

# 1. 基本数据和定义

为了更易于对同位素工业应用中所用的方法有一个概要的了解,本章将简要回顾基本的概念、术语和符号,归纳一些最重要放射性同位素(核素)的主要性质,并提及放射性制剂的一般性质及其在使用中出现的问题。

## 1.1 符 号

放射性同位素的应用在不同领域(如核物理和核化学)迅速而相当孤立的发展,产生了一致甚至矛盾和不正确的术语和符号。这种情况目前因引入SI(国际单位制)单位而变得更加混乱(至少是暂时如此)。

在本书中SI单位和“传统”单位之间的换算因子在附录中列出,正文中物理量以SI表示,也常常以惯用单位表示(在括号中)。

与同位素工业应用有关的各种术语要用将近100个符号表示,然而遗憾的是应该提到,这些缩写词在不同领域中的解释存在很大的差异。

根据编者和著者都可接受的办法,本书避免使用黑(正)体字母,即在本节中集中列出使用最广泛的符号,它们在全书中具有相同的解释,但是如果需要对正文有一清晰的理解,就在必要的地方标明它们的单位,为了引起读者注意,这些符号用黑斜体表示。

下面未列出的物理量的量纲或单位将在正文适当的地方给出,这些物理量的符号用白斜体表示;为避免繁复的符号,有时要用角标。

这意味着用黑斜体或白斜体表示的相同的字母,可以具有不同的含义。在本书的使用中始终应当注意这一点。\*

*A* 活度, Bq(Ci)

*A* 质量数

*a* 比活度, Bq/kg(Ci/g)

*c* 浓度, mol/m<sup>3</sup>, mg/cm<sup>3</sup>

*D* 剂量(至于单位,在索引或正文中提到), Gy(rd)

*E* 辐射能(下标例如*E<sub>r</sub>*,指辐射类型), MeV

*h* 高度, m(cm)

*I* 剂量率, Gy/s, A/kg(rd/s, R/s)

*I<sub>rel</sub>* 相对剂量率, 相对活度, 相对计数率, 1/s(cps=每秒计数)

*K* 剂量率常数\*\* (如果使用下标,下标指辐射类型), aAm<sup>2</sup>/kgBq(Rm<sup>2</sup>/hCi)

*l* 长度, 距离, m(cm)

*m* 质量, kg(g)

*n* 计数

\* 这两种不同的表示译文中不予区分,均用白斜体表示。——译者注

\*\* 现称照射量率常数,下文中出现的剂量常数也应为照射量率常数。——译者注

$R$	几何半径, $m(\text{cm})$
$t$	时间, $s(\text{h})$
$t_{1/2}$	半衰期, $s(\text{h})$
$U$	电位, $V$
$V$	容积, $m^3(\text{ml})$
$v$	速率, $m/s$
$Z$	原子序数
$\lambda$	衰变常数, $1/s$
$\mu$	线吸收系数, $1/m(1/\text{cm})$
$\mu_m$	质量吸收系数, $m^2/\text{kg}(\text{cm}^2/\text{g})$
$\rho$	密度, $\text{kg}/m^3(\text{g}/\text{cm}^3)$
$\sigma$	标准偏差
$\phi$	通量密度(下标指辐射类型), $1/n \cdot s(1/\text{cm}^2 \cdot s)$

## 1.2 同位素技术中所用的基本定义

在以后章节中遇到的许多定义和表达式, 或者因为它们被看作是众所周知的, 或者因为不列它们可以使文章更为明晰, 而不单独加以表述。最常用的术语和它们的定义按英文名称字母顺序列举如下。

### 吸收剂量

放射性辐射在介质中衰减时赋予介质的能量。单位质量或体积被辐照介质所吸收的平均能量称为吸收剂量, 以戈瑞(gray)为单位表示,  $1 \text{ 戈瑞} = 1\text{Gy} = 1\text{J}/\text{kg}$ 。早先使用的单位是拉德(rad), 为了与平面角的单位区分开, 拉德的常用缩写词为rd,  $1\text{rd} = 0.01\text{Gy}$ 。

### 吸收剂量率

单位时间的吸收剂量为吸收剂量率, 正确的单位为Gy/s。

### 累积因子

参见积累因子。

### 活度

放射性衰变是一种不受外界影响并导致初始不稳定核形成新核的自发过程。衰变速率用活度表征。

活度的单位是贝可勒尔(Bq)。如果在放射源中1秒钟发生1次核衰变, 则该源的活度为1Bq, 即  $1\text{Bq} = 11/s$ 。

活度的传统单位是居里, 其定义为每秒钟的转变数(tps)或衰变数(dps)为  $3.7 \times 10^{10}$  的放射性核素的量。这个单位有一历史背景, 它相当于与放射性子体处于长期平衡的1g镭的活度。

这个单位缩写为Ci, 它以及它的分数和倍数还在使用。它们与Bq及Bq的倍数的关系如下:

$$1\text{MCi} = 10^6\text{Ci} = 3.7 \times 10^{16}\text{Bq} = 37\text{PBq}$$

$$1\text{kCi} = 10^3\text{Ci} = 3.7 \times 10^{13}\text{Bq} = 37\text{TBq}$$

$$1\text{mCi} = 10^{-3}\text{Ci} = 3.7 \times 10^7\text{Bq} = 37\text{MBq}$$

$$1\mu\text{Ci} = 10^{-6}\text{Ci} = 3.7 \times 10^4\text{Bq} = 37\text{kBq}$$

$$1\text{nCi} = 10^{-9}\text{Ci} = 3.7 \times 10^1\text{Bq} = 37\text{Bq}$$

$$1\text{pCi} = 10^{-12}\text{Ci} = 3.7 \times 10^{-11}\text{Bq} = 37\text{mBq}$$

活度还常常用每分衰变数(dpm)表示,即 $1\text{Ci} = 2.22 \times 10^{12}\text{dpm}$ 。测量的效率系数定为 $\eta$ ,则每分钟计数(cpm)与以Ci表示的活度之间的关系可以下式表示: $1\text{Ci} = 2.22 \times 10^{12} \times 1/\eta \text{cpm}$ 。

#### $\alpha$ 辐射

$\alpha$ 辐射是原子核发射 $\alpha$ 粒子的衰变形式。 $\alpha$ 粒子具有2个单位正电荷、4个单位原子质量,因此它相当于氦原子核。这种微粒的辐射具有不连续的能量。原子核发射的 $\alpha$ 粒子的初始能量范围为3~8MeV。

#### 湮没辐射

原子核以正电子衰变而发射的带正电荷粒子与核外带负电荷的电子相互作用,这种相反电荷的相互作用产生两个分别具有0.511MeV能量的光子。这样产生的电磁辐射称为湮没辐射。

#### 原子质量

元素的原子质量是核内质子数和中子数的总和。因为大多数元素的原子由几种核素组成,所以元素的原子质量是这些同位素核素质量根据它们的天然丰度加权的平均值。

#### 原子序数

给定元素的原子序数等于原子核的质子数,它指示了该元素在元素周期表中的位置。

#### $\beta$ 辐射

与原子核发射高能电子( $\beta$ 辐射)或正电子( $\beta^+$ 辐射)有关的核转变称为 $\beta$ 辐射。电子的发射伴有不带电的反中微子的发射,而正电子的发射伴有中性中微子的发射。作为后一过程的次级过程,伴随发射湮没辐射。

在这两种类型微粒辐射的情况下,都观察到了连续能谱,这是由不稳定性产生的剩余能量分别在 $\beta$ 粒子和中微子或反中微子之间的统计分布产生的。

#### 韧致辐射(X射线)

当放射性核素发射的 $\beta$ 或 $\beta^+$ 粒子在吸收体原子的力场中减速时,产生具有连续能谱的电磁辐射,这就称韧致辐射。韧致辐射的强度和最大能量取决于引起这一过程的初始动能以及吸收体的原子序数和密度。

除了 $\beta$ 粒子外,电子俘获以后产生的电荷的变化也能导致韧致辐射。

#### 积累因子

在测量厚吸收体中 $\gamma$ 辐射的吸收时,观察到强度的减弱小于由指数衰减律计算得到的值。这是在吸收靶体中发生的散射效应引起的,在计算中可以用积累因子来修正。

#### 无载体同位素

如果除了给定元素的一种放射性同位素以外,放射性产品不含有该元素的任何其它放射性和非放射性同位素,则这种放射性产品就称为无载体(c.f)同位素。因为“无载体”这个术语只能大致反映实际情况,所以特别仔细地把载体从其中除去的制剂通常也认为是无载体的。

#### 康普顿效应

$\gamma$ 光子在电磁场中的散射引起这些量子频率降低,这种现象就称为康普顿效应。

#### 转换电子辐射

由原子核的同质异能素发射的电磁辐射 $\gamma$ 光子,能从围绕该核的电子层打出一个电子,并用一定量能量使它离开该原子的力场,由这种发射造成的电子空缺,引起产物核素发射特

征X射线。

### 微粒辐射

放射性核通过发射微粒（即非电磁辐射）而变成稳定核的一类核辐射称为微粒辐射。

#### 计数率

在活度的实际测量中常常只需要知道相对值。相对活度大多用所谓的计数率来表示，计数率以每单位时间计数（脉冲/s, 脉冲/min, cps, cpm, 等等）表示。为了计算绝对活度，必须考虑各种校正因子（指的是吸收，反散射，几何位置，探测器的分辨率，等等）。

#### 截面

核过程的几率通常用截面来表征，实质上这是微粒或电磁辐射与介质之间相互作用的一种量度。因为相互作用的大小可以定量地用垂直于辐射方向的面积表示，所以截面具有面积的量纲，它的常用单位是 $10^{-28}m^2 = 10^{-24}cm^2 = 1b$ （靶恩），此值与原子核的实际平均截面积可比。有人建议以后截面用 $m^2$ 为单位表示。

按照一般概念可以用类似的方法定义散射截面，吸收截面，活化截面和裂变截面等。

#### 死时间

探测器和计数系统记录到的脉冲数总是小于进入探测器的粒子或光子数，其原因是由于存在死时间，密集的事件难以被探测器或计数仪器分辨。这可能在活度的精确测量中引起误差，尤其在高计数率的情况下。

#### 衰变常数

单位时间内衰变的放射性原子核的分数可以用衰变常数来表示。衰变常数和物理半衰期的关系式如下：

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{t_{1/2}}$$

#### 剂量

参见照射量，剂量当量，吸收剂量。

#### 剂量常数

单位活度的放射源在单位距离处产生的剂量率（剂量强度）称为剂量常数。按照辐射类型可以把它分为 $\alpha, \beta, \gamma$ 和中子剂量常数，分别以 $K_\alpha, K_\beta, K_\gamma$ 和 $K_n$ 代表。从实用观点看， $K_\gamma$ 是最重要的，用更确切的术语，它被称为比照射量率，SI单位为 $aAm^2/kgBq$ ，可以换算成更实用的单位，即 $\mu Gy \cdot m^2 / GBq \cdot h$ 。换算关系： $1 aAm^2/kgBq = 121.27 \mu Gy \cdot m^2 / GBq \cdot h$ 。较早使用的单位是 $Rm^2/hCi$ ，可以用下式进行换算，

$$1 Rm^2/hCi = 1.937 aAm^2/kgBq$$

使用剂量常数 $K_\gamma$ 的主要优点在于以 $A/kg$ 为单位的照射量率( $I$ )可以用下式计算，

$$I_\gamma = \frac{10^{-18} K_\gamma A}{l^2} \text{ A/kg}$$

式中 $A$ 为点源的活度，以 $Bq$ 为单位； $l$ 为到源的距离，以 $m$ 为单位。

#### 有效半衰期

进入人体的放射性物质的减少速率服从指数规律。进入体内放射性物质的一半排出机体所需要的时间称为生物半衰期( $t_{1/2, \text{生物}}$ )。同时，活度也在不断减小，可以用放射性衰变定律（物理半衰期）来描述。观察到的半衰期对应于综合效应，称为有效半衰期( $t_{1/2, \text{有效}}$ )。下列关系式对上面提到的物理量是适用的：

$$t_{1/2, \text{有效}} = \frac{t_{1/2} t_{1/2, \text{生物}}}{t_{1/2} + t_{1/2, \text{生物}}}$$

### 电磁辐射

由量子组成(具有不连续能量),不带电荷,波长相当短(nm量级)的辐射称为电磁辐射。实际上把X射线和 $\gamma$ 辐射一起称为电磁辐射。X射线来源于电子壳层,而 $\gamma$ 辐射发射于原子核。

### 电子

原子核被带负电的粒子,电子,围绕着,电子的质量为 $9.108 \times 10^{-28} \text{g}$ 。 $\beta^-$ 辐射也由高能电子组成,但它们是在原子核的中子衰变过程中与副产物质子和反中微子一起产生的。

### 电子俘获

一种特殊类型的放射性衰变是原子核从最靠近它的壳层(K层)俘获一个电子。这一过程导致原子核中一个质子转换为中子。该放能过程释放的能量一部分用于原子核的激发,一部分用于中微子发射。电子俘获伴有特征X射线发射,X射线是由具有多余能量的变换后的原子核发射的。

### 电子伏

核衰变产生的粒子和光子的能量可以对应于一个电子通过电位为1V的电场所获得的能量。在核物理领域之外,是直接以J(焦耳)为单位表示能量的。 $1 \text{电子伏} = 1 \text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{J} = 0.1602 \text{aJ}$ ,  $1 \text{J} = 6.242 \text{EeV}$ 。

实用中主要应用电子伏的倍数单位,例如 $10^3 \text{eV} = 1 \text{keV}$ ,  $10^6 \text{eV} = 1 \text{MeV}$ 。

### 剂量当量

吸收剂量在保健物理实践中几乎被剂量当量的概念代替了。剂量当量考虑到了辐射类型、相对生物效应(RBE)和其它因子(例如所谓的品质因数Q)。这可用对人体机体具有与X射线相同的生物效应的剂量来表征。

剂量当量的新单位是希沃特(Sv),  $1 \text{Sv} = 1 \text{J/kg}$ 。

早先使用的单位是“拉德当量人”或雷姆(rem),  $1 \text{Sv} = 100 \text{rem}$ ,  $1 \text{rem} = 0.01 \text{Sv}$ 。

### 当量厚度

参见表面质量。

### 受照剂量

不能直接引起电离的放射性辐射,能够由于给与辐照介质剂量而产生带电粒子。该剂量(也称比释动能)的单位与吸收剂量单位一样,为J/kg。

### 照射量

电磁辐射引起空气电离。这种相互作用的大小用以库仑每千克为单位的照射量(或早先使用的“照射剂量”)表示。如果电离辐射在1kg空气中产生1库仑任一种符号的电荷,那么该恒定强度的电离辐射具有一单位照射量。

照射量从前的单位伦琴(R)现在还在使用,然而按建议要逐渐加以淘汰。在1.293mg干燥空气(标准状况下 $1 \text{cm}^3$ 干燥空气)中形成1e.s.u.任一种符号的离子的辐射量为1R。

上述两个单位之间的换算使用下式,

$$1 \text{R} = 2.5798 \times 10^{-4} \text{C/kg}$$

### 照射量率

照射量率即单位时间的照射量,用I表示并应以A/kg为单位。早先广为使用的单位是

R/s和R/h。

$$1R/s = 258\mu A/kg, \quad 1R/h = 71.66nA/kg$$

γ辐射

参见电磁辐射。γ辐射这个词的特征含义是从原子核发射的辐射。

G值

由核辐射引起的化学反应的产额用所谓的G值表示。它等于因吸收100eV辐射能而分解或形成的物质(分子, 原子, 离子, 原子团等)的数目, 即辐射化学产额。

考虑新的单位制, 这个量应以1/J表示:

$$1/100eV = 6.242 \times 10^{15} J^{-1}$$

但是G值早先的定义仍然沿用。

半衰期

在均匀的放射性物质中, 由于放射性衰变而使核素的数目减小到初始值的一半所需要的时间称为该给定同位素的物理半衰期, 或简称半衰期。半衰期可以任何一种时间单位表示, 它的符号为 $t_{1/2}$ (另见衰变常数)。

吸收物质的半厚度

使辐射强度减弱到初始值一半的吸收物质厚度称为该给定吸收物质的半厚度, 通常以 $g/cm^2$ \* 为单位表示。除了半厚度以外还使用十分之一厚度, 这主要在γ辐射情况下。

实际上, 对应于8倍半厚度的距离可以看作给定辐射的最大射程。

同位素效应

同位素或含有同种元素同位素的化合物之间, 物理性质, 有时还有化学性质出现差别, 尤其在质量数相差比较大时更明显。这种现象就称为同位素效应。

LET值

参见比电离。

质量吸收系数

放射性辐射在物体中的吸收一般可以用下式计算:

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu_m d)$$

上式说明在辐射通过厚度 $d$ 的吸收层后, 其强度从初始值 $I_0$ 减小到 $I$ ; 辐射强度在给定介质中的减小取决于以指数 $\mu_m$ 表示的比例常数。如果 $d$ 为当量厚度(还可参见表面质量)并以 $kg/m^2$ (或 $g/cm^2$ )表示, 则质量吸收系数 $\mu_m$ 的单位应该表示为 $m^2/kg$ (或 $cm^2/g$ )。在 $d$ 以长度单位例如 $m$ 或 $cm$ 表示时, 采用量纲为 $1/m$ 或 $1/cm$ 的线吸收系数 $\mu$ 代替质量吸收系数。

已知吸收物质密度 $\rho(kg/m^3)$ 时, 可以利用下式容易地换算这两个常数:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

实际上使用 $\mu_m$ 是方便的, 因为吸收对能量的依赖关系可以这样一种方法用简单得多的方式加以描述。

核辐射的平均能量

放射性核发射的β辐射的能谱是连续的, 上限为 $E_{\beta, max}$ 。β粒子的平均能量可以粗略地从

\* 原文为 $g/m^2$ , 疑误。——译者注

$E_{\beta} \approx 1/3 E_{\beta, \max}$  估计。式中比例系数是放射性核素原子序数的函数，在较大或较小原子序数时，该系数分别小于或大于1/3，当上式用于很高能量的 $\beta$ 辐射时，该系数近似等于1/2。

$\gamma$ 辐射平均能量可以从 $\gamma$ 光子各组分的分布百分数进行加权平均而估计，但由于辐射与物质相互作用的复杂性，这样估算预计会有很大的误差。

#### 穆斯堡尔效应

穆斯堡尔指出，以低能 $\gamma$ 光子与适当选择的吸收晶体相互作用能实现无反冲的共振散射，并且该散射截面接近最大值。通过恰当地选择实验条件（首先，冷却系统）可以防止核激发能级热增宽。

如果我们把通过源周围吸收晶体的辐射的电磁束谱与通过含有与前述吸收体相同原子但不同的化学结合的物质束谱相比较，则由于电子结构的不同而观察到的变化可以提供有关同质异能变换的结论。如果我们把所研究的核放到不均匀电场中，则可分辨出一些吸收线，这样观察到的四极劈裂可提供关于结构和对称性的有价值的信息。

#### 中子

中子是一种中性的基本粒子，它参与构成除了 $^1\text{H}$ 以外的每一原子核。中子的静止质量为 $1.6747 \times 10^{-24} \text{g}$ ，相当于能量 $939.5 \text{MeV} = 0.15011 \mu\text{J}$ 。如果中子的能量等于 $0.025 \text{eV}$ 左右，则称其为热中子。

#### 中子通量密度

从麦克斯韦分布得到的中子平均速度同单位时间通过垂直于束流方向的单位面积\*的中子密度的乘积被称为中子通量密度，用 $\phi$ 或 $\phi_n$ 表示，以 $1/(\text{m}^2\text{s})$ 为单位计量。与此相似，这一概念可以用于粒子束或电磁辐射的光子束。

#### 核裂变

质量数高和中子过量的原子核，能自发地或在粒子的轰击下分解为两个质量数之比约等于3:2的初级核，同时发射基本粒子（中子）。核裂变很少直接形成稳定产物，产生的核素通过一系列衰变（大多通过连续 $\beta$ 衰变）达到稳定。

#### 同质异能素

核辐射的吸收或放射性衰变可能引起半衰期相对比较长（ns级）的激发态核素的产生，这种物质称为相应的基态核素的同质异能素。同质异能素用在右上角注m的方式表示，例如， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 。

#### 核素

具有一定原子序数和质量数，并处于一定能态的一类原子称为核素。核素可以分为稳定核素和放射性核素。另外，核素分类的其它根据有相同原子序数（相同质子数）不同质量数（同位素核素），相同中子数（等中子异位核素），相同质量数（同量异位核素），等等。

为了符合一般使用的习惯，本书用术语“同位素”代替准确的名称“核素”。

#### 电子对产生

$\gamma$ 辐射与物质相互作用的一种特殊的结果是电子对产生，即 $\gamma$ 光子在原子核的电场中转换成两个正电子和一个负电子。该相互作用的阈能为相应的静止质量的能量当量的总和，即 $1.02 \text{MeV}$ 。

#### 粒子通量密度

\* 原文为“面积”，疑误。——译者注

单位时间通过单位面积表面的粒子数称为粒子通量密度，它的单位为 $1/(m^2s)$ 。

#### 光电效应

低能 $\gamma$ 光子与物质相互作用最可能的方式是把全部能量交给一个电子，同时该受激原子\*一般通过发射特征X射线而变稳定。

#### 正电子辐射

一些放射性核通过核内质子分解为一个中子和一个称为正电子的粒子而稳定，正电子具有与电子相同的质量，但带有一个正电荷。该核过程伴有中微子产生。正电子辐射的次级效应是湮没辐射。

#### 质子

质子是每一个原子核的组成粒子，具有一个单位正电荷，并形成最轻的氢同位素 $^1H$ 的核。在每个元素中质子数都等于原子序数，因此可以根据质子数推定化学性质。质子的静止质量等于 $1.6724 \times 10^{-24}g$ ，对应于能量 $938.2MeV = 0.15011\mu J$ 。

#### 放射性浓度

单位体积溶液中同位素溶质的活度称为放射性浓度。推荐以 $GBq/(dm)^3$ 为单位表示这一量，以代替早先采用的 $mCi/ml$ 。 $1mCi/ml = 3.7 \times 10^{10}Bq/(dm)^3 = 37GBq/(dm)^3$ 。

应该说明的是过去曾把这一术语不正确地当成比活度，特别是在较早期的工作中。

#### 放射化学纯度

在非密封的放射性制剂中，以产物名称所表达的化学形式存在的总活度的分数称为放射化学纯度，通常以百分数表示。

#### 放射性核素纯度

放射性核素（或放射性同位素）纯度这个术语指给定核素的活度占总活度的百分数。

#### 镭当量

密封源的活度现在有时还用老方法以镭当量给出。使用这一术语时，活度间接地与 $^{226}Ra$ 的剂量常数（照射量率）相关。如果自某一距离处测得放射源的剂量率等于 $1g^{226}Ra$ 处于与其衰变产物平衡状态下的剂量率，则该放射源的活度为1克镭当量。

实际上，以克镭当量表示的活度可以通过单位质量 $^{226}Ra$ 的活度乘以 $^{226}Ra$ 与给定同位素两者剂量常数 $K_r$ 之比而换算为以 $Bq$ 为单位。例如，1克镭当量的 $^{192}Ir$ 源的活度换算成 $Bq$ 单位，可用下式：

$$\frac{K_r,^{226}Ra}{K_r,^{192}Ir} = \frac{1.59aAm^2/kgBq}{0.97aAm^2/kgBq} \times 3.7 \times 10^{10}Bq = 60.6GBq$$

#### 饱和活度

在给定通量和截面下通过给定的活化核反应原则上所能达到的最大活度，称为饱和活度。采用“无限长”时间的活化可以达到饱和活度。

#### 自吸收

如果放射源不是无限薄，就有部分辐射要被放射源本身吸收，因而造成粒子或光子的输出减少。在软 $\beta$ 发射体的情况下自吸收特别重要。

#### 比活度

就辐射物质而言，表征制剂的放射性同位素的活度与被该放射性同位素标记的元素的质

\* 原文为核，不甚确切。——译者注



量的比值称为比活度。活度过去常与化合物的相对分子量相联系，特别在有机标记化合物的情况，但目前用制剂的摩尔活度更为恰当。

以Bq/kg或类似地以PBq/g, GBq/g等单位表示这个活度是适当的。

与单位体积相关的活度为放射性浓度，而不是比活度。

比电离

致电离粒子穿透介质时沿着它的径迹产生离子对。单位路程长度的离子对数目称为线离子密度或比电离。在单位路程长度上传递给介质的能量以eV/nm或keV/ $\mu\text{m}$ 表示，并称之为线能量转移(LET)。

在核物理领域以外的研究中，线能量转移应该以J/m为单位表示，

$$1\text{keV}/\mu\text{m}=0.1602\text{nJ}/\text{kg}$$

标准偏差

如果实验数据符合高斯分布，则常常用对应于0.683统计置信度的标准偏差来表示误差；0.683统计置信度的意思是68.3%的实验会得到比标准偏差所表示的值小的误差。标准偏差用 $\sigma$ 表示。

对于实验次数 $m$ 很大的情况，可以利用下式计算标准偏差的值：

$$\sigma = \pm \left[ \frac{\sum_{i=1}^m (\xi_i - \bar{\xi})^2}{m-1} \right]^{1/2}$$

式中 $\xi_i$ 表示各个数据， $\bar{\xi}$ 表示它们的算术平均值， $\sigma \approx \sqrt{\bar{\xi}}$ 。

表面质量(当量厚度)

在核技术中经常以当量厚度(即 $\text{g}/\text{cm}^2$ )代替长度单位来表示厚度。当量厚度(早期还称为面密度)的概念主要在研究质量吸收系数时用于辐射吸收的计算。

齐拉-却尔曼斯效应

核衰变形成的新核处于激发态，并且反冲的动能能改变初始化学键的形式和性质，这种现象称为齐拉-却尔曼斯效应。在某些情况下它使我们能够利用放射化学方法分离在不改变原子序数的核反应中形成的产物。

X荧光

当波长在X射线范围内的电磁辐射与物质相互作用时，产生表征该物质组成的X射线，这种现象就称为X荧光。利用其它类型的电离辐射也能引起强度较低的特征辐射。

### 1.3 100种最重要放射性同位素的主要性质

下面叙述的100种放射性同位素代表一种或多或少带有任意性的选择。在收集关于辐射的数据( $\beta^-$ 和 $\gamma$ 能量)时，本表限于最重要的值；从表1.1有关的栏目中脚注序号不完全连续(例如， $\beta_7$ ,  $\gamma_{11}$ )就可以看出这一点。

辐射能量的分布百分数和100次衰变发射的 $\gamma$ 量子数如果已知，在括号内列出。

特别注意确保从最新测定的，并认为最可靠的数据中选取数据。表1.1中几个数据多少不同于原先发表的数据这一事实反映了这一努力。

表1.1 一些放射性同位素的主要性质

同位素	$t_{1/2}$	特征辐射的能量(MeV) 和分布百分数(%)	剂量常数 $K_r$	
			$aA m^2/kgBq$	$Rm^2/Cih$
$^3H$	12.26a	$\beta^-0.019(100)$		
$^{14}C$	5730 a	$\beta^-0.156(100)$		
$^{18}F$	110 min	$\beta^+0.635(97)$ K	1.10	0.57
$^{22}Na$	2.62 a	$\beta^+0.54(89)$ $\gamma_1 1.275(99.9)$ K	2.32	1.20
$^{24}Na$	15.05 h	$\beta^-1.389(100)$ $\gamma_1 1.369(100); \gamma_2 2.754(100)$	3.66	1.89
$^{28}Mg$	21.2 h	$\beta^-0.46(100)$ $\gamma_1 0.03(97); \gamma_2 0.40(29);$ $\gamma_3 0.45(29); \gamma_4 1.35(71)$	1.41	0.73
$^{31}Si$	2.62 h	$\beta^-1.48(100)$ $\gamma_1 1.26(0.07)$		
$^{32}P$	14.28 d	$\beta^-1.71(100)$		
$^{33}P$	24.4 d	$\beta^-0.25$		
$^{35}S$	87.9 d	$\beta^-0.167(100)$		
$^{36}Cl$	$3.1 \times 10^5 a$	$\beta^-0.714(98)$ K		
$^{39}Ar$	269 a	$\beta^-0.565(100)$		
$^{42}K$	12.36 h	$\beta^-1.99(18); \beta^-3.52(82)$ $\gamma_1 0.31(0.2); \gamma_2 1.52$	0.15	0.08
$^{45}Ca$	165 d	$\beta^-0.252(100)$		
$^{47}Ca$	4.54 d	$\beta^-0.66(83); \beta^-1.98(17)$ $\gamma_1 0.49(6); \gamma_2 0.82(6)$ $\gamma_3 1.31(76)$	0.99	0.51
$^{48}Sc$	83.9 d	$\beta^-0.357(100);$ $\beta^-1.48(0.004)$ $\gamma_1 0.889(100); \gamma_2 1.120(100)$	2.15	1.11
$^{51}Cr$	27.8 d	$\gamma_1 0.320(9)$ K	0.04	0.02
$^{54}Mn$	303 d	$\gamma_1 0.835(100)$ K	0.93	0.48
$^{56}Mn$	2.58 h	$\beta^-0.72(20); \beta^-1.04(30)$ $\beta^-2.85(50)$ $\gamma_1 0.85(99); \gamma_2 1.81(26)$ $\gamma_3 2.11(14)$	1.61	0.83

(续表)

同位素	$t_{1/2}$	特征辐射的能量(MeV)和分布百分数(%)	剂量常数 $K_r$	
			$\mu\text{A m}^2/\text{kgBq}$	$\text{Rm}^2/\text{Cih}$
$^{55}\text{Fe}$	2.60 a	K 0.006		
$^{59}\text{Fe}$	45.6 d	$\beta_1^-$ 0.27(46); $\beta_2^-$ 0.46(53.7) $\beta_3^-$ 1.57(0.3) $\gamma_1$ 0.19(2.5); $\gamma_2$ 1.10(56); $\gamma_3$ 1.29(44)	1.32	0.68
$^{60}\text{Co}$	267 d	$\gamma_1$ 0.014(9); $\gamma_2$ 0.122(88); $\gamma_3$ 0.136(12); $\gamma_4$ 0.692(0.1) K	0.12	0.06
$^{60}\text{Co}$	71.3 d	$\beta_1^+$ 0.47(15) $\gamma_1$ 0.81(100); $\gamma_2$ 0.87(1.4) K	1.07	0.55
$^{60}\text{Co}$	5.26a	$\beta_1^-$ 0.312(99) $\gamma_1$ 1.173(99); $\gamma_2$ 1.332(100)	2.52	1.30
$^{63}\text{Ni}$	92 a	$\beta_1^-$ 0.067(100)		
$^{65}\text{Ni}$	2.56 h	$\beta_1^-$ 0.05(29); $\beta_2^-$ 1.02(1.4); $\beta_3^-$ 2.14(57) $\gamma_1$ 0.37(11); $\gamma_2$ 1.12(19); $\gamma_3$ 1.48(11)	0.43	0.22
$^{64}\text{Cu}$	12.8 h	$\beta_1^-$ 0.57(38); $\beta_2^+$ 0.66(19) $\gamma_1$ 1.33(0.05) K	0.21	0.11
$^{63}\text{Cu}$	61 h	$\beta_1^-$ 0.40(45); $\beta_2^-$ 0.48(35); $\beta_3^-$ 0.57(20) $\gamma_1$ 0.09(23); $\gamma_2$ 0.18(23)	0.12	0.06
$^{65}\text{Zn}$	245 d	$\beta_1^+$ 0.33(1.7) $\gamma_1$ 1.12(49) K	0.52	0.27
$^{67}\text{Ga}$	77.9 h	$\gamma_1$ 0.09(42); $\gamma_2$ 0.18(26); $\gamma_3$ 0.30(19); $\gamma_4$ 0.39(5) K	0.17	0.09
$^{75}\text{Ga}$	14.1 h	$\beta_1^-$ 0.64(42); $\beta_2^-$ 0.96(31); $\beta_3^-$ 1.51(10); $\beta_4^-$ 2.53(9); $\beta_5^-$ 3.15(8) $\gamma_1$ 0.63(21); $\gamma_2$ 0.64(97);	3.04	1.57

(续表)

同位素	$t_{1/2}$	特征辐射的能量(MeV)和分布百分数(%)	剂量常数 $K_r$	
			$\mu\text{A m}^2/\text{kgBq}$	$\text{Rm}^2/\text{Cih}$
$^{67}\text{Ga}$	14.1 h	$\gamma_{12}$ 1.04(9); $\gamma_{14}$ 1.27(5); $\gamma_{19}$ 1.46(3); $\gamma_{23}$ 2.20(39); $\gamma_{31}$ 2.50(30)		
$^{68}\text{Ge}$	11.4 d	K		
$^{74}\text{As}$	24.6 h	$\beta_1^-$ 0.36(9); $\beta_2^-$ 1.76(4) $\beta_3^-$ 2.41(31); $\beta_4^-$ 2.97(56) $\gamma_1$ 0.56(39); $\gamma_2$ 0.66(6.3) $\gamma_3$ 1.22(5.8); $\gamma_4$ 2.10(0.9)	0.46	0.24
$^{76}\text{Se}$	120.4 d	$\gamma_5$ 0.10(3); $\gamma_6$ 0.12(15); $\gamma_8$ 0.14(54); $\gamma_9$ 0.27(56); $\gamma_{10}$ 0.28(23); $\gamma_{11}$ 0.40(13) K	0.29	0.15
$^{78}\text{Br}$	35.3 h	$\beta_1^-$ 0.44(100) $\gamma_1$ 0.55(67); $\gamma_2$ 0.62(42) $\gamma_3$ 0.70(24); $\gamma_4$ 0.78(80); $\gamma_5$ 0.83(24); $\gamma_6$ 1.04(30); $\gamma_7$ 1.32(31); $\gamma_8$ 1.48(19)	2.81	1.45
$^{81}\text{Kr}$	10.76a	$\beta_1^-$ 0.15(0.7); $\beta_2^-$ 0.67(99.3) $\gamma_1$ 0.514(0.4)	0.004	0.002
$^{86}\text{Rb}$	18.7 d	$\beta_1^-$ 0.71(9); $\beta_2^-$ 1.78(91) $\gamma_1$ 1.08(9)	0.12	0.06
$^{87}\text{Sr}$	64 d	$\gamma_1$ 0.514(99) K	0.56	0.29
$^{89}\text{Sr}$	52.7 d	$\beta_1^-$ 1.462(100)		
$^{90}\text{Sr}$	28.1 a	$\beta_1^-$ 0.546(100)		
$^{91}\text{Y}$	108.1 d	$\beta_1^+$ 0.76 $\gamma_1$ 0.91(90); $\gamma_2$ 1.86(99)	2.73	1.41
$^{92}\text{Y}$	64 h	$\beta_1^-$ 2.27(100) $\beta_2^-$ 0.36(43); $\beta_3^-$ 0.40(45)		
$^{93}\text{Zr}$	65.5 d	$\beta_1^-$ 0.89(2) $\gamma_1$ 0.724(55); $\gamma_2$ 0.756(42)	0.81	0.42
$^{93}\text{Nb}$	35 d	$\beta_1^-$ 0.16(99); $\beta_2^-$ 0.92(1) $\gamma_1$ 0.77(100)	0.85	0.44
$^{99}\text{Mo}$	66.7 h	$\beta_1^-$ 0.41(14); $\beta_2^-$ 1.18(85) $\gamma_1$ 0.18(4); $\gamma_2$ 0.37(1.3);	0.23	0.12

(續表)

同位素	$t_{1/2}$	特征辐射的能量(MeV)和分布百分数(%)	剂量常数 $K_r$	
			$\mu\text{A m}^2/\text{kgBq}$	$\text{Rm}^2/\text{Cih}$
$^{99}\text{Mo}$	66.7 h	$\gamma_4$ 0.74(12)		
$^{99}\text{Tc}^m$	6.05 h	$\gamma_1$ 0.140(89); $\gamma_2$ 0.142(0.03) K 0.018	0.12	0.06
$^{100}\text{Ru}$	1.0 a	$\beta_1^-$ 0.039(100)		
$^{110}\text{Ag}^m$	255 d	$\beta_1^-$ 0.086(65); $\beta_2^-$ 0.536(33) $\beta_3^-$ 2.87(2) $\gamma_2$ 0.556(8); $\gamma_3$ 0.677(95) $\gamma_7$ 0.706(17); $\gamma_9$ 0.762(21); $\gamma_{10}$ 0.818(8); $\gamma_{11}$ 0.885(69); $\gamma_{12}$ 0.937(29); $\gamma_{13}$ 1.384(26); $\gamma_{15}$ 1.506(14)	2.77	1.43
$^{111}\text{Ag}$	7.5 d	$\beta_1^-$ 0.68(6); $\beta_2^-$ 0.79(1); $\beta_3^-$ 1.05(93) $\gamma_1$ 0.247(1); $\gamma_2$ 0.342(5.6)	0.02	0.01
$^{113}\text{Cd}^m$	43 d	$\beta_1^-$ 0.70(3.3); $\beta_2^-$ 1.62(96.7) $\gamma_1$ 0.49(0.3); $\gamma_2$ 0.94(2.3); $\gamma_3$ 1.29(1.0)	0.04	0.02
$^{113}\text{Cd}$	53 h	$\beta_1^-$ 0.59(24); $\beta_2^-$ 0.63(13); $\beta_3^-$ 1.11(62) $\gamma_1$ 0.23(10); $\gamma_3$ 0.33(52); $\gamma_4$ 0.63(25)	0.45	0.23
$^{115}\text{In}^m$	1.66 h	$\gamma_1$ 0.393(64)	0.31	0.16
$^{115}\text{In}^m$	60.0 d	$\gamma_1$ 0.19(18.2); $\gamma_2$ 0.56(3.5); $\gamma_3$ 0.72(3.5) K	0.08	0.04
$^{117}\text{Sn}$	115 d	$\gamma_1$ 0.257(0.25); $\gamma_2$ 0.650(0.18)		
$^{123}\text{Sb}$	2.8 d	$\beta_1^-$ 0.74(4); $\beta_2^-$ 1.40(63); $\beta_3^-$ 1.97(30); $\beta^+$ 0.56 $\gamma_1$ 0.57(88.5); $\gamma_2$ 0.69(3.5); $\gamma_3$ 1.14(1.0); $\gamma_4$ 1.26(0.7) K		
$^{125}\text{Sb}$	60.9 d	$\beta_1^-$ 0.25(9); $\beta_2^-$ 0.62(63); $\beta_3^-$ 0.94(9); $\beta_4^-$ 1.60(7); $\beta_5^-$ 2.31(22) $\gamma_1$ 0.609(98.6); $\gamma_2$ 0.646(7.5);		

(续表)

同位素	$t_{1/2}$	特征辐射的能量(MeV)和分布百分数(%)	剂量常数 $K_r$	
			$aA m^2/kgBq$	$Rm^2/Cih$
$^{124}Sb$	60.9 d	$\gamma_4$ 0.723(10.0); $\gamma_5$ 0.969(2.5); $\gamma_6$ 1.370(3.6); $\gamma_{11}$ 1.69(50.0); $\gamma_{12}$ 2.088(6.5)		
$^{132}Te$	77.7 h	$\beta_1^-$ 0.22(100) $\gamma_1$ 0.053(17); $\gamma_2$ 0.230(90)	0.25	0.13
$^{125}I$	60.2 d	$\gamma_1$ 0.036(7) K 0.028	0.14	0.07
$^{131}I$	8.05 d	$\beta_1^-$ 0.25(2.8); $\beta_2^-$ 0.34(9.3); $\beta_3^-$ 0.61(87.2); $\beta_4^-$ 0.81(0.7) $\gamma_2$ 0.284(5.0); $\gamma_3$ 0.364(78.4); $\gamma_4$ 0.637(9.0); $\gamma_5$ 0.722(3.0)	0.45	0.23
$^{132}I$	2.26 h	$\beta_1^-$ 0.73(15); $\beta_2^-$ 0.90(20); $\beta_3^-$ 1.16(23); $\beta_4^-$ 1.53(24); $\beta_5^-$ 2.12(18) $\gamma_1$ 0.375(4.8); $\gamma_2$ 0.521(21.0); $\gamma_3$ 0.645(30.0); $\gamma_4$ 0.670(100); $\gamma_5$ 0.773(86); $\gamma_6$ 0.950(23); $\gamma_7$ 1.500(5.8)	2.19	1.13
$^{133}Xe^m$	2.3 d	$\gamma_1$ 0.233(14)	0.02	0.01
$^{134}Xe$	5.27 d	$\beta_1^-$ 0.35(100) $\gamma_1$ 0.08(35.6); $\gamma_2$ 0.16(1.6)		
$^{134}Cs$	9.7 d	K 0.03		
$^{134}Cs$	2.05 a	$\beta_1^-$ 0.08(32); $\beta_2^-$ 0.31(5); $\beta_3^-$ 0.66(50); $\beta_4^-$ 0.68(13) $\gamma_2$ 0.56(10); $\gamma_3$ 0.57(14); $\gamma_4$ 0.61(95); $\gamma_5$ 0.80(90)	1.72	0.89
$^{137}Cs$	30 a	$\beta_1^-$ 0.514(92.4); $\beta_2^-$ 1.18(7.6)		
$^{138}Ba$	10.7 a	$\gamma_2$ 0.08(38); $\gamma_3$ 0.16(8); $\gamma_4$ 0.30(12); $\gamma_7$ 0.36(64); $\gamma_8$ 0.39(4); $\gamma_9$ 0.63(8) K	0.46	0.24
$^{133}Ba^m$	2.6 min	$\gamma_1$ 0.662(85)	0.66	0.34
$^{140}Ba$	12.8 d	$\beta_1^-$ 0.48(25); $\beta_2^-$ 0.60(10); $\beta_3^-$ 0.90(5); $\beta_4^-$ 1.02(60) $\gamma_1$ 0.03(16); $\gamma_2$ 0.16(5);	0.48	0.25

(续表)

同位素	$t_{1/2}$	特征辐射的能量(MeV)和分布百分数(%)	剂量常数 $K_r$	
			$\mu\text{A m}^2/\text{kgBq}$	$\text{Rm}^2/\text{Cih}$
$^{140}\text{Ba}$	12.8 d	$\gamma_4$ 0.30(5); $\gamma_5$ 0.44(5); $\gamma_6$ 0.54(25)		
$^{140}\text{La}$	40.2 h	$\beta_1^-$ 0.42(16); $\beta_2^-$ 0.86(12); $\beta_3^-$ 1.15(20); $\beta_4^-$ 1.36(30); $\beta_5^-$ 1.69(14); $\beta_6^-$ 2.18(8) $\gamma_1$ 0.323(20); $\gamma_2$ 0.491(40); $\gamma_3$ 0.815(19); $\gamma_6$ 0.868(5); $\gamma_7$ 0.923(9); $\gamma_8$ 1.596(95); $\gamma_9$ 2.53(8)	2.32	1.20
$^{141}\text{Ce}$	33.1 d	$\beta_1^-$ 0.44(75); $\beta_2^-$ 0.53(25) $\gamma_1$ 0.145(48)	0.10	0.05
$^{142}\text{Ce}$	33.4 h	$\beta_1^-$ 0.22(6); $\beta_2^-$ 0.50(12); $\beta_3^-$ 0.74(5); $\beta_4^-$ 1.13(40); $\beta_5^-$ 1.40(38) $\gamma_1$ 0.057(6); $\gamma_2$ 0.294(23); $\gamma_3$ 0.351(23); $\gamma_4$ 0.565(6); $\gamma_5$ 0.861(6); $\gamma_{10}$ 1.10(6)	0.37	0.19
$^{144}\text{Pr}$	13.6 d	$\beta_1^-$ 0.93(100)		
$^{147}\text{Pm}$	2.62 a	$\beta_1^-$ 0.224(100)		
$^{148}\text{Sm}$	46.8 h	$\beta_1^-$ 0.64(38); $\beta_2^-$ 0.71(40); $\beta_3^-$ 0.81(22) $\gamma_1$ 0.070(8); $\gamma_2$ 0.103(34); $\gamma_3$ 0.545(0.2)	0.04	0.02
$^{152}\text{Eu}^m$	9.3 h	$\beta_4^-$ 0.56(2); $\beta_5^-$ 1.55(2); $\beta_6^-$ 1.87(74); $\beta_7^+$ 0.82(0.01) $\gamma_1$ 0.12(15); $\gamma_2$ 0.85(14); $\gamma_3$ 0.97(7); $\gamma_4$ 1.33(2)	0.27	0.14
$^{154}\text{Eu}$	12.2 a	$\beta_1^-$ 0.22(2); $\beta_2^-$ 0.36(3); $\beta_3^-$ 0.71(12); $\beta_4^-$ 1.05(2); $\beta_5^-$ 1.47(7); $\beta_6^+$ 0.47(0.01); $\beta_7^+$ 0.70(0.01) $\gamma_1$ 0.12(59); $\gamma_2$ 0.24(9); $\gamma_3$ 0.87(6); $\gamma_4$ 0.96(14); $\gamma_5$ 1.09	1.12	0.58
$^{156}\text{Eu}$	16 a	$\beta_1^-$ 0.12(2); [ $\beta_2^-$ 0.25(27);	1.20	0.62

(續表)

同位素	$t_{1/2}$	特征辐射的能量(MeV)和分布百分数(%)	剂量常数 $K_r$	
			$\mu\text{A m}^2/\text{kgBq}$	$\text{Rm}^2/\text{Cih}$
$^{154}\text{Eu}$	16 a	$\beta_1^-$ 0.59(35); $\beta_2^-$ 0.83(23); $\beta_3^-$ 1.60(3); $\beta_4^-$ 1.84(10); $\gamma_1$ 0.12(14); $\gamma_2$ 0.25(6); $\gamma_3$ 0.59(4); $\gamma_4$ 0.73(21); $\gamma_5$ 0.87(13); $\gamma_6$ 1.00(31); $\gamma_7$ 1.28(42)		
$^{150}\text{Eu}$	1.81 a	$\beta_1^-$ 0.15(70); $\beta_2^-$ 0.19(10); $\beta_3^-$ 0.25(20) $\gamma_1$ 0.061(25); $\gamma_2$ 0.087(73); $\gamma_3$ 0.190(30); $\gamma_4$ 0.106(28); $\gamma_5$ 0.125(17); $\gamma_6$ 0.132(6)	0.06	0.03
$^{160}\text{Tb}$	72.1 d	$\beta_1^-$ 0.30(12); $\beta_2^-$ 0.46; $\beta_3^-$ 0.58(37.6); $\beta_4^-$ 0.87(31); $\beta_5^-$ 1.77(0.4) $\gamma_1$ 0.087(8); $\gamma_2$ 0.298(23); $\gamma_3$ 0.878(26); $\gamma_4$ 0.962(35); $\gamma_5$ 1.179(15); $\gamma_6$ 1.273(8)	1.07	0.55
$^{170}\text{Tm}$	134 d	$\beta_1^-$ 0.884(24); $\beta_2^-$ 0.968(76) $\gamma_1$ 0.084(2.5) K	0.006	0.003
$^{175}\text{Hf}$	70 d	$\gamma_1$ 0.09(3.4); $\gamma_2$ 0.34(75.5); $\gamma_3$ 0.43(1.4) K	0.41	0.21
$^{180}\text{Hf}$	42.5 d	$\beta_1^-$ 0.34(1); $\beta_2^-$ 0.41(97); $\beta_3^-$ 0.55(2) $\gamma_1$ 0.133(48); $\gamma_2$ 0.346(14); $\gamma_3$ 0.482(88)	0.60	0.31
$^{182}\text{Ta}$	115.1 d	$\beta_1^-$ 0.18(38); $\beta_2^-$ 0.25(5); $\beta_3^-$ 0.33(2); $\beta_4^-$ 0.36(20); $\beta_5^-$ 0.44(23); $\beta_6^-$ 0.48(4); $\beta_7^-$ 0.51(8); $\beta_8^-$ 0.59(0.9) $\gamma_1$ 0.16; $\gamma_2$ 0.22; $\gamma_3$ 0.26; $\gamma_4$ 1.12 $\gamma_5$ 1.16; $\gamma_{10}$ 1.19 $\gamma_{11}$ 1.22	1.15	0.61
$^{187}\text{W}$	75 d	$\beta_1^-$ 0.430(100)		



(续表)

同位素	$t_{1/2}$	特征辐射的能量(MeV)和分布百分数(%)	剂量常数 $K_r$	
			$aA \cdot m^2/kgBq$	$Rm^2/Cih$
$^{187}W$	24 h	$\beta_1^-$ 0.34(10); $\beta_2^-$ 0.63(7); $\beta_3^-$ 1.33(20) $\gamma_1$ 0.07(10); $\gamma_2$ 0.13(9); $\gamma_{11}$ 0.46(23); $\gamma_{12}$ 0.55(7); $\gamma_{14}$ 0.62(8); $\gamma_{15}$ 0.69(31); $\gamma_{13}$ 0.78(5)	0.60	0.31
$^{187}Ir$	74.2 d	$\beta_1^-$ 0.24(15); $\beta_2^-$ 0.54(36); $\beta_3^-$ 0.67(4) $\gamma_4$ 0.30(89); $\gamma_5$ 0.32(81); $\gamma_3$ 0.47(49); $\gamma_{12}$ 0.81(15) K	0.97	0.50
$^{188}Au$	2.7 d	$\beta_1^-$ 0.29(1); $\beta_2^-$ 0.96(99) $\gamma_1$ 0.41(95); $\gamma_2$ 0.68(1); $\gamma_3$ 1.09(0.2)	0.45	0.23
$^{189}Au$	3.15 d	$\beta_1^-$ 0.25(24); $\beta_2^-$ 0.30(69); $\beta_3^-$ 0.46(7) $\gamma_1$ 0.16(47); $\gamma_2$ 0.21(11)	0.17	0.09
$^{197}Hg^m$	24 h	$\gamma_2$ 0.13(36); $\gamma_3$ 0.16(6) K	0.06	0.03
$^{197}Hg$	65 h	$\gamma_1$ 0.077(28.6); $\gamma_2$ 0.191(0.06); $\gamma_3$ 0.268(0.15) K	0.08	0.04
$^{203}Hg$	46.8 d	$\beta_1^-$ 0.214(100) $\gamma_1$ 0.279(77)	0.29	0.15
$^{204}Tl$	3.80 a	$\beta_1^-$ 0.766(98) K		
$^{210}Bi$	5.01 d	$\alpha_1$ 4.65( $2 \times 10^{-4}$ ) $\beta_1^-$ 1.16(100)		
$^{210}Po$	138.4 d	$\alpha_1$ 5.30(100) $\gamma_1$ 0.80( $10^{-3}$ )		
$^{226}Ra$	1602 a	$\alpha_1$ 4.50(5.7); $\alpha_2$ 4.78(94.3) $\gamma_2$ 0.242(10.5); $\gamma_4$ 0.295(18.9); $\gamma_5$ 0.352(37.7);	1.82	0.94