

一. 放射性

1. 放射性核素和放射性同位素

原子是由原子核和外围电子组成，原子核是由带电的质子和不带电的中子组成。不同质量数、质子数和核能态的原子核构成不同种类的原子。

具有特定质量数、质子数和核能态，而且平均寿命长得足以被观察到的一类原子称为**核素** (Nuclide)。核素通常用符号 A_ZX 表示。X 是元素符号，A 是质量数，Z 是质子数即原子序数。

原子核内具有相同质子数但中子数不同的核素，它们在元素周期表中处于同一位置，称为**同位素** (Isotope)。**核素**是泛指所有核素。核素和同位素是两个不同的术语，但是人们往往不把核素与同位素严格分开。质子数和质量数均相同，而核能态不同的核素称**同质异能素** (Nuclear isomers)。某些核素是不稳定的，自发地放出粒子（如 α 粒子、 β 粒子等）和可能伴随的 γ 辐射，或在轨道电子俘获，或自发裂变。核素的这种特性称谓**放射性**。具有放射性的核素称为放射性核素。

放射性核素具有三个重要特点：(1) 能自发地放出射线，与此同时衰变成别的核素。(2) 有一定的半衰期。一定数量的某种放射性核素的原子数目衰减到它的初始值的一半所需要的时间称为该放射性核素的半衰期，表示为 $T_{1/2}$ 。(3) 放射性原子核数目的减少（衰变）服从指数定律。

在 ICRP38,1983 公布的小于原子序数 101 共 97 个元素的 1252 个放射性核素的数据。

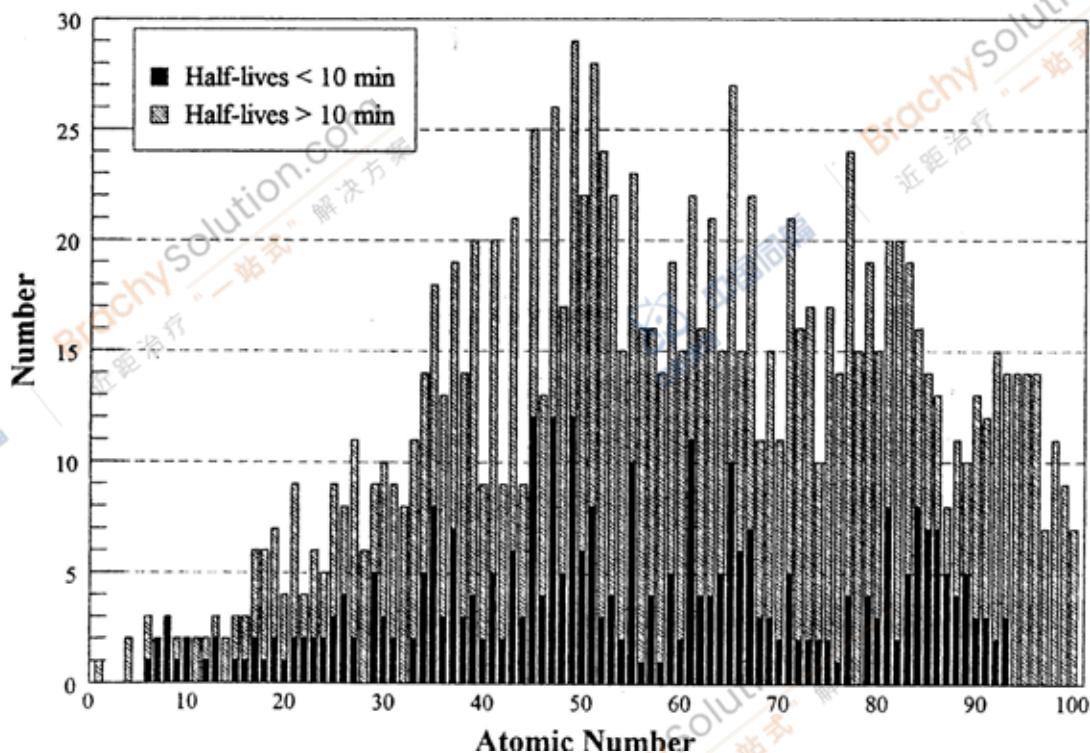


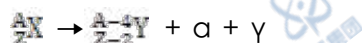
图 1-1 元素的放射性核素数

2. 放射性核素衰变

2.1 放射性核素衰变类型

放射性核素通过 α 衰变, β^- 衰变, β^+ 衰变, 轨道电子俘获, 同质异能跃迁和自发裂变, 生成新核素。这些核素可能是稳定的, 也可能是放射性的。放射性核素继续衰变直到变成稳定核素。一种放射性核素还可以有两种或多种不同的衰变类型, 并按一定比例进行衰变。

(1) α 衰变的表示式为:



式中, X 和 Y 分别表示母体和子体元素; A 和 Z 分别表示原子质量数和原子核中的质子数

(原子序数); γ 射线是伴随子体核素从激发态转移到基态的辐射。 α 粒子 (实际是氦核 ${}^4_2\text{He}$)

具有一定数值的动能, 形成的子体具有反冲核。

(2) β^- 衰变的表示式为



式中, $\bar{\nu}$ 是反中微子, 其他符号意义同上。所发射的 β 粒子具有连续能谱, 通常以平均能量或最高能量表示。

(3) β^+ 衰变的表示式为:



式中, ν 是中微子, 其他符号意义同上。

(4) 轨道电子俘获属 β 衰变的一种形式, 形成的子体原子的原子壳层成空位, 伴随有 x 射线和俄歇电子发射, 其表示式为:



(5) 同质异能素跃迁过程是指处于激发态的子体核素存在时间比较长, 通过发射 γ 射线转化为基态, 放射性核素表示方法是在原子质量数后加 m, 其表示式为



式中其他符号意义同上。

(6) 某些重核具有自发裂变的特性, 即原子核在无外力的作用下自发裂变成轻核素, 称作‘裂片’, 并发射中子和高能量辐射。

表 1-1 放射性核素衰变后生成核素的性质

衰变类型	衰变后生成核素性质		
	原子核质子数 Z 变化	原子质量数 A 变化	能态变化
α 衰变 (原子核发射 α 粒子衰变)	Z-2	A-4	—
β^- 衰变 (原子核发射电子衰变)	Z+1	—	—
β^+ 衰变 (原子核发射正电子衰变)	Z-1	—	—
n 衰变 (中子衰变)	—	A-1	—
P 衰变 (质子衰变)	Z-1	A-1	—

EC 衰变（轨道电子俘获）	Z-1	—	—
IT 衰变（同质异能跃迁）	—	—	从激发态跃迁到稳态
SF 衰变（自发裂变）	处于基态或同质异能态的原子核在没有外加粒子或能量情况下发生的裂变		

放射性衰变发射的粒子具有一定动能，依据粒子所携带的动能大小和周围介质情况，决定其射程。

(1) α 射线的射程

$$R=0.318E^{3/2}$$

式中：R— α 射线在空气中的射程（cm）； E— α 射线的能量（MeV）

(2) β 射线的射程

$$E>0.8\text{MeV} \quad R_{\text{Al}}=542E-133$$

$$0.8\text{MeV}>E>0.15\text{MeV} \quad R_{\text{Al}}=407E^{1.38}$$

式中： R_{Al} — β 射线在铝中射程（mg/cm²）； E— β 射线最大能量（MeV）

(3) β 射线的吸收

a. 吸收系数

$$\mu = 0.017E^{-1.43}$$

式中： μ —吸收系数（cm²/g）； E—最大能量（MeV）

b. 自吸收校正

$$I=I_0 \times \frac{1-e^{-\mu d}}{\mu d}$$

式中：I—测得 β 放射性数值； I_0 ：—设定在无自吸收情况下的测定值

μ —吸收系数（cm²/g）； d—试验材料厚度（cm²/g）

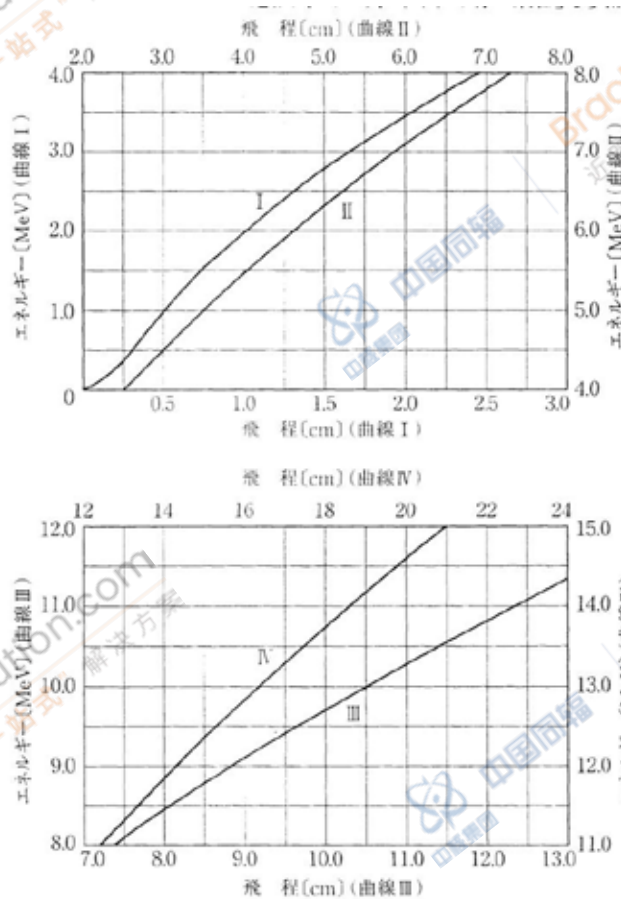


图 1-2 在标准状态空气中 粒子的射程与能量的关系

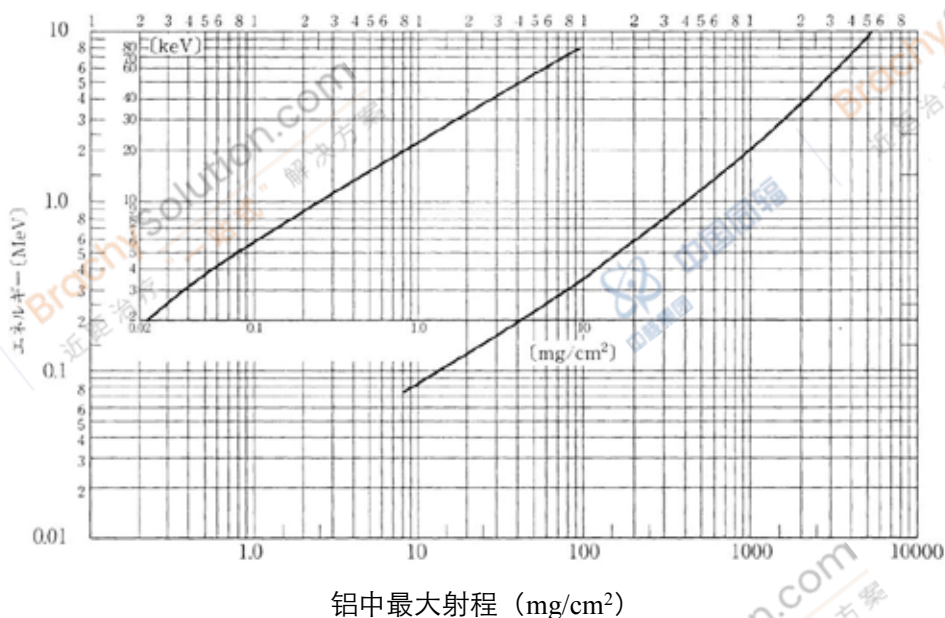


图 1-3 β 粒子在铝中最大射程与能量关系

(4) γ 射线的衰减

a. 经准直的窄束 γ 射线

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad D = \frac{0.693}{\mu}$$

式中：I— γ 射线通过吸收体后的强度； I_0 — γ 射线通过吸收体前的强度；
 μ —线性衰减吸收（cm）；d—吸收体厚度（cm）；D—半值层（cm）。

b. 在散射场合

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

式中：B—积累因子。

2.2 放射性核素衰变基本规律

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N = A; \quad N = N_0 e^{-\lambda t}; \quad A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T};$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}; \quad \tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln 2} = T/0.693 = 1.443T$$

$$A = \left(\frac{1}{2}\right)^n A_0 \quad n = \frac{t}{T}; \quad t = \frac{1}{2}T \text{ 时 } A = 0.707A_0; \quad t = 10T \text{ 时 } A \approx \frac{1}{1000}A_0$$

式中，N， N_0 ：分别是时刻 t 时和最初时放射性核素的原子数；

A， A_0 ：分别是时刻 t 时和最初时放射性核素的活度；

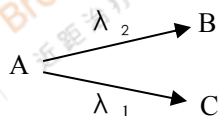
λ ：衰变常量；t：经过时间；T：半衰期； τ ：平均寿命。

有效半衰期(T_{eff})是指吸入体内的放射性物质的半排期（生物半减期）(T_{biol})和物理半衰期(T_{phys})的综合值，按有效半衰期可以计算体内吸入放射性物质经过一定时间后，该放射性物质经排出和物理衰变后体内仍存存量。

$$\frac{1}{T_{\text{eff}}} = \frac{1}{T_{\text{phys}}} + \frac{1}{T_{\text{biol}}}$$

(1) 分支衰变

如果放射性核素 A 同时按两种方式衰变为 B 和 C



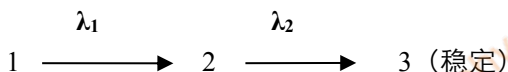
A 的总衰变常数 λ 等于各分支的衰变常数的和： $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$

各分支 B 和 C 的放射性活度为： $A_1 = \lambda_1 N = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda t}$, $A_2 = \lambda_2 N = \lambda_2 N_0 e^{-\lambda t}$

总放射性活度为： $A = \lambda_1 N + \lambda_2 N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$

有些核素可能发生多个分支衰变。

(2) 连续衰变。在放射性核素衰变过程中，经常遇到一个核素经过两次或多次衰变后方可达到稳定核素，这种过程称作连续衰变。以两次连续核衰变为例



$$-\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1, \quad \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2, \quad N_1 = N_{1,0} e^{-\lambda_1 t}, \quad A_1 = A_{1,0} e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{1,0} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{2,0} e^{-\lambda_2 t}; \quad A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_{1,0} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + A_{2,0} e^{-\lambda_2 t}$$

式中, N_1 , N_2 : t 时刻放射性核素 1, 2 的原子数;

$N_{1,0}$, $N_{2,0}$: $t=0$ 时间放射性核素 1, 2 的原子数;

A_1 , A_2 : t 时刻放射性核素 1, 2 的活度;

$A_{1,0}$, $A_{2,0}$: $t=0$ 时放射性核素 1, 2 的活度;

λ_1 , λ_2 : 放射性核素 1, 2 的衰变常数。

(3) 放射性平衡。在连续核衰变过程中, 因为母体核素与子体核素的半衰期不同, 可能出现三种情况:

(1) 暂时平衡 ($T_1 > T_2$, 且 t 足够大时)

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{1,0} e^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 \quad \left(\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = \text{常数} \right)$$

$$A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_{1,0} (e^{-\lambda_1 t}) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1$$

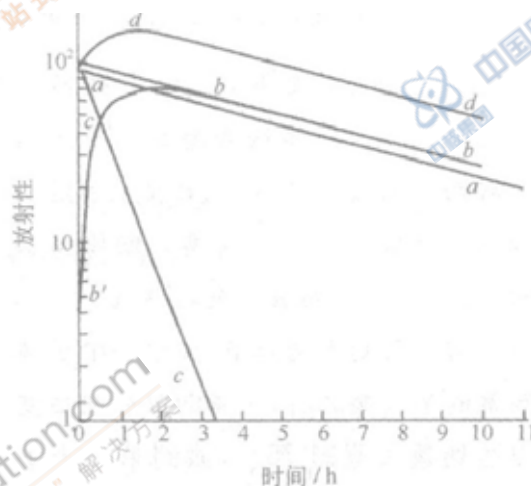


图 1-3 暂时平衡母子体衰变生长体系

曲线 aa: 母体的放射性活度; 曲线 bb: 母子体混合物中子体的放射性活度 (t 足够长后); 曲线 b'bb: 新纯化过的母体内子体放射性核素的生长; 曲线 cc: 新分离的子体的衰变; dd: 母子体系总放射性活度 (最初只有纯母体)

(2) 长期平衡 ($T_1 \gg T_2$, 且 t 足够大时)

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{1,0} e^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1 \quad \lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2, \text{ 即 } A_1 = A_2$$

上述各式中, T_1 和 T_2 : 放射性核素 1 (母体) 和 2 (子体) 的半衰期。

铀和钍衰变系列是典型的长期平衡系列。

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \lambda_i N_i$$

$$\frac{N_2}{T_2} = \frac{N_3}{T_3} = \frac{N_4}{T_4} = \dots = \frac{N_i}{T_i}$$

式中, $N_1, N_2, N_3, \dots, N_i$ 为处于放射性平衡时, 各核素的原子数;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_i$ 为各核素的衰变常数;

$T_1, T_2, T_3, \dots, T_i$ 为各核素的半衰期。

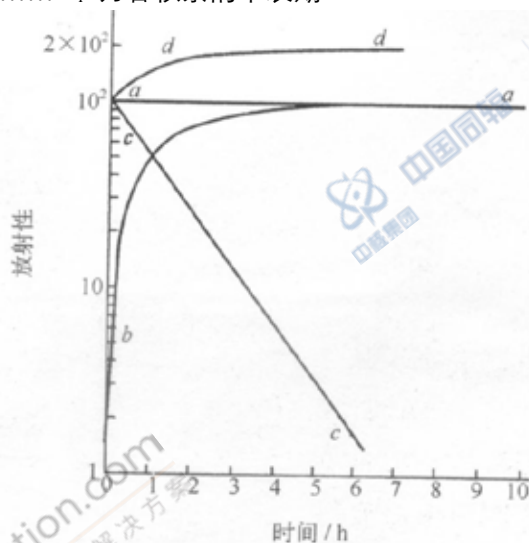
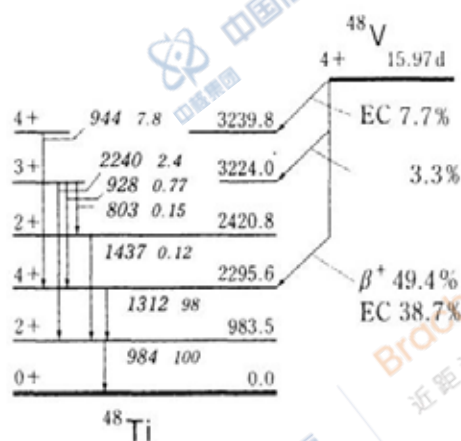
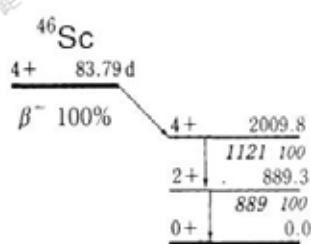
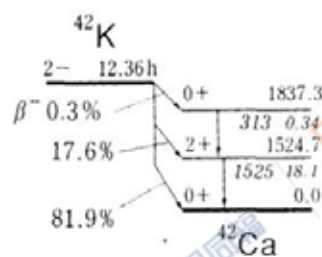
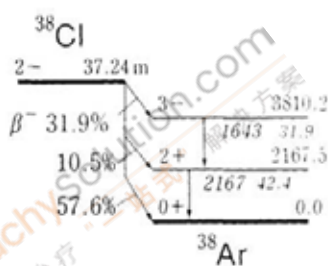
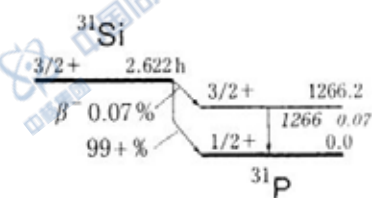
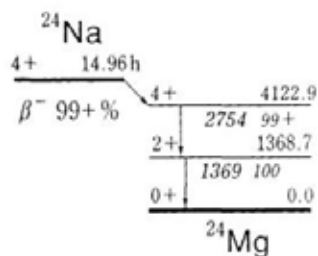
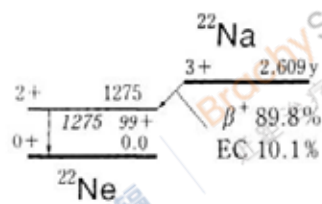
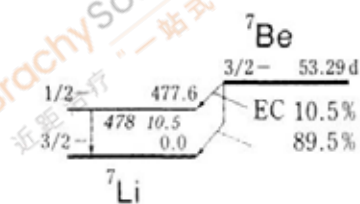


图 1-4 长期平衡母体 (T_1 很长) 和子体 ($T=1.0h$) 的放射性变化图

曲线 aa: 母体的放射性活度; 曲线 cc: 新分离的子体的衰变; 曲线 ba: 新纯化过的母体内子体放射性核素的增长; dd: 母子体系总放射性活度 (最初只有纯母体)

- (3) 若母体核素半衰期小于子体半衰期, 经过一定时间后, 总的放射性衰变将按子体的半衰期衰变。

图 1-5 某些放射性核素衰变纲图





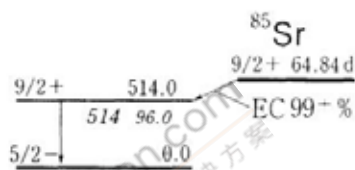
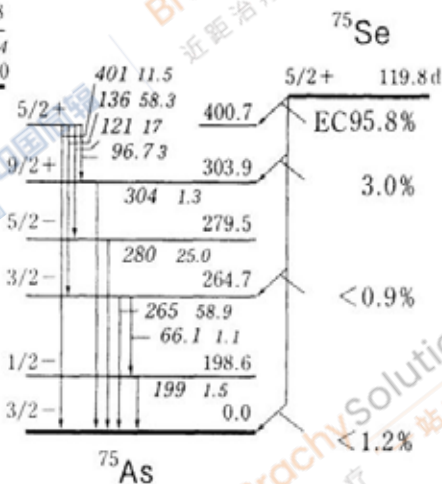
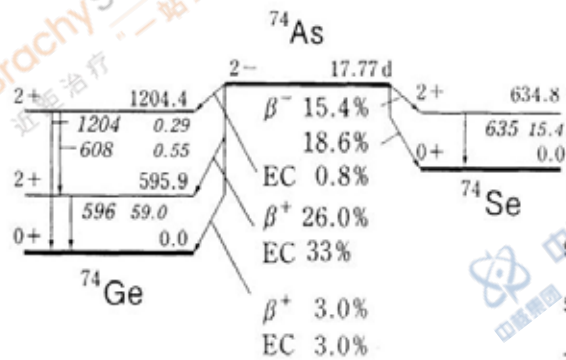
中国同辐



中国同辐



中国同辐

BrachySolution.com
一站式解决方案BrachySolution.com
一站式解决方案BrachySolution.com
一站式解决方案BrachySolution.com
一站式解决方案BrachySolution.com
一站式解决方案BrachySolution.com
一站式解决方案BrachySolution.com
一站式解决方案BrachySolution.com
一站式解决方案BrachySolution.com
一站式解决方案BrachySolution.com
一站式解决方案BrachySolution.com
一站式解决方案BrachySolution.com
一站式解决方案BrachySolution.com
一站式解决方案**⁸⁵Rb**

⁹⁰Sr

0+ 28.74 y

β⁻ 100%

⁹⁰Y

2- 64.10 h

β⁻ 100%

0+ 0.0

⁹⁰Zr

0+ 0.0

⁹⁵Zr

5/2+ 64.02 d

β⁻ 54.5% 44.2% 1.1% 0.1%

7/2+ 756.7 757 54.5 724.2 724 44.2 235.7 86.6 h IT 94.4% 236 0.29 0.0

⁹⁵Nb

34.98 d

β⁻ 5.6%

⁹⁹Mo

1/2+ 65.94 h

β⁻ 0.1% 0.1% 16.4% 1.1%

3/2 1142.1 961 0.10 1004.1 823 0.13 920.7 778 4.3 739 12.1 509.1 366 1.2 181.1 181 6.0 40.6 1.1 142.7 6.01 h IT 99+ % 7/2+ 140.5 141 4.5 0.0

⁹⁹Tc

2.111 × 10⁵ y

β⁻ 0.0037%

^{99m}Tc

1/2- 142.7 6.01 h

IT 99+ % 143 0.019 140.5 141 89.1 0.0

⁹⁹Tc

β⁻ 弱

3/2+ 322.4 322 弱 89.6 89.6 弱 0.0

⁹⁹Ru

5/2+ 0.0



中国同辐
中核集团



中国同辐
中核集团



中国同辐
中核集团

BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案

BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案

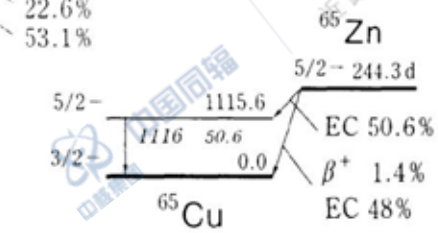
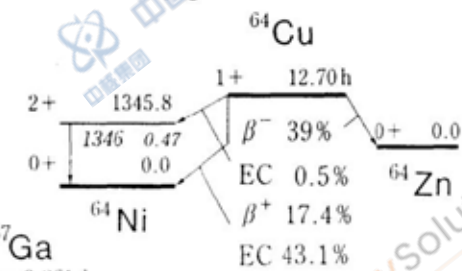
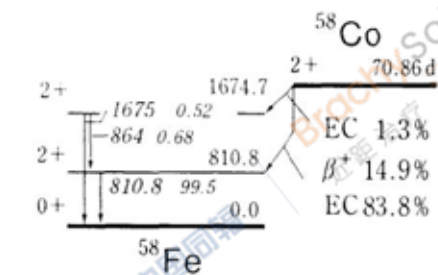
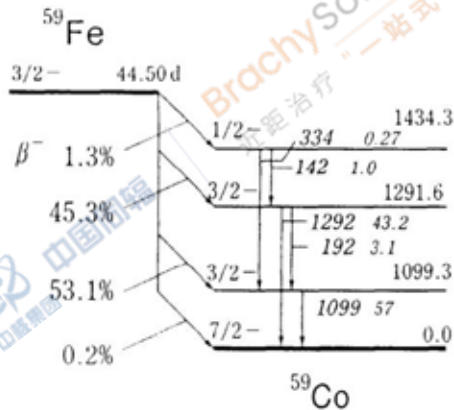
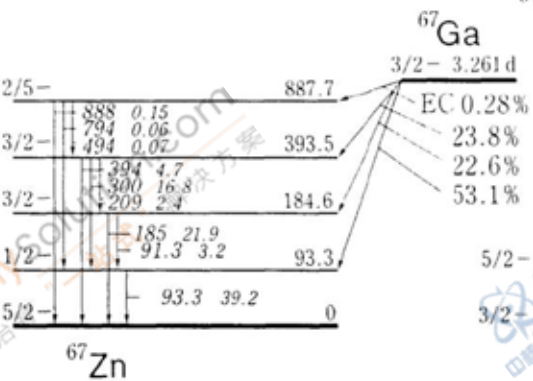
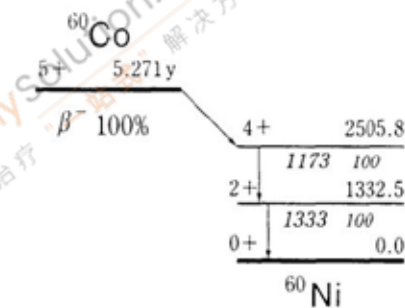
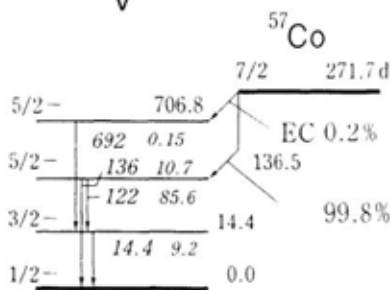
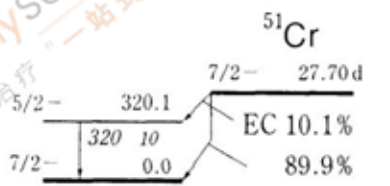
BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案

BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案

BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案

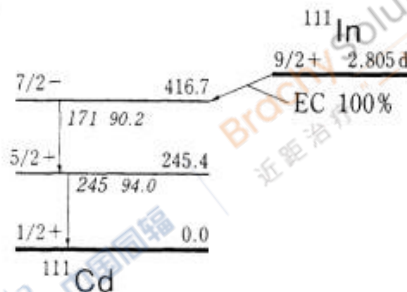
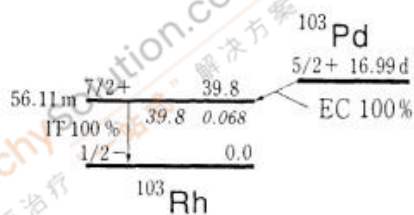
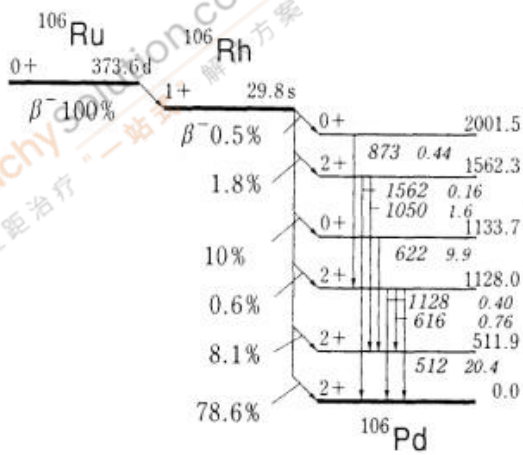
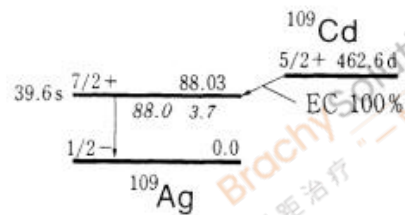
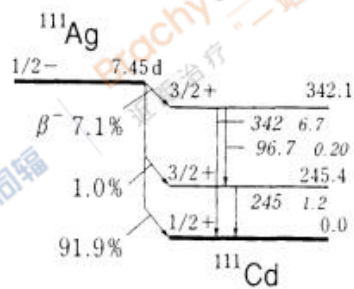
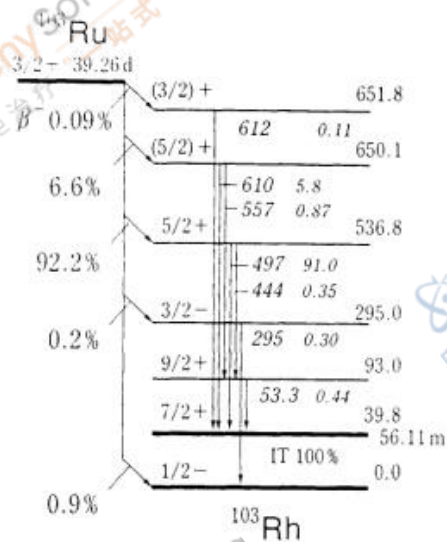
BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案

BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案





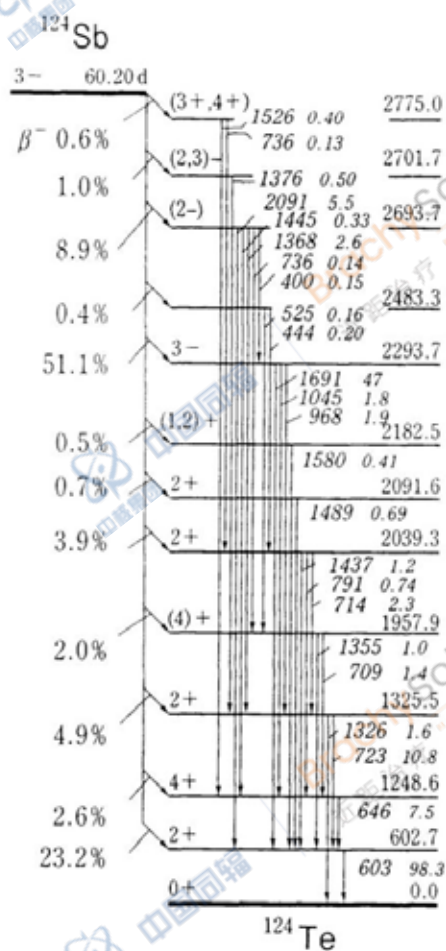
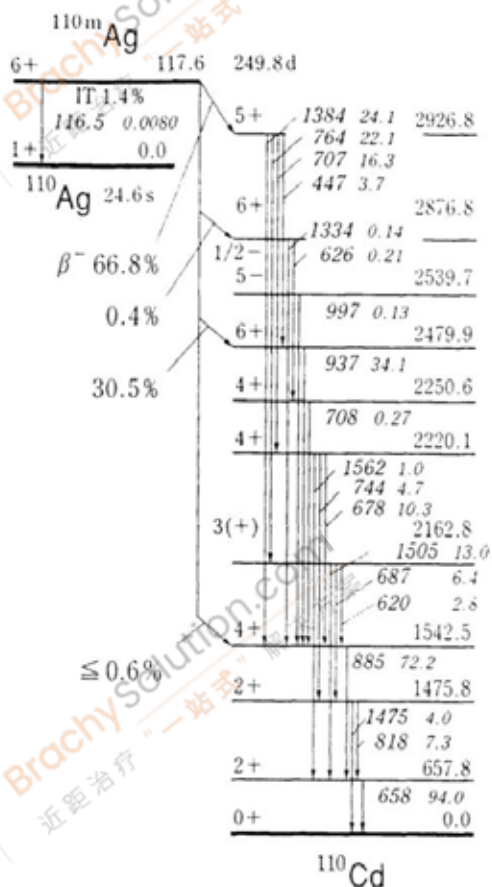
中国同辐

BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案

中国同辐

BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案

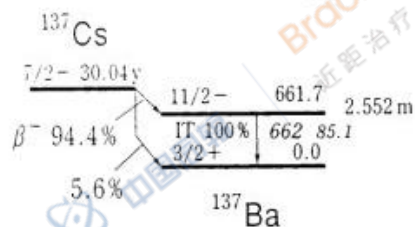
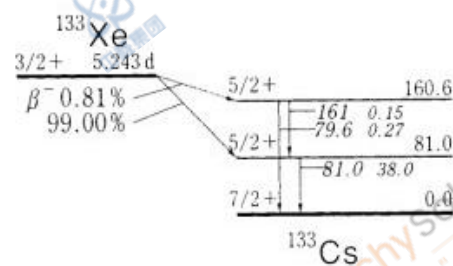
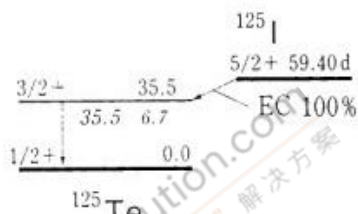
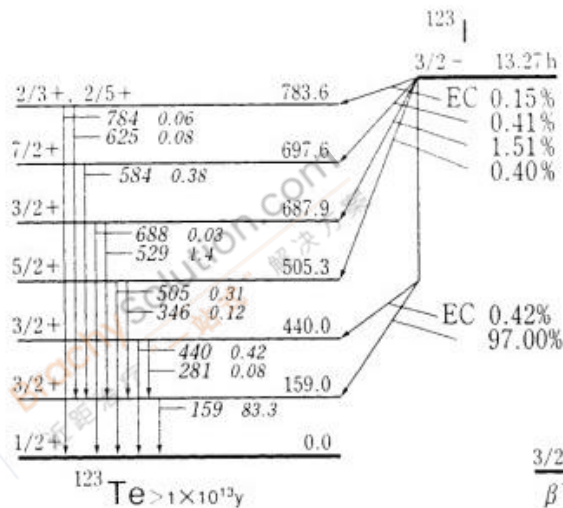
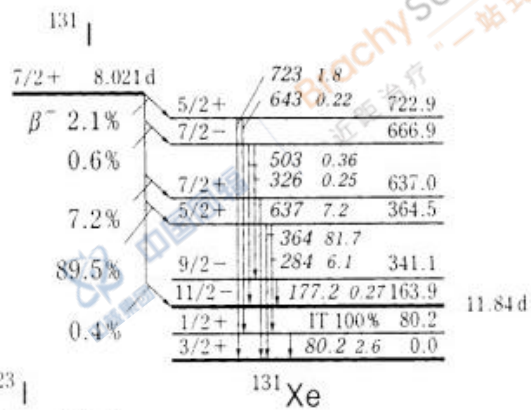
中国同辐





中国同辐
中核集团

BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案



中国同辐
中核集团

BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案



BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案



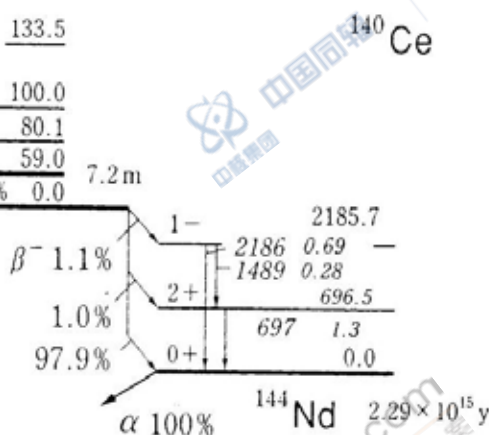
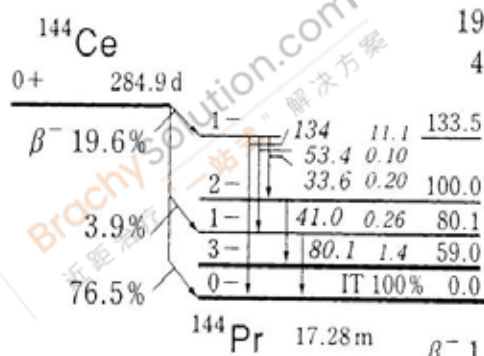
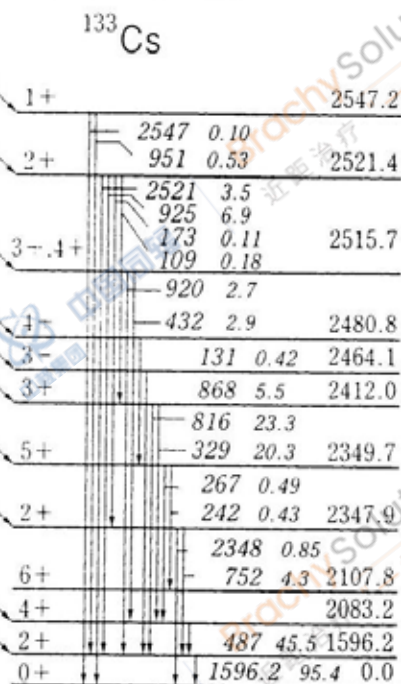
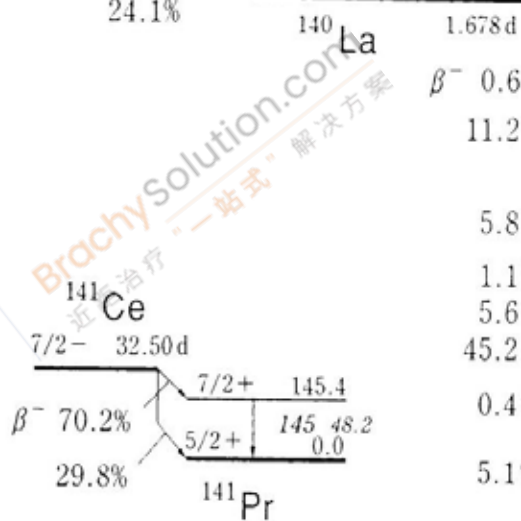
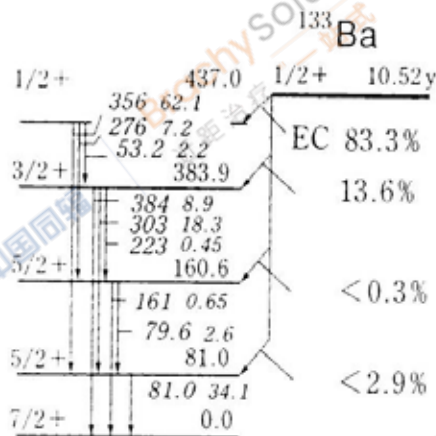
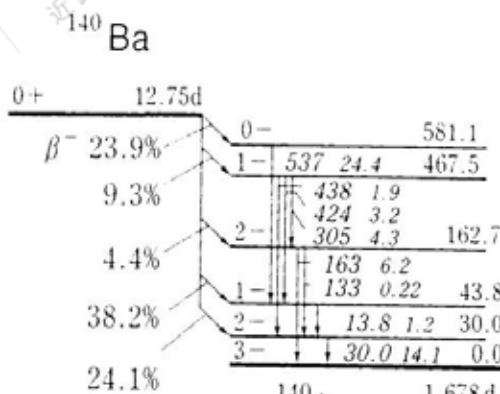
中国同辐
中核集团

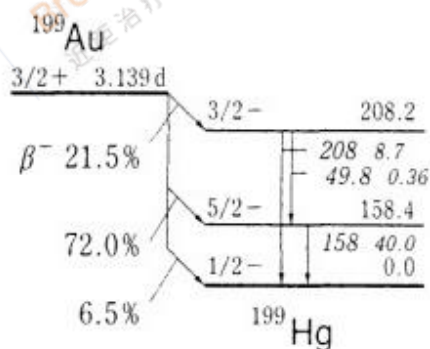
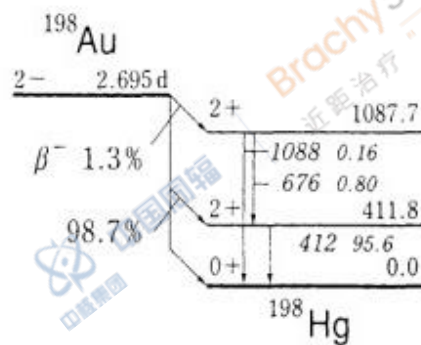
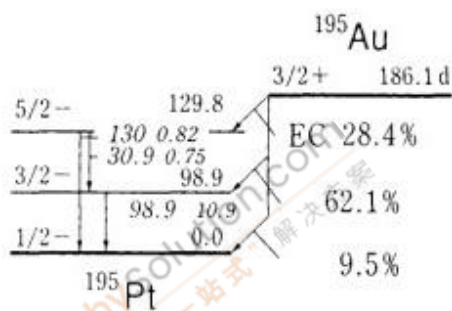
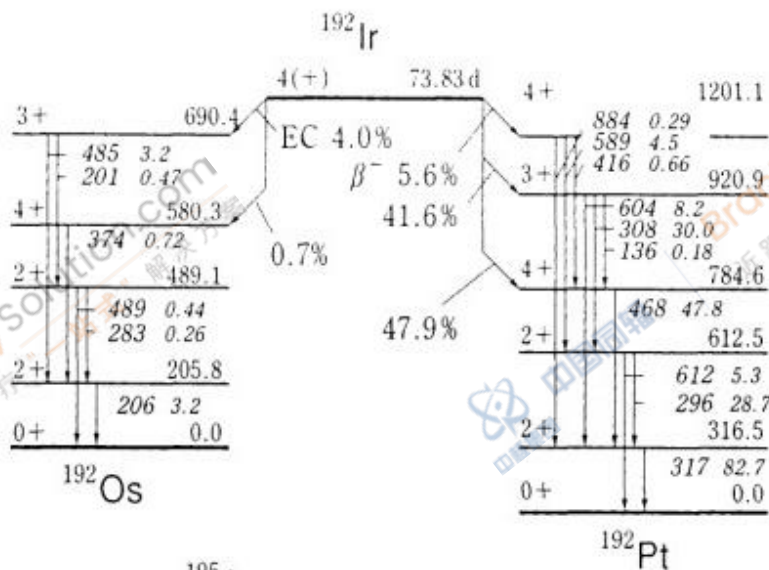
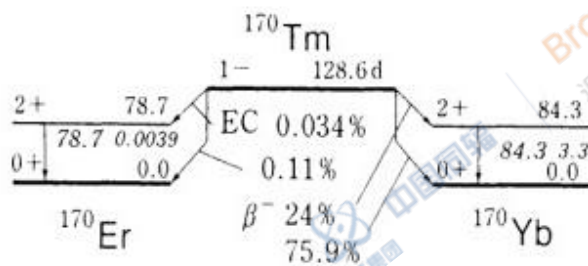
BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案

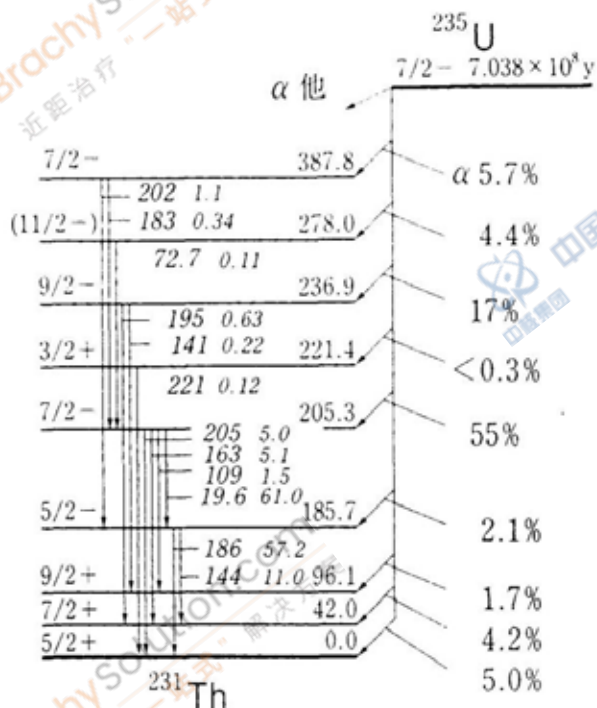


中国同辐
中核集团

BrachySolution.com
近距离治疗“一站式”解决方案







2.3 放射性活度

在给定时刻处于一给定能态的一定量的某种放射性核素的活度 A 定义为：

$$A = \frac{dN}{dt}$$

式中：dN—在时间间隔 dt 内该核素从该能态发生自发核跃迁数目的期望值。

放射性活度国际 SI 单位是贝可 (Bq)，每秒钟发生一次衰变为 1 贝可 (Bq)。曾用单位是居里 (Ci)。1Ci=3.7X10¹⁰Bq。实际工作中常用活度浓度这一名称。它是指每单位质量的固体物质 (Bq/g)，或每单位体积的液体中所含的放射性活度(Bq/ml)。

放射性核素活度与该核素质量的关系。1Bq 放射性核素的质量和活度 (比活度) 的关系，可以下式表示：

$$m = 8.62 \times 10^{-23} MT \quad S = 1.16 \times 10^{20} M^{-1} T^{-1}$$

式中，m：1Bq 的质量 (g)；T：半衰期 (h)；M：原子质量 (A 代替)；S：无载体放射性核素的质量活度 (比活度)。

1-2 常用放射性核素质量活度表 参考 (18)

放射性核素	半衰期	衰变类型	质量活度 TBq/kg	质量活度 Ci/g (近似值)
^3H	10.32 y	β^- (100)	3.56E+5	9.612E+3
^7Be	53.22 d	EC(100)	1.294E+7	3.494E+
^{11}C	20.39 m	β^+ (99.96)	3.099E+10	8.367E+8
^{14}C	5700 a	β^- (100)	1.657E+2	4.477E+0
^{13}N	9.965 m	β^+ (99.9)	5.369E+10	1.449E+9
^{15}O	122.24 s	β^+ (99.9)	2.135E+11	5.765E+9
^{18}F	109.77 m	β^+ (96.73)+EC(3.27)	3.337E+9	9.017E+7
^{22}Na	2.6019 y	EC(10.1)+ β^+ (89.9)	2.212E+5	5.972E+3

²⁴ Na	14.959 h	β^- (100)	3.102E+8	8.375E+6
²⁷ Mg	9.458 m	β^- (100)	2.629E+10	7.098E+8
²⁸ Mg	20.915 h	β^- (100)	1.913E+8	5.165E+6
²⁶ Al	7.17X10 ⁵ y	EC(18.27)+ β^+ (81.7 3)	6.939E-1	1.874E-2
²⁸ Al	2.2414 m	β^- (100)	1.071E+11	2.892E+9
³¹ Si	157.3 m	β^- (100)	1.383E+9	3.734E+7
³² P	14.263 d	β^- (100)	1.027E+7	2.776E+5
³³ P	25.34 d	β^- (100)	5.613E+6	1.517E+5
³⁵ S	87.51 d	β^- (100)	1.535E+6	4.149E+4
³⁶ Cl	301000 y	EC(1.9)+ β^- (98.1)	1.189E+0	3.214E-2
³⁸ Cl	37.24 m	β^- (100)	4.795E+9	1.296E+8
³⁷ Ar	35.04 d	EC(100)	3.633E+6	9.819E+4
⁴¹ Ar	109.61 m	β^- (100)	1.513E+9	4.0892E+7
⁴⁰ K	1.251X10 ⁹ y	EC(10.72)+ β^+ (0.001)+ β^- (89.28)	2.582E-4	6.978E-6
⁴² K	12.36 h	β^- (100)	2.184E+8	5.903E+6
⁴³ K	22.3 h	β^- (100)	1.183E+8	3.197E+6
⁴⁵ Ca	162.67 d	β^- (100)	6.464E+5	1.464E+4
⁴⁷ Ca	4.536 d	β^- (100)	2.222E+7	6.054E+5
⁴⁴ Sc	3.97 h	EC(5.73)+ β^+ (94.27)	6.498E+8	1.756E+7
⁴⁶ Sc	83.79 d	β^- (100)+IT(100)	1.228E+6	3.319E+4
⁴⁷ Sc	3.3492 d	β^- (100)	3.009E+7	8.132E+5
⁴⁹ Sc	57.2 m	β^- (100)	2.435E+9	6.581E+7
⁴⁴ Ti	60 y	EC(100)	4.904E+3	1.325E+2
⁵¹ Ti	5.76 m	β^- (100)	2.325E+10	6.284E+8
⁴⁸ V	15.9735 d	EC(50.3)+ β^+ (49.7)	6.180E+6	1.670E+5
⁴⁹ V	330 d	EC(100)	2.932E+5	7.924E+3
⁵² V	3.743 m	β^- (100)	3.511E+10	9.489E+8
⁵¹ Cr	27.7025 d	EC (100)	3.358E+6	9.075E+4
⁵² Mn	5.591 d	EC(70.4)+ β^+ (29.6)	1.632E+7	4.411E+5
⁵⁴ Mn	312.12 d	EC(100)	2.818E+5	6.976E+3
⁵⁶ Mn	2.5789 h	β^- (100)	7.898E+8	2.135E+7
⁵² Fe	8.275 h	EC(44.51)+ β^+ (55.49)	2.647E+8	7.154E+6
⁵⁵ Fe	2.737 y	EC (100)	8.642E+4	2.342E+3
⁵⁹ Fe	44.495 d	β^- (100)	1.812E+6	5.084E+4
⁵⁶ Co	77.23 d	EC(81)+ β^+ (19)	1.099E+6	2.970E+4
⁵⁷ Co	271.74 d	EC (100)	3.069E+5	8.295E+3
⁵⁸ Co	70.86 d	EC(85.1)+ β^+ (14.9)	1.157E+6	3.127E+4
⁶⁰ Co	5.2713 y	β^- (100)	4.119E+4	1.113E+3
⁶³ Ni	100.1 y	β^- (100)	2.067E+3	5.586E+1
⁶⁴ Cu	12.7 h	EC (43.6)+ β^+ (17.4)+ β^- (39)	1.406E+8	3.799E+6
⁶⁵ Zn	244.06 d	EC (98.5)+ β^+ (1.5)	3.003E+5	8.116E+3
^{69m} Zn	13.76 h	IT	1.205E+8	3.257E+6

⁶⁹ Zn	56.4 m	β ⁻ (100)	1.764E+9	4.768E+7
⁶⁶ Ga	9.49 h	EC (44)+β ⁺ (56)	1.826E+8	4.935E+6
⁶⁷ Ga	3.2612 d	EC (100)	2.181E+7	5.895E+5
⁶⁸ Ga	67.71 m	EC(10.9)+β ⁺ (89.1)	1.491E+9	4.297E+7
⁷² Ga	14.1 h	β ⁻ (100)	1.128E+8	3.049E+6
⁶⁸ Ge	270.95 d	EC(100)	2.587E+5	6.992E+3
⁷¹ Ge	11.43 d	EC(100)	5.878E+6	1.589E+5
⁷⁵ Ge	82.78 m	β ⁻ (100)	1.107E+9	2.919E+7
⁷⁷ Ge	11.3 h	β ⁻ (100)	1.317E+8	3.559E+6
⁷² As	26 h	EC(12.2)+β ⁺ (87.8)	6.116E+7	1.653E+6
⁷³ As	80.3 d	EC(100)	8.140E+5	2.199E+4
⁷⁴ As	17.77 d	EC(36.9)+β ⁺ (29.1)+β ⁻ (34)	3.629E+6	9.808E+4
⁷⁶ As	90.7 m	β ⁻ (100)	5.828E+7	1.574E+6
⁷⁷ As	38.83 h	β ⁻ (100)	3.833E+7	1.036E+6
⁷² Se	8.4 d	EC(100)	7.888E+6	2.129E+5
⁷⁵ Se	119.779 d	EC (100)	5.314E+5	1.436E+4
⁷⁷ Br	57.036 h	EC(99.26)+β ⁺ (0.74)	2.609E+7	7.051E+5
⁸⁰ Br	17.68 m	EC(6.1)+β ⁺ (2.2)+β ⁻ (91.7)	4.864E+9	1.315E+8
⁸² Br	35.30 h	β ⁻ (100)	3.962E+7	1.071E+6
⁷⁹ Kr	35.04 h	EC(93)+β ⁺ (7)	4.141E+7	1.119E+6
^{83m} Kr	1.83 h	IT(100)	7.736E+8	2.091E+7
⁸⁵ Kr	10.756 y	β ⁻ (100) +IT(21.4)+β ⁻ (78.6)	1.432E+4	3.870E+2
⁸¹ Rb	4.576 h	EC(72.9)+β ⁺ (27.1)	3.094E+8	8.362E+6
⁸³ Rb	86.2 d	EC(100)	6.680E+5	1.805E+4
⁸⁴ Rb	32.77 d	EC(70.5)+β ⁺ (25.7)+β ⁻ (3.8)	1.737E+6	4.695E+4
⁸⁶ Rb	18.642 d	β ⁻ (99.99) +EC(0.01)+IT(100)	2.982E+6	8.059E+4
⁸⁷ Rb	4.923x10 ¹⁰ y	β ⁻ (100)	3.057E-6	8.262E-8
⁸⁸ Rb	17.78 m	β ⁻ (100)	4.401E+9	1.189E+8
⁸² Sr	25.36 d	EC(100)	2.298E+6	6.211E+4
⁸⁵ Sr	64.84 d	EC (100)	8.675E+5	2.345E+4
⁸⁹ Sr	50.53 d	β ⁻ (100)	1.064E+6	2.876E+4
⁹⁰ Sr	28.79 y	β ⁻ (100)	5.055E+3	1.366E+2
⁸⁷ Y	79.8 h	EC(99.8)+β ⁺ (0.2)	1.653E+7	4.468E+5
⁸⁸ Y	106.65 d	EC (99.79)+β ⁺ (0.24)	5.096E+5	1.377E+4
⁹⁰ Y	64.1h	β ⁻ (100)	1.990E+7	5.378E+5
⁹¹ Y	58.51 d	β ⁻ (100)	8.986E+5	2.429E+4
⁹⁵ Zr	64.032 d	β ⁻ (100)	7.868E+5	2.126E+4
⁹⁷ Zr	16.744 h	β ⁻ (100)	7.074E+7	1.912E+6
⁹⁰ Nb	14.6 h	EC(48.8)+β ⁺ (51.2)	8.738E+7	2.362E+6
⁹⁵ Nb	34.991 d	β ⁻ (100)	1.440E+6	3.892E+4
⁹⁹ Mo	65.94 h	β ⁻ (100)	1.760E+7	4.757E+5
^{99m} Tc	6.015 h	IT (100)	1.930E+8	5.216E+6

⁹⁹ Tc	2.11x10 ⁵ y	β ⁻ (100)	6.273E-1	1.695E-2
¹⁰³ Ru	39.26 d	β ⁻ (100)	1.185E+6	3.203E+4
¹⁰⁵ Ru	4.44 h	β ⁻ (100)	2.466E+8	6.665E+6
¹⁰⁶ Ru	373.59 d	β ⁻ (100)	1.210E+5	3.270E+3
¹⁰⁵ Rh	35.36 h	β ⁻ (100)	3.097E+7	8.370E+5
¹⁰³ Pd	16.991 d	EC (100)	2.737E+6	7.397E+4
¹⁰⁹ Pd	13.7012 h	β ⁻ (100)+IT(100)	7.701E+7	2.081E+6
¹⁰⁵ Ag	41.29 d	EC(100)	1.105E+6	2.986E+4
¹¹⁰ Ag	24.6 s	β ⁻ (99.7)+EC(0.3)	1.530E+11	4.135E+9
^{110m} Ag	249.76 d	β ⁻ (98.64)+IT(1.36)	1.744E+5	4.714E+3
¹¹¹ Ag	7.45 d	β ⁻ (100)	5.796E+6	1.566E+5
¹⁰⁹ Cd	461.4d	EC (100)+IT(100)	9.529E+4	2.575E+3
¹¹⁵ Cd	53.46 h	β ⁻ (100)	1.872E+7	5.059E+5
¹¹⁷ Cd	2.49 h	β ⁻ (100)	3.950E+8	1.068E+7
¹¹¹ In	2.8047d	EC(100)	1.540E+7	4.162E+5
^{113m} In	1.6579 h	IT(100)	6.141E+8	1.659E+7
^{114m} In	49.51 d	EC(3.25)+IT(96.75),IT(100)	8.494E+5	2.296E+4
¹¹⁴ In	71.9 s	EC(0.495)+β ⁺ (0.005)+β ⁻ (99.5)	5.053E+10	1.366E+9
^{116m} In	54.41 m	β ⁻ (100)	1.094E+9	2.957E+7
^{117m} In	116.2 m	β ⁻ (52.9)	5.079E+8	1.373E+7
¹¹⁷ In	43.2 m	β ⁻ (100)	1.366E+9	3.692E+7
¹¹³ Sn	115.09 d	EC(100)+EC (8.9)+IT(91.1)	3.686E+5	9.962E+3
¹²¹ Sn	27.03 h	β ⁻ (100)	3.519E+7	9.511E+5
¹²³ Sn	129.2 d	β ⁻ (100)	3.018E+5	8.157E+3
¹²⁴ Sb	60.2 d	β ⁻ (100)	6.426E+5	1.737E+4
¹²⁵ Sb	2.75856 y	β ⁻ (100)	3.809E+4	1.029E+3
¹²⁷ Te	9.35 h	β ⁻ (100)	9.697E+7	2.621E+6
^{129m} Te	33.6 d	β ⁻ (37)+IT(63)	1.107E+6	2.992E+4
¹²⁹ Te	69.6 m	β ⁻ (100)	7.696E+8	2.079E+7
¹³¹ Te	25 m	β ⁻ (77.8)+IT(22.2)+β ⁻ (100)	2.110E+9	5.703E+7
¹³² Te	3.204 d	β ⁻ (100)	1.135E+7	3.068E+5
¹²¹ I	2.12 h	EC(89.7)+β ⁺ (10.3)	4.487E+8	1.2134E+7
¹²³ I	13.27 h	EC (100)	7.053E+7	1.906E+6
¹²⁴ I	4.176 d	EC(77)+β ⁺ (23)	9.624E+6	2.601E+5
¹²⁵ I	59.4 d	EC (100)	4.462E+5	1.206E+4
¹²⁶ I	12.93 d	EC(55.4)+β ⁺ (1.16),β ⁻ (43.7)	2.945E+6	7.959E+4
¹²⁸ I	24.99 m	EC(6.895)+β ⁺ (0.005)+β ⁻ (93.1)	2.160E+9	5.838E+7
¹²⁹ I	1.57X10 ⁷ y	β ⁻ (100)	6.487E-3	1.753E-4
¹³⁰ I	12.36 h	β ⁻ (100)	7.167E+7	1.937E+6
¹³¹ I	8.0207 d	β ⁻ (100)	4.567E+6	1.234E+5
¹³² I	2.295 h	β ⁻ (100)	3.802E+8	1.028E+7
¹³³ I	20.8 h	β ⁻ (100)	4.264E+7	1.152E+6

^{131m} Xe	11.84 d	IT(100)	3.094E+6	8.362E+4
^{133m} Xe	2.19 d	IT(100)	1.648E+7	4.454E+5
¹³³ Xe	5.243 d	β ⁻ (100)	6.883E+6	1.860E+5
¹²⁹ Cs	32.06 h	EC(100)	2.785E+7	7.527E+5
¹³⁰ Cs	29.21 m	EC(53.2)+β ⁺ (45.2)+β ⁻ (1.6)	1.820E+9	4.919E+7
¹³¹ Cs	9.689 d	EC (100)	3.781E+6	1.022E+5
¹³² Cs	6.479 d	EC(97.7)+β ⁺ (0.43)+β ⁻ (1.87)	5.612E+6	1.517E+5
^{134m} Cs	2.903 h	IT(100)	2.961E+8	8.003E+6
¹³⁴ Cs	2.0648 y	β ⁻ (100)	4.749E+4	1.284E+3
¹³⁷ Cs	30.1671 y	β ⁻ (100)	3.180E+3	8.595E+1
^{131m} Ba	14.6 m	IT(100)	3.613E+9	9.765E+7
¹³¹ Ba	11.5 d	EC (100)	3.185E+6	1.023E+5
¹³³ Ba	10.52 y	EC(100)	9.392E+3	2.538E+2
¹³⁹ Ba	83.06 m	β ⁻ (100)	5.988E+8	1.618E+7
¹⁴⁰ Ba	12.752 d	β ⁻ (100)	2.689E+6	7.268E+4
¹⁴⁰ La	1.6781 d	β ⁻ (100)	2.043E+7	5.522E+5
¹³⁹ Ce	137.641 d	EC(100)	2.509E+5	6.781E+3
¹⁴¹ Ce	32.508 d	β ⁻ (100)	1.047E+6	2.829E+4
¹⁴³ Ce	33.039 h	β ⁻ (100)	2.439E+7	6.592E+5
¹⁴⁴ Ce	284.91 d	β ⁻ (100)	1.170E+5	3.162E+3
¹⁴² Pr	19.12 h	β ⁻ (99.98)+EC(0.02)	4.244E+7	1.147E+6
¹⁴³ Pr	13.57 d	β ⁻ (100)	2.474E+6	6.686E+4
¹⁴⁷ Nd	10.98 d	β ⁻ (100)	2.975E+6	8.041E+4
¹⁴⁹ Nd	1.728 h	β ⁻ (100)	4.476E+8	1.209E+7
¹⁴⁷ Pm	2.6234 y	β ⁻ (100)	3.409E+4	9.214E+2
¹⁴⁹ Pm	53.08 h	β ⁻ (100)	1.457E+7	3.938E+5
¹⁴⁵ Sm	340 d	EC (100)	9.740E+4	2.632E+3
¹⁵¹ Sm	90 y	β ⁻ (100)	9.676E+2	2.615E+1
¹⁵³ Sm	46.5 h	β ⁻ (100)	1.620E+7	4.378E+5
^{152m} Eu	9.3116 h	EC(27.99)+β ⁺ (0.07) + β ⁻ (72.1)+IT(100)	8.144E+7	2.201E+6
¹⁵² Eu	13.537 y	EC (72.1)+β ⁺ (0.014) +β ⁻ (27.9)	6.391E+3	1.727E+2
¹⁵⁴ Eu	8.593 y	β ⁻ (99.98)	9.938E+3	2.686E+2
¹⁵⁵ Eu	4.7611 y	β ⁻ (100)	1.782E+4	4.816E+2
¹⁵³ Gd	240.4 d	EC (100)+IT(100)	1.306E+5	3.529E+3
¹⁵⁹ Gd	18.479 d	β ⁻ (100)	3.924E+7	1.061E+6
¹⁶⁰ Tb	72.3 d	β ⁻ (100)	4.153E+5	1.122E+4
¹⁶¹ Tb	6.906 d	β ⁻ (100)	4.321E+6	1.168E+5
¹⁵⁷ Dy	8.14 h	EC(100)	9.021E+7	2.438E+6
¹⁶⁵ Dy	2.334 h	β ⁻ (100)	2.994E+8	8.092E+6
¹⁶⁶ Ho	26.8 h	β ⁻ (100)	2.592E+7	7.005E+5
¹⁶⁹ Er	9.4 d	β ⁻ (100)	3.025E+6	8.176E+4

¹⁷¹ Er	7.516 h	β ⁻ (100)	8.974E+7	2.425E+6
¹⁷⁰ Tm	128.6 d	β ⁻ (99.87)+EC(0.13)	2.198E+5	5.941E+3
¹⁶⁹ Yb	32.026 d	EC (100)	8.879E+5	2.399E+4
¹⁷⁵ Yb	4.185 d	β ⁻ (100)	6.562E+6	1.774E+5
¹⁷⁷ Yb	1.911 h	β ⁻ (100)	3.410E+8	9.216E+6
^{176m} Lu	3.635 h	β ⁻ (99.9)+EC(0.1)	1.803E+8	4.873E+6
¹⁷⁷ Lu	6.647 d	β ⁻ (100)	4.085E+6	1.104E+5
¹⁷⁵ Hf	70 d	EC(100)	1.923E+5	5.197E+3
^{180m} Hf	5.5 h	IT(99.7)+ β ⁻ (0.3)	1.165E+8	3.149E+6
¹⁸¹ Hf	42.39 d	β ⁻ (100)	6.265E+5	1.693E+4
¹⁸² Ta	114.43 d	β ⁻ (100)+IT(100)	2.308E+5	6.238E+3
¹⁸¹ W	121.2 d	EC(100)	2.191E+5	5.922E+3
¹⁸⁵ W	75.1 d	β ⁻ (100)+IT(100)	3.460E+5	9.351E+3
¹⁸⁷ W	23.72 h	β ⁻ (100)	2.601E+7	7.029E+5
¹⁸³ Re	70 d	EC(100)+IT(100)	3.753E+5	1.014E+4
¹⁸⁶ Re	3.7183 d	β ⁻ (92.53)+EC (7.47)	6.951E+6	1.879E+5
¹⁸⁸ Re	17.004 h	β ⁻ (100)+IT(100)	3.609E+7	9.754E+5
¹⁸⁵ Os	93.6 d	EC(100)	2.776E+5	7.503E+3
¹⁹¹ Os	15.4 d	β ⁻ (100)+IT(100)	1.635E+6	4.419E+4
¹⁹³ Os	30.11 h	β ⁻ (100)	1.986E+7	5.368E+5
¹⁹² Ir	73.827 d	β ⁻ (95.13)+EC (4.87)	3.392E+5	9.168E+3
¹⁹⁴ Ir	19.28 h	β ⁻ (100)	3.085E+7	8.338E+5
^{195m} Pt	4.02 d	IT(100)	6.134E+6	1.658E+5
¹⁹⁷ Pt	19.8915 d	β ⁻ (100)+β ⁻ (3.3)+IT(96.7)	2.945E+7	7.959E+5
¹⁹⁹ Pt	30.8 m	β ⁻ (100)+IT(100)	1.130E+9	3.054E+7
¹⁹⁵ Au	186.098 d	EC (100)+IT(100)	1.325E+5	3.581E+3
¹⁹⁸ Au	2.69517 d	β ⁻ (100)+IT(100)	9.011E+6	2.435E+5
¹⁹⁹ Au	3.139 d	β ⁻ (100)+IT(100)	7.698E+6	2.081E+5
^{197m} Hg	23.8 h	EC(8.6)+IT(91.4)	2.461E+7	6.651E+5
¹⁹⁷ Hg	64.94 h	EC(100)	9.021E+6	2.438E+5
²⁰³ Hg	46.612 d	β ⁻ (100)	5.082E+5	1.374E+4
²⁰¹ Tl	72.912 h	EC (100)+IT(100)	7.875E+6	2.128E+5
²⁰⁴ Tl	3.78 y	β ⁻ (97.1)+EC (2.9)	1.707E+4	4.614E+2
²¹⁰ Pb	22.2 y	β ⁻ (100)	2.824E+3	7.632E+1
²⁰⁶ Bi	6.243 d	EC(100)	3.739E+6	1.011E+5
²⁰⁷ Bi	32.9 y	EC(99.988)+β ⁺ (0.012)	1.933E+3	5.224E+1
²¹⁰ Bi	5.013 d	β ⁻ (100)	4.569E+6	1.234E+5
²⁰⁸ Po	2.898 y	EC(0.0018)+α(99.9982)	2.184E+4	5.903E+2
²¹⁰ Po	138.376 d	α(100)	1.655E+5	4.473E+3
²²² Rn	3.8235 d	α(100)	5.692E+6	1.538E+5
²²⁴ Ra	3.66 d	α(100)	5.893E+6	1.593E+5
²²⁶ Ra	1600 y	α(100)	3.658E+1	9.886E-1

^{228}Ra	5.75 y	β^- (100)	1.009E+4	2.727E+2
^{227}Ac	21.772 y	α (1.38)+ β^- (98.62)	2.677E+3	7.235E+1
^{228}Th	1.9116 y	α (100)	3.035E+4	8.203E+2
^{232}Th	1.405×10^{10} y	α (100)	4.058E-6	1.097E-7
^{233}Th	22.3 m	β^- (100)	1.339E+9	3.619E+7
^{231}Pa	32760 y	α (100)	1.748E+0	4.724E-2
^{233}Pa	26.967 d	β^- (100)	7.689E+5	2.078E+3
^{232}U	68.9 y	α (100)	8.275E+2	2.236E+1
^{235}U	7.04×10^8 y	α (100)	7.995E-5	2.161E-6
^{237}U	6.75 d	β^- (100)	3.020E+6	8.162E+4
^{238}U	4.468×10^9 y	α (100)	1.244E-5	3.362E-7
^{239}U	23.45 m	β^- (100)	1.241E+9	3.254E+7
^{237}Np	2.144×10^6 y	α (100)	2.603E-2	7.035E-4
^{239}Np	2.3565 d	β^- (100)	8.578E+6	2.124E+5
^{238}Pu	87.7 y	α (100)	6.337E+2	1.713E+1
^{239}Pu	24110 y	α (100)	2.295E+0	6.203E-2
^{240}Pu	6564 y	α (100)	8.396E+0	2.262E-1
^{241}Pu	14.35 y	β^- (100)	3.825E+3	1.034E+1
^{241}Am	432.2 y	α (100)	1.270E+2	3.451E+0
^{242}Am	16.02 h 141y	EC (17.3)+ β^- (82.7)+ α (0.46)+IT(99.54)	2.991E+7	8.084E+5
^{243}Am	7370 y	α (100)	7.385E+0	1.996E-2
^{242}Cm	162.8 d	α (100)	1.226E+5	3.314E+3
^{244}Cm	18.1 y	α (100)	2.995E+3	8.095E+1
^{252}Cf	2.645 y	α (96.91)+SF(3.09)	1.984E+4	5.362E+2

3. 原子核反应

原子核之间或原子核与粒子（如中子、质子、氘核、 α 粒子等）、 γ 光子之间相互作用所引起的变化过程称为**核反应**。核反应是制备放射性核素，获得核能的重要途径。核反应一般表示为 $X+a=Y+b$ ，或简写成 $X(a,b)Y$ 。X 和 a 分别表示靶核和入射粒子；Y 和 b 分别表示生成核和出射粒子。

表 1-3 核反应的分类

入射粒子种类		主要核反应
中子	慢中子	(n,γ) , (n,p) , (n,α) , (n,f)
	快中子	(n,p) , (n,α) , $(n,2n)$, $(n,3n)$
带电粒子	质子	(p,n) , (p,α) , (p,d) , (p,pn) , $(p,p2n)$, (p,γ)
	氘核	(d,n) , (d,p) , (d,α) , $(d,2n)$, $(d,\alpha n)$
	α 粒子	(α,n) , (α,p) , (α,d) , (α,pn) , $(\alpha,2p)$, $(\alpha,2n)$, $(\alpha,2pn)$, $(\alpha,p2n)$
	重离子	如 $^{249}\text{Cf}(^{18}\text{O},4n)^{263}106$
γ 光子		(γ,n) , (γ,p) , (γ,np) , $(\gamma,2n)$, $(\gamma,2p)$

核反应过程遵循电荷守恒、能量守恒、动量守恒、角动量守恒、宇称守恒以及低能核反应中的质量数守恒。

核反应中放出的能量，用符号 Q 表示。 Q 等于反应后体系的动能减去反应前体系的动能。核反应过程中，如果 $Q>0$ 称为**放能反应**； $Q<0$ 的反应称为**吸能反应**； $Q=0$ 的反应称为**弹性散射**。对于某一核反应可以用下式的计算结果判断是放热反应或吸热反应：

$$Q=(E_y+E_b)-(E_x+E_a)=[(m_x+m_a)-(m_y+m_b)]c^2$$

E_x, E_a, E_y, E_b 分别表示靶核、入射粒子、生成核和出射粒子的动能； m_x, m_a, m_y, m_b 分别为它们的静止质量。对于吸热反应，入射粒子具有的动能除了供应体系所要求的能量外，还必须供给体系一定量的动能。此能量称为**核反应阈能**。对于放能反应，原则上**阈能等于零**。

反应截面表示一个入射粒子同单位面积靶上一个靶核发生反应的几率。反应截面用 σ 表示，单位是靶 (barn, b)。1 靶 (b) = 10^{-28} m^2 。反应截面与入射粒子能量之间的函数关系称为**激发函数**，它对放射性核素生产具有重要意义。

4. 射线与物质的相互作用

射线通过物质时使物质产生物理、化学或生理变化。在此过程中，射线将逐步损失能量，最终被物质吸收。射线与物质的相互作用是射线探测、辐射防护和放射性核素应用的基础。

4.1 带电粒子与物质相互作用

带电粒子与物质的相互作用的重要过程有：电离和激发，弹性散射，韧致辐射，湮没辐射，核反应以及引起物质化学变化等。

高能带电粒子 (α, β , 质子, 核裂变碎片, 反冲核等) 穿过物质，与它周围原子的壳层电子发生库仑作用时，把自身的部分能量传递给壳层电子。如果壳层电子获得的能量足以克服原子核的束缚而成为自由电子，则原子发生**电离**。如果自由电子所获能量足够高，可以引起次级电离。电离过程产生正离子和电子组成的离子对。

如果壳层电子获得的能量不足以克服原子核对它的束缚，而是从低能级跃迁到高能级，使原子处于激发态，此过程称为**激发**。处于激发态的原子不稳定，通过放出元素特征X射线回到基态。

带电粒子通过物质时，不仅损失能量，而且由于与原子核发生库仑作用，其运动方向也发生改变，这种现象称为**散射**。

高速带电粒子掠过原子核，会受到原子核库仑力的作用而产生加速度，其部分甚至全部动能将转变为连续谱的电磁辐射，成为**韧致辐射**。韧致辐射是快速电子在物质（特别是高原子序数物质）中损失能量的重要方式。

一个粒子与其相应的反粒子发生碰撞时，其质量可能转化为 γ 辐射，称为**湮没辐射**。例如一个正电子与一个负电子碰撞，产生两个（或三个但几率很小）能量为 0.511MeV 的光子。

4.2 γ 射线与物质的相互作用

γ 射线对物质的主要作用是**光电效应**、**康普顿散射**和**电子对效应**。

一个光子打在原子上时，它可能将本身的能量全部转移给原子的壳层电子，使其脱离原子自由运动，光子则被原子吸收。光子打出的电子称**光电子**，这种效应叫**光电效应**。对于低能 γ 射线，高原子序数吸收物质，主要发生光电效应。

γ 光子与物质作用时还可能发生散射作用，即光子和原子中的一个电子发生弹性碰撞，光子损失能量，改变运动方向，电子获得能量从原子中移出。这种现象称为**康普顿散射**。对于中能 γ 射线，低原子序数吸收物质，康普顿散射占优势。

当入射光子的能量大于 1.022MeV 时，可能发生**电子对效应**。此时原入射光子消失，形成一个正电子和一个负电子（电子对）。对于高能 γ 射线和高原子序数的吸收物质，电子对效应是主要的。

γ 射线通过物质时发生这三种效应，逐步损失能量，最终被物质吸收。 γ 射线强度 I 与吸收物质厚度 d 的关系是一种指数关系：

$$I=I_0e^{-\mu d}$$

式中， I_0 为 $d=0$ 时的 γ 射线强度； μ 为物质的总线性减弱系数。

μ 为物质的总线性减弱系数，表示入射光子在物质中穿行单位距离时，平均发生总的相互作用的几率。在实际工作中使用线衰减系数较为方便，但它与屏蔽材料的密度有关，在计算时常采用质量衰减系数 μ/ρ 。表 1-4~12 给出某些物质材料的质量衰减系数

表 1-4 γ 射线衰减系数（氢）

($Z=1$, $\rho=8.988 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$)

γ 射线能量 (MeV)	散射	光电效应	电子对生成	光子总截面	质量衰减系 数(cm^2/g)
	$(10^{-24} \text{ cm}^2/\text{atom})$				
0.005	6.525E-1	4.907E-2		7.016E-1	4.192E-1
0.006	6.501E-1	2.627E-2		6.764E-1	4.042E-1
0.008	6.452E-1	9.816E-3		6.550E-1	3.914E-1
0.01	6.405E-1	4.558E-3		6.451E-1	3.854E-1
0.015	6.290E-1	1.128E-3		6.301E-1	3.764E-1
0.02	6.180E-1	4.182E-4		6.184E-1	3.695E-1
0.03	5.975E-1	1.032E-4		5.976E-1	3.570E-1
0.04	5.787E-1	3.823E-5		5.787E-1	3.458E-1
0.05	5.615E-1	1.771E-5		5.615E-1	3.355E-1
0.06	5.456E-1	9.455E-6		5.456E-1	3.260E-1
0.08	5.173E-1	3.523E-6		5.173E-1	3.091E-1
0.10	4.927E-1	1.644E-6		4.927E-1	2.944E-1
0.15	4.436E-1	4.176E-7		4.436E-1	2.650E-1
0.2	4.065E-1	1.611E-7		4.065E-1	2.429E-1
0.3	3.535E-1	4.414E-8		3.535E-1	2.112E-1
0.4	3.167E-1	1.858E-8		3.167E-1	1.892E-1
0.5	2.892E-1	9.927E-9		2.892E-1	1.728E-1
0.6	2.675E-1	6.158E-9		2.675E-1	1.598E-1
0.8	2.350E-1	3.118E-9		2.350E-1	1.404E-1
1.0	2.112E-1	1.961E-9		2.112E-1	1.262E-1
1.5	1.716E-1	9.732E-10	4.385E-5	1.716E-1	1.026E-1
2	1.464E-1	6.201E-10	1.758E-4	1.466E-1	8.758E-2
3	1.151E-1	3.524E-10	5.452E-4	1.156E-1	6.910E-2
4	9.597E-2	2.444E-10	9.849E-4	9.695E-2	5.793E-2
5	8.287E-2	1.866E-10	1.430E-3	8.430E-2	5.036E-2
6	7.323E-2	1.508E-10	1.859E-3	7.509E-2	4.486E-2
8	5.988E-2	1.088E-10	2.634E-3	6.251E-2	3.735E-2

10	5.099E-2	8.503E-11	3.308E-3	5.430E-2	3.244E-2
15	3.771E-2	5.495E-11	4.639E-3	4.235E-2	2.530E-2
20	3.025E-2	4.057E-11	5.651E-3	3.590E-2	2.145E-2
30	2.200E-2	2.662E-11	7.141E-3	2.914E-2	1.741E-2
40	1.746E-2	1.981E-11	8.225E-3	2.569E-2	1.535E-2
50	1.457E-2	1.577E-11	9.075E-3	2.365E-2	1.412E-2
60	1.254E-2	1.310E-11	9.771E-3	2.231E-2	1.333E-2
80	9.882E-3	9.787E-12	1.087E-2	2.075E-2	1.240E-2
100	8.199E-3	7.811E-12	1.171E-2	1.991E-2	1.189E-2

表 1-5 γ 射线衰减系数 (碳)

($Z=6$, $\rho=2.25\text{g/cm}^3$)

γ 射线能量, MeV	散射	光电效应	电子对生成	光子总截面	质量衰减系数 (cm^2/g)
	$(10^{-24}\text{cm}^2/\text{atom})$				
0.005	3.915	3.721E+2		3.760E+2	1.866E+1
0.006	3.901	2.103E+2		2.142E+2	1.074E+1
0.008	3.871	8.459E+1		8.846E+1	4.435
0.01	3.843	4.141E+1		4.542E+1	2.268
0.015	3.774	1.114E+1		1.491E+1	7.476E-1
0.02	3.708	4.341		8.049	4.035E-1
0.03	3.585	1.138		4.723	2.368E-1
0.04	3.472	4.374E-1		3.909	1.960E-1
0.05	3.369	2.097E-1		3.577	1.794E-1
0.06	3.274	1.131E-1		3.387	1.698E-1
0.08	3.104	4.327E-2		3.147	1.578E-1
0.1	2.956	2.057E-2		2.977	1.493E-1
0.15	2.662	5.397E-3		2.667	1.338E-1
0.2	2.439	2.121E-3		2.441	1.223E-1
0.3	2.121	5.944E-4		2.122	1.063E-1
0.4	1.900	2.536E-4		1.900	9.527E-2
0.5	1.735	1.364E-4		1.735	8.700E-2
0.6	1.605	8.482E-5		1.605	8.047E-2
0.8	1.410	4.277E-5		1.410	7.070E-2
1	1.267	2.659E-5		1.267	6.352E-2
1.5	1.029	1.209E-5	1.594E-3	1.031	5.167E-2
2	8.782E-1	7.631E-6	6.356E-3	8.846E-1	4.435E-2
3	6.906E-1	4.282E-6	1.844E-2	7.090E-1	3.555E-2
4	5.758E-1	2.947E-6	3.054E-2	6.063E-1	3.040E-2
5	4.972E-1	2.239E-6	4.163E-2	5.388E-1	2.701E-2
6	4.394E-1	1.802E-6	5.179E-2	4.912E-1	2.463E-2
8	3.593E-1	1.294E-6	6.928E-2	4.286E-1	2.148E-2
10	3.059E-1	1.009E-6	8.388E-2	3.898E-1	1.954E-2

15	2.263E-1	6.490E-7	1.115E-1	3.378E-1	1.693E-2
20	1.815E-1	4.782E-7	1.319E-1	3.134E-1	1.571E-2
30	1.320E-1	3.131E-7	1.608E-1	2.928E-1	1.468E-2
40	1.048E-1	2.327E-7	1.810E-1	2.858E-1	1.433E-2
50	8.740E-2	1.851E-7	1.963E-1	2.837E-1	1.423E-2
60	7.525E-2	1.537E-7	2.086E-1	2.838E-1	1.423E-2
80	5.929E-2	1.148E-7	2.271E-1	2.864E-1	1.436E-2
100	4.919E-2	9.156E-8	2.408E-1	2.900E-1	1.444E-2

表 1-6 γ 射线衰减系数 (氧)

($Z=8$, $\rho=0.001429\text{g/cm}^3$)

γ 射线能量, MeV	散射	光电效应	电子对生成	光子总截面	质量衰减系数 (cm^2/g)
	$(10^{-24}\text{cm}^2/\text{atom})$				
0.005	5.220	1.254E+3		1.259E+3	4.738E+1
0.006	5.201	7.199E+2		7.251E+2	2.730E+1
0.008	5.162	2.967E+2		3.019E+2	1.136E+1
0.01	5.124	1.479E+2		1.530E+2	5.758
0.015	5.032	4.096E+1		4.599E+1	1.731
0.02	4.944	1.627E+1		2.121E+1	7.985E-1
0.03	4.780	4.360		9.140	3.440E-1
0.04	4.630	1.699		6.329	2.382E-1
0.05	4.492	8.151E-1		5.307	1.997E-1
0.06	4.365	4.465E-1		4.812	1.811E-1
0.08	4.138	1.726E-1		4.311	1.622E-1
0.1	3.942	8.264E-2		4.025	1.514E-1
0.15	3.549	2.186E-2		3.571	1.344E-1
0.2	3.252	8.637E-2		3.261	1.227E-1
0.3	2.828	2.441E-3		2.830	1.066E-1
0.4	2.533	1.045E-3		2.534	9.538E-2
0.5	2.313	5.634E-4		2.314	8.708E-2
0.6	2.140	3.509E-4		2.140	8.056E-2
0.8	1.880	1.771E-4		1.880	7.077E-2
1	1.690	1.101E-4		1.690	6.356E-2
1.5	1.373	5.054E-5	2.850E-3	1.376	5.178E-2
2	1.171	3.179E-5	1.134E-2	1.182	4.450E-2
3	9.207E-1	1.776E-5	3.273E-2	9.535E-1	3.589E-2
4	7.678E-1	1.219E-5	5.388E-2	8.217E-1	3.093E-2
5	6.629E-1	9.242E-6	7.314E-2	7.360E-1	2.770E-2
6	5.858E-1	7.430E-6	9.067E-2	6.765E-1	2.546E-2
8	4.791E-1	5.326E-6	1.207E-1	5.998E-1	2.258E-2
10	4.079E-1	4.146E-6	1.457E-1	5.536E-1	2.084E-2
15	3.017E-1	2.664E-6	1.928E-1	4.945E-1	1.861E-2

20	2.420E-1	1.961E-6	2.273E-1	4.693E-1	1.766E-2
30	1.760E-1	1.283E-6	2.762E-1	4.522E-1	1.702E-2
40	1.397E-1	9.531E-7	3.100E-1	4.497E-1	1.693E-2
50	1.165E-1	7.581E-7	3.359E-1	4.524E-1	1.703E-2
60	1.003E-1	6.294E-7	3.563E-1	4.566E-1	1.719E-2
80	7.905E-2	4.698E-7	3.876E-1	4.666E-1	1.756E-2
100	6.559E-2	3.747E-7	4.105E-1	4.761E-1	1.792E-2

表 1-7 γ 射线衰减系数 (铝)

($Z=13$, $\rho=2.70\text{g/cm}^3$)

γ 射线能量, MeV	散射	光电效应	电子对生成	光子总截面	质量衰减系数 (cm^2/g)
	$(10^{-24}\text{cm}^2/\text{atom})$				
0.005	8.483	8.612E+3		8.620E+3	1.924E+2
0.006	8.451	5.119E+3		5.127E+3	1.144E+2
0.008	8.388	2.218E+3		2.226E+3	4.970E+1
0.01	8.326	1.145E+3		1.153E+3	2.575E+1
0.015	8.177	3.367E+2		3.449E+2	7.697
0.02	8.034	1.389E+2		1.469E+2	3.279
0.03	7.767	3.908E+1		4.685E+1	1.045
0.04	7.624	1.570E+1		2.322E+1	5.184E-1
0.05	7.300	7.696		1.500E+1	3.347E-1
0.06	7.093	4.285		1.138E+1	2.539E-1
0.08	6.725	1.695		8.420	1.880E-1
0.1	6.406	8.245E-1		7.231	1.614E-1
0.15	5.767	2.237E-1		5.991	1.337E-1
0.2	5.284	8.970E-2		5.374	1.199E-1
0.3	4.595	2.573E-2		4.621	1.031E-1
0.4	4.117	1.111E-2		4.128	9.213E-2
0.5	3.759	6.021E-3		3.765	8.403E-2
0.6	3.477	3.764E-3		3.481	7.769E-2
0.8	3.054	1.905E-3		3.056	6.821E-2
1	2.746	1.184E-3		2.747	6.132E-2
1.5	2.230	5.476E-4	7.652E-3	2.238	4.995E-2
2	1.903	3.420E-4	3.023E-2	1.934	4.316E-2
3	1.496	1.892E-4	8.647E-2	1.583	3.533E-2
4	1.248	1.291E-4	1.411E-1	1.389	3.101E-2
5	1.077	9.746E-5	1.904E-1	1.267	2.829E-2
6	9.520E-1	7.821E-5	2.350E-1	1.187	2.649E-2
8	7.785E-1	5.577E-5	3.110E-1	1.090	2.432E-2
10	6.629E-1	4.330E-5	3.736E-1	1.037	2.313E-2
15	4.903E-1	2.772E-5	4.910E-1	9.814E-1	2.191E-2
20	3.933E-1	2.037E-5	5.763E-1	9.696E-1	2.164E-2

30	2.860E-1	1.330E-5	6.962E-1	9.822E-1	2.192E-2
40	2.270E-1	9.870E-6	7.799E-1	1.007	2.248E-2
50	1.894E-1	7.846E-6	8.425E-1	1.032	2.303E-2
60	1.631E-1	6.511E-6	8.921E-1	1.056	2.355E-2
80	1.285E-1	4.857E-6	9.667E-1	1.095	2.455E-2
100	1.066E-1	3.873E-6	1.020	1.127	2.515E-2

表 1-8 γ 射线衰减系数 (硅)

($Z=14$, $\rho=2.42\text{g/cm}^3$)

γ 射线能量, MeV	散射	光电效应	电子对生成	光子总截面	质量衰减系数 (cm^2/g)
	$(10^{-24}\text{cm}^2/\text{atom})$				
0.005	9.136	1.137E+4		1.138E+4	2.440E+2
0.006	9.101	6.802E+3		6.811E+3	1.461E+2
0.008	9.033	2.975E+3		2.984E+3	6.397E+1
0.01	8.967	1.546E+3		1.555E+3	3.334E+1
0.015	8.805	4.593E+2		4.681E+2	1.004E+1
0.02	8.652	1.907E+2		1.994E+2	4.275
0.03	8.365	5.413E+1		6.250E+1	1.340
0.04	8.102	2.186E+1		2.996E+1	6.425E-1
0.05	7.861	1.076E+1		1.862E+1	3.993E-1
0.06	7.639	6.009		1.365E+1	2.927E-1
0.08	7.242	2.388		9.630	2.065E-1
0.1	6.898	1.165		8.063	1.729E-1
0.15	6.210	3.174E-1		6.527	1.399E-1
0.2	5.691	1.276E-1		5.819	1.247E-1
0.3	4.948	3.676E-2		4.985	1.069E-1
0.4	4.432	1.590E-2		4.450	9.545E-2
0.5	4.048	8.624E-3		4.057	8.698E-2
0.6	3.745	5.393E-3		3.750	8.041E-2
0.8	3.289	2.730E-3		3.292	7.058E-2
1	2.957	1.697E-3		2.959	6.344E-2
1.5	2.402	7.853E-4	8.917E-3	2.412	5.171E-2
2	2.049	4.899E-4	3.513E-2	2.085	4.469E-2
3	1.611	2.705E-4	1.003E-1	1.712	3.670E-2
4	1.344	1.843E-4	1.635E-1	1.508	3.233E-2
5	1.160	1.391E-4	2.205E-1	1.381	2.960E-2
6	1.025	1.114E-4	2.719E-1	1.297	2.781E-2
8	8.384E-1	7.950E-5	3.594E-1	1.198	2.568E-2
10	7.138E-1	6.169E-5	4.317E-1	1.146	2.457E-2
15	5.280E-1	3.947E-5	5.668E-1	1.095	2.347E-2
20	4.235E-1	2.899E-5	6.647E-1	1.088	2.334E-2
30	3.080E-1	1.892E-5	8.025E-1	1.111	2.381E-2

40	2.445E-1	1.404E-5	8.986E-1	1.143	2.451E-2
50	2.039E-1	1.116E-5	9.707E-1	1.175	2.519E-2
60	1.756E-1	9.258E-6	1.027	1.203	2.580E-2
80	1.383E-1	6.906E-6	1.113	1.251	2.682E-2
100	1.148E-1	5.507E-6	1.173	1.288	2.762E-2

表 1-9 γ 射线衰减系数 (铁)

($Z=26$, $\rho=7.86\text{g/cm}^3$)

γ 射线能量, MeV	散射	光电效应	电子对生成	光子总截面	质量衰减系数 (cm^2/g)
	$(10^{-24}\text{cm}^2/\text{atom})$				
0.005	1.697E+1	1.274E+4		1.276E+4	1.375E+2
0.006	1.690E+1	7.671E+3		7.688E+3	8.291E+1
K0.007112	1.683E+1	3.764E+4		3.766E+4	4.060E+2
0.008	1.678E+1	2.819E+4		2.821E+4	3.041E+2
0.01	1.665E+1	1.571E+4		1.573E+4	1.696E+2
0.015	1.635E+1	5.215E+3		5.231E+3	5.641E+1
0.02	1.607E+1	2.323E+3		2.339E+3	2.522E+1
0.03	1.553E+1	7.199E+2		7.354E+2	7.930
0.04	1.505E+1	3.075E+2		2.226E+2	3.478
0.05	1.460E+1	1.574E+2		1.720E+2	1.854
0.06	1.419E+1	9.066E+1		1.049E+2	1.131
0.08	1.345E+1	3.765E+1		5.110E+1	5.510E-1
0.1	1.281E+1	1.896E+1		3.177E+1	3.425E-1
0.15	1.153E+1	5.435		1.697E+1	1.829E-1
0.2	1.057E+1	2.256		1.283E+1	1.383E-1
0.3	9.190	6.738E-1		9.864	1.064E-1
0.4	8.234	2.976E-1		8.532	9.200E-2
0.5	7.518	1.634E-1		7.681	8.282E-2
0.6	6.955	1.029E-1		7.058	7.611E-2
0.8	6.190	5.240E-2		6.161	6.644E-2
1	5.491	3.259E-2		5.524	5.957E-2
1.5	4.461	1.509E-2	3.320E-2	4.509	4.862E-2
2	3.805	9.306E-3	1.265E-1	3.941	4.250E-2
3	2.992	5.025E-3	3.516E-1	3.349	3.611E-2
4	2.495	3.403E-3	5.643E-1	3.063	3.303E-2
5	2.155	2.547E-3	7.534E-1	2.911	3.139E-2
6	1.904	1.904E-3	9.228E-1	2.829	3.050E-2
8	1.557	1.436E-3	1.210	2.769	2.985E-2
10	1.326	1.109E-3	1.445	2.772	2.989E-2
15	9.805E-1	7.041E-4	1.882	2.864	3.088E-2
20	7.865E-1	5.151E-4	2.199	2.986	3.220E-2
30	5.719E-1	3.348E-4	2.641	3.213	3.465E-2

40	4.541E-1	2.479E-4	2.942	3.397	3.663E-2
50	3.787E-1	1.968E-4	3.168	3.547	3.825E-2
60	3.261E-1	1.631E-4	3.345	3.671	3.958E-2
80	2.569E-1	1.216E-4	3.610	3.867	4.169E-2
100	2.132E-1	9.687E-5	3.799	4.012	4.327E-2

表 1-10 γ 射线衰减系数 (钨)

($Z=74$, $\rho=19.1\text{g/cm}^3$)

γ 射线能量, MeV	散射	光电效应	电子对生成	光子总截面	质量衰减系数 (cm^2/g)
	$(10^{-24}\text{cm}^2/\text{atom})$				
0.005	4.829E+1	1.666E+5		1.666E+5	4.585E+2
0.006	4.811E+1	1.051E+5		1.052E+5	3.447E+2
0.008	4.775E+1	5.039E+4		5.044E+4	1.652E+2
0.01	4.739E+1	2.821E+4		2.826E+4	9.256E+1
L ₃ 0.0102068	4.736E+1	6.990E+4		6.995E+4	2.291E+2
L ₂ 0.011544	4.713E+1	6.939E+4		6.944E+4	2.274E+2
L ₁ 0.0120998	4.703E+1	7.157E+4		7.162E+4	2.346E+2
0.015	4.654E+1	4.150E+4		4.155E+4	1.361E+2
0.02	4.573E+1	1.942E+4		1.947E+4	6.376E+1
0.03	4.421E+1	6.545E+3		6.589E+3	2.158E+1
0.04	4.283E+1	2.986E+3		3.029E+3	9.922
0.05	4.155E+1	1.615E+3		1.657E+3	5.425
0.06	4.038E+1	9.742E+2		1.015E+3	3.324
K0.069525	3.934E+1	3.297E+3		3.336E+3	1.092E+1
0.08	3.828E+1	2.272E+3		2.310E+3	7.568
0.1	3.646E+1	1.268E+3		1.304E+3	4.273
0.15	3.283E+1	4.259E+2		4.587E+2	1.502
0.2	3.008E+1	1.953E+2		2.254E+2	7.383E-1
0.3	2.616E+1	6.612E+1		9.228E+1	3.023E-1
0.4	2.343E+1	3.153E+1		5.496E+1	1.801E-1
0.5	2.140E+1	1.820E+1		3.960E+1	1.297E-1
0.6	1.979E+1	1.183E+1		3.162E+1	1.036E-1
0.8	1.739E+1	6.235		2.363E+1	7.738E-2
1	1.563E+1	3.917		1.955E+1	6.403E-2
1.5	1.270E+1	1.803	4.611E-1	1.496E+1	4.902E-2
2	1.083E+1	1.091	1.430	1.335E+1	4.373E-2
3	8.517	5.725E-1	3.261	1.235E+1	4.046E-2
4	7.102	3.759E-1	4.790	1.227E+1	4.019E-2
5	6.132	2.761E-1	6.077	1.249E+1	4.089E-2
6	5.419	2.167E-1	7.186	1.282E+1	4.199E-2
8	4.431	1.503E-1	9.047	1.363E+1	4.464E-2
10	3.773	1.144E-1	1.095E+1	1.447E+1	4.741E-2
15	2.791	7.121E-2	1.356E+1	1.642E+1	5.380E-2
20	2.239	5.153E-2	1.596E+1	1.798E+1	5.889E-2

40	1.292	2.436E-2	2.066E+1	2.197E+1	7.198E-2
50	1.078	1.927E-2	2.216E+1	2.325E+1	7.616E-2
60	9.281E-1	1.593E-2	2.232E+1	2.426E+1	7.946E-2
80	7.312E-1	1.183E-2	2.503E+1	2.577E+1	8.442E-2
100	6.057E-1	9.410E-3	2.623E+1	2.685E+1	8.794E-2

表 1-11 γ 射线衰减系数 (铅)

($Z=82$, $\rho=11.35\text{g/cm}^3$)

γ 射线能量, MeV	散射	光电效应	电子对生成	光子总截面	质量衰减系数 (cm^2/g)
	$(10^{-24}\text{cm}^2/\text{atom})$				
0.005	5.351E+1	2.485E+5		2.486E+5	7.224E+2
0.006	5.331E+1	1.582E+5		1.583E+5	4.600E+2
0.008	5.291E+1	7.660E+4		7.665E+4	2.228E+2
0.01	5.252E+1	4.322E+4		4.327E+4	1.257E+2
L ₃ 0.0130352	5.194E+1	5.443E+4		5.448E+4	1.583E+2
L ₂ 0.0151999	5.154E+1	3.594E+4		3.599E+4	1.046E+2
L ₁ 0.0158607	5.142E+1	4.514E+4		4.519E+4	1.314E+2
0.02	5.067E+1	2.889E+4		2.894E+4	8.411E+2
0.03	4.899E+1	9.929E+3		9.978E+3	2.900E+1
0.04	4.746E+1	4.593E+3		4.640E+3	1.349E+1
0.05	4.604E+1	2.509E+3		2.555E+3	7.426
0.06	4.474E+1	1.525E+3		1.570E+3	4.563
0.08	4.242E+1	6.924E+2		7.348E+2	2.123
K0.0880045	4.158E+1	2.519E+3		2.561E+3	7.442
0.1	4.041E+1	1.802E+3		1.842E+3	5.355
0.15	3.638E+1	6.244E+2		6.608E+2	1.921
0.2	3.333E+1	2.912E+2		3.245E+2	9.432E-1
0.3	2.898E+1	1.008E+2		1.298E+2	3.772E-1
0.4	2.597E+1	4.876E+1		7.475E+1	2.172E-1
0.5	2.371E+1	2.841E+1		5.212E+1	1.514E-1
0.6	2.193E+1	1.860E+1		4.053E+1	1.178E-1
0.8	1.927E+1	9.878		2.915E+1	8.472E-2
1	1.732E+1	6.226		2.355E+1	6.844E-2
1.5	1.407E+1	2.863	6.215E-1	1.755E+1	5.102E-2
2	1.200E+1	1.732	1.875	1.561E+1	4.536E-2
3	9.438	9.054E-1	4.105	1.445E+1	4.199E-2
4	7.870	5.927E-1	5.904	1.437E+1	4.175E-2
5	6.795	4.344E-1	7.416	1.465E+1	4.257E-2
6	6.005	3.404E-1	8.721	1.507E+1	4.379E-2
8	4.991	2.355E-1	1.091E+1	1.606E+1	4.667E-2
10	4.181	1.790E-1	1.272E+1	1.708E+1	4.965E-2
15	3.092	7.111E-1	1.625E+1	1.945E+1	5.653E-2
20	2.481	8.029E-2	1.878E+1	2.134E+1	6.202E-2
30	1.804	5.150E-2	2.229E+1	2.415E+1	7.019E-2

40	1.432	3.787E-2	2.470E+1	2.617E+1	7.607E-2
50	1.194	2.993E-2	2.648E+1	2.771E+1	8.053E-2
60	1.028	2.474E-2	2.787E+1	2.892E+1	8.405E-2
80	8.103E-1	1.837E-2	2.990E+1	3.073E+1	8.932E-2
100	6.723E-1	1.460E-2	3.134E+1	3.203E+1	9.308E-2

表 1-12 射线衰减系数（水、混凝土、空气）

（重量组成：空气：75.5%N₂，23.2%O₂，1.3%Ar

混凝土：0.56%H₂，49.83%O₂，31.58%Si，4.56%Al，8.26%Ca，0.12%*s*，22%Fe，
0.24%Mg，1.71%Na，1.92%K）

γ射线能量 (MeV)	质量衰减系数 (cm ² /g)			在 20°C 下, 线衰 减系数
	水	混凝土	空气	空气
0.005	4.150E+1	1.460E+2	3.942E+1	475.0
0.006	2.385E+1	8.729E+1	2.305E+1	277.8
0.008	9.940	4.213E+1	9.507	114.6
0.01	5.051	2.216E+1	4.866	58.64
0.015	1.546	6.809	1.519	18.41
0.02	7.505E-1	2.973	7.220E-1	8.700
0.03	3.455E-1	9.830E-1	3.251E-1	3.917
0.04	2.503E-1	5.026E-1	2.312E-1	2.786
0.05	2.149E-1	3.324E-1	1.964E-1	2.367
0.06	1.973E-1	2.566E-1	1.792E-1	2.159
0.08	1.787E-1	1.934E-1	1.614E-1	1.945
0.1	1.675E-1	1.673E-1	1.510E-1	1.820
0.15	1.490E-1	1.394E-1	1.341E-1	1.616
0.2	1.362E-1	1.252E-1	1.225E-1	1.476
0.3	1.182E-1	1.077E-1	1.063E-1	1.281
0.4	1.059E-1	9.625E-2	9.524E-2	1.148
0.5	9.667E-2	8.779E-2	8.694E-2	1.084
0.6	8.943E-2	8.118E-2	8.041E-2	0.9689
0.8	7.856E-2	7.127E-2	7.065E-2	0.8513
1	7.062E-2	6.406E-2	6.348E-2	0.7649
1.5	5.747E-2	5.218E-2	5.168E-2	0.6227
2	4.932E-2	4.497E-2	4.441E-2	0.5351
3	3.960E-2	3.658E-2	3.573E-2	0.4305
4	3.395E-2	3.186E-2	3.072E-2	0.3702
5	3.024E-2	2.885E-2	2.745E-2	0.3308
6	2.763E-2	2.680E-2	2.516E-2	0.3032
8	2.423E-2	2.426E-2	2.220E-2	0.2675
10	2.213E-2	2.280E-2	2.040E-2	0.2458
15	1.936E-2	2.110E-2	1.806E-2	0.2176
20	1.809E-2	2.053E-2	1.702E-2	0.2051
30	1.706E-2	2.041E-2	1.624E-2	0.1957

40	1.675E-2	2.070E-2	1.607E-2	0.1936
50	1.670E-2	2.107E-2	1.611E-2	0.1941
60	1.676E-2	2.145E-2	1.622E-2	0.1955
80	1.698E-2	2.213E-2	1.651E-2	0.1989
100	1.724E-2	2.270E-2	1.681E-2	0.2026

4.3 中子与物质的相互作用

中子不带电荷，几乎不与原子的壳层电子作用，主要是和原子核作用。作用形式有两种：**散射（弹性散射和非弹性散射）和吸收。**

核材料裂变是中子的主要来源，核裂变释放的中子能量较高，相当部分是几个 MeV，经过与周围重水、轻水或铍等材料发生弹性散射，使中子能量迅速降低，形成慢中子，特别是易被原子核吸收的热中子。

中子与原子核作用时可能被吸收，发生核反应。这是制备放射性核素的重要途径。这些核反应有： (n,γ) ， (n,α) ， (n,p) ， (n,f) 。当中子能量很高时可能发生 $(n,2n)$ ， (n,np) 反应等。中子与原子核相互作用时，发生何种反应取决于中子能量和物质的性质。

表 1-13 中子分类

名称		能量
慢中子 (0—1 keV)	冷中子	≤ 0.002 eV
	热中子	≈ 0.025 eV
	超热中子	≥ 0.5 eV
	共振中子	1 eV—1 keV
中能中子		1 keV—0.5 MeV
快中子		0.5 MeV—10 MeV
特快中子		10 MeV—50 MeV