

放射性物质的 卫生防护与运输安全

刘学成 韩开春 编

中国铁道出版社

内 容 提 要

本书介绍了放射性物质的卫生防护与运输安全方面的基础知识，全书共分12章，内容包括射线对人体的影响、放射防护标准、电离辐射的探测以及外照射防护、放射性物质的运输包装及运输安全、放射防护管理、各种运输业运送放射性物质的特点及管理要求等。

本书可供铁路、公路、航空、水运部门运输工作人员以及环境保护和邮政部门的职工学习参考。

放射性物质的卫生防护与运输安全

刘学成 韩开春 编

*

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 闵季 胡舜珣

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/32 印张：10.5字数：234 千

1990年8月第1版 第1次印刷

印数：0001—1500册

ISBN7-113-00790-2/U·245 定价：4.35元

目 录

第一章 放射卫生防护和运输辐射安全的基础知识·····	1
一、放射现象·····	1
二、放射性活度及单位·····	12
三、放射性物质及其特点·····	16
四、射线与物质相互作用·····	24
五、常用辐射剂量单位·····	37
第二章 射线对人体的影响·····	56
一、辐射作用于人体的方式·····	56
二、辐射损伤的分类·····	57
三、影响人体辐射效应的因素·····	57
四、射线对人体的损伤作用·····	61
五、细胞的辐射损伤·····	63
六、染色体畸变·····	66
七、急性放射损伤·····	68
八、慢性放射损伤·····	76
九、内照射对人体的效应·····	80
十、远期效应·····	82
第三章 放射防护标准·····	91
一、作用于人体的电离辐射源·····	91
二、放射防护的目的和制订防护标准的原则·····	96
三、辐射防护标准的分类·····	99
四、我国现行的放射卫生防护标准·····	102
第四章 电离辐射的探测·····	114

一、射线探测器	115
1. 气体探测器	115
2. 闪烁计数器	126
3. 半导体探测器	131
4. 热释光剂量计	133
二、放射性活度测定	136
三、放射性测量数据的误差处理	150
第五章 开放型放射源的卫生防护	155
一、工作单位与场所的卫生防护	155
二、安全操作	164
三、放射性污染的去除	166
四、放射性废物的处理	170
第六章 电离辐射的外照射防护	177
一、外照射防护的一般原则	177
二、屏蔽计算	179
三、运输中的外照射防护	203
第七章 放射防护管理	206
一、管理法规	206
二、监督制度	207
三、医学监护	208
四、健康检查	209
五、放射性事故及其处理	211
六、放射性事故的应急医学处理	218
第八章 放射性物质运输安全	222
一、放射性物质的特征	222
二、放射性物质的运输分类	223
三、货包的类型和放射性活度限值	225
四、货包的运输等级和辐射水平的限值	230

五、货包表面放射性污染限值	232
六、运输裂变物质的规定	233
七、标记、标志和标牌	236
第九章 放射性物质的运输包装	242
一、放射性物质运输包装的基本组成	242
二、放射性货包的可靠性试验	244
三、包装设计的要求	248
四、货包试验程序	258
第十章 放射性货物安全运输的组织和管理	260
一、货物的发送准备	260
二、货物运输	263
三、审批和管理要求	274
第十一章 各种运输业运送放射性物质的特点	
和管理要求	279
一、铁路、公路、水路和航空运输放射性物质在	
管理上的共同要求	279
二、各运输业的运送特点和管理要求	279
第十二章 放射性物质运输中的辐射安全监测	287
一、运输行业中辐射安全防护的特点	287
二、放射性物质运输中辐射安全的组织机构	288
三、运输中的辐射监测	289
四、监测方法	294
五、运输行业放射性监测仪器的配置	311
附录 A、附录 B	318

第一章 放射卫生防护和运输辐射 安全的基础知识

一、放射现象

运动是物质最根本的属性，五彩缤纷的世界正是永恒运动着的物质的总体。放射现象也是物质运动的一种形式，但它是发生于原子核内的微观现象。这种形式的运动使物质发生质的变化——由一种核素变成另一种核素。放射现象是1896年由法国物理学家贝可勒尔发现的，并通过实验证明具有放射特性的物质所发出的射线具有类似X射线的某些特性，能使周围的空气产生电离。接着，卢瑟福、索迪和居里夫妇等科学家通过实验证实，放射现象发生于那些不稳定的原子核，它们在发生放射现象以后变成另一种新的原子核。

（一）原子及原子核的结构

为了理解物质的放射特性，必须明了原子及原子核的结构。19世纪末期以前，人类仅认识到物质是由原子构成的，以为物质最终不能再分割的最小单位是原子。然而，当1895年发现X射线、1896年发现放射现象以及1897年发现电子以后，物质结构的原子论学说就动摇了，因为它无法解释这些新发现的物质特性。因此，新的物质结构学说应运而生。人们认识到原子不是物质的最小单位，原子有一个复杂的结构。卢瑟福等许多科学家不断完善原子结构学说，认识到原子是由原子核和围绕原子核不停地运动的电子构成的；而原子核是由中子和质子组成的（中子和质子都称为核子）。若把原

子核与原子中的电子之间的关系设想为一个壳层模型，根据这个模型，元素氟的原子结构可以用图 1—1 表示。

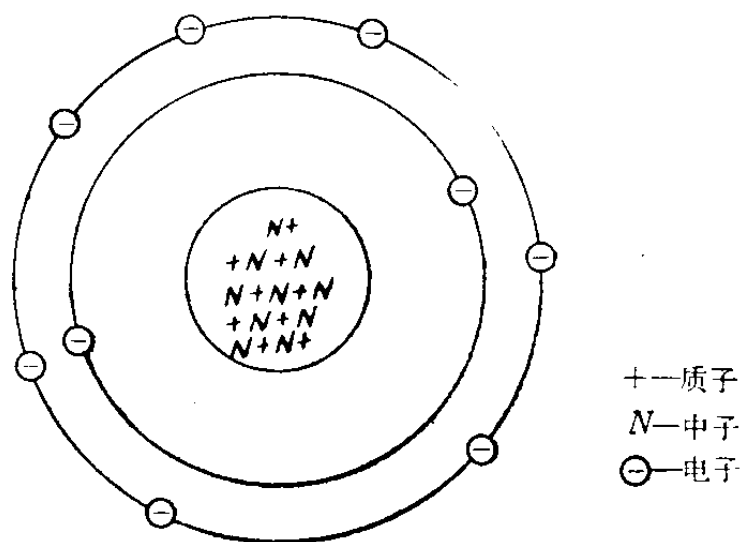


图 1—1 稳定的氟原子壳层模型示意图

氟原子核里有9个质子和10个中子紧密地结合在一起，核外有9个电子分两层绕原子核运动。原子核的质子数越大，核外电子数越多，并且这些电子按一定的规律分布在不同的壳层里。实验证实原子的线度约为 10^{-8} 厘米，而居原子中间的原子核的线度约 10^{-12} 厘米，原子核几乎集中了原子的全部质量。从上述两个线度的数量级可知，在原子核与轨道之间有着相当大的空间。在原子核里，质子之间的库伦斥力和质子与中子之间的超短程引力作用的结果，使原子核中的核子组合在一起。由此可知，当原子核中的中子、质子数目比例超过了一定范围，原子核就不可能稳定，因为斥力与引力的平衡被破坏。大量实验资料表明，对于轻元素而言，只有原子核里的中子和质子数量大致相等时，原子核才是稳定的。在 $Z=20$ （即原子核里质子数等于20）以后的那些元素，原子核里的中子数目必须超过质子的数目，原子核才是稳定的。实验的数据是，中子数：质子数 $=1.54:1$ 时，原子核才是稳定的。否则，原子核就将产生变化，中子数过多的

则放射出负电子使原子核里的质子数增加 1 而中子数减少 1；质子数过多的则放射出正电子，而使原子核中的质子数减少 1，而中子数增加 1。

(二) 元素、核素和同位素

1. 元素

在化学里，元素是指原子核里质子数（即核电荷数）相同的一类原子。早在 19 世纪 60 年代，门捷列夫就发现了元素周期表，指明了元素的化学性质随元素的原子量增加而呈现出周期性的变化。至今人类已找到的元素有 107 种，其中 93 号以后的元素都是通过人工方法获得的。随着科学技术的不断发展，人类将会不断获得新的元素。

2. 核素

核素指的是原子核里质子数、核子数（或原子量）都相等而且所处的能量状态也相同的一类原子。通常，核素用符号 ${}_Z^AX$ 表示， X 是元素符号， Z 表示质子数目， A 表示核子数（即中子数加质子数之和）。例如， ${}_{53}^{131}I$ 就表示核素碘-131，这种核素质子数（也即原子序数）为 53，原子量（或称核子数）为 131。 ${}_1^1H$ 、 ${}_1^2H$ 、 ${}_1^3H$ 分别表示三种不同的核素。如果该核素原子核处于激发态，则在核素符号的左上角 A 的后面加一个 m ，即变为 ${}_Z^{Am}X$ ，它与 ${}_Z^AX$ 的差别仅在于能量状态，所以， ${}_Z^{Am}X$ 与 ${}_Z^AX$ 之间又互称为同质异能素。例如，运输中常遇到的“发生器”中装的 ${}_{43}^{99}Tc$ 与 ${}_{43}^{99m}Tc$ 就是同质异能素。至今人类已找到 2000 多种核素，其中绝大多数是通过人工方法获得的。

3. 同位素

同位素是指质子数相同的那些核素。例如， ${}_1^1H$ 、 ${}_1^2H$ 和 ${}_1^3H$ 这三种核素的原子核里都只有一个质子，它们都属于元素氢，是氢的三种同位素。由此可以看出同位素只能限于某

个元素而言，如上述 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 和 ${}^3_1\text{H}$ 是氢的同位素；又如， ${}^{125}_{53}\text{I}$ 、 ${}^{129}_{53}\text{I}$ 和 ${}^{131}_{53}\text{I}$ 等是元素碘的同位素。核素的含义较广，它是泛指原子序数（也即原子核里的质子数）、原子量和能量状态不同的原子形式。因此可以这样说，核素的概念类似于元素，但它比同位素更广泛。

（三）不稳定性核素（放射性核素）

在现有的2000多种核素中，仅有200多种核素是稳定的，而1700多种核素是不稳定的。这些不稳定的核素的原子核自发地放射出某种射线（或粒子）而变成另一种核素的原子核（此过程称为衰变）。不稳定性核素的特点就是带有放射性，所以不稳定性核素又称放射性核素。放射性核素有的很轻，如 ${}^3_1\text{H}$ 是发射出低能 β 射线的发射体，也有很重的，如 $Z=107$ 的核素，它是 α 射线的发射体。但稳定性核素仅存在于原子序数 $Z < 83$ 的那些核素里。除 $Z=43$ （即元素锝）和 $Z=61$ （钷）这两种元素外，所有的元素都有一种以上的稳定性核素；而 $Z > 83$ 的所有核素都是不稳定的，它们都是放射性核素。

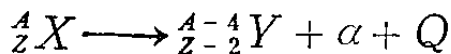
（四）辐射类型

不稳定性核素的原子核，产生衰变过程中主要发射三种类型的辐射，即 α 、 β 和 γ 射线。在正常情况下，原子核处于最低能量状态（称基态）。当不稳定性原子核发生衰变或者在核反应以及核裂变过程中，原子核才可能处于激发态（亚稳态）。这个不稳定状态不能停留很久，它将很快地跃迁到基态或较低能级（然后再到基态）并放出 γ 射线。不稳定性原子核衰变过程中，绝大多数是核内中子与质子的相互转化，它们放射出 β^- 粒子（即负电子）或 β^+ 粒子（即正电子）；只有重核才可能发射出 α 粒子，而 γ 射线就是不稳定性原子核发射 β 或 α 以后，由于原子核处于激发态，当它们跃迁至基

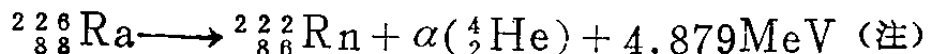
态时发射出的电磁辐射。通过实验，证明三种射线的属性如图 1—2 所示。从镭源发射出的三种不同射线，在磁场作用下 α 、 β 射线发生偏转，而 γ 射线不偏转，它是一种类似X射线的电磁波。

1. α 衰变

不稳定性原子核中的重核（一般是 $Z \geq 82$ 以上的核素）才有可能发生 α 衰变。如果发生一次 α 衰变，原子核就减少两个质子和两个中子，即其核电荷数减少 2，核子数减少 4，它变成新的核素的原子核。 α 衰变这种过程可用下列关系式表示：



式中， Q 代表衰变能量， X 是母核元素， Y 是子核元素，由于 α 粒子是由两个质子和两个中子组成的，其实质就是元素氦的原子核。镭-226在衰变成氡-222时就是 α 衰变，它可以表示为：



衰变能量一般是分配给 α 粒子（作为其动能）和伴生的 γ 射线。

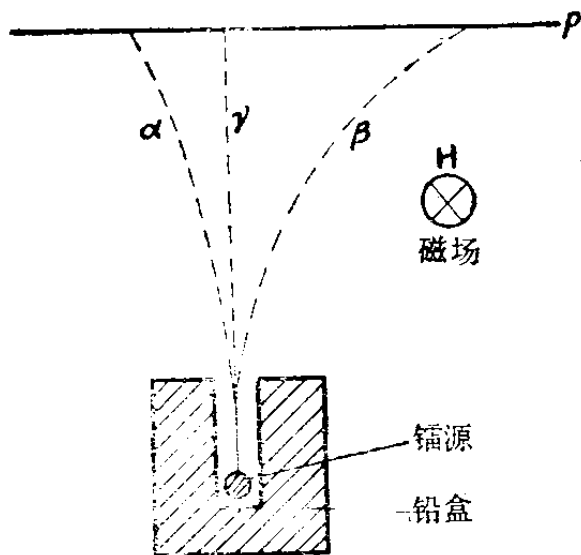


图 1—2 从镭源发出三种射线在磁场作用下的偏转
(磁场是垂直地指向页面的； P 是感光板)

注：电子伏特，是核物理中描述微观粒子的能量单位； $1\text{MeV} = 10^6\text{eV}$ 。

eV ——电子伏特， $1\text{eV} = 1.60 \times 10^{-12}$ 尔格。电子伏特(eV)的定义：当一个电子在电动势为 1 伏特的电场中，从负极到正极所获得的能量称为 1 电子伏特 (1eV)。

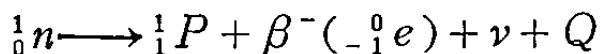
α 射线的主要特点是质量大，所带的电荷量也大，所以它对周围物质的电离能力很强电离密度最大，在空气中的电离密度为 $1 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4$ 离子对/厘米，因此， α 射程很短。例如，具有5.5MeV的 α 粒子在空气中的射程仅为4厘米，在生物组织中的射程仅为49微米，一张牛皮纸即可以将 α 射线挡住。所以，在卫生学上， α 射线的主要危害是内照射。

2. β 衰变

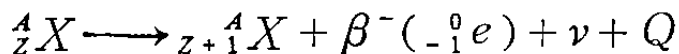
不稳定性核素的原子核发射出 β 粒子而变成另一种核素的原子核的过程称为 β 衰变。由于 β 粒子是电子，包括负电子和正电子，所以 β 衰变包含三种形式：

(1) β^- 衰变

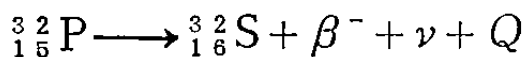
不稳定性原子核中，由于中子过多，原子核自发地发射出一个负电子（即 β^- 粒子）而使原子核的质子数增加1（同时中子数减少1，核的总质量数不变），即新生成的子核素的原子核电荷数比母核增加1，这个过程称为 β^- 衰变。 β^- 衰变的实质就是核里面1个中子转变为一个质子：



式中 ${}_0^1n$ 、 ${}_1^1P$ 分别代表中子和质子，它们的质量几乎相等，但中子不带电，而质子带一个正电子的电量； ${}_1^0e$ 代表电子，其静止质量为零，带负电荷； ν 为中微子，也是一种基本粒子，是静止质量为零的中性粒子； Q 代表衰变能量，它是 β 粒子和中微子所具有的能量的总和。 β^- 衰变可以用下式表示：



例如：磷-32转化为硫-32就是 β^- 衰变的过程：

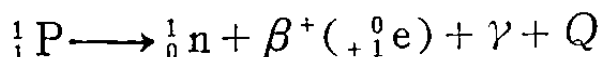


当中微子 ν 所带的能量近乎零时， ${}_{15}^{32}\text{P}$ 所发出的 β^- 粒子

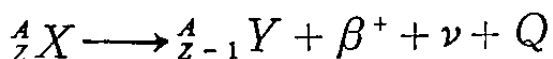
具有的最大能量可达1.71MeV。

(2) β^+ 衰变

不稳定性原子核发射出一个 β^+ 粒子而转变为原子序数减少1但质量数不变的子体核素，此过程称为 β^+ 衰变。该衰变的实质是不稳定性原子核里面由于质子过多而产生质子自发地转变为中子的过程：



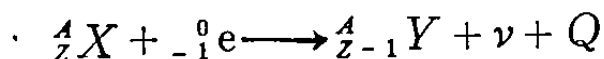
β^+ 衰变可以用下式表示：



例如，氮-13衰变为碳-13时，就是 β^+ 衰变，此过程中产生的 β^+ 粒子最大能量可达1.91MeV。

(3) 电子俘获

电子俘获是不稳定性原子核俘获其某一轨道（一般是K轨道）上的一个电子而使原子核中的一个质子变成一个中子，同时放出一个中微子的过程，即：



例如， ${}_{26}^{55}\text{Fe} + {}_{-1}^0\text{e} \longrightarrow {}_{25}^{55}\text{Mn} + \nu + Q$ 就是电子俘获过程。

电子俘获发生后，某轨道上少了一个电子，留下空位，外层轨道上的电子将发生跃迁来填补空位，并将其多余能量以标识X射线的形式辐射出来，或者这个多余的能量传到另一个电子使之脱离轨道成为自由电子（这个电子称为俄歇电子）。

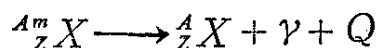
因此，发生电子俘获的原子核其原子中总伴随有标识X射线发射或俄歇电子。例如，上述例子 ${}_{26}^{55}\text{Fe}$ 就是放射俄歇电子，而 ${}_4\text{Be}$ 发生电子俘获时就有能量为477eV的X射线发射。

β 射线的实质是电子流。由于 β 粒子所带的电量仅为 α 粒子的一半而质量又极其微小（约为 α 粒子的1/8000），所以 β 射线对周围介质的电离能力比 α 小得多。例如， β 射线在空气中比电离值分布在60~700离子对/厘米，而 α 是 10^4 离子对

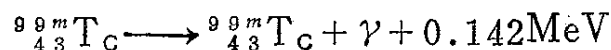
／厘米以上。但 β 射线的射程比 α 长得多，例如，对于能量为5.5MeV的 α 粒子，在空气中的射程为4厘米；而能量为5 MeV的 β 粒子射程可达19米。

3. γ 衰变

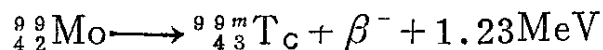
γ 衰变是不稳定性核素的原子核在发生 α 或 β 衰变后，子核素的原子核的能态处于激发态。这种状态是不稳定的，当该原子核跃迁到基态或低能级态时，将多余的能量以 γ 射线的方式释放出来而变成一个稳定能态的核，这过程称为 γ 衰变。如果子体核素原子核处于激发态的时间较长（例如大于 10^{-9} 秒），可以把 γ 衰变的半衰期测量出来。这种半衰期比较长的激发态核素就是其基态核素的同质异能素。例如， ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ 就可以称做激发态核素，它是 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ 的同质异能素，这类型的同质异能素是纯 γ 衰变的放射性核素。根据上述， γ 衰变可以用下式表达：



式中 Q 是 γ 射线的能量。例如上面提到的 ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ 的 γ 衰变可写为：



上式中 ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ 是从“钼-锝”发生器中，由 ${}^{99}_{42}\text{Mo}$ 衰变来的：



${}^{99}_{42}\text{Mo}$ 的半衰期66小时， ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ 的半衰期为6.6小时，而 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ 也是不稳定性核素，但半衰期很长，可达 2.15×10^5 年。

“钼-锝”发生器是目前临床医疗与科研上放射性核素的主要来源。

γ 射线的实质与X射线一样，都是如同光和热一样的电磁波，只不过是波长不同而已。与 α 、 β 相比， γ 射线是由 γ 光子构成的，本身不带电，不能直接产生电离，在物质中有很强的贯穿能力，例如在空气中， γ 射线射程可达几百米。

如果说 γ 与X射线有差别的话，那么其来源是最主要的差别： γ 射线一般称为核射线，它来自原子核；但X射线主要来自原子范围而不是核。

综上所述，三种不同衰变类型发射三种不同的射线，它们各有不同的特性，可以简单地概括为表1—1所列。

三种射线基本特性比较 表1—1

射线名称	实质	类似表示	荷电情况	电离本领	穿透能力	主要危险
α 射线	氦核 粒子流	${}^4_2\text{He}$	+ 2	强	最弱	内照射
β (β^- 、 β^+) 射线	高速 离子流	$-{}^0_1\text{e}$ 或 $+{}^0_1\text{e}$	∓ 1	较强	较强	内、外照射 均有
γ 射线	电磁波		0	只能间接 电离	强	外照射

(五) 放射性核素原子核的衰变规律

原子核的稳定性是由核内中子、质子的数量以及其内部矛盾运动所决定的。不稳定性核素的原子核的衰变与外界温度、压力以及物质状态（如固态、液态和气态等）等无关。对于某一个不稳定性原子核来说，其衰变的产生是一个随机的过程，我们不可能预言某一个不稳定性原子核在某一时刻发生衰变。而随机过程是遵循统计规律的，大量实验表明，对于一个包含许多不稳定性原子核的群体，随时间的增长其核数目不断减少，如果将不稳定性原子核的数目 (N) 与时间 (t) 的关系描述在坐标纸上，可以得到如图1—3所示：

1. 衰变规律

设有一个不稳定性核素的样品，其中不稳定性原子核群体中，在开始时刻（即 $t = 0$ ）有 N_0 个原子核，在 t 时刻有 $N(t)$ 个原子核。在时间从 $t \rightarrow t + dt$ 这个间隔里，不稳定性原子核减少（即发生衰变）了 dN 个，显然 dt 与 dN 这两

个增量是相反符号的， dt 是正值与 dN 是表示减少的应带负号，即不稳定性原子核数目随时间的增长而不断减少，这可以从图 1—3 实验结果看到 dN 可以用下列等式得出：

$$dN = -\lambda N(t) dt \quad (1-1)$$

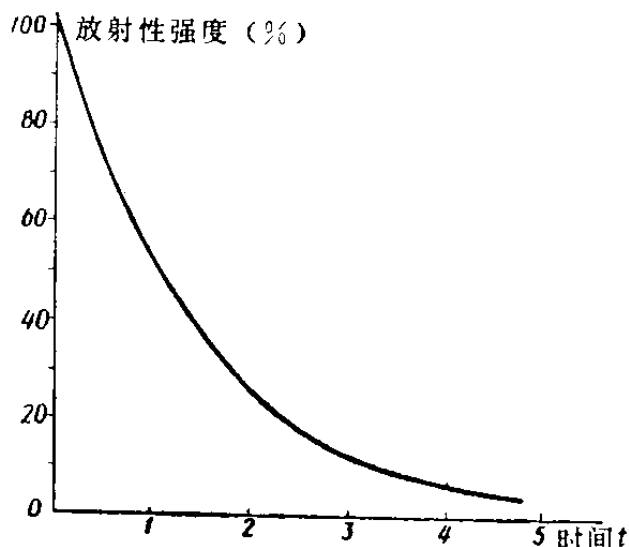


图 1—8 放射性衰变曲线

(1—1) 式描述在时间间隔 dt 里，不稳定性原子核减少的个数等于 t 时刻不稳定性核个数与 dt 和 λ 的乘积，式中 λ 是一个常数。从(1—1)式中，可看出 $\lambda = \frac{-dN/dt}{N(t)}$ ， λ 描述每一个不稳定原子核在单位时间里的衰变几率，实验中发现，对于一放射性核素， λ 是个常数，不同的放射性核素有不同的 λ 。

从(1—1)式中还可以变为下列等式：

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N(t) \quad (1-2)$$

(1—2) 式中 $\left(-\frac{dN}{dt}\right)$ 表示在单位时间里原子核减少的个数，即衰变的个数，以前称这个量为放射性强度，现在统一称为活度并记以 A ，即：

$$A = \left(-\frac{dN}{dt}\right) = \lambda N(t) \quad (1-3)$$

(1—1) 式表示的核衰变规律是微分量, 如果将 (1—1) 式变化为: $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$, 并对两边进行不定积分, 然后利用初始条件: $t=0$ 时, $N=N_0$ 则可以得到核衰变规律的积分形式:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-4)$$

$$(1-3) \text{ 式 } A = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \\ = A_0 e^{-\lambda t} \quad (\lambda N_0 = A_0) \quad (1-5)$$

(1—4) 和 (1—5) 两式是等效的, 都描述不稳定性核素原子核的衰变规律。(1—4) 式描述 t 时刻不稳定性原子核的数目等于 $t=0$ 时刻原子核的个数乘以一个时间衰减因子; (1—5) 式描述的是 t 时刻不稳定性核素的活度等于 $t=0$ 时的活度乘以一个时间衰减因子。

2. 半衰期

半衰期是描述放射性核素一个重要的物理量。不同的放射性核素有不同的半衰期, 它描述这种放射性核素由于衰变减少一半所需要的时间, 是放射性核素的特征常数之一。从

(1—4) 式可以看到:

$\frac{N(t)}{N_0} = \frac{1}{2}$, 即 $e^{-\lambda t} = \frac{1}{2}$ 这时的 t 便是该放射性核素的半衰期, 所以可以写为:

$$e^{-\lambda T_{1/2}} = \frac{1}{2} \quad (1-6)$$

这里我们用 $T_{1/2}$ 来表示半衰期, 从 (1—6) 式可以得到:

$$\lambda T_{1/2} = \ln 2 = 0.693 \\ T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}, \text{ 或 } \lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} \quad (1-7)$$

将 (1—7) 式 $\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$ 代入 (1—4) 式可以得:

$$N(+)=N_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot t} \quad (1-8)$$

同样道理可以得到

$$A(t)=A_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot t} \quad (1-9)$$

(1-9) 式是很有用的关系式。它提供计算任何时刻放射性核素活度的依据。如果以 $A(t)/A_0$ 和 $t/T_{1/2}$ 为坐标, 在半对数纸上可以得到图 1-4, 它描述放射性核素随时间增长活度减少的情况, 也是一个有用的工具。只要知道该核素的半衰期和时间 t , 便可以查出 $A(t)/A_0$ 的值, 再由该放射性核素开始时的活度 A_0 , 便可计算出 $A(t)$ 值。图 1-4 中该坐标 $n=t/T_{1/2}$

二、放射性活度及单位

(一) 放射性活度的定义

放射性核素只有在其原子核产生衰变时才有射线射出, 所以放射性核素的放射性(强度)大小与该核素的衰变常数 λ 有直接关系。从 $A=\lambda N$ 这个等式中可知, 对于相同的 N , λ 越大其放射性就越强。现在用活度 A 来描述不稳定性核素发射出射线的强弱, 其定义是: 放射性核素的原子核单位时间里产生衰变的数目称为放射性活度。

(二) 放射性活度单位

1. 贝可

1974年国际辐射单位和测量委员会建议放射性活度的国际制单位(SI)是秒⁻¹, 符号为s⁻¹, 专用名称是贝可勒尔缩写为Bq。我国法定计量单位中, 规定将Bq写为贝可(Bq), 根据定义, 1Bq=1次核衰变/秒。

2. 居里