

上海第一医学院
师资进修教材

医用生物物理技术(二)

同位素技术在医学和生物学中的应用

1982

817
3
06

医用生物物理技术(二)
同位素技术在医学和生物学中的应用

编者：上海第一医学院
生物物理教研组同位素实验室

印刷：上海第一医学院印刷厂

1982年9月第一版 第一次印刷

书号(2339—8216—1)



前 言

同位素的应用是原子能利用的一个重要方面，也是现代医学的重要内容。

同位素在医学中的应用是研究核素及核技术（包括加速器）的医学应用及其理论基础的科学。它不仅为临床医学和基础医学的研究开辟了新途径，而且对于认识生命现象的本质，弄清疾病的病因和药物的作用原理都有重要作用。

我国开展同位素应用工作始于1956年，虽只有廿多年，但发展极为迅速。各种类型的扫描机，功能测定仪和同位素测量仪器已成批生产，并用于临床。医用的放射性核素、放射源、标记化合物及放射性药物生产和使用不断增加，在某些疑难疾病的诊断和治疗方面取得优异成效。在基础医学方面，液体闪烁测量和放射自显影术已广泛使用，很多核素和核技术已成为医学研究的重要工具和手段，在肿瘤、计划生育、心血管疾病、内分泌疾病、针麻原理和中医基础理论等医学重点课题研究中发挥越来越大的作用。它不仅是医学基础学科、生物化学、药理、生理和病理研究的重要手段，也是近几年来新兴边缘学科分子生物学、基因工程、分子免疫学等领域中必不可少的重要手段。

为了帮助医药院校学生、研究生、进修生和临床研究工作者学习同位素医学应用的基本理论和原理，特编写本讲义。由于我们水平有限，错误之处敬请指正。

一九八一、十一

目 录

第一章	原子核物理基础知识	(1)
第二章	放射性同位素测量	(15)
第三章	液体闪烁测量	(28)
第四章	放射性测量中的数据处理	(44)
第五章	放射性同位素的剂量和防护	(59)
第六章	标记化合物	(71)
第七章	同位素示踪法	(73)
第八章	同位素稀释法、竞争放射分析法和活化分析法	(79)
第九章	放射自显影	(84)
第十章	同位素技术在分子生物学中的应用	(89)
第十一章	放射性核素在临床诊断和治疗中的应用	(95)

第一章 原子核物理基础知识

科学的发展使我们获得很多关于原子的知识。业已证明原子有复杂的内部结构和运动，而且可以击破。化学已经阐明物体由元素构成的。原子是元素最小的单元。各种元素的原子结构与性质是有差异的。这就是说：不同类型的原子，例如碳和铁它们的最小单位是碳原子和铁原子，它们有各自的结构和特征，也都可以被击破，但击破以后分出来的粒子不再具有碳和铁的特性，已经不再是碳和铁了。各种原子都是由几种基本粒子组成。正是这些基本粒子构成多种多样的具有各种元素特性的原子。本章只介绍原子核的一般性质。

第一节 原子核的电荷、质量和大小

一、原子核的电荷

电荷是原子核的重要特征之一。因为原子是由原子核和核外电子所组成，是中性的，而核外电子带负电，所以原子核是带正电，并且所带的电荷量与核外电子的总电荷量相等。每个电子所带的电荷量 $e = 1.6021 \times 10^{-19}$ 库仑，这是最小的电量单位。原子核所带正电荷必定是最小电量单位的整数倍，这个数值称为原子核的“电荷数”。一个原子的原子序数 Z 就等于中性原子的核外电子数，所以原子序数与原子核的电荷数也是一致的。例如氢原子的原子序数 $Z = 1$ ，则氢原子核的电荷数为1，带一个单位的正电荷。铀原子序数 $Z = 92$ ，则铀原子核带92个单位正电荷，其核的电荷数为92。

二、原子核的质量

质量也是原子核的一个重要特征。原子核的质量近似等于原子的质量减去核外轨道电子的质量。又由于电子质量很小，一个电子质量差不多只有最轻的原子核的 $\frac{1}{1840}$ 倍，因而在粗略计算时，可以认为原子核的质量近似等于中性原子的质量。

衡量宏观物体的质量单位常用克，但用克来表示一个原子的质量显然太大了，例如铀原子是比较重的原子，但也只有 3.95×10^{-22} 克。可见用克作为原子质量单位是不方便的。1960年和1961年在国际物理和化学会议上分别通过决议作了关于原子质量单位的碳标准的规定。把 ^{12}C 原子的质量的十二分之一作为原子量单位，记为 $1.0000000\text{u}(\text{unit})$ 的简写，又称为碳单位。

根据精确测定，一个 ^{12}C 原子的质量为 1.9924×10^{-23} 克，由此可得，碳单位(u)和克(g)的换算关系：

$$\begin{aligned} 1 \text{ u} &= 1.9924 \times 10^{-23} \times \frac{1}{12} \text{ 克} \\ &= 1.66035 \times 10^{-24} \text{ 克} \end{aligned}$$

表1—1列出了一些原子的质量，各种原子的质量可查阅理化手册等有关材料。

从表1—1可见，用碳单位u表示的原子量都很接近于整数，这个整数称为原子核的

“质量数”以符号A表示。A是一个没有单位的整数。例如氢(^1H)的原子量为1.007825u, 质量数A = 1; 氧(^{16}O)的原子质量为15.994915u, 质量数A = 16。

表 1—1 原子质量表

符 号	天然同位素丰度 %	原子质量 u
e		0.000549
p		1.007276
n		1.0086654
^1H	99.985	1.0078252
$^2\text{H}(\text{D})$	0.015	2.0141022
$^3\text{H}(\text{T})$		3.01605
^3He	0.00013	3.0160297
^4He	100	4.002603
^6Li	7.42	6.01512
^7Li	92.58	7.01600
^{12}C	98.89	12.00000
^{13}C	1.11	13.003355
^{16}O	99.759	15.99491
^{17}O	0.037	16.99913
^{18}O	0.204	17.99916
^{40}Ar	99.60	39.96238
^{39}K	93.70	38.96370
^{40}K	0.00118	39.96400
^{40}Ca	96.97	39.96259
^{54}Fe	5.82	53.93961
^{56}Fe	91.66	55.93493
^{57}Fe	2.19	56.93539
^{58}Fe	0.33	57.93327
^{234}U	0.005481	234.04097
^{235}U	0.714	235.0439
^{238}U	99.28	238.0508

核电荷数和质量数都是原子核的最基本特性。由各种特定数目的中子和质子组成的核, 统称为“核素”(Nuclide)。我们可以按照一个原子核的电荷数和质量数来简单标记一个核素, 如果某一核素的元素符号为X, 其核电荷数为Z, 质量数为A, 那末这个核素可以标记为 ^A_ZX , 这称为核素符号。

核素符号有时也可以用来表示原子核。由于一个元素的原子序数Z总是确定的, 因而核素符号也常可简化为 ^AX 表示。例如: 核电荷数为8, 质量数为16的氧原子或原子核, 可

以用核素符号 $^{16}_8\text{O}$ 表示,或记为 ^{16}O 。 $^{235}_{92}\text{U}$ 或 ^{235}U 表示质量数为235的铀原子或原子核。

如果两个原子的原子序数不同,就属于不同的化学元素,在化学性质上表现出很大的差别。例如 $Z=1$ 的原子是氢,是一个很活泼的气体。 $Z=2$ 的原子是氦,则是一种惰性气体。如果原子序数相同,而质量数不同的原子,这些原子在元素周期表中占据着同一个位置,因而也称为同位素。原子的化学性质主要与原子序数即与核电荷数有关,而与原子质量关系极微。但原子的核性质方面,则不仅与核电荷数有关,而且与核质量也十分有关。因为同位素原子在化学性质方面往往极为相似,但在核性质方面则仍会表现出很大的差别。例如 ^1_1H 和 ^2_1H 是氢的同位素,化学性质十分相似。在核性质方面, ^1_1H 很容易吸收中子,而 ^2_1H 则不容易吸收中子。 ^2_1H 所组成的重水是建造反应堆时作为减速剂。

自然界存在的某种元素中,往往是由几种同位素所组成,并且各同位素的含量有一定的比例。例如自然界存在的氧有三种同位素: ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O 。它们的天然含量分别为99.985% (^{16}O), 0.037% (^{17}O), 0.204% (^{18}O)。某一元素内所含有的各种同位素的百分比称为同位素的丰度。表1-1也列出了某些元素的天然同位素丰度。

三、原子核的大小

测量各种原子核的大小,其半径都在 10^{-12}cm 到 10^{-13}cm 范围内,测量的结果显示出各种原子核的半径 R 与原子的质量数 A 有关。

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

其中 r_0 是一个常数,近年来较为精密的测量结果表明 $r_0 = 1.20 \times 10^{-13}\text{cm}$ 即

$$R = 1.20 \times A^{1/3} \times 10^{-13}\text{cm}$$

这关系表明了原子核的体积是与原子核的质量成正比的。

10^{-13}cm 也被定为量度原子核大小的长度单位称为“费米” fm ,

$$1 \text{ fm} = 10^{-13}\text{cm}$$

第二节 原子核的组成

原子核主要是由质子和中子两种粒子组成。质子就是带有一个单位正电荷的氢核。中子是质量为1.0086654质量单位的中性粒子。由于这两种粒子的质量数都为1,所以原子核的质量数 A 也代表构成该原子核的质子和中子总数。表示原子核电量 Z ,也能代表核内质子数。 $N = A - Z$ 是核内的中子数。质子和中子统称为核子。

下面介绍几个常用术语:

1. 核素(Nuclides):

具有特定特征的某种原子。国际上表示核素的方法是把质量数 A 放在元素化学符号的左上角,而把原子序数 Z 放在符号的左下角,写成 ^A_ZX 。

2. 同位素(Isotopes):

原子序数 Z 相同而质量数 A 不相同的核素称为元素的同位素。一种元素的同位素在周期表上占有同一个位置。如氢有三种, ^1_1H 、 ^2_1H 、 ^3_1H 。

3. 同质异能素(Isomers):

原子序数 Z ,质量数 A 相同,但能量状态不同的核素。其中处于高能态的核素称为该元素的同质异能素,如 $^{99m}_{43}\text{Tc}$ 就是 $^{99}_{43}\text{Tc}$ 的同质异能素。 m 代表亚稳态(metastable state)。

4. 同中子异荷素(Isotones):

原子序数 Z 不同而中子数 N 相同的核素如 ${}^2_1\text{H}$ 和 ${}^3_2\text{He}$ 。

5. 同量异荷数(Isobar):

质量数 A 相同但 Z 值相不同的核素如 ${}^6_3\text{Li}$ 和 ${}^6_4\text{Be}$ 和 ${}^6_2\text{Be}$ 。

6. 放射性核素:

目前已发现约2000种核素,其中将近300种核素是稳定的,其余都是不稳定的。不稳定的核素就是放射性核素(习惯上称放射性同位素)。所谓放射性,它是指物质自发地(不受外界理化因素影响)不断地射出射线,并变成新的核素的性质。这种性质是由原子核内部的性质决定的,此种变化即称为核衰变。

第三节 结合能与质量亏损

使核完全分裂成质子与中子所必需作的功称为结合能。显然,结合能愈大,使核破坏也愈难。因此,结合能可表明核的稳定性。因为使稳定的核分裂成质子与中子要作功,所以生成的质子与中子的能量应大于原来核的能量。又因为根据质量与能量相互联系定律,当能量增加时质量总是成比例地增加,所以这些质子与中子的质量也应该大于原来核的质量。

组成核的各个质子及中子的质量总和与核的质量之差称为质量亏损。

$$\Delta m = (Zm_{\text{H}} + nm_{\text{n}}) - M_{\text{R}}$$

在此式中 Δm 为质量亏损, m_{n} 为中子的质量, n 为核中的中子数, m_{H} 为质子的质量, M_{R} 为核的质量。

显然,核愈稳定,即使其破坏所需的能量愈多,则质量亏损也愈大。因此,质量亏损也可表明核的稳定性。

根据质量与能量相互联系定律,结合能等于:

$$E_{\text{结合}} = \Delta m \cdot C^2$$

在此式中 Δm 为质量亏损, C 为真空中的光速。这一普遍的规律为实验事实所证实,并在一切原子核蜕变的过程中严格地被遵循着。

质量亏损的存在说明为什么同位素的原子量不是整数,而与整数略有出入。原子量不成整数是由于核子的结合能不同,即核的稳定程度不同。

第四节 原子核的衰变类型

放射性核素放射出来的射线分三种:

α 射线:是由带正电的 α 粒子组成。

β 射线:是由带负电的 β 粒子组成。

γ 射线:是不带电的 γ 光子(电磁辐射)组成。

自然界存在的核素,有些能自发地射出射线,称为天然放射性核素,它们大约有58种。另一些放射性需要人工产生,称人工放射性核素。

在106种元素中通过实验发现,凡原子序数在83以上的元素,均有放射性元素,其中大部分是天然放射性核素。中等原子核的天然放射性核素主要有 ${}^{40}\text{K}$ 、 ${}^{87}\text{Rb}$ 、 ${}^{125}\text{Sn}$ ……此外,

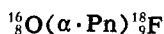
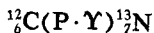
由于宇宙射线的作用，还形成 ^3H 、 ^{14}C ……等放射性核素。

第五节 人工放射性核素

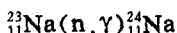
目前已有大约一千几百种人工放射性核素。这些核素都是用中子源产生的中子或各种加速器产生的中子、高速带电粒子以及光子等轰击靶子引起的核反应而获得的。

第一批人工放射性同位素是用 α 粒子轰击元素硼、镁、铝而获得的。在轰击铝时有中子飞出并得到放出正电子的同位素。 $^{27}_{13}\text{Al} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^1_0\text{n} + ^{30}_{13}\text{P}$ 。该反应的简单表示方法为：靶核素（轰击粒子·产生的核素）产生的核素，例如 $^{27}_{13}\text{Al}(\alpha, \text{n})^{30}_{13}\text{P}$ 。通常生产人造核素的方法主要有以下四种：

1. 带电粒子轰击的核反应如：



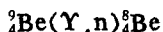
2. 俘获中子的核反应如：



3. 快中子的核反应如：



4. 高能光子照射的核反应如：



此外，还可以从天然放射性核素的裂变产物中获得，如 ^{131}I 就是从U裂变的产物中得到的。

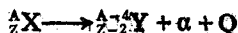
第六节 核衰变的方式

放射性核素是不稳定的，它自发地向外放射出射线，同时转变成新的核素。因此，原来的核素（母体）在数量上不断减少，而新核素（子体）不断生成，这个过程称衰变。衰变方式很多，有 α 衰变、 β 衰变、 γ 衰变。此外还有自裂变等方式。

一、 α 衰变

α 衰变就是从核中放射出 α 粒子。 α 粒子实际上就是氦核，由二个质子和二个中子组成（ ^4_2He ）因此 α 粒子的质量数是4，带二个单位的正电荷。 α 粒子的速率为2万公里/秒。

α 衰变后，母体的质量数A减少4，原子序数Z下降2，因此子体核素在周期表中位置前移两位。如果令X代表母体，Y代表子体，那么 α 衰变可用下式表示。



式中Q表示衰变时，核内释放的能量，称为衰变能，以镭为例，



还可以用图示法来表示 α 衰变，称衰变图。

图1—1示镭的衰变。图中箭头表示 ^{226}Ra 变成 ^{222}Rn 。箭头指向左下方表示子体核素的原子序数向前移位。 ^{226}Ra 衰变时放出的 α 粒子有二组，一组的能量是4.777mev占94.3%，另一

组的 α 粒子伴有0.1888mev的 γ 射线，其能量为4.589mev占5.7%。

图 1—2 是氡 $^{216}_{86}\text{Rn}$ 放射出 α 射线：

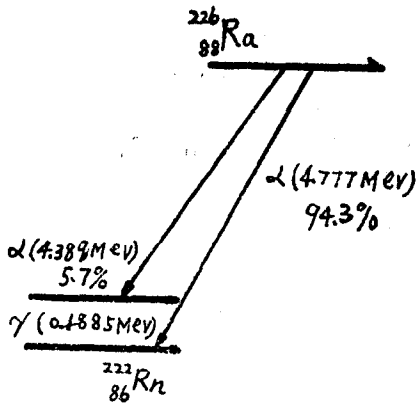
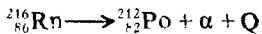


图 1—1 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 的衰变图

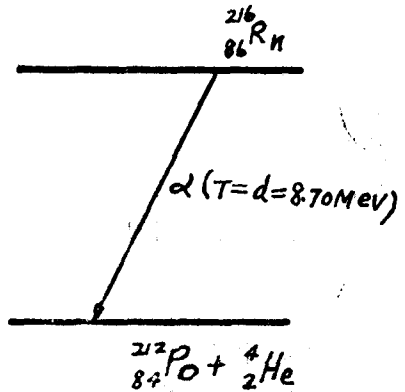


图 1—2 $^{216}_{86}\text{Rn}$ 的衰变图

二、 β 衰变

β 衰变包括三种类型：

母体核素放射出负电子称 β^- 衰变。

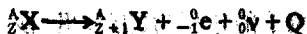
母体核素放射出正电子称 β^+ 衰变。

母体核素从核外俘获一个电子称电子俘获（也叫K俘获）。

以上三种类型的衰变有许多规律是相同的，所以统称为 β 衰变。由于原子核中是不存在电子的，所以在 β 衰变的过程中所放射的电子被认为是临时产生的。在 β^- 衰变时原子核中一个中子放射出一个负电子本身转变为质子。在 β^+ 衰变时，一个质子放射出一个正电子本身转变为中子。在K俘获时，原子核中一个质子吸收一个电子变为中子。

1. β^- 衰变

β^- 衰变是由于核内中子过多，致使核放射出电子，这是富中子核素的一个特征。在 β^- 衰变时，中子转化成为质子同时放射出一个电子和一个中微子 $n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}$



上式中 ^A_ZX 代表母体， $^A_{Z+1}\text{Y}$ 代表子体， ^-_1e 代表电子， $\bar{\nu}$ 是中微子。Q代表衰变能。图 1—3 是 ^{32}P 放射出 β 射线后生成子体 ^{32}S 的衰变图。箭头向右下方表示子体核素的原子序数往后移位。 β^- 衰变有三个生成物，即 $^A_{Z+1}\text{Y}$ ， ^-_1e ， $\bar{\nu}$ ，因而衰变能Q由此三个粒子带走。由于子核的质量大于 β^- 和 $\bar{\nu}$ ，它带走的能量很少，大部分能量均以 β^- 和 $\bar{\nu}$ 的动能形式带走。衰变能在 β^- 和 $\bar{\nu}$ 之间是任意分配的， β^- 粒子的动能可能从最小值（近乎零）到最大值（近乎Q）之间形成一个连续的能谱。如图 1—4 所示能谱的曲线有个最大值Q，大于此数测不到粒子，E值就是通常各种图表中给出的 β^- 粒子能量，E在值的1/3处，能谱曲线有一高峰，表示具有此种能量的粒子较多。

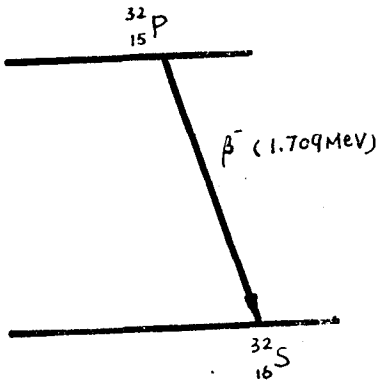


图 1-3 ^{32}P 的衰变图

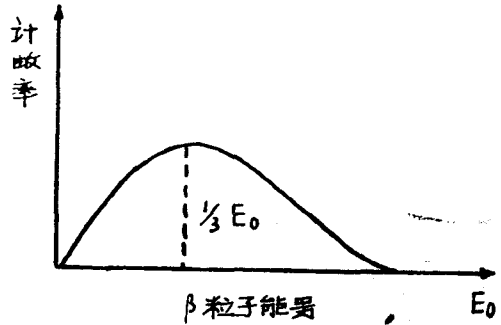


图 1-4 β 粒子能谱曲线

2. β^+ 衰变

β^+ 衰变是缺中子核素的衰变方式。这种方式属于人工放射性核素。 β^+ 衰变是核内一个质子转化成中子放射出一个带正电荷的电子(β^+)和一个中微子(ν)即 $\text{P} \rightarrow \text{n} + \beta^+ + \nu$ 。所以 β^+ 衰变可表示为 ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + \beta^+ + \nu + \text{Q}$ 。

以 ^{13}N 为例,衰变式为

$^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + \beta^+ + \nu + 1.1999\text{Mev}$,其衰变跟 β^- 衰变一样, β^+ 粒子的能量也是连续的,也有一个最大值Q, $\frac{1}{3}\text{Q}$ 处有一个计数率高峰,有时也可能伴有 γ 射线。

β^+ 衰变时放射出的 β^+ 粒子是短寿命的。当它和其它粒子相互作用而失去能量时,就会和一个负电子结合,转变成二个沿相反方向辐射的能量各为0.51Mev的 γ 光子(γ 射线),这种现象称为“湮没辐射”,是 β^+ 衰变的特征。

3. 电子俘获(EC)

例如: ${}^{55}_{26}\text{Fe} + {}^0_{-1}\text{e} \rightarrow {}^{55}_{25}\text{Mn}$

${}^{109}_{48}\text{Cd} + {}^0_{-1}\text{e} \rightarrow {}^{109}_{47}\text{Ag} + \nu$

只有人工放射性核素中才能产生。

电子俘获是指原子核俘获一个轨道电子而使核一个质子转变为中子和中微子,即 $\text{P} + \text{e}^- \rightarrow \text{n} + \nu$,从而生成一个新的核素。跟 β^+ 衰变一样,这种衰变方式也只发生在缺中子的人工放射性核素。一般被俘获的电子来自K壳层的几率最大,所以又称为K俘获。当K壳层电子被俘获后,外层电子有可能落到里面K层的空位上,而放射出子体核素的特征X射线。此外还有可能使能量转移给外层轨道电子使之成为自由电子而射出,这样射出的电子称俄歇电子(Auger electron)。

电子俘获后生成的子体如处于激发态,就有可能放射出 γ 射线回到基态。图1-6表示 ^{125}I 原子核俘获轨道电子衰变时可能放射0.109Mev和0.035Mev的 γ 射线。

三、 γ 衰变

γ 射线是硬电磁辐射的光子流,所谓光子是不带电的光速运动的粒子。一切可见光、紫外光、X线、 γ 线都是光子集合组成的光子流。 γ 线、最小能量为1Kev,大的可在几十万电子伏特以上。可见光只有几十电子伏特。因此, γ 线穿透力很强,而可见光穿透力很弱。

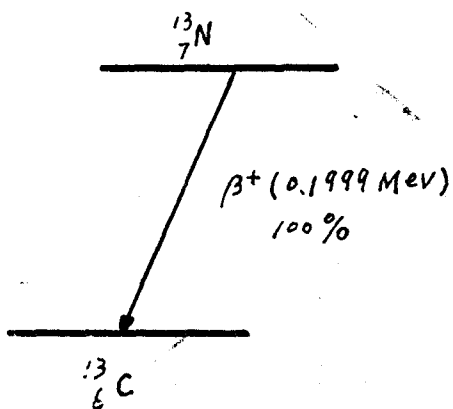


图 1—5 ^{13}N 衰变图

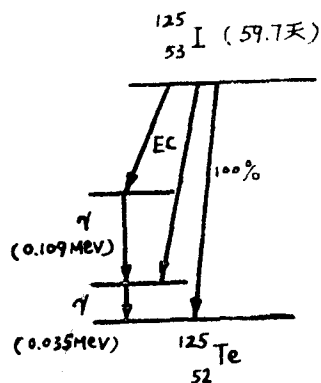


图 1—6 ^{125}I 衰变图

核子在核内的能量状态不是连续的，而是分立的，存在着一系列的能级。原子核从激发态通过放射 γ 射线回到基态，即由不稳定核变为稳定核，这种衰变方式称 γ 衰变。它的特点是核素的原子质量 A 和原子序数 Z 在衰变前后没有变化，只是能量有不同，因此可以称“同质异能跃迁”。有许多放射性物质在 α 衰变或 β 衰变后，原子核处于激发态（原子核也可通过其它方式被激发）。处于激发态的原子核，可通过发射 γ 射线回到基态。

一般来说，伴随 α 、 β 衰变的 γ 衰变是很快的，即处于激发态的时间十分短暂（ $<10^{-11}$ 秒），但也有一些核素的 γ 衰变延续时间较长，即核处于激发态时间较长，这种激发态称为亚稳态。

处于激发态的核，除了放射 γ 射线以外，还可以发射“内转换”电子，使核从激发态回到基态。此时，核的能量转移给某一轨道电子，结果放射出轨道电子，这种方式就是“内转换”。

表 1—2 几种主要衰变方式概况

衰变方式	辐 射			对核产物的效应	
	种类	电荷	质量	电荷变化 E	质量变化 A
α 衰变	α 粒子	+ 2	4	- 2	- 4
β 衰变	β^- 粒子	- 1	0	+ 1	0
	β^+ 粒子	+ 1	0	- 1	0
电子俘获	各种X射线	0	0	- 1	0
γ 衰变	γ 射线	0	0	0	0

第七节 衰变定律和放射性强度

放射性核素的衰变完全不以外加因素而改变，是核素本身的特性。有的核衰变得很快，有的则很慢，但是从每个个别的核素衰变过程中，可以发现核素衰变的规律具有统计学的性质，即对任何一种核素来讲，其中任意一个原子核的衰变可能在这时，也可能在那时发生，是随机的，但对于大量的原子核来说，衰变的快慢有一定的规律。

一、衰变定律

设样品在未衰变时的原子核数为 N ，经过 Δt 时间以后有 ΔN 个原子核衰变。根据统计规律， ΔN 和时间间隔 Δt 及未衰变的原子核数 N 成正比，即 $\Delta N \propto N \Delta t$

引入比例常数 λ 则： $\Delta N = -\lambda \cdot N \cdot \Delta t \dots\dots (1-1)$

式中右边的负号表示 N 值随 t 的时间增大而减少，如果所取的时间间隔很小则(1)式可写成微分方程：

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \dots\dots (1-2)$$

积分后得：

$$\ln N = -\lambda t + K$$

K 为积分常数。设 $t = 0$ 时，未衰变的核数为 N_0 ，即 $N = N_0$ 。代入上式求 K ， $K = \ln N_0$ ，上式可写成

$$\ln N = -\lambda t + \ln N_0$$

$$\text{或 } N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \dots\dots (1-3)$$

根据此式， N 值是按时间 t 的指数函数而变化的，这就是衰变定律。

在实际工作中，须知道的并不是未衰变的原子核数，而是单位时间内有多少核发生衰变，也就是 $\frac{\Delta N}{\Delta t}$ 。我们的定义放射性强度 A 等于衰变率即 $A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$ ，则 $A = A_0 e^{-\lambda t}$ ，式中 A_0

为 $t = 0$ 时的放射性强度。

在(2)式中定义 λ 为衰变常数，则 $\lambda = \frac{dN}{dt} / N_0$ ，它的物理意义即单位时间内每个核的衰变几率。各种放射性核素，它们的衰变都符合上述指数变化规律只是直线（对数座标）斜率不同，因此 λ 值可以表示放射性核素的特征。

除衰变常数以外还用半衰期表示放射性核素。它的定义就是放射性核素的数量因衰变减少到原来一半所需要的时间，即当 $t = T_{1/2}$ 时：

$$N = N_0 / 2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

解得此式得

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \dots\dots (1-4)$$

根据半衰期定义，放射性强度与时间的关系，可列出为 $A = A_0 / 2^n$ 。式中 n 为经过的半衰期从而可以测得不同时间内放射性衰变的表格。

此外还用平均寿命T来表示放射性核素。

平均寿命T的物理意义是母体在衰变前的平均生存期。它与半衰期的关系 $T = \frac{T_{1/2}}{0.693}$ ，与衰变常数的关系是 $T = 1/\lambda$ ，例：实验室有一参考源 ^{60}Co ，1969年1月测得其强度为 6×10^5 粒子数/分·2 π ，问在1975年1月使用时，其强度为多少？

查得 ^{60}Co 半衰期为5.26年，则 $A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-0.693 \frac{t}{T_{1/2}}}$ 。按题意 $A_0 = 6 \times 10^5$ 粒子数/分·2 π ， $T_{1/2} = 5.26$ 年， $t = 7$ 年（从1968到1975间隔）。

代入即得到 $A = 6 \times 10^5 \times e^{-0.693 \frac{7}{5.26}} = 2.4 \times 10^5$ 粒子数/分·2 π 。答：在1975年1月使用时，其强度为 2.4×10^5 粒子数/分·2 π 。

表 1—3 不同时间内放射性衰变

n	A/A ₀	n	A/A ₀	n	A/A ₀	n	A/A ₀
0	1.0000	0.7	0.6156	3	0.1250	7.9	0.0078
0.1	0.9330	0.8	0.5744	3.5	0.0884	8.0	0.0029
0.2	0.8750	0.9	0.5354	4	0.0625	9.0	0.0020
0.3	0.8122	1.0	0.5000	4.5	0.0442	10.0	0.0010
0.4	0.7579	1.5	0.3536	5	0.0312	11.0	0.0005
0.5	0.7071	2.0	0.2500	5.5	0.0221	12.0	0.0002
0.6	0.6591	2.5	0.1768	6.5	0.0156	13.0	0.0001

二、放射性强度及其单位

前面讨论中，我们以核辐射测量仪器所测得的计数率来表示放射性强度。实际上，由于仪器探测效率不同，同一放射源在不同的仪器中也会测得不同的计数率。因此计数率不能直接代表放射性物质本身的衰变。放射性强度应是指放射性物质在单位时间之内发生的衰变数，即应当以衰变率来表示。仪器直接测得的计数率必须经过一系列测量效率的校正，才能换算出放射性的衰变率。但是如果在相同的测量条件和测量效率下，所测得的计数率仍可以反映出放射性物质的相对强度大小。这在放射性测量中将深入讨论。

为什么一般都不是用放射性物质的重量或者原子数来代表放射性强度呢？这是因为放射性强度，即衰变率是与两个因素有关。一方面与放射源内的放射性原子数有关，另一方面也与衰变常数有关。一个放射源，即使它包含的原子数N很多，但如果每一个核在单位时间之内发生衰变的几率不大，即衰变常数 λ 值很小，则这个放射源在单位时间在发生衰变的总数，即衰变率还是不大的。因此放射性强度A与原子数和衰变常数有下列关系：

$$A = N\lambda$$

这个关系式十分有用。

放射性强度的单位是“居里”，(Curie)用字母Ci表示。1950年以后规定，一居里的放

射源每秒有 3.7×10^{10} 次衰变。

$$1 \text{ 居里(Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 次/秒}$$

此值相当于每分钟有 2.22×10^{12} 次核衰变，每分钟的衰变次数常简写为dpm即：

$$1 \text{ 居里} = 2.22 \times 10^{12} \text{ dpm}$$

工作中，有时用居里作单位显得过大，通常还采用毫居里(mci)和微居里(μ ci)等单位。

$$1 \text{ 毫居} = 3.7 \times 10^7 \text{ 次/秒} = 10^{-3} \text{ 居里}$$

$$1 \text{ 微居} = 3.7 \times 10^4 \text{ 次/秒} = 10^{-6} \text{ 居里}$$

第八节 放射线与物质的相互作用

放射性核素在衰变时，放射出 α 、 β 、 γ 射线，它们能穿透物质，并与物质相互作用，产生物理、化学和生物效应。了解放射线对物质的作用对探测射线和利用射线是必需的。鉴于 α 、 β 射线由带电粒子组成， γ 光子是不带电的，因此将分别讨论。

一、带电粒子和物质的相互作用

带电粒子和物质的相互作用可以从三方面来讨论：电离和激发，散射，吸收。此外还有韧致辐射等。射线与物质的相互作用包括二个相互联系的两个方面。一方面射线对物质的作用（引起物质电离，激发），另一方面是物质对射线的作用（引起射线减速，散射，吸收）。

1. 电离和激发

当带电粒子穿过物质时，它的能量会逐渐损失，速度渐渐减慢。主要原因是能量消耗在使物质的电离和激发上。

电离作用主要是带电粒子和构成物质的原子的轨道电子之间的静电引力使得轨道电子加速，克服核的束缚而成为自由电子逸出。这样就产生自由电子和正离子组成的离子对。这种电离作用称为直接电离。假如自由电子逸出原子后所带的能量足够大，它又可以按照上述方式，使物质产生离子对，这就是次级电离。据估计， α 粒子穿过气体所产生的离子对大约有60~80%是次级电离产生的。如果轨道电子获得的能量不足以使它摆脱原子核的束缚而变成自由电子，只是跃迁到较高的能级，这种情况称激发。电子从激发态回到基态时多余的能量就以光子形式辐射出来。

带电粒子穿过物质时，由于电离作用，在其径迹周围留下许多离子对。每厘米径迹中离子对的数目称电离比度。电离比度和带电粒子的速度有关，速度快的比度小，速度慢的比度大。这是因为速度快，带电粒子经轨道附近空间时间较短，因而使轨道电子电离机会减少。速度小，带电粒子经轨道附近空间的时间较长，情况刚好相反。下图表示 α 粒子射入空间时径迹上各点的电离比度的变化。由图1—7可以看出，开始时粒子速度较快，电离比度小。当快接近径迹末端时，因为速度较慢，电离比度增加很快，形成一个高峰。A曲线表示低能的 α 粒子，B曲线表示高能的 α 粒子。

β 粒子和 α 粒子相比， β 粒子的直接电离占20~30%，其余的是次级电离。由于 β 粒子的质

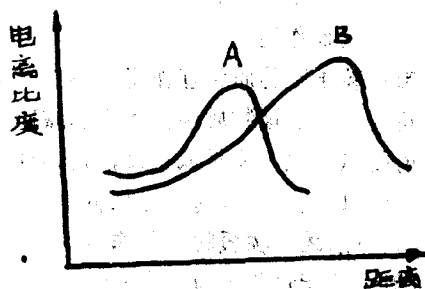


图1—7 α 粒子射入行径及其电离比度变化

量很小,它与相同能量的 α 粒子相比较,速度快许多。所以 β 粒子的电离比度比 α 粒子小许多。以1Mev能量的 α 粒子和 β 粒子相比较, α 粒子在空气中电离比度为40000对/厘米, β 粒子只有50,对/厘米。电离比度也和带电粒子的电量及被作用物的密度有关,因此 α 粒子的电离比度大。

粒子在物质中通过的最大路程称粒子的射程。射程的长短与粒子的能量和物质的性质有关。电离比度越大,单位路程上损失的能量越大,射程越短。因此, α 粒子的射程比 β 粒子射程短,例如9Mev的 α 粒子在空气中的射程为9cm,在生物组织约0.0011厘米。0.1Mev的 β 粒子在空气中射程约13厘米。

2. 散射

带电粒子在物质中通过时,受到核外电子特别是核的静电作用,会改变运动方向,这种现象称散射。

α 粒子比核外电子质量大7000倍,电荷数是2倍,所以核外电子不致引起 α 粒子的散射,因此 α 粒子的径迹大多数是一条直线。 α 粒子经过原子核旁时,由于静电斥力,会发生小角度偏转,只是当原子核的电量很多,而且 α 粒子又非常靠近时,才会引起大角度散射。

β 粒子的电量和质量与轨道电子一样所以散射很明显。

3. 吸收

物质对射入带电粒子的吸收作用可以认为是电离和激发作用的结果。当带电粒子通过一片薄层物质时,穿过的粒子数比入射的数少,这就是吸收。减少的粒子数中,除了散射以外,大部分被物质吸收。吸收作用随物质的厚度增加而增加,也和粒子的种类有关。例如 α 粒子在空气中通过时在前半射程几乎没有被吸收。在后半射程中,由于电离比度增加,空气的吸收作用才显示出来。 β 粒子的吸收不同于 α 粒子。由于入射的 β 粒子的能量是连续的,当它们通过物质时, β 粒子数的减少(即物质对 β 粒子的吸收)近似地服从指数函数规律。可表示为:

$$A = A_0 e^{-\mu d}$$

式中 A_0 为吸收前的放射强度。 A 为经过厚度 d 物质后的放射强度, μ 为线性系数(单位是1/厘米)如同半衰期概念一样,这里可以引入半吸收厚度($d_{1/2}$)概念,并且 $d_{1/2} = \frac{0.693}{\mu}$ 。

在射线测量时,必须考虑到吸收作用这一因素。实际上应用时,吸收物质的厚度用克/厘米²表示和这样厚度单位相对应的吸收系数称质量吸收系数 μ_m (单位是厘米²/克),它与线性吸收系数的关系是 $\mu_m = \mu/\rho$ 。 ρ 是吸收体的密度,所以 $A = A_0 e^{-\mu d}$ 可改成:

$$A = A_0 \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho}(\rho d)} = A_0 \cdot e^{-\mu_m d_m}$$

4. 其他作用

带电粒子跟物质相互作用,还有韧致辐射、光化辐射和契仑科夫辐射等。韧致辐射指高速运动的电子被物质阻挡而突然减速时,一部分动能转变为连续能量的电磁辐射。产生这种辐射的量与电子能量成正比,与物质的原子序数平方成正比。防护高能 β 射线要考虑韧致辐射,所以屏蔽高能 β 射线是用低原子序数的材料如有机玻璃、铝等。

二、 γ 射线与物质的相互作用

γ 射线的能量范围为几个Kev到几个Mev。它们对物质有三种作用。

1. 光电效应

当一个光子和轨道电子作非弹性碰撞时，可将它所有的能量($h\nu$)交给这个电子，使它脱离原子而运动，光子本身则整个被吸收。由于这种作用而被释放出来的电子，主要是K层电子。这些被打出来的电子称光电子，这种效应称光电效应。

光电子也和普通电子一样，在穿过物质时会逐渐损失能量而被吸收。发射光电子的原子也会发射特征X射线，俄歇电子而恢复正常。

光电子所带的能量由下式决定

$$E_i = h\nu - \Sigma_i \quad (i = K, L, M \dots)$$

式中 Σ_i 为K.L.M...层电子的电离能， h 为普朗克常数， ν 为光子的频率，($\nu = C/\lambda$ ， C 光速， λ 射线波长)。

光电效应的特征，一是原子中束缚越紧的电子发生效应的几率越大；二是与物质的原子序数关系十分密切，原子序数高的物质产生该效应几率大；三是与光子能量的三次方成反比。所以光子能量增高时，光电效应显著减少。当 γ 光子能量在2Mev以上，光电效应就十分不明显。

2. 康普顿——吴有训效应

康普顿效应是入射的 γ 光子和原子的一个电子作弹性碰撞，把一部分能量交给电子，使之与入射的 γ 光子成角度飞出(见图1—8)。 γ 光子本身则成为能量较低的新光子而发射。康普顿效应与光电效应不同处是 γ 光子很少与内层电子起作用，而是跟外层电子起作用，二是与物质的原子序数关系不大。

3. 电子对的生成

当入射光子能量大于1.022Mev时，它与物质相互作用，可产生一对正负电子而 γ 光子本身则消失(见图1—9)。这种作用称“电子对生成”。生成的正电子接着会发生“湮没辐射”，负电子跟上述的效应中负电子一样，当能量足够大时，也能引起物质的电离和激发。

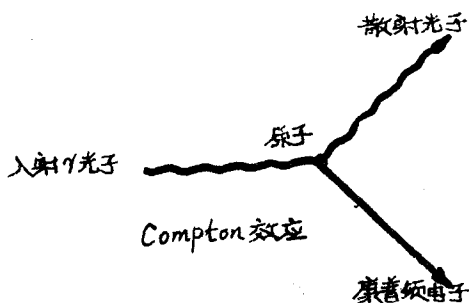


图1—8 γ 光子康普顿效应

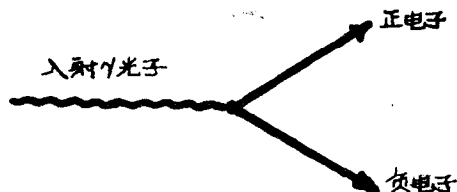


图1—9 γ 光子与物质的相互作用

这三种效应均与入射光子的能量有关，因此对于一定能量的 γ 光子与物质的相互作用，往往只以其中一种效应为主。

当 γ 射线穿过物质时，它的强度是随着所通过的厚度的增加而逐渐减弱，也是符合指数规律的。