

医
师
进
修
书

临床同位素学

赵惠扬主编

六-174

上海科学技术出版社

医 师 进 修 丛 书

临 床 同 位 素 学

赵 惠 扬 主 编

赵惠扬 林克健 蒋长英 陈可靖 编著

荣 独 山 审 校

上 海 科 学 技 术 出 版 社

內 容 提 要

本书較系統地介紹有关放射性同位素在临床医学上应用方面的知識。全书分为三篇,第一篇为同位素应用技术基础,包括放射物理学基础、放射剂量学基础和放射卫生防护等。第二篇为同位素診斷学,包括示踪診斷的原理和同位素在各种系統疾病診斷上的应用。第三篇为同位素治疗学,包括放射性碘 131 、磷 32 在治疗上的应用, β 射綫敷貼治疗和放射性胶体治疗等。全书共分为十五章。

本书供使用同位素的临床医师参考,并可作为同位素在临床医学上应用的教学参考书。

医 师 进 修 丛 书

临 床 同 位 素 学

赵惠揚 林克健 蔣长英 陈可靖 編著

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出033号

商务印书館上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/18 印張 15 插頁 5 排版字数 363,000

1964年8月第1版 1964年8月第1次印刷

印数 1—5,000

統一书号 14119·1134 定价(科六) 2.70 元

前 言

放射性同位素在临床诊断、治疗和研究上的应用,我国正在广泛开展。但是,到目前为止,适合我国情况的、较有系统的参考书尚感缺乏。本书是根据几年来我院举办的同位素临床应用训练班的讲义,并结合国内外文献和编者的临床经验修改、扩充而写成的。

本书编写的主要目的是想把放射性同位素临床应用的基本知识、理论和最新成就系统扼要地介绍给读者,使读者能够了解同位素临床应用的一般内容和概况,并可进行这方面的工作。

本书在编写过程中,得到上海第一医学院中山医院党总支和裘麟副院长的支持和鼓励。初稿完成后,又经吾师荣独山教授在百忙之中详细审校和修改,并给了我们不少的建设和鼓励;部分稿件还经莊鳴山教授和王快雄副教授提出了宝贵意见,我们在此表示衷心的感谢。

由于我们在同位素临床应用方面的工作经验尚不足,业务水平有限,本书难免有若干缺点,希读者们提出批评和指正。

本书的出版,上海科学技术出版社曾给以有力的支持,我们在此表示谢意。

赵惠扬

上海第一医学院中山医院同位素室

1963年11月

目 录

前 言

第一篇 同位素应用技术基础(赵惠揚)

第一章 放射物理学基础	1	四、放射性的绝对测量	37
一、放射性的发现	1	五、剂量的单位	42
二、原子构造	1	六、放射性同位素体外照射的剂量测定	44
三、原子核结构	2	七、放射性同位素体内照射的剂量测定	48
四、质量、能量和结合能	3	第三章 临床上常用的同位素及 标记化合物介绍	53
五、 α 、 β 和 γ 射线的性质	4	一、临床上常用的同位素	53
六、原子核的天然衰变及人工放射性 同位素	4	二、临床上常用的标记化合物	57
七、放射性同位素衰变的方式	5	第四章 放射卫生防护	60
八、放射性衰变的规律	10	一、对各种放射线的防护	60
九、放射性强度的单位	12	二、放射性同位素临床应用实验室的 设计要求	75
十、放射线与物质的相互作用	13	三、放射性沾染的清除	77
第二章 放射剂量学基础	16	四、放射性废物的处理	79
一、放射性探测的方法	16		
二、放射性的探测仪器	17		
三、放射性测量的统计学因素和数据 处理	34		

第二篇 同位素诊断学(赵惠揚 林克健 蔣长英 陈可靖)

第五章 同位素诊断的方法和原理	83	三、其他	120
一、示踪方法的优缺点	83	第七章 血液系统	
二、同位素的适用条件	84	(林克健 赵惠揚)	122
三、同位素稀释法	84	一、放射性铁的应用	122
四、双重标记法	87	二、红血球寿命的测定	129
五、更新、聚集与更新时间	88	三、红血球破坏部位及骨髓活性的测定	139
六、前身物与产物的关系	91	四、白血球及血小板寿命的测定	140
七、物质的渗透和转移	93	五、利用放射性钴标记维生素 B_{12} 诊断 恶性贫血	141
八、放射性同位素扫描术	93	六、脾脏扫描	143
第六章 内分泌系统	99	第八章 循环系统	
一、甲状腺机能测定	99	(赵惠揚 蔣长英 林克健)	144
二、甲状腺扫描	116		

一、血容量的測定	144
二、末梢循环	154
三、循环時間	156
四、組織血流的測定	158
五、細胞外液測定	160
六、可交換鈉的測定	160
七、可交換鉀的測定	161
八、全身总水量	162
九、放射性同位素測定心脏功能	163
十、心脏和大血管扫描	168
第 九 章 泌尿系統(赵惠揚)	169
一、腎功能測定或放射性同位素腎 脏图	169
二、腎脏血流量	173
三、腎脏扫描	174
四、精子發生的測定	175
五、电解质的吸收及排泄	175
第 十 章 消化系統	
.....(陈可靖 赵惠揚)	177

一、肝功能測定	177
二、胆囊功能測定	182
三、肝脏血流量	182
四、消化道的吸收功能	187
第十一章 肿瘤的診斷和鉴别診斷(赵惠揚)	193
一、脑肿瘤	193
二、甲状腺癌	197
三、脊髓肿瘤	200
四、眼部肿瘤	201
五、皮肤恶性黑色素瘤	201
六、乳腺癌	202
七、消化器官癌	203
八、睪丸肿瘤及前列腺癌.....	207
九、妇科肿瘤	208
十、肺肿瘤	209
十一、淋巴系統肿瘤	209
十二、骨肿瘤	209

第三篇 同位素治疗学(赵惠揚)

第十二章 放射性碘¹³¹在治疗上的 应用	212
一、甲状腺机能亢进症	212
二、甲状腺癌	222
三、心絞痛及充血性心力衰竭	224
四、放射性碘 ¹³¹ 治疗陣发性心动过速	226
五、肺气肿及肺功能不全	226
第十三章 放射性磷³²在治疗上的 应用	227
一、眞性紅血球增多症	227
二、慢性白血病	229
三、淋巴肉瘤	231
四、多发性骨髓瘤	232
五、乳腺癌轉移	233
六、治疗反应	233

七、治疗前后注意事項	233
第十四章 β 射綫敷貼治疗	234
一、放射性磷(P^{32})敷貼治疗皮肤 疾患	235
二、放射性鈾(Sr^{90})敷貼治疗眼科 疾患	237
第十五章 放射性胶体在治疗上的 应用	238
一、放射性胶体的性质	239
二、放射性胶体的生物学效应	241
三、放射性胶体在临床上的应用	243
附 表	253
附表 1 同位素衰变表	253
附表 2 死時間校正表	262
附表 3 64 进位乘积表	264
附表 4 門捷列夫元素周期表	265

第一篇 同位素应用技术基础

第一章 放射物理学基础

一、放射性的发现

天然放射性于十九世紀末始被发现。1896 年法国物理学家 Henri Becquerel 发现铀盐能够发射出一种不可见的射线,它的性质和 X 射线相似,能够使照相乳胶变黑。

自 1895 年 X 射线发现以后,很多学者研究它发生的本性。著名的法国数学家 Henri Poincaré 错误的认为 X 射线的产生是由于某些矿物质被可见光线或电子流照射后产生的荧光。为了证明这个假设他曾经进行了很多的实验观察,很幸运地,他使用了铀及钍的硫酸复盐作为发荧光的物质,这促进了他成功的发现。

Becquerel 的实验是这样的,将发荧光的铀盐放置在用黑纸或不透光的其他物质包裹好的照相底片的上面,用太阳光照射一定的时间,底片显影以后,在底片上可以发现黑点的阴影,它的形状和发荧光物质的轮廓和形状是相同的。这个实验在起初似乎是证实了 Poincaré 的假设,可是,以后 Becquerel 又发现铀盐事前不被射线照射,照相底片亦可以感光,以后的很多实验皆证明,铀盐的射线不是荧光,而是此盐的一种特殊的性质。随后的观察证明,其他不发生荧光的铀盐及金属铀皆能发射出相似的射线,射线的强度与铀的含量成正比例。

Pierre Curie 和 Marie Curie (居里夫妇) 研究发现了钋的化合物同样能够发射出类似铀的射线。他们在进行这些实验的过程中特别注意到这样的事实,铀沥青矿对照相乳胶的作用较纯的铀化合物强。这个意味着在铀矿中尚含有较铀放射性更强的未知元素。

经过仔细的研究,居里夫妇自铀矿中分离出两种新元素,1898 年 7 月他们发现了钋(Po),1898 年 12 月他们发现了镭(Ra)。钋和镭的发现使学者们开始对放射性进行研究。

二、原子构造

目前已知有 103 种化学元素。地球上所有的物质都是由 92 种不同的元素组成的,最轻的元素是氢,最重的元素是铀。构成某一元素最基本的单位是该元素的原子。原子是很微小的粒子,它的直径只有 10^{-8} 厘米左右。原子的质量也很微小,一个氢原子的质量只有 1.6733×10^{-24} 克,一个铀原子的质量也不过是 3.951×10^{-22} 克。

虽然不同元素的原子具有不同的性质,但是它们的构造却很相似。在原子的心脏是一个原子核,在其周围有电子围绕原子核按一定的轨道运行。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,通常用字母 e 来表示。原子核所带的正电荷恰好与各电子所带的负电荷的总和相等,因此,原子为中性的。当原子失去一个或数个(或增加一个或数个)绕行电子时,它就带有正(或负)电荷,此时我们就称它为离子。

通常用字母 Z 来表示不同元素的原子核所带的正电荷数(用 e 为单位),亦即绕行电子数或原子序数。 A 表示原子的质量数。

绕行电子和原子核构成一个原子,可是它们的质量相差很远,原子核差不多具有原子的全部质量,电子的质量比起核来要轻得很多。核的质量虽然几乎等于原子的质量,可是核只占有整个原子的极小一部分空间。原子的直径约 10^{-8} 厘米左右,而核的直径仅在 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ 厘米之间。

原子核周围的每一个绕行电子都有它固定的轨道(圆形的或椭圆形的)。这些轨道分成好几个壳层,每一个壳层有一定数目的几个轨道,每个轨道最多只能有一个电子。最靠近核的是 K 壳层,它有两个轨道。其次是 L 壳层,它有两个支壳层,第一支壳层有两个轨道,第二支壳层有六个轨道。接着是 M 壳层,它有三个支壳层,共有 18 个轨道,所以最多只能有 18 个绕行电子。一般来说,壳层里可以有的最大电子数目可以用 $2n^2$ 来表示, $n=1$ 代表 K 壳层, $n=2$ 代表 L 壳层,余者类推。在某一轨道上绕行的电子具有一定的能量, K 壳层的电子能量最低,越往外的轨道电子能量越高。电子可以吸收外来的能量而从能量较低的轨道跃迁至能量较高的轨道,这种现象叫做激发。假如激发的能量很大,使得轨道上的电子能够脱离原子核的吸引力而自由运动,则称为电离或游离。反之,如果能量较低的轨道没有电子,则能量较高的轨道上的电子亦可以跃迁到这个能量较低的轨道,在这样的跃迁过程中,电子的多余能量一般以电磁辐射(可见光、紫外线、红外线、X 射线)的形式放射出来。

三、原子核结构

原子核也不是不可分的,它是由质子和中子组成的。自从 1932 年 Chadwick 发现中子以后,人们对于原子核的构造才得到了进一步的正确了解。设用 Z 代表元素原子核内的质子数(即原子序数), A 表示原子的质量数,则 $A-Z$ 就代表核内所含有的中子数。例如,氦(He)的原子序数是 2,质量数是 4,核内有二个质子,二个中子。所以,原子序数+中子数=质量数。

原子序数相同,而原子质量不同的元素,它们在周期表上占有同一位置,称为同位素(isotopes)。例如,氢、氘和氚。氢和氘是稳定的;氚是不稳定的,它会放射出 β 粒子而衰变成氦。不稳定的同位素又称为放射性同位素。

通常用式子 ${}_Z X^A$ 来表示同位素,其中 X 代表元素的符号, Z 为原子序数, A 为原子质量数。例如,氢、氘和氚用式子来表示分别为 ${}_1\text{H}^1$ 、 ${}_1\text{H}^2$ 和 ${}_1\text{H}^3$ 。

A 相同而 Z 不同的元素,如 ${}_1\text{H}^3$ 和 ${}_2\text{He}^3$; ${}_3\text{Li}^8$ 、 ${}_4\text{Be}^8$ 和 ${}_5\text{B}^8$ 等则称为同量异位素

(isobars)。

$A-Z$ 相同的元素, 如 ${}_5\text{B}^{11}$ 、 ${}_6\text{C}^{12}$ 和 ${}_7\text{N}^{13}$; ${}_{19}\text{K}^{39}$ 、 ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ 和 ${}_{18}\text{Ar}^{38}$ 等则称为同中子异荷素(isotones)。 A 和 Z 都相同, 但核处于不同的能级, 如 ${}_{47}\text{Ag}^{110}$ 和 ${}_{47}\text{Ag}^{110*}$; ${}_{55}\text{In}^{115}$ 和 ${}_{55}\text{In}^{115*}$ 等, 则称为同质异能素(isomers)。处于较高能级的同质异能素通常加一星号, 以和低能级的相区别。

在原子核里, 质子和中子的相对数目并不是可以成任意比例的。一般说来, 在 Z 小的稳定性同位素中, 中子数差不多等于质子数或略多一些。只有 ${}_1\text{H}^1$ 和 ${}_2\text{He}^3$ 是例外。在 Z 大的元素中, 中子要比质子多。当 Z 甚大时, 中子要比质子多 50% 左右。任何含有过多中子或质子的核, 都会是不稳定的。

原子核的核子(中子、质子)間除了有质子与质子間的静电排斥力外, 尚存在一种很强的具有引力性质的力, 叫做核力。核力的特点是大而力程(力作用所能达到的空间距离)短。根据实验証明, 当核子間距离大于 5×10^{-13} 厘米时, 作用力就微不足道。各种核子的核力的大小都大致相等。

四、质量、能量和結合能

基本粒子的质量都是十分小的, 因此通常用原子质量单位(a. m. u.)来表示。原子质量单位是以 ${}_8\text{O}^{16}$ 的原子质量作为 16.000000 原子质量单位为标准而訂出的。

$$1 \text{ 原子质量单位} = 1.6599 \times 10^{-24} \text{ 克}$$

在原子核物理上, 由于常用的能量单位尔格嫌太大, 一般采用电子伏特(ev)作为能量的单位。电子伏特是指电子在电位差为 1 伏特的电场中从阴极走到阳极时所获得的能量。因为电子所带的电荷为 4.8×10^{-10} 静电单位, 1 伏特的电位差等于 1/300 静电单位, 所以

$$\begin{aligned} 1 \text{ 电子伏特} &= 4.8 \times 10^{-10} \text{ 静电单位(电荷)} \times 1/300 \text{ 静电单位(电位差)} \\ &= 1.6 \times 10^{-12} \text{ 尔格} \end{aligned}$$

通常还用百万电子伏特(Mev)和十亿电子伏特(Bev)作为能量的单位。

质量和能量是物质必具的属性。任何物体皆同时具有质量和能量, 并且它們之間存在着一定的关系:

$$E = mc^2$$

式中 E 为物体的能量, m 为物体的质量, c 为光在真空中的速度。根据狭义相对論, 速度为 v 的物体的质量等于:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

式中 m_0 系該物体在靜止($v=0$)时的质量。

任何具有 m 克质量的物体, 一定具有 mc^2 尔格的能量。如果在运动过程中物体的质量改变了, 則物体的能量也要按以上的关系相应的改变。

靜止质量为 m_0 的物体, 其相应的能量为 $E_0 = m_0 c^2$; E_0 称为該物体的靜止质量能。相当于 1 克靜止质量的能量为:

$$1 \text{ 克} \times (3 \times 10^{10} \text{ 厘米/秒})^2 = 9 \times 10^{20} \text{ 尔格} = 2.15 \times 10^{13} \text{ 卡}$$

利用这个关系,可以计算出原子质量单位和克、尔格及百万电子伏特之间的关系:

$$\begin{aligned} 1 \text{ 原子质量单位(相应的能量)} \\ &= 931.141 \text{ 百万电子伏特} \\ &\approx 931.2 \text{ 百万电子伏特} \end{aligned}$$

原子是由中子、质子和电子所组成的,但其质量并不等于各个粒子质量的代数和,而是比它小。我们称这个差值为质量亏损。例如,氦原子的质量就比组成它的成员(一个质子,一个中子和一个电子)的质量的总和为小,其质量之差为:

$$m_{\text{H}_2} - (m_n + m_p + m_e) = 2.014735 - 2.017124 = -0.002389 \text{ 原子质量单位}$$

质量亏损的现象与核子(中子、质子)的结合能有密切的关系。由于在原子核中,核子与核子间存在着很强而具引力性质的核力,而任何二相互吸引的物体相互靠近时都放出能量(因为势能变小了),因此,当自由存在的单个核子相互靠近而结合成原子核时,便释放出大量的能量,这能量即称为结合能。根据质能联系定律,能量的减少(由于释出了能量)意味着质量的减小,所以,核的质量比其组成核子的质量总和为小,而所减小的质量就是质量亏损。

五、 α 、 β 和 γ 射线的性质

某些元素,它们并不需要外界的任何作用,就能自行放出不可见的具有穿透能力的射线,此种性质称为放射性。具有此种性质的元素称为放射性元素。放射性元素所放出来的射线并非一种,把镭放在带有小孔的铅盒内,再置于正负两片极板之间,则可使放出的射线分成三束(图 1-1)。向阴极偏转的射线称为 α 射线,向阳极偏转的称为 β 射线,不受电场影响的称为 γ 射线。

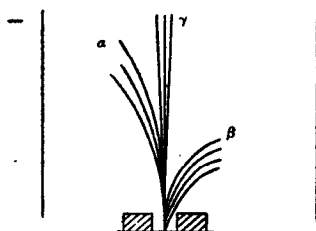


图 1-1 从镭源中放出的三种射线,在强有力的磁极之间,被分裂成为向左、向前和向右的三种射线。

某些元素,它们并不需要外界的任何作用,就能自行放出不可见的具有穿透能力的射线,此种性质称为放射性。具有此种性质的元素称为放射性元素。放射性元素所放出来的射线并非一种,把镭放在带有小孔的铅盒内,再置于正负两片极板之间,则可使放出的射线分成三束(图 1-1)。向阴极偏转的射线称为 α 射线,向阳极偏转的称为 β 射线,不受电场影响的称为 γ 射线。

α 射线是带正电的氦核粒子流,它的传播速率约 20,000~25,000 千米/秒,它的原子量是 4,带有两个正电荷,它的穿透力很弱,电离本领最强,一张纸就可以阻挡它的透过。

β 射线是带负电的高速电子流或正电子流,它的传播速率约 200,000 千米/秒,穿透力比 α 射线大很多,可以穿过铝箔,电离本领次之。

γ 射线是光子流,是电磁辐射(如可见光、紫外线、红外线、X 射线和 γ 射线等),它的波长很短,穿透能力极强,可以穿透很厚的金属。它不带电,具有一定的质量与能量,电离本领最弱,它的传播速度与可见光线一样,每秒可行约 300,000 千米。

六、原子核的天然衰变及人工放射性同位素

1. 原子核的天然衰变

铀、钍、镭等放射性元素,它们会自行放射出 α 、 β 及 γ 射线。一切原子序数大

于82的重元素(周期表上鉛以后的元素),由于核内质子与中子数目甚多,中子多于质子,核内的作用力不平衡而呈现不稳定状态。它们有轉化为稳定状态核的趋势,于是自行发生核的变化,放射出 α 、 β 、 γ 射綫,轉变为另外的元素,这种核的改变称为衰变。

如鈾($_{92}\text{U}^{238}$)经过14次逐步的衰变轉变为鉛的稳定同位素鉛($_{82}\text{Pb}^{200}$)。釷($_{90}\text{Th}^{232}$)经过10次逐步衰变而轉变为鉛的稳定同位素鉛($_{82}\text{Pb}^{208}$)。上述鈾、釷、鐳等元素称为天然放射性元素。

2. 人工放射性同位素

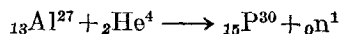
1919年,英国科学家 Rutherford 想到使原子核内核子結合在一起的能量一定非常大,因此,如果要把一个原子核打破,改变它的成分,一定要用能量非常大的质点来轰击原子核。他用天然放射性同位素放射出的 α 粒子来轰击氮原子核,而获得了核的人工轉变,使氮($_{7}\text{N}^{14}$)变成氧($_{8}\text{O}^{17}$),



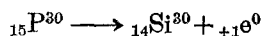
上面就是核反应方程式。

1934年,法国科学家約里奥·居里夫妇发现了在核反应中能够产生不稳定的原子核,这些原子核正象天然存在的放射性元素一样,也能在一定时期内发生衰变,放出 α 、 β 或 γ 射綫。

如果用 α 粒子轰击鋁($_{13}\text{Al}^{27}$)则



人工获得的同位素磷($_{15}\text{P}^{30}$)是不稳定的,它具有放射性,放出正电子后再衰变成硅($_{14}\text{Si}^{30}$)

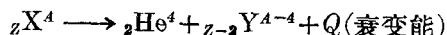


以上的人工获得的具有放射性的同位素,称为該元素的人工放射性同位素。

七、放射性同位素衰变的方式

1. α 衰变

原子核发生 α 衰变,核内即失去两个质子和两个中子,因此,它的原子质量数即减少了4个单位,原子序数减少了两个单位。 Q 为衰变能,它的值可以从质量守恒定律求得。若令 X 代表母体, Y 代表子体,则 α 衰变可用下式表示:

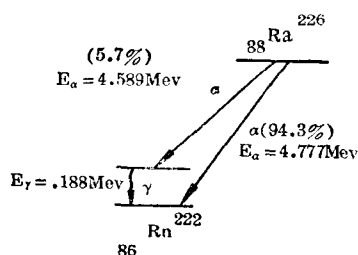


例如:



在 α 衰变后,如果核具有过多的能量(核尚处在激发状态),则核将以 γ 射綫的形式放出多余的能量,而形成稳定状态的核。核放出 γ 射綫时,其原子序数与质量数皆不改变。

一般的 α 放射核总是不具有过多的能量,故 α 衰变时很少伴有 γ 射綫, α 衰变时,原子核放出的 α 粒子和 γ 射綫的能量是一定的。但是伴有 γ 射綫的 α 衰变同位

图 1-2 $^{88}\text{Ra}^{226}$ 的衰变图

素常常放射出不只一种能量的 α 粒子。例如镭($^{88}\text{Ra}^{226}$)衰变时伴有 γ 射线($E_\gamma=0.188$ 百万电子伏特),它的 α 粒子的能量就有两种,一种的能量是4.777百万电子伏特(占总强度的94.3%),另一种的能量是4.589百万电子伏特(占总强度的5.7%)(图1-2)。

测量 α 射线的射程 R 通常是以 α 粒子通过温度为 15°C 、压力为760毫米水银柱的干燥空气时所走的平均距离来决定的。射程 R 和能量 E_α 或 α 粒子的速度 v 之间有下面的关系:

$$R = M E_\alpha^{3/2} = L v^3$$

L 和 M 为常数。在 R 的值大于3厘米而小于8厘米时,上式相当适用。若 E_α 用百万电子伏特表示,则常数的值为 $L=9.67 \times 10^{-28}$; $M=0.323$ 。当射程大于8厘米时, R 差不多和 v 的4次方(或 E_α^2)成正比;小于3厘米时, R 差不多和 $v^{3/2}$ 成正比。这些关系都是半经验的近似公式,不很准确;比较可靠的方法要参阅能量和射程的曲线(图1-3)。

α 粒子在别种吸收体中的射程 R' 可以应用下面公式来换算:

$$R' \approx 3.2 \times 10^{-4} \frac{R \sqrt{A}}{\rho}$$

R 为 α 粒子在空气中的射程, ρ 为吸收体的密度, $\sqrt{A}$ 为吸收体的原子质量平方根的平均数。例如RaA的 α 射线在空气中的射程为 $R=4.62$ 厘米, $A=63.5$, $\rho=8.85$ 克/厘米³,则在铜中的射程为

$$R' = 3.2 \times 10^{-4} \frac{4.62 \sqrt{63.5}}{8.85}$$

$$= 1.32 \times 10^{-3} \text{ 厘米}$$

$$\text{或 } 1.32 \times 10^{-3} \times 8.85$$

$$= 11.7 \text{ 毫克/厘米}^2$$

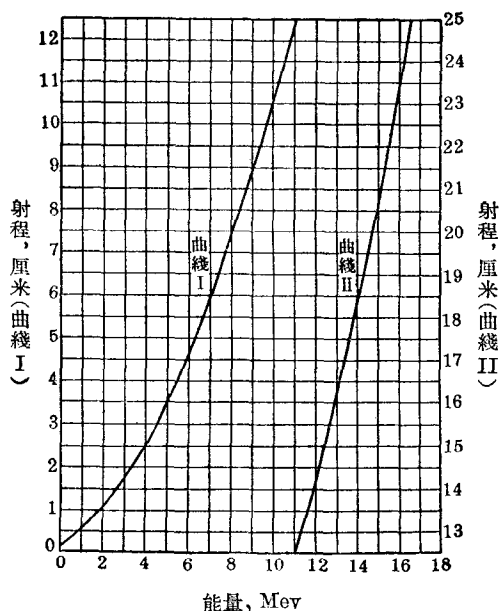
在生物学、医学方面,常常要知道 α 射线在组织中的射程。这可以从下面式子来换算:

$$R_t \rho_t = R \rho$$

R_t 和 R 分别为 α 粒子在组织中的射程和在空气中的射程; ρ_t 和 ρ 分别为组织的密度和空气的密度。因为 $\rho_t \approx 1$ 克/厘米³,而在 15°C 和1个大气压下空气的密度为 $\rho=0.00122$ 克/厘米³;所以上式可简化为:

$$R_t \approx 0.00122 R$$

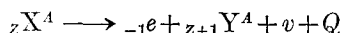
例如RaA的 α 射线在组织中的射程约为

图 1-3 α 粒子在空气中的射程

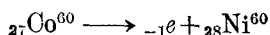
$$0.00122 \times 4.62 = 56.4 \times 10^{-4} \text{ 厘米, 即 } 56.4 \text{ 微米}$$

2. β 衰变

β 衰变是由于原子核内中子转化成质子而放出负电子, 因此它的原子序数增加一个单位, 原子质量数不变。 β 衰变可用下式表示:



式中 ν 为中微子, 是一种质量十分微小的中性粒子。例如: 钴⁶⁰ 衰变时, 放射出能量为 0.306 Mev 的 β 粒子, 和能量为 1.17 Mev 及 1.33 Mev 的 γ 光子, 而转变为镍 (${}_{28}\text{Ni}^{60}$) (图 1-4)。



β 衰变有三个生成物: ${}_{Z+1}\text{Y}^A$, β 和 ν , 因此在衰变时所释放出来的衰变能将由这三个粒子共同带走。因为三个粒子的发射方向所成的角度可以是任意的, 所以每个粒子所带走的能量将是不固定的。 E_β 的值可以从最小的零 ($E_\beta \simeq Q$) 以至最大的值 Q ($E_\nu = 0$), 形成一个连续的能谱。实验上用 β 摄谱仪来分析 β 粒子的能量, 则得到如图 1-5 所示的形状。能谱曲线有个最大的能量 E_0 , 比 E_0 大时就测不到 β 粒子。在能量约为 $E_0/3$ 的地方, 曲线有一高峰为平均能量。一般图表上所绘的 β 能量都是指 β 粒子的最大能量 E_0 而言, 它的数值和 Q 值几乎是相等的。

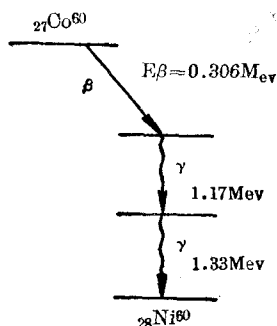


图 1-4 ${}_{27}\text{Co}^{60}$ 的衰变图

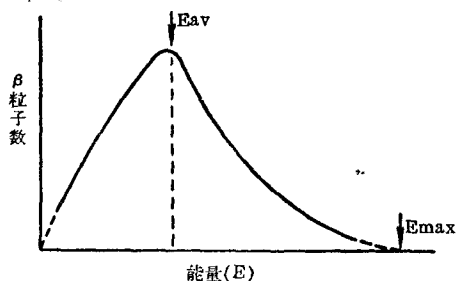


图 1-5 β 粒子的能量分布曲线

许多 β 衰变的放射性同位素只放射 β 粒子, 而没有伴随其他的射线, 如 ${}^6\text{C}^{14}$, ${}^{15}\text{P}^{32}$, ${}^{16}\text{S}^{35}$ 等。但是有更多的 β 衰变放射性同位素常常伴有 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。有些同位素的 β 衰变不只有一种方式, 因而就有两组或两组以上的 β 粒子。

β 粒子在空气中的射程要比同能量的 α 粒子的射程长得多, 所以用空气来测定 β 射线的射程是不方便的。通常用纯铝对于 β 粒子的吸收作用来测定 β 粒子在铝中的射程。射程 R 和最大能量 E_0 的关系有很多不同的半经验公式。其中比较常用的是费梭公式:

$$R = 0.543 E_0 - 0.16 \quad (E_0 < 3 \text{ 百万电子伏特})$$

$$E_0 = 1.84 R + 0.294$$

此式中 R 的单位为克/厘米², E_0 的单位为百万电子伏特。上式适用于 E_0 小于 3 百万电子伏特的 β 射线。但是在 $0.15 < E_0 < 0.8$ 百万电子伏特的范围时, E_0 和 R 并

不成直线关系。它们之间比较精确的关系如下式所示：

$$R = 0.407 E_0^{1.38} (0.15 \text{ 百万电子伏特} < E_0 < 0.8 \text{ 百万电子伏特})$$

$$E_0 = 1.92 R^{0.725} (0.03 \text{ 克/厘米}^2 < R < 0.3 \text{ 克/厘米}^2)$$

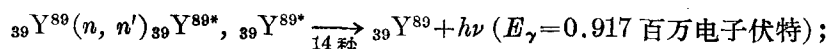
当 β 的能量甚低时,如氦³ ($E_0 = 0.018$ 百万电子伏特)和碳¹⁴ ($E_0 = 0.155$ 百万电子伏特),上两式仍不适用,在此情形下,可用下面公式:

$$R = 0.685 E_0^{1.67} (E_0 < 0.2 \text{ 百万电子伏特})$$

通常应用实验的曲线来决定射程和能量的关系。原子序数不同的吸收体对于射程的影响并不太大。例如能量为 1 百万电子伏特的 β 射线对于铝 ($Z=13$) 的射程是 400 毫克/厘米²,而对金 ($Z=79$) 的射程则为 500 毫克/厘米²。

3. γ 衰变

γ 射线是一种电磁辐射,是从原子核内放射出来的,波长比较短(波长从 10^{-8} 厘米至 10^{-11} 厘米),它的性质和 X 射线十分相似。现在应用几百万至几亿电子伏特的电子加速器来产生 X 射线,可以得到比 γ 射线波长还短得多的电磁辐射。从核衰变所得到的 γ 射线通常是伴随 α 射线、 β 射线或其他射线一起产生的。作电子俘获的核衰变(参阅本节 5),有时也伴有 γ 射线。 γ 射线是核从它的激发能级跃迁至基级时的产物。这种跃迁对于核的原子序数和原子质量数都没有影响,所以称为同质异能跃迁。当母体放射 β 粒子(或其他粒子)而跃迁到子体的激发能级时,它处在激发态的时间十分短暂(一般 $\sim 10^{-13}$ 秒),差不多马上就跃迁到基级而放出 γ 射线来。有些同质异能素本身并不是 β 衰变或其他衰变的产物,同时它的基态同位素又是稳定的,这样就构成了纯粹 γ 衰变的放射性。这一类的同质异能素都是用非弹性激发的方法得到的。例如:



这里钇⁸⁹是稳定性同位素。

和 β 射线不同, γ 射线的能量是单色的,它的大小差不多等于两个能级之差。一个核衰变可能不只放出一个 γ 射线,因此可能放出两组或两组以上能量不同的 γ 射线。例如,每一个钴⁶⁰核衰变放射出两个 γ 射线;每一个碘¹³⁰核衰变,平均要放射出 4 个 γ 射线,有四组不同的能量。

放射 γ 射线的核衰变还可以以发射内转换电子 (conversion electron) 的方式从激发态回到较低的激发态或基态,而不必放射出 γ 射线。所谓内转换电子就是指向外发射核外的绕行电子,主要是 K 电子,也有 L 电子或其他轨道上的电子。

放射 γ 射线和内转换电子是核从激发能级跃迁至较低的激发能级或基级的两种可能方式。通常用内转换系数 a 来表示内转换电子所占的比例:

$$a = \frac{N_e}{N_\gamma + N_e}$$

此处, N_e 代表内转换电子总数的多少(包括 K, L, ……电子); N_γ 代表 γ 射线的多少。内转换系数随着不同的放射性同位素而异。它的变化范围从零至 100%。

4. β^+ 衰变

β^+ 粒子又称正电子或阳电子,是一种质量和电子相等但带着 1e 单位正电荷的

粒子。作 β^+ 衰变的放射性可以看成是由于核里的一个质子转变成为中子而放出 β^+ 粒子和中微子的结果：

$$P \longrightarrow n + \beta^+ + \nu$$

β^+ 衰变的子体和母体具有相同的原子质量数 A ，但是原子序数 Z 则降低了一位。如令 X 代表母体， Y 代表子体，则有：

$${}_Z X^A \longrightarrow {}_{Z-1} Y^A + \beta^+ + \nu + Q$$

Q 为衰变能。和 β 粒子一样， β^+ 的能谱也是连续的。最大的能量仍为 $E_0 \simeq Q$ 。但是 β^+ 衰变的 Q 值不等于母体和子体的同位素质量之差，而还要再减去两个电子质量，这是和 β 衰变不同的地方。

β^+ 粒子在吸收体中的射程和 β 的射程略有不同；但是一般近似的计算可以把它看成相同的。 β^+ 粒子被物质阻止住而丧失了动能时，它将和物质中的电子相结合而把两个正负电子的静止质量能转化为电磁辐射，此时两个正负电子的静止质量全部亏损，转化的电磁辐射则称为光化辐射。光化辐射可以是一个光子、两个光子或三个光子；其中以两个光子最为普遍，因为每个电子的静止质量为 0.511 百万电子伏特，所以产生两个光子的光化辐射，每个光子的能量应为 0.511 百万电子伏特。探测这个能量的射线是否存在，可以判断是否有 β^+ 衰变产生。

5. 电子俘获

如果母体的同位素质量仅大于子体的同位素质量，但其质量的差小于两个正电子的质量，则 β^+ 衰变是不可能的。在此情况下，母体 ${}_Z X^A$ 可以通过电子俘获的方式衰变成为子体 ${}_{Z-1} Y^A$ 。所谓电子俘获是指核俘获了一个绕行电子而使核里的一个质子转变成中子和中微子，即

$$P + e \longrightarrow n + \nu$$

它的核衰变过程可以用下面式子来表示：

$${}_Z X^A + {}_{-1} e \longrightarrow {}_{Z-1} Y^A + \nu + Q$$

因为 K 壳层最靠近核， K 电子被俘获的几率比其他壳层电子被俘获的几率为大，所以这样的衰变有时称做 K 电子俘获。整个系统的电子数目在衰变前后并无增减，只是俘获电子时，必须消耗了相当于电子结合能的能量。电子俘获的衰变过程中只放射出一个中微子，所以中微子的能量是单色的， $E_\nu \simeq Q$ 。

凡能满足产生 β^+ 衰变的条件，也就能满足产生电子俘获的条件，所以有许多种放射性同位素同时具有放射 β^+ 粒子和电子俘获的衰变。还有少数的放射性同位素即满足了 β^+ 衰变的条件，同时又满足了 β 衰变的条件，这样的同位素（如 ${}_{47} \text{Ag}^{108}$ ， ${}_{35} \text{Br}^{80}$ ， ${}_{32} \text{As}^{74}$ ， ${}_{29} \text{Cu}^{64}$ ，…）都是同时具有放射 β 粒子、 β^+ 粒子和电子俘获的衰变的。

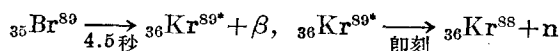
作电子俘获的衰变，除了有些同位素因子体处在激发状态而放射出 γ 射线外，核并没有放射出任何易于探测的射线，可是它却有次级放射能够得到探测。例如 K 电子俘获时，当 K 电子被核俘获后， K 壳层即少了一个电子。此时比 K 壳层能级更高的绕行电子（如 L 电子）有可能跃迁至 K 壳层来填充被俘获电子的空位，而将两壳层的能级差转变为 X 射线放射出来。这个过剩的能量也可以传给另一个 L 电子，

使它成为自由电子而放射出来,即是所謂 Auger 电子,它的能量是单一的。X 射綫和 Auger 电子都是次級放射,而且是能够探测的。放射內轉換电子的核衰变也同样地有 X 射綫和 Auger 电子。

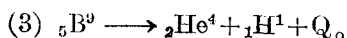
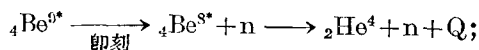
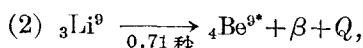
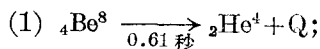
6. 其他类型的核衰变

1) 自裂变: 原子序数高的同位素 ($Z \geq 90$) 会自发地发生裂变,而分裂成两个质量較輕的碎片。这样的变化过程称为自裂变。一般說来,自裂变并不是核衰变的主要方式。例如,鈾²³⁸和釷²³⁰主要的核衰变是放射 α 粒子,自裂变不过占很小很小的一部分。

2) 緩发中子及其他: 在鈾、釷等的裂变产物中,有很多是放射中子的。这种中子称为緩发中子,以別于在裂变时由鈾核(或釷、……)出来的即发中子。緩发中子約占裂变时所釋放的总中子数的 0.75%。在裂变时,碎片的核都处于高度激发状态,而且有着过多的中子,因此有可能放射中子而衰变。緩发中子的半衰期都是很短的。已經被測定的有半衰期为 4.5 秒的溴⁸⁹、22 秒的碘¹³⁷和 55.6 秒的溴⁸⁷等。凡是放射緩发中子的同位素都同时放射 β 射綫。如



除了自裂变和緩发中子外,在低原子序数的同位素中还有几种核衰变是很特殊的。例如:



八、放射性衰变的規律

假定取一定量的某种放射性同位素,并测量它在每一单位時間內所放射出来的粒子数,則可以发现它的数值随時間的增长而逐漸减少。这一个事实說明:放射性同位素每一个核的衰变并不是同时发生的,而是有前有后的。精确的實驗証明,在時間間隔为 t 到 $t + \Delta t$ 內,衰变的数目 ΔN 是和 Δt 及在該时候尚未衰变的总核数 N 成正比的,即

$$\Delta N \propto N \Delta t$$

写成等式則为

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

此式中 λ 是一个比例常数,称为衰变常数。右边的負号表示 N 的值随 t 的增大而减小,也即 ΔN 是負的。若所取的时间間隔非常小,則上式可写成微分方程式

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

积分后得

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

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 , 则得 $K = \ln N_0$ 。所以上式可写成:

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

或

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

此式指出, N 的值按照时间的指数函数而衰减。

应用一个子体没有放射性的放射性同位素来做实验, 测量在不同的时间 t 下的放射性强度 $I(t)$ 。测量的结果可以将 $I(t)$ 作为纵坐标, t 作为横坐标, 绘在半对数坐标纸上。实验的点将形成一条直线, 如图 1-6 所示。

衰变常数 λ 可写成

$$\lambda = -\frac{\frac{dN}{dt}}{N}$$

它的物理意义就是在单位时间内每一个核的衰变几率。每一种同位素都有它固定的衰变常数, 通常以 λ 表示之。 λ 数值大的放射性同位素衰变得快, 数值小的衰变得慢。例如, 钴 (Co^{60}) 的衰变常数为 4.439×10^{-9} 每秒, 磷 (^{32}P) 的衰变常数为 0.56×10^{-6} 每秒。

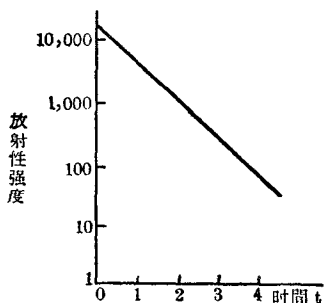


图 1-6 放射性同位素的放射性强度与时间的关系曲线

除了衰变常数以外, 通常用来表示放射性的特征的还有半衰期(又称半寿期), 用符号 $T_{1/2}$ 来代表。半衰期的定义是放射性原子数因衰变而减少到原来的一半时所需要的时间, 即当 $t=T_{1/2}$ 时,

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

解此式, 则得

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

或

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

半衰期是可以直接测量的。因此用上式可以求出衰变常数之值。不同的放射性同位素, $T_{1/2}$ 的差异相当大。例如, 钍²³⁵ 的半衰期为 45 亿年, 镭²²⁶ 为 1590 年, 磷³² 为 14.3 天, 碘¹³¹ 为 8.1 天, 钠²⁴ 为 15.04 小时, 铯¹³⁷ 为 2.8×10^{10} 秒。半衰期是固定不变的, 为元素的特性, 外界的条件对半衰期不能发生任何的影响。

在理论上还常常用到平均寿命。这里我们用符号 $\bar{T}$ 来代表。它的物理意义就是母体原子在衰变前的平均生存时间。 $\bar{T}$ 和 λ 的关系可以用下面的方法求得。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

$$-\left(\frac{dN}{dt}\right)_{t=t_i} \cdot \Delta t$$