

# 1. Basic Nuclear Processes in Radioactive sources 23pt

放射線源は 検出器の試験や校正 に用いられる  
核物理・高エネルギー物理に必須のツールである。

## ○ 放射線の放出についての分類

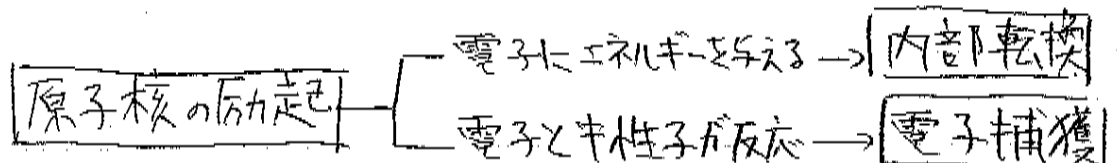
### 1. 過程による分類

- 自発的な崩壊 (radioactivity)  
他の核種になったり同じ核より安定な状態になったりする。  
よく用いられる放射線源は二つ。
- 核反応 (nuclear reactions)  
他の核との相互作用によって別の核種になる。  
こっちの反応に引き続いて自発的に崩壊することもある。

### 2. 生成物による分類

- 電磁気的なものを放射  
X-線,  $\gamma$ -線 (電磁波)
- 微粒子を放射  
 $\alpha$ -粒子,  $\beta$ -電子, 陽電子  
内部転換電子, 木注電子  
中性子, 核分裂片 etc.

放射線のほとんどが原子核から放出されるが  
電子の雲から出てくるものもある。  
原子の中で原子核が孤立しているわけではない  
ということに留意しておく必要がある。



# 放射線源の典型的反応 (Table 1.1)

原子核では同時に何種類もの反応が発生しているがそれらは

- 放射線のエネルギー スペクトラム
- 放出された粒子の種類

によって区別できる。

また娘核 (反応後の核) も反応しているのに注意。

## 1.1 Nucleat Level Diagrams

$\alpha$ -崩壊以外の核反応の見やすい記法として nuclear energy level diagram というものがある。

質量数  $A$  が同じ原子核は同じものの別の状態であるという理念のもとで同重体 ( $A$  が同じグループ) をひとまとめで扱う。

( $\alpha$ -崩壊では  $A$  が変わるので除外)

横軸を原子番号  $Z$ , 縦軸をエネルギー  $E$  として Fig 1.1 のように書く。

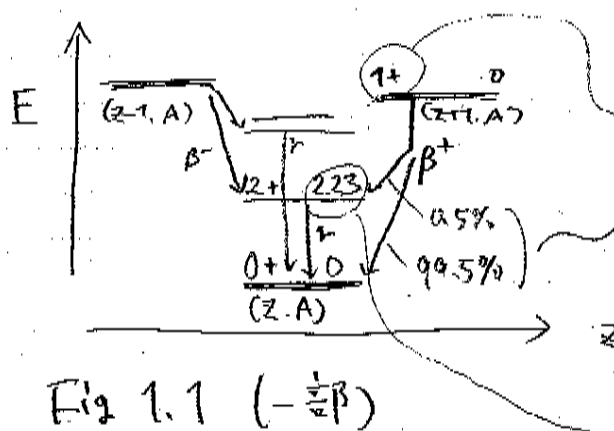
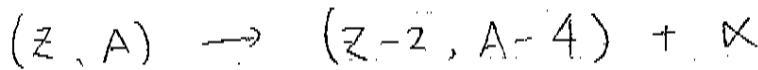


Fig 1.1 (-部)

- 太い線は基底状態
- $Z$  の  $\pm$  パリティ 正
- 2通りの反応があるときは確率を書く
- 反応の種類は矢印のそばに書く
- 基底からのエネルギー

## 1.2 Alpha Decay

- 反応する原子核の特徴 核子過剰な重い原子核
- 放射される粒子  ${}^4\text{He}$  原子核 (中性子 2つ, 陽子 2つ)  
(結合エネルギーが大きい)  
(エネルギー的に有利)



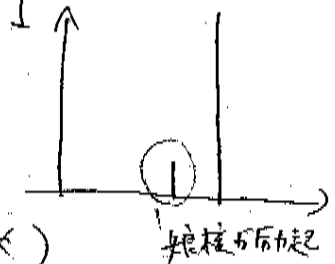
- エネルギー・スペクトラム 単一 (放射粒子が1つ(かないた $\alpha$ ?)

核のポテンシャル障壁を $\alpha$ 粒子がトンネル効果によって透過することによって起こる。  
透過率はエネルギーに依存するので $\alpha$ 線源として用いる場合  $E \approx 4 \sim 6 \text{ MeV}$

- 娘核の状態 ほとんど基底状態

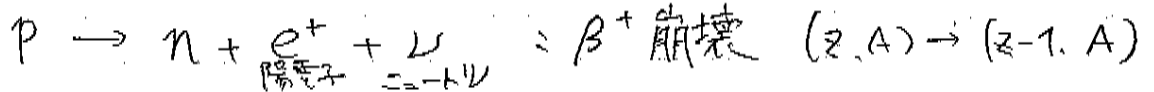
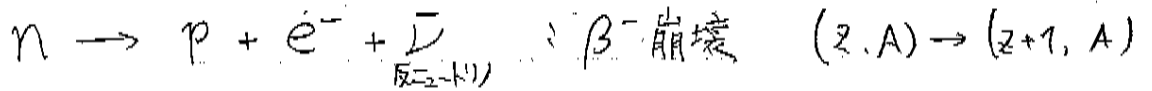
- $\alpha$ -線源

薄くしなければならない  
(エネルギー損失 $\ominus$ のため)  
 $\leftarrow +2e$  の電荷



## 1.3 Beta Decay

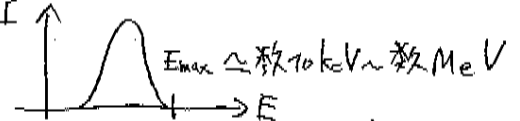
- 反応する原子核の特徴 中性子または陽子過剰
- 放射される粒子 電子 ( $\beta^-$ 崩壊) 陽電子 ( $\beta^+$ 崩壊)



- エネルギー・スペクトラム

連続的  
(2つの粒子が $Q$ 値をわけあうため)

弱い相互作用による



- 娘核の状態

多くが崩壊状態  $\rightarrow$  速やかに $\beta$ 崩壊

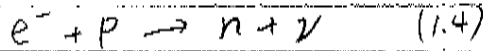
- $\beta$ -線源

薄くしなければならない。特に $\beta^+$ 線源は対消滅もある。(511 keV =  $m_e c^2$  の光子になる)

## 吉池

## 1.4 電子捕獲 (EC)

$\beta^+$ 崩壊の代わりに陽子の多い原子核は軌道上の電子を1つ捕獲して変化したこともある。



この反応は、 $\beta^+$ 崩壊での $\beta$ 粒子が左側には電子捕獲のためだけに、 $\beta^+$ 崩壊と本質的には同じなので、核準位のエネルギーは $\beta^+$ 崩壊のものと同じである。

この反応は(二重)を放出するだけで観測することはほぼ不可能と思われる。

けれどもECは他の原子内電子で満たされた原子殻に穴を空け、それにより特徴的なX線やオージェ電子を放射する。これらの放射は検出しやすく、この反応の信号として使うことができる。一般にはK殻の電子が捕獲されやすく、L殻の電子を捕獲されるが、その確率は低い。

## 1.5 ガンマ放射

原子の電子殻構造のように原子核も、不連続なエネルギー準位で特徴づけられている。

準位間の遷移は、その準位間のエネルギー差に等しいエネルギーを放出(または吸収)することになる。数百keVから数MeVのエネルギーの光子のエネルギーは、原子核の高いエネルギー準位を示している。この高エネルギーの光子は $\gamma$ 線と呼ばれる。原子核放射の特徴的なスペクトルを示す。典型的な $\gamma$ 線のエネルギー構造を示している準位図が図1.3である。

ほとんどの $\gamma$ 線源は $\beta$ 崩壊の後励起状態となっているが、原子核反応による後励起されるものもある。電子や陽電子は物質中で吸収されやすいので、線源内の $\beta$ 粒子はまわりの物質と吸収され、 $\gamma$ 線だけが残り、 $\gamma$ 線だけが残り。

## 1.5.1 核異性状態

多くの原子核の後励起状態は、すぐに低い準位へと遷移してしまうが、とても長い寿命を持つ後励起状態もある。準位間のエネルギー差を大きく、腕励起を妨げる。その結果、数秒から数年に及ぶ寿命の幅を生み出している。準安定状態に同じエネルギーの核種は、これらの普通の状態とは異なり、放射性を示すようになる。そのような原子核は異性体と呼ばれる。質量数の後にmをつけて表す。例:  $^{60m}\text{Co}$ ,  $^{69m}\text{Zn}$

## 1.6 消滅放射線

高エネルギー光子の別の線源が陽電子消滅である。 $^{22}\text{Na}$ のような陽電子源を吸収体で囲むと、吸収体の電子と陽電子が対消滅し、電子の質量511keVに等しいエネルギーを持つ2つの光子を生成する。この2つの光子は運動量保存のため、常に逆方向へ放出される。厚い陽電子源の $\gamma$ 線のスペクトルは、娘核への遷移によるピークに加えて、

対消滅に引消される光子のエネルギーに一致する 511 keV のピークを持つ。

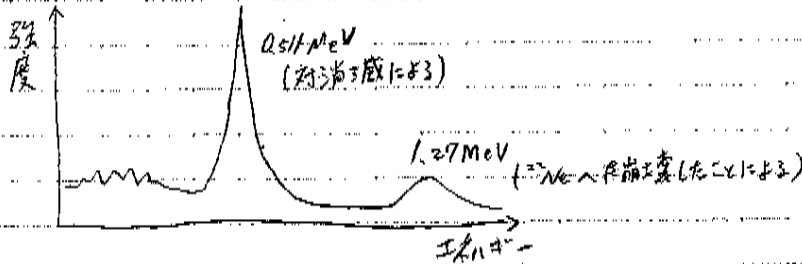


図 1.4. <sup>23</sup>Na の  $\gamma$  線スペクトル

### 1.7 内部転換

$\gamma$  線放射は最も一般的な原子核の脱励起の仕方であるが、内部転換も起こる遷移も起こりうる。この過程では、原子核の励起エネルギーが、光子として放出されるのを、直接原子内電子へと渡される。この電子は、(励起エネルギー) - (原子の結合エネルギー) を運動エネルギーとして持ち出す。 $\beta$  崩壊とは違い、内部転換で放出される電子は、競合する崩壊の  $\gamma$  線とほぼ同じ数値 keV から数 MeV の単一のエネルギーを持っている。

K 殻の電子が最も放出されやすいが、それ以外の殻の電子もエネルギーを奪取することもある。そのため、内部転換線源のスペクトルは、線スペクトルの集まりとなる。そのスペクトルのエネルギーの違いは、電子のそれぞれの軌道の結合エネルギーの違いと等しい。

内部転換線源は、単一のエネルギー電子を放出する数少ない原子核の一つであり、目的のものを測定するのに役立つものである。実験室で容易に見つけたこの珍しい内部転換線源が表 1.4 である。

### 1.8 オージェ電子

内部転換のよう、電子殻で起った励起エネルギーは、 $\gamma$  線として放出された時を原子内電子に渡される。例えば、電子捕獲の過程で反発の電子にこのエネルギーが起る。ここで放出された電子は単一のエネルギーを持ち、オージェ電子と呼ばれる。内部転換スペクトルのように線スペクトルのかたまりを示すが、このエネルギーは、数 keV 以下の原子遷移を代表するエネルギーである。低エネルギーのため線源内での自己吸収の影響を受けやすく、検出するのは難しい。

### 1.9 中性子源

中性子を放出する同位体を人工的に作ることは可能であるが、実験に使用する天然の中性子源は存在しない。その代わりに、実験では自発的に核分裂するか、原子核反応を起こすものを使っている。

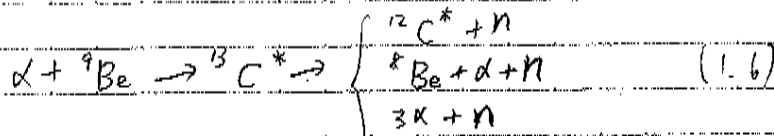
### 1.9.1 自発的な核分裂

超ウラン元素(ウラン92より原子番号の大きい元素)では核分裂が起きることがある。中性子と一緒に、核分裂によってできた核種も放出している。こうして放出された核種もすぐに同様に崩壊し、β線やγ線を放射する。この核分裂線源を十分に厚い容器で覆うと、後に放射されたβ線やγ線のほとんどは吸収され、より透過性の高い中性子だけを残すことができる。

この中で最も一般的で中性子源は<sup>252</sup>Cfであり、半減期は2.65年である。  
中性子のエネルギーは10 MeV程度まで連続的にあり、272 eVに分布している。(図1.5)

### 1.9.2 核反応

中性子を作り出す新しい方法は、(α, n) または (γ, n) の核反応を用いることである。この反応は多くの原子核で起こるが、最も効率良く中性子を作れるものだけを使う。このような線源はターケットと通常な強放射のαまたはγ線源と混ぜて作られる。ターケットとして最も一般的なのはベリリウムである。α線照射下で、ベリリウムは自由な中性子を作れる反応を誘起する。

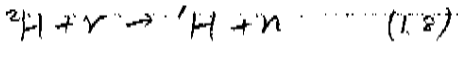
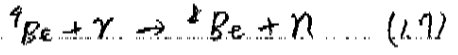


励起された原子核が混合した<sup>12</sup>C\*が作られ、励起エネルギーに依存して様々な崩壊の仕方を示す。一般に主要な存在は<sup>12</sup>Cまたは<sup>12</sup>Cの44 MeV励起された状態への崩壊である。<sup>241</sup>Am<sup>241</sup>Amをα線源として用いると、10<sup>6</sup>個のα粒子当たり、70個の中性子を出せる中性子源が得られる。他に<sup>242</sup>Cm<sup>242</sup>Cm、<sup>238</sup>Pu<sup>238</sup>Pu、<sup>226</sup>Ra<sup>226</sup>Ra、<sup>227</sup>Ac<sup>227</sup>Ac等も用いられる。ターケットとして、ベリリウム以外にもホウ素、リチウム、等も用いられるが、中性子の生産効率はやや低い。中性子源の半減期はもろくα線源の半減期に依存している。

決まったエネルギーのα線が入射する場合には、放出される中性子のエネルギースペクトルは中性子の放出時に遷移した準位間と一致する単一エネルギーの線スペクトルになるはずである。しかし、混ぜられた中性子源では、エネルギー損失のためα粒子スペクトルのぼやけが生じてしまう。その結果、中性子のエネルギースペクトルが大きくぼやけてしまうことになる。また、2 MeV程度に落ちたトランプラントも無視することはできない。  
図1.6には<sup>241</sup>Am/Beと<sup>242</sup>Cm/Beのエネルギースペクトルが示されている。

光反応(γ, n)の場合は、ターケットとして適しているものは、ベリリウムと重水素のみである。

これと水の反応は、



$\gamma$ 線は $\alpha$ 線と違い、エネルギーの損失がないので、この過程で放出される中性子は、ある程度単一のエネルギーを持つという利点がある。もちろんこのエネルギーは運動学的に見て厳密に単一であるわけではないが、エネルギーの広がり性は凡そ小さいと云える。この中性子の源の不利な点は、中性子の生産効率が悪く、 $\alpha$ 線を用いた場合と比べて1~2桁小さいエネルギーになることである。さらに、反応した $\gamma$ 線は $\alpha$ 粒子ほど簡単には吸収されず、その結果ガンマ線放射により大きなバックグラウンドが出てしまう。

\*核反応の表記法

- A...  $\alpha$ -粒子となる原子核
- B... 反応後に生成する原子核
- $\alpha$ ...  $\alpha$ 射する粒子
- $\beta$ ... 反応後に放出される粒子

A, Bを省略して  $(\alpha, \beta)$  と書く場合には、 $\alpha$ は原子核に $\alpha$ を $\alpha$ 射して $\beta$ が放出されることを表す

10. 放射能の単位

放射能試料の放射能の強さは、単位時間当たり起こる崩壊の平均回数により定義されている。これは物質の性質を表す本質的な量ではない。存在する試料に含められた線源の量で決まり、存在する試料はそれだけ崩壊の回数も多いので大きな値になるからである。さらに、放射能の強さと単位時間当たりの放射線量は必ずしも関連はしていないが、必ずしも同義ではない。例として、ある原子核が不安定な娘核に崩壊したとすれば、その娘核がさらに崩壊することもある。その放射線量が最初の崩壊からの放射線と見ることができても、放射能の強さと考えることはできない。同様に、核種は、 $\beta^+$ 崩壊と電子捕獲というように複数の競合する過程で崩壊することもある。この過程では放射線を出すのは崩壊の一部だけが現れたりする。実際放射線量と放射能の関係は、特定の原子核の崩壊機構により決まり、唯一の放射性遷移の場合には放射能と放射線量が同じになる。

放射能の単位には古くからキュリー (Ci) が使われてきた。これは、1グラムの純粋なラジウム226の放射能と定義されており、

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 回/秒} (= \text{Bq}) \quad (1.9)$$

これはとても大きい単位で、実際に使う線源は数十～数百 $\mu\text{Ci}$ のオーダーである。  
また最近ではベクレルを使うことが推奨されている。

始めの頃は、放射能の単位を、放射線量の単位であるグレイやシーベルトと区別することが重要である。これらの単位は、放射線が人や物に与える影響を測るのに必要なものであるが、キュリーやベクレルは線源自身の崩壊に関連した量である。