

临床同位素讲义

(铁道部同位素学习班)

北 京 铁 路 医 院

一九七五年九月

毛主席语录

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

只有从工农兵出发，我们对于普及和提高才能有正确的了解，也才能找到普及和提高的正确关系。

前 言

我院受铁道部委托举办全国铁路医疗系统临床同位素学习班。因为我们开展此项工作时间较短，缺乏经验，特邀请北京市及路内部分医院参加教学工作。现将各单位在实践中为教学编写的讲义汇集成册，供同志们学习参考。

因为我们水平有限时间仓促，汇集中一定会有不少缺点和错误，请批评指正。

在此，对有关单位的大力支援表示感谢。

北京铁路医院

一九七五年九月

目 录

基 础 部 分

一、放射物理.....	(1)
二、放射性探测仪器简介.....	(23)
三、放射卫生——大连铁路医院同位素室.....	(38)
四、同位素发生器.....	(52)

临 床 部 分

一、放射性同位素在甲状腺疾病中的应用	
——中国医学科学院首都医院同位素科.....	(61)
二、肝脏扫描.....	(95)
三、放射性同位素在泌尿系疾病诊断中的应用——北医一院同位素室.....	(105)
四、	
1. 放射性同位素在心、血管疾病上的应用.....	(149)
2. 应用放射性核素测定心输出量与中心血容量.....	(169)
——中国医学科学院阜外医院同位素室.....	(169)
五、脑扫描——北京宣武医院同位素室.....	(179)
六、	
1. 放射性同位素在呼吸系统疾病方面的临床应用.....	(184)
2. 肝血流指数测定在肝胆病诊断的应用.....	(193)
3. 脾扫描及其临床应用.....	(199)
4. β 射线敷贴疗法在某些皮肤病治疗上的应用	
——北京朝阳医院同位素室.....	(205)
七、	
1. 放射性同位素诊断肿瘤的原理和常用亲肿瘤的标记化合物的评价.....	(211)
2. 骨扫描.....	(220)
3. 胰腺扫描.....	(225)
4. 血清甲胎蛋白放射免疫测定及其临床意义	
——中国医学科学院日坛医院同位素室.....	(230)

放 射 物 理

第一节原子结构及同位素

一、原子结构:

原子结构象太阳系似的、中心有一个小而重的带正电荷的原子核，周围有若干小而轻带负电荷的电子、不间断地绕核转动。

原 子 半径= 10^{-8}cm	{ 电子——带一个单位负电荷, $e=4.828 \times 10^{-10}\text{e.s.u.}$ 一个单位 质量的 $\frac{1}{1840}$ · 电子质量= 9.1085×10^{-28} 克。	
	原子核 (半径= 10^{-12}cm) 原子核大	{ 质子——带一个单位正电荷, 一个单位质量。质子质量= 1.6724×10^{-24} 克, 质子数 ($P=Z$) 目与原子序数相同 中子——不带电荷, 中子质量与质子相同 · 中子以 n 表之 · 质子中子统叫核子。
	小, 仅当原子大小的 $\frac{1}{10,000}$, 而质量几乎等于整个原子重量。 $A=n+p$	

二、电子能级

1. 电子根据能量大小, 按层排列 (K.L.M.N……) · 每层电子按能量稍微差别, 又分成几个电子组 (s.p.d.f), 各组上电子按运动轨道轨迹的空间分布不同, 又分几个轨道, 轨道可能是圆形或椭圆形。
2. 各轨道都有一定能量, 离核近的能量低, 离核远的能量高。
3. 当电子由外层跃迁到内层轨道, 放出光子产生电磁波; 当电子由内层轨道跃迁到外层轨道, 吸收外加能叫激发。
4. 电子除绕核转动外尚有自旋。。

三、核符号及同位素

核符号以 ${}_Z\text{Y}^A$ 表示, A 代表原子核的质量数, Z 代表原子序数。

象 ${}_{53}\text{I}^{131}$ ${}_{53}\text{I}^{125}$ ${}_{53}\text{I}^{123}$ ${}_{53}\text{I}^{132}$ 或 ${}_{80}\text{Hg}^{203}$ ${}_{80}\text{Hg}^{197}$ 原子序数相同而原子核质量数不同的元素叫同位素。因为 $A=n+p$, 即 $n=A-p$ · 所以也可以说原子序数相同而中子数不同的元素叫同位素。

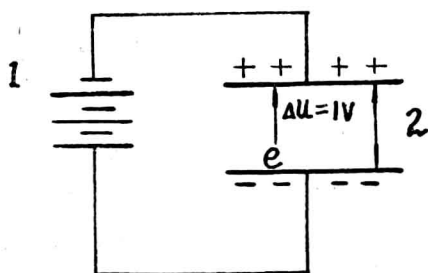
四、原子质量单位 (AMU)

原子核的质量通常是用原子量单位来表示的，以 ${}_6\text{C}^{12}$ 的原子质量的 $\frac{1}{12}$ 为1原子质量

单位。 $1\text{AMU} = \frac{1}{12} \times {}_6\text{C}^{12}$ 的原子质量 $= \frac{1}{12} \times \frac{12\text{克}}{6.023 \times 10^{23}} = 1.6549 \times 10^{-24}$ 克。

$6.023 \times 10^{23} = 1$ 克原子量的任何元素含有的原子数。用最接近同位素原子质量的整数来表征核的质量叫元素的质量数。

五、电子伏特 (eV) — 能量单位



1. 电池

2. 平行电极, 电位差为1伏

图 1

1个电子在电位差为一伏特的电场中，电子从阴极走向阳极所获得的能量叫1 eV。

eV所作的功 $W = \Delta u \times q = \frac{1}{300} \times 4.8028 \times 10^{-10} = 1.601 \times 10^{-12}$ 尔格。

1 MeV = 1.601×10^{-6} 尔格。

$\Delta u =$ 电极间的电位差 = 1 伏 = $\frac{1}{300}$

e.s.u.

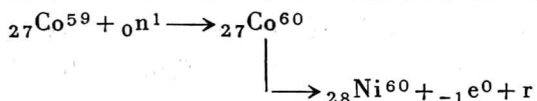
一个电子所带有电荷 $e = 4.8028 \times 10^{-10}$ e.s.u.

如1图

第二节放射性同位素衰变现象

一、放射性

原子序数大于82的元素如铀 ${}_{92}\text{U}^{238}$ 、钍 ${}_{90}\text{Th}^{232}$ 、镭 ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ 由于它们核内质子多、核内作用力不平衡。(因为核子间有吸力，吸力与A成正比，是维持核不衰变主要因素；而质子间有斥力，斥力与 Z^2 成正比，故衰变与 $\frac{Z^2}{A}$ 成正变)。这些元素自发地放出各种射线，可引起气体电离、胶片感光及荧光物质发光叫天然放射性元素。用高能质子、中子、氘核、 γ 射线轰击原子核所产生的放射性元素叫人工放射性元素。如

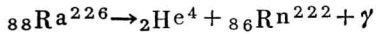
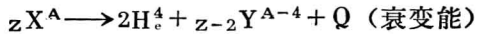


二、放射性元素衰变方式

放射性元素不断地放出射线而变成子体元素，这种核结构的改变叫衰变。

1. α 衰变

α 衰变后，核内失去两个中子，生成的子体核子数少4，而原子序数少2。



α 射线是氦原子核 ${}_2 He^4$ ，带正电荷、电离作用大，射程短。

镭放出 α 射线有两种，一是 $E_\alpha = 4.777 \text{ MeV}$ ，占总强度的94.3%，而变成基态的氡；二是 $E_\alpha = 4.589 \text{ MeV}$ ，占总强度5.7%，而变成激发态的氡，然后很快地跃迁到基态的氡，而放出 $E_\gamma = 88 \text{ MeV}$ 的 γ 射线。

2. β 衰变:

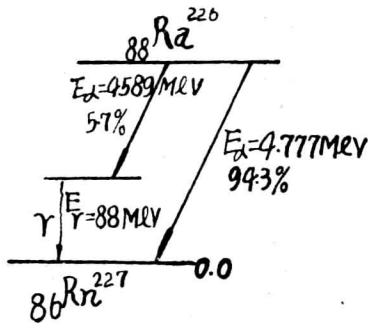


图 2

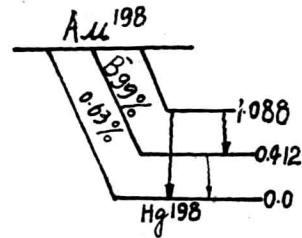
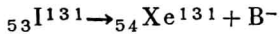
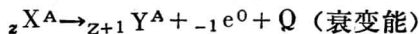
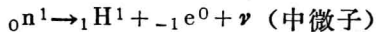


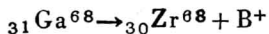
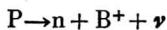
图 3

β 粒子是由中子转化成质子而放出负电子， β 衰变后，原子核内多了一个质子，所以序数增加1，但总质量数是不变的。



3. 正电子衰变

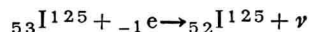
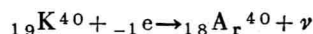
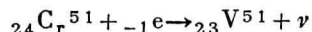
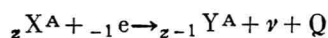
β^+ 衰变是由于核里的一个质子转变成中子，而放出 β^+ 粒子和中微子



4. 电子俘获Ec

核俘获一个绕行电子，而使核里的一个质子转变成中子和中微子。

$$p + e \rightarrow n + \nu$$



因为K层最靠近核，K层电子被俘获的几率比其他层电子为大，此衰变叫K电子俘获。当K电子被核俘获后，K层即少了一个电子，L层的电子有可能跃迁至K层来填充被俘获电子的空位，而将两层的能级差转变为X射线放射出来。叫标识X射线。如图7

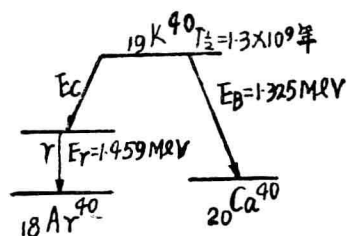


图 5

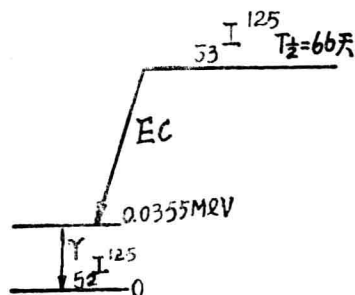


图 4

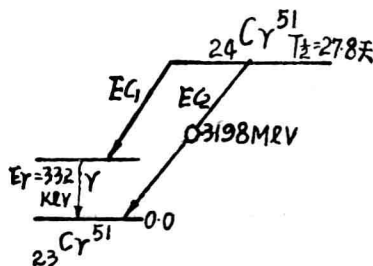


图 6

$$E_x = E_L - E_K$$

E_x 代表X射线的能量， E_L 及 E_K 分别为L层和K层能级的能量。这个过剩的能量($E_L - E_K$)传给另一个L电子，使它成为自由电子叫俄歇电子。

电子俘获及内转换电子

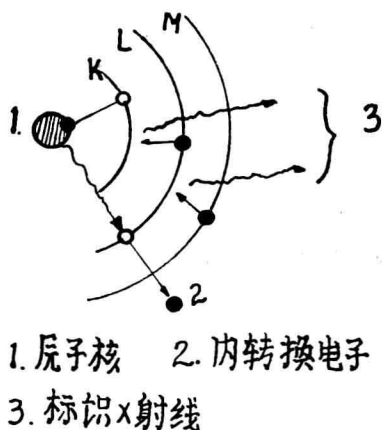


图 7

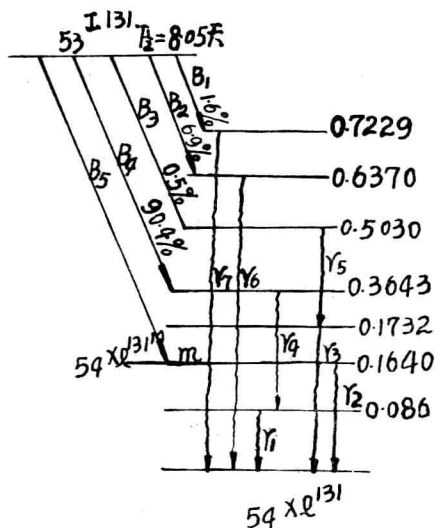


图 8

5. γ 衰变

一般在 α -衰变、 β -衰变、电子俘获衰变等过程中，核可能处在激发态。但很快地（ 10^{-9} 秒）跃迁到基态，这种跃迁叫同质异能跃迁。或先跃迁到较低能级、然后再跃迁到基态，而放出 γ 射线。

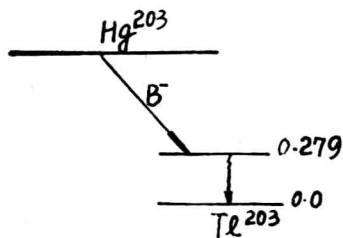


图 9

同质异能体Isomer。

6. 核异能体转位Isomer transirn (It)

象锡铟发生器，锡的 $T_{1/2}=118$ 天，经过电子俘获衰变，产生亚稳级的子体铟 113m ，亚稳定态比较稳定，寿命较长，逐渐衰变放出 γ 射线。 I_n^{113m} 及 I_n^{113} 原子序数及质量数均相同，而能量不同叫

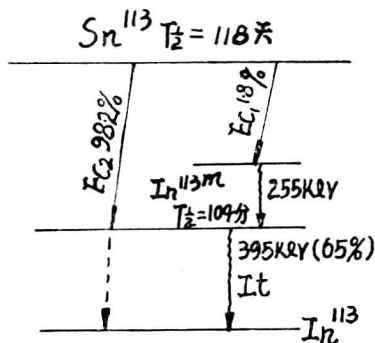


图 10

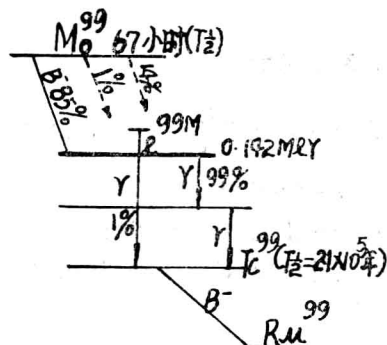


图 11

7内转换电子 (IC)

当 γ 光子从核放射出来和电子撞击，打出的电子叫内转电子如总图7。此电子是单能电子。

三、衰变规律

1. 衰变常数及平均寿命

衰变常数

放射性同位素每一个核的衰变并不是在同时发生的，而是有前有后的。并且核衰变的速度不能用外加因素加以改变的。

若 $t=0$ 时，未衰变核的总数为 N_0 。经过 Δt 时，有 ΔN 个核发生衰变，剩下 N 个未衰变。 $N_0 - N = \Delta N$ 。

实验证明：单位时间内核衰的数目 $\frac{\Delta N}{\Delta t}$ 与现存尚未衰变的总核数 N 成正比。即

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

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

(1)

λ = 衰变常数, 负号表示 N 的值随 t 的增大而减少, 它的单位是 秒^{-1} 或 小时^{-1} 。

λ 的物理意义是: (1) 在单位时间内每个核的衰变几率。(2) 单位时间内衰变原子数占原有放射性原子数的几分之几。每一种放射性同位素都有它固定的衰变常数, λ 数值大的同位素衰变得快, 小的则衰变慢。

平均寿命 $\bar{T}$

放射性元素的衰变是偶然现象, 并且核衰变是一个一个发生的。有的核寿命短在瞬间, 有的长到无限期间, 但长短相加得到一个平均值。故放射性原子在衰变前的平均生存时间叫平均寿命。同位素衰变速度愈快, λ 愈大而平均寿命 $\bar{T}$ 愈短。

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda}$$

(2)

2. 衰变公式

根据 (1) 式 $\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$, 经过积分可得出

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

(3)

N_0 = 开始时放射性原子数,

N = 经过 t 时间后, 未衰变的放射性原子如图 13

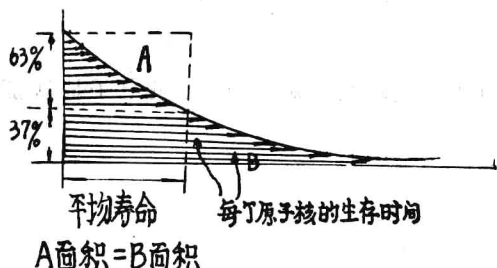


图 12

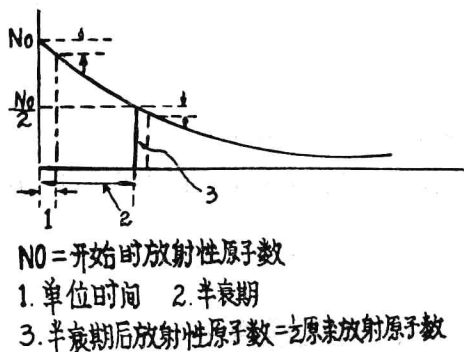


图 13

此公式的意义: 未衰变的放射性核的数目 N 是按着 t 时间的指数函数而衰减的。也就是当 t 按算术级数增加时, 而 N 按几何级数而减少。

3. 半衰期 $T_{1/2}$

放射性元素发生衰变时, 放出射线后, 生成了新的原子核, 由于核衰变的结果使原来放射性原子的数目逐渐减少, 放射性原子数因核衰变而减少到原来的一半所需要时间, 叫物理半衰期 $T_{1/2}$ 。每种放射性元素都有它固定不变的半衰期。如图 14

由(3)式 $N = N_0 e^{-\lambda t}$

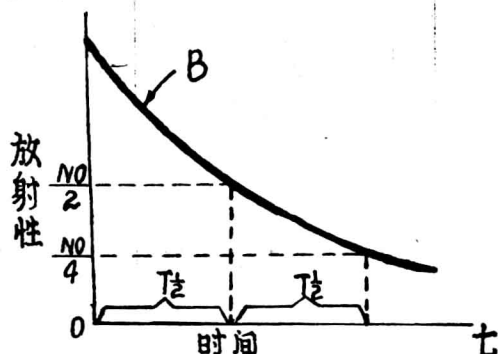
当 $t = T_{\frac{1}{2}}$ 时, 则 $N = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}} \quad \text{即} \quad \log \frac{1}{2} = \log e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

$$\log 1 - \log 2 = -\lambda T_{\frac{1}{2}}$$

$$-\log 2 = -\lambda T_{\frac{1}{2}}$$

$$T_{\frac{1}{2}} \frac{\log 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (4)$$



B: 衰变指数曲线

图 14

4. 简便公式

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{\frac{-0.693t}{T_{\frac{1}{2}}}}$$

设 $K = e^{\frac{0.693t}{T_{\frac{1}{2}}}}$, 如知道 $\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$, 查表求 K

$$\text{则 } N = N_0 K^{-1} = \frac{N_0}{K}$$

例 P^{32} 的 $T_{\frac{1}{2}} = 14.3$ 天, 出厂时放射性为 100mc, 经 7 天后尚有多少 mc?

$$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}} = \frac{7}{14.3} = 0.48 \text{ 查表得 } K = 1.39$$

$$N = \frac{N_0}{K} = \frac{100}{1.39} = 72 \text{ mc}$$

放射性衰变 K 值表

衰 变 校 正 表

天 数	I ¹³¹ ($T_{\frac{1}{2}} = 8.08$ 天)	Hg ²⁰³ ($T_{\frac{1}{2}} = 47.9$ 天)	P ³² ($T_{\frac{1}{2}} = 14.3$ 天)	Cr ⁵¹ ($T_{\frac{1}{2}} = 27.8$ 天)	Au ¹⁹⁸ ($T_{\frac{1}{2}} = 64.75$ 小时)	
1	1.09	1.01	1.05	1.03	2 小时	1.02
2	1.19	1.03	1.10	1.05	4	1.04
3	1.29	1.04	1.16	1.08	6	1.07
4	1.41	1.06	1.21	1.10	8	1.09
5	1.54	1.08	1.27	1.13	10	1.11
6	1.67	1.09	1.34	1.16	12	1.14
7	1.82	1.11	1.40	1.19	14	1.16
8	1.99	1.12	1.47	1.22	16	1.19
9	2.16	1.14	1.55	1.25	18	1.21
10	2.36	1.16	1.62	1.28	20	1.24
11	2.57	1.17	1.70	1.32	22	1.27
12	2.80	1.19	1.79	1.35	24	1.29
13	3.05	1.21	1.88	1.38	26	1.32

放 射 性 衰 变 K 值 表

$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K
1.89	3.70	2.30	4.90	3.20	9.21	4.05	16.45	4.90	29.96	5.75	53.32
1.90	3.72	2.35	5.10	3.25	9.52	4.10	17.12	4.95	30.88	5.80	55.70
1.91	3.75	2.40	5.26	3.30	9.87	4.15	17.81	5.00	32.00	5.85	57.40
1.92	3.78	2.45	5.47	3.35	10.18	4.20	18.17	5.05	33.12	5.90	59.74
1.93	3.80	2.50	5.64	3.40	10.54	4.25	18.92	5.10	34.12	5.95	62.18
1.94	3.82	2.55	5.81	3.45	10.91	4.30	19.69	5.15	35.52	6.00	64.00
1.95	3.85	2.60	6.05	3.50	11.36	4.35	20.40	5.20	36.60	7.00	128.00
1.96	3.88	2.65	6.27	3.55	11.71	4.40	21.12	5.25	38.09	8.00	256.00
1.97	3.91	2.70	6.49	3.60	12.06	4.45	21.76	5.30	39.25	9.00	512.00
1.98	3.94	2.75	6.73	3.65	12.55	4.50	22.65	5.35	40.45	10.00	1024.00
1.99	3.97	2.80	6.96	3.70	12.74	4.55	23.34	5.40	42.10	11.00	2048.00
2.00	4.00	2.85	7.17	3.75	13.40	4.60	24.29	5.45	43.48	12.00	4096.00
2.05	4.16	2.90	7.76	3.80	13.87	4.65	25.03	5.50	45.15		
2.10	4.31	3.00	8.00	3.85	14.39	4.70	26.05	5.55	46.53		
2.15	4.44	3.05	8.25	3.90	14.88	4.75	26.84	5.60	48.42		
2.20	4.57	3.10	8.58	3.95	15.49	4.80	27.74	5.65	49.90		
2.25	4.73	3.15	8.93	4.00	16.00	4.85	28.79	5.70	51.94		

放射性衰变值 K 表

$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$
0.00	1.00	0.17	1.13	0.34	1.26	0.51	1.42	0.68	1.60	0.84
0.01	1.07	0.18	1.14	0.35	1.27	0.52	1.43	0.69	1.61	0.85
0.02	1.01	0.19	1.14	0.36	1.28	0.53	1.44	0.70	1.62	0.86
0.03	1.02	0.20	1.15	0.37	1.29	0.54	1.45	0.71	1.63	0.87
0.04	1.03	0.21	1.16	0.38	1.30	0.55	1.46			0.88
0.05	1.03	0.22	1.16	0.39	1.31	0.56	1.47	0.72	1.64	0.89
0.06	1.04	0.23	1.17	0.40	1.32	0.57	1.49	0.73	1.65	0.90
0.07	1.05	0.24	1.18	0.41	1.33	0.58	1.50	0.74	1.67	0.91
0.08	1.06	0.25	1.19	0.42	1.34	0.59	1.51	0.75	1.68	0.92
0.09	1.06	0.26	1.19	0.43	1.34	0.60	1.52	0.76	1.69	0.93
0.10	1.07	0.27	1.20	0.44	1.35	0.61	1.53	0.77	1.70	0.94
0.11	1.08	0.28	1.21	0.45	1.36	0.62	1.54	0.78	1.71	0.95
0.12	1.09	0.29	1.22	0.46	1.37	0.63	1.55	0.79	1.72	0.96
0.13	1.10	0.30	1.23	0.47	1.38	0.64	1.56	0.80	1.73	0.97
0.14	0.11	0.31	1.24	0.48	1.39	0.65	1.57	0.81	1.74	0.98
0.15	1.11	0.32	1.25	0.49	1.40	0.66	1.58	0.82	1.75	0.99
0.16	1.12	0.33	1.25	0.50	1.41	0.67	1.59	0.83	1.77	1.00

放 射 性 衰 变 值 K 表

K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K	$\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$	K
1.79	1.01	2.01	1.18	2.25	1.35	2.54	1.52	2.86	1.69	3.22
1.80	1.02	2.02	1.19	2.27	1.36	2.56	1.53	2.88	1.70	3.25
1.81	1.03	2.03	1.20	2.29	1.37	2.58	1.54	2.90	1.71	3.27
1.82	1.04	2.04	1.21	2.31	1.38	2.59	1.55	2.92	1.72	3.29
1.84	1.05	2.05	1.22	2.32	1.39	2.61	1.56	2.94	1.73	3.31
1.85	1.06	2.07	1.23	2.33	1.40	2.63	1.57	2.96	1.74	3.33
1.86	1.07	2.09	1.24	2.34	1.41	2.64	1.58	2.98	1.78	3.43
1.88	1.08	2.10	1.25	2.36	1.42	2.66	1.59	3.00	1.79	3.45
1.89	1.09	2.11	1.26	2.38	1.43	2.68	1.60	3.02	1.80	3.47
1.90	1.10	2.13	1.27	2.40	1.44	2.70	1.61	3.04	1.81	3.49
1.92	1.11	2.14	1.28	2.42	1.45	2.72	1.62	3.06	1.82	3.52
1.93	1.12	2.15	1.29	2.44	1.46	2.75	1.63	3.09	1.83	3.54
1.94	1.13	2.17	1.30	2.46	1.47	2.77	1.64	3.11	1.84	3.56
1.95	1.14	2.19	1.31	2.47	1.48	2.78	1.65	3.13	1.85	3.59
1.97	1.15	2.20	1.32	2.49	1.49	2.80	1.66	3.15	1.86	3.62
1.99	1.16	2.22	1.33	2.51	1.50	2.82	1.67	3.17	1.87	3.64
2.00	1.17	2.24	1.34	2.53	1.51	2.84	1.68	3.19	1.88	3.67

表 变 校 正 表

天 数	I ¹³¹ ($T_{\frac{1}{2}}=8.08$ 天)	Hg ²⁰³ ($T_{\frac{1}{2}}=47.9$ 天)	P ³² ($T_{\frac{1}{2}}=14.3$ 天)	Cr ⁵¹ ($T_{\frac{1}{2}}=27.8$ 天)	Au ¹⁹⁸ ($T_{\frac{1}{2}}=64.75$ 小时)	
14	3.36	1.22	1.97	1.42	28	1.35
15	3.62	1.24	2.07	1.45	30	1.38
16	3.95	1.26	2.17	1.49	32	1.41
17	4.30	1.28	2.28	1.53	34	1.44
18	4.68	1.30	2.39	1.57	36	1.47
19	5.10	1.32	2.51	1.61	38小时	1.50
20	5.56	1.34	2.64	1.65	40	1.53
21	6.06	1.36	2.77	1.69	42	1.57
22	6.60	1.38	2.91	1.73	44	1.60
23	7.19	1.39	3.05	1.82	46	1.64
24	7.84	1.41	3.21	1.87	48	1.67
25	8.54	1.44	3.36	1.91	50	1.71
26	9.30	1.46	3.52	1.96	52	1.75
27	10.14	1.48	3.70	2.01	54	1.78
28		1.50	3.89		56	1.82
29		1.52	4.08		58	1.86
30		1.54	4.27		60	1.90
31		1.56	4.48		62	1.94
32		1.59	4.72		64	1.98
33		1.61	4.95		66	2.03
34		1.64	5.21		68	2.07
35		1.66	5.46		70	2.11
36		1.68	5.71		72	2.10
37		1.71	6.02			
38		1.73	6.29			
39		1.76	6.62			
40		1.78				
41		1.81				
42		1.83				
43		1.86				
44		1.89				
45		1.92				
46		1.95				
47		1.97				
48		2.00				
49		2.03				
50		2.07				

第三节射线与物质作用

一、带电粒子 (β 、 α 粒子)

(一) 弹性碰撞 (又叫散射作用)

带电粒子与物质的原子相碰撞 (核, 轨道电子) 因受核电场作用而改变运动的方向, 但动能未发生改变叫弹性碰撞如图15

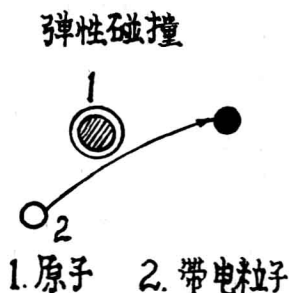


图 15

散射的几率与物质的原子序数及带电粒子的电荷的平方成正比; 而与带电粒子的静止质量成反比。原子核的质量比电子大得多。当碰撞时, β 粒子的散射较 α 粒子大得多。所以 β 经迹比其射程大1.5—2倍。

(二) 非弹性碰撞

是带电粒子与物质作用的主要过程。碰撞前后相对运动能量之和有改变。 γ 射粒子耗能作用有电离损失 (电离和激发) 及韧致辐射。

1. 激发

当带电粒子从原子附近掠过时, 如果没有足够的能量从原子中打出1个电子出来, 而仅使内层轨道电子跃迁到外层轨道, 即提高电子的能级叫激发。激发态电子是不稳定的, 即刻由外层轨道上的电子跳到内层轨道上, 以补空缺, 将多余的能量以辐射的形式放出。所以激发与辐射总是伴生的。如图16

2. 电离

带电粒子和物质的原子作用, 使原子中的轨道电子脱离出来, 产生自由电子及阳离子 (离子对) 此现象叫电离。如图17产生一个离子对所需能量叫电离功。 α 粒子带正电荷, 对电子有吸引力; β 粒子带负电荷, 对电子有排斥力。它们能使轨道上电子产生加速运动, 因而获

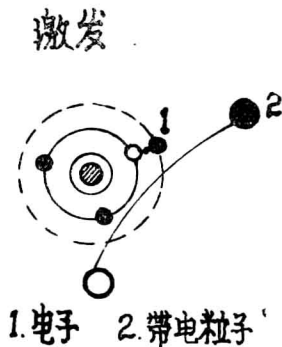


图 16

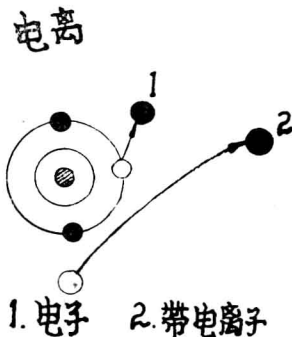


图 17

得足够能量变成自由电子。此作用叫直接电离。

X射线、γ射线、中子不带电荷。它们通过物质时，直接打出能量较高的电子，这个电子再产生电离作用叫间接电离。

当带电粒子和物质产生电离作用时，每毫米途经上所产生的离子对数叫电离比度。它代表带电粒子对物质的生物效应。电离比度的大小决定于带电粒子的电荷量、速度以及作用物质的密度。 α 粒子的电离比度比 β 射线大800倍，而程是 β 射线的 $\frac{1}{100}$ 。

(三) 轫致辐射

当高能量的带电粒子(β)通过重核时，因受电场作用，由于进路受阻，速度突变。带电粒子能量损失，而将多余的能量以光子形式发出叫轫致辐射。如图18

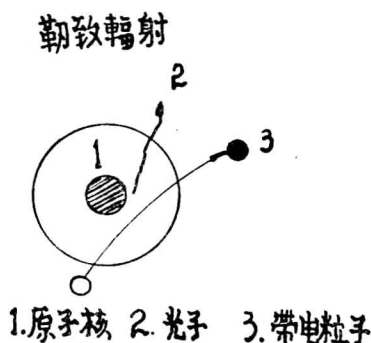


图 18

当高能电子穿过原子序数Z的物质时，轫致辐射和电离能量损失之比取决于(1)带电粒子的能量(2)粒子质量(3)物质的原子序数。

$$\frac{\text{轫致辐射的能量损失}}{\text{电离的能量损失}} = \frac{E \times Z}{820}$$

例将放射 10Mev 电子的同位素放在铅罐内 ($Z=82$) 以及放射 1 Mev 电子的同位素放在铝罐内 ($Z=13$)，求其能量损失分配比。

$$\frac{\text{辐射能量损失 (铅)}}{\text{电离能量损失 (铅)}} = \frac{10 \times 82}{820} = 1$$

$$\frac{\text{辐射能量损失 (铝)}}{\text{电离能量损失 (铝)}} = \frac{10 \times 13}{820} = 0.158$$

$$\frac{\text{辐射能量损失 (铝)}}{\text{电离能量损失 (铝)}} = \frac{1 \times 13}{820} = 0.016$$

从上式看出，放射高能量 β 射线的同位素应放在衬铝的铅罐内。

(四) 带电粒子通过物质的吸收过程是电离作用，散射作用以及轫致辐射的综合作用。

1. α 粒子通过物质，当吸收体厚度不大时，通过的 α 粒子数几乎不变，厚度达到一定值后吸收作用方显著起来， α 粒子迅速降为0。可以看出同位素放出的 α 粒子能量大致相同。如图19。

α 粒子在空气射程

$$R_{\alpha}(\text{cm}) = 0.318 E^{3/2}, E = \alpha \text{ 射线能量}$$

α 粒子在组织射程

$$R_{\text{组织}} = R_{\text{空气}} \times \frac{\text{空气密度 (0.001226)}}{\text{组织密度}} \times \frac{\text{组织的质量数(原子量)}}{\text{空气平均质量数(14.4)}} \times \frac{\sqrt{Z+10}}{0.56 Z}$$

2. B粒子的能量不是单一的，从最小值到最大值形成一个连续能谱。如图20

B射线吸收：因B射线中电子具有各种能量，当B粒子通过物质时，随着吸收体厚度的增大，B粒子数逐渐减少，吸收曲线类似指数曲线，但曲线不与横轴相交。

B吸收曲线图21、22。