

## 1 Annihilation Radiation 消滅放射

陽電子と電子の対消滅によって、高エネルギーの光子が生成する現象。吸収材の近くに  $\beta^+$ 壊変 などによって陽電子を生み出す線源があれば、吸収材の中に存在する電子と対消滅し二つの光子になる。

二つの光子  $\rightarrow$  逆向きで大きさが等しい運動量、等しいエネルギーを持つ

その結果観測される  $\gamma$  線は、線源の反応後の娘核の遷移によって生じた  $\gamma$  線のエネルギースペクトル以外にピークを持つ。

## 2 Internal Conversion 内部転換

原子核の励起エネルギーが光子 ( $\gamma$  線など) として放出されるのではなく、原子内電子に与えられる。その電子は (励起エネルギー)-(結合エネルギー) であらわされる運動エネルギーをもって排出される。この現象を内部転換という。

$\beta^-$  崩壊とは異なり、 $\gamma$  線と同等の数百 keV~数 MeV の単一エネルギーをもつ。

それぞれの電子殻の結合エネルギーに対応したエネルギー線を示す。

単一のエネルギーを持つ電子を出す数少ない反応のひとつであり、較正等に使用されやすい。

## 3 Auger electron オージェ電子

例として、電子捕獲などで電子軌道に空きが出ると、外側の軌道から電子が遷移してくる。この時に余る軌道間準位差のエネルギーを自己電離の使い外に電子が飛び出すことがある。 $\rightarrow$  オージェ電子

内部転換と同様に一連のエネルギー線を示すが、せいぜい数 keV。

$\rightarrow$  自己吸収の影響を受けやすく検出しにくい。

## 4 Neutron Source 中性子源

自然に存在する実用的な中性子源はないため、実験的には、自然核分裂もしくは原子核反応によって中性子を作る。

### 4.1 Spontaneous fission 自発核分裂

超ウラン性の元素が核分裂を起こすときに中性子を放出する。それと同時に核分裂片が  $\beta, \gamma$  崩壊するが、元の物質が十分に分厚い容器に入っていれば  $\beta, \gamma$  等はほとんど吸収されて中性子のみが出てくる。

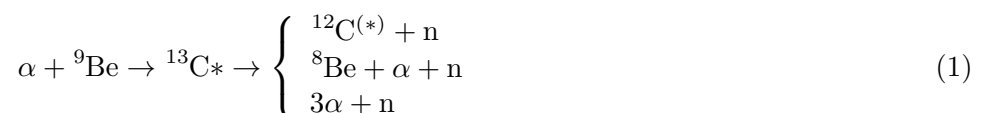
### 4.2 Nuclear reactions 原子核反応

自発核分裂よりも便利な方法。

( $\alpha, n$ ): アルファ線をターゲットにあてて中性子を作る反応

( $\gamma, n$ ): ガンマ線をターゲットにあてて中性子を作る反応

多くの原子核で可能な反応であるが、中性子の収量が大きい反応としてもっともよく知られたものが、( $\alpha, n$ ) 反応のターゲット: Be である。その時の反応経路は、 $^{13}\text{C}$  の励起状態に応じて様々なものがある。



主要反応は  $^{12}\text{C}+n$  である。Be に対して  $\alpha$  線源が  $^{241}\text{Am}$ 、 $^{242}\text{Cm}$  のとき、 $10^6$  個の  $\alpha$  粒子に対してそれぞれ約 70 個と 106 個の中性子が得られる。ここで、 $\alpha$  粒子のエネルギーが単一であるならば、上で述べたような反応でできた中性子は単一のエネルギーラインを持つようなスペクトルを示すはず。しかし混合したものを中性子線源として使うときは  $\alpha$  粒子のエネルギースペクトルが広がり、ドップラー幅の効果と合わせて、中性子のスペクトルは不鮮明になる。

( $\gamma, n$ ) のターゲットはふたつのみで Be と重水素。

長所:  $\gamma$  線は物質中でエネルギーロスが起こりにくい  $\rightarrow$  ほぼ単一のエネルギーを持つ中性子を得られる。

短所：反応の収量が  $\alpha$  粒子を使った反応より 1~2 桁少ない。

$\gamma$  線は吸収されにくいのでバックグラウンドが大きくなる。

## 5 Source Activity Units 放射能の単位

放射能 (放射性試料の強さ)：単位時間あたりに試料中の原子が放射性崩壊する平均の個数。

つまり、試料が大きければ崩壊の数も多くなり、放射能も高くなる。また重要なこととして、放射能は単位時間あたりに放出される放射線の量と関連はあるが、必ずしも対応しない。← 原子核の崩壊スキームによる。

もともと、1 g の  $^{226}\text{Ra}$  の放射能を 1 Ci(Curie) として放射能を計測していたが、単位として大きすぎるためベクレルを定義し直し使っている。1 ベクレル (Bq) =  $1/(3.7 \times 10^{10})\text{Ci}$

物体や人の被ばく量である放射線量と、放射能は区別すること。

## 6 The Radioactive Decay Law 放射性崩壊則

20 世紀初めにラザフォードとソディによって実験的に確立された、放射性試料の放射能が指数関数的に減衰するという法則。核種に多数の崩壊プロセスがあれば、遷移確率  $\lambda$  は  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots$  と合計で表せる。よって  $N$  個の核があつて  $\lambda$  の確率で崩壊するとき、その時間変化は、

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2)$$

である。  $N$  が十分に大きければ、連続変数として扱えて積分すれば、  $N$  の初期値を  $N_0$  とおいて以下のようなになる。

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) \quad (3)$$

放射能の減衰指数となる  $\lambda$  は実用的には平均寿命として  $\tau_m = 1/\lambda$  が有用である。半減期  $T_{1/2}$  との関係は、式 (6.2) から、

$$\frac{1}{2} = \exp(-\lambda T_{1/2}), \text{ よって、 } T_{1/2} = \frac{1}{\lambda} \ln 2 = \tau_m \ln 2 \quad (4)$$

### 6.1 Fluctuations in Radioactive Decay

$\Delta t$  の間に放射線源が崩壊する数を計測してみよう。  $\Delta t$  が半減期に比べて十分小さいとすれば、その間放射能は一定と考えてよい。この計測を繰り返せば、  $\Delta t$  の間の崩壊数  $n$  がわかり  $n$  の揺らぎも観測される。これは統計的なものであるが、実際、  $\Delta t$  の間に崩壊数  $n$  が観測される確率はポアソン分布に基づくことが知られている。  $n$  の平均を  $m$  とするとき、

$$P(n, \Delta t) = \frac{m^n}{n!} \exp(-m) \quad (5)$$

よって標準偏差が  $\sigma = \sqrt{m}$  であることがわかる。

#### 例 1.1

5 秒間線源を観測したところ、900 カウントが検出された。このとき 1 秒あたりのカウント数とその誤差を求めよ。

ポアソン分布 (5) に従うので一回の試行で 900 カウントなので、  $\sigma = \sqrt{900} = 30$ 。

よって一秒あたりの error は  $\frac{30}{5} = 6$

$\therefore n(/s) = \frac{900}{5} \pm 6 = 180 \pm 6$

#### 例 1.2

カウントレイトが 1 count/s の弱い放射線源がある。4 秒間の間に一回も観測されない確率と、一回観測される確率を求めよ。

$\Delta t=4$  s より  $m=4$  であるので、ポアソン分布 (5) より、

$$P(0, \Delta t = 4) = \frac{4^0}{0!} \exp(-4) = e^{-4} = 0.0183 \quad (6)$$

$$P(1, \Delta t = 4) = \frac{4^1}{1!} \exp(-4) = 4e^{-4} = 0.0733 \quad (7)$$

## 6.2 Radioactive Decay Chains 崩壊系列

よくある現象の一つとして、放射性崩壊して不安定な娘核になり、それがまた崩壊するような崩壊系列をもつ反応がある。3つ核を伴う系列を例にとって考えてみる。



式 ( ) から、

$$\frac{dN_a}{dt} = -\lambda_a N_a \quad (9)$$

$$\frac{dN_b}{dt} = \lambda_a N_a - \lambda_b N_b \quad (10)$$

$$\frac{dN_c}{dt} = \lambda_b N_b \quad (11)$$

初期値を  $N_b(0) = N_c(0) = 0$  とすると、式 (9) より

$$N_a = N_a(0) \exp(-\lambda_a t) \quad (12)$$

これを指揮 (10) に代入して、

$$\frac{dN_b}{dt} = \lambda_a N_a(0) e^{-\lambda_a t} - \lambda_b N_b \quad (13)$$

式 (13) 右辺の第 1 項が  $t$  に依存しているので、 $N_b = f(t)e^{-\lambda_b t}$  と予想できる。これを式 (13) に代入すれば  $f'(t) = \lambda_a N_a(0) \exp((\lambda_b - \lambda_a)t)$  となるのでこれを解いて、

$$f(t) = \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} N_a(0) \exp((\lambda_b - \lambda_a)t) + C \quad (14)$$

$$N_b = \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} N_a(0) \exp(-\lambda_a t) + C \exp(-\lambda_b t) \quad (15)$$

初期条件より  $C = -\frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} N_a(0)$  と求まるので、

$$N_b = N_a(0) \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} [\exp(-\lambda_a t) - \exp(-\lambda_b t)] \quad (16)$$

式 (16) を式 (11) に代入して積分すると、

$$N_c = N_a(0) \frac{\lambda_a \lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} \left[ -\frac{1}{\lambda_a} \exp(-\lambda_a t) + \frac{1}{\lambda_b} \exp(-\lambda_b t) + D \right] \quad (17)$$

初期条件より  $D = \frac{1}{\lambda_a} - \frac{1}{\lambda_b}$  であるので結局、

$$N_c = N_a(0) \left[ 1 + \frac{1}{\lambda_b - \lambda_a} (\lambda_a \exp(-\lambda_b t) - \lambda_b \exp(-\lambda_a t)) \right] \quad (18)$$

これで A,B,C の時間変化が求まったわけであるが、前述したような放射能の定義によると、B の放射能は  $\lambda_b N_b$  であることに注意する必要がある。教科書図 (1.7) から読み取れるように、 $N_b$  のみが最大値をもち、この最大値をもつ  $t$  を求めると、 $t_{max} = \frac{\log \lambda_b / \lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a}$ 。このときの A と B の放射能は  $\lambda_b N_b(t_{max}) = \lambda_a N_a(t_{max})$  となることがわかる。→ 理想平衡

最後に任意の時刻  $t$  における A,B の放射能の比は、

$$\frac{\lambda_b N_b}{\lambda_a N_a} = \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} [1 - e^{(\lambda_a - \lambda_b)t}] \quad (19)$$

この式から  $\lambda_a$  と  $\lambda_b$  の関係によって  $t$  に対する A,B の放射能の比がどのように変化するかが読み取れる。

$\lambda_b < \lambda_a$  : 増加

$\lambda_b > \lambda_a$  : 十分に大きい  $t$  で  $\frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} \rightarrow$  過渡平衡

$\lambda_b \gg \lambda_a$  : 1  $\rightarrow$  永年平衡

## Radio Isotope Production 照射による放射性同位体製造

前章で述べた放射線壊変系列の良い例となるのが、安定な元素へ照射してできた放射性同位体である。たとえば、 $N_a$  個の A にフラックス  $F$  の x を照射したとする。この時の反応断面積を  $\sigma(A \rightarrow B)$ 、また B が C に崩壊する崩壊係数を  $\lambda_b$  とすると、

$$\frac{dN_a}{dt} = -F\sigma(A \rightarrow B)N_a = -\lambda_a N_a \quad (20)$$

$$\frac{dN_b}{dt} = \lambda_a N_a - \lambda_b N_b \quad (21)$$

となり、これはまさに、前述した例と同じ形の式となっている。