

## 原子核

原子核 (atomic nucleus) は原子のほぼ中心に位置し、陽子 p と中性子 n が核力によって強く結合して構成される。核力は中間子によって媒介される。原子は原子核とそのまわりに存在する軌道電子とからなるが、原子の質量の大部分は原子核が占めている。原子は原子核と電子の間の静電引力によって構成される。静電気力は仮想的な光子によって媒介される。陽子 p や中性子 n のことを総称して核子という。陽子 p は、正電気量 約  $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$  (クーロン) をもち、質量 約  $1.672 \times 10^{-24} \text{g}$ 、スピン (spin)  $\frac{1}{2}$  の素粒子である。中性子 n は電気量をもたず、質量 約  $1.674 \times 10^{-24} \text{g}$ 、スピン  $\frac{1}{2}$  の素粒子である。核力とは、核子間に作用する強い短距離力のことをいう。核子間の距離が  $10^{-13} \text{cm}$  を超えると急激に減衰する。中間子は、核力を媒介する素粒子で、電気量を持つもの ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ) と電気量をもたないもの ( $\pi^0$ ) とがある。 $\pi^+$ ,  $\pi^-$  の質量は 約  $2.49 \times 10^{-25} \text{g}$ 、 $\pi^0$  の質量は 約  $2.41 \times 10^{-25} \text{g}$  で、スピンはいずれも 0 である。光子は、電気量や質量をもたず、スピン 1 の素粒子である。スピンとは、素粒子が固有に持っている角運動量の大きさを示し、半奇数値または整数値で表わす。素粒子とは、物質を構成する要素の中で最小単位に属する粒子のことをいい、その大きさは  $10^{-13} \text{cm}$  以下である。現在では、陽子 p, 中性子 n, 中間子  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$  などは、さらに基本的な粒子であるクォーク (quark) から構成されていると考えられている。

### 核種 (nuclide)

原子核の種類のことをいう。核種は以下のような記号を用いて表記する。

核種の表記法:  ${}^Z_A X$

Z は陽子 p の個数。(原子番号に等しい。)

A は陽子の個数と中性子の個数の総和で質量数という。

X は原子核の種類で元素記号を用いて表わす。

[ 例 ]  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^3_2\text{He}$ ,  ${}^{14}_7\text{N}$ ,  ${}^{16}_7\text{N}$  など。

中性子の個数を  $N$  とすると、質量数  $A = Z + N$  である。陽子 p の個数  $Z$  が等しく、中性子 n の個数  $N$  が異なる核のことを同位核 (isotope) という。

[ 例 ]  ${}^{92}_{235}\text{U}$ ,  ${}^{92}_{238}\text{U}$  など。

陽子 p の個数と中性子 n の個数の総和  $A$  は等しいが、陽子の個数  $Z$  や中性子の個数  $N$  が異なっている核のことを同重核 (isobar) という。

[ 例 ]  ${}^4_{10}\text{Be}$ ,  ${}^5_{10}\text{B}$  など。

### 原子核の性質

原子核の大きさはおおよそ  $10^{-12} \text{cm}$  (原子の大きさの  $\frac{1}{10^4}$  程度)、密度はおおよそ  $10^{14} \text{g/cm}^3$  (比重  $10^{14}$ ) という高密度である。多くの核は、ほぼ球形とみなせる。核の半径  $R$  は近似的に次式で与えられる。

$$R = rA^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ただし  $r = 1.3 \times 10^{-13} \text{cm}$  である。この近似式 (1) は軽い核については成り立たない。

例として、パラジウム核  ${}^{46}_{106}\text{Pd}$  の半径を求める。

$$R = 1.3 \times 10^{-13} \text{cm} \times (106)^{\frac{1}{3}} \approx 6.2 \times 10^{-13} \text{cm}$$

### 核の結合エネルギー

原子核  ${}^Z_A X$  を  $Z$  個の陽子と  $N$  個の中性子に完全に分解するのに要する仕事は、核が構成されるときに放出されるエネルギーに等しい。核を作るとき放出されるエネルギーを核の結合エネルギーという。これが正で大きい程、核は安定である。一般に核  ${}^Z_A X$  の質量  $m_X$  は、これを構成する  $Z$  個の陽子 (質量  $m_p$ ) と  $N$  個の中性子 (質量  $m_n$ ) の質量の総和  $Zm_p + Nm_n$  より小さく、その質量差のことを質量欠損  $\Delta m$  といい、次式で与えられる。

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_X \quad (2)$$

[例題 1] 炭素核  ${}^6_{12}\text{C}$  の質量を  $19.92636 \times 10^{-24}\text{g}$  とするとき、式 (2) より核の質量欠損を求めよ。  
ただし 陽子、中性子の質量をそれぞれ  $1.67262 \times 10^{-24}\text{g}$ ,  $1.67493 \times 10^{-24}\text{g}$  とする。

$$\Delta m = 6 \times 1.67262 \times 10^{-24}\text{g} + 6 \times 1.67493 \times 10^{-24}\text{g} - 19.92636 \times 10^{-24}\text{g} = 0.1589 \times 10^{-24}\text{g}$$

(この結果は陽子の質量の約 9.5 % に相当する。)

核の結合エネルギー  $B$  と質量欠損  $\Delta m$  の間には次の関係がある。

$$B = c^2 \Delta m = c^2 (Zm_p + Nm_n - m_X) \quad (3)$$

ただし  $c$  は真空中の光速で、およそ  $3.0 \times 10^8\text{m/s}$  である。

[例題 2] 酸素原子核  ${}^8_{16}\text{O}$  の質量を  $26.56005 \times 10^{-27}\text{kg}$  とするとき、式 (3) より核の結合エネルギーを求めよ。  
ただし 陽子、中性子の質量をそれぞれ  $1.67262 \times 10^{-27}\text{kg}$ ,  $1.67493 \times 10^{-27}\text{kg}$  とする。  
また 真空中の光速を  $3.0 \times 10^8\text{m/s}$  とし、 $\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$  とする。

結合エネルギー  $B = (Zm_p + Nm_n - m_X)c^2$  より

$$B = (8 \times 1.67262 \times 10^{-27}\text{kg} + 8 \times 1.67493 \times 10^{-27}\text{kg} - 26.56005 \times 10^{-27}\text{kg}) \times (3.0 \times 10^8\text{m/s})^2$$

$$= (13.38096 + 13.39944 - 26.56005) \times 10^{-27} \times 9.0 \times 10^{16} \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = 1.98315 \times 10^{-11} \text{J}$$

ここで  $\text{J} = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} \text{eV}$  より

$$B = 1.98315 \times 10^{-11} \times \frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} \text{eV} = 1.24 \times 10^8 \text{eV} = 124 \text{MeV}$$

### 質量とエネルギーの等価性

相対性理論によると、質量  $m$  の物体が速度  $v$  で運動しているとき、この物体のエネルギー  $E$  は

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (4)$$

で与えられる。この式より物体が静止 ( $v = 0$ ) しているときのエネルギー  $E_0$  は

$$E_0 = mc^2 \quad (5)$$

となり、質量とエネルギーの等価性が示される。この  $E_0$  を静止エネルギーという。

例として、質量  $0.05\text{mg}$  をエネルギーの SI 単位 J (ジュール) に換算する。ただし 真空中の光速を  $3.0 \times 10^8\text{m/s}$  とする。

$$E_0 = mc^2 = 0.05 \times 10^{-6}\text{kg} \times \left(3.0 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 0.45 \times 10^9 \text{J}$$

物体のもつ相対論的な運動エネルギー  $K$  は次式によって与えられる。

$$K = E - E_0 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - mc^2 = mc^2 \left[ \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (6)$$

相対性理論によると、質量をもつ物体の速度の上限は真空中の光速  $c$  であり、この  $c$  を超える速度は原理的にあり得ない。  
ただし光子のように質量が 0 の粒子の場合は光速  $c$  で運動するが、速度が 0 の状態すなわち静止することは出来ない。

### エネルギーの単位 eV

エネルギー  $1\text{eV}$  (エレクトロン ボルト) は、電子が  $1\text{V}$  (ボルト) の電圧で加速されたときに得るエネルギーである。エネルギーの SI 単位 J (ジュール) と eV の関係は、次のようにして求められる。  
電子の電気量の大きさは、およそ  $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$  (クーロン) であるから、

$$(\text{電子の得るエネルギー}) = (\text{電荷}) \times (\text{電圧}) \quad \text{より} \quad 1\text{eV} \approx 1.6 \times 10^{-19}\text{J} \quad \text{となる。}$$

なお  $1\text{keV} = 10^3\text{eV}$ ,  $1\text{MeV} = 10^6\text{eV}$ ,  $1\text{GeV} = 10^9\text{eV}$ , ( $\text{k}$ : キロ,  $\text{M}$ : メガ,  $\text{G}$ : ギガ) である。

原子核や素粒子の分野では、エネルギーの大きさを表わすとき eV, MeV, GeV などの単位を用いることが多い。このとき質量の単位には、 $\text{eV}/c^2$ ,  $\text{MeV}/c^2$ ,  $\text{GeV}/c^2$  などが用いられる。

[例題 3] 静止していた電子を電圧  $70\text{kV}$  で加速したとき、式 (6) より電子の得る速度を求めよ。  
ただし電子の静止質量を  $0.51\text{MeV}/c^2$  とし、真空中の光速を  $3.0 \times 10^8\text{m/s}$  とする。

$$\text{運動エネルギー} \quad K = mc^2 \left[ \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad \text{より}$$

$$70 \times 10^3 \text{ eV} = 0.51 \times 10^6 \frac{\text{eV}}{c^2} c^2 \left[ \left( 1 - \left( \frac{v}{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right]$$

よって 電子の速度  $v = 1.4 \times 10^8 \text{ m/s}$  (この速度は、真空中の光速の約 47 % に相当する。)

### 核の結合の強さ

核子 1 個あたりの結合エネルギーを  $b$  とするとき

$$b = \frac{B}{A} \quad (7)$$

である。ここで  $B$  は核の結合エネルギー、 $A$  は質量数である。この  $b$  の値は、その核の結合の強さすなわち核の安定度を示す尺度である。軽い核 (質量数  $A < 20$ ) のとき  $b$  は約 3 ~ 8 MeV であり、 $A$  が 4 の倍数であると特に大きくなる。これは  ${}^4_2\text{H}$  核 ( $\alpha$  粒子) が特に大きな結合エネルギーを持って安定であるから、軽い核内においては 2 個の陽子と 2 個の中性子が  $\alpha$  粒子的な集団を作り易いことを意味する。質量数  $20 \leq A \leq 190$  の核では、 $b$  はおよそ 8 MeV の値を持つが、 $A > 190$  のような重い核の  $b$  は 7 MeV 程度に減少する。したがって  $A$  が中程度の値のとき  $b$  が最も大きくなり、核は安定となる。天然に存在する 287 種類の安定核を、陽子数  $Z$  や中性子数  $N$  が偶数か奇数かに応じて分類したとき、核の存在数は  $Z, N$  とも偶数の場合が最も多く、 $Z, N$  がともに奇数の場合が最も少ない。このことは陽子数と中性子数がともに偶数のとき、核は最も安定であることを示す。軽い安定核では陽子数  $Z$  と中性子数  $N$  はほぼ等しいが、重い核になるにつれて、中性子数  $N$  が陽子数  $Z$  より大きくなる。これを中性子過剰 (neutron excess) といい、過剰中性子数  $D = N - Z$  に対し次の経験式が成り立つ。

$$D = N - Z \approx 0.006 A^{5/3} \quad (8)$$

正電荷を持つ陽子間には静電気による反発力が作用するために陽子数  $Z$  が大きいと核力による結合が弱められて核が不安定となる。ところが電荷を持たない中性子が多いと核力の寄与が強くなるので、重い核では中性子過剰のとき核は安定となる。

[例題 4] 質量数 195 の白金の核について、式 (8) より過剰中性子数を求めよ。

$$D = 0.006 \times (195)^{5/3} \approx 39$$

### 放射性崩壊 (radioactive decay)

核  $X$  が放射線 ( $\alpha$  線,  $\beta$  線,  $\gamma$  線) を射出して他の核  $Y$  に変換する現象のことを放射性崩壊という。このとき核  $X$  を母核、核  $Y$  を娘核という。射出する放射線の種類により  $\alpha$  崩壊,  $\beta$  崩壊,  $\gamma$  崩壊 に分類される。放射線 (radiation) とは、 $\alpha$  線,  $\beta$  線,  $\gamma$  線などの総称である。 $\alpha$  線はヘリウム核  ${}^4_2\text{He}$  ( $\alpha$  粒子) であり、 $\beta$  線は電子  $e^-$  や陽電子  $e^+$  から成る。また  $\gamma$  線は短波長の電磁波 (光子) である。 $\alpha$  線 ( $\alpha$  粒子) のエネルギーは最大でおよそ 9 MeV で、大気中での飛程は約 10 cm である。 $\beta$  線の最高エネルギーは数 MeV 程度で、アルミニウム金属中の最大飛程は数 mm 程度である。 $\gamma$  線は物質に対する透過力が極めて強い。なお電磁波の波長が  $10^{-8}$  cm 以下の電磁波を  $\gamma$  線ということが多いが、短波長の X 線 (レントゲン線) との区別は明確ではない。放射能 (radioactivity) とは、放射性核種に関して放射線を射出する性質のことをいう。

### 核崩壊の法則

母核  $X$  のもつ静止エネルギーが娘核  $Y$  および放射線のもつエネルギーの和よりも大きいとき、母核は自発的に崩壊する可能性をもつ。膨大な数の放射性核があるとき、時刻  $t$  に存在する崩壊性核の個数を  $N$  , 単位時間あたりに核が崩壊する確率を  $\lambda$  (崩壊定数) とすると、微小時間  $dt$  の間に崩壊する核の個数  $dN$  は  $dN = -\lambda N dt$  である。すなわち

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (9)$$

となる。この一階微分方程式は変数分離法により下記のように解くことができる。

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad \text{より} \quad \int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt + c \quad (\text{ただし } c \text{ は積分定数})$$

$$\log_e N = -\lambda t + c$$

$$N = e^{-\lambda t + c} = e^{-\lambda t} e^c = C e^{-\lambda t} \quad (\text{ただし } C = e^c) \quad (10)$$

そこで初めの時刻  $t = 0$  のとき  $N = N_0$  として (10) に代入すると  $C = N_0$

よって解は

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (11)$$

[例題 5] 崩壊定数  $1.15 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  の放射性核について、初めの個数の  $\frac{1}{100}$  になるまでの時間を求めよ。

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{より} \quad t = \frac{-1}{\lambda} \log_e \left( \frac{N}{N_0} \right) = \frac{-1}{1.15 \times 10^{-8}} \log_e \left( \frac{1}{100} \right) \text{ s} = 4.00 \times 10^8 \text{ s} = 12.7 \text{ 年}$$

放射性核の平均寿命  $\tau$  は崩壊定数  $\lambda$  に反比例する。放射性核の平均寿命は

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (12)$$

である。放射性核の個数が現在の数の  $\frac{1}{2}$  に減少するまでの時間  $T$  を半減期 (half-life) といい、次式で与えられる。

$$T = \frac{\log_e 2}{\lambda} = \tau \log_e 2 \quad (13)$$

[例題 6] 半減期 3.05 分の放射性核について、崩壊定数と平均寿命を求めよ。

$$T = \frac{\log_e 2}{\lambda} = \tau \log_e 2 \quad \text{より}$$

$$\text{崩壊定数 } \lambda = \frac{\log_e 2}{T} = \frac{0.693}{3.05 \times 60 \text{ s}} = 3.79 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{平均寿命 } \tau = \frac{T}{\log_e 2} = \frac{3.05 \times 60}{0.693} \text{ s} = 264 \text{ s}$$

[例題 7] 半減期 138 日の放射性核について、初めの時刻のときの個数の  $\frac{1}{1000}$  になるまでの時間を求めよ。

$$\lambda = \frac{\log_e 2}{T} = \frac{0.693}{(138/365) \text{ 年}} = 1.83 \text{ 年}^{-1}$$

$$\text{よって } t = \frac{-1}{\lambda} \log_e \left( \frac{N}{N_0} \right) = \frac{-1}{1.83 \text{ 年}^{-1}} \log_e \left( \frac{1}{1000} \right) = 3.77 \text{ 年}$$

放射能の強さは、単位時間に崩壊する核の個数で表わされる。単位は 1 秒間に崩壊する核の個数が 1 個のとき 1Bq (ベクレル) と決める。放射能の強さは、放射性核の種類に依存し、その放射性核の固有の性質である。

他方、放射線は物質中を通過すると吸収され、その放射線の強度は減少する。放射線が物質に吸収される度合のことを吸収線量という。単位は、物質の質量 1kg あたりに吸収される放射線のエネルギーが 1J (ジュール) のとき 1Gy (グレイ) と決める。線量当量とは、放射線の生物学的効果を考慮した量であって、吸収線量と修正係数の積で定義される。修正係数は放射線の種類等により異なる。単位は、吸収線量が Gy (グレイ) のとき、線量当量は Sv (シーベルト) となる。

#### 崩壊系列

放射性崩壊により母核から生じた娘核は、さらに崩壊して他の核種に変換し、順次このような変換を続けて最後には非放射性核種に達して安定となる。これを崩壊系列 (放射性系列) といい、次の 4 種類の系列がある。

U-Ra(ウラン-ラジウム) 系列 :  ${}_{92}^{238}\text{U}$  から始まり  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$  に終わる。

Th(トリウム) 系列 :  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  から始まり  ${}_{82}^{208}\text{Pb}$  に終わる。

Ac(アクチニウム) 系列 :  ${}_{89}^{235}\text{U}$  から始まり  ${}_{82}^{207}\text{Pb}$  に終わる。

Np(ネプツニウム) 系列 :  ${}_{93}^{237}\text{Np}$  から始まり  ${}_{83}^{209}\text{Bi}$  に終わる。

#### $\alpha$ 崩壊 ( $\alpha$ decay)

核が  $\alpha$  線 ( $\alpha$  粒子) を放出して、陽子数  $Z$  が 2、中性子数  $N$  が 2 少ない核に変換することをいう。

核 X が  $\alpha$  崩壊



を起こすことができるための条件は、次式が成り立つことである。

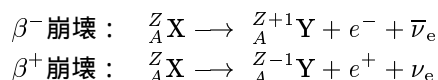
$$\Delta m = M_X - M_Y - M_\alpha \geq 0 \quad (15)$$

ただし  $M_X, M_Y, M_\alpha$  は、それぞれ母核 X, 娘核 Y,  $\alpha$  粒子の質量である。このとき  $E = c^2 \Delta m$  を崩壊エネルギーといい、その大部分は放出される  $\alpha$  粒子の運動エネルギー  $E$  となる。このとき  $\alpha$  粒子の飛程  $R$  は次式で与えられる。

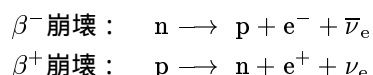
$$R = CE^{3/2} \quad (C \text{ は定数}) \quad (16)$$

### $\beta$ 崩壊 ( $\beta$ decay)

核が  $\beta$  線 (電子  $e^-$  または 陽電子  $e^+$ ) を放出して、質量数  $A$  は等しいが陽子数  $Z$  が 1 だけ異なる核に変換することをいい、次の反応式で示されるように、2 種類のものがある。



$\beta$  崩壊では、 $\beta$  線の他に電子ニュートリノ  $\nu_e$  や反電子ニュートリノ  $\bar{\nu}_e$  が放出される。(ニュートリノは中性微子とも呼ばれる。) 核内の素過程としては、陽子  $p$  と中性子  $n$  が次式のように相互転換するとき  $\beta$  崩壊が起こる。



電子ニュートリノ  $\nu_e$  は素粒子の一種で、電氣量を持たず、スピンは  $\frac{1}{2}$  である。 $\nu_e$  は他の素粒子とは弱く相互作用するだけで、あらゆる物質を貫通する。電子ニュートリノの質量は零とみられていたが、現在では極めて小さい質量をもつと考えられている。なお  $\alpha$  崩壊は核反応の一種であるが、 $\beta$  崩壊は弱い相互作用に起因する素粒子反応である。

### $\gamma$ 崩壊 ( $\gamma$ decay)

核が高いエネルギー準位の状態から低いエネルギー準位の状態へ遷移する際に  $\gamma$  線 (光子) を放出する。高いエネルギー準位  $E_i$  の核が低いエネルギー準位  $E_j$  に遷移したとき放出される  $\gamma$  線の光子のエネルギー  $E$  は次式で与えられる。

$$E = E_i - E_j \quad (17)$$

一般に  $\alpha$  崩壊や  $\beta$  崩壊で生成された核は励起状態 (高いエネルギー準位) にあり、それがさらに  $\gamma$  線を放出して安定な基底状態 (最低エネルギー準位) に移行することが多い。 $\gamma$  崩壊のとき放射される  $\gamma$  線 (光子) の振動数  $\nu$  は次式で与えられる。

$$\nu = \frac{E_i - E_j}{h} \quad (18)$$

光波の波長  $\lambda$  は

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (c \text{ は真空中の光速}) \quad (19)$$

である。

### 粒子と波動の二重性

量子論 (quantum theory) によると、一般に粒子は波動的性質をもつことが知られている。粒子の運動量  $p$  やエネルギー  $E$  は、その粒子の波動的性質を表わすところの波長  $\lambda$  や振動数  $\nu$  に密接に関係している。

光子の場合、そのエネルギー  $E$  と光波の振動数  $\nu$  の間には

$$E = h\nu \quad (20)$$

の関係がある。

電子の場合、その運動量  $p$  と電子波の波長  $\lambda$  の間には

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (21)$$

の関係がある。ただし  $h$  は Planck (プランク) 定数と呼ばれる基本定数で  $h \approx 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$  である。

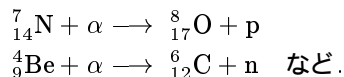
### 核反応 (nuclear reaction)

核反応とは、陽子 p や中性子 n 等の粒子を核に衝突させるときに起こる現象のことをいう。核 X に粒子 a が衝突して核 Y と粒子 b, c, ... が生ずるときの反応式は



のように表わせる。ここで X を標的核, a を入射粒子, Y を生成核, (b, c, ...) を放出粒子という。

[ 例 ]



標的核 X, 生成核 Y の質量をそれぞれ  $m_X, m_Y$  とし、入射粒子 a や放出粒子 b, c ... などの質量をそれぞれ  $m_a, m_b, m_c \dots$  などとすると、反応前後の静止エネルギーの差  $Q$  のことを反応の  $Q$  値といい、次式で与えられる。

$$Q = (m_X + m_a)c^2 - (m_Y + m_b + m_c + \dots)c^2 \quad (23)$$

### しきいエネルギー (threshold energy)

$Q$  値が正 ( $Q > 0$ ) のときは発熱反応であって、入射粒子 a の運動エネルギーが小さくても反応が起こる。 $Q$  値が負 ( $Q < 0$ ) のときは吸熱反応であって、入射粒子 a の運動エネルギーがある値以上でなければ反応は起こらない。このとき必要な最小エネルギーのことを、しきいエネルギーという。重心系においては、しきいエネルギーは  $Q$  の大きさに等しい。実験室系において、しきいエネルギーは次式で与えられる。

$$(\text{しきいエネルギー}) = -\frac{(m_X + m_a)Q}{m_X} \quad (24)$$

ここで重心系 (center of mass system) とは、系の重心に固定した座標系のことをいう。実験室系 (laboratory system) とは、静止した標的核に固定した座標系のことをいう。

[ 例題 8 ] 質量  $6.65 \times 10^{-24} \text{g}$  の粒子を質量  $15.01 \times 10^{-24} \text{g}$  の標的核に衝突させた場合の実験室系でのしきいエネルギーが 8.28 MeV であるとするとき、反応の  $Q$  値を求めよ。

$$\begin{aligned} (\text{しきいエネルギー}) &= -\frac{(m_X + m_a)Q}{m_X} \quad \text{より} \quad 8.28 = -\frac{(15.01 + 6.65) \times 10^{-24} Q}{15.01 \times 10^{-24}} \\ \text{よって } Q &= -5.74 \text{ MeV} \end{aligned}$$

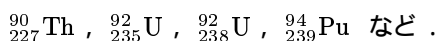
### 熱中性子 (thermal neutron)

正電気を持った粒子 (陽子や  $\alpha$  粒子等) を核に衝突させるには、核との間の静電反発力のために極めて大きなエネルギーを必要とする。ところが電気を持たない中性子を核に衝突させる場合には、静電反発力に妨げられることがなく、低エネルギー (低速) の中性子であっても核反応を起こす。低速度の中性子は、核の近傍にいる時間が長くなるので核に捕獲されて核反応を起こしやすい。このような低速度の中性子を熱中性子という。

### 核分裂 (nuclear fission)

核子 1 個あたりの結合エネルギーは、中程度の質量数の核が最も大きく約 8.6 MeV であるが、質量数の大きな非常に重い核では 7.7 MeV 程度と小さくなる。したがって非常に重い核に中性子等が衝突すると、ほぼ同質量の中程度の質量数の核に分裂しやすい。この現象を核分裂という。1 個の重い核の分裂により、非常に大きなエネルギーが放出される。(およそ 0.2 GeV)

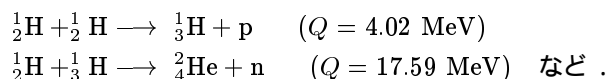
[ 例 ] 核分裂する核種



### 核融合 (nuclear fusion)

軽い核の核子 1 個あたりの結合エネルギーは、質量数が中程度の核に比べて小さいために、軽い核は融合して中程度の質量数の核に近づこうとする。この現象を核融合という。核融合の際に大きなエネルギーが放出される。

[ 例 ]



[ 補足資料 ]

X 線 (X-ray)

X 線はレントゲン線とも呼ばれ、波長が  $10^{-9} \sim 10^{-6}$  cm 程度の電磁波 (光子) である。波長が短いほど物質に対する透過性が強くなり、短波長側は  $\gamma$  線に移行する。また長波長側では紫外線に移行する。X 線を発生させる真空管のことを X 線管 (X-ray tube) という。X 線管の構造は、真空にしたガラス管内に陰極と陽極ターゲットが封入されており、これに高電圧を印加して使用する。ターゲット物質は重金属 (タングステン, 鉄, 銅など) で作られている。一般に真空中において電子を高電圧 (10 ~ 100 kV) で加速してターゲットに衝突させると X 線が放射される。X 線管に印加される電圧を  $V$  [V ボルト], 電流を  $i$  [A アンペア], ターゲット金属の原子番号  $Z$  とすると、単位時間あたりに放射される X 線の全エネルギー  $P$  [W ワット] は

$$P = \eta Z i V^2 \quad (25)$$

で与えられる。ただし  $\eta$  は定数であって、SI 単位系では  $\eta = 10^{-9} \text{ V}^{-1}$  となる。

[ 例題 9 ] X 線管に印加する電圧と管電流が定められているとき、ターゲットの金属を銅からタングステンに変更すると放射される X 線のエネルギーは幾倍となるかを求めよ。

ただし 銅 Cu, タングステン W の原子番号をそれぞれ 29, 74 とする。

$$P = \eta Z i V^2 \text{ より } P_{\text{Cu}} = 29 \eta i V^2, \quad P_{\text{W}} = 74 \eta i V^2, \quad \text{よって } \frac{P_{\text{W}}}{P_{\text{Cu}}} = \frac{74}{29} = 2.55 \text{ 倍}$$

[ 例題 10 ] X 線管のターゲット金属や管電流が定められているとき、X 線の放射エネルギーを 2 倍にするための管電圧は、幾倍にすればよいかを求めよ。

$$P = \eta Z i V^2, \quad 2P = \eta Z i E^2 \text{ より } \frac{2P}{E^2} = \frac{P}{V^2}, \quad \text{したがって } E = \sqrt{2}V, \quad \text{よって } \sqrt{2} \text{ 倍}$$

陽極ターゲットの物質に関係なく連続スペクトルをもつ X 線のことを連続 X 線という。連続 X 線は、高速な電子が陽極ターゲットに衝突する際に、電子の制動放射によって生ずる。ここで制動放射とは電子が減速される際に、電子のもつ運動エネルギーの一部が電磁波 (X 線など) のエネルギーに変換されて放射されることをいう。他方、陽極ターゲットの物質に固有の線スペクトルをもつ X 線のことを特性 X 線という。特性 X 線は、電子が高速で陽極ターゲットに衝突したときに、ターゲット物質の原子が励起されることにより生ずる。

[注] 透過性の強い X 線 (短波長) を硬 X 線、透過性の弱い X 線 (長波長) を軟 X 線とすることがある。

X 線は電子等の荷電粒子に当たると散乱される。X 線の散乱には Thomson (トムソン) 散乱と Compton (コンプトン) 散乱がある。トムソン散乱は電子が入射 X 線 (電磁波) を受けて振動を起こすことにより生ずる。トムソン散乱では散乱 X 線の波長は入射 X 線の波長に等しい。コンプトン散乱は入射 X 線 (光子) が電子と衝突する際、光子のもつ運動量とエネルギーの一部を電子に与えることにより生ずる。コンプトン散乱では散乱 X 線の波長は入射 X 線の波長と異なっている。

X 線が物質中を通過するとき、物質に吸収されて X 線強度は指数関数的に減衰していく。初め強度  $I_0$  の X 線が、厚さ  $x$  のような物質中を通過すると、その強度  $I$  は

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (26)$$

となる。ここで  $\mu$  を線吸収係数といい、入射 X 線の波長で決まる定数である。単体物質においては、その物質の密度  $\rho$  としたとき  $\frac{\mu}{\rho}$  のことを質量吸収係数という。質量吸収係数は物質の凝集状態によらない定数となる。

[ 例題 11 ] 定められた強度の X 線を均一な物質中に入射させたとき、表面より深さ 30.0 mm の点での強度が表面の  $\frac{1}{2}$  になったとき、表面の強度の  $\frac{1}{10}$  になるような深さを求めよ。

$$I = I_0 e^{-\mu x} \text{ を用いて } \frac{I}{2I} = e^{-30.0\mu} \text{ より } \mu = \frac{\log_e 2}{30.0} \text{ となる。}$$

$$\text{つぎに } \frac{I}{10I} = e^{-x\mu} \text{ より } x = \frac{\log_e 10}{\mu} \text{ であるから}$$

$$\text{よって } x = 30.0 \times \frac{\log_e 10}{\log_e 2} \text{ mm} = 99.7 \text{ mm}$$

## 演習問題 1

[ 注 ] この演習問題は「自習用参考資料 1」についての読解力を自身で確認するためのものです。

次の文章の ( ) 中に、下欄より適当な語句や式などを選んで入れよ。

- (1) 原子核は、重粒子の ( ) と ( ) が、中間子を媒介として強く結合して構成される。  
同位核は ( ) の個数が等しく、( ) の個数が異なる核のことである。  
[ 電子 陽子 陽電子 中性子 光子 ]
- (2) 陽子 7 個と中性子 7 個からなる窒素核を、核種の記号を用いて表すと ( ) となる。  
[  ${}^7_7\text{N}$   ${}^{14}_7\text{N}$   ${}^{14}_{14}\text{N}$   ${}^{14}\text{N}$   ${}^7\text{N}$  ]
- (3) 原子核の大きさは、およそ ( ) cm の程度である。  
[  $10^{-20} \sim 10^{-19}$   $10^{-17} \sim 10^{-16}$   $10^{-13} \sim 10^{-12}$   $10^{-9} \sim 10^{-8}$  ]
- (4) 球形な原子核の半径は、近似的に核の質量数の ( ) に比例する。  
[ -1 乗 2 乗 3 乗 平方根 立方根 ]
- (5)  $\alpha$  線は ( ) であって、 $\beta$  線は ( ) からなる。また  $\gamma$  線は ( ) である。  
[ 陽子 中性子 中間子 ヘリウム核 光子 電子または陽電子 ]
- (6) 放射能の強さは放射性核固有の性質であり、その単位は ( ) である。  
放射線が物質に吸収される割合すなわち吸収線量の単位は ( ) である。  
[ グレイ Gy シーベルト Sv ジュール J ベクレル Bq ワット W ]
- (7) 静止している粒子の質量  $m$  とエネルギー  $E$  の間には常に ( ) の関係が成り立つ。  
ただし  $c$  は真空中の光速である。  
[  $E = mc$   $E = \frac{m}{c}$   $E = mc^2$   $E = m^2c$   $E = \frac{m}{c^2}$  ]
- (8) 光子のエネルギー  $E$  と光波の振動数  $\nu$  の間には ( ) の関係がある。  
ただし  $h$  はプランク定数である。  
[  $E = h\nu$   $E = \frac{h}{\nu}$   $E = \frac{\nu}{h}$   $E = h\nu^2$  ]
- (9) 電子の運動量  $p$  と電子波の波長  $\lambda$  の間には ( ) の関係がある。  
ただし  $h$  はプランク定数である。  
[  $p = h\lambda$   $p = \frac{\lambda}{h}$   $p = \frac{h}{\lambda}$   $p = h\lambda^2$  ]
- (10) X 線は波長が ( ) cm 程度の電磁波すなわち光子である。  
[  $10^{-1} \sim 10^2$   $10^{-3} \sim 10^{-1}$   $10^{-6} \sim 10^{-3}$   $10^{-9} \sim 10^{-6}$  ]
- (11) X 線管に印加される電圧を  $V$ 、電流を  $i$ 、ターゲット金属の原子番号  $Z$  とすると、  
単位時間あたりに放射される X 線の全エネルギーは ( ) となる。ただし  $\eta$  は定数である。  
[  $\eta ZiV$   $\eta ZiV^2$   $\eta Zi^2V$   $\eta Z^2iV$  ]
- (12) 強度  $I_0$  の X 線が、厚さ  $x$  の一様な物質中を通過すると、その強度は ( ) となる。  
ただし  $\mu$  は線吸収係数である。  
[  $I_0e^{\mu x}$   $I_0e^{\frac{\mu}{x}}$   $I_0e^{-\mu x}$   $I_0e^{-\frac{\mu}{x}}$  ]