

放射性輻射防護手冊

4-1

人民衛生出版社

## 序 言

本手冊討論了放射性物質及其射綫的物理性質的一些基本知識,主要着重在防護問題上。

有些資料(蘇聯採用的游離輻射最高容許限度表、 $\gamma$ 射綫防護計算通用表、平衡錘的 $\gamma$ 射綫防護計算表、完整的放射性元素 $\gamma$ 常數表)是第一次發表的。

有些資料經過了修改,以符合手冊的需要。

一些更為準確的數據,如 $\beta$ 粒子的半價層(И. Кеирим-Маркус, М. Львова),錘 $\gamma$ 射綫的防護以及在柱形射源中 $\gamma$ 射綫的自吸收(Е. Ковалев)均系轉錄自已經發表的文獻,蒙作者們惠予同意,特向他們致謝。

本書並不包括所討論問題的全面內容。特別是書中沒有收入“同位素表”的一些重要物理參數,因為這樣的資料是經常在翻印着的。

本手冊專供廣大範圍的工程師、醫務工作者以及其他從事放  
射性同位素的專業實際工作人員的閱讀。

古魯夫 (Н. Гусев)

# 目 录

I. 原子物理学的基本概念 .....	1
一些定义和常数 .....	1
放射性过程 .....	2
放射量单位 .....	4
$\alpha$ -及 $\beta$ -放射量单位 .....	4
液体及气体中放射性物质浓度单位 .....	5
$\gamma$ 放射量单位 .....	5
强度与物理剂量单位 .....	5
命当量 .....	7
粒子射线 ( $\alpha$ -及 $\beta$ -粒子, 质子, 反冲原子核等) 的物理剂量单位 .....	7
放射性物质的重量 (以克为单位) 与放射量 (以居里为单位) 的关系 .....	8
放射性蜕变 .....	9
放射性元素的一些性质 .....	11
稀有天然放射性元素 .....	11
天然铀的成分 .....	11
具有技术意义的长寿碎片 .....	11
放射系 .....	12
II. 目前国外文献所推荐的体外及体内照射的最高容许 限度 .....	14
体外游离辐射流的最高容许剂量和强度 (每日照射 8 小时, 每週 6 天) .....	14
“标准”人积聚器官的重量和大小 (下面计算最高容许浓度时 采用) .....	14
伦敦放射学会 (1950) 推荐的最高容许浓度表 .....	15
摩尔根及福特氏在水及空气中放射性物质的最高容许浓度表 .....	15
在意外情况下 (如通过针刺、注射或创口污染), 放射性物质进 入体内的单次最高容许量 .....	20
在意外情况下, 放射性物质通过呼吸, 进入机体的单次最高容 许限度 .....	24
III. $\gamma$ 射线及电子加速器轫致辐射 (宽射束) 的防护 .....	30

計算 $\gamma$ 射線防護用的通用表	30
防護計算舉例	32
第 I 類 無屏防護	33
第 II 類 根據物理劑量率的減弱因數求防護層厚度	34
第 III 類 根據劑量的減弱因數計算防護	35
第 IV 類 根據已知的放射量計算防護厚度	36
第 V 類 根據照射時間、距離及寬裕度的關係來計算防護	37
第 VI 類 根據半價層進行近似的防護計算	38
第 VII 類 复合能譜(非單能射源)的防護計算	39
第 VIII 類 根據放射量比度的減弱因數來計算防護	42
第 IX 類 $\gamma$ 射線在防護層中的減弱(考慮“斜”射線)	43
關於方法的準確度討論	45
對不同 $\gamma$ 射線(寬射束)減弱因數 $\kappa$ 所需的鉛板防護厚度表	46
對不同 $\gamma$ 射線(寬射束)減弱因數 $\kappa$ 所需的鉄板防護厚度表	48
對不同 $\gamma$ 射線(寬射束)減弱因數 $\kappa$ 所需的混凝土防護厚度表	50
對不同 $\gamma$ 射線(寬射束)減弱因數 $\kappa$ 所需的水層防護厚度表	52
對“斜”射線效应的修正值 $d_0$	54
鐳、放射性鈾及鈾的 $\gamma$ 射線防護	55
將鐳的 $\gamma$ 射線輻射劑量降低至容許限度(6 小時內 0.05 倫)所需的防護厚度(單位:厘米)	55
對表 21(鐳)的照射時間修正值	56
將 $\text{Co}^{60}$ 的 $\gamma$ 射線輻射劑量降低至容許限度(6 小時內 0.05 倫)所需的防護厚度(以厘米為單位)	57
對表 23(放射性鈾)的照射時間修正值	58
將 $\text{Cs}^{137}$ 的 $\gamma$ 射線輻射劑量降低至容許限度(6 小時內 0.05 倫)所需的防護厚度(以厘米為單位)	59
對表 25( $\text{Cs}^{137}$ )的照射時間修正值	60
電子加速器致射輻射的防護	61
考慮防護屏內多次散射的 Fano 氏因數 $B(h\nu, x, Z)$	63
IV. 窄 $\gamma$ 射線束的眞吸收係數及減弱係數數據表	65
窄 $\gamma$ 射線束在各種基本建築材料中的綫性減弱係數 $\mu$ (厘米 <sup>-1</sup> )	65
窄 $\gamma$ 射線束在金屬中的綫性減弱係數 $\mu$ (厘米 <sup>-1</sup> )	66
窄 $\gamma$ 射線束在輕元素中的質量減弱係數 $\mu/\rho$ (厘米 <sup>2</sup> /克)	68
$\text{Co}^{60}$ $\gamma$ 射線的綫性減弱係數	70
窄射束 $\gamma$ 射線綫性減弱係數達到最小值時的 $\gamma$ 量子能量 $E_{\min}$	70
$\gamma$ 射線的電子變換綫性係數	71

在空气中的 $\gamma$ 射线电子变换系数 $\gamma$ (以厘米 <sup>-1</sup> 为單位).....	71
在水、鋁、鉄、鉛中的 $\gamma$ 射线电子变换系数 $\gamma$ (以厘米 <sup>-1</sup> 为單位).....	71
單个电子的全量子散射 $\sigma_e$ , 根据 Клейн-Нишина-Тамм 公式算出.....	72
从線性減弱系数換算为質量的、原子的及电子的減弱系数时的換算因 数.....	72
<b>V. 在非点狀放射源中的<math>\gamma</math>射线自体吸收</b> .....	73
不同形狀放射源中的 $\gamma$ 射线自体吸收(依 Dixon 氏).....	73
在圓柱形放射源中的 $\gamma$ 射线自体吸收(依 E. Ковалев).....	74
<b>VI. 有关<math>\alpha</math>及<math>\beta</math>粒子的数据</b> .....	75
$\alpha$ 粒子在空气、生物組織及鋁中的射程 $R$ .....	75
$\beta$ 粒子的最大射程 $R_\beta$ .....	76
$\beta$ 粒子在鋁中的半价層 $\Delta\frac{1}{2}$ .....	77
样本中 $\beta$ 射线的自体吸收因数 $P$ .....	77
用鐘罩形計数器測量 $\beta$ 放射量时的几何修正值 $\omega$ .....	78
放射性同位素 $\beta$ 放射源的性质.....	79
<b>VII. 放射性元素<math>\gamma</math>射线</b> .....	81
表的說明.....	81
放射性元素的 $\gamma$ 常数表.....	83
<b>附 录</b>	
附录 1 苏联暫行游离輻射最高容許限度.....	111
附录 2 一些物質的密度.....	116
附录 3 混凝土的化学成份.....	117
附录 4 $e^{-x}$ 及 $e^x$ 值表.....	118
附录 5 書中函数数值表.....	122
参考文献.....	123

# I. 原子物理学的基本概念

## 一些定义和常数

同位素——具有相同原子序数  $Z$ ，但不同質量数  $A$  的一些原子。例如， ${}_{26}\text{Fe}^{56}$ 、 ${}_{26}\text{Fe}^{57}$ 。

同量異位素——具有相同的質量数  $A$ ，但原子序数  $Z$  不相同的一些原子。例如， ${}_{56}\text{Ba}^{140}$ 、 ${}_{57}\text{La}^{140}$ 。

同質異能素——具有相同的原子序数  $Z$  和質量数  $A$  的一些原子，但它們具有不同的放射性質，如：不同的射線种类和能量、半衰期。例如， ${}_{27}\text{Co}^{60}$  的半衰期  $T=5.3$  年，而  ${}_{27}\text{Co}^{60m}$  —  $T=10.7$  分。

表 1 基本粒子

基本粒子的种类	符号	电量	靜止質量①
質子	$p$	+1	1.00758
反質子	$\bar{p}$	-1	1.00758
中子	$n$	0	1.00898
电子	$e^-$	-1	0.0005486
正子	$e^+$	+1	0.0005486
中微子	$\nu$	0	0
光子	$\gamma$	0	0.00107(当 $h\nu = 1.0$ 兆电子伏)②
$\mu$ -介子	$\mu^\pm$ -介子	$\pm 1$	$\approx 207$ 电子質量
$\pi$ -介子	$\pi^\pm$ -介子	$\pm 1$	$\approx 273$ 电子質量
$\tau$ -介子	$\tau^\pm$ -介子	$\pm 1$	$\approx 967$ 电子質量
$\kappa$ -介子	$\kappa^\pm$ -介子	$\pm 1$	$\approx 1000$ 电子質量
超子	$Y^\pm$	$\pm 1$	正或負介子，質量大于質子質量
$\pi^0$ -介子	$\pi^0$ -介子	0	= 263 电子質量
$\theta^0$ -介子	$\theta^0$ -介子	0	= 550 电子質量
$\lambda^0$ -介子	$\lambda^0$ -介子	0	= 2200 电子質量

① 粒子質量以原子質量單位表示。1 原子質量單位 =  $1.6603 \cdot 10^{-24}$  克。

② 譯註：此處不是指靜止質量。

同中子異荷素——中子數  $N=A-Z$  完全相同，但質量數  $A$  不相同的一些原子。例如， $_{15}\text{P}^{30}$  及  $_{16}\text{S}^{31}$ 。

### 基本物理常數

電子電量  $e=4.805 \cdot 10^{-10}$  靜電單位

$e=1.602 \cdot 10^{-20}$  電磁單位

電子質量  $m_e=9.106 \cdot 10^{-28}$  克

質子質量  $m_p=1.6724 \cdot 10^{-24}$  克

中子質量  $m_n=1.6749 \cdot 10^{-24}$  克

氫原子質量  $m_H=1.6734 \cdot 10^{-24}$  克

$\alpha$  粒子質量  $m_\alpha=6.6444 \cdot 10^{-24}$  克

亞佛加德羅數  $N=6.02338 \cdot 10^{23}$

普朗克常數  $h=6.6238 \cdot 10^{-27}$  爾格·秒

真空中光的速度  $C=2.9979 \cdot 10^{10}$  厘米/秒

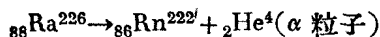
1 電子伏特 1 電子伏特  $=1.60256 \cdot 10^{-12}$  爾格

1 兆電子伏特 1 兆電子伏特  $=1.60256 \cdot 10^{-6}$  爾格

## 放射性過程

放射性——原子核的自發轉換，並隨之引起本身物理及化學性質的改變。根據轉換的型式，放射性過程可以分為五類：

1.  $\alpha$  蛻變 ( $\alpha$ )。高  $Z$  值天然放射性元素(鐳、錒、釷等)的特性； $\alpha$  射線就是高速度飛行的氦核線束。由於  $\alpha$  粒子具有兩個單位的正電量和等於 4 的原子量，因此當它由原子核放出後，新形成原子核的原子序數較前降低了 2 單位，質量數減少了 4 單位。例如：

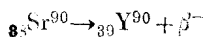


一定放射性原子核所放出的  $\alpha$  粒子照例具有一定的能量，其值決定於元素的種類<sup>①</sup>。因此  $\alpha$  粒子的平均能量也就是它的最大能量。

2. 電子  $\beta$  蛻變 ( $\beta^-$ )。天然和人工放射性同位素都能放射； $\beta$

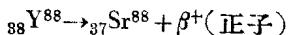
<sup>①</sup> 這里不考慮長射程及短射程的  $\alpha$  粒子，因為在發射的粒子數目中它們只佔極小的一部分。

粒子流就是高速飞行的电子。 $\beta$  粒子飞出原子核以后，新形成原子的原子序数增加一个单位，但原子量实际上却没有变化，因为“静止”电子的质量比氢原子的质量几乎少 2000 倍。例如：



跟每一个  $\beta$  粒子一起飞出的还有一个不带电的粒子，叫中微子 ( $\nu$ )，它的质量非常微小。一定的放射性元素的每个核子所放出的每个  $\beta$  粒子和中微子  $\nu$  可以具有各种不等的能量，但  $\beta$  粒子与中微子的能量总和却永远等于某一定的最高能量值，这值决定于放射性元素的种类。因此  $\beta$  粒子的能谱是连续的。 $\beta$  能谱的平均能量  $\overline{E}_{\beta}$  约等于最大能量值的  $\frac{1}{3}$ ，即  $\overline{E}_{\beta} = \frac{1}{3} E_{\beta}$ ，式中  $E_{\beta}$  表示  $\beta$  粒子的最大能量值，此值决定于放射性元素的种类。

3. 正子  $\beta$  蜕变 ( $\beta^{+}$ )。在某些人工放射性同位素中可以观察到。正子与电子的差别仅在于它带有正号的电量。正子飞出原子核后，新形成原子核的原子序数降低了一个单位，但原子量实际上没有改变。例如：



正子的生命是短促的。它在物质中速度降低后就和某一个电子结合，结果变成两个能量各为 0.511 兆电子伏的光子 ( $\gamma$  量子)。这一过程称为湮没作用，放出的辐射叫湮没辐射。与  $\gamma$  辐射不同，它们是在原子核以外产生的。每一个正子的放出也伴随着中微子的放出；因此  $\beta^{+}$  能量谱也是连续的。

4. 电子俘获 ( $K$ -俘获)。在某些情况下 (当原子核的能量不大时)，原子核可以把原子周围的电子俘获。通常这些被原子核俘获的电子都是从最内层即所谓  $K$  层出来的，因此把这种放射性过程叫做  $K$  俘获。在这一过程中，和正子蜕变一样，新放射性元素的原子序数降低了 1 单位，但原子量实际上依然不变。空出来的电子级 (在原子的  $K$  或  $L$  层) 很快被来自其他更外层的电子所填满。随着这种变迁放出了所谓标识 X 射线。

5. 同素异能跃迁就是原子核由它的介稳态过渡到基态。所谓介稳态就是指原子核处于一种受激状态，原子核停留在这种状态的时间至少比它处于简单的受激状态长 1000 倍。原子核的这



种延長停留在介穩态的原因，是由于在基态和受激态中动量矩数值有显著差别的緣故。

因此，当原子由受激态轉到基态的机率極低时，这种受激态就是介穩性的。同素異能轉变的半衰期值由  $10^{-9}$ — $10^{-8}$  秒至几个月不等。

原子核的介穩态系在核轉变后出現，引起核轉变的原因是慢中子俘获、光中子过程、帶电粒子对核的冲击等等。原子核由介穩态进入基态时总是發生  $\gamma$  輻射。在个别情况下，除了  $\gamma$  輻射外，同时还有正和負  $\beta$  粒子 ( $\beta^+$  或  $\beta^-$ ) 的放出，还有电子轉換 ( $e^-$ )。

同素異能轉变的例子： $\text{In}^{113}$ ， $T=105$  分，發出能量  $h\nu=0.39$  兆电子伏特的  $\gamma$  射線和电子轉換 ( $e^-$ )。

## 放射量單位<sup>①</sup>

### $\alpha$ -及 $\beta$ -放射量單位

居里——每秒發生  $3.700 \times 10^{10}$  蛻变的放射性物質的放射量。

符号。居里— $c$ ；毫居里— $mc$ ，微居里— $\mu c$ ；<sup>②</sup>

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

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

盧瑟福——每秒發生  $10^6$  蛻变的放射性物質的放射量(此單位在苏联未正式采用)。

符号、盧瑟福— $rd$ ，毫盧瑟福— $mrd$ ，微盧瑟福— $\mu rd$ ：

$$1 \text{ 盧瑟福} = 10^3 \text{ 毫盧瑟福} = 10^6 \text{ 微盧瑟福}$$

$$1 \text{ 微盧瑟福} = 10^{-3} \text{ 毫盧瑟福} = 10^{-6} \text{ 盧瑟福}$$

$$1 \text{ 微盧瑟福} = 1 \cdot \text{蛻变/秒}$$

居里和盧瑟福二單位一般用于表征放射性物質的  $\alpha$ -和  $\beta$ -放射量。

① 譯註：放射量(Радиоактивность)亦譯为放射性。

② 譯註：原書符号采用俄文，此处改譯拉丁符号。

## 液体及气体中放射性物質濃度單位

$$1 \text{ 居里/升} = 2.2 \times 10^{12} \text{ 蜕变/分} \cdot \text{升}$$

$$1 \text{ 爱曼(эман)} = 10^{-10} \text{ 居里/升} = 220 \text{ 蜕变/分} \cdot \text{升}$$

$$1 \text{ 馬哈(махе)} = 3.64 \times 10^{-10} \text{ 居里/升} = 780 \text{ 蜕变/分} \cdot \text{升}$$

鈾、鈾和鐳的容积濃度通常以克/升表示

## $\gamma$ 放射量單位

**毫克鐳当量**——任何放射性制剂的  $\gamma$  辐射，在空气等效电离室中所产生的电离强度与苏联国家鐳标准 1 毫克鐳在完全相同的情况下所产生的电离一样时，这制剂的放射量为 1 毫克鐳当量。

1 毫克鐳当量的点源，当它与蜕变产物达到平衡时，通过 0.5 毫米鉛板的初濾后，在距离 1 厘米处空气中的剂量率为 8.4 倫/小时<sup>①</sup>。

因此，任何放射性物質，若它的点源在 1 厘米距离处所建立的物理剂量率为 8.4 倫/小时，則它的  $\gamma$  放射量相当于 1 毫克鐳当量。各种采用居里單位来表示射源的  $\gamma$  放射量的方法会带来混乱，应该避免采用。

**倫-时-米(倫/时·米)**——放射源在距离 1 米处的物理剂量率为 1 倫/时时，它的  $\gamma$  放射量为 1 倫/时·米。 $\gamma$  放射量为 1.2 克鐳当量的放射源，它的剂量率等于 1 倫/时·米（倫/时·米的單位在苏联未被正式采用）。

## 强度与物理剂量單位

$\gamma$  射線的强度 I 决定于在單位時間內通过垂直于  $\gamma$  射線方向的單位面积的輻射能量。

$$\text{强度} = \frac{\gamma \text{ 量子数} \times \gamma \text{ 量子能量}}{\text{厘米}^2 \cdot \text{秒}}$$

$$= \text{兆电子伏特/厘米}^2 \cdot \text{秒} = \text{尔格/厘米}^2 \cdot \text{秒} = \text{瓦/厘米}^2$$

$\gamma$  射線量是指在全部照射時間內的积分强度。 $\gamma$  射線量以

① 剂量單位倫的定义見下文。

尔格/厘米<sup>2</sup> 为單位。

X 射線或  $\gamma$  射線采用侖为剂量單位。侖就是在 0.001293 克的空气中产生的正或負离子总电量为 1 静电單位时的剂量。

註：0.001293 克就是 1 厘米<sup>3</sup> 干燥大气空气在 0°C 及 760 毫米水銀柱时的質量。

符号：侖— $r$ 、毫侖— $mr$ 、微侖— $\mu r$

$$1 \text{ 侖} = 10^3 \text{ 毫侖} = 10^6 \text{ 微侖}$$

$$1 \text{ 微侖} = 10^{-3} \text{ 毫侖} = 10^{-6} \text{ 侖}$$

單位時間內的剂量，称为物理剂量率  $P$ ：

$$P = \frac{D}{t}$$

各种剂量率單位間的关系：

$$1 \text{ 侖/时} = 10^3 \text{ 毫侖/时} = 10^3 \text{ 微侖/时}$$

$$1 \text{ 侖/时} = 16.7 \text{ 毫侖/分} = 16700 \text{ 微侖/分}$$

$$1 \text{ 侖/时} = 0.28 \text{ 毫侖/秒} = 280 \text{ 微侖/秒}$$

$$1 \text{ 微侖/秒} = 60 \text{ 微侖/分} = 3600 \text{ 微侖/时}$$

$$1 \text{ 微侖/秒} = 0.06 \text{ 毫侖/分} = 3.6 \text{ 毫侖/时}$$

$$1 \text{ 微侖/秒} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ 侖/分} = 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ 侖/时}$$

以侖/秒为單位的剂量率  $P$  和以尔格/厘米<sup>2</sup>·秒为單位的强度  $I$  之間有如下关系：

$$P = \frac{I \cdot \gamma}{0.11} \text{ 侖/秒} = N \cdot h\nu \cdot \frac{1.6 \cdot 10^{-3} \cdot \gamma}{0.11} \text{ 侖/秒}$$

式中  $N$ —在 1 秒內通过面积 1 厘米<sup>2</sup> 的  $\gamma$  量子数目； $h\nu$ —以兆电子伏特为單位的  $\gamma$  量子能量； $1.6 \times 10^{-6}$ —相当于 1 兆电子伏特的尔格数；0.11—在空气中的侖能量当量； $\gamma$ —在空气中电子变换的線性系数，即在通过 1 厘米厚度空气層时， $\gamma$  射線总强度中轉变为次級电子的分数。这一量有时也称为真吸收系数。

物理剂量率  $P$  (微侖/秒) 与点狀制剂的  $\gamma$  放射量  $m$  (以毫克镭当量为單位) 之間的关系：

$$P = \frac{m \cdot 8.4 \cdot 10^6}{R^2 \cdot 3600} = 2300 \frac{m}{R^2} \text{ 微侖/秒}$$

式中  $R$ —离射源的距离, 以厘米为單位。若  $R$  以米为單位, 而  $m$  以毫克錳当量为單位, 則:

$$P = 0.23 \frac{m}{R^2} \text{ 微倫/秒}$$

若  $R$  以米为單位,  $m$  以克錳当量为單位, 則:

$$P = 230 \frac{m}{R^2} \text{ 微倫/秒}$$

以毫居里表示的放射量  $M$  与剂量率  $P$  的关系:

$$P = \frac{M \cdot K_\gamma \cdot 10^6}{R^2 \cdot 3600} = 280 \frac{MK_\gamma}{R^2} \text{ 微倫/秒}$$

式中  $K_\gamma$  叫  $\gamma$  常数, 它表示放射量为 1 微居里的放射性同位素点源在距离为 1 厘米处 1 小时内所給出的  $\gamma$  射線剂量率。  $K_\gamma$  以 倫/时·微居里·厘米为單位。各种放射  $\gamma$  射線的同位素的  $K_\gamma$  值見表 46。

## 当 量

在 1 厘米<sup>3</sup> 空气內, 1 倫 =  $2.083 \cdot 10^9$  离子对 = 0.11 尔格 =  $6.8 \cdot 10^4$  兆电子伏特。

在 1 克空气內, 1 倫 =  $1.61 \cdot 10^{12}$  离子对 = 84 尔格 =  $5.3 \cdot 10^7$  兆电子伏特。

## 粒子射線( $\alpha$ -及 $\beta$ -粒子、質子、反冲原子核等)的物理剂量單位

**物理当量倫 (rep)**——任何游离輻射当它被 1 克物質吸收的能量等于 1 倫 X 射線(或  $\gamma$  射線)在 1 克空气中产生游离所損失的能量时, 它的剂量为 1 物理当量倫。

1 物理当量倫 = 84 尔格/克 =  $1.61 \cdot 10^{12}$  离子对/克 =  $5.3 \cdot 10^7$  兆电子伏特/克

物理当量倫也可以用来表示 X 射線或  $\gamma$  射線的剂量, 这时候

以侖为單位的物理劑量在数值上等于以物理当量侖为單位的劑量。

在照射生物組織时，物理劑量为 1 侖的  $\gamma$  射線在每克組織中被吸收的射線能量約为 93 尔格。

在哥本哈根举行的第七届国际放射学会議(1953)建議采取新的能量吸收單位 rad 来代替物理当量侖。

1 rad 單位等于任何游离射線在 1 克任何物質中被吸收的能量为 100 尔格：

1 物理当量侖 = 0.84 rad; 1 rad = 1.19 物理当量侖。

**生物当量侖 (rem)**——組織所吸收的能量，其生物效应相当于 1 侖 X 射線或  $\gamma$  射線所产生者，称为 1 生物当量侖，用符号 rem 表示。

表 2 列出不同射線的物理当量侖与生物当量侖的关系。

表 2 各种射線的生物效率

射 線 种 类	1 物理当量侖相应于	1 生物当量侖相应于
$\beta$ 粒子及 $\gamma$ 射線	1 生物当量侖	1 物理当量侖
$\alpha$ 粒子及質子	10 生物当量侖	0.1 物理当量侖
热中子	5 生物当量侖	0.2 物理当量侖
快中子 (<40兆电子伏特)	10 生物当量侖	0.1 物理当量侖

### 放射性物質的重量(以克为單位)与 放射量(以居里为單位)的关系

放射量等于 1 居里的放射性元素其重量为(單位: 克):

$$Q = 8.9 \cdot 10^{-14} AT (T \text{ 以秒为單位}),$$

$$Q = 5.3 \cdot 10^{-14} AT (T \text{ 以分为單位}),$$

$$Q = 3.2 \cdot 10^{-10} AT (T \text{ 以时为單位}),$$

$$Q = 7.7 \cdot 10^{-9} AT (T \text{ 以天为單位}),$$

$$Q = 2.8 \cdot 10^{-6} AT (T \text{ 以年为單位}).$$

式中的  $A$  是原子量,  $T$  是半衰期,  $Q$  是除去非放射性载体后的重量, 以克为單位。

[例題]: 計算 1 居里  $P^{32}$  的重量 ( $A=32, T=14.3$  日):

$Q = 7.7 \cdot 10^{-9} \cdot 32 \cdot 14.3 = 3.52 \cdot 10^{-6}$  克  $= 3.52 \cdot 10^{-3}$  毫克  $= 3.52$  微克

任何放射性物質 1 克的放射量  $C$  (以居里为單位):

$$C = \frac{1.13 \cdot 10^{13}}{AT} (T \text{ 以秒为單位}),$$

$$C = \frac{1.88 \cdot 10^{11}}{AT} (T \text{ 以分为單位}),$$

$$C = \frac{3.10 \cdot 10^9}{AT} (T \text{ 以时为單位}),$$

$$C = \frac{1.30 \cdot 10^8}{AT} (T \text{ 以天为單位}),$$

$$C = \frac{3.57 \cdot 10^5}{AT} (T \text{ 以年为單位}).$$

[例題]: 求 1 克  $P^{32}$  的放射量 ( $A=32, T=14.3$  天):

$$C = \frac{1.30 \cdot 10^8}{32 \cdot 14.3} = 2.85 \cdot 10^5 \text{ 居里/克}$$

## 放射性蛻变

放射性物質的放射量变化由下式決定:

$$C_t = C_0 e^{-\frac{0.693 \cdot t}{T}} = C_0 e^{-\lambda t}$$

式中  $T$ —半衰期, 即放射性原子衰变一半所經的时间:

$$T = 0.693 \tau \text{ 或 } \tau = \frac{T}{0.693},$$

$\tau$  是放射性原子的平均寿命:

$$\lambda = \frac{0.693}{T} = \frac{1}{\tau}$$

$\lambda$  是蛻变常数, 表征着在單位時間內的一个原子的

蜕变机率;  $C_0$  是开始时刻的放射量;  $C_t$  是经过时间  $t$  后的放射量。

放射量的相对变化  $C_t/C_0$  决定于关系式:

$$\frac{C_t}{C_0} = e^{-\frac{0.693 t}{T}} = e^{-\lambda t}$$

若已知某一时刻  $t$  的放射量  $C_t$ , 则在时间  $t$  前的开始放射量  $C_0$  可以用下法求出:

$$C_0 = C_t e^{\lambda t} = C_t e^{\frac{0.693 t}{T}}$$

若母元素的放射量为  $C_1$ , 则时间  $t$  后子元素放射量  $C_2$  的增长按下列规律进行:

$$C_2 = C_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

式中符号 1 及 2 分别指母元素及子元素。

在所有上述公式中,  $T$ 、 $t$  及  $\lambda$  的数值都应采用相同的时间单位。

表 3

放射量随时间减弱比率  $C_t/C_0 = e^{-\frac{0.693 t}{T}}$  及时间  $t$  后放射量的蜕变系数  $K$ :

$$K = \frac{C_0}{C_t} = e^{\frac{0.693 \cdot t}{T}}, \quad T - \text{半衰期。}$$

$\frac{t}{T}$	$e^{-\frac{0.693 \cdot t}{T}}$	$e^{\frac{0.693 \cdot t}{T}}$	$\frac{t}{T}$	$e^{-\frac{0.693 \cdot t}{T}}$	$e^{\frac{0.693 \cdot t}{T}}$
0.00	1.00	1.00	1.25	0.42	2.36
0.02	0.98	1.02	1.50	0.35	2.82
0.04	0.97	1.03	1.75	0.30	3.35
0.06	0.96	1.04	2.0	0.25	4.00
0.08	0.95	1.06	2.5	0.18	5.64
0.1	0.93	1.07	3.0	0.125	8.00
0.2	0.87	1.15	3.5	0.088	11.36
0.3	0.81	1.23	4.0	0.062	16.0
0.4	0.76	1.32	4.5	0.056	22.65
0.5	0.71	1.41	5	0.031	32
0.6	0.66	1.52	6	0.016	64
0.7	0.62	1.62	7	0.0078	128
0.8	0.57	1.73	8	0.0039	256
0.9	0.54	1.86	9	0.0020	512
1.0	0.50	2.00	10	0.0010	1024

## 放射性元素的一些性質

表 4 稀有天然放射性元素

元素	化学符号	T	在自然界中的分佈%	輻射种类	射線能量, 兆电子伏特	1毫克居里的γ-放射量, 毫克镭当量
鉀	$^{19}\text{K}^{40}$	$1.31 \cdot 10^9 \text{ лет}$	0.0119	$\beta^-$ (88%) K (12%)	$\beta^-$ 1.32 $\gamma$ 1.46	0.1
鉀 釷	$^{87}\text{Rb}^{87}$	$6.15 \cdot 10^{10} \text{ лет}$	27.85	$\gamma, \beta$	$\beta^-$ 0.275	無
	$^{82}\text{Sm}^{147}$	$6.7 \cdot 10^{11} \text{ лет}$	5.07	$\alpha$	$\alpha$ 2.1	無 $\gamma$
鐳	$^{71}\text{Lu}^{176}$	$2.4 \cdot 10^{10} \text{ лет}$	2.60	$\beta, \gamma$	$\beta^-$ 0.22; 0.40 $\gamma$ 0.18; 0.27	0.39
銻	$^{75}\text{Re}^{187}$	$4 \cdot 10^{12} \text{ лет}$	62.93	$\beta^-$	$\beta^-$ 0.04	無 $\gamma$

表 5 天然鈾的成份

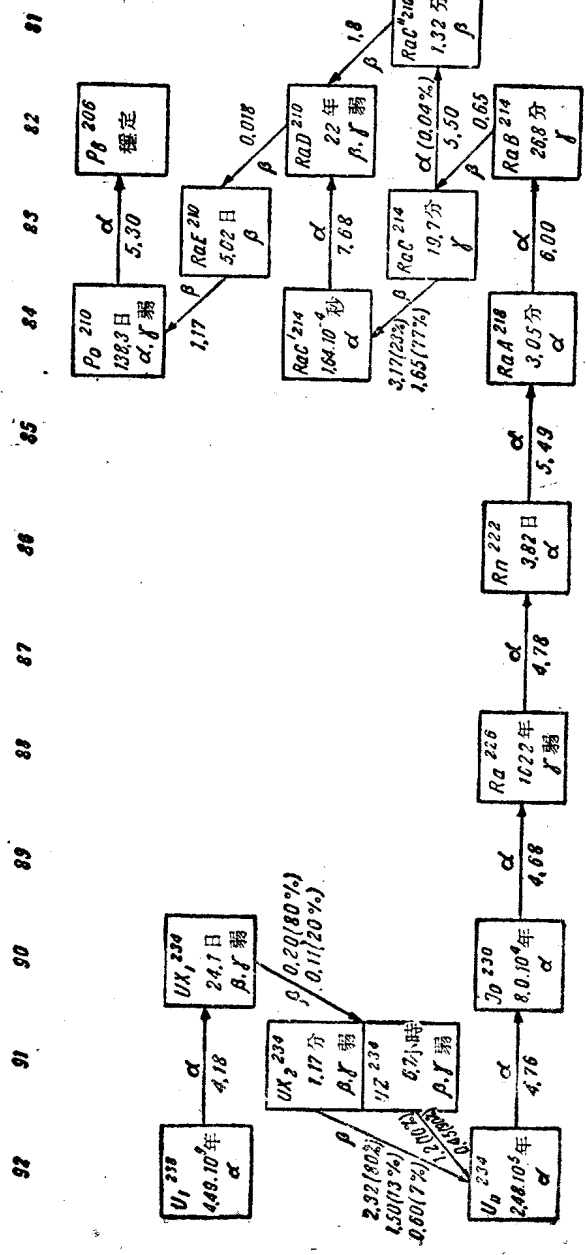
同位素	重量百分比%	T, 年	$\alpha$ 放射量%	$\alpha$ 粒子能量 兆电子伏特
$\text{U}^{238}$	99.28	$4.5 \cdot 10^9$	48.9	4.1
$\text{U}^{235}$	0.714	$7.1 \cdot 10^8$	2.2	4.4
$\text{U}^{234}$	0.00548	$2.48 \cdot 10^4$	48.9	4.8

表 6 具有技术意义的長壽碎片 [1]

碎 片	半衰期	产量	碎 片	半衰期	产量
A. 气体及揮發物			c, $\beta, \gamma$ 射源		
$\text{Kr}^{85} + \text{Rb}^{85m}$	9.4年	0.24	$\text{Zr}^{95} \rightarrow \text{Nb}^{95}$	65 天	6.4
$\text{Ru}^{103} \rightarrow \text{Rh}^{103m}$	39.8天	3.7	$\text{Ru}^{103} \rightarrow \text{Rh}^{103m}$	39.8天	3.7
$\text{Ru}^{108} \rightarrow \text{Rh}^{108}$	1 年	0.48	$\text{Ru}^{108} \rightarrow \text{Rh}^{108}$	1 年	0.48
$\text{I}^{131} (+ \text{Xe}^{131m_2} + \text{Xe}^{131m_1})$	8.1天	2.8	$\text{Sb}^{125}$	2.7年	0.023
$\text{Xe}^{133}$	5.27天	6.29	$\text{Te}^{129m} + \text{Te}^{129}$	33.5天	0.19
B. $\beta$ 射源			$\text{Cs}^{137}$	33 年	6
$\text{Sr}^{89}$	54 天	4.6	$\text{Ba}^{140} \rightarrow \text{La}^{140}$	12.8天	6.1
$\text{Sr}^{90} \rightarrow \text{Y}^{90}$	19.9年	5	$\text{Ce}^{141}$	33.1天	5.7
$\text{Y}^{91}$	61 天	5.9	$\text{Ce}^{143} \rightarrow \text{Pr}^{144}$	282 天	5.3
$\text{Te}^{127m} + \text{Te}^{127}$	115天	0.033	$\text{Nd}^{147}$	11.3天	2.6
$\text{Pr}^{143}$	13.7天	5.4	$\text{Eu}^{155}$	1.7年	0.031
$\text{Pm}^{147}$	2.6年	2.6	$\text{Eu}^{156}$	15.4天	0.016
$\text{Eu}^{155}$	1.7年	0.03			



表 7 放射系



82 81  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92