

上海第一醫學院

SHANG-HAI DIYI YIXUE YUAN

放射医学讲义

FANGSHE YIXUE JIANGYI

(医疗系用)



1961年1月(918-6035-3)

緒 言

原子能的发现和利用，是全世界科学家的艰苦劳动的成果。这个成果可以造福于人类为和平建设服务。但帝国主义却企图使用原子武器发动侵略战争，达到其控制全世界的目的，因此它也可能给人们带来深重的灾难。原子能在我国的和平利用，是党对科学研究重视的直接成果。1956年，国务院在拟订的科学发展十二年远景规划中，将同位素在医学科学上的应用列为国家的一项重点任务，由于苏联的无私援助，1958年我国建成了第一个原子反应堆及回旋加速器。与此同时，相应地发展了放射医学这门科学，短短的四年间，我国的科学工作者在党的领导下，使这门科学取得了不少成绩，同位素在医学上的应用已广泛展开，目前国内应用放射性碘¹³¹测定甲状腺机能状态，治疗甲状腺机能亢进症及甲状腺癌，应用放射性磷³²治疗真性红血球增多症，慢性白血病及多发性骨髓瘤也取得了一定的疗效，钴⁶⁰的应用，使许多恶性肿瘤的患者延长了寿命，在肿瘤诊断上，也已取得了不少成绩，例如应用碘¹³¹及其他化合物测定肝癌肿及脑瘤，用磷³²作乳腺肿瘤，睾丸肿瘤，食道癌，胃癌等的诊断，并已成功地合成了多种的示踪化合物如碘¹³¹化入血清白蛋白等，对肿瘤，心血管等疾病等的研究，亦提供了有利的条件。

为了保证放射工作者的健康，党特别重视发展放射卫生防护工作，对每一种放射工作和同位素实验室，提出了严格的卫生学要求，放射工作者首先要接受放射卫生防护的教育，在工作中要严格地执行防护条例。

我院放射生物学的研究工作随着客观的需要亦必在迅速地开展中，医疗系放射医学课程，将着重地讲授同位素在临床医学上的应用，使学生能掌握同位素，临床诊断及治疗的基本方法及原理，并对放射性同位素在医学上的应用有概括的了解，至于对放射损伤及放射病及放射卫生学，也要求有基本知识，以培养其对放射线具有必要的防护知识。

本讲义是由四个教研组分别担任编号组合而成的，内容尚条理连贯。“放射损伤及放射病”和“放射治疗学”二篇较为简短扼要。“放射性同位素在临床医学上的应用”“放射卫生学”及“放射物理学”等三篇，是以多编少讲的原则汇集了较多的资料，其中除课堂讲授的为必需掌握的内容外，其余的均作为参考资料，无需强求精通，这门功课新开辟不久，教学内容在不断修订，希望大家多提出意见，以便今后改进。

放射医学讲义

目 录

緒言:

第一篇: 放射物理学

第一章: 物理学基础 1—13

第一节: 原子, 原子核结构和放射性 1

第二节: 放射过程的规律 3

第三节: 放射线和物质间的相互作用 8

第二章: 放射性的探测 12—28

第一节: 放射性探测的原理和种类 13

第二节: 几种常用放射性探测仪器介绍 24

第三章: 放射性测量技术 29—37

第一节: 放射性测量结果的数据处理 29

第二节: 放射性同位素放射性的绝对测量 32

第三节: 闪烁扫描在临床医学上的应用 36

第四章: 放射性同位素辐射剂量学 38—54

第二篇: 放射性同位素在临床医学上的应用

第一章: 概论 55—61

第二章: 放射性碘 62—98

第一节: 放射性碘的物理性质及其示踪化合物 62

第二节: 放射性碘在诊断上的应用 66

第三节: 放射性碘在治疗上的应用 90

第三章: 放射性磷 99—122

第一节: 放射性磷的一般性质 99

第二节: 放射性磷在诊断上的应用 102

第三节: 放射性磷在治疗上的应用 104

第四章: 放射性铁, 钠, 钴等在临床医学上的应用 123—142

第三篇: 放射治疗学:

引言 126—127

第一章: α 线治疗 128—144

第二章: 镭治疗 145—146

第三章: 钴治疗 147—156

第四篇: 放射损伤及放射病

第一章: 放射病基础医学 157—164

第二章: 急性放射病 165—169

第三章: 慢性放射病 170—173

第四章: 放射复合伤 174—178

第五篇：放射卫生学

第一章：概论 179—188

第二章：放射性同位素实验室的卫生要求 189—212

第三章：X射线及γ射线使用机构的卫生防护 213—227

第四章：核子武器的防御 228—250

附1：放射性同位在临床医学上的应用

附2：表 (259—276)

第一篇 物理学基础

第一章 放射物理学基础

第一节 原子核结构和放射

§1. 原子、原子核结构

地球上所有的物质是由各种不同的元素组成，构成某一元素的最基本的单位是该元素原子，原子是很小的粒子，它的直径只有 10^{-8} 厘米左右，原子的质量也十分小，一个氢原子的质量只有 1.6733×10^{-24} 克，就是最重的铀原子的质量也不过是 3.951×10^{-22} 克。

不同元素的原子是具有不同性质，但构造基本上是相同的。在原子中心是一个原子核，离开中心很远的地方为电子，它绕着原子核按一定轨道运行。原子核带正电荷，电子带负电荷，一个电子所带的电荷为 4.8028×10^{-10} 静电单位（当二个等量的电荷在真空中相距一厘米，二者之间的作用力是一达因时，每个电荷的电量叫做一静电单位电量），它的质量只有世界上最轻的原子——氢原子质量的 $\frac{1}{1840}$ ，通常用字如 e 来代表它，为了方便起见，又规定一种电量单位，把电子的电量叫做一个“电子单位”的电量，一个电子所带的电量，目前来说是世界上最小的电量，某一种东西所带的电量是电子的几倍，就说明它带几个电子单位的电量。

原子核带正电，质量和整个原子差不多，各种元素的原子核所带电量，刚好等于该元素在门捷列夫周期表上的原子序数，也就是说原子核所带正电荷的数量由绕核电子的数目决定，例如氢原子只有一个绕核电子，它的核带有 $1e$ 正电荷，换句话说，原子核所带的正电荷恰好和各电子所带负电荷的总和相等，形成中性原子，当原子失去或增加电子时就带有电荷而称为离子。

电子和原子核构成一个原子，二者的质量相差很远，原子核差不多具有原子的全部质量，而电子与核相比则轻得多。如氢原子核的质量是 1.67243×10^{-24} 克，而这一个绕核的电子质量为 9.1085×10^{-28} 克，二者的比是：

电子质量	9.1085×10^{-28}	$=$	$\frac{1}{1836}$
氢核质量	1.67243×10^{-24}		

原子序数大的元素，这个比值还要小，如铀原子的92个绕行电子的总质量和核的质量的比只有 $\frac{1}{4714}$ 。

核的质量几乎等于原子的质量，可是只占整个原子的极少一部分空间原子的直径约为 10^{-8} 厘米左右，而核的直径仅在 10^{-13} — 10^{-12} 厘米，因此在原子核和绕行电子之间，大部分空间是空着虚无物的。

原子核周围的每一个绕行电子都有它固定的轨道，越往外的轨道电子能量越高，电子可吸收外来的能量从较低的轨道跃至较高的轨道，此种情况即为激发。同样，如果能量较低的轨道没有电子，则较高的轨道电子亦可以跃到能量较低的轨道，电子多余的能量一般变成电磁波（光子）放射出来。

质子和中子相结合而构成原子核，因此又都称为核子。中子是一种不带电的中性粒子，它的质量是 1.647×10^{-24} 克，比氢核的质量略为重一些。在自然界中子并不单独存在，它是在原子核受了外来粒子的轰击而起了变化时，才从核里释放出来。中子在处于自然状态时是不稳定的，它要蜕变成一个氢核（质子），一个电子，和一个中微子。蜕变的半衰期为12.8分钟，若用公式表示则：



n —— 中子

p —— 质子

e —— 电子

ν —— 中微子

Q —— 蜕变过程中释放出的能量。

中微子是一种质量十分微小的中性粒子，它的质量比电子质量的 $\frac{5}{10000}$ 还小。

一个原子核都是由若干个质子和 $A - Z$ 个中子所组成，质子和中子的数目总和等于质量数，质子数等于核的电荷数。例如铀 238 (${}^{238}_{92}\text{U}$)，铀 235 (${}^{235}_{92}\text{U}$) 是分别由 92 个质子和 146 个中子，92 个质子和 143 个中子组成的。

核子间除了有质子-质子之间的静电排斥力外，尚存在着一种很强的具有引力性质的力，叫做核力。对稳定的核而言，核力克服了静电斥力而使核子（中子，质子）紧紧地结合在一起。核力的特点是大而力程（力作用所能达到的空间距离）短，当核子间距离大于 5×10^{-23} 厘米时，作用力就微不足道，对各核子而言，核力大小都大致相等。

所谓同位素，就是原子数目相同而中子数目不同的原子，也就是原子序数相同，化学性质也相同（在周期表上的地位相同），而质量不同的原子就叫做某元素的同位素。历史上，人们利用了质谱仪首先发现元素氦原来是三种氦原子的混合物，它们的质量是 19.998860，21.998270，和 21.000589，上面所说

的三种氖原子。氖 20 (${}_{10}\text{Ne}^{20}$)，氖 22 (${}_{10}\text{Ne}^{22}$) 和氖 21 (${}_{10}\text{Ne}^{21}$) 就是氖的同位素。元素符号左上角的数就是质量数。

上述三种氖的同位素，在自然界中以某种一定的比例相混。氖 20 占氖原子总数的 90.92% ，氖 22 占 8.82% ，而氖 21 占 0.26% 。进一步的研究证明：大多数元素都是由若干种天然同位素以一定比例混合而成。

稳定的和不稳定的同位素：核反应后的产物有很多是稳定的同位素，例如 $\text{Li}^7(\alpha, n)\text{B}^{10}$ ，硼 10 是稳定的同位素，但也有更多的产物是不稳定的同位素，例如 $\text{Cu}^{63}(\alpha, p)\text{Cu}^{64}$ ；

$\text{C}^{12}(p, n)\text{N}^{13}$ ， Cu^{64} 和 N^{13} 都是不稳定的同位素，它们将自发地衰变成其它同位素。不稳定的同位素又称为放射性同位素，应用核反应方法产生的，特称为人工放射性同位素，以别于在自然界中存在的天然放射性同位素。所谓稳定的同位素是指核结构不会自发地发生改变的同位素，而不稳定的同位素则与此相反，即使不受外在原因的作用，核的构造会自发地产生变化，在这变化过程中，核将放射出 α -射线（即 2He^4 ）或 β -射线（即电子）或 γ -射线（一种高能量的电磁波），或 β^+ -射线（即正电子），或者在核外俘获一个绕引电子，这些现象就统称为核衰变。

甲种射线是带正电的高速度粒子流，这种粒子叫做 α 粒子，它是氦原子核，质量为氢原子质量的4倍，带有二倍电子电荷的正电荷。它们从放射性元素的原子核中以高达每秒约二万千米的速率放射出来，它很容易被物质吸收一张纸就可以阻挡 α -射线的通过。

乙种射线是负电的高速粒子，这种粒子就是电子，速率为每秒钟二十多万千米，其穿透能力较 α -射线大，可以透过铝箔。

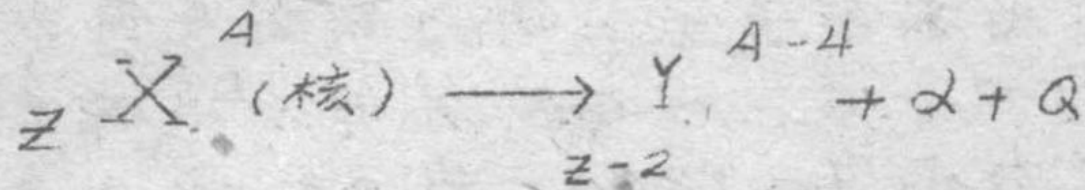
丙种射线是一种光子流，光子是不带电，以光速运动，粒子，一切可见光、紫外线、 γ 射线均是光子流，彼此区别在于光子的能量不同，丙种射线能量很大，约几十万电子伏特，平常可见光子的能量只有几个电子伏特。

第二节 放射过程的规律

§一、核衰变的种类

当原子放射 α 粒子时叫做 α 衰变。因为 α 粒子的电荷数等于二个单位，而质量数减少4个单位，所以衰变时原子核的电荷数减少 α 单位，而质量数减少4个单位。用 X 代表原来的原子核， Y 代表所产生的原子核，並以 Z 指标表原子核的电荷数

上指标表其质量数，则 α 衰变可用下式表示：



这里的 Q 为衰变能，它的值为母体核的质量和子体核及 α 粒子的总质量的差数，但实际计称中，应该用母元素的质量和子元素的质量及氦原子的质量来计称。如果要自发地发生 α 衰变时，则 Q 必须为正值。也即母元素的质量必须大于元素与氦原子的总质量，若 Q 为负值，表示不能自发衰变，必须吸收能量才能发生 α 衰变，作 α 衰变的天然放射性元素绝大部分是属于原子序数大于82的同位素。

由一种同位素放射出来的 α 粒子的能量是单一的，但也有些 α 衰变伴有 γ 射线的发生（如图1-1）。镭226的 α 衰变就有二种衰变方式，其中一种是伴有 γ 射线，在这种情况下 α 粒子就有如图所示的一种能量，但能量为4.777兆电子伏特的衰变要佔总强度的94.3%，而另一种衰变只佔总强度的5.7%，它的产生是由于镭放射出能量为4.589兆电子伏特的 α 粒子而变成处于激发状态的氡222，然后很快地跃进到222的基级（稳定状态）而放射出能量为0.188兆电子伏特的 γ 射线。

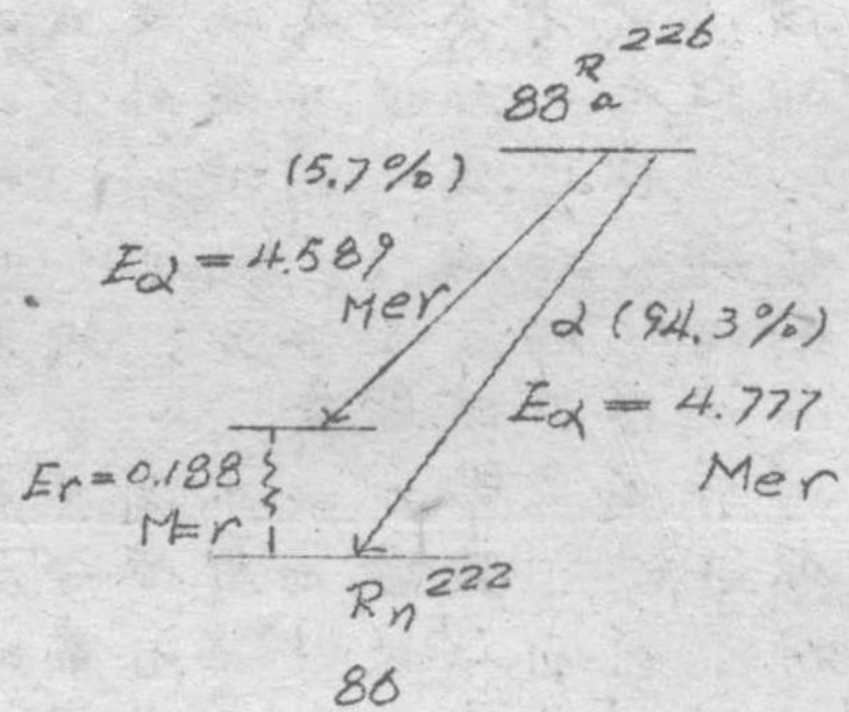
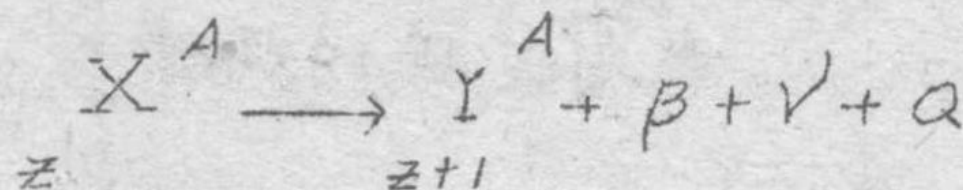


图1-1 Ra^{226}_{88} 的衰变图

当原子核放射 β 粒子时叫做 β 衰变。由于 β 粒子是电子，电子的质量要比原子质量单位小1840倍，所以它的质量近于零。而所带的电荷是一个基本负电荷的电量，因此当 β 衰变时，原子核的电荷数增加一单位，而质量保持不变。 β 衰变可用如下公式来表示：



式中符号 γ 是一种不带电的微小粒子，称为中微子。 Q 也是表示衰变能。要自发地发生 β 衰变， Q 也必须正值。由于电子的质量与核相比较起来要小得多，中微子的质量比电子又小得多，因此，从以上式可以看出，在 β 衰变时产生位于门德列也夫周期表中较原来元素后一个位置的元素。此外，还可以了解到每种

同位素衰变，一共有三个生成物，即 Y^M 、 e^- 和 γ 。自发衰变所放射出的能量也为三者所共有，所以，各生成物所带走的能量不是都固定的。也即所放射出 β 粒子的能量不是单一的，而是形成一个能谱。其分布情况如图 1~2。图中纵坐标代表具有不同能量的 β 粒子数相对值，横坐标代表 β 粒子的能量，其值从零一直到该同位素所特有的最大能量 E_0 。各种放射 β 粒子的同位素的 β 能谱的分布情况均相同，只是最大能量 E_0 。

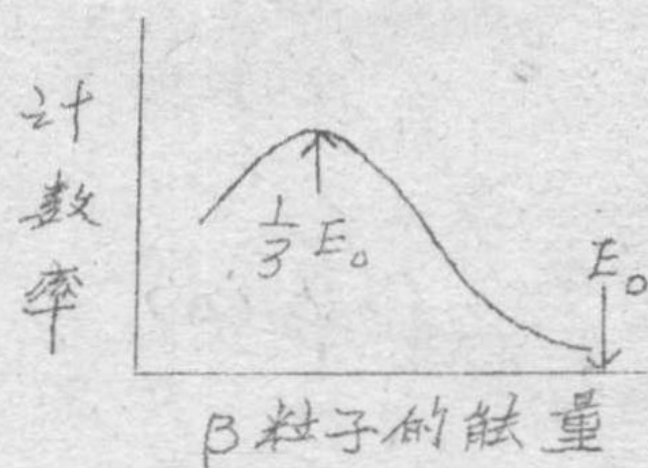


图 1~2 β 粒子的能量分布曲线

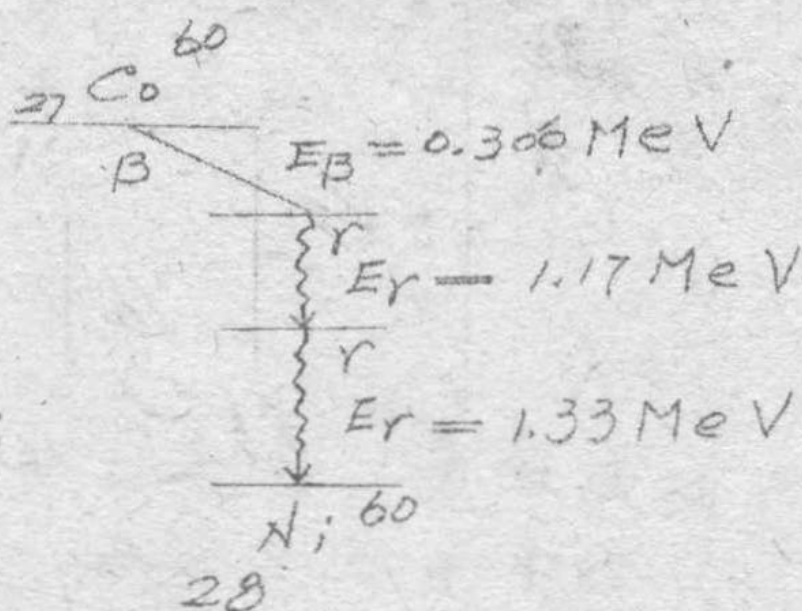


图 1-3 $^{60}_{27}\text{Co}$ 的衰变图

有所不同。 β 粒子的平均能量 E 约等于 $\frac{1}{3} E_0$ 。

许多 β 衰变的放射性同位素只放射 β 粒子，而没有伴随其它射线如： $^{14}_6\text{C}$ 、 $^{32}_{15}\text{P}$ 、 $^{35}_{16}\text{S}$ 等，但更多的 β 衰变同位素有

γ 射线，这样的放射性同位素有的只有一组 β 粒子，即只有一个 E_0 值。如图 (1~3) 所示 $^{60}_{27}\text{Co}$ 的衰变，也有一些同位素的 β 衰变，放射出 2 组或 2 组以上的 β 粒子，即有 2 个或 2 个以上的 E_0 值。

γ 射线是一种从核的放出的电磁辐射，它的性质和伦琴射线十分相似，只是波长更短。与原子的能级一样，原子核也具有许多能级。当它由高的能级过渡到低能级时，放射出能量较大的光子。所以原子核发射 γ 射线后，原子核的电荷数和质量数都不会变化，只使核能量变小了一些，因而不产生新元素。 γ 射线的能量是单色的，可是是一个核衰变时，可能不只放出一个光子，因此，就有 2 组或 2 组以上能量不同的 γ 射线。

§二、放射性衰变定律

某原子核放射出甲种或乙种粒子以后，它自己变成别的原子核，就称为核衰变。实验证明，放射物质中所有的原子并不是都在同一个时间内进行衰变，而是按照一定规律进行衰变的。如将镭所衰变的一定量的氦和镭分开，并把之装入另一个密闭的容器里，那末，它在容器里的量，将不断按图 (1-4) 所示

规律衰变。经过 3.825 天之后将剩下原有剂量的二分之一，再经过 3.825 天剩下原来的 $1/4$ ，依此类推。时间 $t = 3.825$ 天是放射性镭的原子数减少到最初时半数所需的时间，叫做半衰期。半衰期越长，元素衰变得愈慢。

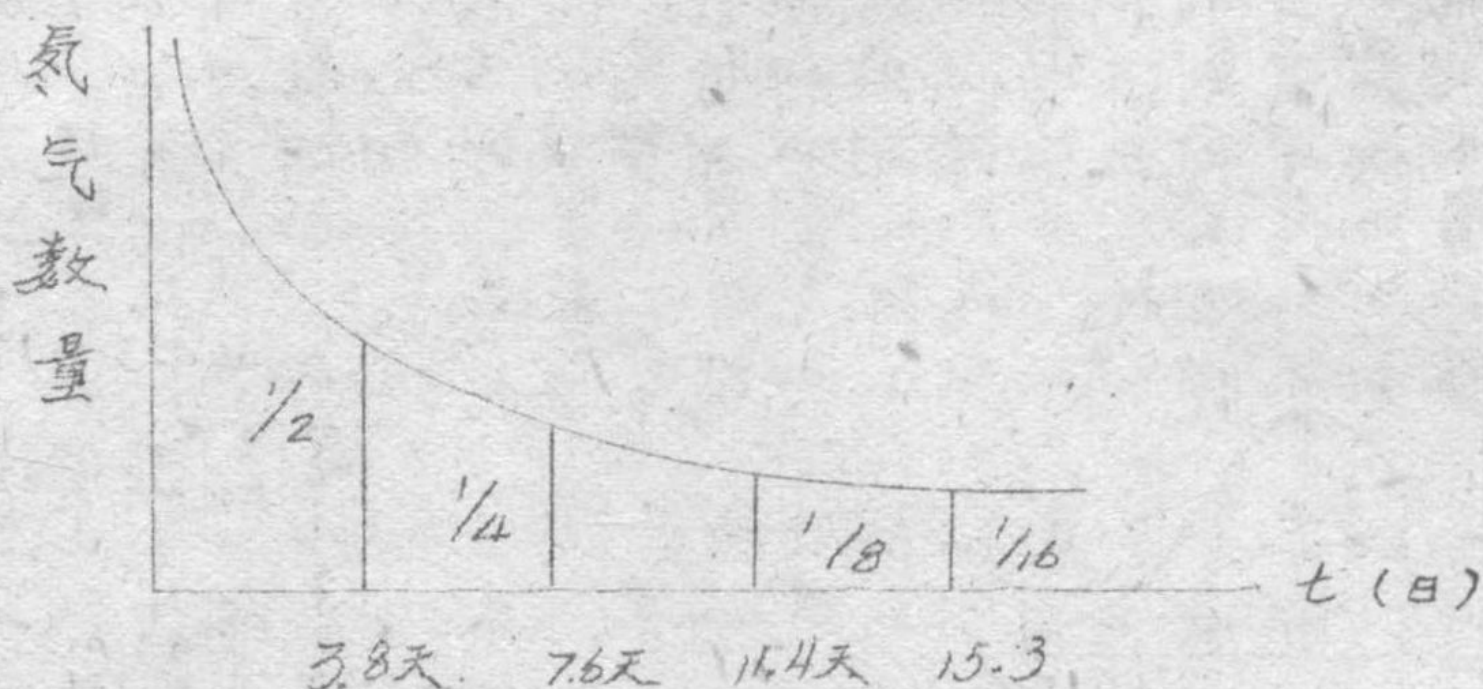


图 1-4

根据卢瑟福和索迪的理论，每秒衰变的原子数与在该时间将衰变的原子数成正比。设 Δn 表示在极短时间 Δt 内衰变的原子数目， N 表示现有的原子数目，则

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = -\lambda N \quad (1)$$

式中负号表示 N 的值随 t 的增大而变小， λ 是比例常数，叫做该元素的衰变系数，它对于一定的放射性元素来说，不受任何外界影响。 λ 总是一个常数。

$$\lambda = \frac{\frac{\Delta n}{\Delta t}}{N}$$

从上式可知衰变系数的物理意义表示单位时间内衰变的原子数是原有放射性原子数的几分之一。

若所取的时间间隔非常小则公式 (1) 可写成微分方程式 $dN/dt = -\lambda N$ 积分后得

$$\ln N = -\lambda t + K \quad (2)$$

K 为积分常数，假定当 $t = 0$ 时，未衰变核的总数为 N_0 ，即 $N = N_0$ ，代入上式求 K ，则 $K = \ln N_0$ ，所以上式又可写成

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

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

式中 e 为自然对数的底。

任何放射的质的放射性强度 I 以每秒衰变的原子数来衡量，如把公式 (3) 两边各乘以 λ 则得 $\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$ ， λN_0 和 λN 分别表示开始时和经 t 秒后每秒内衰变的原子数目，即开始时和经 t 秒后的放射性强度，分别以 I_0 和 I 表示，则得放射性衰变定律

$$I = I_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

这一定律对一切放射性元素都是正确的。

衰变系数 λ 与半衰期 t 都表示放射性元素衰变的快慢，它们之间的关系可由公式 (3) 求出。按定义 $t = t$ 时 $N = \frac{1}{2} N_0$ 。于是

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\text{所以 } t = \frac{\ln 2}{\lambda} = 0.693/\lambda \quad (5)$$

和 λ 一样， t 也是不受外界作用的影响而且和时间无关的恒量。不同放射性元素的 t 是不同的，自然界中各种放射性元素半衰期的长短相差很大，有的长达几十亿年，有的短到一秒的若干分之一。

在应用放射性物质时，还常用到平均寿命 T ，它的意义是放射质的原子在衰变前的平均生存时间。

$$T = 1/\lambda \quad (6)$$

假定原来未衰变的原子数为 N_0 ，在时间为 t_i 与 $t_i + \Delta t$ 的间隔内，原子核衰变的数目应为

$$-(dN/dt)_t = t_i \Delta t$$

这些原子核的寿命为 t_i ，因此平均寿命应为

$$T = \frac{1}{N_0} \left(t_1 \left(\frac{dN}{dt} \right)_{t_1} \Delta t + t_2 \left(\frac{dN}{dt} \right)_{t_2} \Delta t + t_3 \left(\frac{dN}{dt} \right)_{t_3} \Delta t + \dots \right)$$

$$= \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \frac{dN}{dt} dt = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$$

$$= \left(\frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} (-\lambda t - 1) \right) \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda}$$

即平均寿命等于衰变系数的倒数, 由式 (5) 得知平均寿命和半衰期的关系为

$$\bar{T} = \frac{t}{0.693} \quad (7)$$

放射性强度的常用单位是居里, 一块放射物质每秒有 3.7×10^{10} 个原子衰变则它的放射性强度是一居里, 居里的单位相当大, 因此通常还用毫居里和微居里等较小的单位。

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

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

放射性强度的大小和放射性元素的质量有关, 如有质量为 m 克的放射性元素, 则是放射性强度的居里数可按下法来计算

m 克质量的放射性元素所含有的原子数为 $N_A/M \cdot m$, N_A 是阿佛加德罗常数, M 为该放射性元素的原子量, 如该放射性元素的衰变系数为 λ 则其相应的放射性强度为,

$$I = \frac{\lambda N}{3.7 \times 10^{10}} = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \times \frac{N_A}{M} m = \frac{0.693}{3.7 \times 10^{10} t} \frac{6.023 \times 10^{23}}{M} m$$

$$= 1.13 \times 10^{13} \frac{m}{tM} \text{ 居里 (} t \text{ 以秒为单位)}$$

$$= 1.3 \times 10^8 \frac{m}{tM} \text{ 居里 (} t \text{ 以天 " ")}$$

$$= 3.57 \times 10^5 \frac{m}{tM} \text{ 居里 (} t \text{ 以年为单位)}$$

第三节 放射线与物质间相互作用

§一. 带电子和物质的相互作用

放射性同位素所放出的带电粒子 (α , β^- 和 β^+ 粒子) 通过物质时主要产生电离作用, 此外 α 粒子和某些物质作用时会产生核反应, 这里讨论主要是电离和物质对带电粒子的吸收。

(一) 电离: 当运动的带电粒子在物质中通过时, 由于它们带电因此对原子内的电子发生了电力作用。 α 粒子对电子是吸引, β 粒子对电子是排斥, 束缚的电子在电力作用下脱离原子成为自由电子, 而原子就变成离子。要把原子内的电子脱离

原子核对它的束缚，必须外加能量。在空气中产生一对离子所需平均能量为 32.5 电子伏特，此能量来源就是从入射的带电粒子得来的。如果束缚的电子所获得的能量还不能使它变成自由电子，而只是使它激发到更高的能级，这样处于激发状态的原子不能维持很久，将以辐射形式放出能量。因此二者总是相伴生的。

带电粒子所通过路径周围留下许多离子时，每厘米路径上所产生的离子对数称电离密度，它代表粒子对物质电离作用的大小。它和射线对生物的伤害机制有很密切的关系，不同种类的射线或能量不同的同种射线所产生的生物效应是不同的，有很大一部分原因是由于机体内所产生的电离密度不同之故。

电离密度和带电粒子的速率，电荷和物质的密度有关，粒子的带电量越大则作用于原子中电子的力大，速率小则作用原子的时间长，因此对物质的电离作用就大。物质的密度大也就是物质的电子密度大，因此所产生的电离密度也大， α 粒子比 β 粒子带电量小，并且速率慢，因此电离本领比 β 粒子大得多。

粒子在物质中所走的路程叫做粒子在该物质中的射程，射程的长短与物质的能量、质量及物质种类有关。电离密度越大，单位路程中能量损失也大，故粒子就不能维持很长的射程。单位路程上损失能量和物质的密度成正比，也就是说和物质单位面积的质量成正比。

α 粒子具有高的电离密度，但射程短即穿透力弱，它在组织中的射程为 0.03-0.07 毫米， α 粒子的危害较小，稍加防护（带手套）即可。内照射时因电离密度大，故危害性也就大。

对于 β 粒子或电子，电离情况基本上和 α 粒子是相似的。直接电离约佔 20-30% 其余为次级电离的作用，不过 β 粒子的电离比值和同能量的 α 粒子的电离比值相比要小得多。这是因为 β 粒子的速度比同能量 α 粒子的速度要大得多，即使在速度相等的条件下， β 粒子的电离比值仍然要比 α 粒子低得多。 β 粒子在物质中的射程比 α 粒子大，这是因为 β 粒子的速率大，带电量小，电离密度小的缘故，由于 β 粒子受到原子核的强烈散射而改变其原来运动方向，所以 β 射线在物质中的径迹和 α 的有些不同，它是弯弯曲曲的，而甚至折回的。在实际工作中采取两个数值来代表 β 粒子的能量，最大能量 E 。及平均能量 E （约为 $\frac{1}{3} E$ ）。在临床上 E 较常用，而防护上 E 较常用。如磷（ P^{32} ）所放射的 β 粒子的 $E = 1.01$ 兆电子伏特。

$E = 0.68$ 兆电子伏特。 β 粒子在空气中的射程可由 10 毫米到数米。 β 粒子在组织中的射程可以达到几个毫米，甚至 10 几个毫米。在外照射的情况下较 α 危害性大，对一般 β 粒子的防护只需几毫米铝片即可。

(二) 吸收：物质对于入射的带电粒子的吸收作用可以说是电离作用，散射作用和轫致辐射的结果。电离作用已如上述，带电粒子因电离而消耗的能量称为电离损失，散射作用系带电粒子在物质中通过时，因受原子核静电场的相互作用而改变其运动方向。散射同样能引起能量的损失。快速粒子碰到原子核受阻而以辐射形式放出能量，这种现象叫轫致辐射，这部份消耗的能量称为辐射损失。由于上述几种因素带电粒子通过物质时，能量不断损失，粒子数目逐渐减少亦即逐渐被吸收了， α 粒子因其本身为 He 核，于是俘获 2 个电子而成为 He 原子停留在吸收体内。 β 粒子失去能量后即成为一般电子停留在吸收体内。

吸收作用和粒子的性质有关，图 (-6) 表示 α 粒子在空气中的吸收曲线，由图可见 α 粒子在物质中通过时，在前半段射程里物质对它差不多没有吸收作用，即通过的 α 粒子数起初无改变，到后来则 α 粒子能量减低了，物质的吸收作用显示出来 α 粒子数迅速地减少，到射程末端，全部 α 粒子都被吸收了。

物质对于 β 粒子的吸收不同于 α 粒子，因为放射 β 粒子的同位素所放射出的 β 粒子并不是具有单一的能量，而是形成一个连续的能谱，所以 β 粒子束通过物质时， β 粒子数将递减，因而吸收曲线是逐渐下降。 β 粒子束的吸收大致是服从指数曲线的关系；所不同的 β 射线的强度可减为零。

现将 β 粒子的吸收规律以及最大能量与射程等关系，述之如下：

1. 粒子的吸收近似地服从指数关系，可以下列公式表示：

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

式中 I_0 为未经吸收体前的射线强度， I 为经过厚度为 d 厘米的吸收体后的射线强度， μ 为线性吸收系数，其值与吸收体的密度及 β 粒子的能量有关，单位为厘米⁻¹，为了将吸收体密度对吸收的关系考虑在内，吸收体的厚度也有用单位面积的总量（克/厘米² 或毫克/厘米²）来表示，叫做质量厚度 dm ，则上式可写成：

$$I = I_0 e^{-\mu m dm}$$

式中的 μm 称为质量吸收系数，单位为厘米²/克或厘米²/毫克。 μ 与 μm 及 d 与 dm 的关系如下：

$$\mu m = \mu / \rho \quad dm = d \cdot \rho$$

其中 ρ 为吸收体的密度

2. 使射线强度减弱一半的吸收体厚度称为半吸收厚度 ($d_{1/2}$) 由吸收公式得 $d_{1/2}$ 与 μ 之间的关系为

$$d_{1/2} = 0.693 / \mu$$

3. β 粒子最大能量 E_0 与最大射程 R_0 关系, 可以根据经验公式 (以公式的适用范围为最大能量 0.15 ~ 3 兆电子伏特) 表示如下:

i. $0.15 \text{ 兆电子伏特} < E_0 < 0.8 \text{ 兆电子伏特}$

$$R_0 = 0.407 E_0^{1.38}$$

或 $0.03 \text{ 克/厘米}^2 < R_0 < 0.3 \text{ 克/厘米}^2$

$$E_0 = 1.92 R_0^{0.725}$$

ii. $E_0 > 0.8 \text{ 兆电子伏特}$

$$R_0 = 0.542 E_0^{0.133}$$

1. 或 $R_0 > 0.3 \text{ 克/厘米}^2$

$$E_0 = 1.85 R_0 + 0.245$$

4. β 粒子最大能量吸收系数和半吸收厚度的关系亦可以下列经验公式来表示:

$$\mu_m = 22 / E_0^{4/3}$$

$$d_{1/2} = 0.032 E_0^{4/3}$$

以上二式 μ_m 的单位为 $\text{厘米}^2/\text{克}$, $d_{1/2}$ 的单位为 厘米 , E_0 单位为兆电子伏特。

§二. γ 射线和物质的相互作用

γ 射线是光子流, 它使物质产生电离的过程和带电粒子使物质电离的过程稍有不同。当 γ 射线通过物质时, 在物质内部产生快速运动的带电粒子 (质子, 电子等)。这些快速运动的带电粒子在物质中的运动, 从而产生电离。因此电离不是直接的而是间接的。通常称为二次电离。 γ 射线与物质的原子作用通常有二种方式。

(一) 光电效应: 当一个光子和原子相碰撞时, 它可能将它所有的能量 $h\nu$ 交给一个电子, 使它脱离原子而运动, 光子本身整个被吸收。由于这种作用而释放出来的电子主要是 K 壳

层电子，也可以是乙壳层电子或其它壳层电子。它们通称为光电子。这样的效应称为光电效应。

(二) 康普顿——吴有训效应： γ 光子与原子中的电子相碰时，只把它的一部分能量给予电子，自己改变进行的方向，这时电子脱离了核的束缚，也获得很大的动能，并将运动消耗于使物质电离的作用上。产生康普顿——吴有训效应的过程中， γ 光子並沒有消失，只是改变了方向，並减低了一部份能量。

(三) 电子偶的产生：当 γ 光子的能量大于1.02兆电子伏特时， γ 光子在原子核内可以转变为一个正电子和一个电子。正负电子的总能量是 $E_\gamma - 1.02$ 兆电子伏特（ E_γ 是 γ 光子的能量）。正负电子若具有动能就可以在物质中产生电离。最后当正电子动能消耗完后，正电子将在物质中和电子相结合而成为一个能量各为0.51兆电子伏特的 γ 光子。这种光子是次级光子。电子和正电子的运动方向差不多和光子的方向一致，但各与之成一角度 θ 和 ϕ ，二者角度不一定相等。

γ 射线通过物质时与 α 、 β 粒子不同，不是每个光子的速度逐渐减小。因为光子的速度永远是光速，而是光子的数目逐渐减少，也就是说强度减弱了。因此，对于 γ 射线来说，射程的意义是含糊的。应该说，它穿过多少厚的物质强度减弱了多少。

γ 光子的穿透力大：超过 α 、 β 粒子，由于 γ 光子在经过物质时，与物质的分子或原子的电子起作用而产生离子对的机率很小。因此，比起入射 α 和 β 粒子， γ 光子的电离本领是很差的。它在物质中所产生的电离密度很小。假设 α 、 β 、 γ 三种射线能量均为二兆电子伏特，在空气中的电离密度， α 粒子产生的为6000离子对/毫米， β 粒子为60离子对/毫米， γ 光子为0.6离子对/毫米。

参考文献

1. 中国科学院原子能研究所编
放射性同位素应用知识 科学出版社 1959年
2. 赵忠尧等
原子能的原理和应用 科学出版社 1956年
3. 上海第一医学院物理教研组
放射物理学讲义第一部分 1960年
4. 中国人民解放军，军事医学科学院
放射物理学讲义

第二章 放射性的探测

第一节 放射性探测的原理和种类

一、放射性探测的原理：

放射性同位素的研究中，要求探测各种粒子或射线的存在，分辨并测量它们的物理性质（如能量、电荷等），按照工作需要，可制成各种各样的具有不同特性的探测器。探测器的基本原理是利用粒子（或射线）经过一定物质与其相互作用而产生一些特殊现象，探测这些特殊的现象，就可以察知粒子（或射线）的存在并判别它们的性质。

放射性探测的方法，原则上可分为下列几种：

(一) 利用射线通过物质时的电离作用，当带电粒子在物质中通过时，和物质内的束缚电子间的非弹性碰撞而使物质产生电离，从而观察或记录射线的径迹，测量由于电离作用而产生的电离电流或所收集的电荷与度量由于电离作用而产生的脉冲式的电压变化。云室、厚层照相底片、电离室与各种脉冲探测器均利用这原理制成，这将在后面各节一一加以介绍。

(二) 利用射线通过某些物质时所产生的荧光：例如，闪烁计数器即利用带电粒子在可发荧光的物质（如 ZnS 、 NaI 、茶晶等）中引起电离而使之发生荧光的作用，然后再经过光电倍增管把内光信号记录下来。

(三) 利用射线对某种物质的核反应或弹性碰撞而产生易于探测的次级粒子：此法用于探测中子，因为中子不带电，因此不会象带电粒子那样引起电离，但它却可和某些物质作用，引