

放射線計測学

第1回

放射線と物質の相互作用

九州大学工学研究院

渡辺 賢一

講義内容

「放射線計測」という技術は、放射線利用、原子力利用を行うために必要不可欠な基盤技術となる。本科目では、放射線を計測するための物理から、具体的な放射線検出器の動作原理、構造、特徴について、その基礎から平易に解説する。

第1回 放射線と物質の相互作用

第2回 放射線計測の基礎

第3回 信号処理

第4回 ガス検出器

第5回 半導体検出器

第6回 シンチレータ

第7回 中性子検出器

第8回 放射線検出器の応用

放射線イメージング・その他の応用

放射線と物質の相互作用

放射線とは？

放射線 = 放射されてくる線状の物

(広義) 可視光、紫外線、赤外線、マイクロ波、
エックス線、ガンマ線、アルファ線、ベータ線、
中性子線、ミューオン 等々

原子力基本法、放射線障害防止法等の法令上は・・・
(あるいは、一般的には・・・)

放射線 = 電離放射線 (Ionizing radiation)
高い電離能力を有する線状のもの
(1つの粒子で多数の電離を引き起こす = 高エネルギー)

1つの原子・分子を電離するのに必要なエネルギー: 数～数10 eV
→ 高エネルギー: keVオーダー以上くらい

※ $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$



エックス線、ガンマ線、アルファ線、ベータ線、
中性子線、ミューオン 等々

放射線とは？

皆さん！放射線は怖いですか？？

なぜ？？

→ **目で見ることができなくて**、体に害がありそうだから

目で見ることができなくて、体に害がありそうなもの

微生物・ウィルス、有害化学物質、PM2.5、放射線、、、

現代人が、目で見ることができないものを認識するには？

→ 電子機器で検出・モニタする！！

(電気信号として認識)

「放射線」は勝手に電離を引き起こして、電気信号を
作ってくれる！！

→ 体に害のありそうなものの中では、認識しやすい部類と
考えることもできます！！

「放射線計測」：目で見ることのできない放射線を
認識できるようにする手法

放射線の分類 (放射線計測の観点から・・・)

◎ 直接電離放射線

高エネルギー荷電粒子

電子(ベータ線)、陽子、アルファ粒子(He^{2+} イオン)、
ミューオン 等々

・・・クーロン力を介して、物質を電離

◎ 間接電離放射線

非荷電粒子

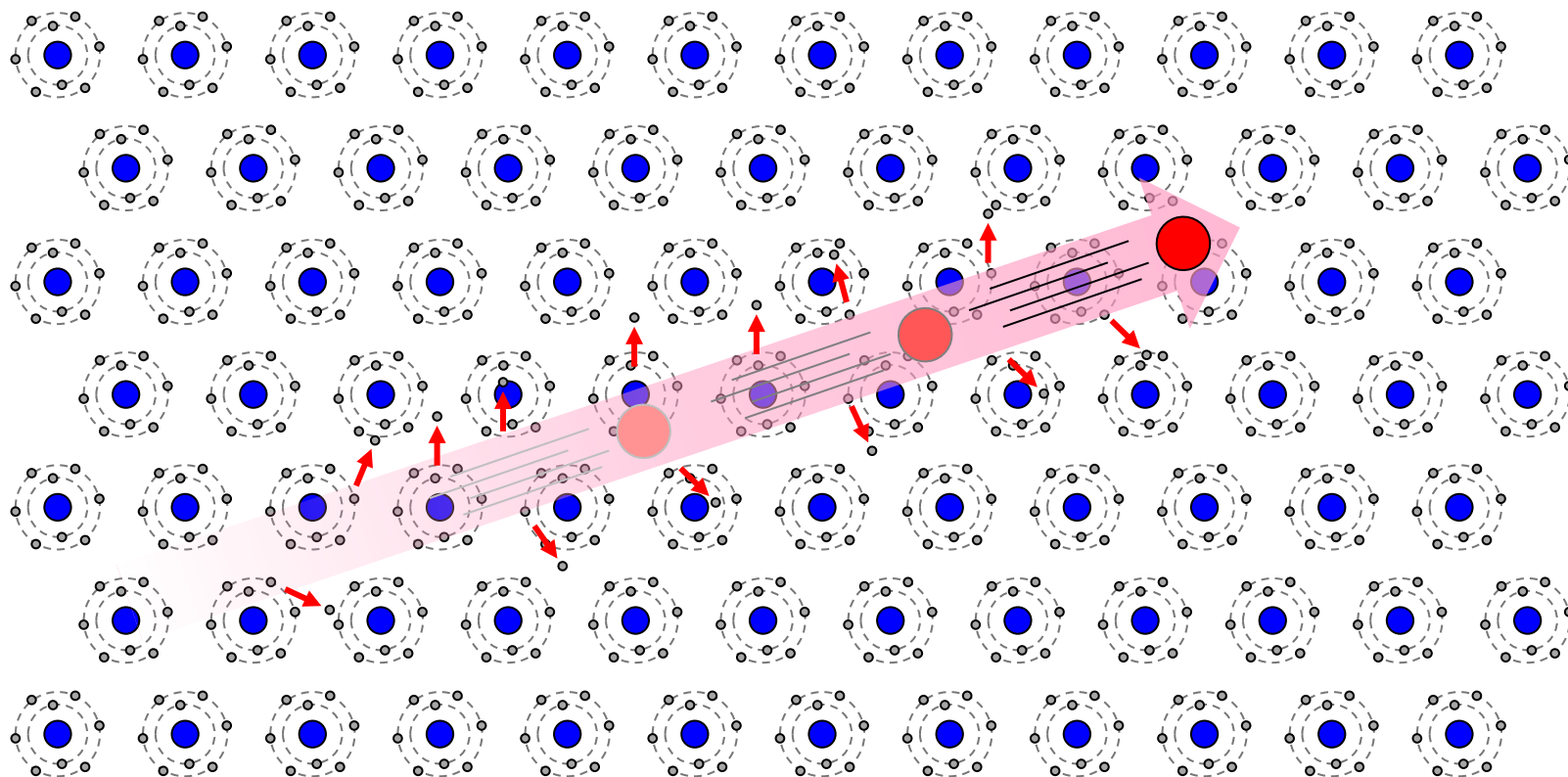
光子(エックス線、ガンマ線)、中性子線、
ニュートリノ 等々

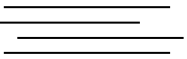
・・・何らかの相互作用により、荷電粒子(直接電離放射線)
を生成し、間接的に電離

もう一つの分類の仕方としては

粒子(荷電粒子、中性粒子) & 電磁波 という分類の仕方も

直接電離放射線による電離のイメージ

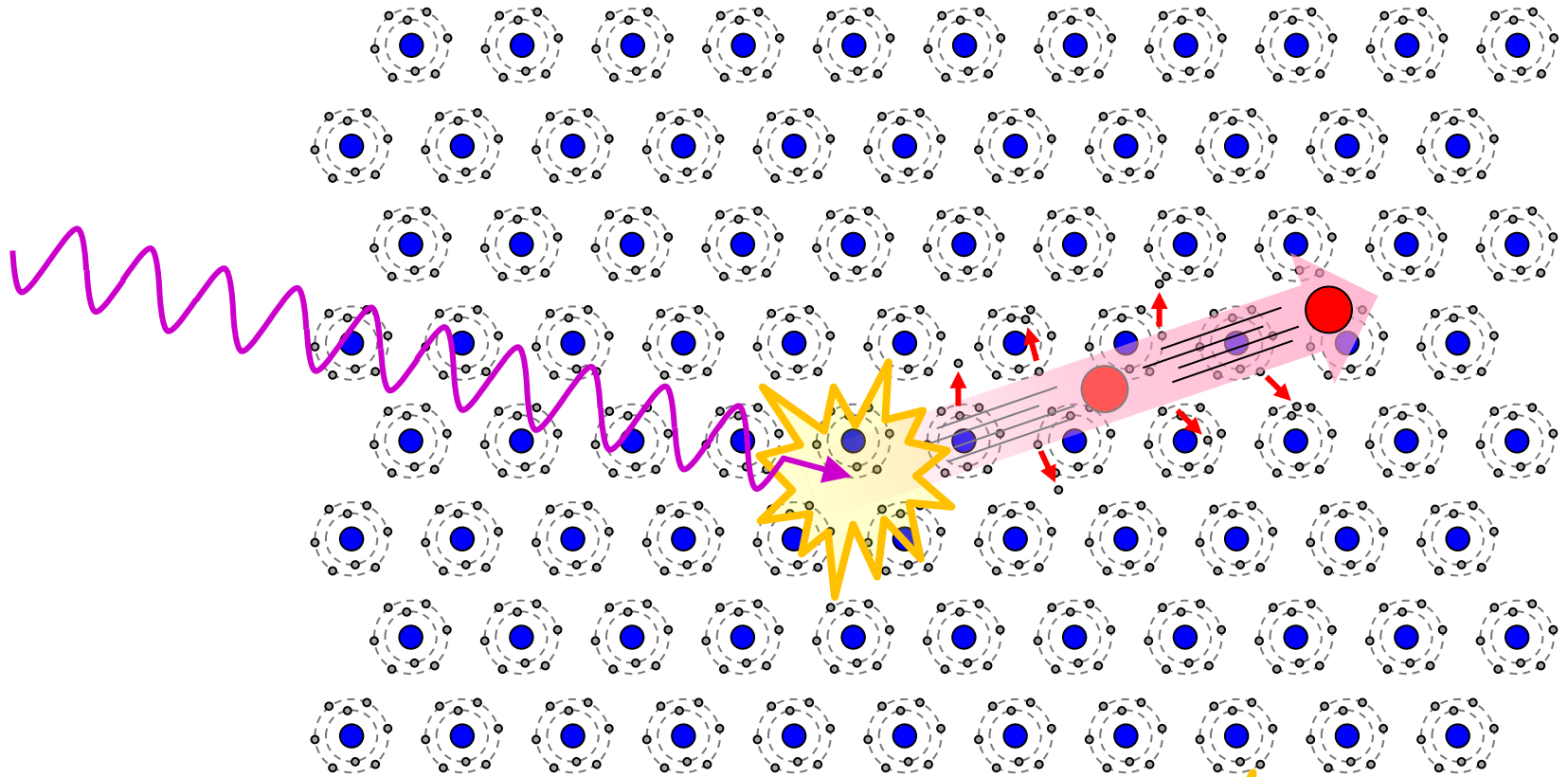


高エネルギー荷電粒子  ● は、主として物質中の原子に束縛されている電子・をクーロン力を介して、はじき飛ばす .

結果として、荷電粒子の飛跡に沿って、多数の電離  が引き起こされる。

荷電粒子(直接電離放射線)は、物質を通過している間、
絶え間なく電離を引き起こしながら進んでいく。

間接電離放射線による電離のイメージ



非荷電粒子  は、なんらかの相互作用(反応)  を介して、
高エネルギー荷電粒子  を生成し、その荷電粒子が電離  を引き起こす。

非荷電粒子(間接電離放射線)は、相互作用(反応)を起こすまでは、
物質の中を通過(素通り)していくことができる。
物質中で生成された荷電粒子により電離は引き起こされる。

各々の相互作用については
後半でもう少し詳しく
説明します！

その前に「放射線源」について
説明します！

放射線源

放射線：電離能力の高い粒子（あるいは量子）
（荷電粒子・非荷電粒子・電磁波＝光子を含む）

◎ 原子核・原子から放出されるもの

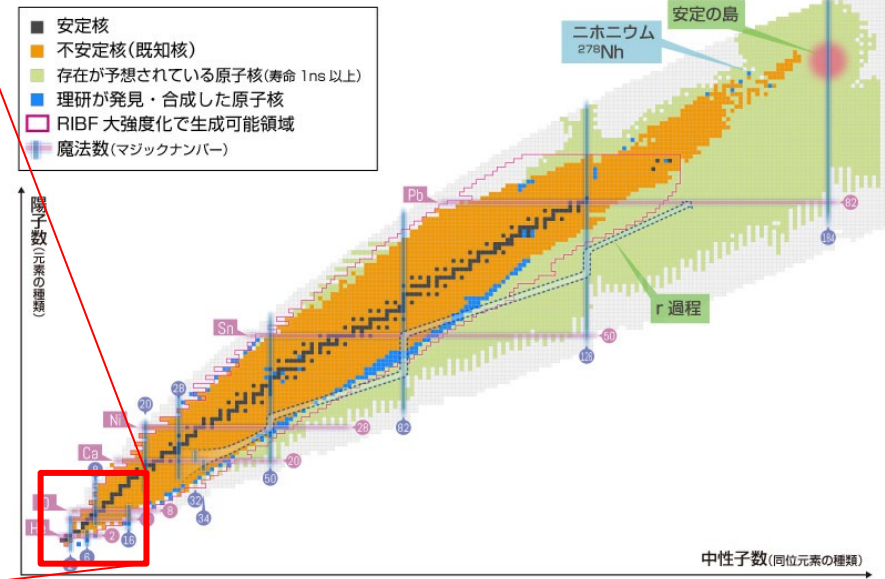
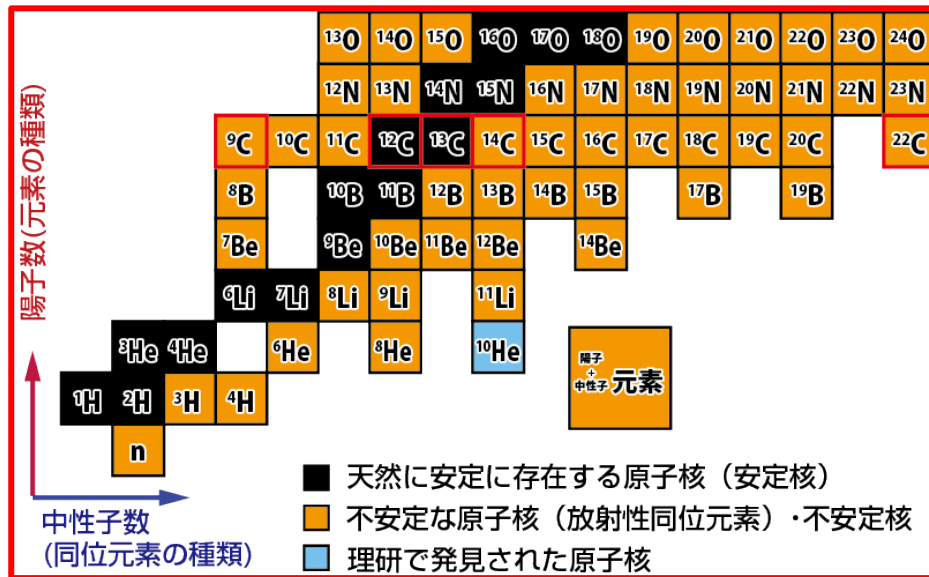
- ・自然に発生する（放射性同位元素、放射性核種とも）
アルファ線、ベータ線、ガンマ線
- ・原子核・原子に放射線が衝突し発生
 - 中性子： (n,p) 反応、 (n,α) 反応 etc.
 - 原子核： (p,α) 反応、 (α,n) 反応 etc.
 - 電子：エックス線

◎ 加速器で生成されるもの

- ・荷電粒子を加速→高エネルギー荷電粒子＝放射線
陽子線、電子線
- ・加速した荷電粒子を原子核・原子に衝突させる
→二次的に放射線が発生
上記「原子核・原子に放射線が衝突し発生」するもの

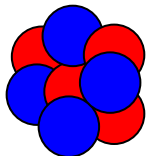
放射線源

◎ 原子核・原子から放出されるもの ・自然に発生する(放射性同位元素)



出典: 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター, <https://www.nishina.riken.jp/research/nucleus.html>

原子核: 陽子と中性子から成る



$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} M$

M: 元素記号

A: 質量数(陽子 + 中性子数)

Z: 原子番号(陽子数)



陽子



中性子

例えば $\begin{matrix} 12 \\ 6 \end{matrix} \text{C}$

陽子数と中性子数の
組み合わせにより
安定な原子核と
不安定な原子核がある

||

放射性同位元素

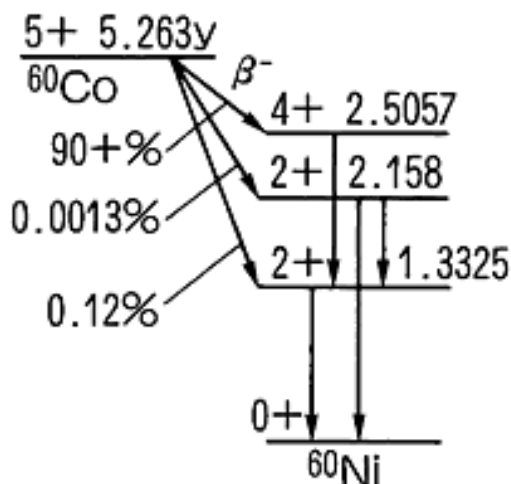
放射性壊変を起こす
→ 放射線を発生

放射線源

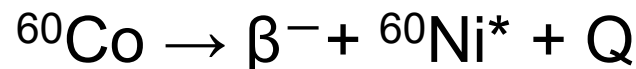
◎ 原子核・原子から放出されるもの
・自然に発生する(放射性同位元素)

放射性壊変

(壊変図式の例)



ベータ崩壊の例



${}^{60}\text{Co}$: 半減期 5.263年

β^- : ベータ粒子(電子)

${}^{60}\text{Ni}^*$: 励起状態の ${}^{60}\text{Ni}$

Q : Q 値(発生するエネルギー)

質量

$$M_{\text{Co-60}} > M_{\beta^-} + M_{\text{Ni-60}^*}$$

$$Q = \{ M_{\text{Co-60}} - (M_{\beta^-} + M_{\text{Ni-60}^*}) \} c^2$$

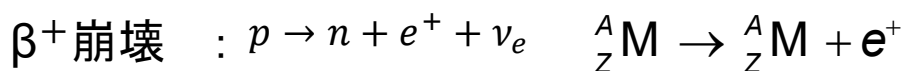
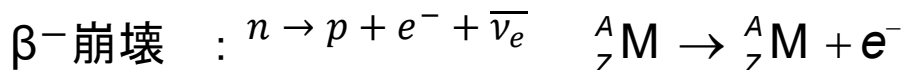
質量欠損

$$E = mc^2$$

質量・エネルギー等価則

静止質量 電子: 511 keV

陽子: 938 MeV



自発核分裂 : 二つの原子核 + 2~3個の中性子

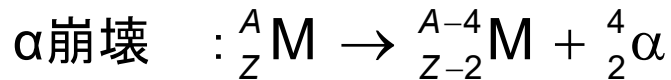
反応は、エネルギー(質量)が
高い状態から低い状態へ進む

出典: 半減期, 図1壊変図式の例, 原子力百科事典ATOMICA,
https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_08-01-01-04.html

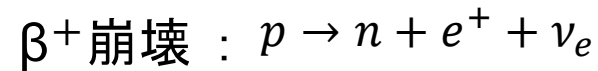
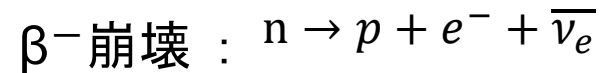
放射線源

◎ 原子核・原子から放出されるもの
・自然に発生する(放射性同位元素)

α崩壊



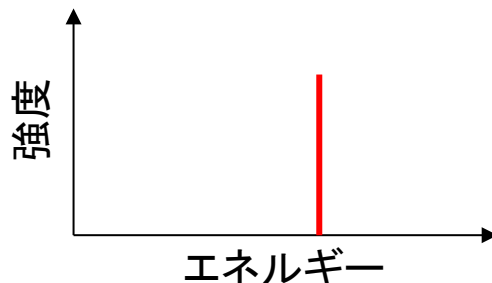
β崩壊



ニュートリノが発生！

二体問題:

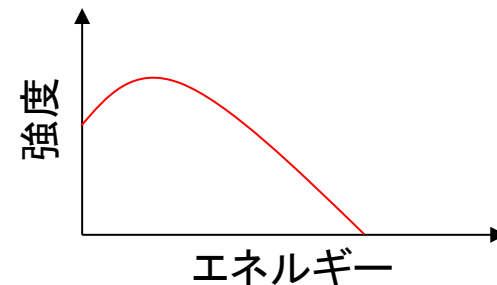
発生するエネルギーが決まれば
運動エネルギー・運動量保存則により
(両者は180° 反対方向に放出)
発生する粒子の各々の運動エネルギー
は一意に決まる



線スペクトル(一定のエネルギー)になる
(生成原子核の励起状態により複数になることも)

三体問題:

発生するエネルギーが決まっても
各々の放出される角度が決まらないので
放出角度によって、各々の粒子に分配される
運動エネルギーは変化
→放出されるβ粒子はエネルギー分布を持つ



連続エネルギー分布になる
(平均エネルギー & 最大エネルギー $Q_{\max}$ で表現)

放射線源

◎ 原子核・原子から放出されるもの

- ・自然に発生する(放射性同位元素)

放射性壊変に付随して起こること

放射性壊変によって

生成される新しい原子核：質量欠損により余剰するエネルギーにより

励起状態(不安定)にあることが多い

→より安定な基底準位へ（エネルギー放出）

特性エックス線(電磁波)

内部轉換電子

原子核

原子

オージェ電子

ガンマ線(電磁波)

特性エックス線 : 原子の脱励起
ガンマ線 : 原子核の脱励起

励起狀態

原子や原子核のエネルギー(状態)は
飛び飛びの値しか取り得ない(離散的)
→量子化

原子: 電子の運動エネルギーとクーロン力
原子核: 核子の殻構造と強い相互作用(核力)

基底狀態：

最も低い
エネルギー状態
(安定)

励起状態：
それより高い
エネルギー状態
(不安定)

放射線源

◎ 原子核・原子から放出されるもの

・自然に発生する(放射性同位元素)

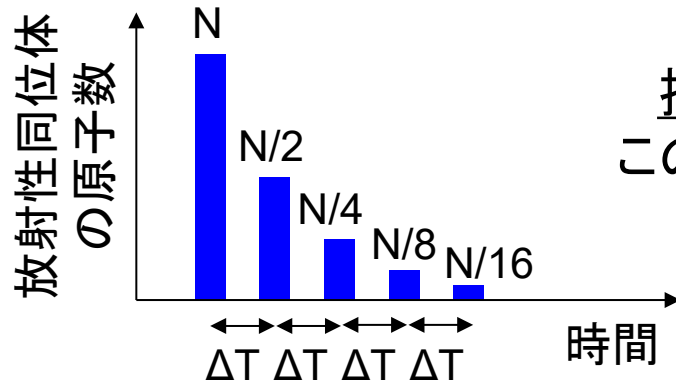
半減期

放射性壊変: 単位時間あたりに崩壊する確率は
放射性同位体によって決まっている

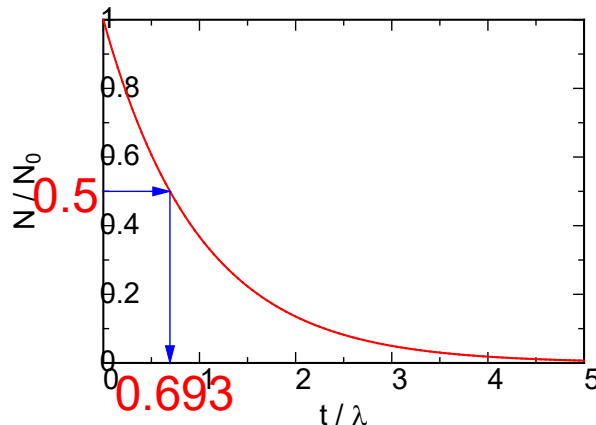
→ **崩壊定数 λ (s^{-1})**

数学的には

例えば、とある時間 ΔT で50%崩壊するとする、..



指数関数的に減少
この半になる時間が
半減期 $T_{1/2}$



壊変する
同位体の
原子数

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

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

$$= N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

放射線源

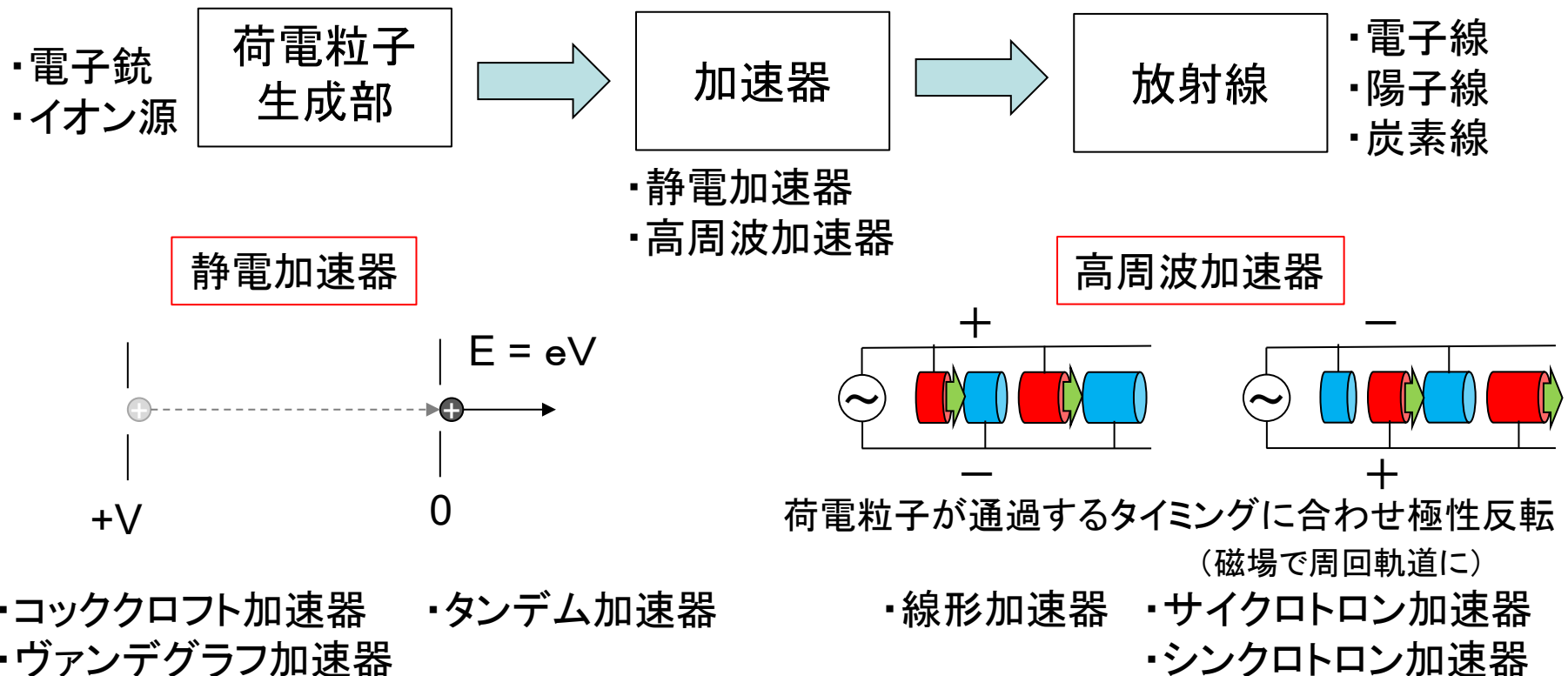
放射線：電離能力の高い粒子（あるいは量子）
（荷電粒子・非荷電粒子・電磁波＝光子を含む）

◎ 加速器で生成されるもの

・荷電粒子を加速→高エネルギー荷電粒子＝放射線

例）陽子線、電子線

加速器を用いた放射線発生装置



放射線源

放射線：電離能力の高い粒子（あるいは量子）
（荷電粒子・非荷電粒子・電磁波＝光子を含む）

◎ 原子核・原子から放出されるもの

・原子核・原子に放射線が衝突し発生

原子核： (p, α) 反応、 (α, n) 反応 etc.

中性子： (n, p) 反応、 (n, α) 反応 etc.

電子：制動放射エックス線

衝突させる放射線は多くの場合、加速器により発生される

中性子発生： ${}^7\text{Li}$ (p, n) 反応、 ${}^9\text{Be}$ (p, n) 反応

核破砕反応（J-PARC： Hg に3 GeV陽子）

$\text{T}(d, n)$ 反応、 $\text{D}(d, n)$ 反応

エックス線発生：金属ターゲットに高エネルギー電子照射

ターゲット内で制動放射エックス線

（荷電粒子が加速度を受けた際に発生）

& 特性エックス線

例外 (α, n) 反応（多くのアクチノイド： α 線源）→ Am-Be中性子源

残りの時間で
「放射線と物質の相互作用」
について
もう少し詳しく説明します！

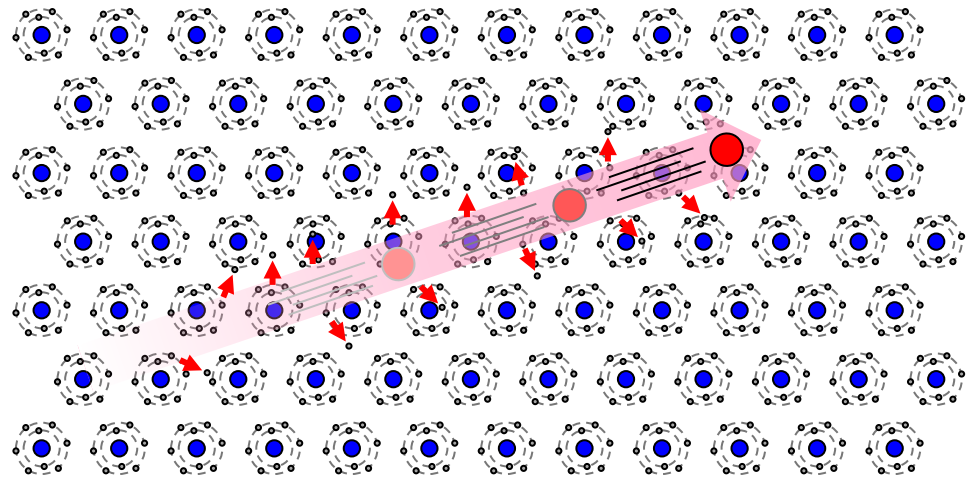
高エネルギーイオンの物質内での振る舞い

イオン: 正の電荷を持つ荷電粒子

クーロン力を介して、
物質に エネルギーを与え
自身は エネルギーを失う

どこからクーロン力を受けるのか？

- 物質は原子の集まり
- 原子は、原子核の周囲を電子が
→ 主として、物質中の(軌道)電子からクーロン力を受ける



物質中には多数の電子が密に詰まっているので、連続的にエネルギーを失う

阻止能: $\frac{dE}{dx}$ 、微小距離 dx 進む間に、どれだけのエネルギー dE を失うか？
(単位距離進む間に失うエネルギー)

Bethe-Blochの公式

$$\frac{dE}{dx} = \frac{Z_1^2 e^4 N Z_2}{4\pi\epsilon_0^2 m_e V^2} \left[\ln \frac{2m_e V^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

高エネルギーイオンの物質内での振る舞い

Bethe-Blochの公式

有効質量 $\mu = \frac{Mm_e}{M + m_e} \approx m_e$

Z_1 : 入射イオンの価数

V : 入射イオンの速度

Z_2 : 標的物質の原子番号

N : 標的物質の原子数密度

I : 平均励起エネルギー

e : 素電荷

m_e : 電子の質量

ϵ_0 : 真空の誘電率

β : V/c

c : 光速度

入射イオンの価数の
2乗に依存

物質中の電子密度

相対論的效果

飛ばされる
電子の質量で
決まる

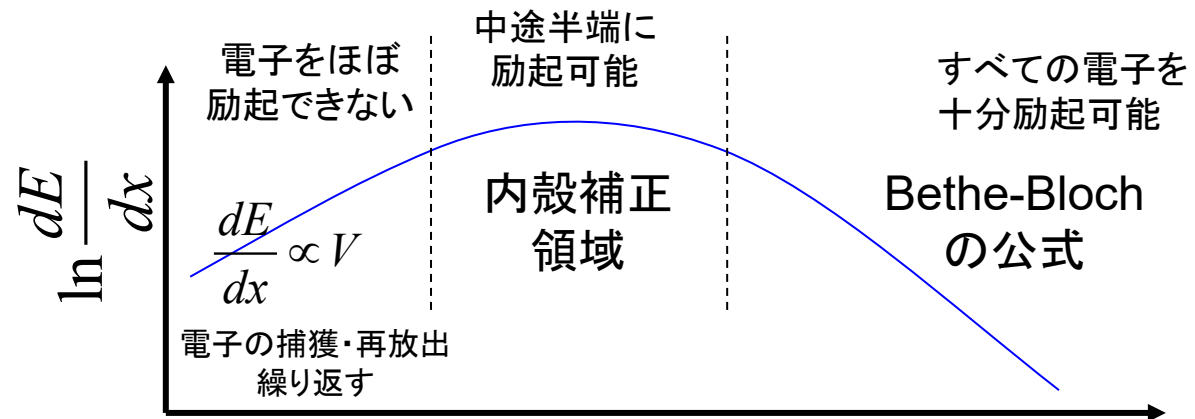
$$\frac{dE}{dx} = \frac{Z_1^2 e^4 N Z_2}{4 \pi \epsilon_0^2 m_e V^2} \left[\ln \frac{2 m_e V^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

速度が大きいとクーロン力を受ける
時間は短いので阻止能は小さくなる

電離・励起の
しやすさ

この項は入射イオンの速度の
関数であるがそこまで速度に依存しない

阻止能の エネルギー依存性



低速では相対的に原子核による寄与も $\ln E$

高エネルギーイオンの物質内での振る舞い

イオン: 物質中の電子からクーロン力を受けエネルギーを失う

質量 イオン >> 電子

→ 個々の電子から受け取る運動量は小さい

→ あまり曲がることなく、直線的に進み、徐々にエネルギーを失う

エネルギーの失う様子は決まっているので、

同じエネルギーを持った同種のイオンは、同じ距離進んで止まる

荷電粒子の進める距離 = 飛程

エネルギーの減り具合は？

イオン: 物質中では連続的に
エネルギー損失

→ 速度減少

→ 阻止能 dE/dx 増加

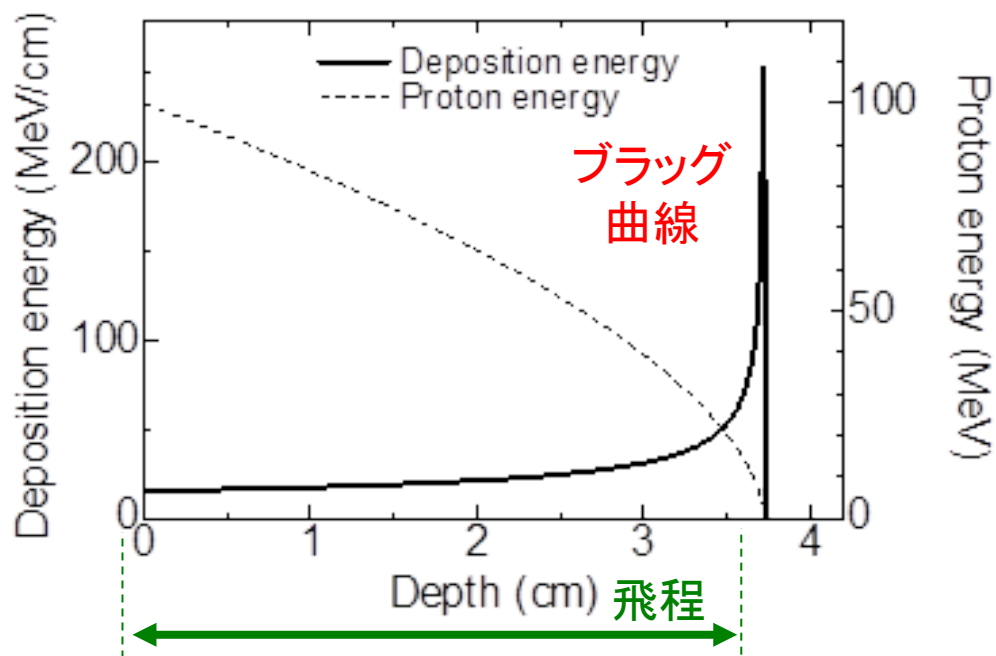
→ 停止直前に大きな阻止能に

ブラッグ曲線

Bethe-Blochの公式

$$\frac{dE}{dx} = \frac{Z_1^2 e^4 N Z_2}{4\pi\epsilon_0^2 m_e V^2} \left[\ln \frac{2m_e V^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

100 MeV陽子をAlに入射



高エネルギー電子の物質内での振る舞い

電子:

荷電粒子であるので、電荷の極性(正負)、**質量が異なる**だけで、基本的には、イオン同様に、物質中の電子とのクーロン力を介して、エネルギーを失う

Betheの公式(電子)

$$\text{有効質量 } \mu = \frac{m_e m_e}{m_e + m_e} \approx \frac{m_e}{2}$$

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_c = \frac{e^4 N Z}{4 \pi \epsilon_0^2 m_e V^2} \left[\ln \frac{m_e V^2}{I} + \ln \frac{E}{2I} - \ln(1 - \beta^2) - \left(2\sqrt{1 - \beta^2} - 1 + \beta^2 \right) \ln 2 + (1 - \beta^2) + \frac{1}{8} \left(1 - \sqrt{1 - \beta^2} \right)^2 \right]$$

クーロン衝突による阻止能

イオンのBethe-Blochの式との大きな違いは、入射粒子である電子の質量が軽い



電子の軌跡



イオンの軌跡

結果として、イオンと異なり電子はほとんど真っすぐ進むことはできない。
エネルギー損失は電子によって。方向は原子核による散乱で大きく変化。

高エネルギー電子の物質内での振る舞い

電子:

荷電粒子であるので、電荷の極性(正負)、**質量が異なる**だけで、基本的には、イオン同様に、物質中の電子とのクーロン力を介して、エネルギーを失う

質量が軽いために、重たい原子核のクーロン力により大きく曲げられる
(原子核による散乱)

↓
原子核は重たいので、ほとんど動かない(エネルギーのやり取り無し)
しかし、運動量は大きく変化



電子の軌跡

↓
大きな運動量変化 → **制動放射** (電磁波=エックス線を放出)

電子の阻止能

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_c + \left(\frac{dE}{dx} \right)_r$$

クーロン衝突 **制動放射**

制動放射 $\left(\frac{dE}{dx} \right)_r \cong \frac{EZ_2}{700} \left(\frac{dE}{dx} \right)_c$

原子番号に比例 → 重たい元素ほど
制動放射しやすい

遮蔽体: 鉛 → 銅 → アクリル

高エネルギー電子の物質内での振る舞い

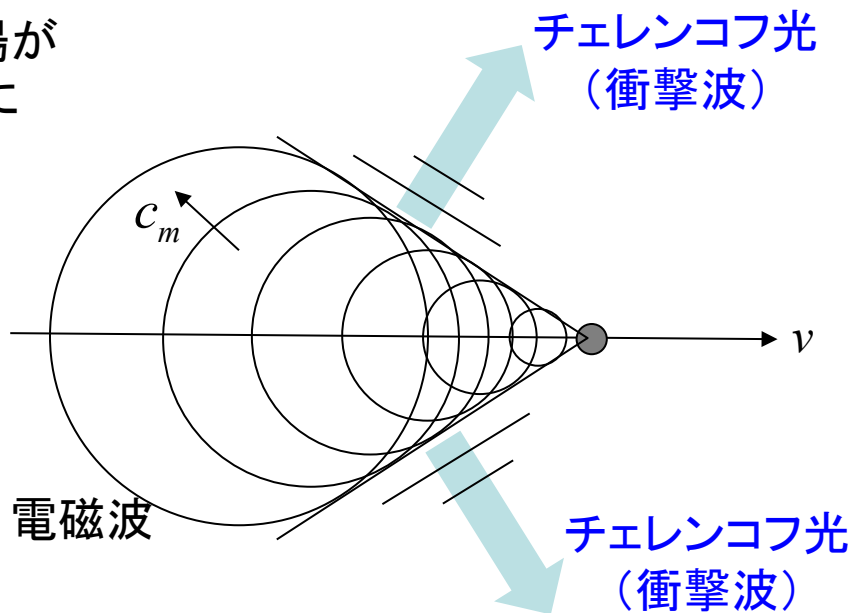
チェレンコフ光

物質中での光の速さ: $c_m = \frac{c}{n}$ n : 屈折率

電子の速さ > 物質中での光の速さ

電子周囲の電磁場が
置いて気きぼりに

↓
波面が重なり
衝撃波に



水中 ($n=1.33$) の電子

水中の光

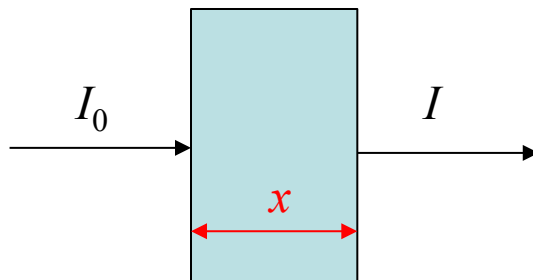
$$c_m = \frac{c}{1.33} \approx 0.75c$$

0.75c の速度を持つ
電子のエネルギー
≒ 260 keV
(相対論を考慮)

高エネルギー光子と物質の相互作用

光子：電磁波（電荷無し）であり、何かしらの相互作用するまでは直進かつエネルギーも変化せず（素通り）

単位距離当たりの相互作用率を μ とすると



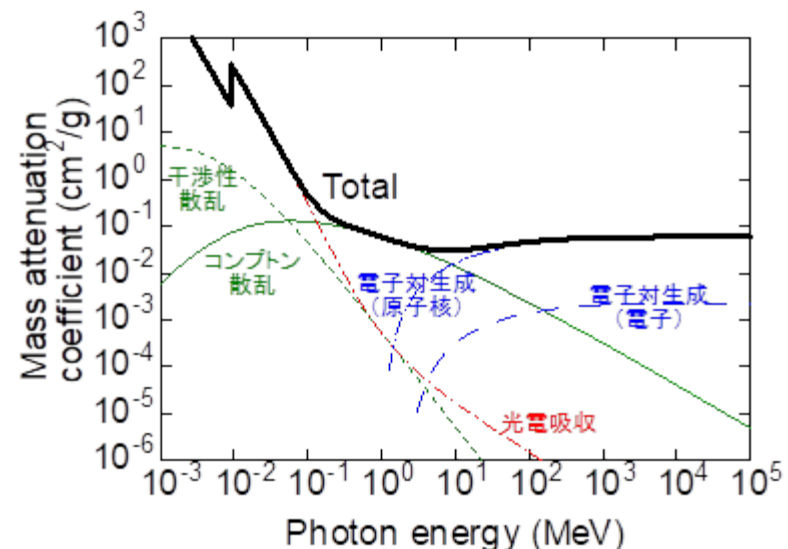
$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

光子の数は物質中の透過距離に対し
指数関数的に減少

μ ：線減弱係数

高エネルギー光子と物質（電子）の相互作用

- | | | |
|--------------|---|-------|
| 1. 散乱 | } | 光子は残る |
| 1. 1 干渉性散乱 | | |
| 1. 2 コンプトン散乱 | | |
| 2. 光電吸収 | } | 光子は消滅 |
| 3. 電子対生成 | | |



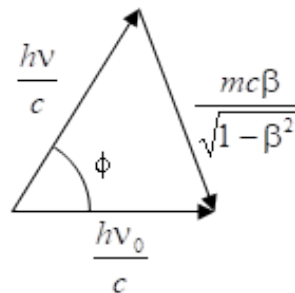
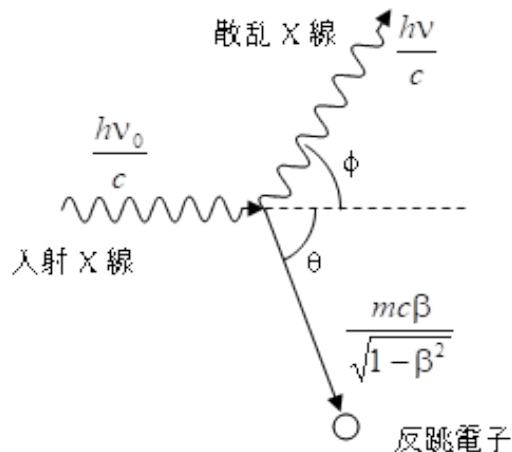
高エネルギー光子と物質の相互作用

1. 1 干渉性散乱 (Coherent Scattering)

- 入射光子と散乱光子のエネルギー(波長): 変化せず (仮想的には、吸収・再放出)
- 低エネルギー領域で支配的な散乱反応
- 断面積が原子番号 Z^2 に比例

1. 2 コンプトン散乱 (Compton Scattering)

- (物質中の)電子との弾性散乱＝運動量・運動エネルギー保存(相対論考慮)



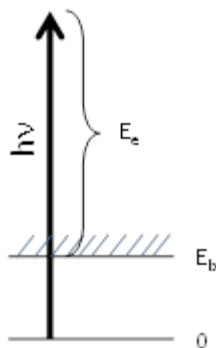
$$h\nu = \frac{h\nu_0}{1 + \frac{h\nu_0}{mc^2}(1 - \cos \phi)}$$

$\nearrow$ 散乱光子エネルギー $\nwarrow$ 入射光子エネルギー

- 散乱断面積は、電子の数に比例 & エネルギーが高くなると前方散乱性が高くなる

高エネルギー光子と物質の相互作用

2. 光電吸収 (Photoelectric absorption)



- 光子が軌道電子に吸収される(光子は消滅)
- 光子のエネルギーは電子に渡される
- 飛び出す電子のエネルギー E_e

$$E_e = h\nu - E_b$$

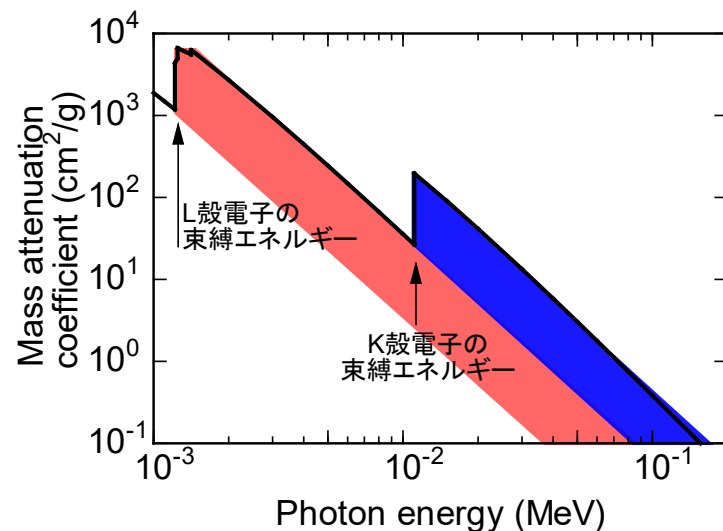
光子 束縛
エネルギー エネルギー

※原子に束縛されていない電子には光電吸収されない
 →運動量・エネルギー保存を満たせない
 →原子に運動量を与えることでつじつまを合わせる
 ……原子は重く、ほとんどエネルギーは移行しない
 →上式のエネルギー収支で事実上問題なし

光電吸収の断面積

$$\sigma_{pe} \cong C \frac{Z^5}{(h\nu)^{3.5}}$$

Z の5乗
 E の-3.5乗



角電子殻軌道の束縛エネルギーを上回れば
 それらが光電吸収の対象に
 →吸収端

高エネルギー光子と物質の相互作用

3. 電子対生成(Pair production)

- 光子が消滅し、電子と陽電子(電荷がプラスの電子)が生成
→ 光子エネルギーは、電子・陽電子の運動エネルギーに分配
- 光子が電子の静止質量2個分のエネルギー($511 \text{ keV} \times 2 = 1,022 \text{ keV}$)
以上でないと起こり得ない

※この反応は何もないところでは起こり得ない

- …運動量・エネルギーを保存できないから
- …近くに、質量を持った荷電粒子がある場合にのみ発生
→ この荷電粒子による運動量のやり取りが必要

この運動量のやり取りを考えた場合の、厳密なしきいエネルギー

$$h\nu = \frac{2m_e c^2}{Mc^2} (m_e c^2 + Mc^2)$$

原子核の場合 ($M \gg m_e$) $2m_e c^2$ 以上で発生

電子の場合 ($M = m_e$) $4m_e c^2$ 以上で発生

- 断面積(反応確率)は
原子核の場合: Z^2 に比例。 電子の場合: Z に比例。
- 生成された陽電子は最終的に周囲の電子とくっついて消滅
→ 511 keV (電子の静止質量) が2つ発生

中性子と物質の相互作用

中性子とは？

電荷: 0 (中性)

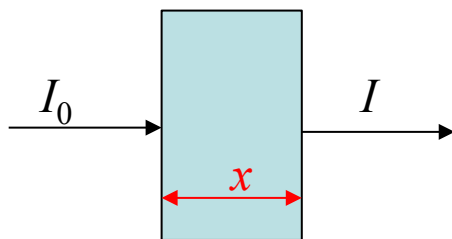
質量: 1.6749×10^{-27} kg (939.573 MeV)、陽子とほぼ等しい。

直径: 約 1×10^{-15} m (原子は約 10^{-10} m)

スピン: 1/2 (フェルミ粒子)

- ・陽子と共に原子核 (Nucleus) を構成 (**核子**: Nucleon)
- ・原子核の外では不安定

単位距離当たりの
相互作用率を $N\sigma$ とすると
(N : 原子数密度)



$$I = I_0 e^{-N\sigma x}$$

中性子数は物質中の
透過距離に対し
指数関数的に減少

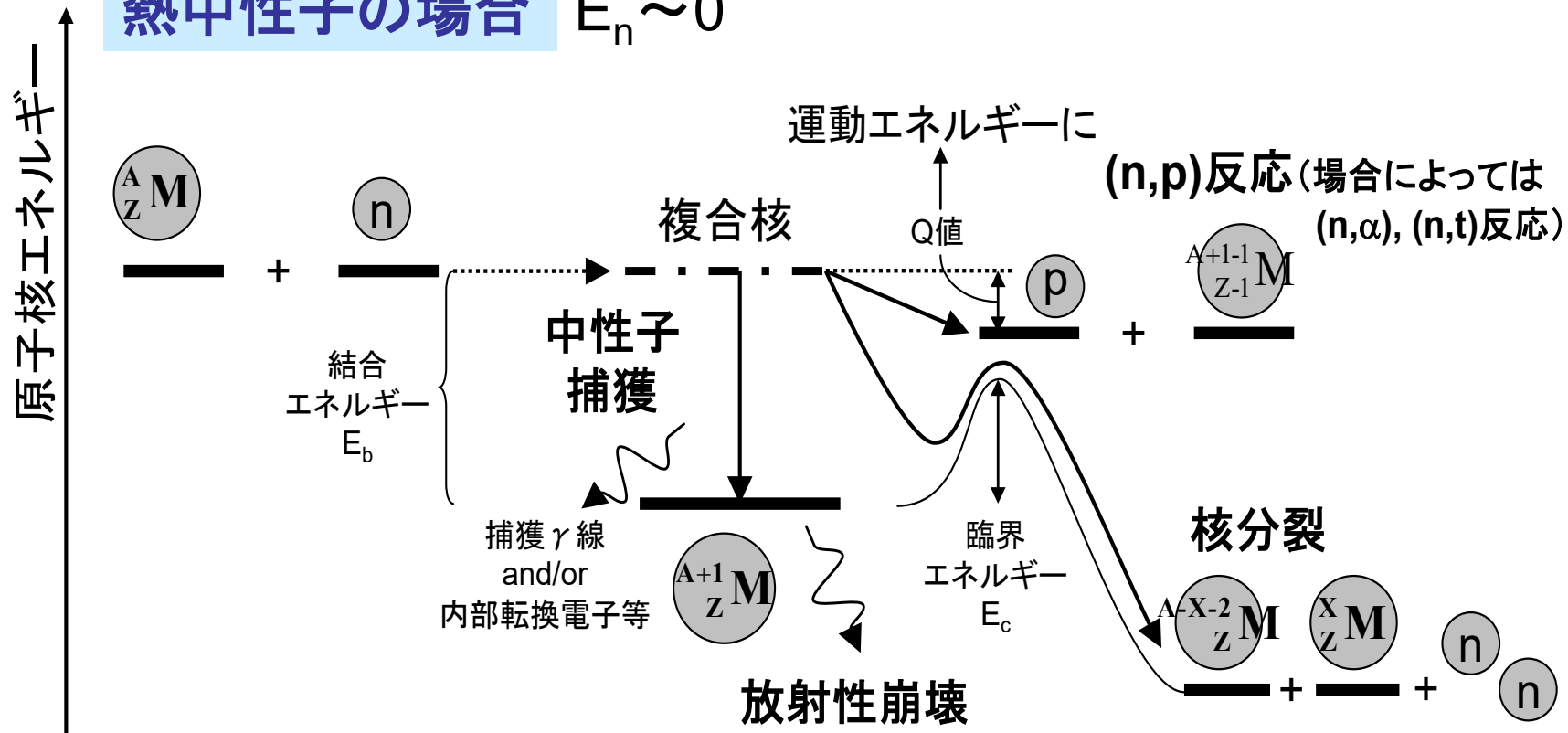
平均自由行程

反応せずに進める平均距離

$$\lambda = \frac{1}{N\sigma}$$

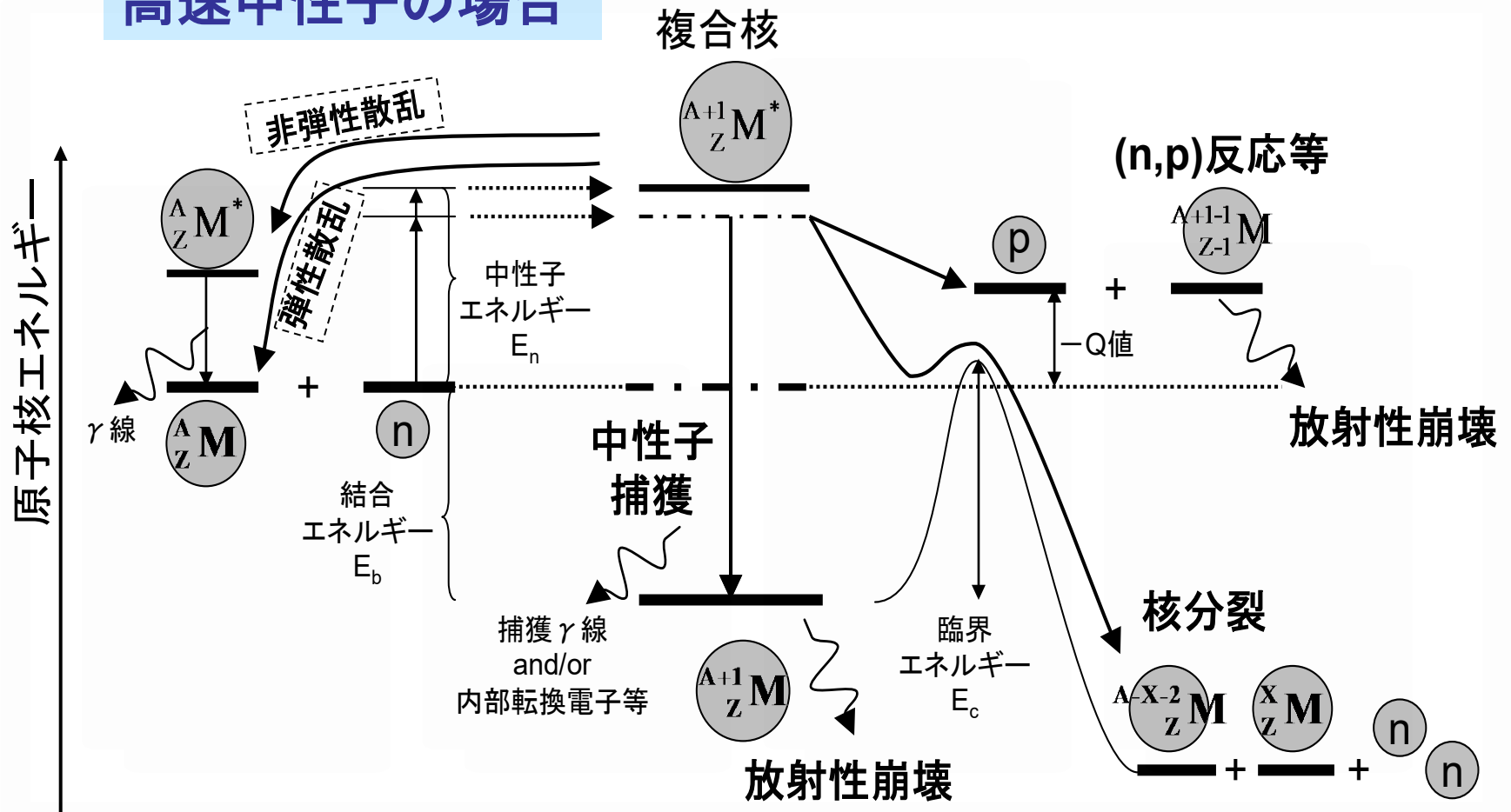
中性子と物質の相互作用

熱中性子の場合 $E_n \sim 0$



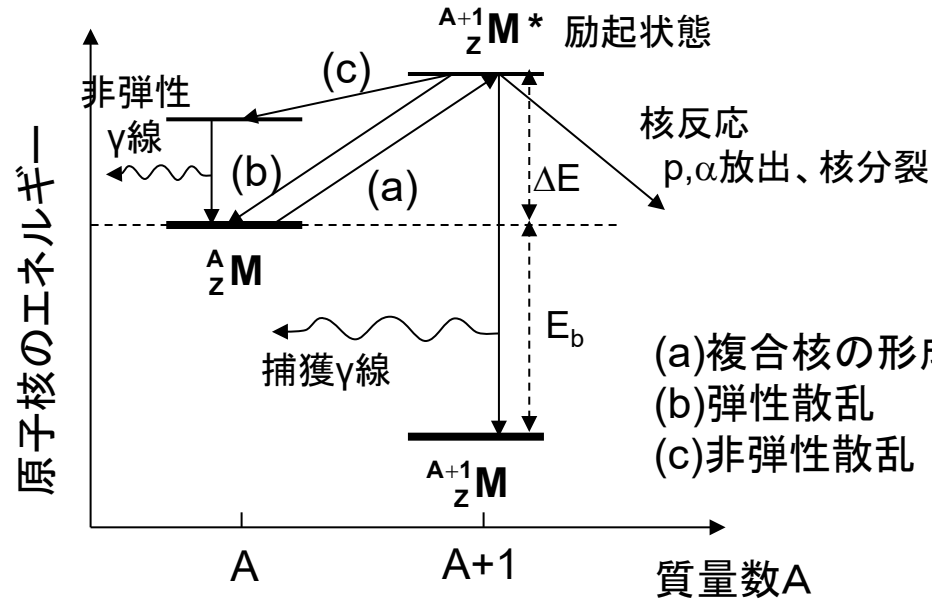
中性子と物質の相互作用

高速中性子の場合



中性子と物質の相互作用

①複合核を形成



○複合核励起エネルギーで
断面積に極大値→共鳴

○ ΔE はゼロでも起こりうる
→断面積: $1/v$ 則

元の標的核に戻らない反応は
捕獲反応

②核力のポテンシャル

原子核-中性子間の核力ポテンシャル ⇒ 弾性散乱 (elastic)

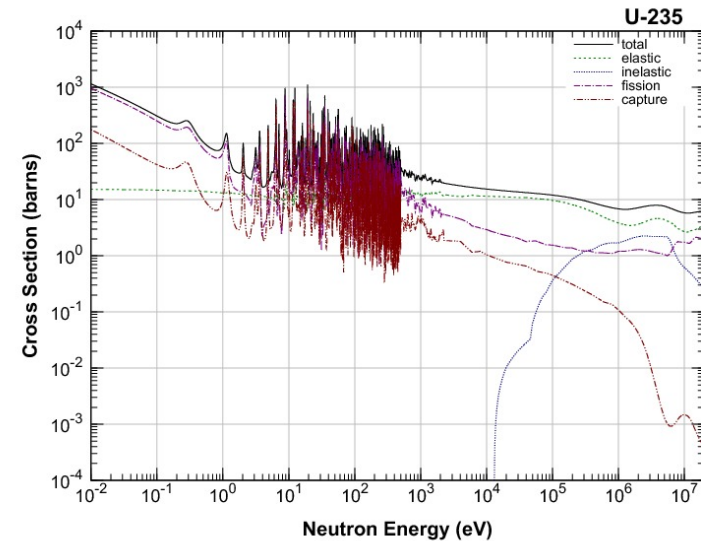
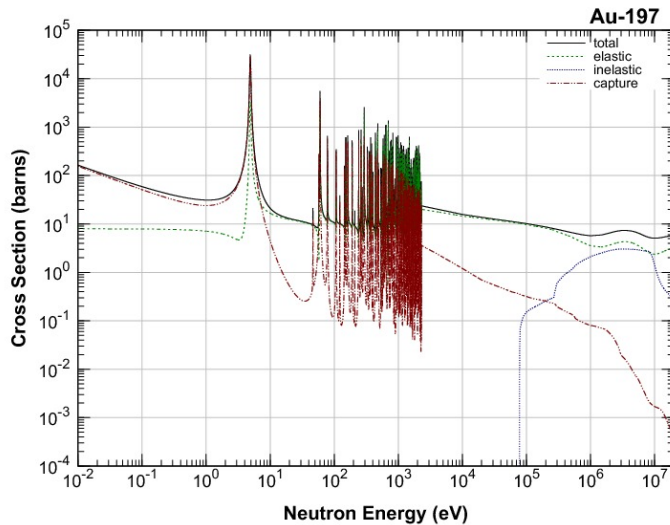
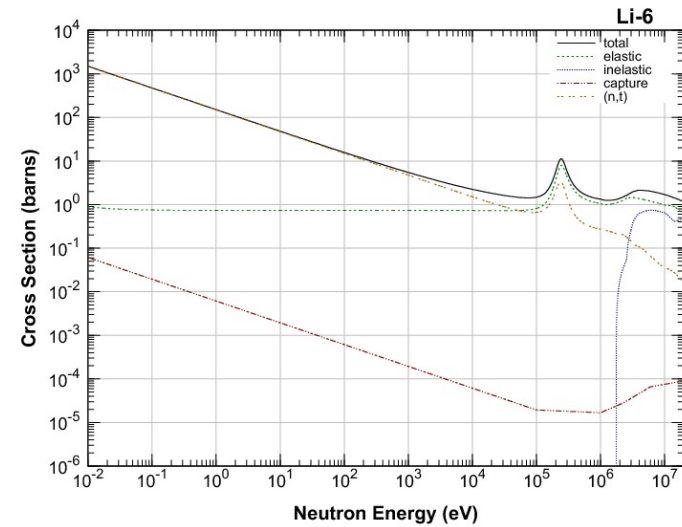
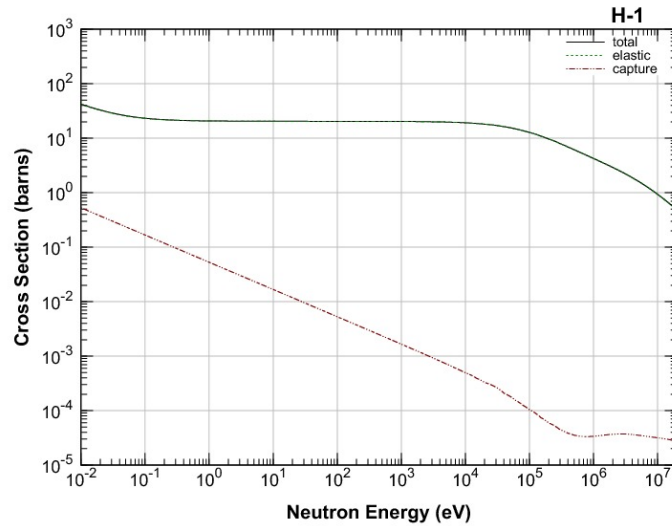
(反応断面積) $\equiv$ (原子核の幾何学的な断面積)、エネルギーに依らない

③核子との直接相互作用

高エネルギー中性子 ⇒ 原子核を構成する核子と直接衝突

⇒ 標的核を励起 (非弾性散乱: inelastic)、核破砕 (spallation) 反応

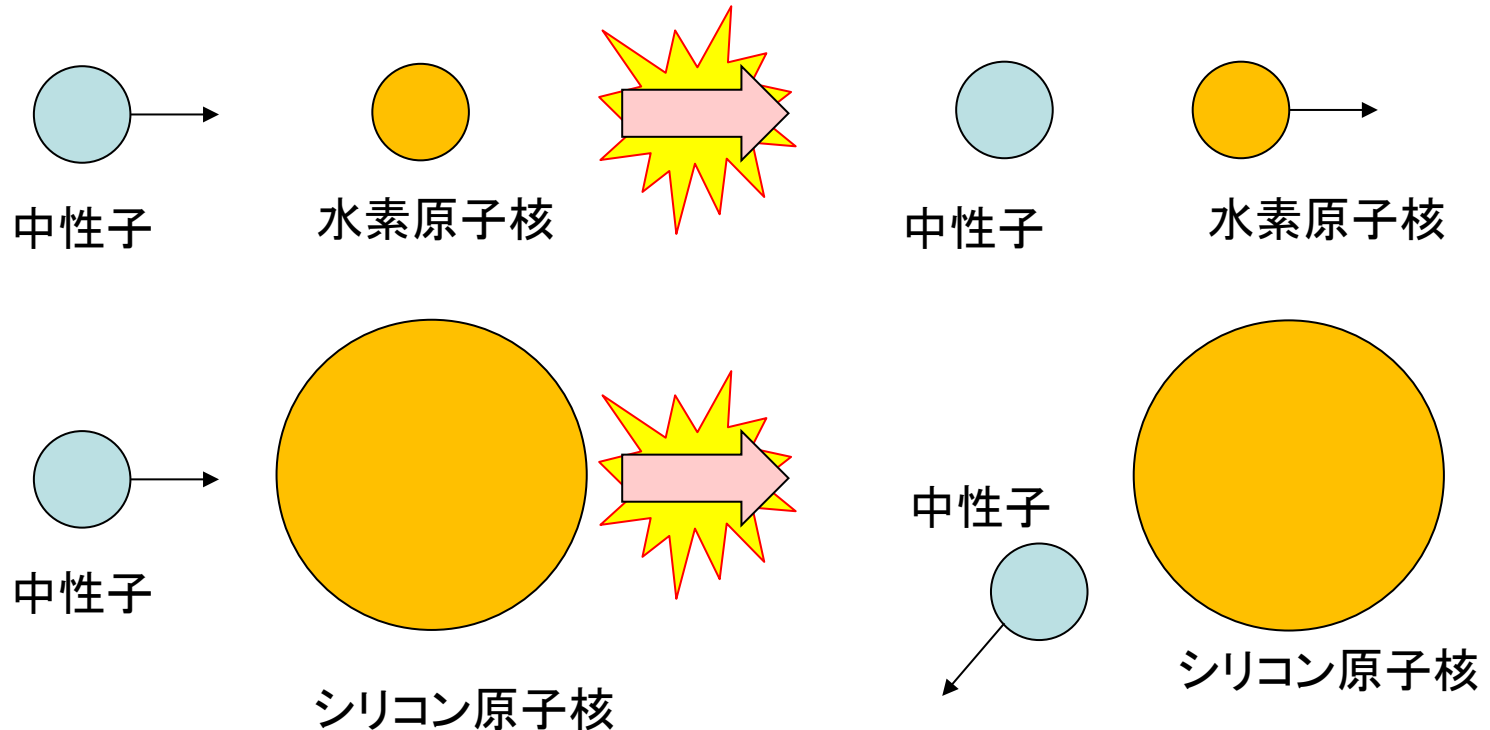
中性子と物質の相互作用



中性子と物質の相互作用

弾性散乱(減速)

質量の等しい水素原子核との散乱で効率よくエネルギー移動



多くの反応は、中性子の速度(運動エネルギー)が小さい方が反応しやすい
→弾性散乱で速度を落とし(減速し)反応しやすくする
減速材: 水、ポリエチレン等の水素含有物

ここまで。
お疲れさまでした。