

# 放射線と物質の相互作用

## 目次

1. ミクロな過程とマクロな過程
2. 放射線と物質中のミクロな粒子との相互作用
  - 2.1 電荷をもつ放射線と原子・電子との相互作用
  - 2.2. X線・ガンマ線と原子・電子との相互作用
3. 放射線のマクロな物質との相互作用
  - 3.1 アルファ線とマクロな物質の相互作用
  - 3.2 ガンマ線とマクロな物質との相互作用
4. 放射線のマクロな物質の透過力と遮蔽(概略)

# 1. ミクロな過程とマクロな過程

放射線と物質との相互作用を考える場合の留意点

1) 放射線は高エネルギーをもつ極微の粒子(ミクロな粒子)であるが、巨視的な物質(マクロな系)も驚くほど多数の原子(原子核と電子)・分子からできていること。

アボガドロ数  $\doteq 6 \times 10^{23}$

$= 6 \times 100,000,000,000,000,000,000,000$

→まず放射線とミクロな粒子との微視的な過程を理解すること。

→ミクロな過程の莫大な集積効果として巨視的な物質に影響が現れる

2) 放射線の種類により、微視的な過程は種々異なること。

3) 放射線の生体への影響・効果を理解する上での基礎になること。

# エネルギーの大きさ(量)と高低(質)

生物的効果の根拠となる、物理的効果を生じる要素的過程(微視的過程)の種類は、放射線の粒子(量子的粒子)1個ずつが運ぶエネルギーの大きさ(=エネルギーの高さ)で決まる。

高エネルギー粒子:大きいエネルギーを受け渡す粒子

低エネルギー粒子:小さいエネルギーを受け渡す粒子

(エネルギーの大きさ) = (1個の粒子のエネルギーの高さ) × (粒子の個数)

巨視的には、エネルギーが小さい場合でも、

粒子のエネルギーが高ければ、すなわち高エネルギー粒子が関与すれば、要素的過程(微視的過程)には、低エネルギー粒子が引き起こす効果と異質の効果をもたらす可能性がある!

豊田利幸「新・核戦略批判」岩波新書、1983年。特に、p.6.

## マイクロ世界でも桁違いの差違

放射線のエネルギーは数MeVという高エネルギー

↑ 100万倍！ ↓

原子のイオン化エネルギーは高々数eV

分子の結合エネルギーも高々数eV

化学結合の強さは原子・分子間の結合エネルギーで表され、大きい方から順に並べると次のようになる。

共有結合 > イオン結合 > 金属結合 > ファンデルワールス結合

## 2.電荷をもつ放射線と原子・電子との相互作用

### 電荷をもつ放射線の種類

ベータ線(高速の電子または陽電子の流れ)

$\alpha$ 線(高速の ${}^4\text{He}$ 原子核の流れ)

${}^{12}\text{C}$  核などの重イオン

電荷と質量の違いによりかなり性質が異なる.

## 2.1 荷電粒子と電子・原子との相互作用の概観

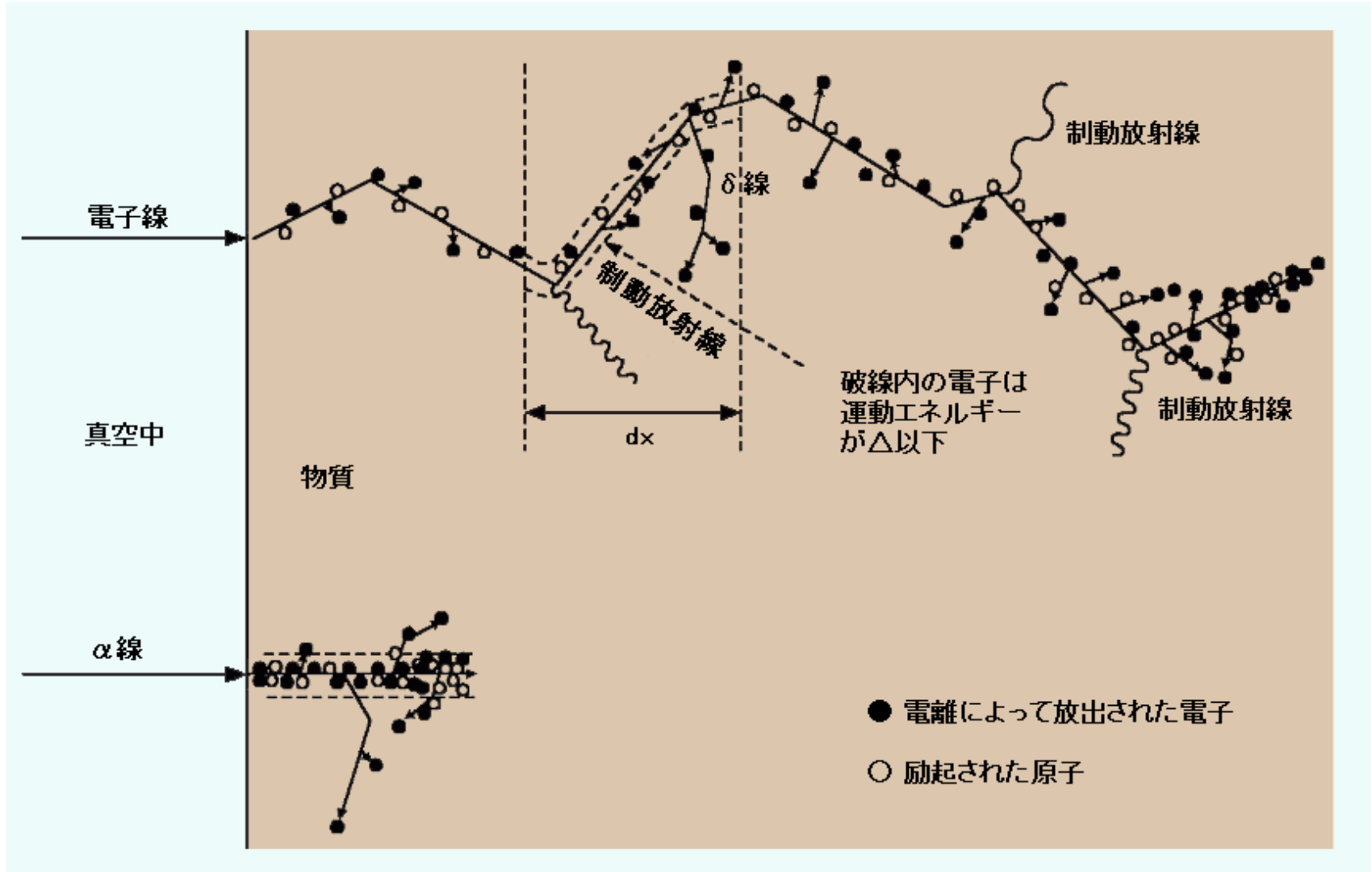
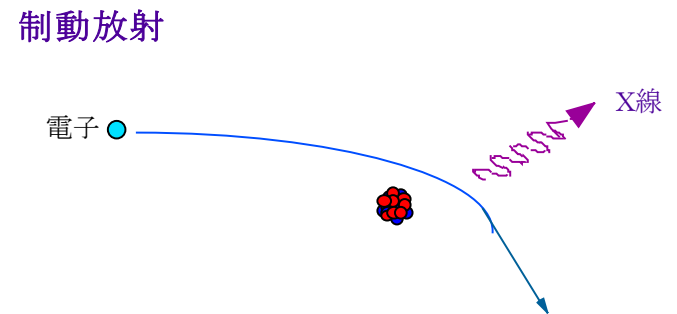
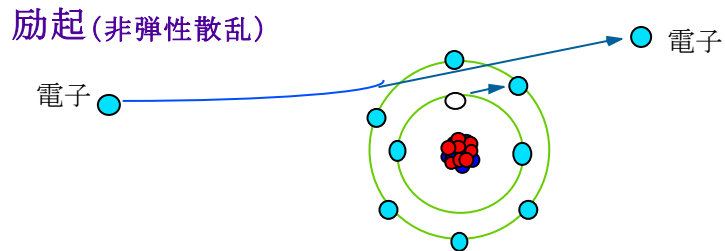
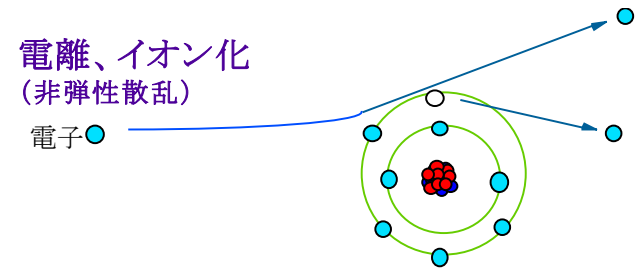
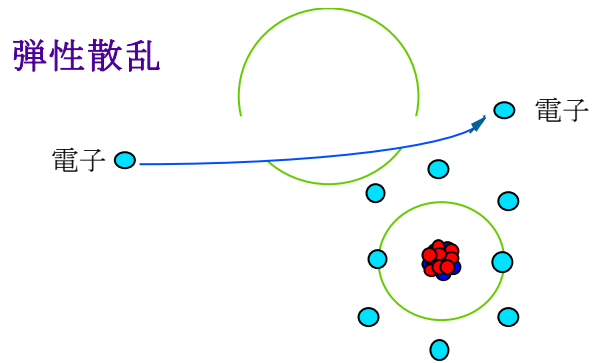


図1 荷電粒子と物質の相互作用

[出典]江藤秀雄(ほか):放射線防護、丸善(1982年12月)、p.54

## 2.2 ベータ線と原子の相互作用



### 3. エックス線、ガンマ線と原子・電子との相互作用

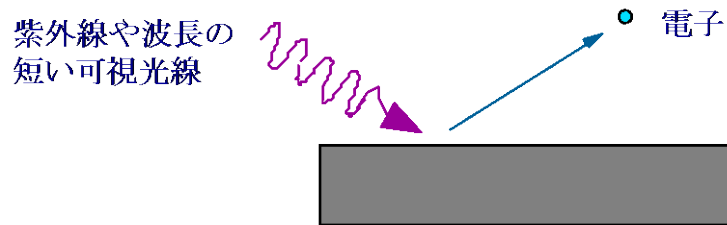
- 1) 広い意味の光は波長(振動数)により種々の種類に分類されている。
- 2) 原子・電子との相互作用で重要な物理量は、光の波長ではなく、振動数である。
- 3) 歴史的には、高エネルギーの電磁波のうち、原子起源のものがエックス線(X線)と呼ばれ、よりエネルギーが高い原子核起源のものがガンマ線( $\gamma$ 線)と呼ばれた。  
現在では、X線発生装置により、原子核起源の電磁波のエネルギーに相当するものを生成できるので、原理的な区別はない。
- 4) 広い意味の光は伝搬において、波動的な性質(電磁波)をもつが、物質中のミクロな粒子(電子など)との相互作用では粒子的な性質も持つ。後者の場合、光子(photon, フォトン)と呼ばれ、エネルギーと運動量の値が離散的になる。しかし、空間的な塊ではないことに注意する。
- 5) 発生装置から出るX線のエネルギーは、その電圧に依存して決まる最大値からごく低いエネルギーまで連続的に変化する。しかし、不安定な原子核から出るガンマ線のエネルギーは、原子核の励起エネルギーの離散性(量子性)の反映として、単一のエネルギーをもつか、あるいは離散的な(いくつかのとびとびの)エネルギーをもつかのいずれかである。したがって、不安定原子核から出るガンマ線のエネルギーは核種に固有である。複数の離散的エネルギーの中間のエネルギーやX線のように低いエネルギーのガンマ線は放出されない。



# 3.1 光電効果

## —紫外線など短波長(高振動数)光吸収による電子の放出—

現象(マクロな系(巨視的な系))



実験結果のまとめ

- 1) 金属にあてる光の振動数  $\nu$  がその金属に特有なある値(限界振動数)  $\nu_0$  より小さいと、どんなに強い光をあてても電子は飛び出さない。
- 2) この限界振動数よりも大きい振動数の光を金属に当てると電子が飛び出す。飛び出した電子はいろいろな大きさの運動エネルギーをもつが、最大の運動エネルギー  $K_{\max}$  は、光の強さに無関係で光の振動数  $\nu$  だけで決まり、

$$K_{\max} = h\nu - h\nu_0$$

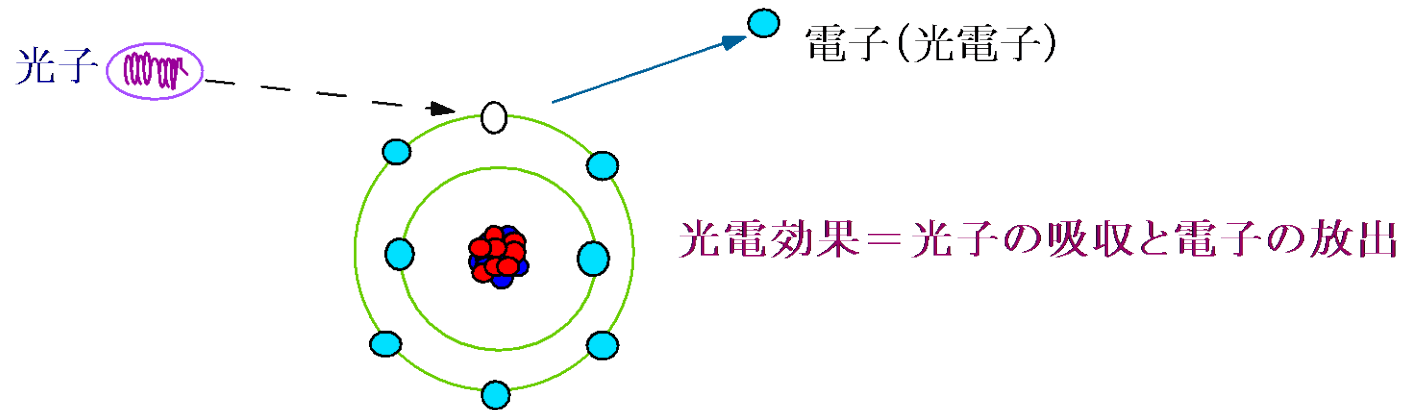
表される。ここで  $h$  はプランク定数よばれる普遍定数である。

- 3) 金属にあて光を強くすると、飛び出す電子の数はあてた光の強さに比例して増加。
- 4) どんなに弱い光でも、光の振動数が限界振動数よりも大きければ、光をあてるとただちに電子が飛び出す。

光が波動であると考えると、3) は理解できるが、1, 2, 4) は理解できない。

## ミクロな系(要素的過程)についてのアインシュタインの考え

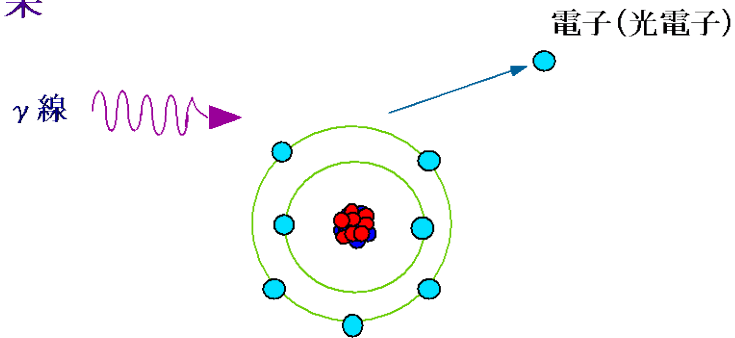
振動数  $\nu$  の光は  $h\nu$  という大きさエネルギーをもつ粒子(光子)の流れであって、光電効果ではこの光子が金属中の電子に衝突すると、そのエネルギーは一度に電子に吸収される。



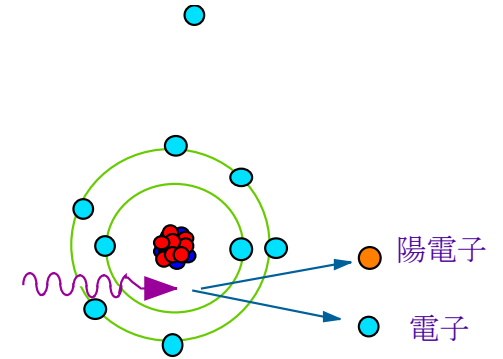
- (1) 電子が金属表面から飛び出すのに必要な最小限のエネルギーを  $h\nu_0$  とすると、振動数が  $\nu_0$  以下の光では必要なエネルギーを電子にいっぺんに与えることができないので光電効果は起こらない。
- (2) 金属内部の電子はさまざまなエネルギーをもっているが、その中で最大の運動エネルギーをもつ電子は光子から  $h\nu$  のエネルギーをもらい、 $\nu$  が  $\nu_0$  よりも大きい場合には表面から飛び出るために  $h\nu_0$  のエネルギーを使うので、残りのエネルギー ( $h\nu - h\nu_0$ ) を運動エネルギーとしてもらって金属の外に飛び出す。

## 3.2 光(X線、 $\gamma$ 線)と原子の相互作用

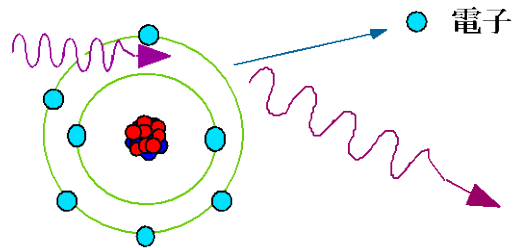
光電効果



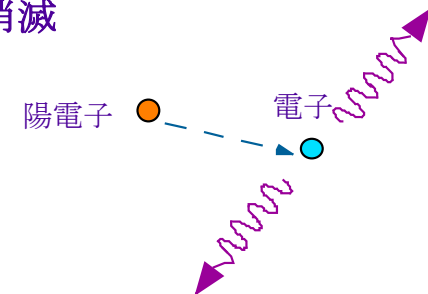
電子対発生



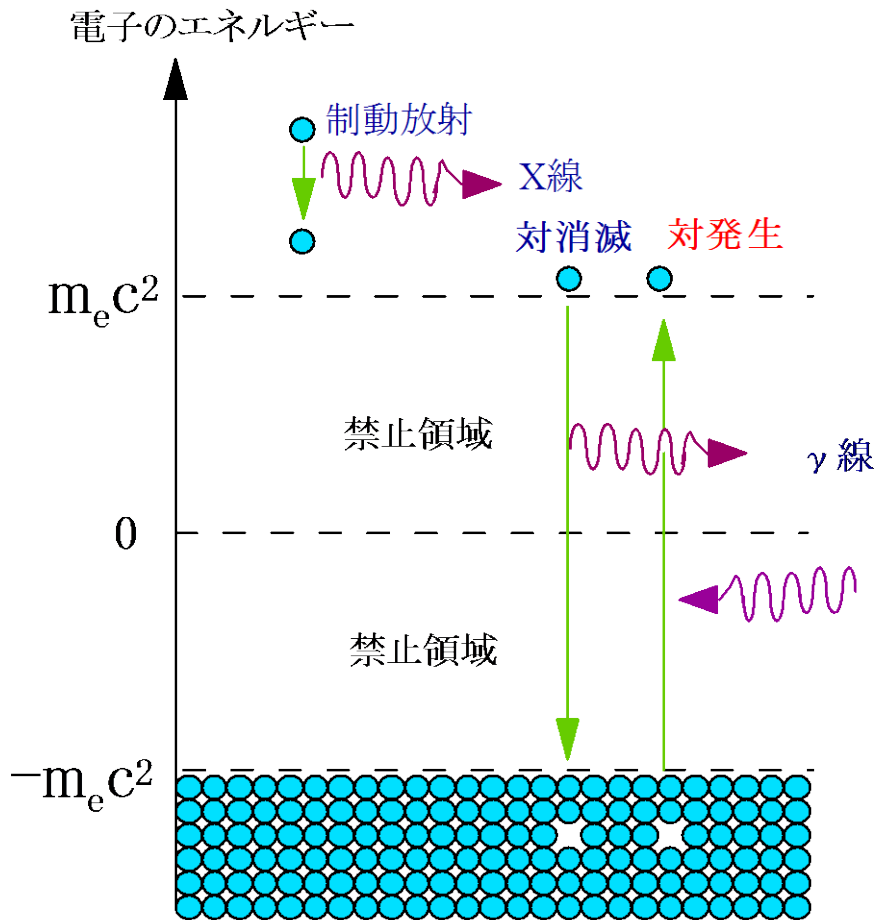
コンプトン効果



電子対消滅



# 3.3 ガンマ線による電子・陽電子対の発生、 電子・陽電子対の消滅によるガンマ線の発生



アインシュタインの特殊相対論(1905)によれば、質量 $m_e$ 、運動量 $p$ の電子の相対論的エネルギーは次の式で与えられる。

$$E^2 = (m_e c^2)^2 + (cp)^2$$

静止している場合( $p=0$ )の場合

$$E = \pm m_e c^2 \cong \pm 0.51 \text{ MeV}$$

P. .M. A. Diracの相対論的電子論(1928)によれば

- 1) エネルギー $E$ が $-m_e c^2 < E < m_e c^2$ の範囲は禁止される、
- 2) 真空は、エネルギー配位においては負エネルギーをもつ電子の準位が完全に占有されている状態である。 充滿した“海”(負エネルギー電子の“海“)
- 3) 外部から $2m_e c^2$ 以上のガンマ線のエネルギーを吸収すると、負エネルギー電子が $+m_e c^2$ 以上のエネルギー状態に励起される。これが通常の電子であり、電子の穴(の状態)はプラスの電荷をもつ以外は電子と同じ物理的性質を示す。電子の穴(の状態)を陽電子(positron)という。

## 3.4 チェレンコフ効果(光)

Cherenkov radiation。エネルギーの高い荷電粒子が物質(誘電体)内を通過するとき、この粒子の速度が物質内の光速度より大きい場合、放射光(チェレンコフ光、チェレンコフ線; 写真参照)を放射する。この現象をチェレンコフ効果またはチェレンコフ放射という。荷電粒子の電場作用により粒子の飛跡に沿って誘電分極が起こり、誘電分極が元に戻るときに、そのエネルギーが電磁波(チェレンコフ線)として放射される。チェレンコフ光は、波面の進行方向と粒子の進行方向とのなす角度 $\theta$  ( $\theta = \cos^{-1}(C/nu)$ )をもつ円錐面の中に放射され、角度 $\theta$ の小さい方向に赤い光として、角度 $\theta$ の大きい方向に青い光として進行する。ここに、 $C$ は光速度、 $u$ は屈折率 $n$ の誘電体を通過する荷電粒子の速度である。

# 4.放射線のマクロな物質への効果

## 4.1アルファ線とマクロな物質との相互作用

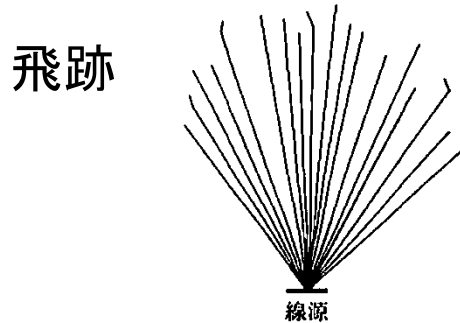


図  $\alpha$ 線と物質との衝突  
(霧箱で観測された $\alpha$   
線の飛跡の模式図)

飛程 (range): 荷電粒子が止まるまでに進む平均距離

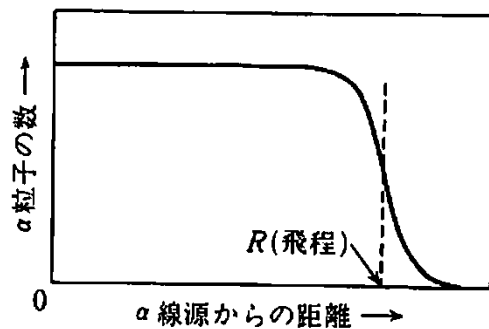


図  $\alpha$ 線の飛跡の分布

表 1個のイオン対をつくるに必要な平均のエネルギー値  $W$ [eV]

気体	$\alpha$ 線 (Po-210, 5.3 MeV)	陽子 (340 MeV)	電子 (5 keV)
Ar	25.9	25.5	27.0
He	31.7	29.9	32.5
H <sub>2</sub>	37.0	35.3	38.0
N <sub>2</sub>	36.0	33.6	35.8
空気	35.2	33.3	35.0
O <sub>2</sub>	32.2	31.5	32.2
CH <sub>4</sub>	29.0	—	30.2

# アルファ粒子と陽子の空気中における比電離能

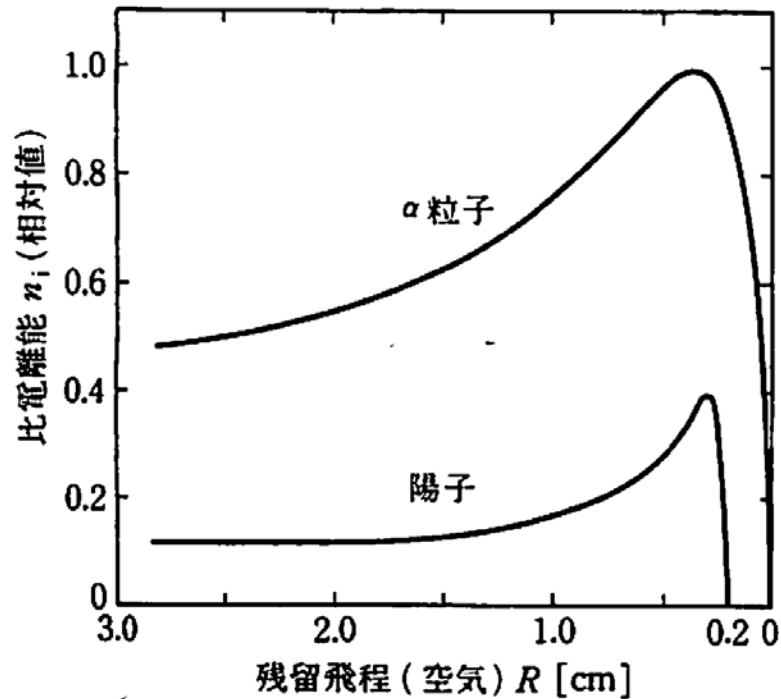


図  $\alpha$  粒子と陽子の空気中における比電離能〔最大比電離能は、6600 イオン対/mm ( $\alpha$ 粒子)；2750 イオン対/mm (陽子)。飛程の終わりで電荷交換効果の差に対する補正として、陽子の飛程は $\alpha$ 粒子の飛程から0.2cm ひいてある。〕

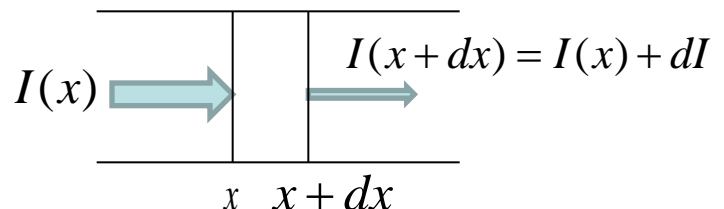
重い荷電粒子ほど、鋭いピークがある→重粒子線によるがん部位の照射

## 4.2 ガンマ線とマクロな物質との相互作用

### 放射線線束(ビーム)の強さ $I(x)$ と吸収係数 $\mu$

入射ビームに垂直な単位面積を単位時間に通過する粒子の個数: 放射線線束(ビーム)の強さ(intensity)  
<マクロ的に考えると>

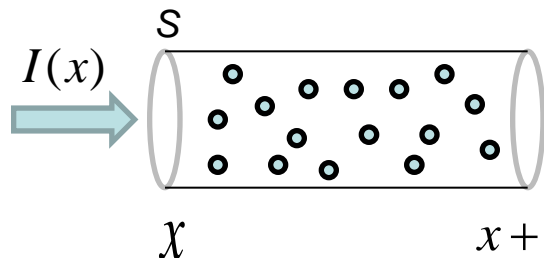
マクロな吸収層の内部の幅  $dx$  を通過する間に、ビームの強さが  $I$  から  $I+dI$  に変化する場合、 $dI$  は  $I$  と  $dx$  に比例する。その比例係数を吸収係数といい、 $\mu$  で表す。


$$-dI = \mu I dx \cdots (1), \quad dI < 0$$
$$\rightarrow I(x) = I(0) e^{-\mu x} \cdots (2),$$

$I(0)$ : 吸収層に入射直前のビームの強さ

### 吸収係数 $\mu$ とマクロ断面積 $\Sigma = N\sigma$ が等価であること

<ミクロ的に考えると> 吸収層の一つの散乱源(例えば、陽子)による、入射ビーム中の粒子(と問えば、中性子)の散乱がビームの吸収(減衰)をひきおこしているとする。幅  $dx$  の吸収層の中に、幾何学的断面積  $S$ 、長さ  $dx$  の円筒と考えると、単位時間あたり、この円筒に流入する粒子数は  $IS$  である。吸収層中の散乱源となる粒子の粒子数密度を  $N$  とすると、この円筒中に、 $NSdx$  個の散乱源がある。単位時間あたりに、1つの散乱源によって任意の1個の入射粒子が散乱される確率は、ミクロ断面積を  $\sigma$  とすると、 $\sigma/S$  である。



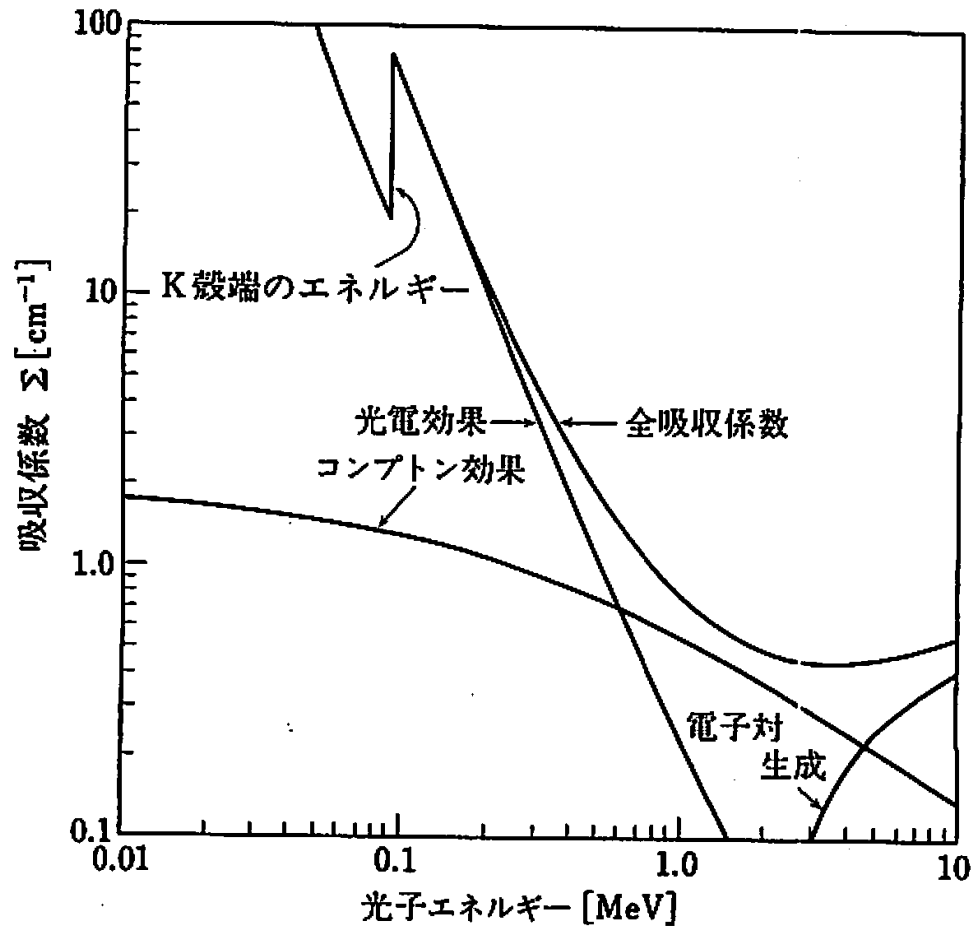
従って、円筒内で単位時間あたり、散乱によりビームから脱落する入射粒子数は

$$IS \cdot NSdx \cdot \frac{\sigma}{S} = N\sigma \cdot ISdx \cdots (3)$$

これが、 $-SdI$  に等しいので、式(1)と比べて、 $\mu = N\sigma$  となる。 16



# Pbに対するガンマ線の吸収係数(巨視的断面積)のエネルギー依存性



吸収係数は、一般に、ガンマ線(X線)のエネルギーと物質(material)の種類にも依存。

$$\mu = \Sigma = N\sigma$$

$$= \mu_{\text{EC}} + \mu_{\text{photo}} + \mu_{\text{Comp}} + \mu_{\text{pair}},$$

$$\mu_i = \mu_i(E_\gamma, \text{material}),$$

$$i = \{\text{EC, photo, Comp, pair}\}$$



次式で定義される質量吸収係数 $\mu_m$ は、近似的に、物質によらず、ガンマ線のエネルギーだけで決まる。

$$\mu_m \equiv \frac{\mu}{\rho}, \rho: \text{物質の密度}$$

$$\rightarrow \mu_m \approx \mu_m(E_\gamma)$$

# 補足

1. X線, ガンマ線について光電効果やコンプトン散乱(効果)、電子陽電子対生成などを起こさずに、物質中を通過(貫通)する場合には、生物の身体に影響を与えない。
2. しかし、アルファ線とベータ線など荷電粒子の場合、軌跡全体にわたって生物の組織に作用する。それゆえ、荷電粒子が生体組織内を通過すれば、生物学的効果が確実に発生する。
3. 放射性の原子核から出るアルファ線は、ガンマ線と同様に、単一のエネルギーをもつか、あるいはいくつかの離散的なエネルギーをもつかのいずれかである。
4. 放射性原子核から出るベータ線(高速の電子の流れ)のエネルギーは単一ではない。  
ベータ線のエネルギーには、それを放出する原子核に固有の最大値があり、ベータ線はその最大値からゼロまでの連続的なエネルギー分布を持つ。[その理由は、ベータ崩壊においては、反ニュートリノ(逆ベータ崩壊においてはニュートリノ)という粒子が同時に放出され、いろいろの値のエネルギーを持ち去るためである。]  
ベータ線の平均のエネルギーは、近似的に最大値の約1/3と見なすことができる。  
いったん原子核から出たベータ線粒子(高速の電子の流れ)は、同一のエネルギーをもつ高速の電子と全く同じように振る舞う。
5. アルファ線もまた、電離によって生体に影響する。アルファ線は原子に作用して電子をもぎ取る。これらの電子も生体内ではやはり、他の原因で生じた同じエネルギーの電子と全く同じように振る舞う。

## 4. 放射線の透過力と遮蔽法(概略)

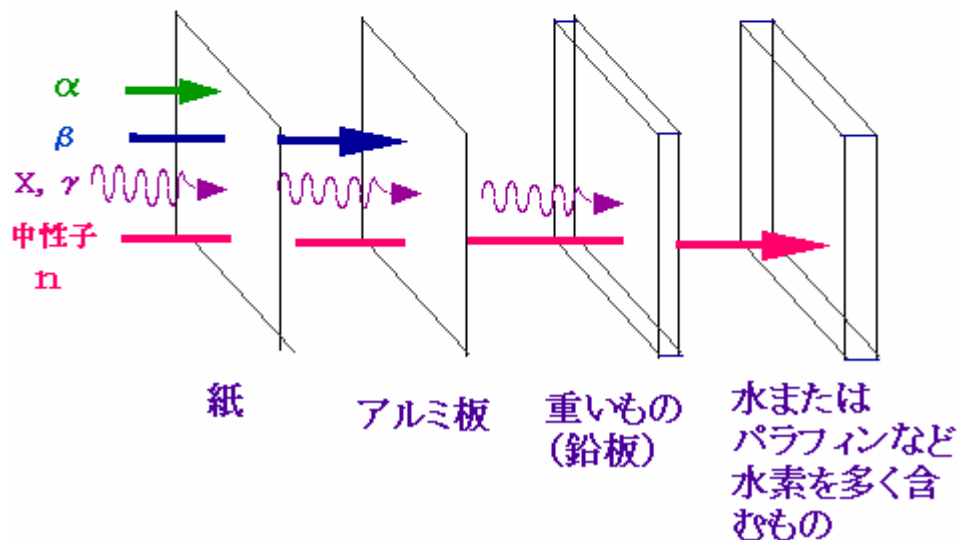
### 4.1 体外に放射線源がある場合(外部被ばく)

アルファ線: 高エネルギーのヘリウム4原子核の流れ

ベータ線: 高エネルギーの電子または陽電子の流れ

X線またはガンマ線: 高エネルギーの電磁波

中性子線: 高エネルギーの中性子の流れ



### 4.2 体内に放射性微粒子が侵入した場合(内部被曝)

体外に排泄されない限り、アルファ線、ベータ線も遮蔽することは不可能<sup>9)</sup>!

## 4.3 阻止能(線エネルギー付与)

**阻止能(stopping power、S):**単位距離あたりに荷電粒子が失うエネルギー(energy loss)のこと。単位はMeV/cm。放射線が運ぶエネルギーの典型的な大きさと生体細胞の大きさが(10~30) μm程度であることを考慮して、単位はkeV/μmとされる場合もある。

位置xにおける放射線のエネルギーをE(x)とすると、阻止能Sは $S=-dE/dx$ で表される。阻止能の計算式を古典力学的に推定できる。電荷がZeの入射粒子と物質中の電子の衝突を考える。衝突により受ける運動量変化 $\Delta p$ は力積 $F\Delta t$ に等しい。力Fは静電力で $F \propto (Ze^2/r^2)$ 、衝突時間 $\Delta t$ は入射粒子の速さをvとすると、 $\Delta t \propto (1/v)$ であるから

$$\Delta p \propto F \cdot \Delta t \propto \frac{Ze^2}{r^2} \cdot \frac{1}{v}$$

電子数密度 $N_e$ の物質を通過する電荷Zeの粒子の阻止能は、運動量変化の2乗と $N_e$ に比例する。また、運動エネルギーEは運動量の2乗に比例する。結局

$$-\frac{dE}{dx} \propto \frac{Z^2 e^4}{v^2} \cdot N_e$$

(厳密な計算では量子力学的効果と相対論的效果から生じる修正因子が付加される。)

**阻止能は放射線の電荷の2乗に比例し、その速さの2乗に反比例し、質量に比例し、物質の電子数密度に比例する。**

質量阻止能: 荷電粒子の飛跡上の長さについて、物質の密度を考慮し、厚みを面積あたりの質量(=面密度)で測っている。阻止能を密度で割った量で、単位はMeV/(g/cm<sup>2</sup>)。

**線エネルギー付与(line energy transfer, LET):**電荷と速さの両方の効果を考慮して、電離効率を表すために、LETが使われ、放射線の生体への影響評価にとって重要である。放射線が失うエネルギーは、与えるエネルギーに等しいので、**阻止能**を作用を受ける物質の側からみた用語。

# 線エネルギー付与(LET)の特徴的性質

前項における近似的表現のように、阻止能すなわち、線エネルギー付与(LET)は電子数密度が低い(疎である)場合より、電子数密度が高い(密である)場合の方が大きい。

「各種の放射線のうち、X線、 $\gamma$ 線はLETが小さいので低LETといい、 $\alpha$ 線、中性子線、その他重荷電粒子、核分裂破片のLETは大きいので高LETという。物質のLETが同じであっても放射線効果に差があることがある。」

荷電粒子は電離によって、生体に障害を与えるにつれて減速するので、LETの値は刻々と変化する。

阻止能は(近似的に)放射線の電荷の2乗に比例し、その速さの2乗に反比例し、質量に比例し、物質の電子数密度に比例する。

⇒他の条件が同じならば、**アルファ線はベータ線の4倍の電離効率をもつはず。**

⇒He4 核の質量は電子の質量よりかなり大きいので、アルファ線の電離効率はかなり高いはず

⇒直観とは逆に、**粒子の速さが遅くなるにつれて、電離効率が增大するはず。**

# 参考文献

多田順一郎「わかりやすい放射線物理学」オーム社

成田正邦、小澤保知「原子工学の基礎:マイクロからマクロへのシステム工学」現代工学社, 1989年。

鳥居寛之、小豆川勝見、渡辺雄一郎「放射線を科学的に理解する—基礎からわかる東大教養の講義」、丸善出版、2012年。