

1 原子核反応

1.1 核反応の種類

1. 核反応の表記法:入射する相対的に小さな粒子 a (=入射粒子,incident particle) と標的核 A (target nucleus) が種々の相互作用を及ぼしあい、相対的に小さな粒子として放出されて (=放出粒子 b ,projectile)、原子核 B (=生成核 product nucleus, または残留核 residual nucleus,)が残ったとする;

$$a + A \rightarrow B + b$$

これを $A(a,b)B$ と略記する。反応により核子の入れ替えがない場合には $A=B, a=b$ と見なす。

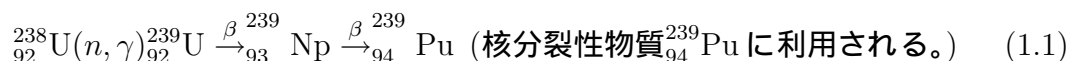
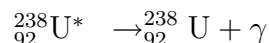
2. 核反応の基本的特徴:

- (a) 標的が原子に比べて非常に小さいために、核反応は一般には非常に起こりにくい。
- (b) 核反応の前後で陽子数 (= 電荷)、中性子数、質量数、運動量 (ベクトル)、角運動量 (ベクトル)、パリティが保存される。
- (c) エネルギー (= 運動エネルギー + 励起エネルギー) と、質量と光速二乗の積の総和が保存される。しかし、エネルギーは必ずしも保存されない。
- (d) 核反応後に生成される原子核は一般に放射能をもつ、すなわち不安定で種々の放射線を放出する。

3. 中性子と原子核との反応:ここでは、中性子と核の反応を中心に扱う。

- (a) 弾性散乱 (elastic scattering):これを (n, n) と略記する。
 - i. 入射粒子と標的核の運動エネルギーの和が保存される。
 - ii. 入射粒子の運動エネルギーは一般に減少する (減速される)。標的核が軽い (質量数が小さい) ほどよく減速される。
 - iii. 標的核は励起されない。
 - iv. 中性子はいずれの原子核とも弾性散乱を行うことができる。(原子炉の理論に重要な高速中性子の減速という点から軽い核との反応が重要。)
- (b) 非弾性散乱 (inelastic scattering) 略記法は (n, n') あるいは $(n, n\gamma)$ である、
 - i. 入射粒子と標的核の運動エネルギーの和が保存されない。
 - ii. 入射粒子と標的核との相互作用により標的核が励起される。
 - iii. 入射粒子の運動エネルギーは一般に減少する (速度は減速される)。
 - iv. 標的核の励起エネルギーは離散的であるので、この反応が起こるためには標的核の最低の励起エネルギーを越えるエネルギーが必要である。これを敷居エネルギーとよび、数百 keV 以上である。
重い原子核はこの敷居値が軽い核のそれよりも低いので、非弾性散乱が起こりやすい。
 - v. 同じ入射エネルギーに対しては、弾性散乱より起こる割合が小さい。
 - vi. 励起状態にある原子核は一般にガンマ線を放出して安定になる。





(c) 吸収反応 (absorption)

吸収反応には、入射粒子を捕獲した後、ガンマ線を放出してより安定な状態に変化する場合 (捕獲反応、capture reaction)、別の粒子を放出する場合 (粒子放出反応) と核分裂 (nuclear fission) がある。

i. 捕獲反応 (capture)(n, γ) と略記する。

A. 中性子が捕獲されて、複合核の励起状態になり、ガンマ線を放射する。

B. ほとんどの原子核で起こる。

C. 残留核はベータ放射性であることが多い。

例： ${}^1_1\text{H}(n, \gamma){}^2_1\text{H}$ ；生物作用で重要。

${}^{59}_{27}\text{Co}(n, \gamma){}^{60}_{27}\text{Co}$ ；ガンマ線源

${}^{113}_{48}\text{Cd}(n, \gamma){}^{114}_{48}\text{Cd}$ ； ${}^{113}_{48}\text{Cd}$ は強い中性子吸収材である。

${}^{115}_{49}\text{In}(n, \gamma){}^{116}_{49}\text{In}$ ；中性子照射検出器に利用される。

${}^{151}_{63}\text{Eu}(n, \gamma){}^{152}_{63}\text{Eu}$ ；中性子照射検出器に利用される。

${}^{197}_{79}\text{Au}(n, \gamma){}^{198}_{79}\text{Au} \rightarrow {}^{198}_{80}\text{Hg}$ ；中性子照射検出器に利用される。

${}_{92}^{238}\text{U}(n, \gamma){}_{92}^{239}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{239}\text{Np}$ ；核分裂性の ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ 生成に利用。

${}_{92}^{235}\text{U}(n, \gamma){}_{92}^{236}\text{U}$ ；核燃料の無駄な消費を示す。

ii. 粒子放出反応: 中性子が入射して、陽子などが放出される反応であり、 (n, p) , (n, α) , (n, n) と略記される。荷電粒子が放出される場合には、クーロンポテンシャル障壁に打ち勝つ必要があるので、入射粒子が速度の遅い中性子に対しては原子番号の小さい軽い核に限られる。

A. (n, α) 反応の例；少数の原子核に限られる。

${}^{10}_5\text{B}(n, \alpha){}^7_3\text{Li} + 2.5\text{MeV}$: 遅い中性子の吸収、原子炉の制御に利用される。

${}^6_3\text{Li}(n, \alpha){}^3_1\text{H}(\text{T}) + 4.78\text{MeV}$: 水爆 (核融合兵器) の原理において重要である。

B. (n, p) 反応の例；高速中性子によって起こる。

${}^{31}_{15}\text{P}(n, p){}^{31}_{14}\text{Si} \rightarrow {}^{31}_{15}\text{P}$

iii. 核分裂 (nuclear fission):

iv. 中性子をつくる / 増倍させる反応:

${}^9_4\text{Be}(\gamma, n){}^8_4\text{Be}$ ；

${}^9_4\text{Be}(\alpha, n){}^{12}_6\text{C}$ ；

${}^9_4\text{Be}(n, 2n){}^8_4\text{Be}$ ；

1.2 核反応の運動学

1. 核反応の前後には、エネルギー・質量、運動量、電荷、質量数、角運動量（量子数）、パリティなどが保存される。（弱い相互作用が関与する場合には、パリティが保存されないことが知られているが。）
2. ここでエネルギー・質量の保存とは、質量 $\times c^2$ 、運動エネルギー、励起エネルギーの和が保存されることを意味する。
3. 反応の前後における質量変化に光速 c の二乗をかけた量を反応の Q 値といい、次のように定義される。

$$Q \equiv (m_a + M_A) \cdot c^2 - (m_b + M_B) \cdot c^2. \quad (1.2)$$

この値が正值のときには、反応がおこる場合、エネルギーが発生する（発熱反応）。この値が負値のときには、反応を起こすには、エネルギーを加えねばならない（吸熱反応）。反応を起こすために必要な最低エネルギーを敷居エネルギー（ $E_{\text{threshold}}$ ）とよばれ、次のように与えられる。

$$E_{\text{threshold}} = |Q| \left(1 + \frac{m_a}{M_A}\right). \quad (1.3)$$

$E_{\text{threshold}}$ の値が単純に $|Q|$ に等しくならない理由は、エネルギーの一部が (a+A) 系の重心運動に消費されるためである。

$Q = 0$ の場合は、エネルギーの出入りがなく、弾性散乱と呼ばれる。

1.3 反応の断面積と平均自由行程

ここで、ある粒子が標的に入射した場合に、ある原子核反応がどのような割合で起こるかを考える。

1. 反応率

(a) 反応率

入射粒子が進行方向に垂直な単位面積あたり単位時間に入射する個数を入射強度とよび、ここでは I_0 と表わす（単位は $[I] = 1/(\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$ ）。標的物質の原子（核）の数密度を N （単位は $[N] = 1/\text{cm}^3$ ）、標的の進行方向の幾何学的面積と S 、厚さを d とする。単位時間あたりの反応回数を反応率（reaction rate）といい、ここでは R_{total} と記す。

(b) 単位体積あたりの反応率 (1)

単位体積あたりの反応率を反応率密度といい、ここでは R と記す。

(c) 単位面積あたりの反応率 (2)

単位体積あたりの反応率も反応率密度ということがあり、ここでは R' と記す。

2. 断面積またはミクロ断面積（微視的断面積）

- (a) ミクロ断面積と反応率の関係反応率 R_{total} は入射強度 (intensity, または流れ current) 入射標的の原子（核）の数密度を N 、幾何学的断面積 S 、厚さ d に比例する。この比例係

数 (σ) は標的の原子核 1 個あたり、特定の核反応が起こる確率を表わす。ここで次の関係式が成立する。

$$R_{total} = \sigma I_0 N S d \quad (1.4)$$

$$\rightarrow \sigma = \frac{R_{total}}{I_0 N S d}, \quad [\sigma] = \frac{\frac{1}{sec}}{[\frac{1}{cm^2 \cdot sec}][\frac{1}{cm^3}][cm^2][cm]} = [cm^2]. \quad (1.5)$$

(b) ミクロ断面積と反応率密度 R の関係単位体積あたりの反応率と反応率密度 R は

$$R \equiv \frac{R_{total}}{S d} = \sigma I_0 N. \quad (1.6)$$

のように表される。

(c) ミクロ断面積と反応率密度 R' の関係単位体積あたりの反応率と反応率密度 R' は

$$R' \equiv \frac{R_{total}}{S} = \sigma I_0 N d. \quad (1.7)$$

のように表される。

σ の単位は、これらの関係式からわかるように、面積の次元をもつ。このために σ は原子核反応の断面積またはミクロ断面積 (微視的断面積、microscopic cross section) と呼ばれる。原子核の幾何学的半径がほぼ 10^{-12}cm なので、つぎのような σ の単位がしばしば使用される。

$$1 \text{ barn}(b, \text{バーン}) \equiv 10^{-24} \text{cm}^2, \quad 1 \text{ mb}(\text{ミリバーン}) \equiv 10^{-3} b. \quad (1.8)$$

3. 巨視的断面積またはマクロ断面積 ここで

$$\Sigma \equiv N \sigma, \quad [\Sigma] = [\frac{1}{cm^3}][cm^2] = [cm^{-1}] \quad (1.9)$$

とにおいて、 Σ をマクロ断面積 (巨視的断面積、macroscopic cross section) とよぶ。ただし、その次元は上に示したように、長さの逆数であることに注意せよ。

標的物質が純粋物質ではなく混合物の場合には、マクロ断面積は拡張される。そのためにマクロ断面積を書き直しておく。標的物質の密度が ρ 、グラム原子量 m_A (原子 1 モルの質量) とすると、 ρ/m_A は標的の単位体積あたりの原子のモル数 (グラム原子量) であるから、これにアボガドロ数 N_a をかけると、標的の原子 (核) 数密度 N になる。したがって

$$\Sigma = \frac{\rho N_a}{m_A} \sigma \quad (1.10)$$

である。もし、標的がいくつかの原子 (核) からできた混合物ならば、その標的のマクロ断面積 Σ は

$$\Sigma = N_1 \sigma_1 + N_2 \sigma_2 + \cdots + N_i \sigma_i + \cdots \quad (1.11)$$

で与えられる。ここで、 N_i は i 番目の原子 (核) の数密度、 σ_i は i 番目の原子 (核) の、今問題にしている核反応に対するミクロ断面積である。さらに標的が化合物であ

る場合には、その化合物の分子 1 モルの質量を M とする (すなわち分子量) と、 Σ は次式で与えられる。

$$\Sigma = \frac{\rho N_a}{M} (\nu_1 \sigma_1 + \nu_2 \sigma_2 + \cdots + \nu_j \sigma_j + \cdots). \quad (1.12)$$

ここで、 ν_j は (その原子の原子核が) 今考えている核反応を起こす j 番目の原子が、その分子 1 個あたりに含まれている個数であり、 σ_j はその核反応に対するミクロ断面積である。例えば、水分子 (H_2O) の水素原子も酸素原子分子 (の原子核) も今考えている核反応を起こす場合には、 $\nu_{\text{H}} = 2, \nu_{\text{O}} = 1$ である。

4. 平均自由行程

有限の厚みをもつ標的物質中を入射粒子が原子核反応を起こしながら減衰していくことを考える。今、初めの入射強度を I_0 とし、厚さ x における入射粒子の強度を $I(x)$ とする。さらに dx だけ進むと強度は I から $I + dI$ に変化する。この強度の変化分 dI はマイナス符号 (減少) であり、核反応によるのだから

$$-dI = \sigma I N dx \rightarrow I(x) = I_0 e^{-N \sigma x} = I_0 e^{-\Sigma x}. \quad (1.13)$$

ここで $I(x)/I_0 = e^{-\Sigma x}$ は問題にしている核反応を起こすことなく厚み x を通りぬけてきた入射粒子の全入射粒子の割合である。さて、引き続く dx で核反応を起こす確率は Σdx となる。なぜならば、幾何学的断面積あたり dx 幅中の標的核の個数は $N dx$ で 1 個の核あたり反応を起こす確率が σ だからである。

さて、核反応を起こすことなく粒子が運動できる距離の平均値を平均自由行程 (mean free path) と呼び、ここでは ℓ と記す。距離 x まで核反応せず、次ぎの dx で核反応する確率は $e^{-\Sigma x} \Sigma dx$ となるので、平均自由行程は次ぎの式で計算される。

$$\ell \equiv \int_0^\infty x e^{-\Sigma x} \Sigma dx = \frac{1}{\Sigma}. \quad (1.14)$$

このように、平均自由行程は、その核反応に対するマクロ断面積に反比例する。すなわち、標的の原子 (核) 数密度が多いほど、またミクロ断面積が大きいほど、核反応を起こす確率が高くなるので、平均自由行程は短くなるのである。

以上、述べた諸結果は一般的であり、種々の核反応に適用できる。例えば、吸収反応には添字 a を、散乱反応には添字 s を、核分裂反応には添字 f をつけると

$$\ell_a = \frac{1}{\Sigma_a}, \ell_s = \frac{1}{\Sigma_s}, \ell_f = \frac{1}{\Sigma_f}, \quad (1.15)$$

となる。今、標的物質において、散乱も吸収も両方とも起こる場合には、その全平均自由行程を ℓ_t とすると

$$\Sigma_t = \Sigma_a + \Sigma_s, \quad \ell_t = \frac{1}{\Sigma_t}, \quad \frac{1}{\ell_t} = \frac{1}{\ell_a} + \frac{1}{\ell_s}. \quad (1.16)$$