



# 放射線

鳥居 寛之  
小豆川勝見  
渡辺雄一郎  
著  
中川 恵一  
執筆協力

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

## 「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 —

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

丸善出版

本体 2500円＋税

- 1章 放射線とは？《放射線入門》
  - 2章 放射線の性質《放射線物理学 I》
  - 3章 原子力発電で生み出される放射性物質  
《原子核物理学・原子力工学》
  - 4章 放射線量の評価《放射線物理学 II》
  - 5章 放射線の測り方《放射線計測学》
  - 6章 環境中での放射性物質《環境放射化学》
  - 7章 放射線の細胞への影響《放射線生物学》
  - 8章 放射線の人体への影響《放射線医学》
  - 9章 放射性物質と農業《植物栄養学・土壤肥料学》
  - 10章 放射線の防護と安全《放射線防護学》
  - 11章 役に立つ放射線《放射線の利用・加速器科学》
- Q&A

放射線を理解するには、物理学・化学・生物学・医学・工学など多くの分野の知識が必要です。しかしこれらすべてを網羅することは難しく、系統立てて学べる機会是非常に少ないのが実情です。

本書は東京大学教養学部で行われた講義をもとに、放射線について多角的に学べるよう配慮しています。日常生活や原発事故にかかわる具体的な例を引きながらやさしくていねいに解説しましたので高校生や一般の方にも広く読んでいただきたいと願っています。

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/radiolect-kn.html>

# 2021年度 Aセメスター 主題科目学術フロンティア講義

## 放射線

を

科学的に

理解する

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE  
(West)

K303教室

& @ Zoom



$\gamma$ 線



中性子線



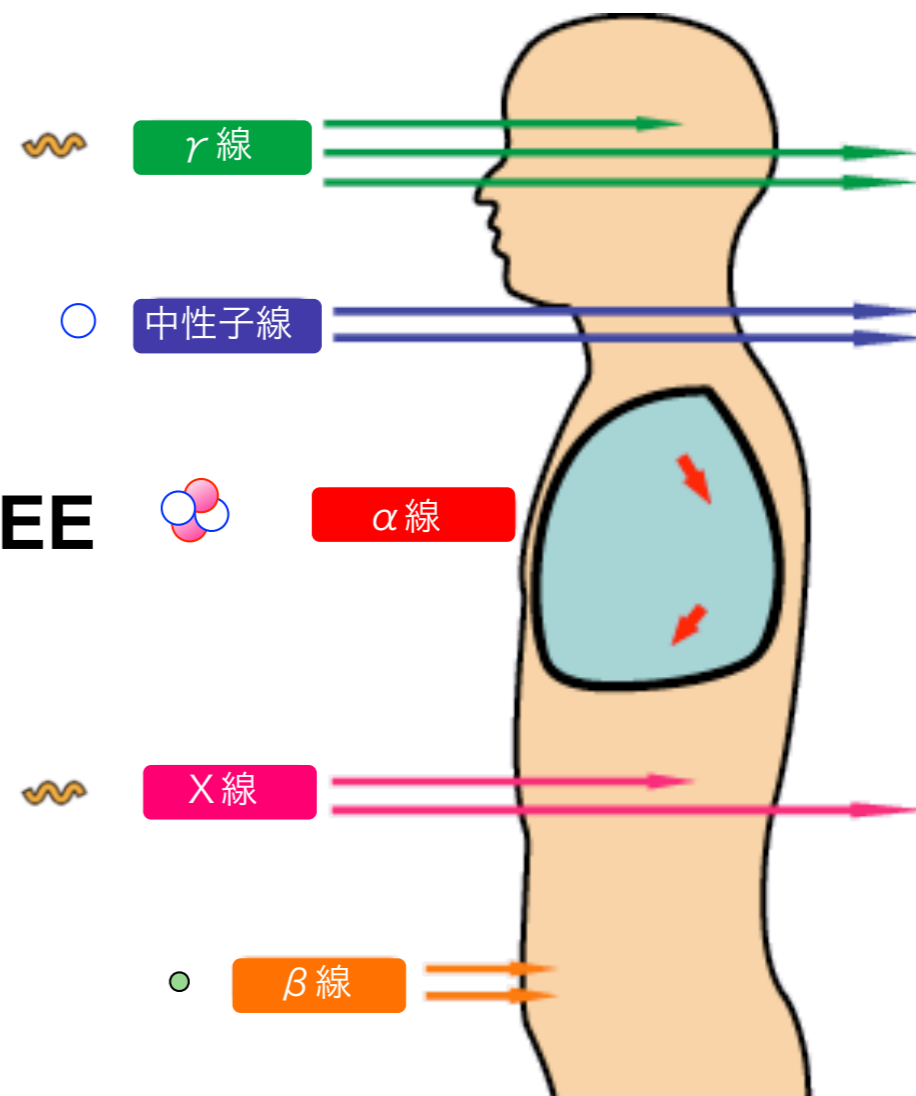
$\alpha$ 線



X線



$\beta$ 線



担当教員 鳥居 寛之 (粒子線物理学)

理学系研究科

小豆川 勝見 (環境分析化学)

総合文化研究科

渡邊 雄一郎 (生命環境応答学)

総合文化研究科

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

# 2021年度 Aセメスター 主題科目学術フロンティア講義

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE  
(West)

K303教室

& @ Zoom

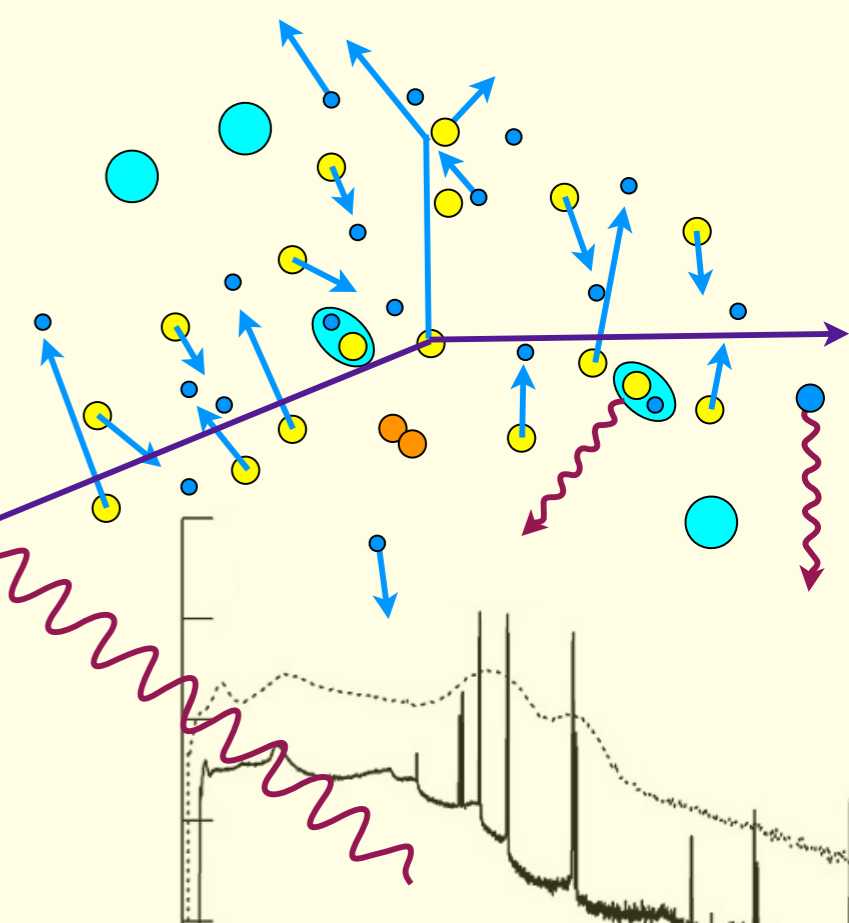
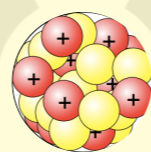
# 放射線

を

科学的に

理解する

2021 / 10 / 29 (金)



## 第4回 放射線物理学・放射線化学

鳥居 寛之

東京大学理学部

# 放射線を科学的に理解する

- 10/ 8 放射線入門 【鳥居】
- 10/15 放射線物理学 【鳥居】
- 10/22 放射線計測学 【小豆川】
- 10/29 放射線物理・化学 【鳥居】
- 11/ 5 放射線生物学 【渡邊】
- 11/12 環境放射化学 【小豆川】
- 11/19 被曝調査・医療支援 【坪倉】
- 12/ 3 原子核物理学 【鳥居】
- 12/10 原子力工学と原子力事故 【鳥居】
- 12/17 環境放射化学 【小豆川】
- 12/24 放射性物質汚染と農業 【藤原】
- 1/ 7 放射線の利用 【渡邊】
- 1/18\* 加速器科学・放射線防護学  
・まとめ 【鳥居】

\* 印：火曜振替

鳥居 寛之 《理学部》

渡邊 雄一郎

小豆川 勝見

《教養学部》

坪倉 正治 《福島県立医大》

藤原 徹 《農学部応用生命化学》

ゲスト講師

# 成績評価

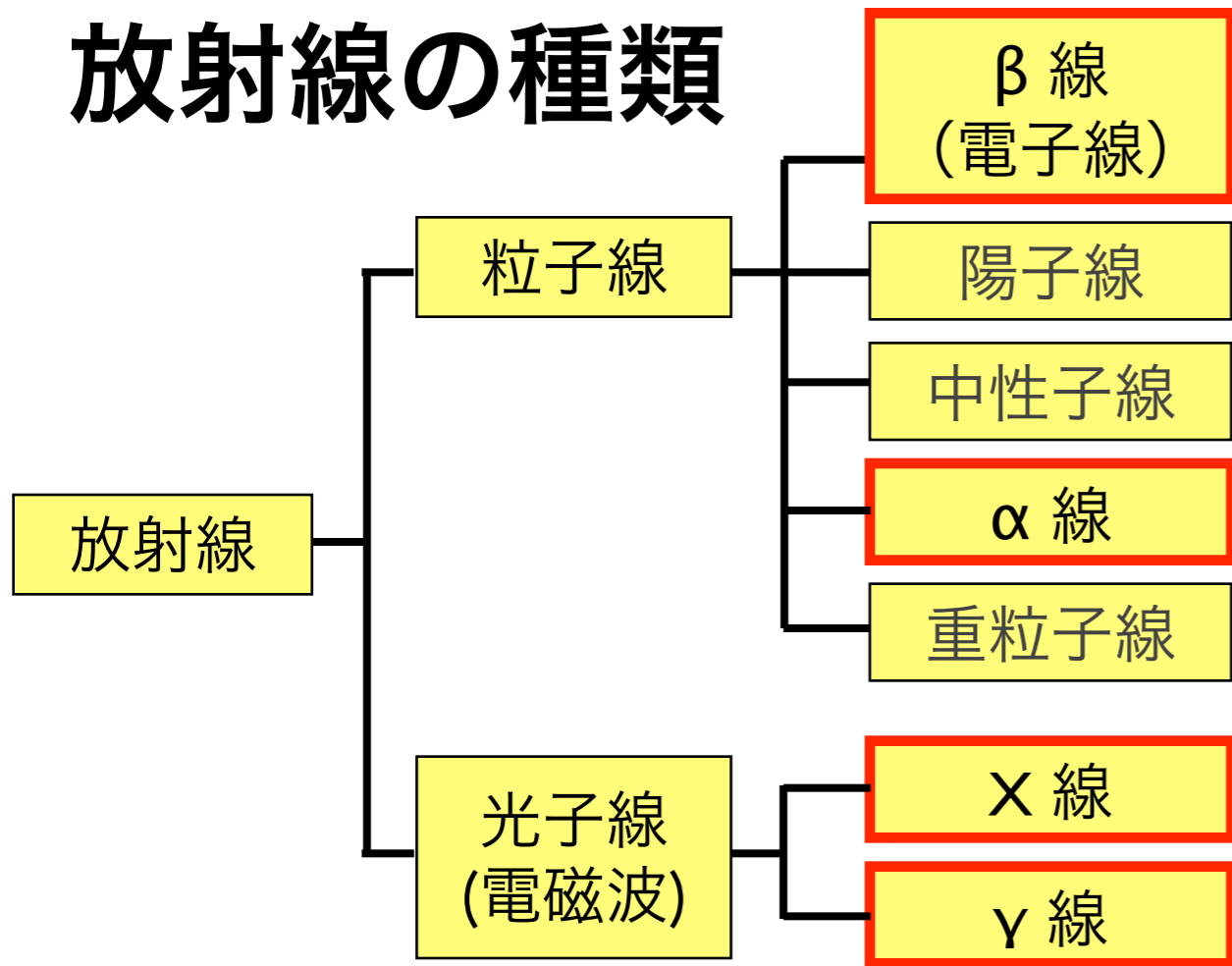
合否判定（点数なし） 2単位

**出席：** チャット窓に、まだの人は  
学生証番号&氏名を記入

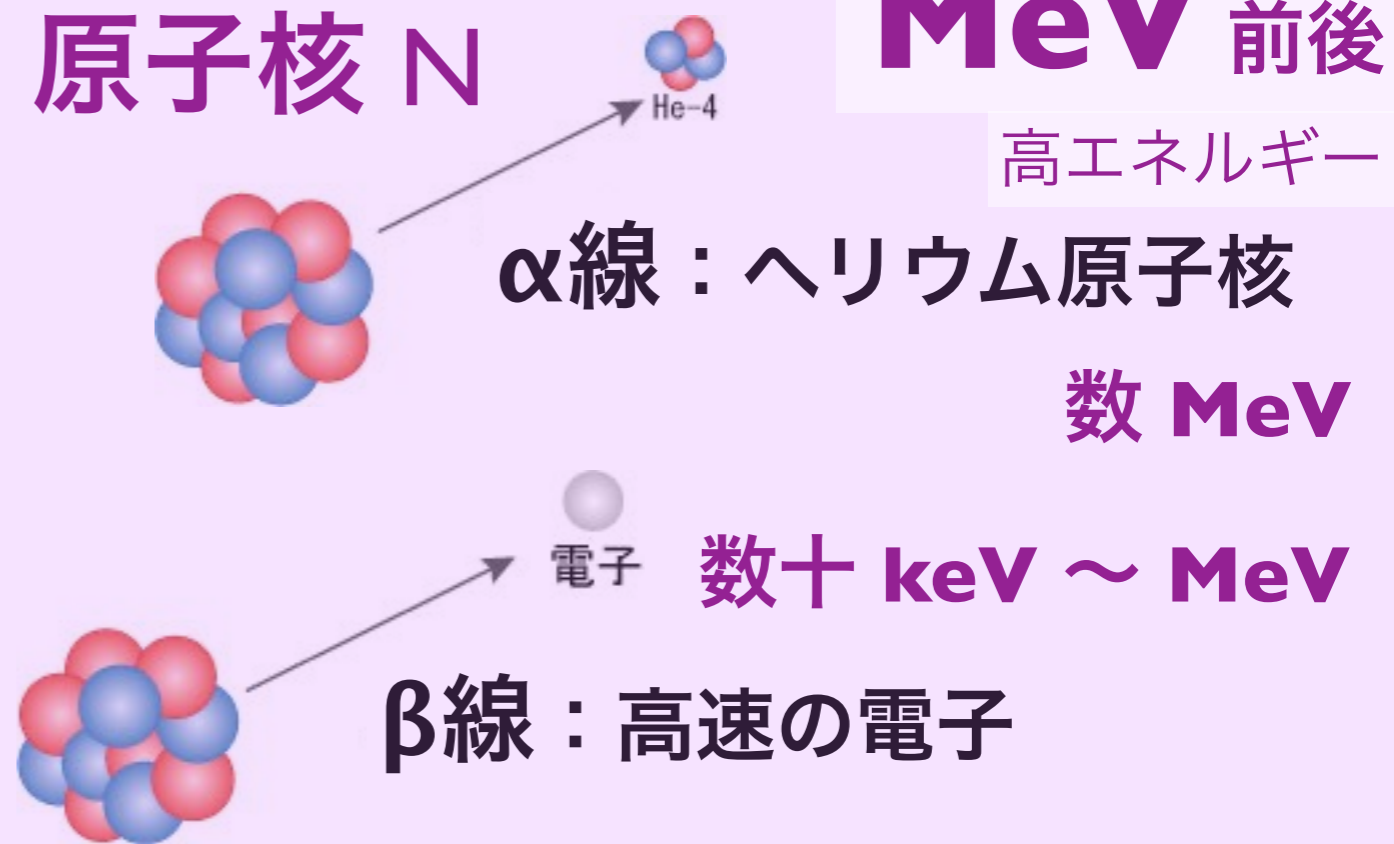
**文書資料「放射線の科学」：**  
ITC-LMS からダウンロード

**講義スライド・レポート課題：**  
専用 web page からダウンロード

# 放射線の種類



原子核 N



MeV 前後

高エネルギー

数十 keV ~ MeV

数十 keV ~ MeV

放射線のもつエネルギーは？

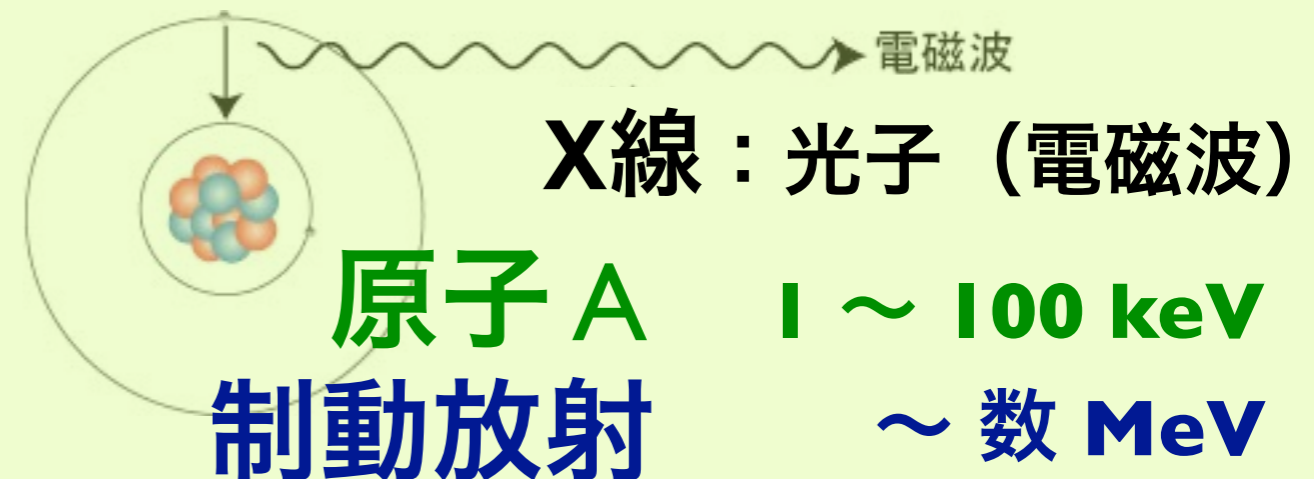
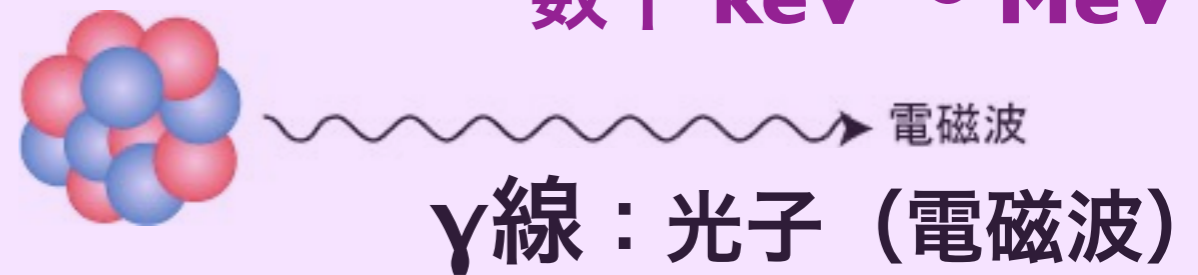
➡ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

➡ 最外殻電子で 10 eV 程度  
(1 eV = 96 kJ/mol)

放射線の速度は？

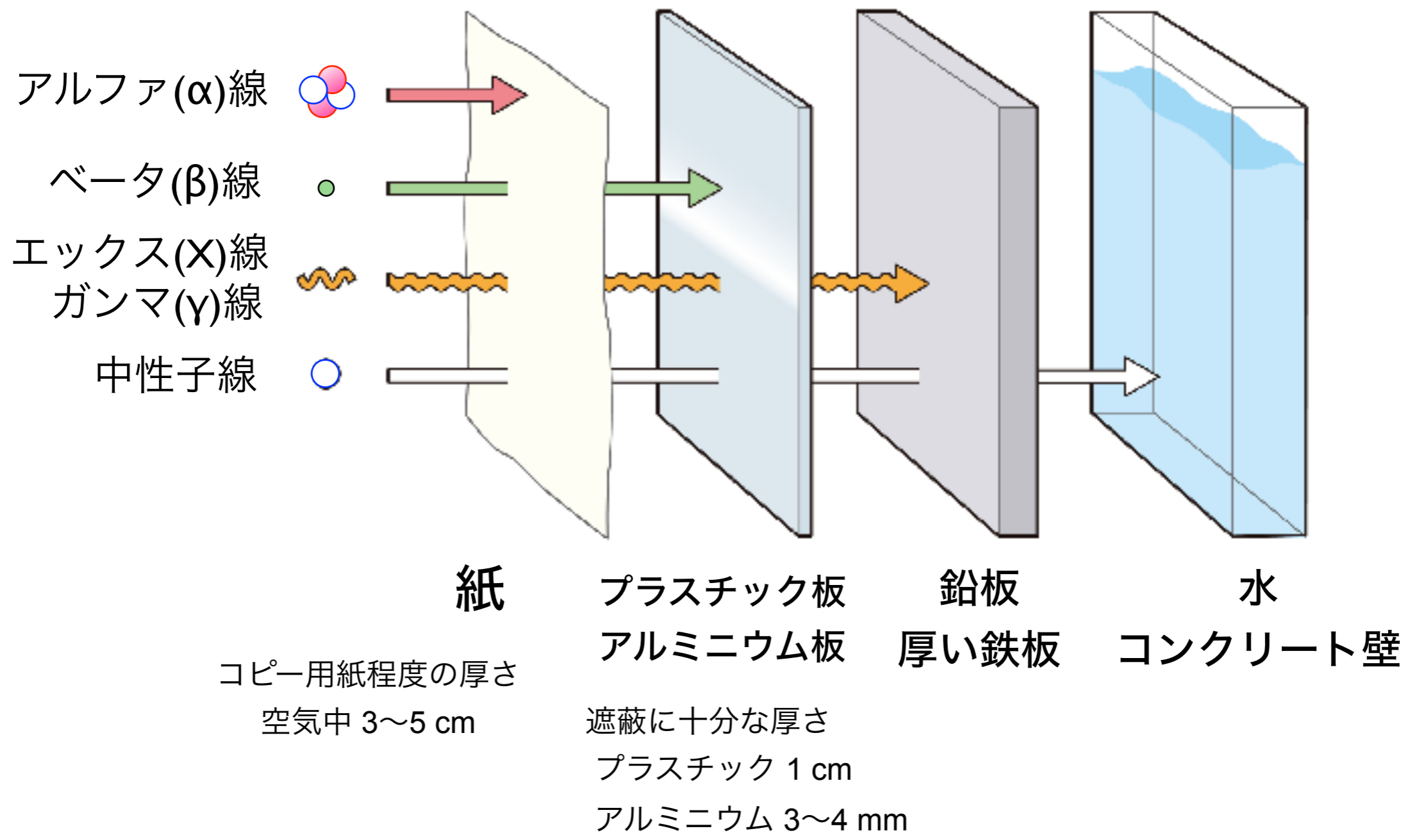
➡ 光速の数% ~ 100%



# 放射線と物質との相互作用

物質中でのエネルギー損失過程

# 放射線の種類と透過力





## 荷電粒子 ( $\alpha$ 線・ $\beta$ 線など) の減速 (エネルギー損失)

荷電粒子は物質中の多数の電子を蹴散らかしつつ  
徐々にエネルギーを失って減速する。

重い粒子は飛程がほぼ揃っている。

単位距離当たりの**エネルギー損失**  $-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$  が重要

## 光子 (X線・ $\gamma$ 線) の減衰 (減弱)

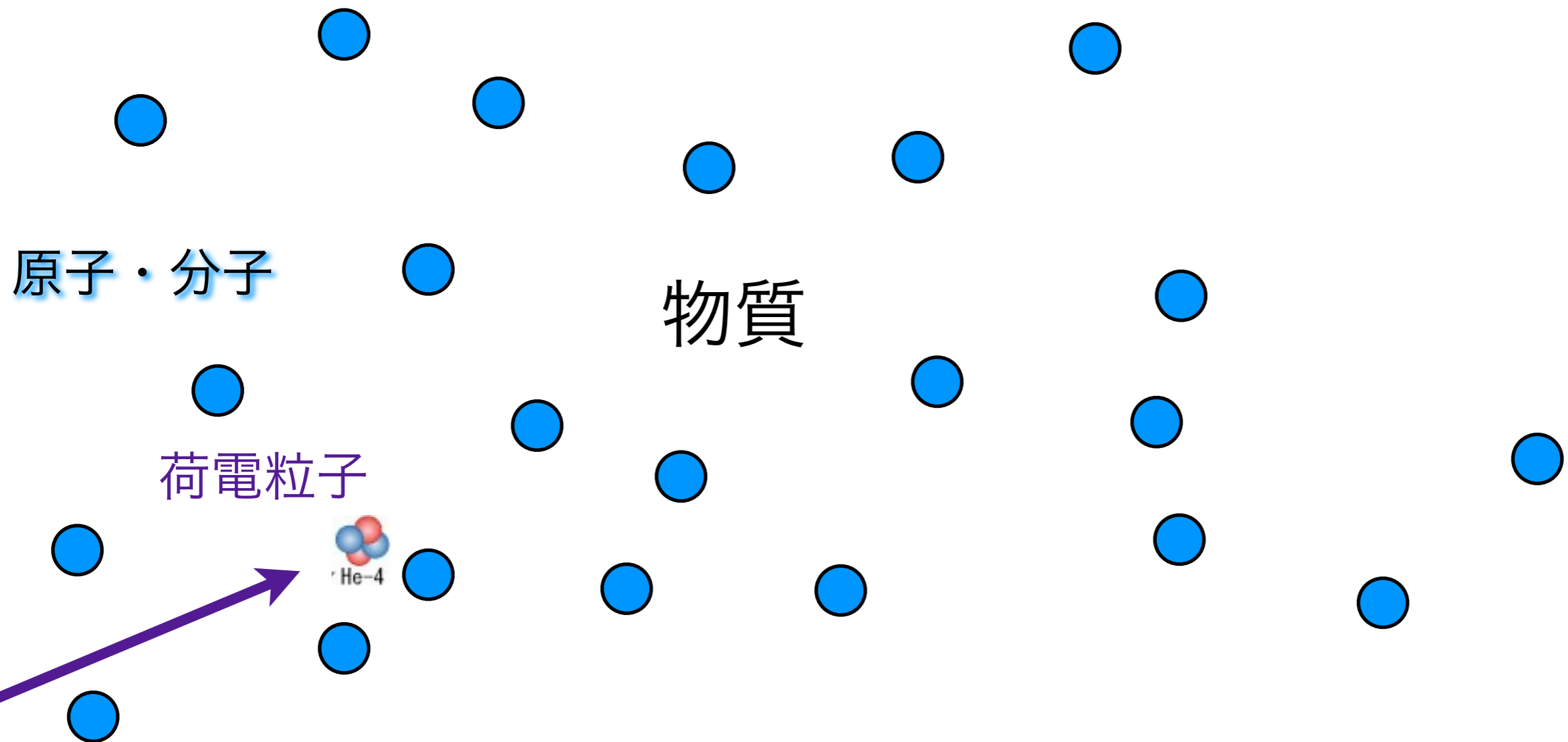
光子は原子に吸収されたり、大きく散乱されて  
一気にエネルギーを失う反面、何も相互作用せず  
素通りするものも多い。☞

**光子数の指数関数的減少**

**反応断面積  $\sigma$**  (単位距離当たりの**反応確率**を与える) が重要

# 荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：  
クーロン力



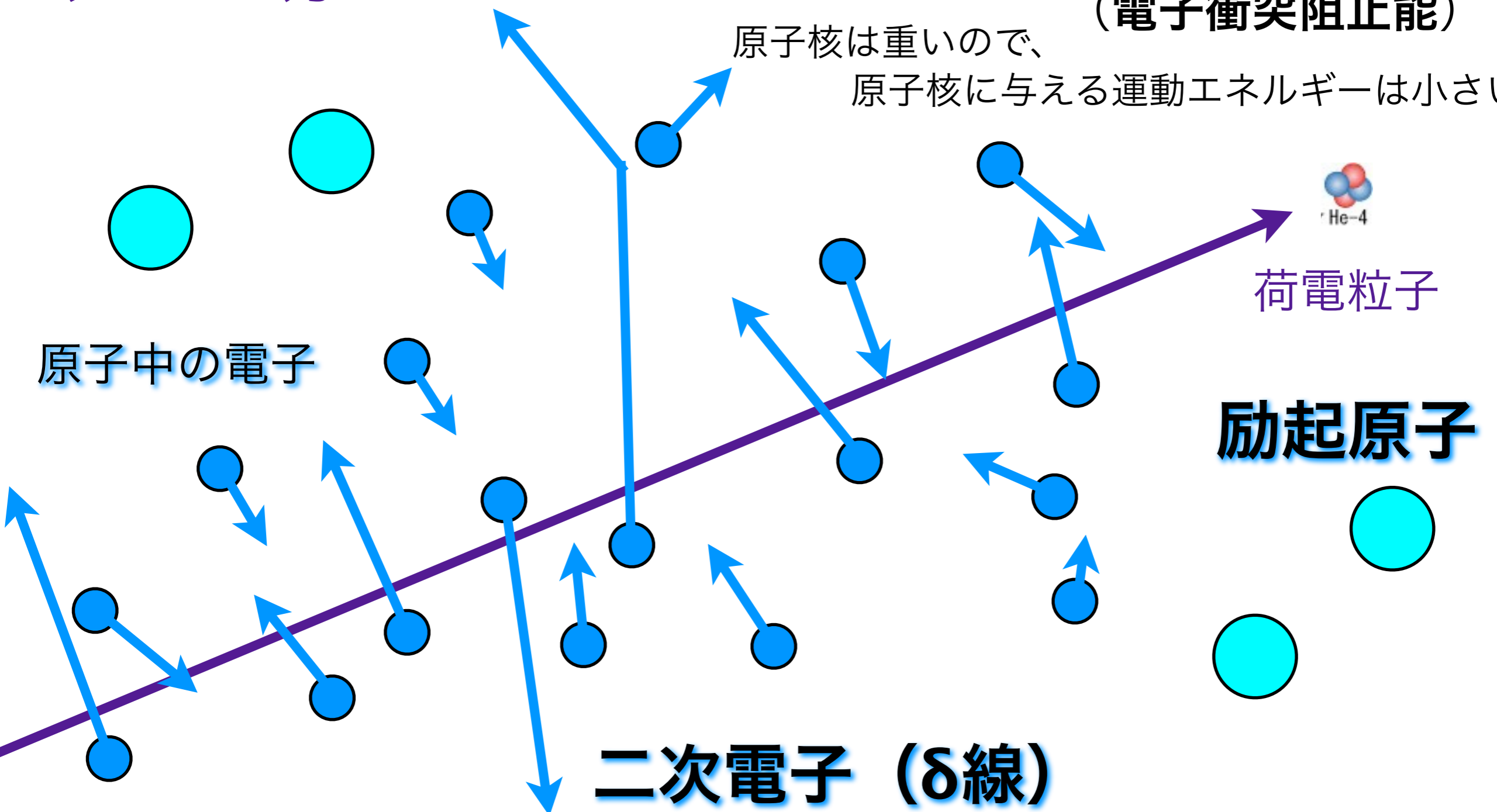
# 荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：  
クーロン力

物質中の原子を電離・励起し、多数の電子を散乱して運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される。

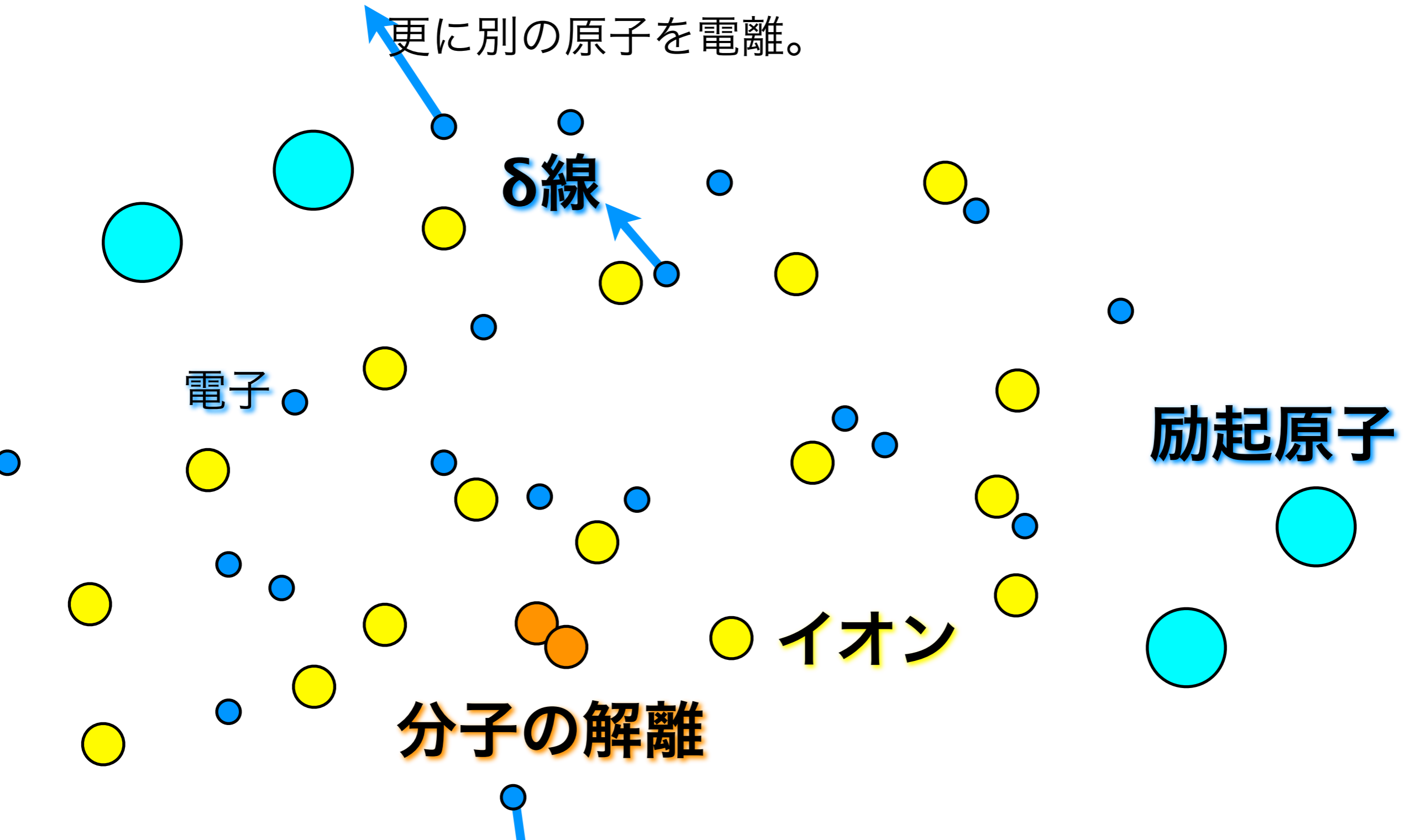
(電子衝突阻止能)

原子核は重いので、  
原子核に与える運動エネルギーは小さい。



# 荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。



# 荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。再結合・脱励起によりX線が発生。

励起原子

電子

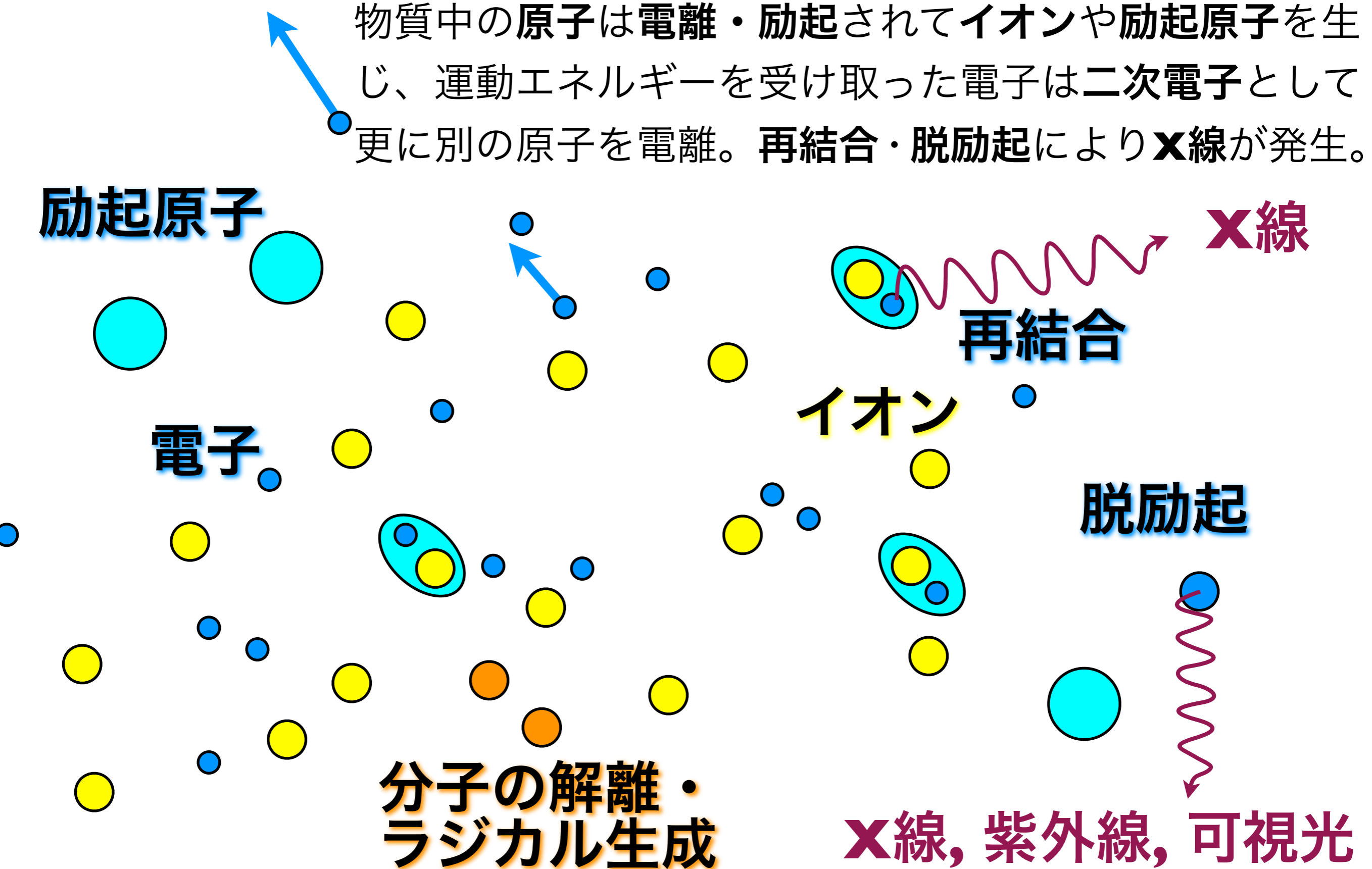
イオン

再結合

脱励起

分子の解離・ラジカル生成

X線, 紫外線, 可視光



# 荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。再結合・脱励起によりX線が発生。

原子の電離（イオン化）・励起

励起原子の脱励起

X線、紫外線・可視光

イオン・電子の再結合

化学結合の切断、組み替え

ラジカル、活性分子の生成

DNA の損傷

シンチレーション光

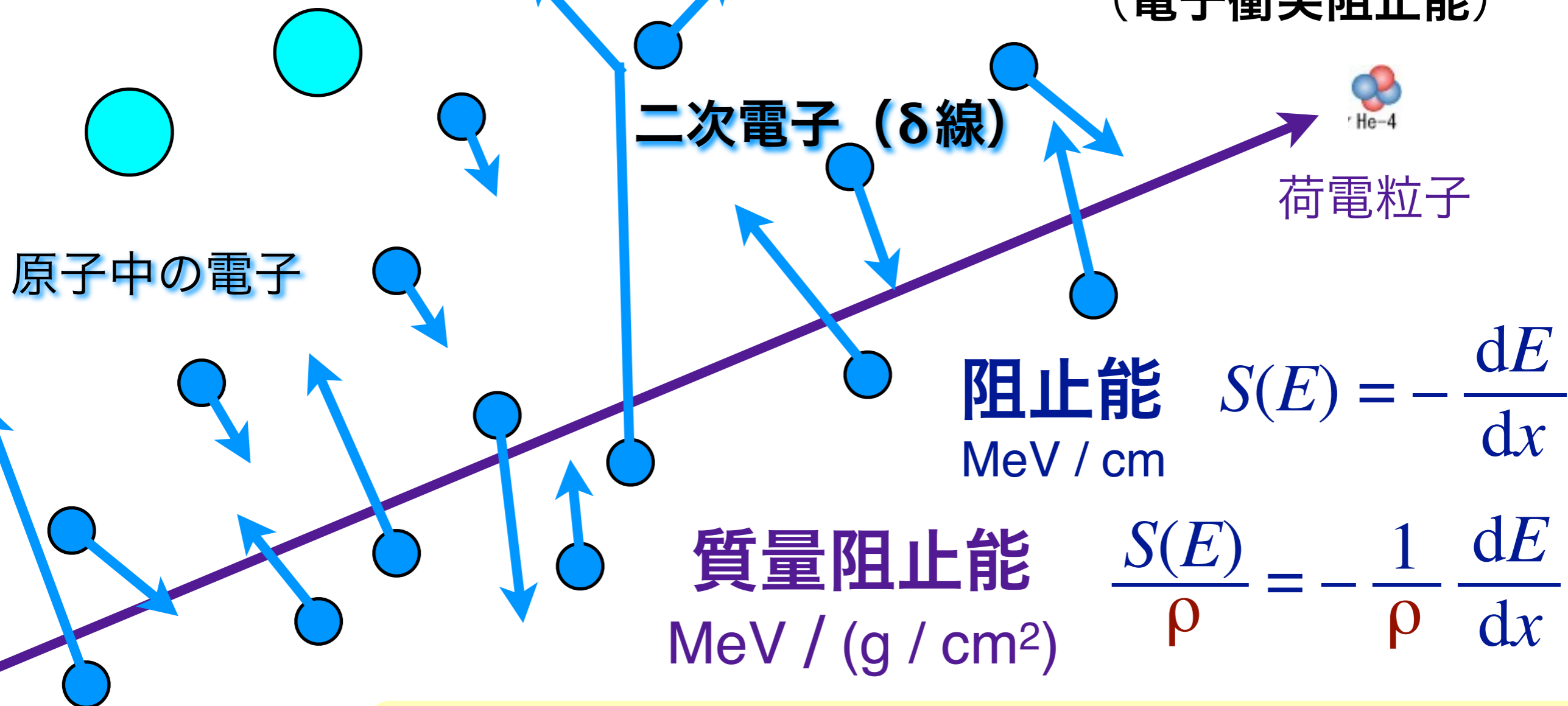
(放射線による原子・分子の蛍光)

# 荷電粒子に対する物質の阻止能

物質中の原子を電離・励起し、多数の電子を散乱して運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される。

(電子衝突阻止能)

荷電粒子：  
クーロン力



阻止能は散乱する電子の密度に比例する。  
質量阻止能は物質の種類にあまりよらない。

# 阻止能（エネルギー損失、線エネルギー付与）

Stopping power

Energy Loss

Linear Energy Transfer : LET

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$$

## 荷電粒子：クーロン力

物質中の原子を電離・励起し、多数の電子を散乱して（二次電子）運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される（電子衝突阻止能）。

### ● 重い粒子：陽子線(p) / $\alpha$ 線 / 重粒子線 / $\pi$ 中間子 / $\mu$ 粒子

1個の電子に与えるエネルギーは微小。多数個の電子との散乱により減速される。運動量変化も小さいので軌道はほぼ直線。

### ● 軽い粒子：電子(e<sup>-</sup>)・陽電子(e<sup>+</sup>)

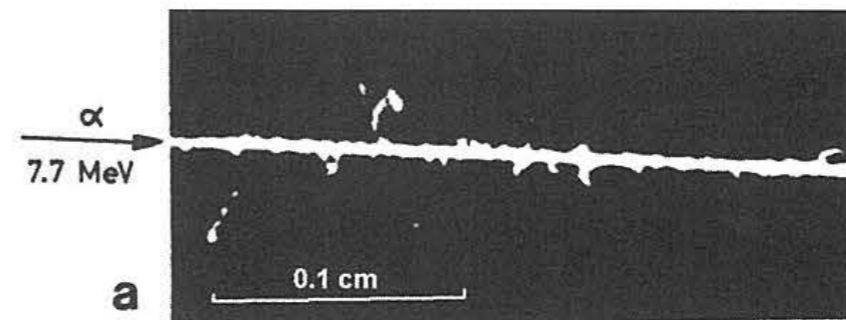
1回の散乱で失うエネルギーが大きい。ジグザグの軌道も。大きな運動エネルギーをもつ二次電子を生成しうる。



# 放射線の軌跡

霧箱による観察

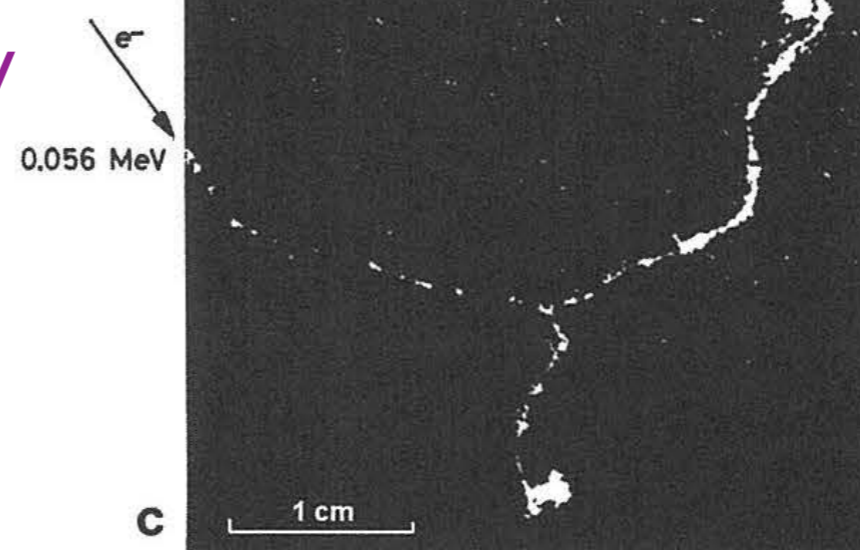
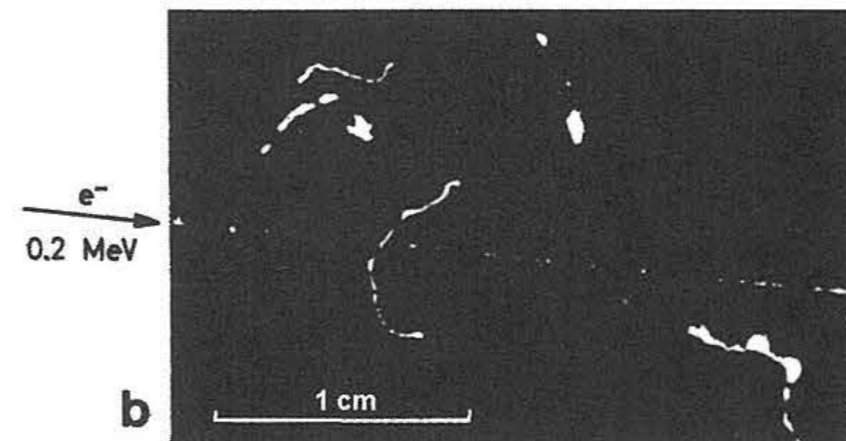
$\alpha$ -ray  
7.7 MeV



0.2 MeV

$\beta$ -ray

0.056 MeV



$\gamma$ -ray  
0.047 MeV

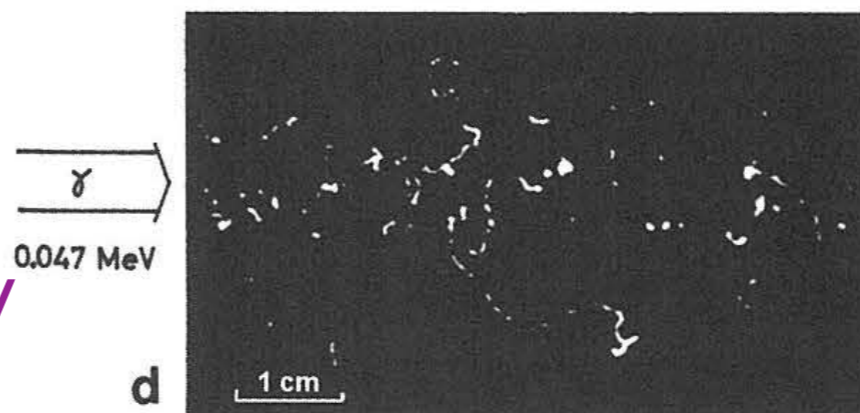


Figure 7.5 Cloud chamber tracks of  $\alpha$ ,  $\beta$ , ( $e^-$ ), and  $\gamma$ -rays at 1 bar in air ((a), (b), and (c)) and in methane (d). (From W. Gentner, H. Maier-Leibnitz, and H. Bothe.)

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$$

## 荷電粒子

### 阻止能

(エネルギー損失)

荷電粒子：クーロン力

物質中の原子を電離・励起し、多数の電子を散乱して  
(二次電子) 運動エネルギーを受け渡し、その分だけ  
減速される (電子衝突阻止能)。

Stopping power (Energy loss)

原子核は重いので、  
原子核に与える運動  
エネルギーは小さい。

## エネルギー損失

エネルギーが高く、電離能力をもつ二次粒子 (大抵は二次電子) のことを  $\delta$  線 と呼ぶことがある。

単位長あたりの電離 (電子・イオン対) 数 = 比電離

阻止能 ÷ 比電離 =  $W$  値

$W$  値：1つの電離を生じるに要する平均エネルギー。

荷電粒子の種類やエネルギーによらない。

イオン化エネルギーより大きな値となる (励起による損失があるため)

物質によらず  $W \approx 30 \text{ eV}$  程度。

$$S = - \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$$

荷電粒子の阻止能 ( **エネルギー損失** )

Stopping power

Energy Loss

(線エネルギー付与)

Linear Energy Transfer : LET

Bohr の計算

ただし式の単位系を国際単位系 SI に直した。

$$- \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{z^2 e^4}{4\pi \epsilon_0^2 m_e v^2} n_e \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}}$$

黒板にて導出

Bethe-Bloch の式

$$n_e = Z n_a = \rho N_A Z / A$$

電子密度                      原子密度

$$- \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho$$

水素以外はほぼ  $Z/A \approx 1/2$

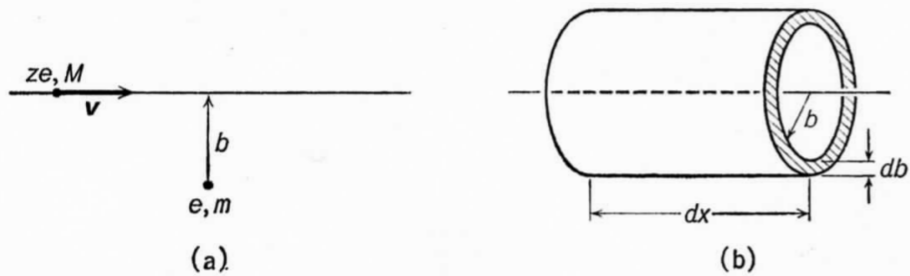
物質の種類にさほど依らない

質量阻止能  
MeV / (g / cm<sup>2</sup>)

$$- \frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

4-2 荷電粒子の物質内でのエネルギー損失†

荷電粒子が物質中を通るとき、物質を構成している原子の電子と電磁相互作用をおこしエネルギーを損失する(電離損失)。またそのときイオン化現象で軌道から飛び出す電子によって荷電粒子の検出が可能になる。次に荷電粒子がエネルギーを損失する機構を古典的に考察してみよう。



4.2 図

4.2 図(a)のように、質量  $M$ 、電荷  $ze$  の荷電粒子が速度  $v$  で原子の電子(質量  $m$ 、電荷  $e$ )から  $b$  の距離を運動しているとする。さらに粒子が電子に最も接近したとき、電子は静止状態にあるとしよう。電荷  $ze$  の電界によって電子は衝撃を受けるので、粒子の通過後電子には運動量を与えら

† 4-2~4-4 の考察は主として Fermi の方法(参考書 4. 参照)に従う。

$I$  の平均値  $\bar{I}$  と考えてよい。(9) はあくまで近似的に求めた式であり非相対論的であって、粒子の散乱も考慮していない。しかしエネルギー損失がどの変数の関数であるかを示し、エネルギー損失の大まかな計算をするためには便利な式である。

新物理学シリーズ14「高エネルギー物理学」山本祐靖 著、培風館(1973)(絶版)より抜粋。ほかに、William R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments", Springer-Verlag (1987) が詳しい。

れる。この場合電界は  $b$  方向の垂直成分  $E_{\perp}$  だけを考えればよい(水平成分  $E_{\parallel}$  は平均すると 0 になる)。 $b$  方向の衝撃  $I_{\perp}$  は

$$I_{\perp} = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\perp}(t) dt = e \int_{-\infty}^{\infty} E_{\perp}(t) dt$$

$$= e \int_{-\infty}^{\infty} E_{\perp}(x) \frac{dt}{dx} dx = \frac{e}{v} \int_{-\infty}^{\infty} E_{\perp}(x) dx \quad (6)$$

SI (MKSA) 単位系での式を記す。

と与えられる。Gauss の法則を使えば

$$\int_{-\infty}^{\infty} E_{\perp}(x) dx = \frac{2ze}{b}$$

となるので、電子に与えられた運動量  $p$  は  $p = I_{\perp} = \frac{2ze^2}{bv}$  である。これをエネルギーに書きかえると

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{2z^2e^4}{mv^2b^2}$$

となる。次に荷電粒子の通る物質中に 4.2 図(b)のような厚さ  $db$  の中空円筒があるとすると、物質中の電子の密度を  $n_e$  とすると、この壁の中の電子によって生じる荷電粒子のエネルギー変化  $dE$  は

$$-dE(b) = \frac{4\pi n_e dx}{mv^2} z^2 e^4 \frac{db}{b} \quad (7)$$

で与えられる。 $b$  を  $b$  の最低値から最大値まで積分すると

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mv^2} n_e \ln \left| \frac{b_{\max}}{b_{\min}} \right| \quad (8)$$

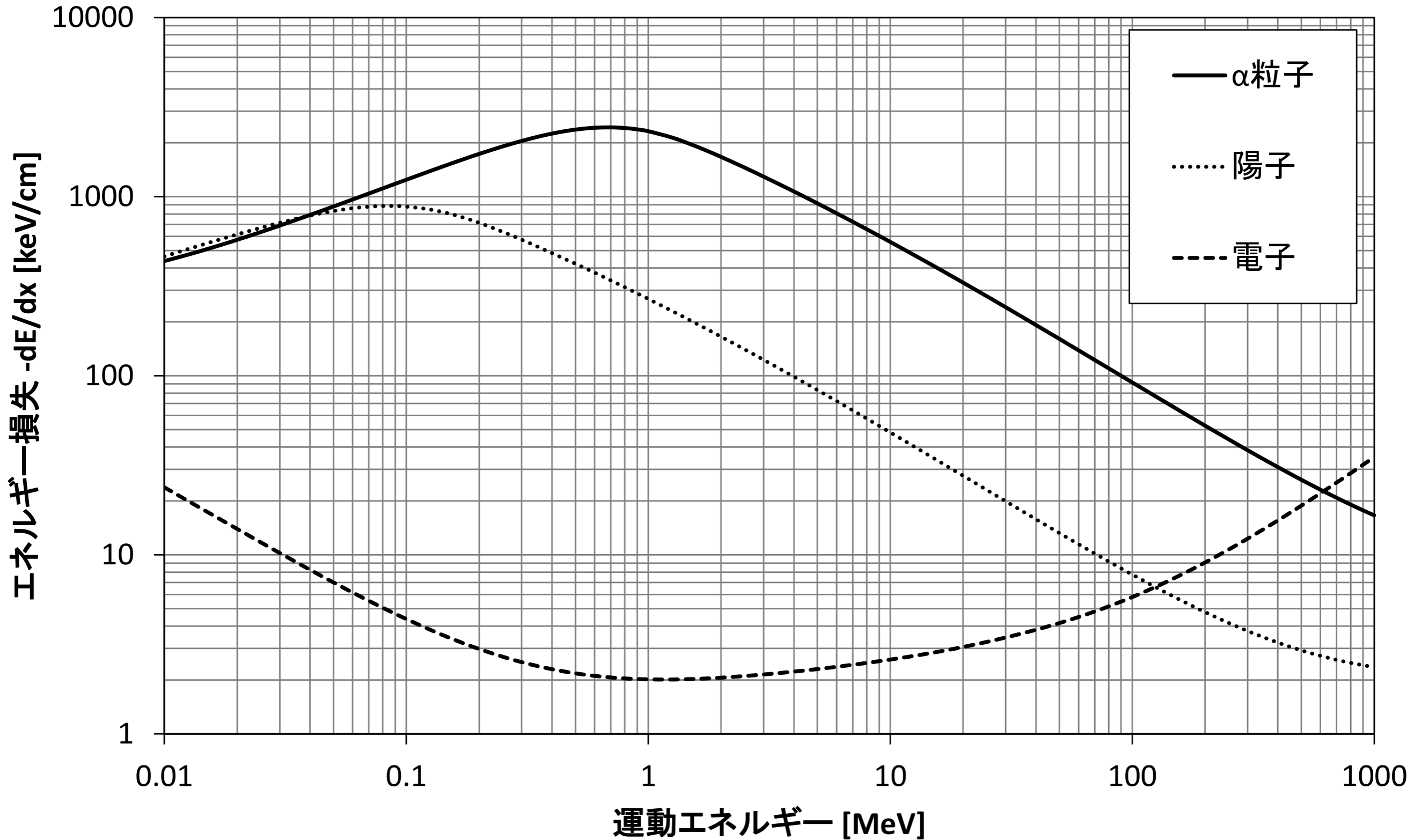
と単位距離に対するエネルギー損失率が与えられる。

量子力学により、粒子には粒子性と波動性があり、運動量  $p$  をもった電子の波長は de Broglie (ド・ブローイ) の式で  $\lambda = h/p$  ( $h$  は Planck の定数  $h$  を  $2\pi$  で割った数) で与えられ、 $b$  はこの波長より短くはならないと考えられる。荷電粒子から電子を観測した場合、つまり荷電粒子が静止状態の座標系では電子の速度は  $v$  であるから、 $b_{\min} \approx \lambda = h/mv$  となる。また電子が軌道一周する周期を  $\tau$  とすると、電子に運動量を与えられるためには、衝突がおきる時間が  $\tau$  と大体同じか短くなければならない。この時間を  $t$  とすると、 $t \approx b/v$  であり、上の条件を満たすためには  $t = b/v \leq \tau = 1/\nu$  ( $\nu$  は電子のこの軌道での周波数) でなければならない。これより  $b_{\max} = v/\nu$  となる。 $b_{\max}$  と  $b_{\min}$  の値を(8)に代入すると

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mv^2} n_e \ln \left| \frac{mv^2}{h\nu} \right| \quad (9)$$

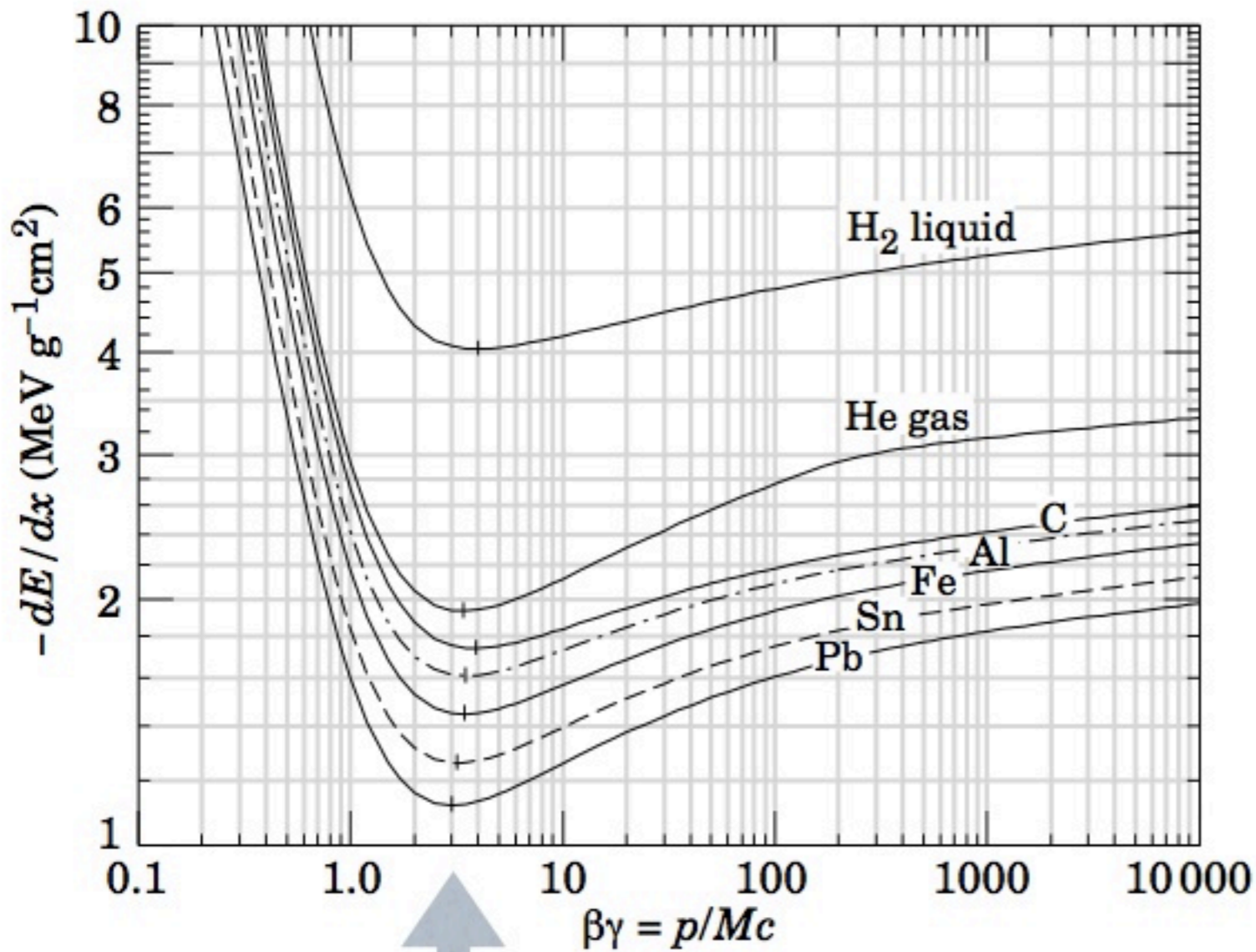
が得られる。ここで  $h\nu$  は大体この原子の各軌道のイオン化ポテンシャル

図A: さまざまな荷電粒子に対する空気の阻止能

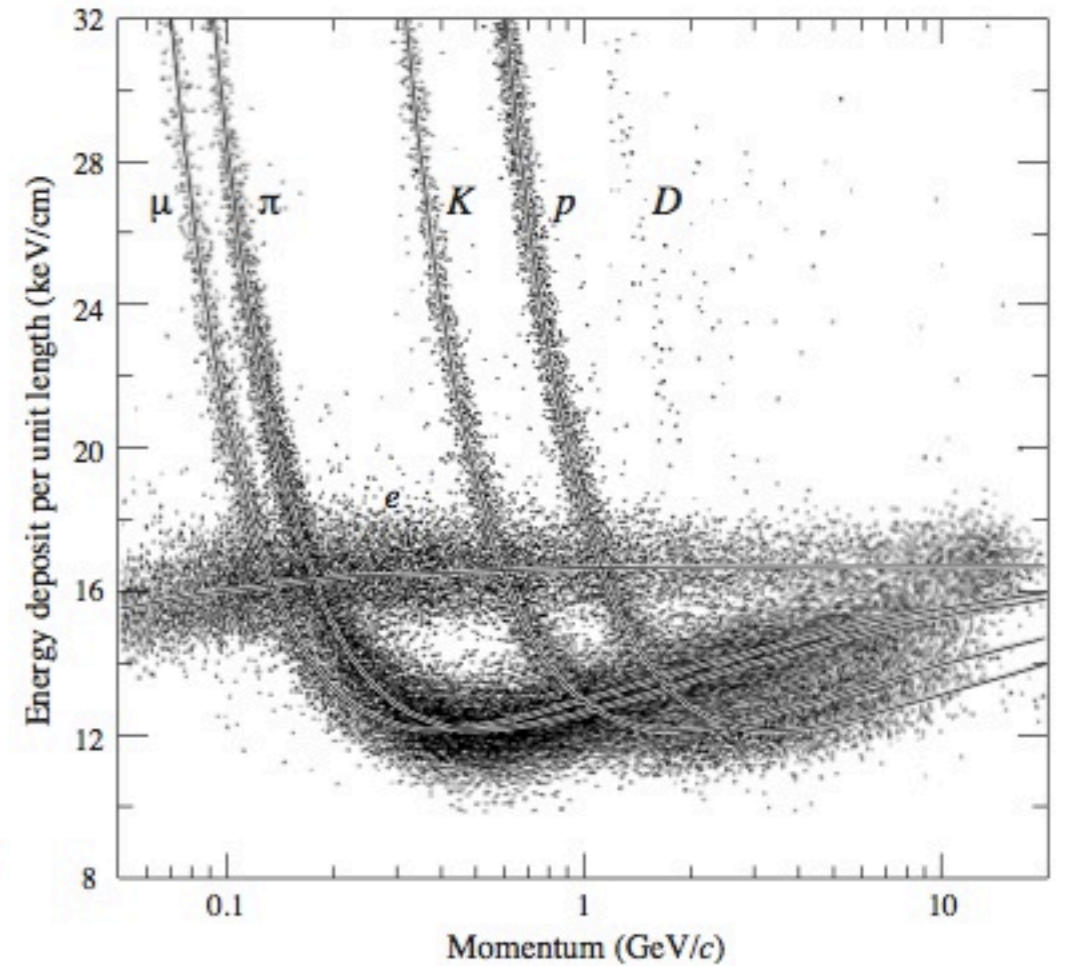


質量阻止能  
MeV / (g / cm<sup>2</sup>)

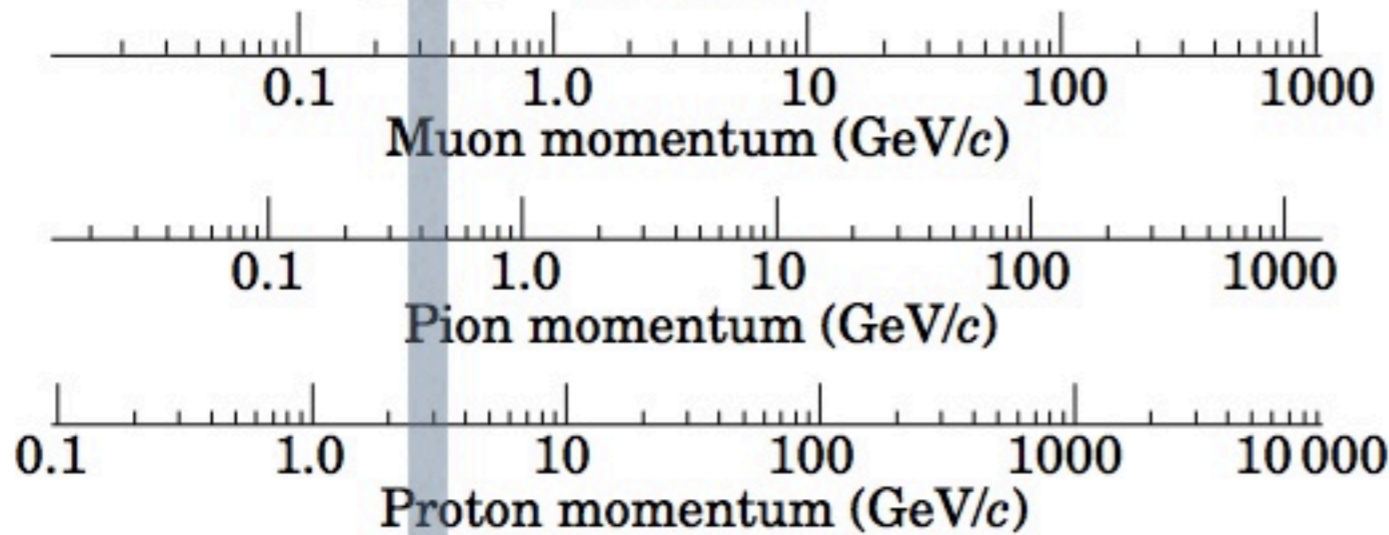
$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$



# 粒子識別



(8.5 atm Ar-CH<sub>4</sub> 80:20)

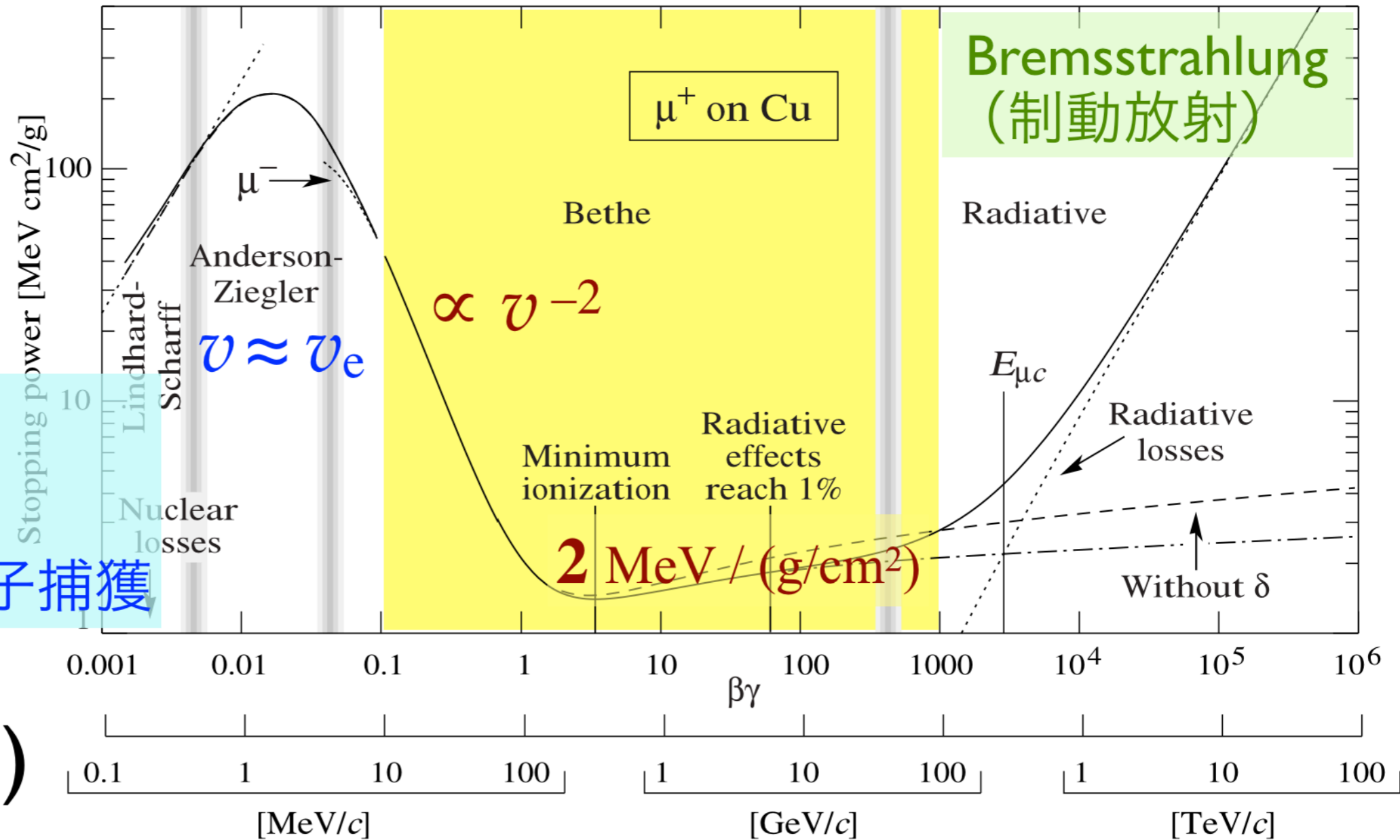


minimum ionizing  $\approx 2 \text{ MeV} / (\text{g}/\text{cm}^2)$

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$$

高エネルギー物理学業界では  $\rho$  を書かない (x について、 $\rho$  を含んだ次元だと見なす) ことが多い。前のスライドではそう表記。

- 非断熱的
- Barkas 効果
- イオンは電子捕獲



(線エネルギー付与)  
keV /  $\mu\text{m}$

Muon momentum

27.2.2. Stopping power at intermediate energies :

The mean rate of energy loss by moderately relativistic charged heavy particles,  $M_1/\delta x$ , is well-described by the "Bethe" equation,

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]. \quad (27.3)$$

質量阻止能  
MeV / (g / cm<sup>2</sup>)

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

# 荷電粒子：クーロン力

$$S = - \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \quad \text{阻止能 (エネルギー損失、線エネルギー付与)}$$

Stopping power      Energy Loss      Linear Energy Transfer : **LET**

陽子線(p) /  $\alpha$ 線 / 重粒子線：高 LET 放射線

中性子線(n)：物質中の陽子を叩いて弾き出すので、  
高い LET を与える。

電子( $\beta$ )線：低 LET 放射線

光子(X線,  $\gamma$ 線)：物質中の電子を弾き出す。

あるいは高エネルギーでは電子陽電子対を生成する。

低い LET。

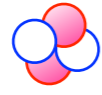
物質の種類にさほど依らない

$$\text{質量阻止能} \quad - \frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

MeV / (g / cm<sup>2</sup>)



start



アルファ(α)線

stop

MeV

エネルギー

MeV

5

4

3

2

1

0

5

4

3

2

1

0

5

4

3

2

1

0

5

4

3

2

1

0

5

4

3

2

1

0

5

4

3

2

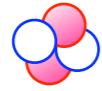
1

0

質量阻止能  
MeV / (g / cm<sup>2</sup>)

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

start



アルファ(α)線

stop

MeV

エネルギー損失

MeV

5	4	3	2	1	0
5	4	3	2	1	0
5	4	3	2	1	0
5	4	3	2	1	0
5	4	3	2	1	0
5	4	3	2	1	0

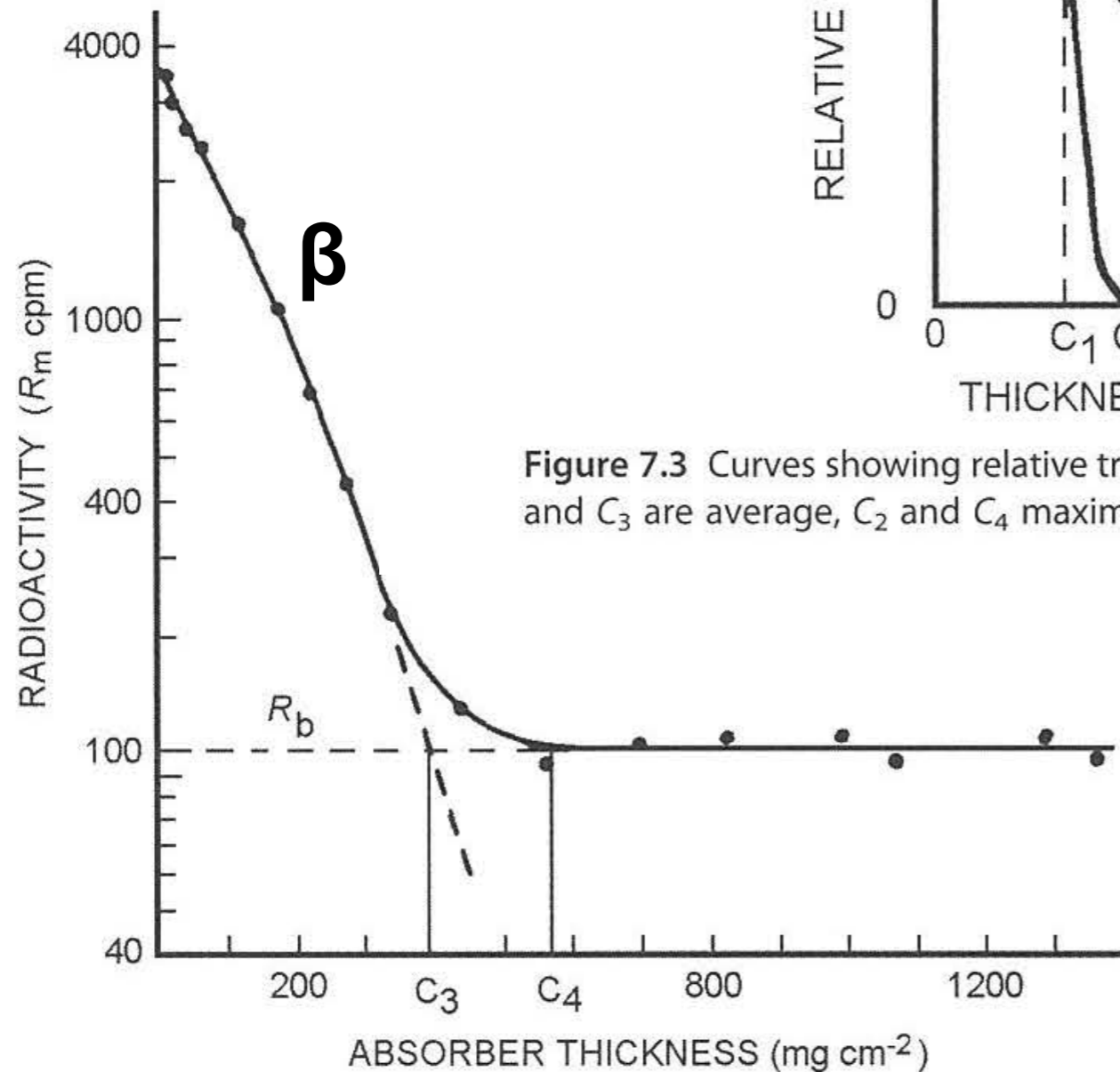
100% 粒子数 100% 100% 100% 100% ... 0%

質量阻止能  
MeV / (g / cm<sup>2</sup>)

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

# 厚さと透過数

log.



lin.

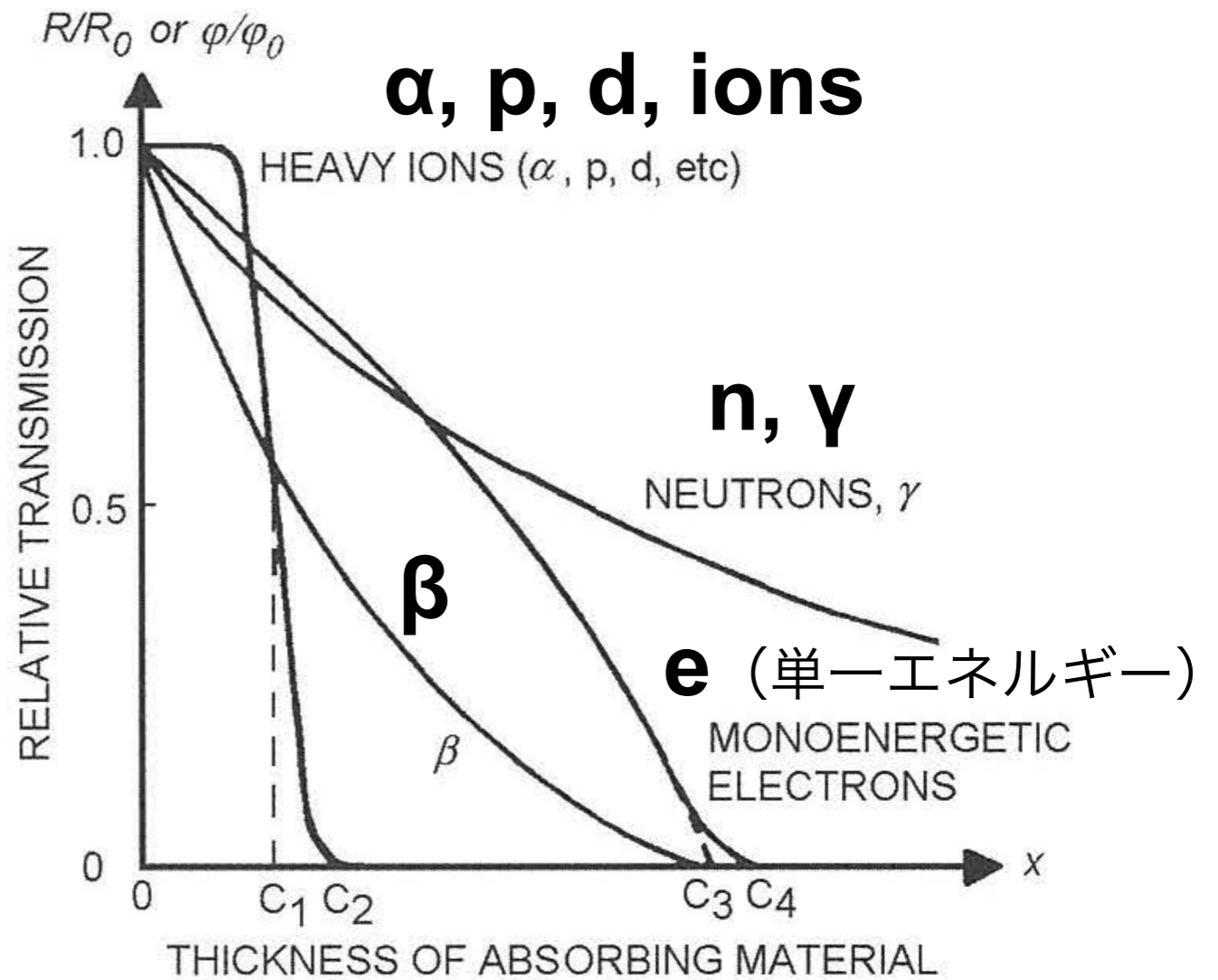


Figure 7.3 Curves showing relative transmission  $\phi/\phi_0$  (or  $R/R_0$ ) as function of absorber thickness  $x$ .  $C_1$  and  $C_3$  are average,  $C_2$  and  $C_4$  maximum range.

$$\begin{aligned}
 R_\beta &= C_4 \\
 &= 0.407 (E / \text{MeV})^{1.38} \text{ g/cm}^2 \\
 &\quad (0.15 \text{ MeV} < E_{\text{max}} < 0.8 \text{ MeV}) \\
 &= 0.542 (E / \text{MeV}) - 0.133 \text{ g/cm}^2 \\
 &\quad (0.8 \text{ MeV} < E_{\text{max}} < 3 \text{ MeV}) \\
 &\approx 0.5 (E / \text{MeV}) \text{ g/cm}^2
 \end{aligned}$$

Figure 7.4 Absorption curve for  $^{32}\text{P}$   $\beta$ -radiation showing extrapolated ( $C_4$ ) and average ( $C_3$ ) ranges.

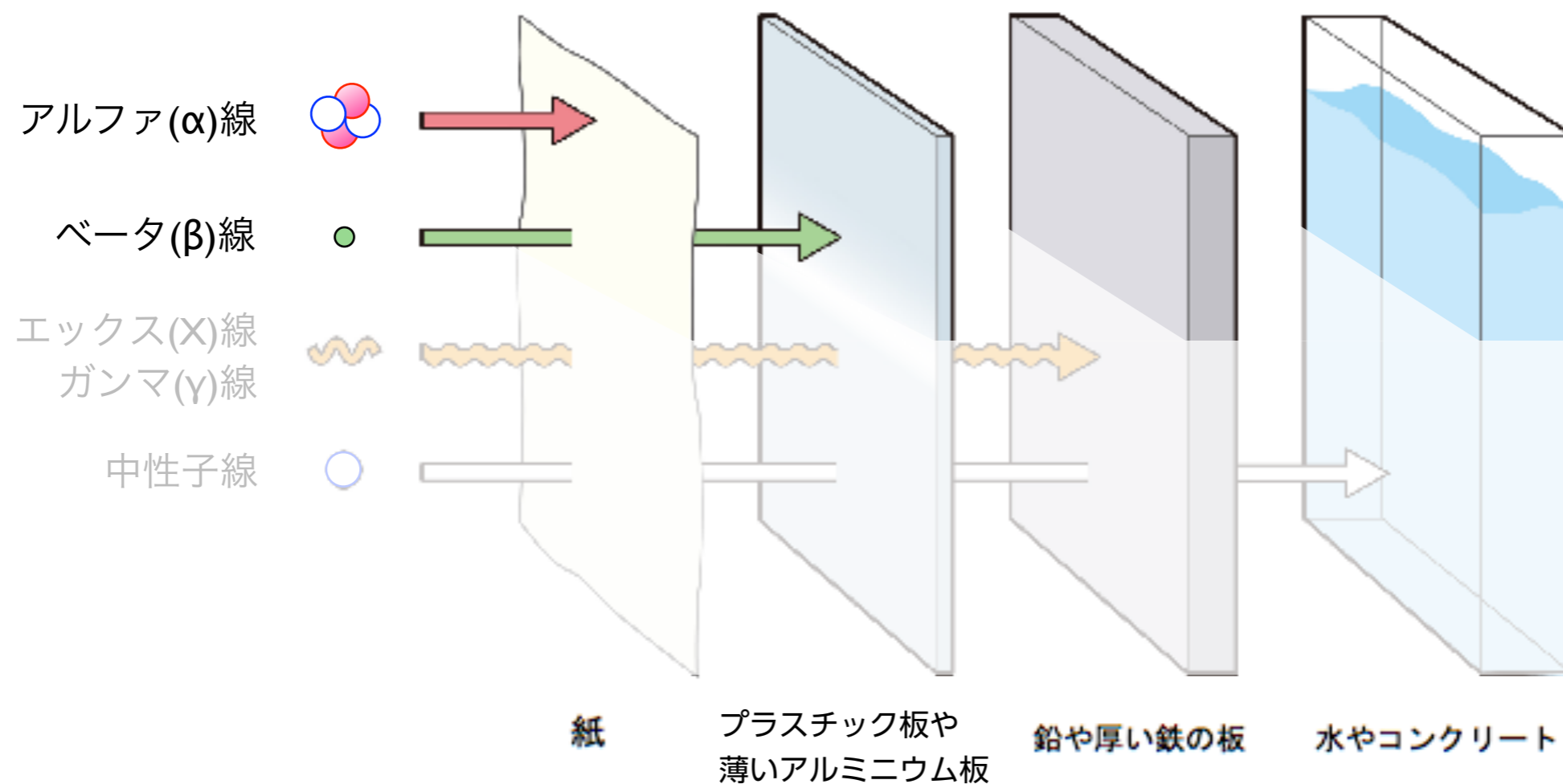
The dashed curve is obtained after subtraction of background.

# 飛程 Range

阻止能の逆数を積分。

相互作用の大きい放射線ほど  
遮蔽しやすい。

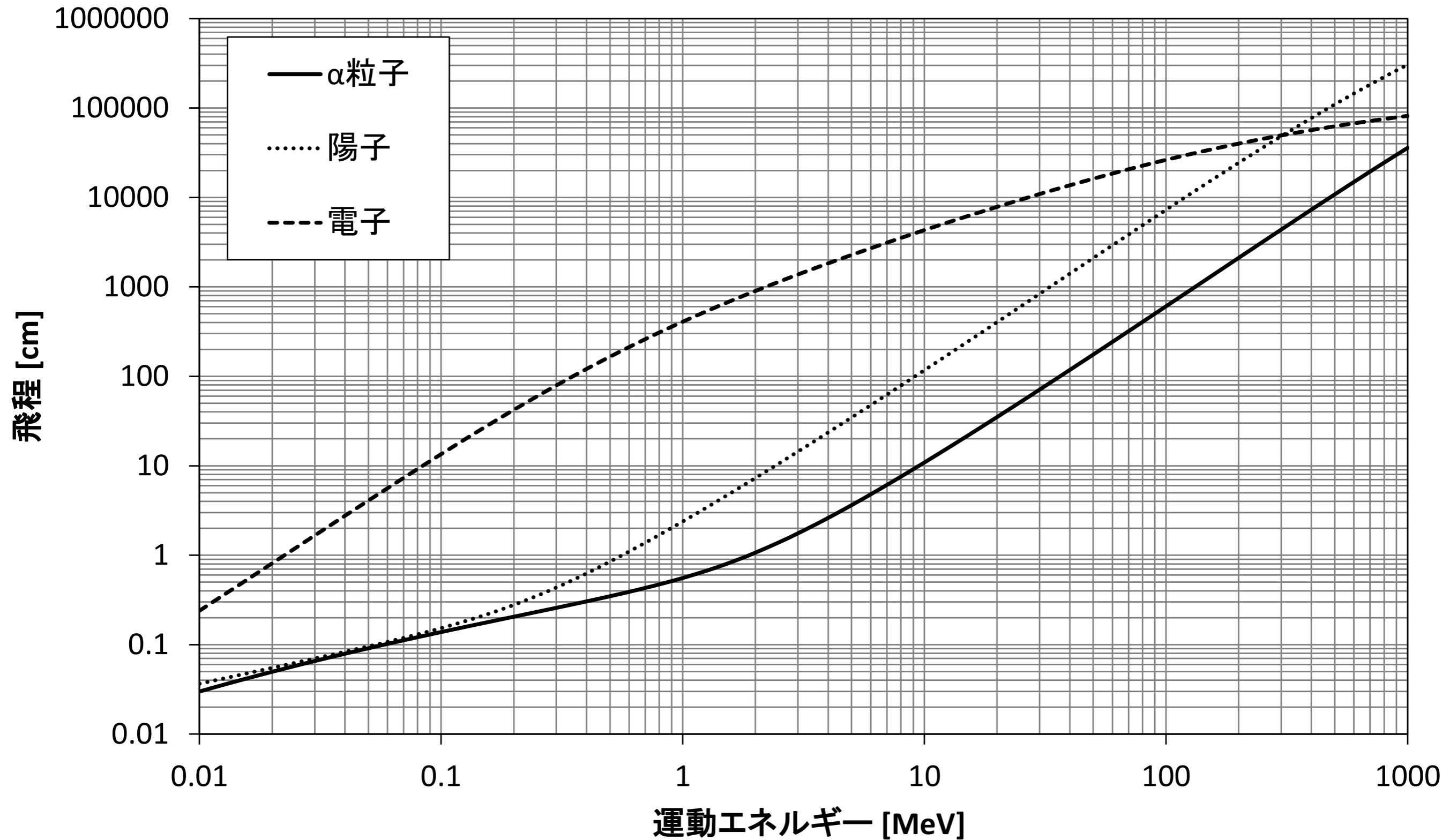
$$R(E_0) = \int_{E_0}^0 \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle^{-1} dE$$



質量阻止能  
MeV / (g / cm<sup>2</sup>)

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

図B: さまざまな荷電粒子の空気中での飛程



飛程 Range  
阻止能の逆数を積分。

$$R(E_0) = \int_{E_0}^0 \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle^{-1} dE$$

飛程 Range

阻止能の逆数を積分。

陽子線(p) /  $\alpha$ 線 / 重粒子線：短い飛程。

外部被曝に対して、遮蔽は容易。

中性子線(n)：電子と相互作用しないので遠くまで飛ぶ。

陽子を叩き出せば一気に減速するが、核子同士なので反応断面積が小さい（反応確率が小さい）。

短い飛程。水素原子を含む物質で遮蔽。

電子( $\beta$ )線：p,  $\alpha$ , 重粒子線に比べて長めの飛程。

軽いので散乱されやすい（相手も電子）。

物質の種類にさほど依らない

$$\begin{array}{l} \text{質量阻止能} \\ \text{MeV} / (\text{g} / \text{cm}^2) \end{array} \quad - \frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

# 放射線の種類と被ばく

- **$\alpha$ 線**は空気中の飛程が数 **cm**。  
生体では**表層**の細胞で止まる。  
**内部被ばくが問題**。全てのエネルギーが短い飛程の間に細胞に与えられる。
- **$\beta$ 線**は外部被ばくでは**皮膚**への影響を考える。**内部被ばくも問題**。
- **$\gamma$ 線**は多くは相互作用（光電効果・コンプトン散乱）せず**体を素通り**し、一部が体内で吸収される。  
**外部被ばくでも体内も被ばくする**。
- **X線**は高エネルギーの場合は  $\gamma$ 線と同様。  
数十 keV 程度以下の場合は**皮膚**への影響が**問題**。

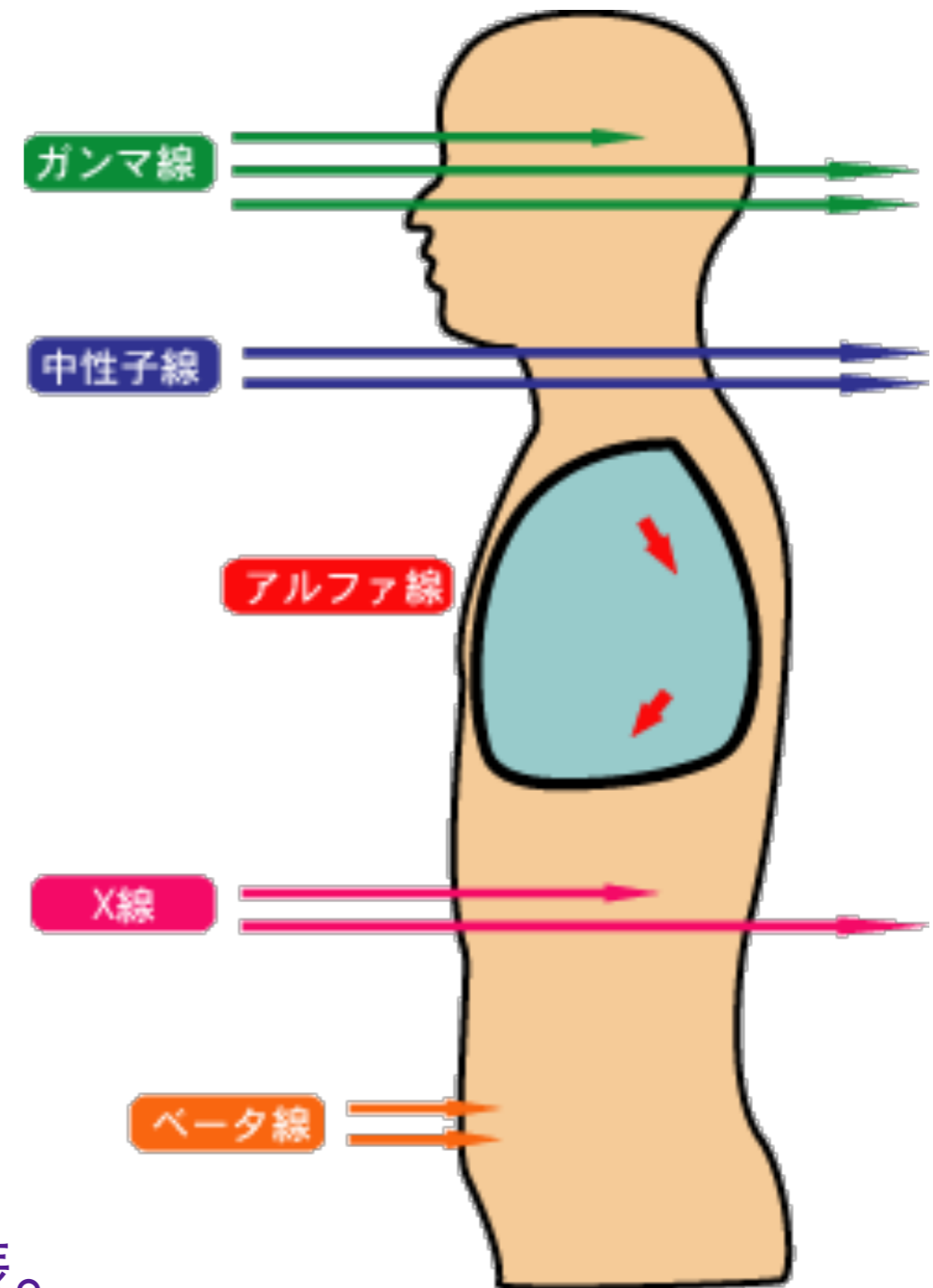


図3 人体を透過する放射線

# 原発北西方向の汚染と「ホットスポット」

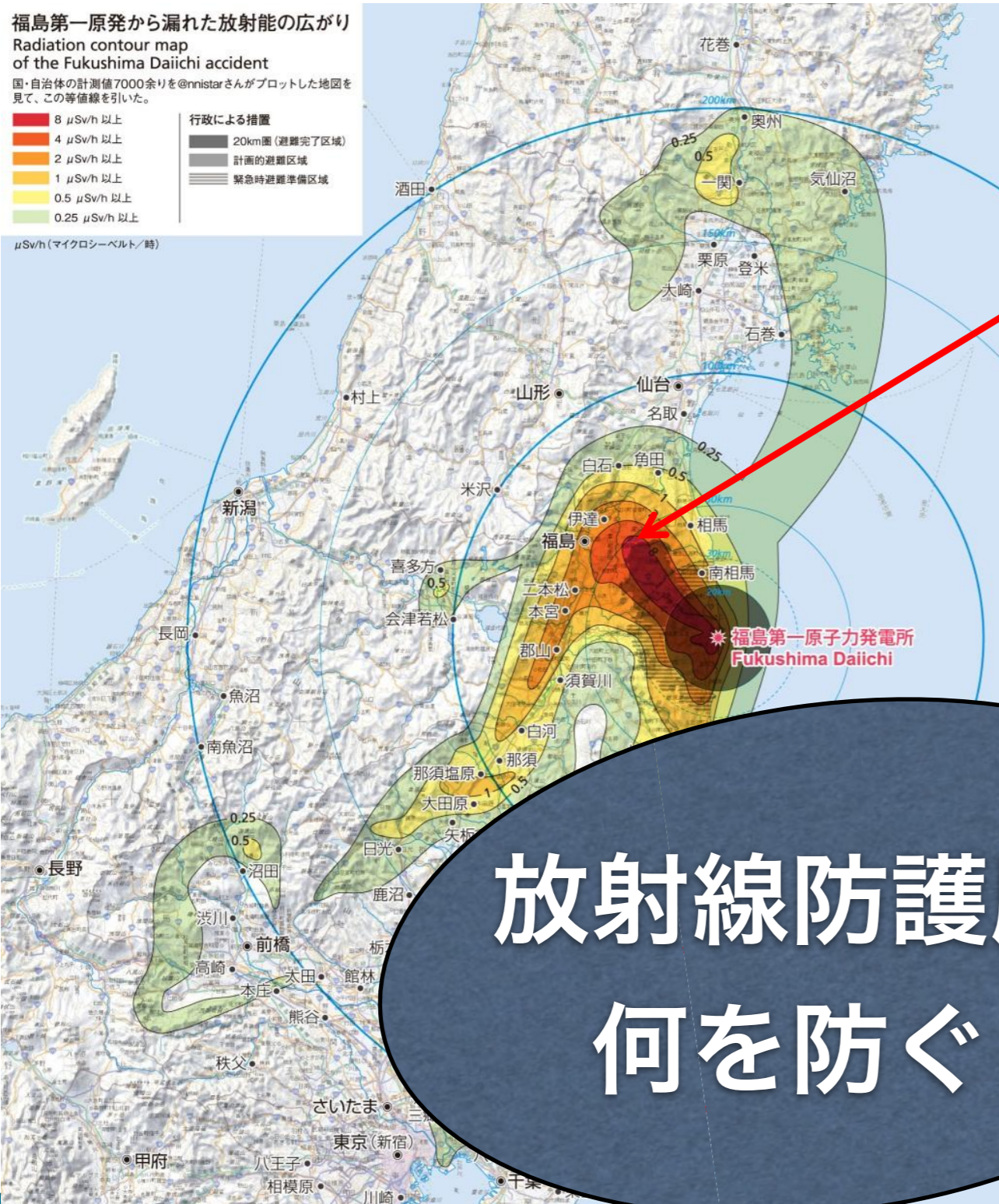
福島第一原発から漏れた放射能の広がり  
Radiation contour map  
of the Fukushima Daiichi accident

国・自治体の計測値7000余りを@nnistarさんがプロットした地図を見て、この等値線を引いた。

- 8  $\mu\text{Sv/h}$  以上
- 4  $\mu\text{Sv/h}$  以上
- 2  $\mu\text{Sv/h}$  以上
- 1  $\mu\text{Sv/h}$  以上
- 0.5  $\mu\text{Sv/h}$  以上
- 0.25  $\mu\text{Sv/h}$  以上

- 行政による措置
- 20km圏 (避難完了区域)
  - 計画的避難区域
  - 緊急時避難準備区域

$\mu\text{Sv/h}$  (マイクロシーベルト/時)



放射線防護服は  
何を防ぐ？



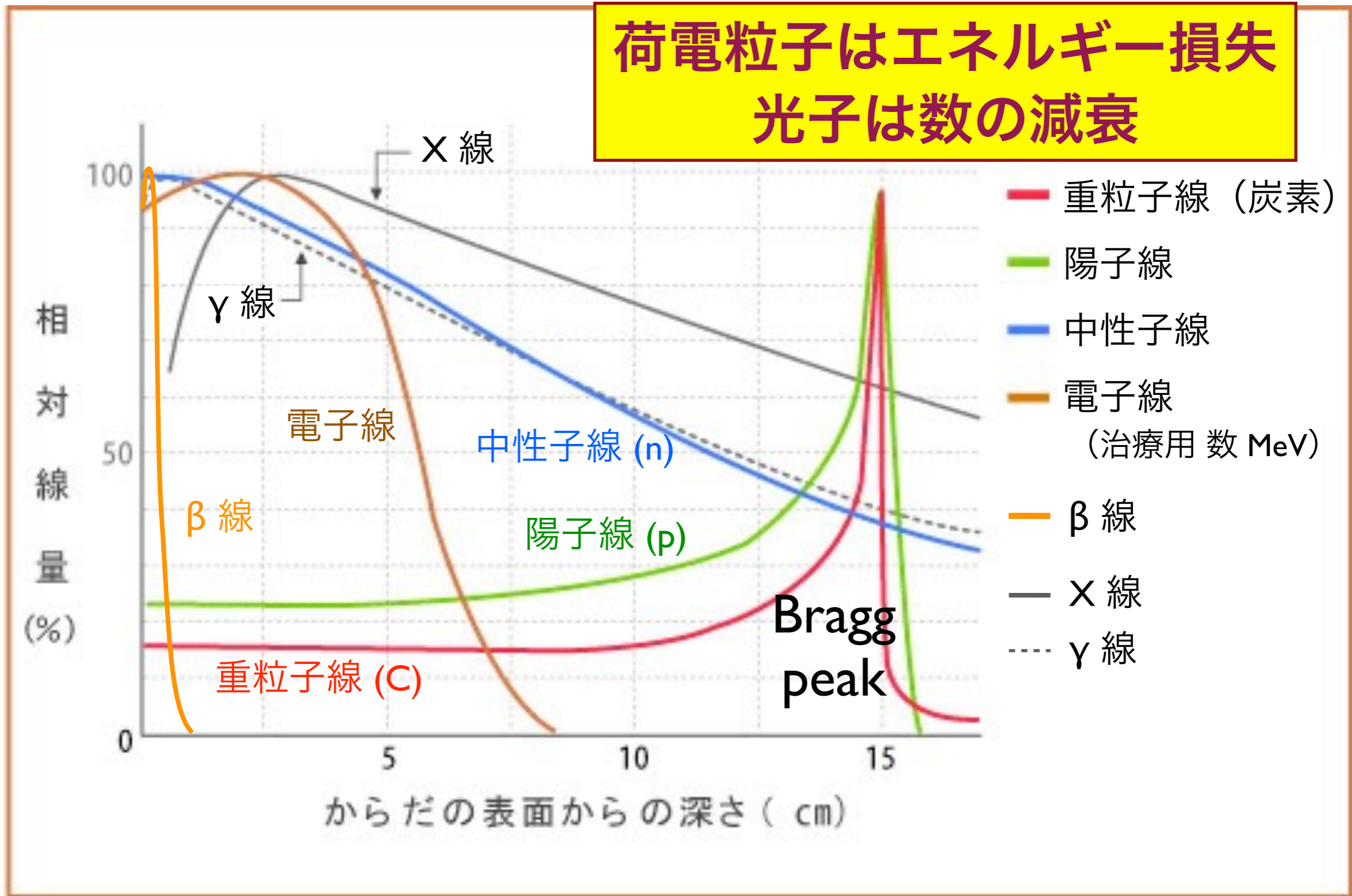
早川由紀夫教授(群馬大学)作成、7月26日版

三訂版7月26日(初版4月21日)  
等値線作成: 早川由紀夫(群馬大学) (kipuka.blog70.fc2.com/)  
@nnistarさんの地図 (www.nnistar.com/gmap/fukushima.html)  
Contour lines drawn by Yukio Hayakawa (Gunma Univ.),  
Source: @nnistar  
地図製図: 萩原佐知子  
背景地図には電子国土ポータル (portal.cyberjapan.jp) の地図を使用しました。



陽子(p)、 $\alpha$ 、重粒子線は飛程が揃っている。  
 電子( $\beta$ )は散乱されやすく、飛程を直線距離(物質厚)で測るとばらつきが大きい。  
 中性子(n)、光子(X, $\gamma$ )は反応が確率的に起こるため、指数関数的減衰をする。

**荷電粒子はエネルギー損失  
 光子は数の減衰**

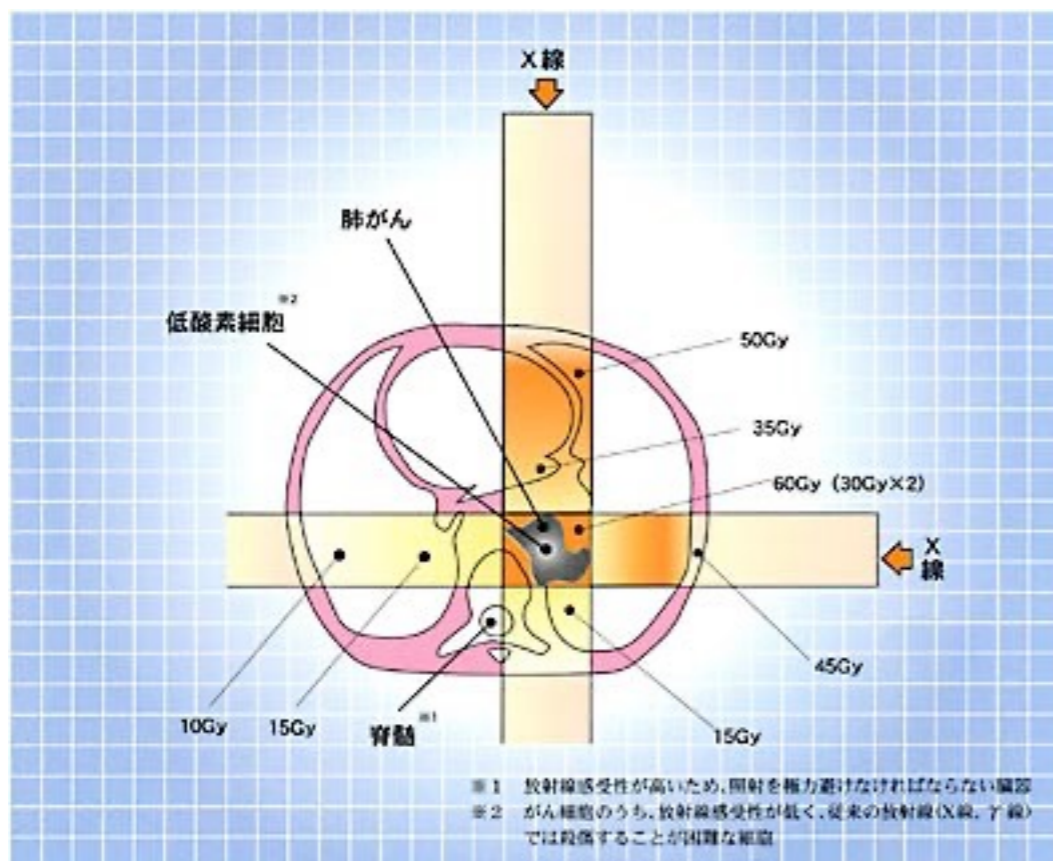


元図：群馬大学重粒子線医学研究センターの旧ホームページより

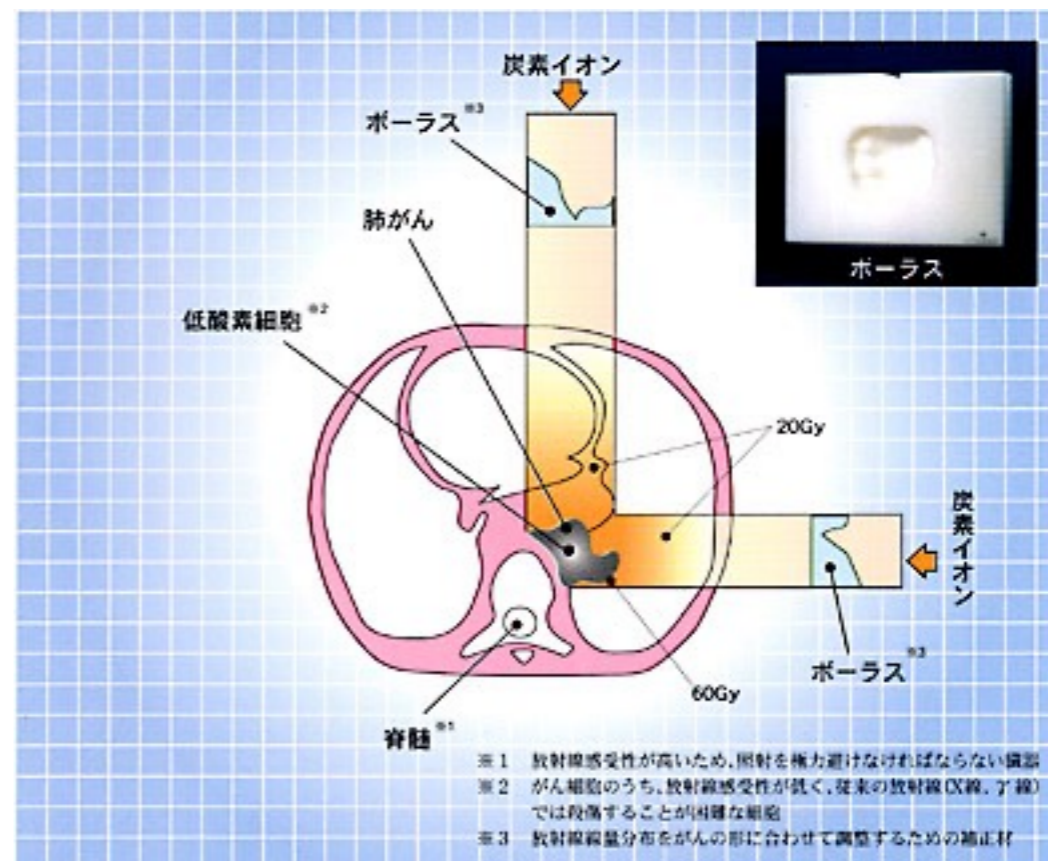
# 放射線医療：がん治療

# 数 Gy を複数回

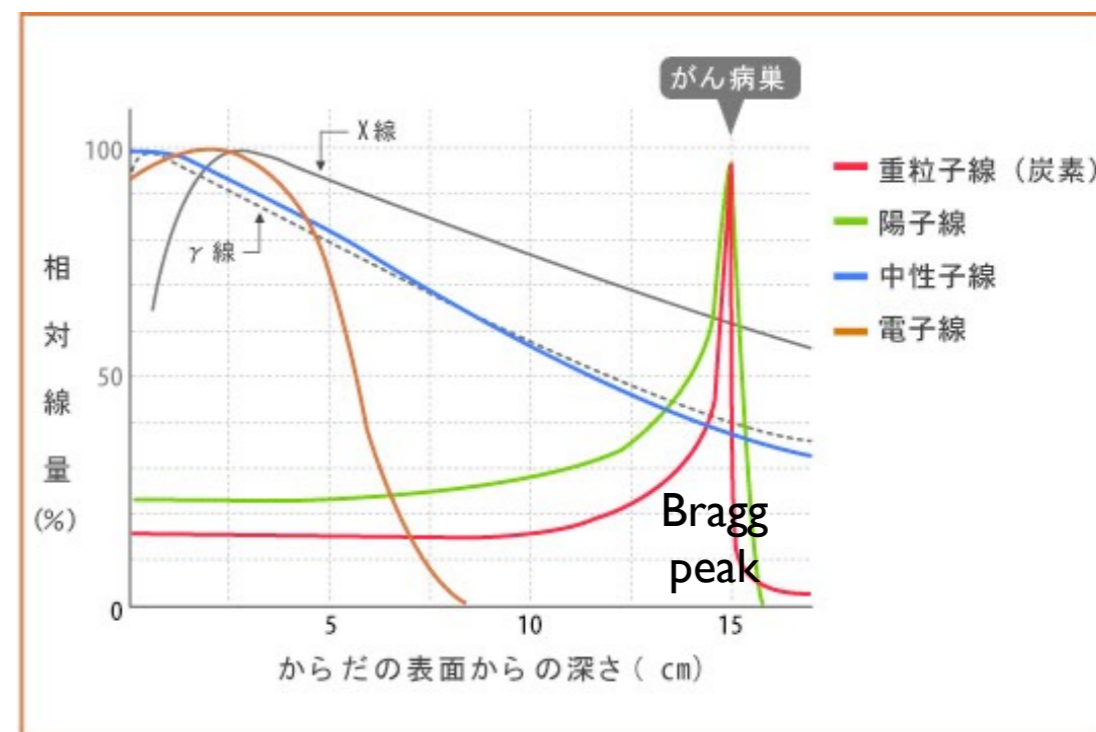
## X線



## 重粒子線 (炭素イオン)

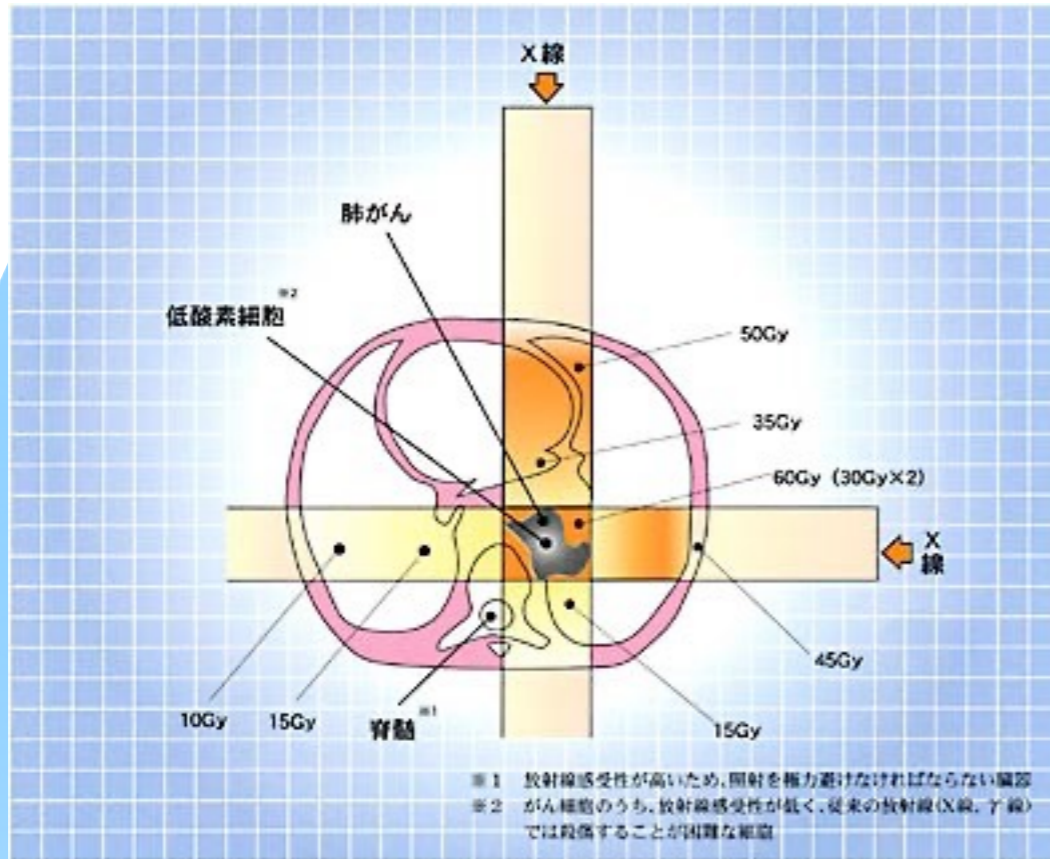


他には：ガンマナイフ、  
陽子線、パイ中間子  
研究中：反陽子



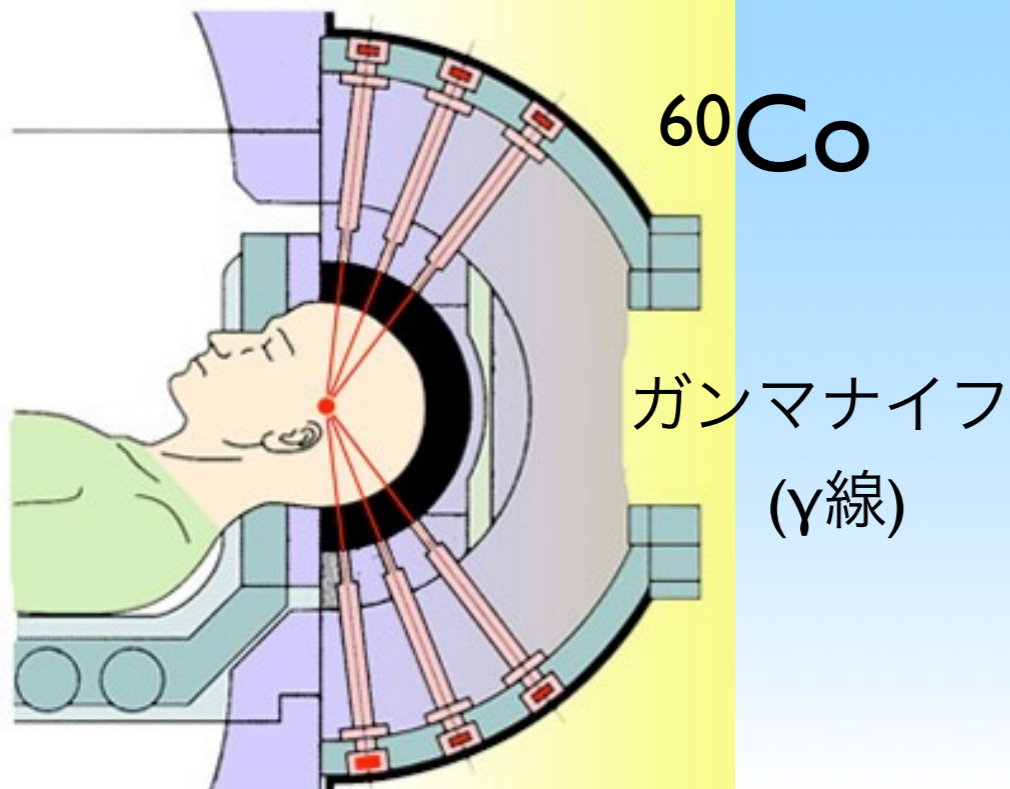
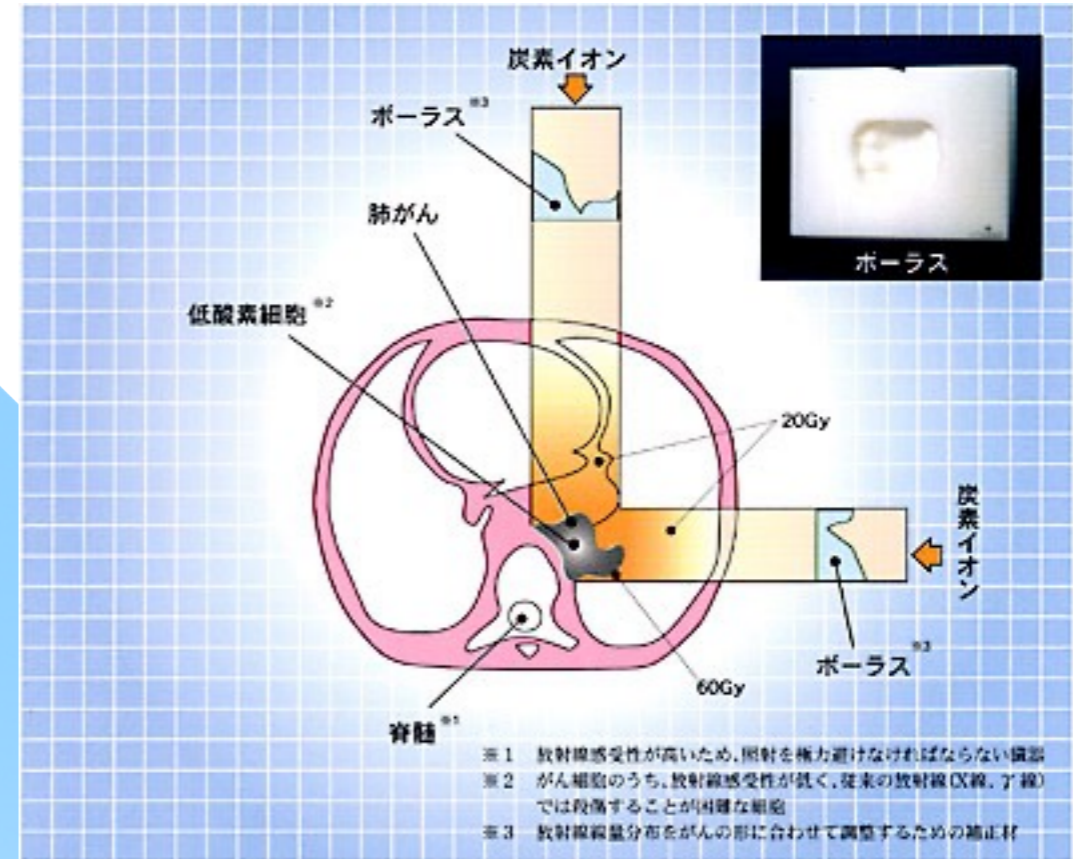
# 放射線医療：がん治療

## X線



# 数 Gy を複数回

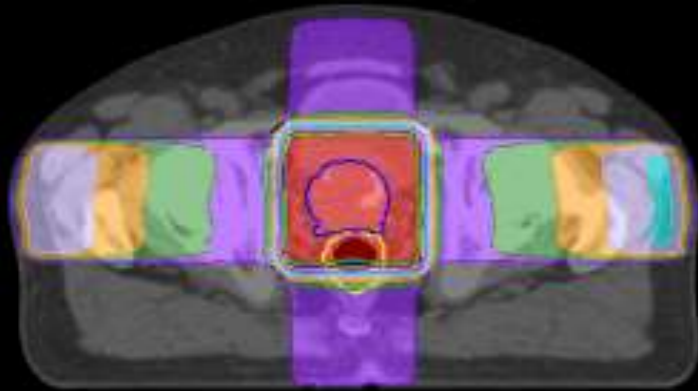
## 重粒子線 (炭素イオン)



サイバーナイフ  
(X線)

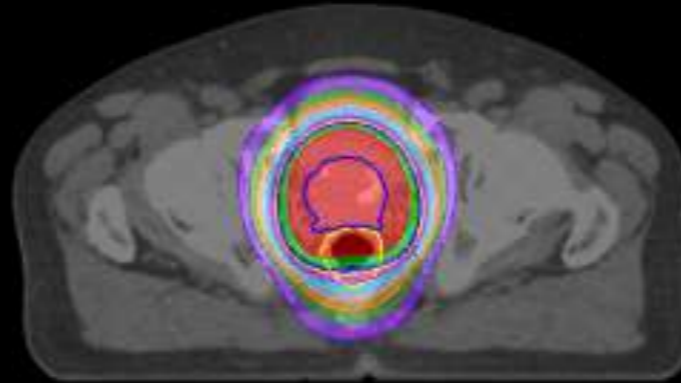
# 前立腺がんの例

前後左右4門照射



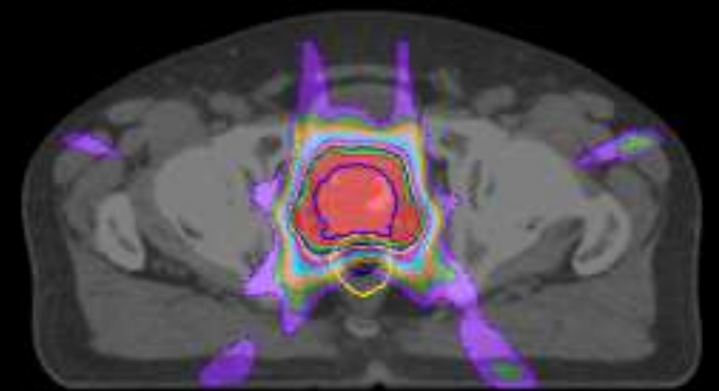
- 前立腺の他に、膀胱や直腸が高線量域に含まれる
- 70Gyが限界（難治性の晩期粘膜障害の発現を許容範囲に抑えるためには、実際には60～66Gy程度が限界となる）

3次元原体照射



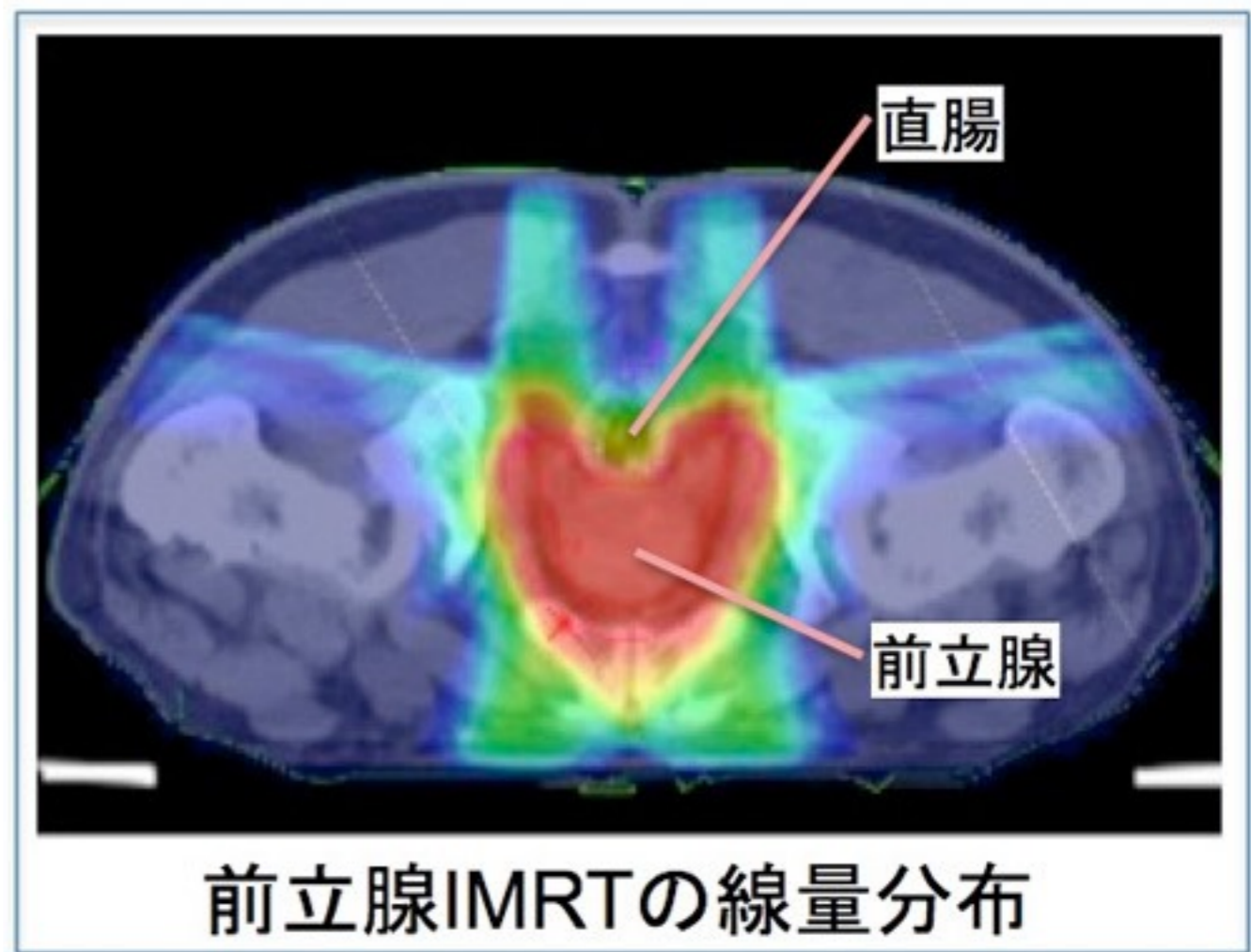
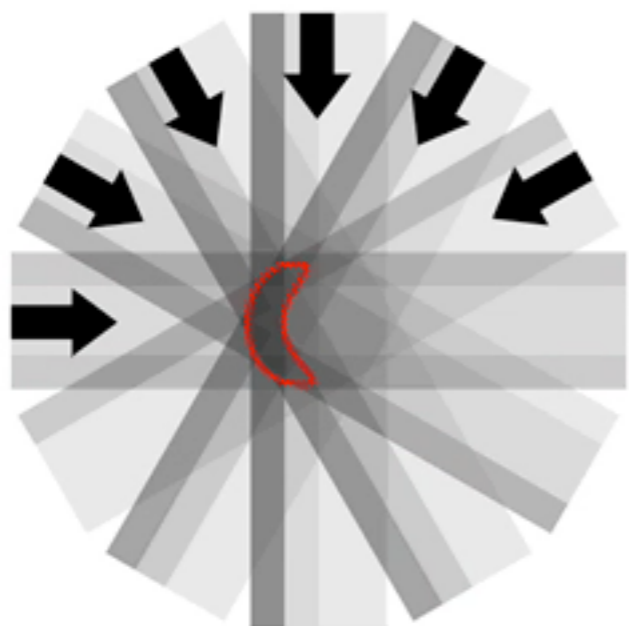
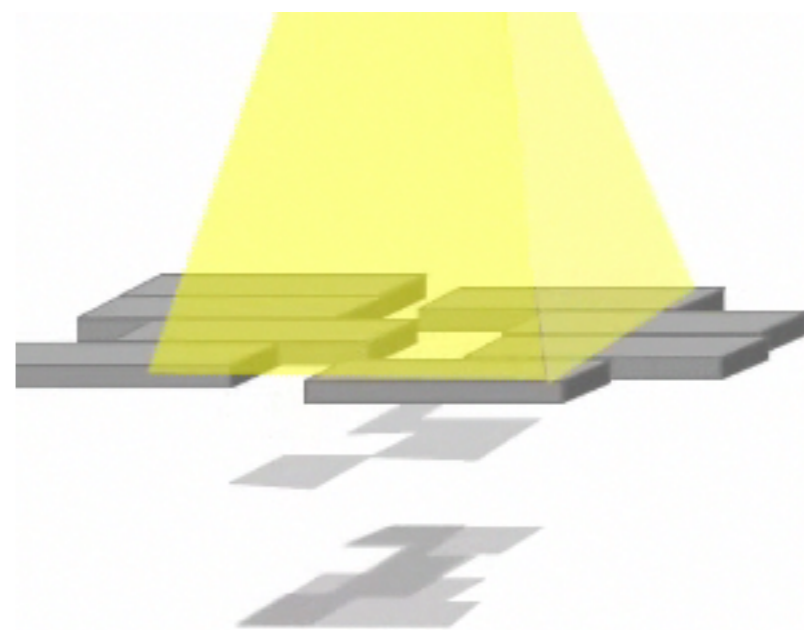
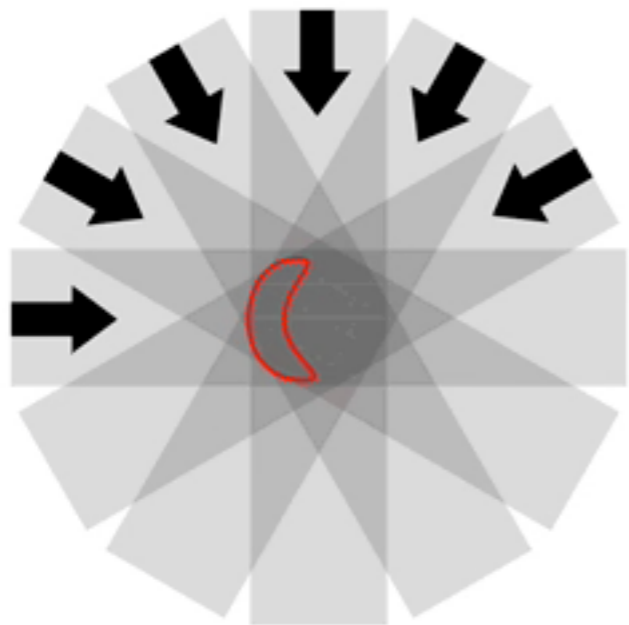
- 前立腺に線量が集中し、膀胱や直腸への線量が低く抑えられる
- 70Gy以上の投与が可能であるが、線量の集中に限界があり、線量増加に伴う副作用の増加が懸念される

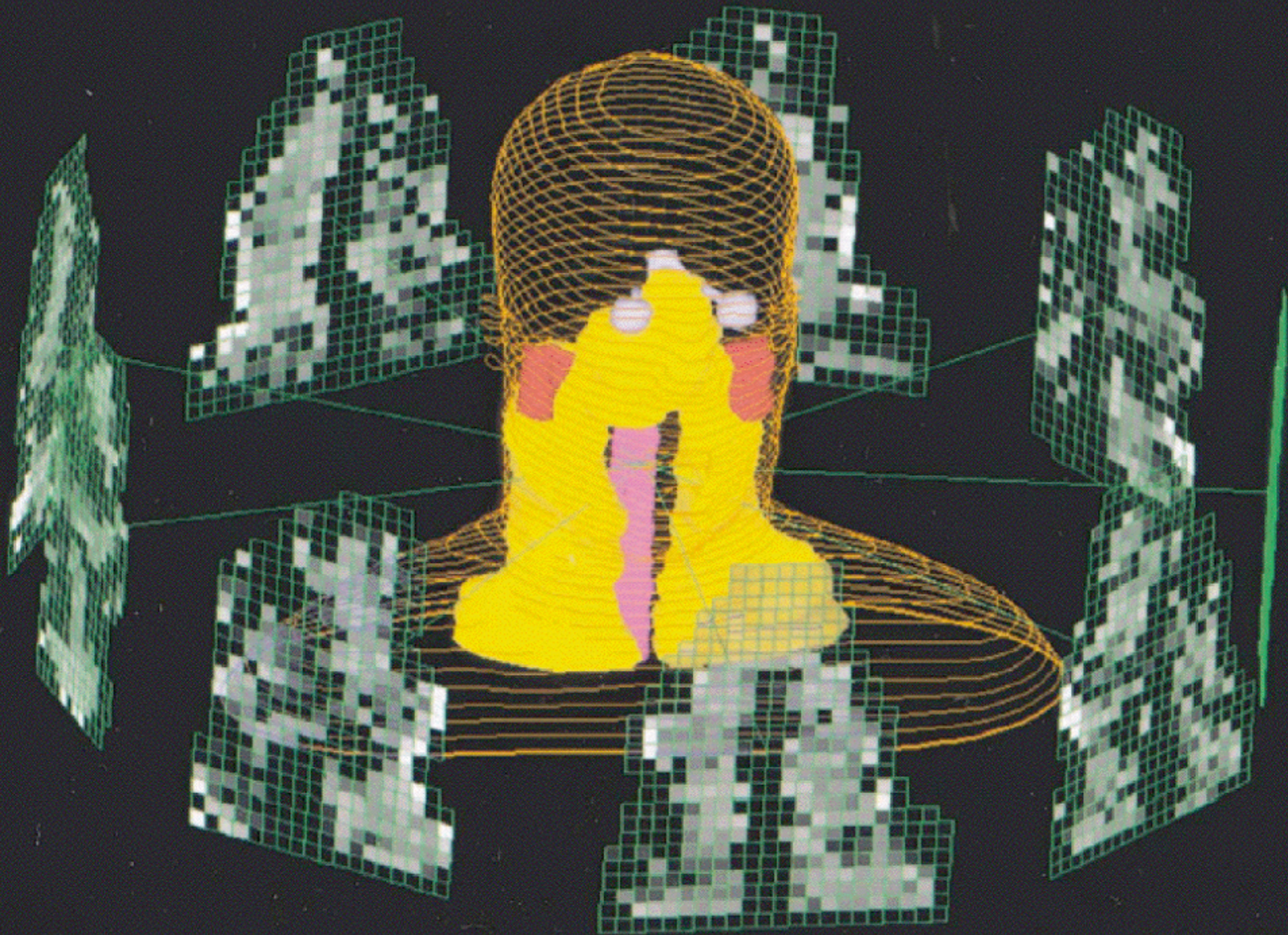
強度変調放射線治療



- 前立腺への集中性がさらに強化
- IGRTを併用することで、3次元原体照射を超える高線量を安全に投与することが可能

外照射法の進歩を背景に、前立腺癌に対する線量増加効果が積極的に検討されている。





# 放射線と物質との相互作用

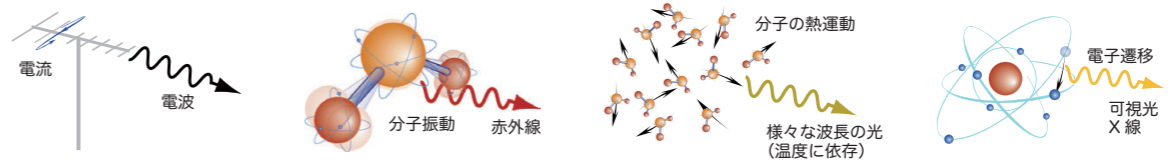
## 光子の物質中での減衰過程

# 光マップ THE LIGHT MAP

光は、自然界にいつも存在していて、あらゆる植物や生物、人間の生命と営みを支えています。太陽からの光は、地球上に温度をもたらす、植物の光合成のエネルギーとなります。蛍光灯やランプは私たちの生活を明るく照らします。レーザーは材料を加工したり、手術や治療をします。ラジオやテレビや携帯電話の信号を送る電波、電子レンジで使われるマイクロ波、電気こたつや電熱線が加熱に用いる赤外線、日焼けや殺菌作用がある紫外線、レントゲン写真に用いるX線や、原子崩壊のときに発生するγ線などすべて、光のなかまです。この光マップは、光が自然界や私たちの生活の中でどのようにつくられ、どのように使われているかをまとめたものです。

## 光の起源

光はどこで生まれるのでしょうか。光子（フォトン）は電子が加速度を持って動くことによって生まれます。アンテナの中で電子が動くと、低い周波数の光である電波が出ます。複数の原子から構成されている分子の中で原子が互いに動く（分子振動）と、原子の中にある電子も一緒に動くので光が生まれます。その光は赤外線です。水や空気の温度が高くなると、水分子が激しく動き回り、電子も共に動くので光が出ます。温度と光の周波数は対応します。分子の振動はランダムですので、熱が発する光（黒体放射）は単色の光ではなく様々な周波数の光が出ます。原子の周りを回る電子が別の軌道に移ると（電子遷移）、光が出ます。これは振動数の高い可視光です。原子の内殻の電子が遷移するとX線が生まれます。

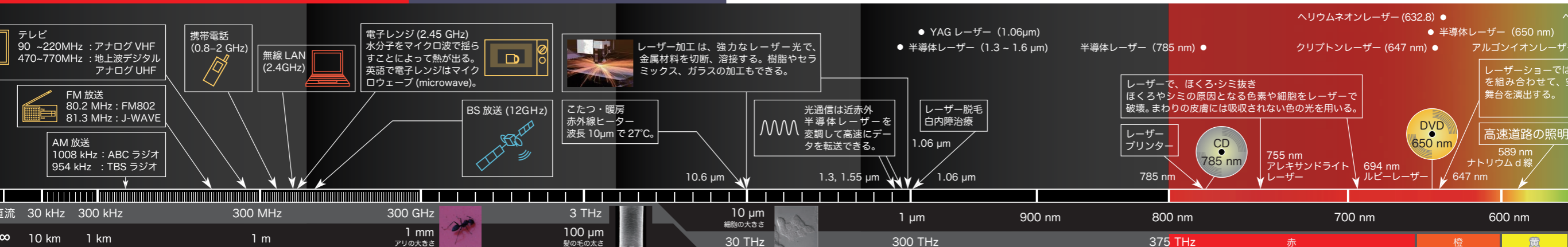


## 波としての光

光は空間横波です。振動数は1秒間の振動の回数（周波数）です。振動数と距離のかけ算は波長です。振動数や波長に関係なく一定で進む速度があります。

## 粒としての光

光の強度は光子の密度（振動数）に相当するエネルギーで表されます。ちょうど、電流が明るいか暗いかは光子の密度（振動数）に相当するエネルギーで表されます。



## 電波領域 (電波も光)

アンテナで送受信

- テレビ: 90~220MHz: アナログ VHF, 470~770MHz: 地上波デジタル アナログ UHF
- 携帯電話 (0.8~2 GHz)
- 無線 LAN (2.4GHz)
- 電子レンジ (2.45 GHz): 水分子をマイクロ波で揺らすことによって熱が出る。英語で電子レンジはマイクロウェーブ (microwave)。
- FM 放送: 80.2 MHz: FM802, 81.3 MHz: J-WAVE
- AM 放送: 1008 kHz: ABC ラジオ, 954 kHz: TBS ラジオ
- BS 放送 (12GHz)
- レーザー加工: 強力なレーザー光で、金属材料を切断、溶接する。樹脂やセラミックス、ガラスの加工もできる。
- 光通信: 近赤外半導体レーザーを変調して高速にデータを転送できる。
- レーザー脱毛/白内障治療: 1.06 μm
- レーザープリンター: 785 nm
- CD: 785 nm
- 755 nm アレキサンドライトレーザー
- 694 nm ルビレーザー
- 647 nm ナトリウムd線
- 589 nm ナトリウムd線
- 600 nm ナトリウムd線

## 遠赤外光

低温の黒体放射

電波望遠鏡: 波長約1mmから1cmの電波を検出する望遠鏡。日本では野辺山宇宙電波観測所にある。温度が非常に低い星間ガスなどからの黒体放射を観測する。

テラヘルツ波: 様々な物質を透過し、X線に比べて人体への影響が少ないため、X線に代わる安全検査技術として期待されている。

黒体放射: 物体はその温度に応じて様々な波長の光を放射する。この現象を黒体放射という。

自由電子レーザー (FEL): 紫外から赤外までの広範囲で波長を自由に選択して強力な光をつくる。高速の自由電子を磁場によって蛇行させて発生したシンクロトロン放射からレーザー光線をつくる。国内では大阪大学、東京理科大学などにある。

## 中赤外光

分子振動・格子振動、有機分子が見える領域

有機分子の指紋領域: 中赤外は分子の振動単位が豊富。有機分子の「指紋領域」と呼ばれる。

二酸化炭素 (C=O 基): 4.3 μm  
水・アルコール (O-H 基): 2.9 μm  
メタン (C-H 伸縮): 3.3 μm  
トルエン (ベンゼン環): 6.7 μm

二酸化炭素の吸収スペクトル

すばる望遠鏡: ハワイ島にある日本の大型天体望遠鏡。可視光から中赤外光の光を使って宇宙を探る。直径 8.2m の反射鏡は世界最大級。

気象衛星ひまわり: 10 μm 付近 (大気窓): 黒体放射から雲や地表温度を観測する。6~7 μm (水の吸収): 水蒸気の分布を観測する。

## 近赤外光

物質と相互作用しない、物質が透明な領域 (光通信に使われる)

監視カメラ (ナイトビジョン): 近赤外光を照射し、カメラで検知する。目に見えない波長なので、暗闇でも相手に気付かれない。防犯のほか、軍事用にも用いられる。

センサー・赤外線通信 (IrDA): 自動ドアやトイレ、照明用のセンサーや、テレビやステレオのリモコン、パソコンの通信にも近赤外光が使われる。

血液の赤色はヘモグロビンの色。動脈は酸素を含んで鮮やかな赤色。静脈では黒っぽい色になる。波長 800 nm で入れかわる吸収率から、近赤外光を使って血中酸素濃度を計測することができる。

3次元ナノ加工は、近赤外パルスレーザーを用いて、レーザー光の波長よりも遙かに小さい100nmの分解能で立体加工を実現。

細胞手術では、近赤外パルスレーザーを細胞内に集光して、細胞内部を加工、刺激する。

半導体量子ドット: 直径数nmの半導体粒子で蛍光を発する。小さい粒子ほど短い波長で光る。

ルビーの赤は不純物のクロムの色。世界初のレーザーはルビーから出た光。

太陽電池は、電卓、腕時計、街路灯から人工衛星にまで使われる。光のエネルギーでクリーン発電。

## 可視光

人間の目に見える光、外殻電子遷移エネルギー

紅葉: アントシアン (赤), カロテノイド (黄), クロロフィル (緑)。秋になると、葉緑素のクロロフィルが分解されてカロテノイドの黄色に、その後、アントシアンがつくられて赤色に変わる。

発光ダイオード: 発光効率の高光源として、信号機、パイロットランプ、街のイルミネーション、車のヘッドライト、光合成等、多目に使用される。

太陽が黄色に見えるのは、500nm 付近の黒体放射のため。表面温度は約 6,000°C。

ホテルの発光の源はルシフェリン。熱をほとんど出さずに発光する。

白色をつくるには青が必要。テレビの液晶の画素、CRTの蛍光体

色づくのは光の干渉

向から伝わってくる光が重なり合うと、互いにめ合ったり弱め合ったりします。シャボン玉や油膜が七色に見えるのは、これは膜の表面と反射した光が干渉するからです。立体像である(1971年ノーベル賞)は、光の干渉を使っています。光は**コヒーレント**(可干渉)であるといえます。コヒーレントな光を出す装置です。

七色に光るシャボン玉

クレジットカードのホログラム

空の青色は光の散乱

光が小さな粒子(分子)に当たると散乱します。波長の短い光は長い波長の光よりよく散乱します。空が青いのも夕焼けが赤いのも光の散乱の効果です。もとの光から色ずれて散乱する光があります。**ラマン散乱**とい、分子や結晶の振動エネルギーが光子に足し算(引き算)されるために生じます。この色のずれを計測して、半導体結晶の欠陥や分子の種類を分析する技術があります。空の色は散乱された青い光

虹の七色は光の屈折

光が空気から水やガラスに入ると、曲がります。この現象を屈折といいます。屈折率は光の波長(色)によって異なります。万有引力の法則で有名なニュートンはプリズムを使って太陽の光には様々な色が混ざっていることを発見しました。雨上がりの路地に虹が見えるのは空気中の水滴がプリズムとして太陽光を分光するからです。最先端の光学には、**負の屈折率**の物質(逆方向に光が曲がる)を人工的に作る研究が進んでいます。

折れたように見えるけど...

プリズムで屈折して色分けされた光

光は回折する

光の進路に障害物を置くと、光は障害物の裏側にも回り込んで伝わっていきます。細い光線をつくらうとして細い穴に光を通して、すぐ広がってしまいます。光の回折を利用して光を選択することができます。細かい周期構造に光を照射すると、それぞれの構造で回折した光が干渉し、角度によって違う色が見えます。CDやDVDの表面が七色に見えるのは、記録ビットの列が回折格子として働くためです。タマシヤやチョウの羽、貝殻も、表面に周期構造があって七色に見えます。このように回折で現れる色のことを**構造色**といひます。

モルフォ蝶と、羽の電子顕微鏡写真

七色に光るCDの表面

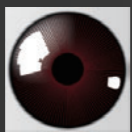
光子ロケットは光の放射圧

光が物質の境界面で屈折や反射、散乱すると、物質に力がかかります。光の放射圧は、400年前に予言されたといわれています。天文学者のケプラーは彗星(ほうき星)の尾がいつも太陽と反対側にのびのびを見て、太陽からの光の圧力のせいだと考えました。スティーブン・チューらは光の放射圧で原子を冷却する技術を発明しノーベル賞を受賞しました。SF小説には放射圧で飛ぶ光子ロケットが出てきます。JAXAやアメリカでは実際にソーラーセイル宇宙船を研究しています。



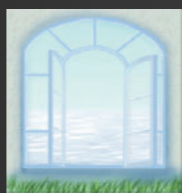
325 nm

近視矯正手術、角膜切除には、エネルギーの高い紫外光が使われる。エキシマレーザーを使って角膜を蒸発させ削り取る。サブミクロンの精度で精密に一部の角膜だけを削り角膜の形を変えて屈折矯正する。

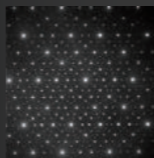


極端紫外光リソグラフィー  
極端紫外光を使って半導体に集積回路をつくる次世代のリソグラフィー技術。

水の窓  
水の吸収がない波長。水分を多く含む生物試料の観察に使えるX線。



X線回折結晶構造解析  
原子の配列による回折を利用し、配列パターンや原子間距離を測る技術。原子間隔に相当する波長のX線を使う。タンパク質分子の立体構造も知ることができる。



XFEL(X線自由電子レーザー)  
SPring-8に自由電子レーザーの発振器を建設し、X線の波長域でレーザー光を得る施設。2006年から建設が始まり、2010年に完成を目指している。



### 紫外光

外殻電子遷移エネルギー

紫外線洗浄  
半導体基板や金属、セラミックス、プラスチック表面の洗浄、食器などに紫外線を使う。

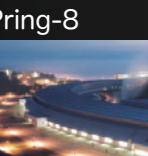
紫外線殺菌  
紫外線を与えずに、水、食品、薬品などを殺菌する。



地球上の生物に害のある紫外線を遮ってくれる。

触媒は、紫外光を吸収して、窓ガラスや壁の汚れを分解する。

酸化チタン



真空紫外  
200 nm~10 nmの紫外線は大気の中を伝わらない。太陽からの真空紫外線は、地表まで到達しない。微細加工などの応用が期待されている光だが、真空環境が必要。

eV (エレクトロンボルト)  
光のエネルギーを表す単位にeVがある。波長1μmの光は1.24eVに相当する。光の波長とエネルギーは反比例し、波長100nmの光は12.4eV、波長1nmでは1.24 keV(1240 eV)と、波長が短いほど高いエネルギーを持つ。

アト秒レーザー  
アト秒(atto)は0.000000000000000001秒(0が18個)。そんな一瞬しか光らないパルスレーザー。このレーザーを使えば、電子が止まって見える。100アト秒では光はたった30nmしか進めない。真空紫外線や軟X線の光でつくられる。

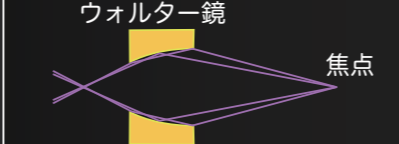
### 軟X線 (極短紫外を含む)

内殻電子遷移エネルギー、水に吸収されない

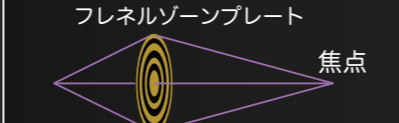
レーザープラズマ光源  
高出力のレーザー光をターゲットに当てて発生するプラズマから軟X線を出す。未来の半導体製造光源。

軟X線顕微鏡  
「水の窓」を使えば、高い空間分解能で生物試料を生きたまま観察できる。軟X線は大気をほとんど伝わらないので、装置を真空中に置く。

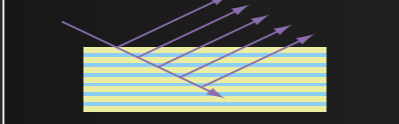
X線のレンズ  
軟X線やX線の領域では、ガラスも金属も屈折率がほぼ1.0で、反射も屈折もしない。浅い角度の反射でX線の進行方向を変えて集光する。



ゾーンプレートでX線を回折して集光する方法もある。



反射には、Mo/SiやCr/Scなどの多層膜が用いられる。



静電気除去  
空気中の分子を分解してイオンを発生し、基板の帯電を除去する。

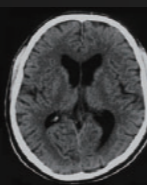
### X線

内殻電子遷移エネルギー

レントゲン写真  
からだが見える。X線が透過しにくい骨が影となって映る。胃を見るときはバリウム(造影剤)を飲む。空港の手荷物検査もX線。



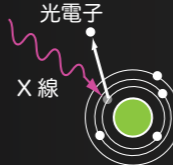
X線CT (コンピュータ断層撮影)  
様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。



X線天文衛星  
X線は大気層で吸収されるため、望遠鏡を搭載した衛星を宇宙まで飛ばして観測する。



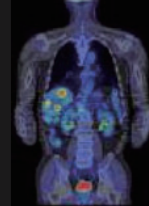
XPS(X線光電子分光)  
X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。



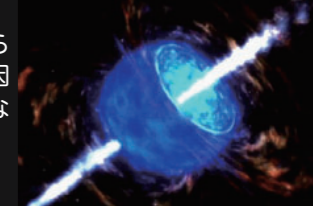
### γ線

原子核・素粒子の遷移エネルギー

PET (ポジトロン断層法)  
放射性分子をマーカーにした新しいがん検診技術。



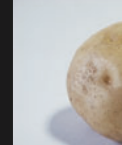
γ線バースト  
太陽系外からやってくる原因不明の突発的なガンマ線。



強い放射線  
強力なX線やγ線は人体に致命的な障害をもたらす。

放射線治療  
弱い放射線を使えばがん細胞を退治できる。

γ線滅菌  
弱いγ線なら医療器具などの滅菌にも使える。じゃがいもの発芽防止にもγ線を照射する。



一家に1枚 光マップ <http://stw.mext.go.jp/>

## 荷電粒子 ( $\alpha$ 線・ $\beta$ 線など) の減速 (エネルギー損失)

荷電粒子は物質中の多数の電子を蹴散らかしつつ  
徐々にエネルギーを失って減速する。

重い粒子は飛程がほぼ揃っている。

単位距離当たりの**エネルギー損失**  $-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$  が重要

## 光子 (X線・ $\gamma$ 線) の減衰 (減弱)

光子は原子に吸収されたり、大きく散乱されて  
一気にエネルギーを失う反面、何も相互作用せず  
素通りするものも多い。☞

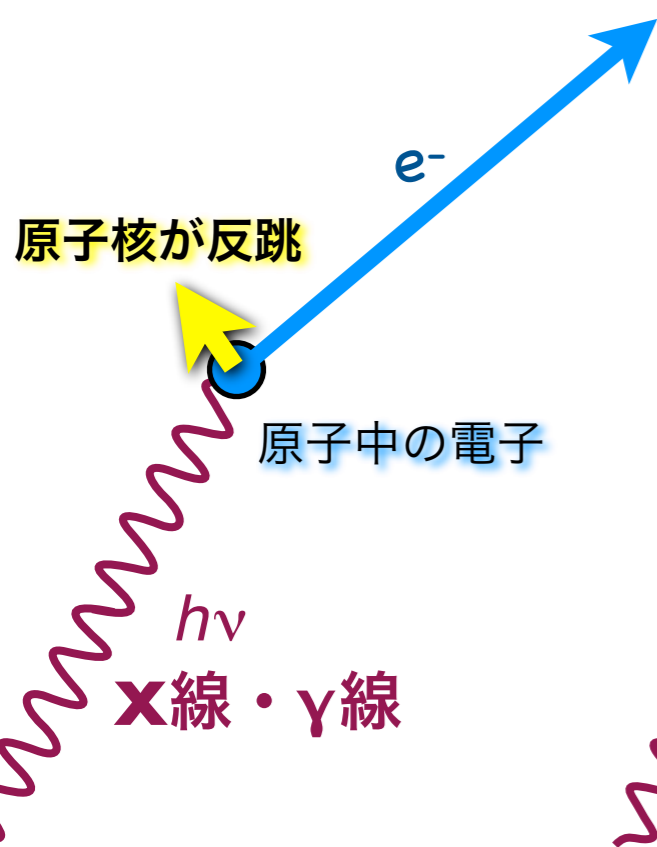
**光子数の指数関数的減少**

**反応断面積  $\sigma$**  (単位距離当たりの**反応確率**を与える) が重要



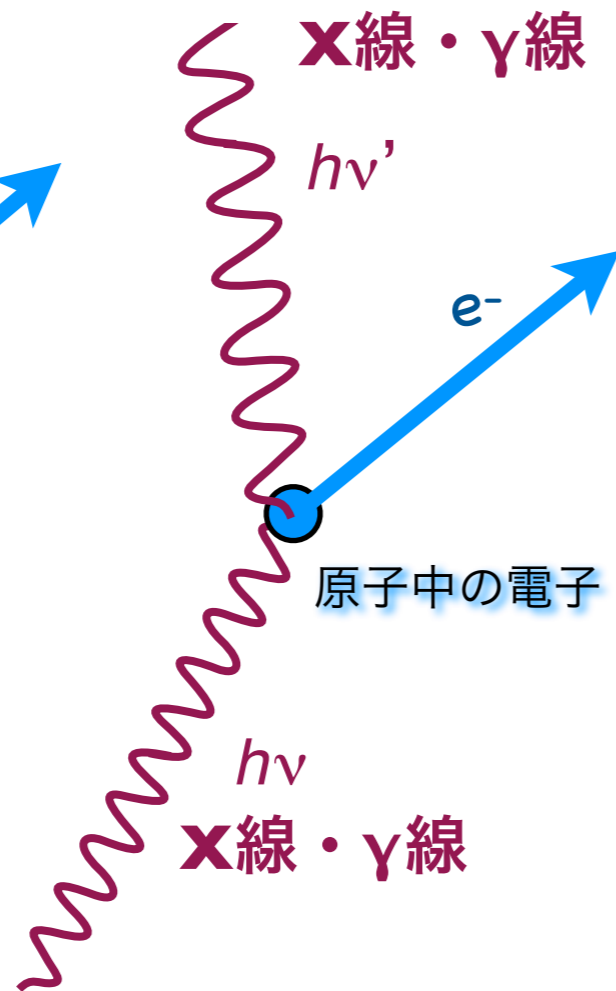
# 光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

## 光電効果



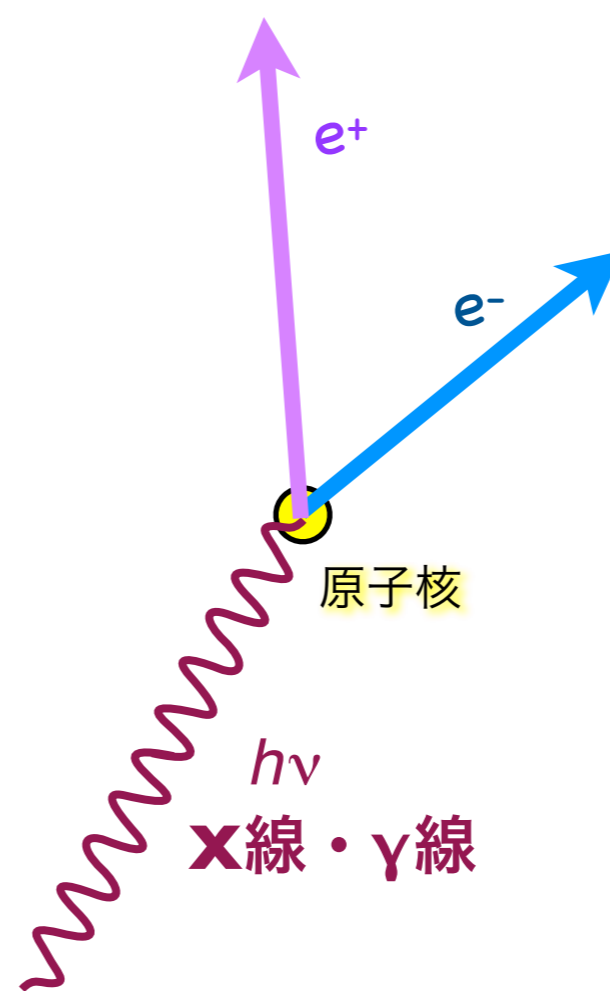
光子が原子中の電子1個をたたき出す。光子は消滅。

## コンプトン散乱



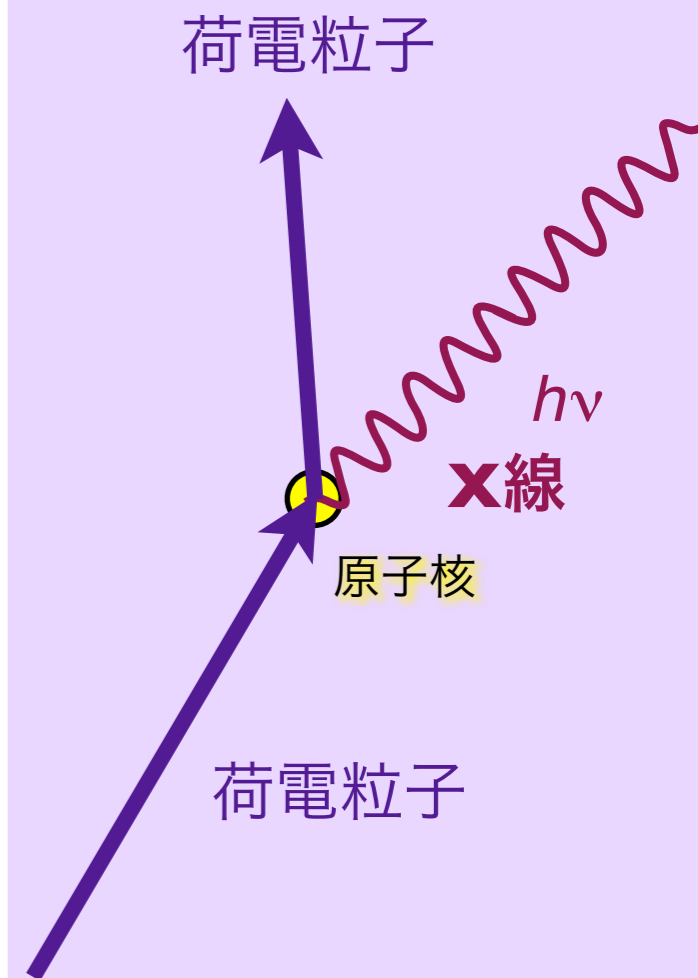
光子が電子1個に散乱され、光子は大きくエネルギーを減じる。

## 電子対生成



MeV以上の光子が電子・陽電子の対を生成する。

## 制動放射



荷電粒子が制止したり軌道を曲げられたりするとき光子を放出する。

高エネルギーの電子線 (β線と同じ) が発生

# 光子

## 反応断面積

$$1 \text{ Mb} = (0.1 \text{ \AA})^2$$

1 Mb

1 kb

$$1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2 = (10 \text{ fm})^2$$

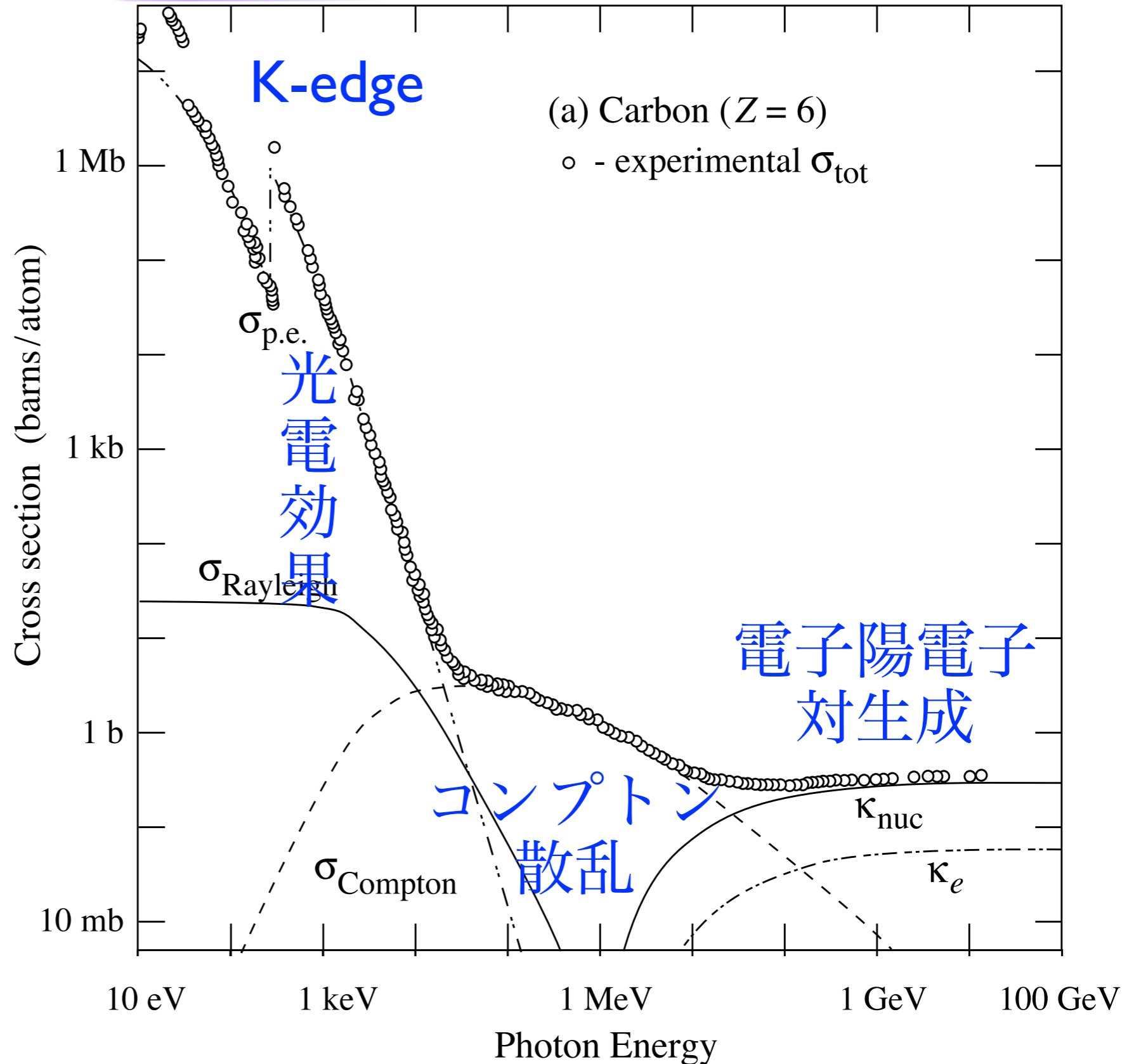
1 b

紫外線

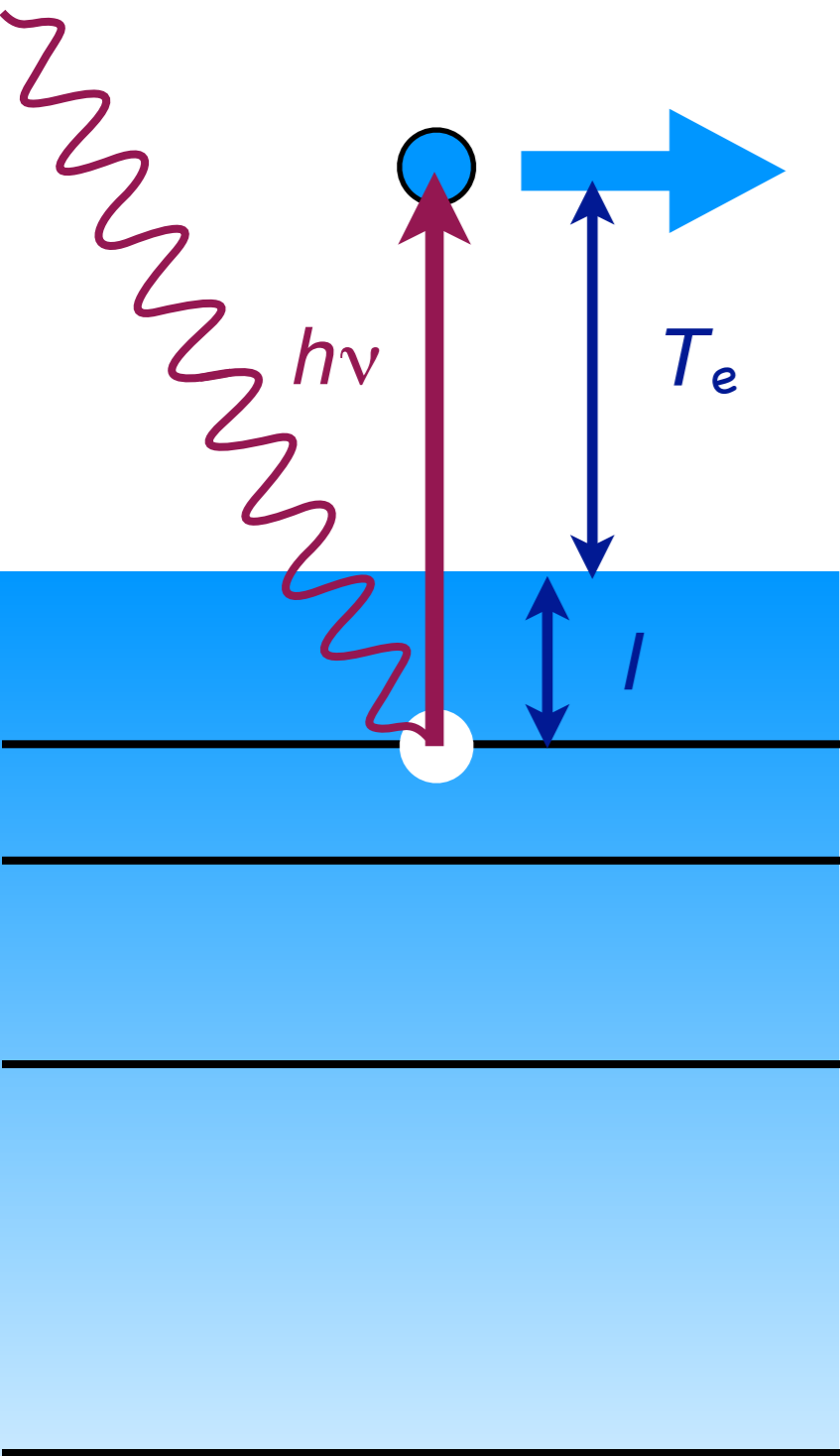
X線

γ

線



# 光電効果

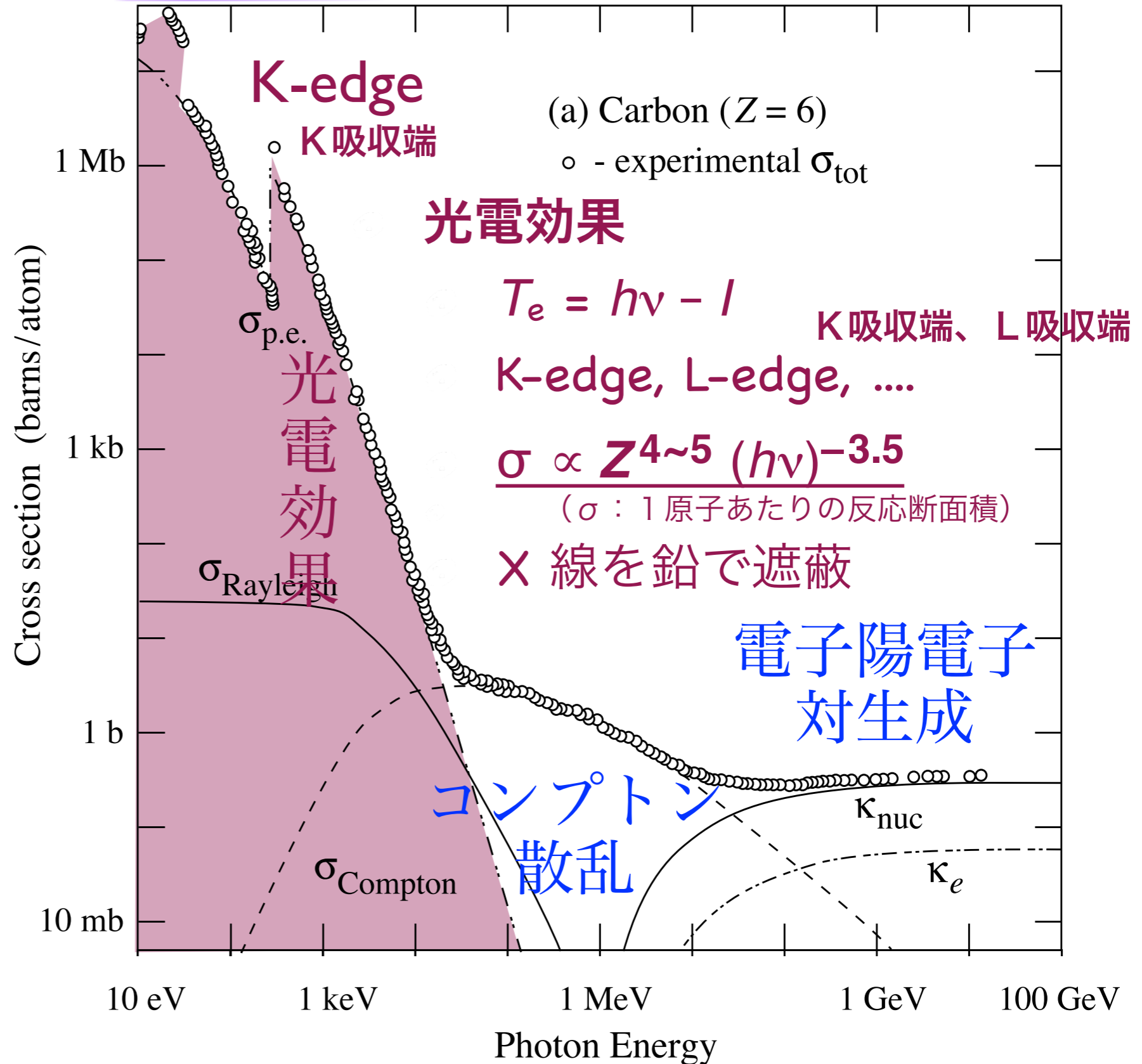


紫外線

X線

γ

線



# 光電効果

紫外線

X線

γ線

線

L-edge  
L吸収端

K-edge  
K吸収端

(a) Carbon (Z = 6)

○ - experimental  $\sigma_{tot}$

光電効果

$$T_e = h\nu - I$$

K吸収端、L吸収端

K-edge, L-edge, ...

$$\sigma \propto Z^{4\sim 5} (h\nu)^{-3.5}$$

( $\sigma$ : 1原子あたりの反応断面積)

X線を鉛で遮蔽

電子陽電子  
対生成

光電効果

コンプトン  
散乱

原子核が反跳

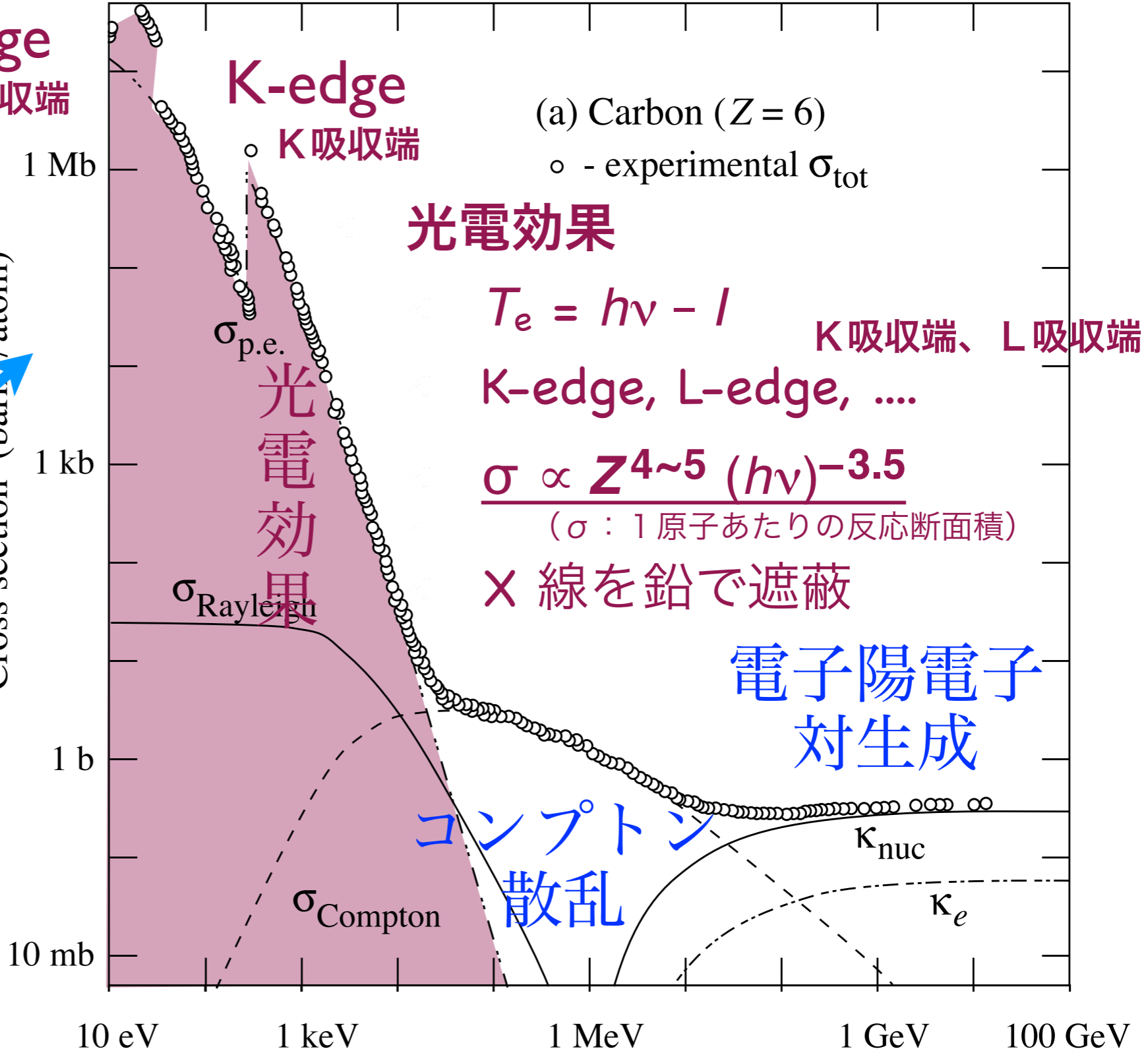
$e^-$

原子中の電子

$h\nu$

X線・γ線

Cross section (barns/atom)



# コンプトン散乱

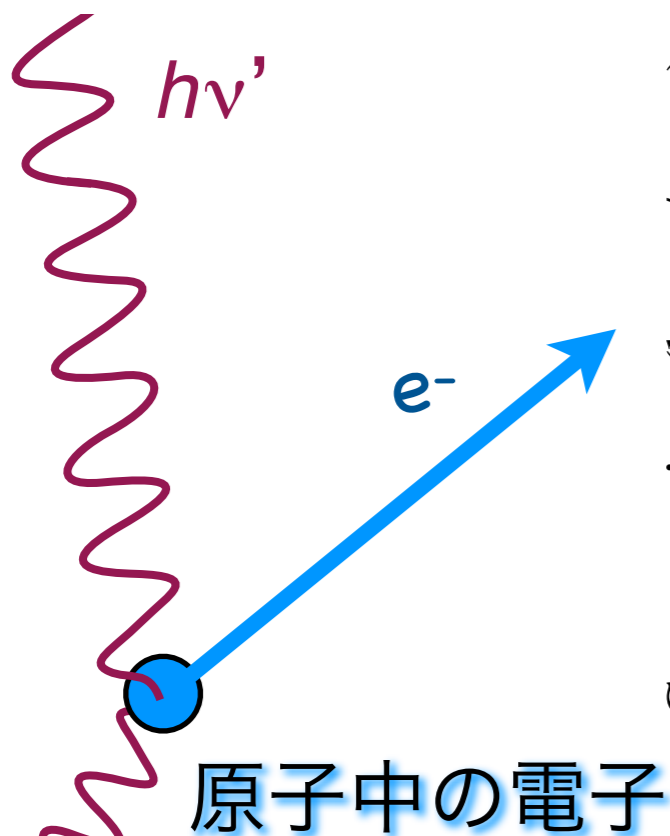
紫外線

X線

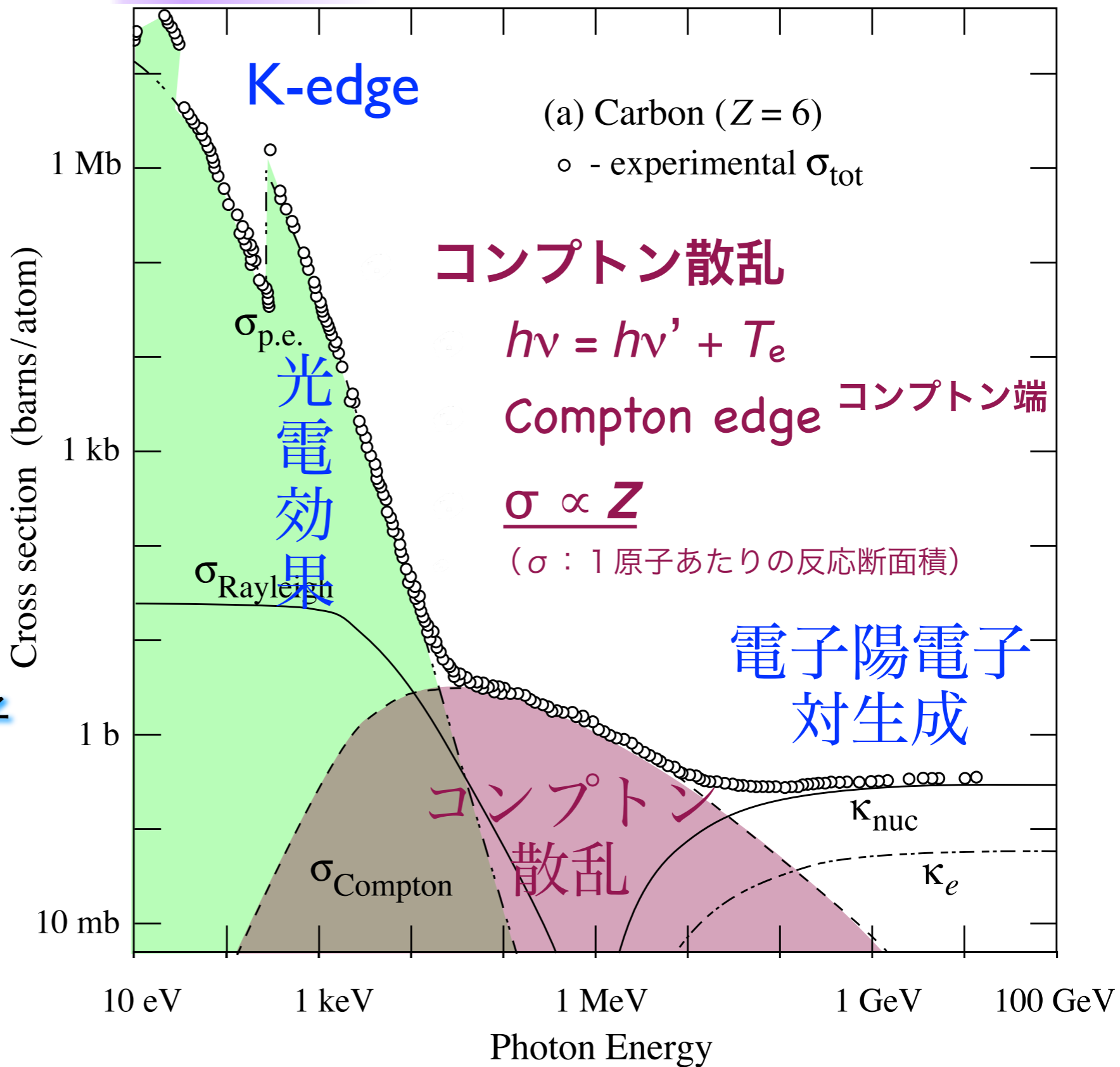
γ線

線

X線・γ線



X線・γ線





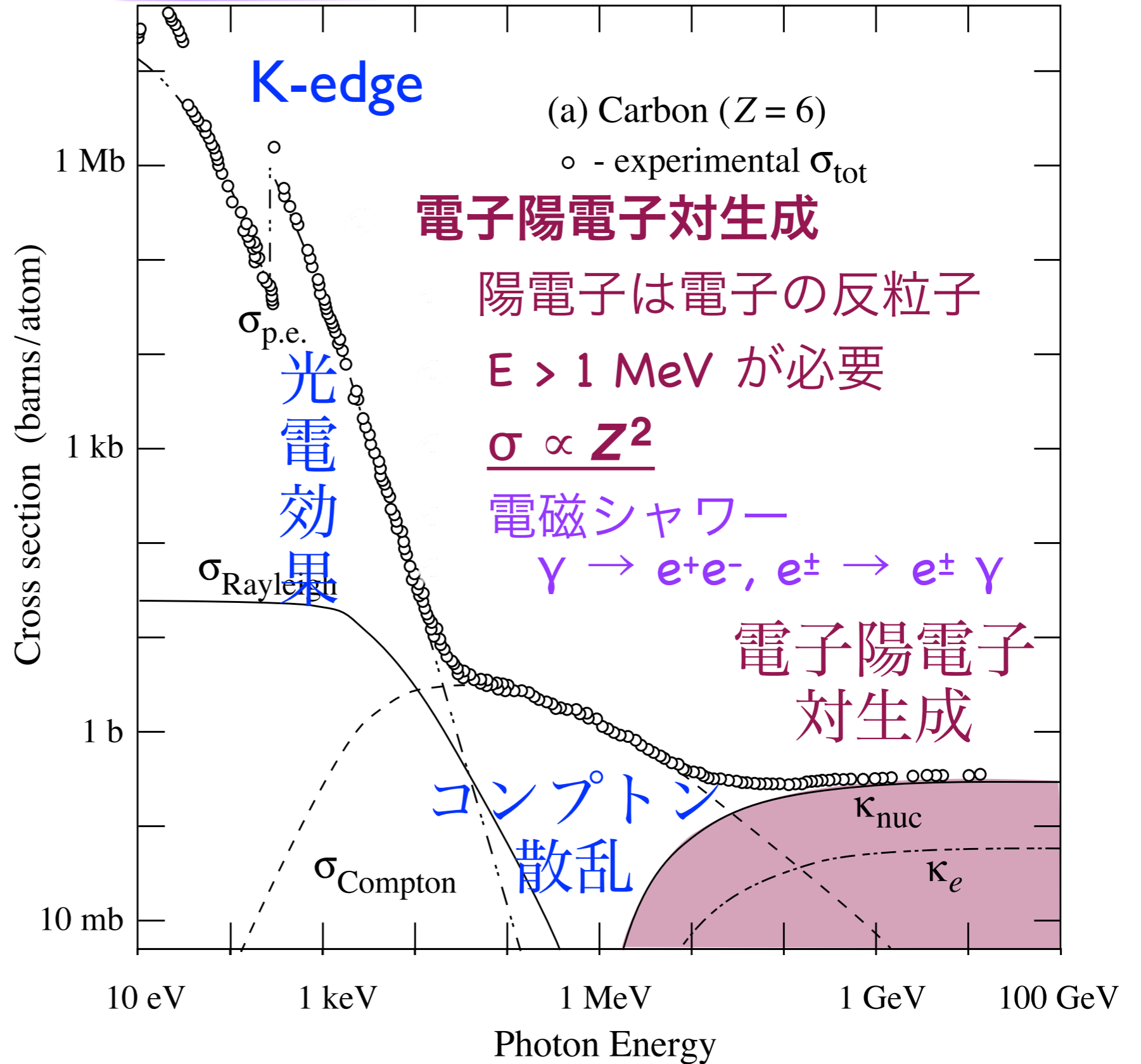
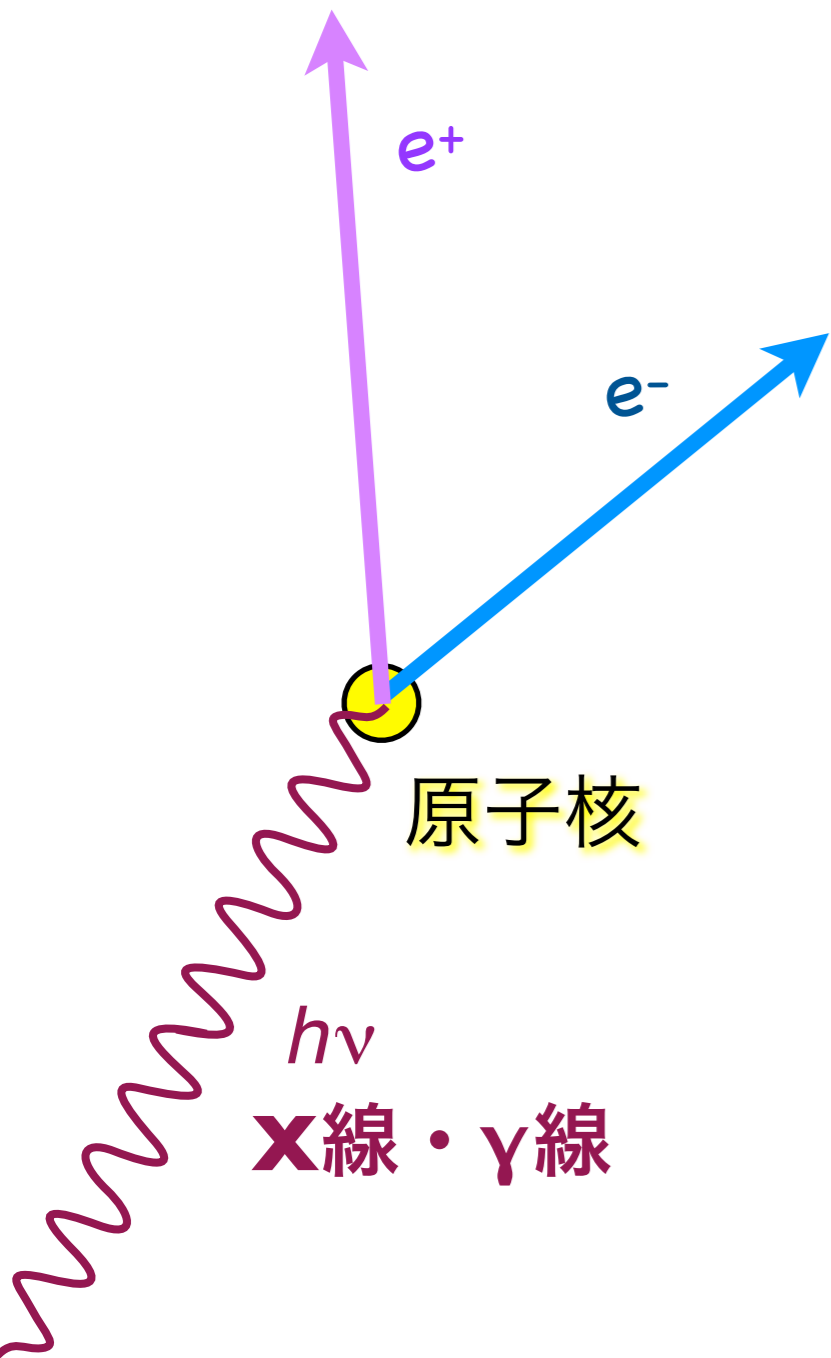
# 電子対生成

紫外線

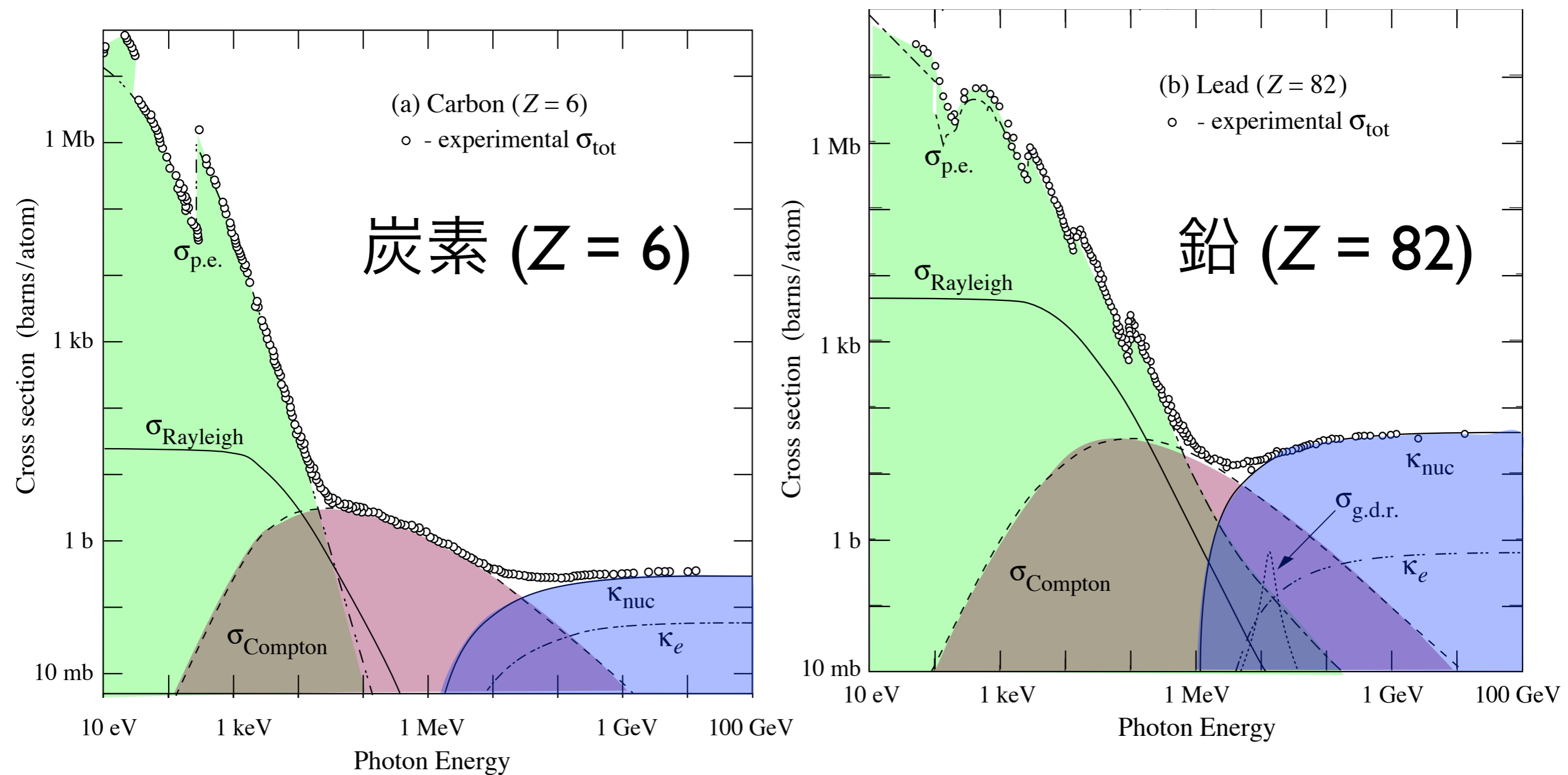
X線

γ線

γ線



# 光子の反応断面積の物質依存性



光電効果  $\propto Z^{4\sim 5}$

コンプトン散乱  $\propto Z$

電子対生成  $\propto Z^2$

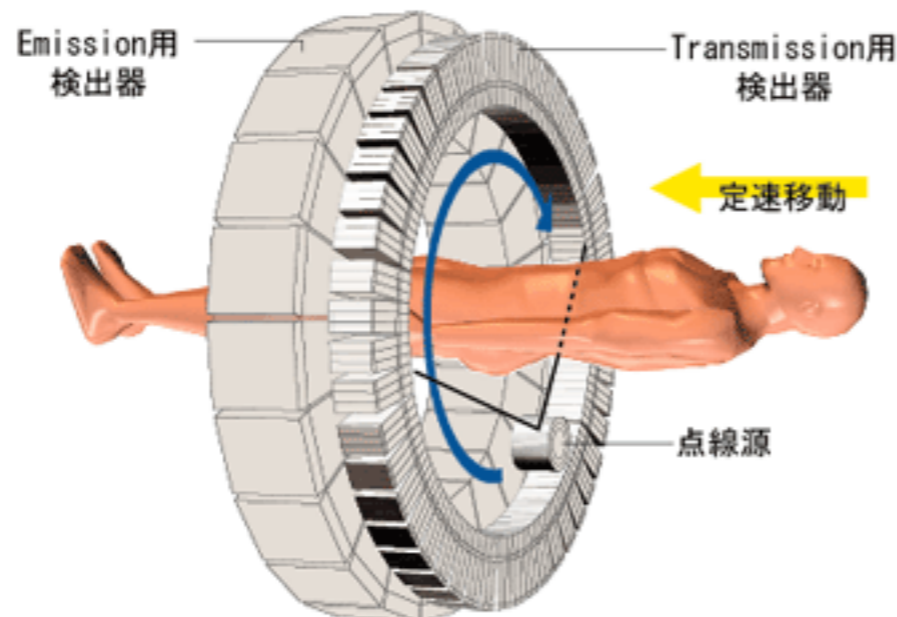
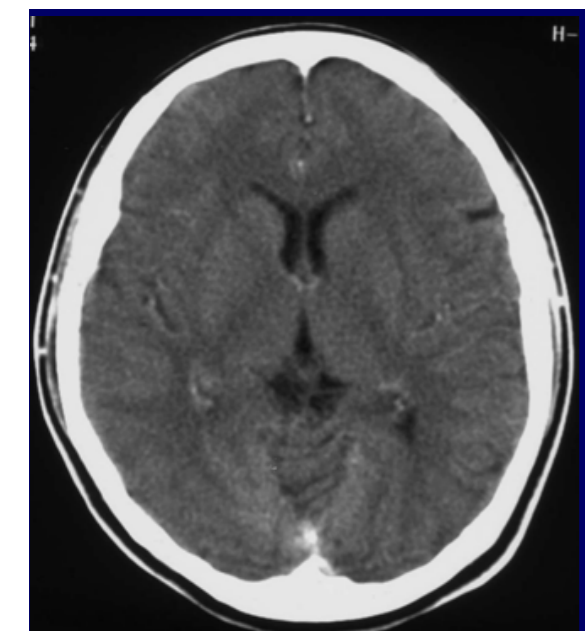
# レントゲン(X線)撮影

吸収率の差を利用して撮像する。



(減弱)  
**造影剤 (I, Ba, Xe) : Z 大 = 減衰係数 大**  
光電効果やコンプトン散乱の反応断面積は  
原子番号 Z が大きい元素ほど顕著に大きい。

## X線 CT



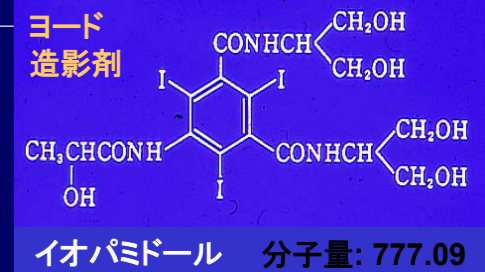
### X線検査用造影剤

#### \* 陽性造影剤

	元素	原子番号	K吸収端
・ヨード造影剤: 血管造影用	I	53	33.16 keV
・硫酸バリウム: 消化管造影用	Ba	56	37.41 keV
・キセノンガス(脳血流CT)	Xe	54	34.56 keV

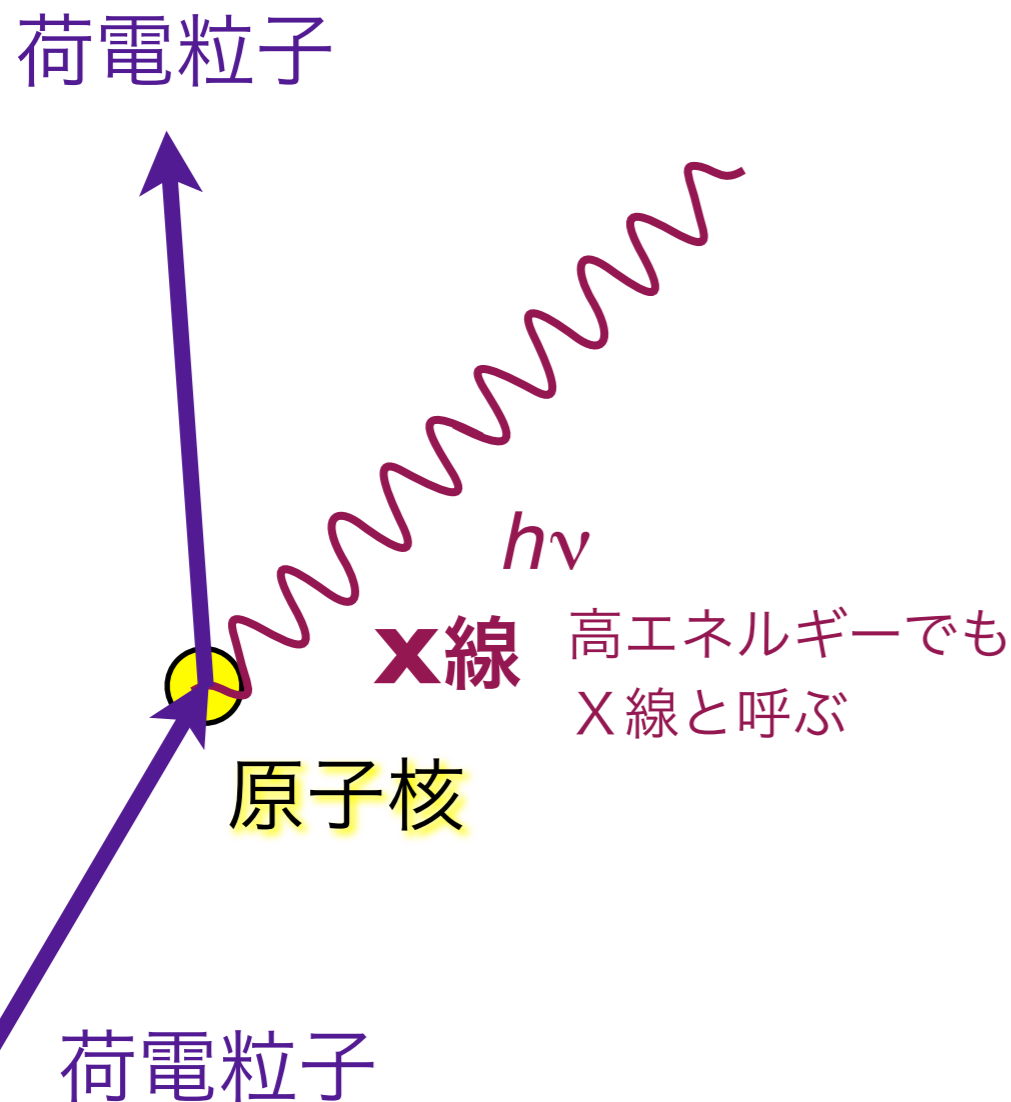
#### \* 陰性造影剤

- ・気体: 空気, 酸素, 炭酸ガス...
- ・オリーブ油(膀胱CT)



# 制動放射

(Bremsstrahlung)



## X線

### 制動放射

荷電粒子が加速度を受けて  
光子 (X線,  $\gamma$ 線) を放出

$$\Delta E \propto Z^2$$

制動放射：放射阻止能  $S_{\text{rad}}$

$$\frac{S_{\text{rad}}}{S_{\text{col}}} = \frac{(E + m_e c^2) Z}{1600 m_e c^2}$$

衝突阻止能  $S_{\text{col}}$  との比

電子 ( $\beta$ 線)

Pb (鉛;  $Z = 82$ )

$$\frac{S_{\text{rad}}}{S_{\text{col}}} \approx \frac{E Z}{800 \text{ MeV}} \approx \frac{E / \text{MeV}}{10}$$

$\beta$ 線 (電子線) を鉛で止めてはいけない

陽子・ $\alpha$ 線

$S_{\text{col}}$

制動放射は無視できる。電子衝突阻止能が  
支配的。(ただし、GeV を超える場合は別。)



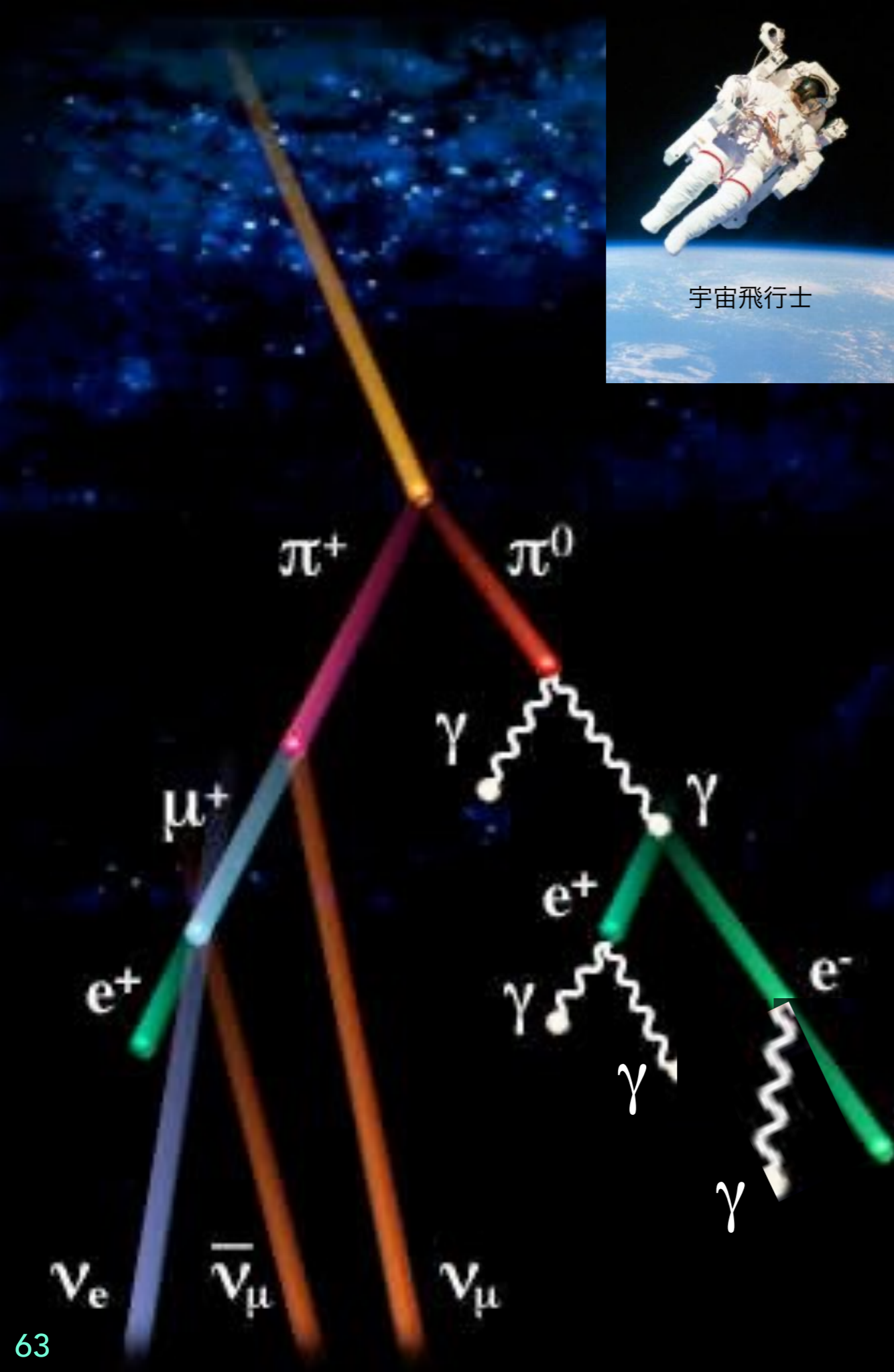
**発展**

# 宇宙線

$\mu^\pm$  : ミュー粒子

# 電磁シャワー

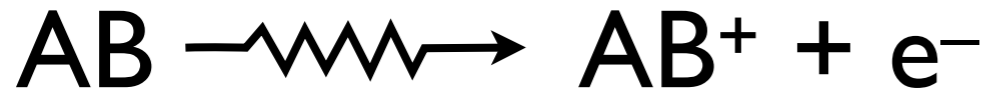
- $\gamma \rightarrow e^+e^-$ ,  $e^\pm \rightarrow e^\pm \gamma$   
 電子対生成      制動放射



# 放射線化学

# 放射線が誘起する素反応

(一部抜粋)



電離 (イオン化)



励起

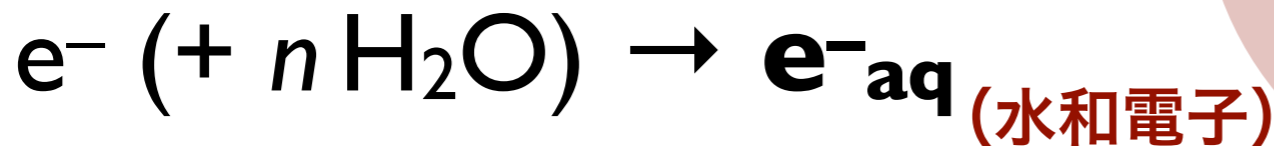
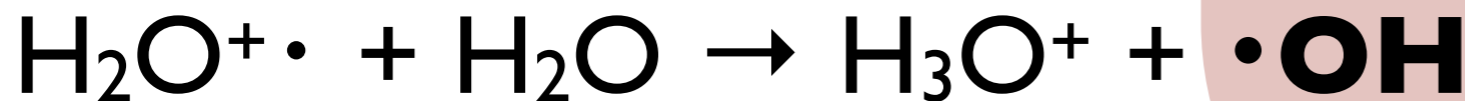
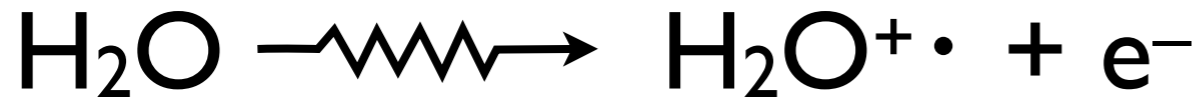


再結合



ラジカル生成

## 水中での反応



## 酸素効果



(ヒドロペルオキシラジカル)



(スーパーオキシドアニオン)



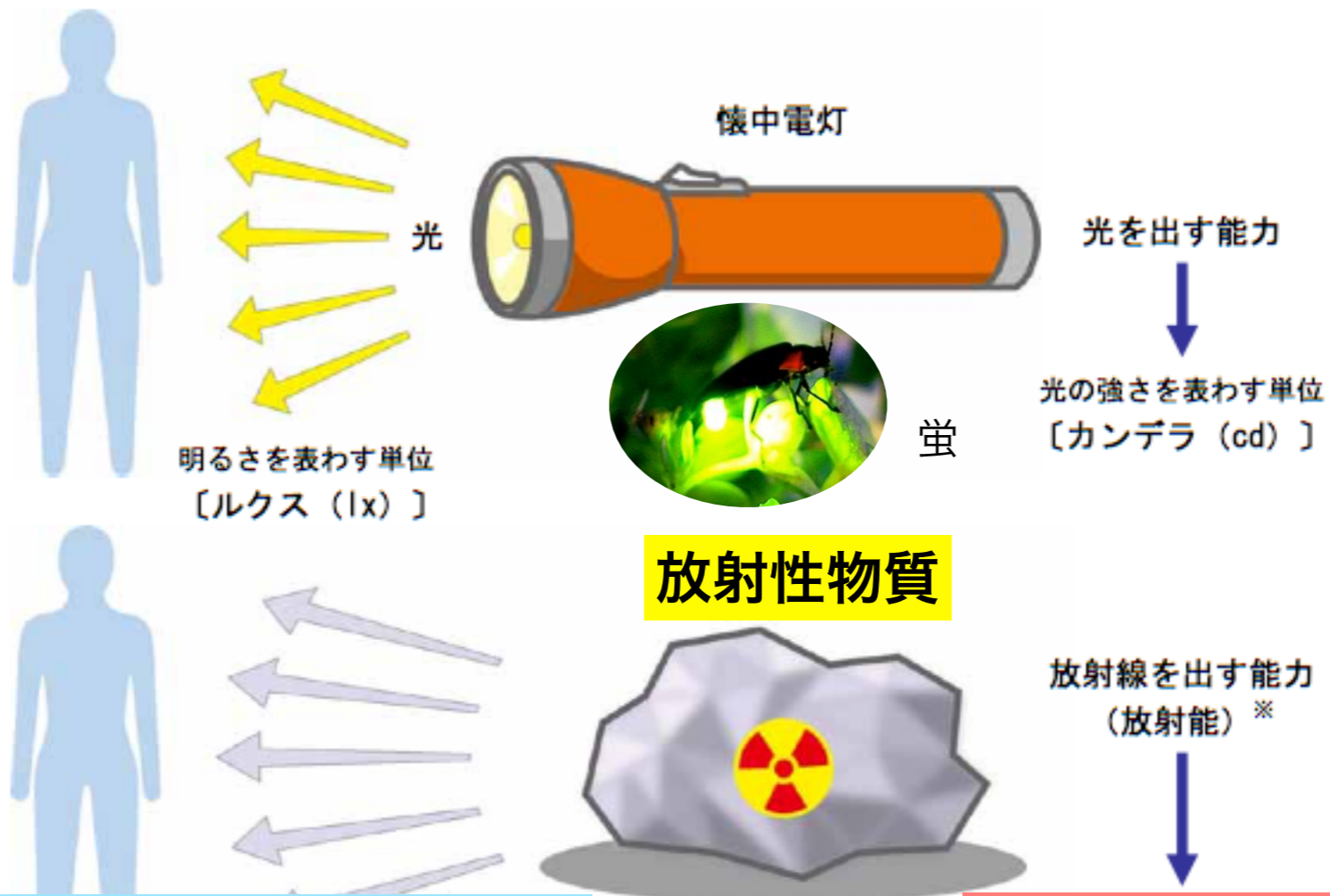
(過酸化水素)

(活性酸素)

# 放射線の単位

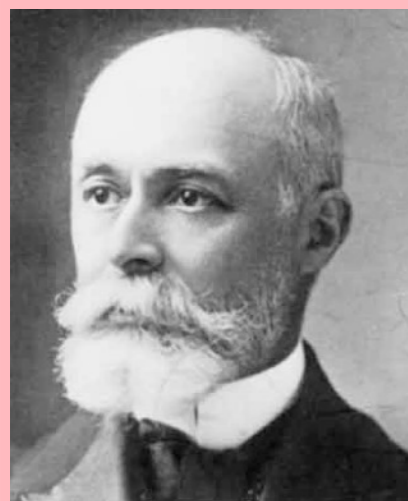


# 放射能と放射線



放射線の強さ・影響を表す単位  
シーベルト [Sv]

放射能の強さを表す単位  
ベクレル [Bq]



## 放射能 (radioactivity) の単位

[Bq] | Bq = 1 dps, [Ci] | Ci = 37 GBq

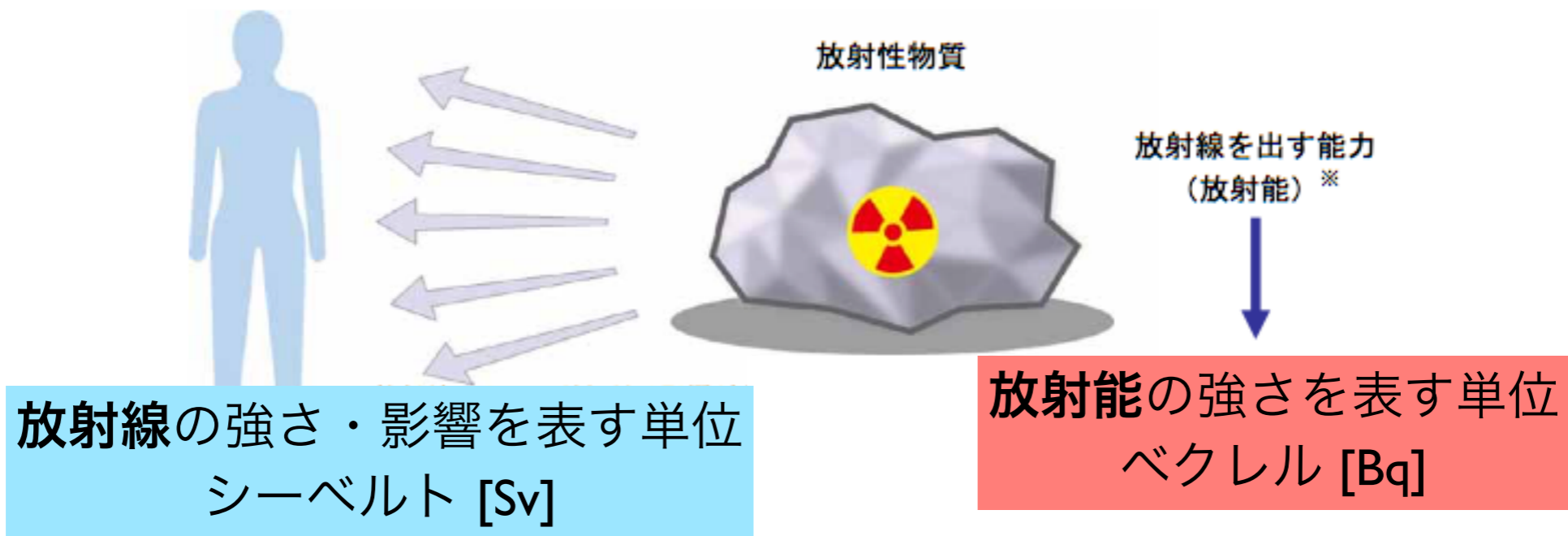
Becquerel

decay/disintegration per second

Curie

1 キュリー = 370億ベクレル





## 放射線量の単位

グレイ

吸収線量  $D [J / kg] = [Gy]$

等価線量  $H_T [J / kg] = [Sv]$  シーベルト

実効線量  $E [J / kg] = [Sv]$  シーベルト

## 放射能の単位

放射能の強さ  $[Bq]$   
ベクレル

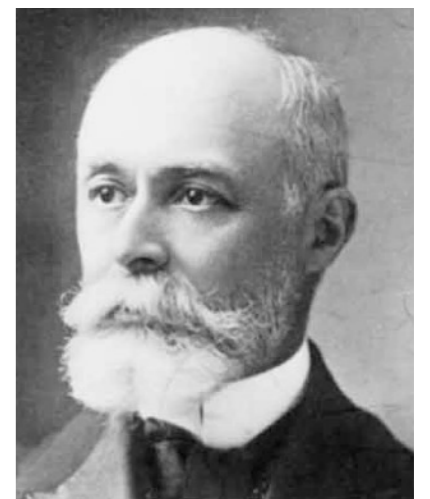
Gray



Sievert



Becquerel



# 放射線量の単位

放射場には

多様なエネルギーの

多種放射線（光子、粒子線）が

様々な方向を向いて飛び交い、

それぞれの強度で存在している。

これをひとつの物理量で表すのは

一筋縄ではいかない。

様々な放射線量の単位が存在する。

# 放射線量の単位



Röntgen



Gray

## 放射計測量 radiometric quantity

粒子フルエンス fluence  $\Phi$  [ $\text{cm}^{-2}$ ]

エネルギーフルエンス energy fluence  $\Psi$  [ $\text{MeV cm}^{-2}$ ]

## 線量計測量 dosimetric quantity : エネルギー変換

カーマ kerma (Kinetic Energy Released in MAterial / MAtter) 非荷電粒子線  $K$  [ $\text{J} / \text{kg}$ ] = [ $\text{Gy}$ ]

シーマ cema (Charged particle Energy imparted to MAtter) 荷電粒子線  $C$  [ $\text{J} / \text{kg}$ ] = [ $\text{Gy}$ ]

照射線量 空気のみ 光子 (X線・ $\gamma$ 線)  $X$  [ $\text{C}/\text{kg}$ ], [ $\text{R}$ ] | R  $\approx 2.58 \times 10^{-4}$  C/kg <sup>Röntgen</sup>

## 線量計測量 dosimetric quantity : エネルギー付与

吸収線量  $D$  [ $\text{J} / \text{kg}$ ] = [ $\text{Gy}$ ], [ $\text{erg} / \text{g}$ ] = [ $\text{ram}$ ] | Gy = 100 ram <sub>Gray</sub>

● 物質が吸収したエネルギー（単位質量あたり）

吸収線量  $D$  [J / kg] = [Gy] グレイ

# 放射線量の単位

radiation dose

Gray

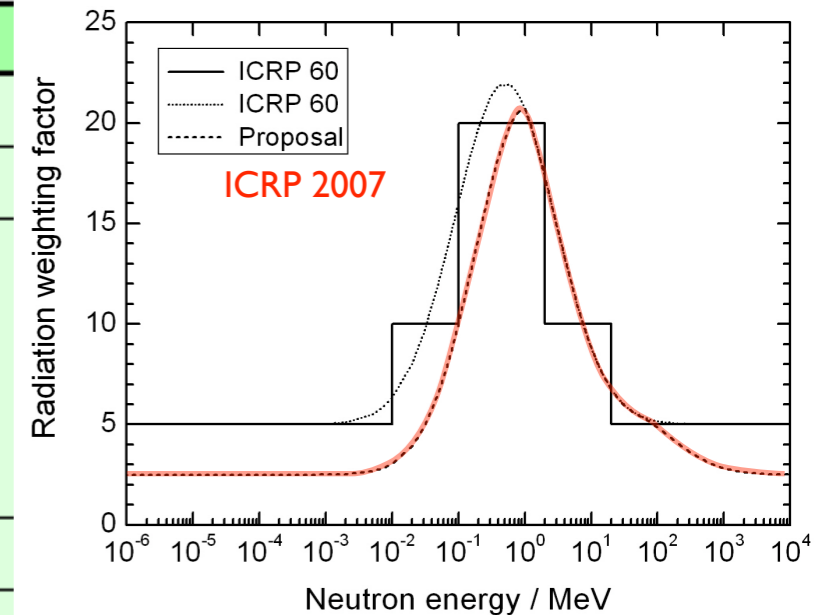


● 放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

等価線量  $H_T = W_R \times D$  [Sv] シーベルト

放射線加重係数  $W_R$

放射線の種類・エネルギーの範囲	放射線加重係数: $W_R$	
光子(X線・γ線); 全てのエネルギー	1	1
電子(β線)およびミュー粒子; 全てのエネルギー	1	1
中性子; 10keV 以下	5	右図を参照
10keV~100keV	10	
100keV~2MeV	20	
2MeV~20 MeV	10	
20MeV以上	5	
反跳陽子以外の陽子; エネルギー 2MeV 以上	5	2 (正負パイオンも)
アルファ粒子(α線)	20	20
核分裂片	20	20
重原子核	20	20



[出典] 日本アイソトープ協会:ICRP Pub 60、国際放射線防護委員会の1990年勧告、丸善、p7(1991)

赤字 ICRP 2007

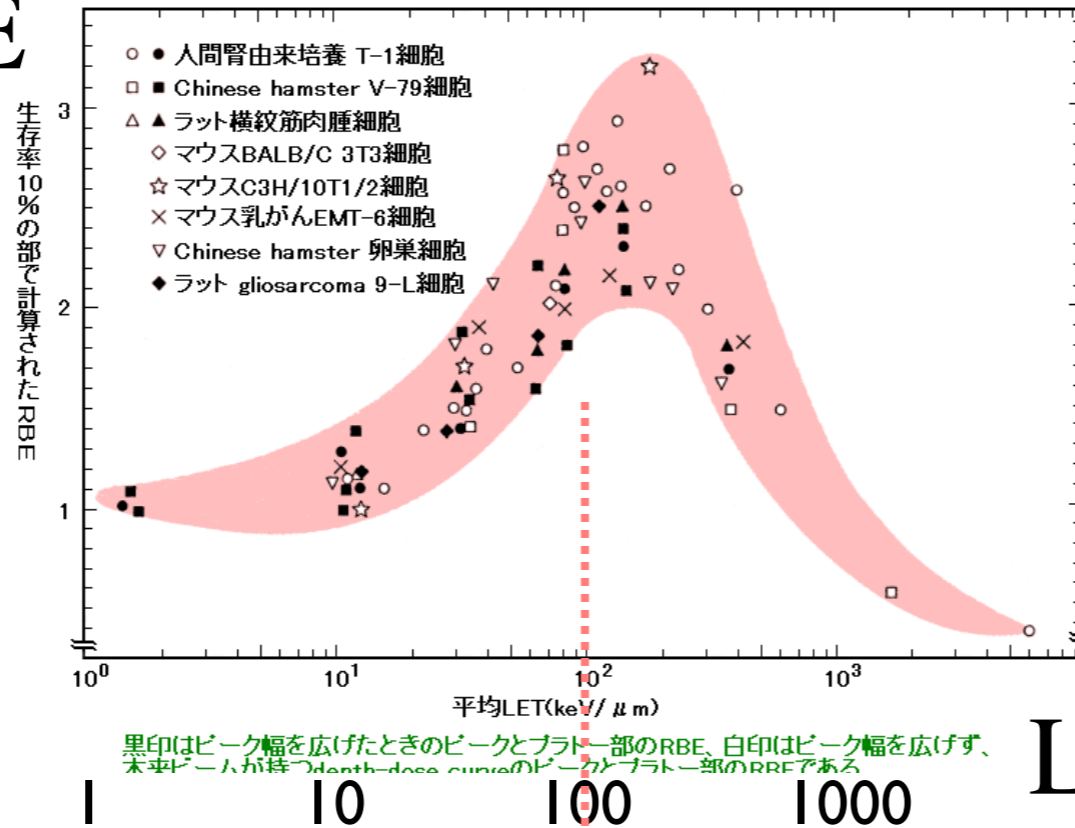
● 全身被曝での影響に換算（臓器ごとに組織加重係数  $w_T$  をかけて合算）

実効線量  $E = \sum_T w_T \times H_T$  [Sv] シーベルト

Sievert



# RBE



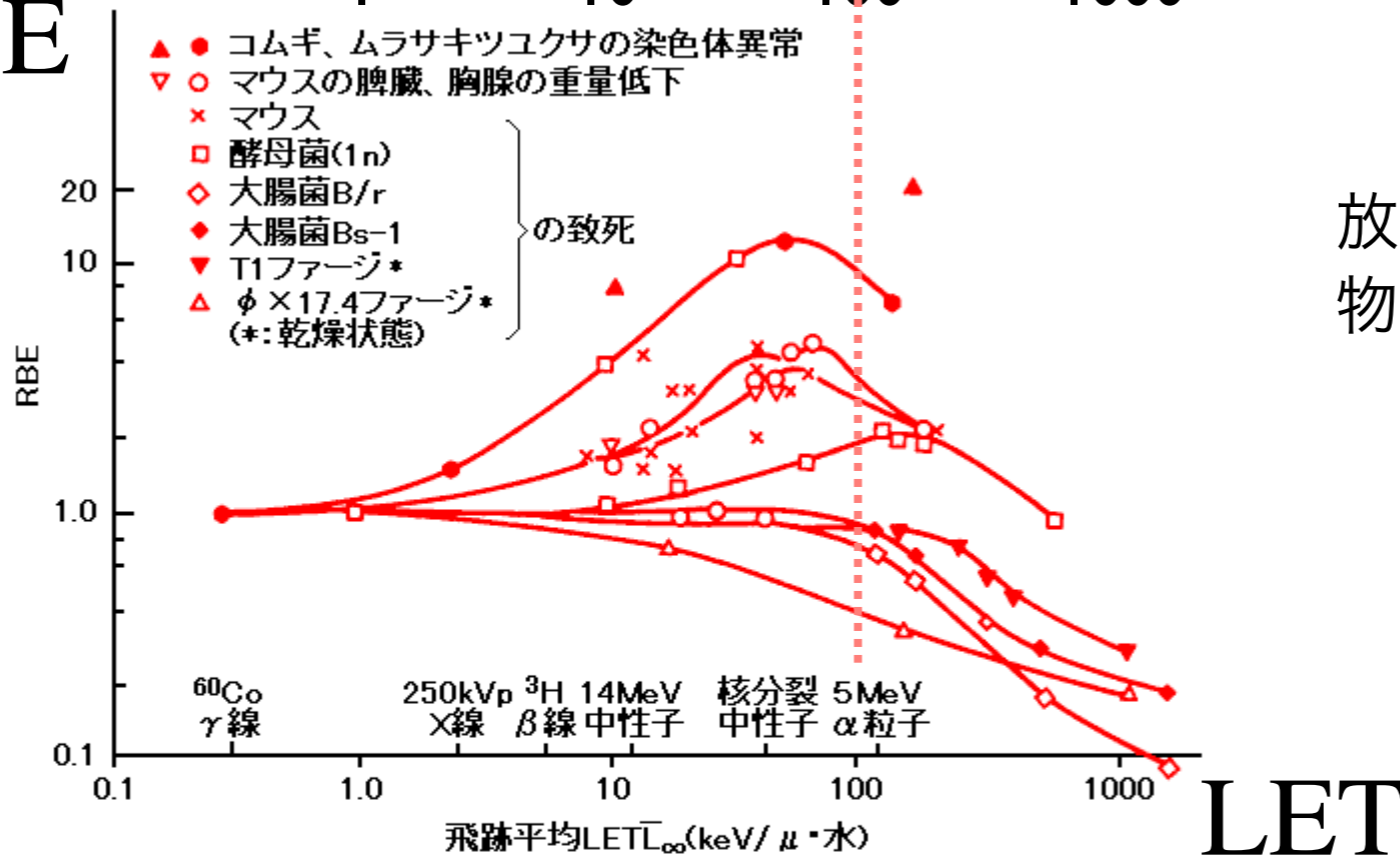
# 生物学的効果比 RBE

(Relative Biological Effectiveness)

LET (線エネルギー付与)  
keV/μm

放射線の軌跡上の単位長さ当たり  
物質に与えられるエネルギー

# RBE



様々な生物反応(マウスの臓器の重量低下や致死、高等植物の染色体異常等)において、いずれも約80keV/μm付近のLET値をもつ放射線が最大のRBE値を示す。

図2 体細胞的効果に対する各種放射線のRBEとLETの関係

[出典]近藤 宗平:分子放射線生物学、東京大学出版会(1972年)、p.174

# 実効線量 effective dose $E [J / kg] = [Sv]$

$$E = \sum_T w_T \times H_T = \sum_T w_T \times \left( \sum_R w_R \times D_{T,R} \right)$$

組織  $T$  の組織加重係数

組織  $T$  における  
等価線量 [Sv]

組織  $T$  における  
平均吸収線量 [Gy]

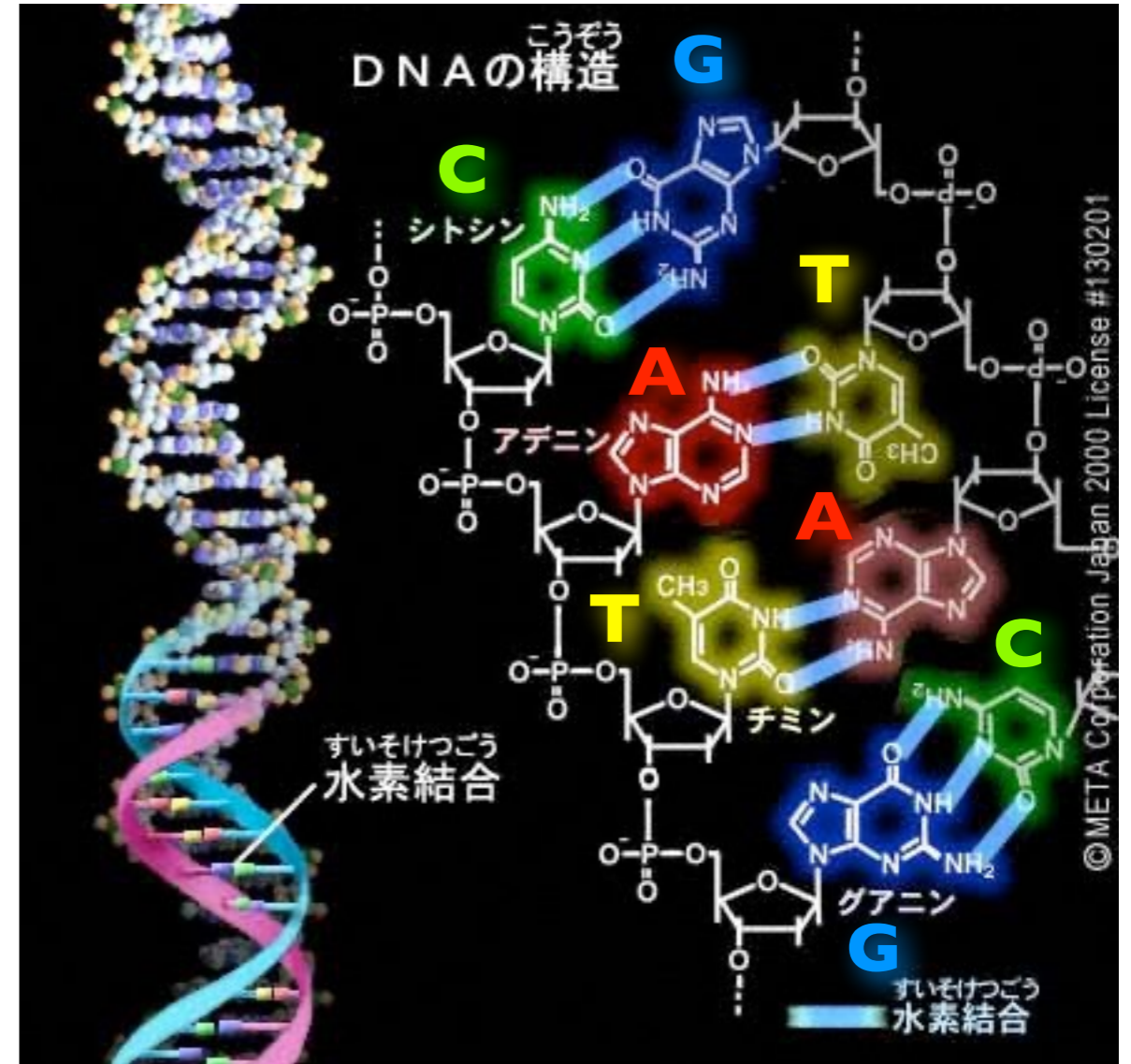
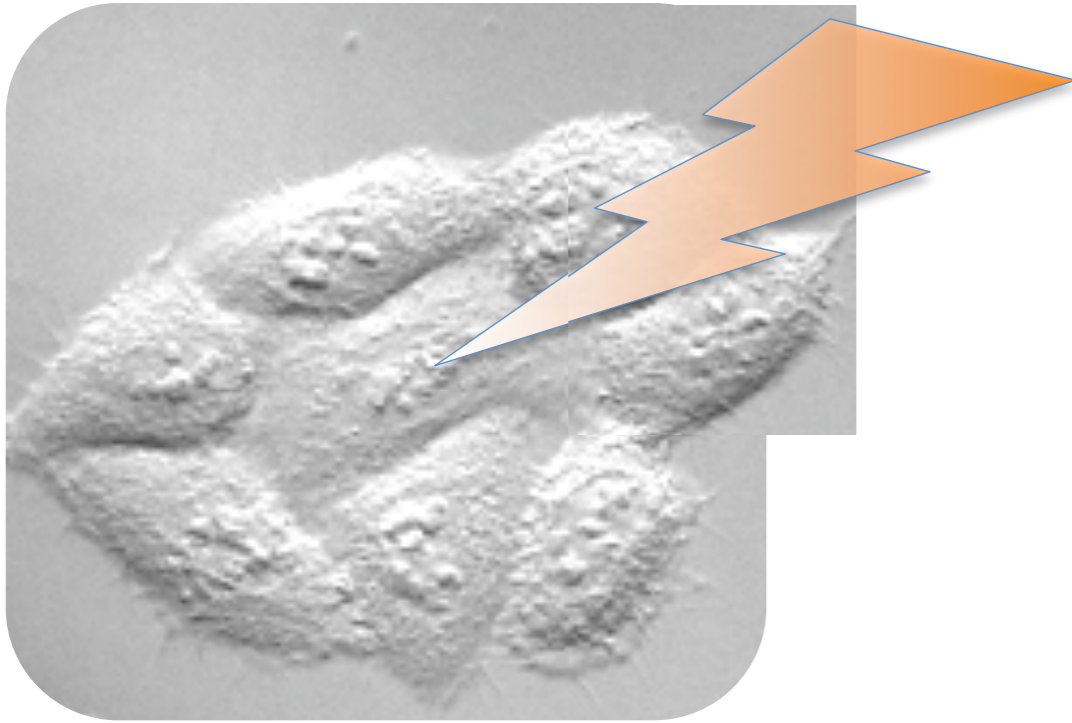
器官・組織	組織加重係数: $w_T$	
生殖腺	0.20	0.08
骨髄(赤色)	0.12	0.12
結腸	0.12	0.12
肺	0.12	0.12
胃	0.12	0.12
膀胱	0.05	0.04
乳房	0.05	0.12
肝臓	0.05	0.04
食道	0.05	0.04
甲状腺	0.05	0.04
皮膚	0.01	0.01
骨表面	0.01	0.01
脳		0.01
唾液腺		0.01
残りの器官・組織 <sup>※2</sup>	0.05	0.12
合計(全身)	1.00	1.00

左欄黒字 ICRP 1990

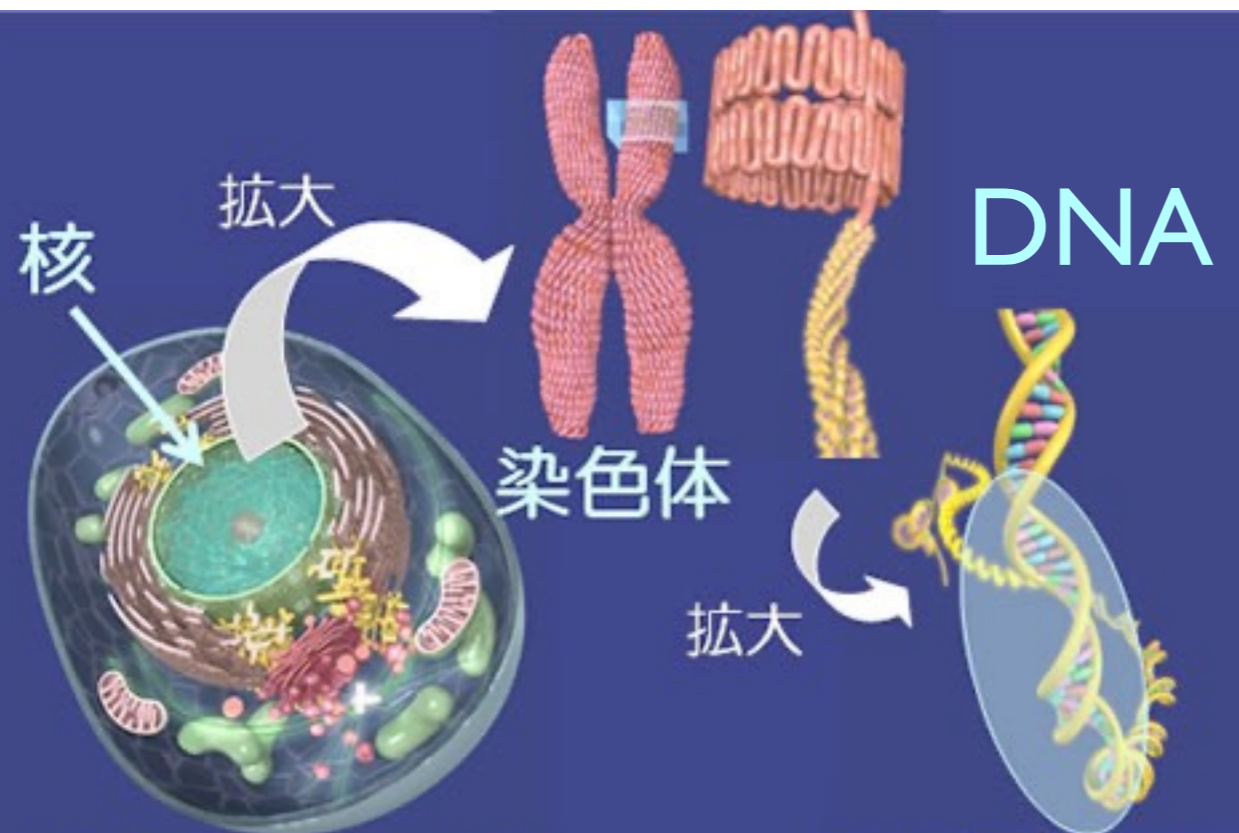
右欄赤字 ICRP 2007

# 細胞の核に放射線が照射

## DNA



出典：IPA「教育用画像素材集サイト」 <http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



細胞(60兆個)

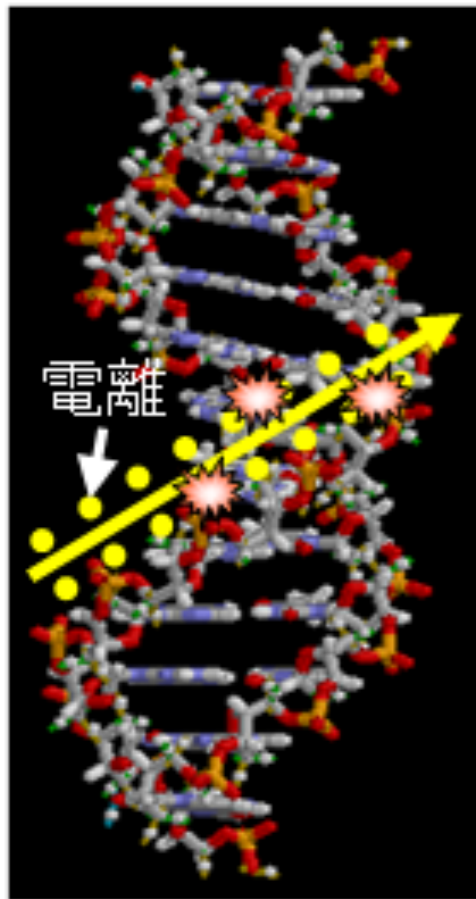
一部が遺伝子

図1 核、染色体、遺伝子

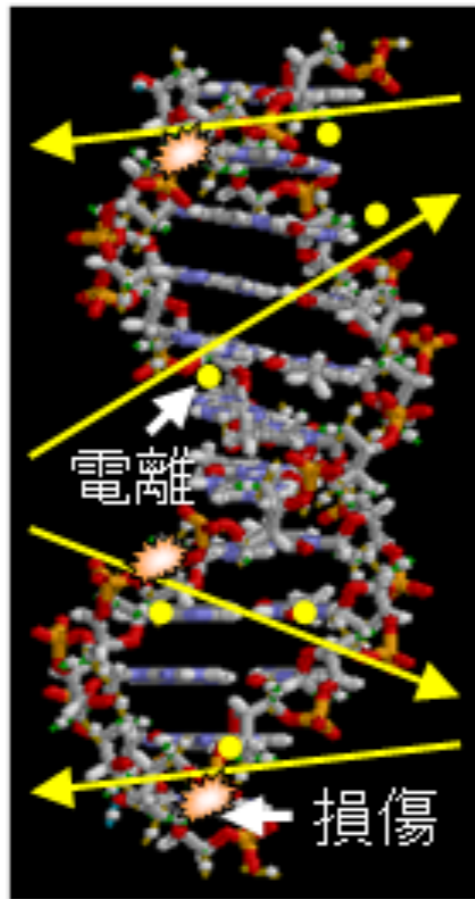


# 放射線による DNA 損傷

**ラジカル  
(活性酸素)**



重イオン



電子

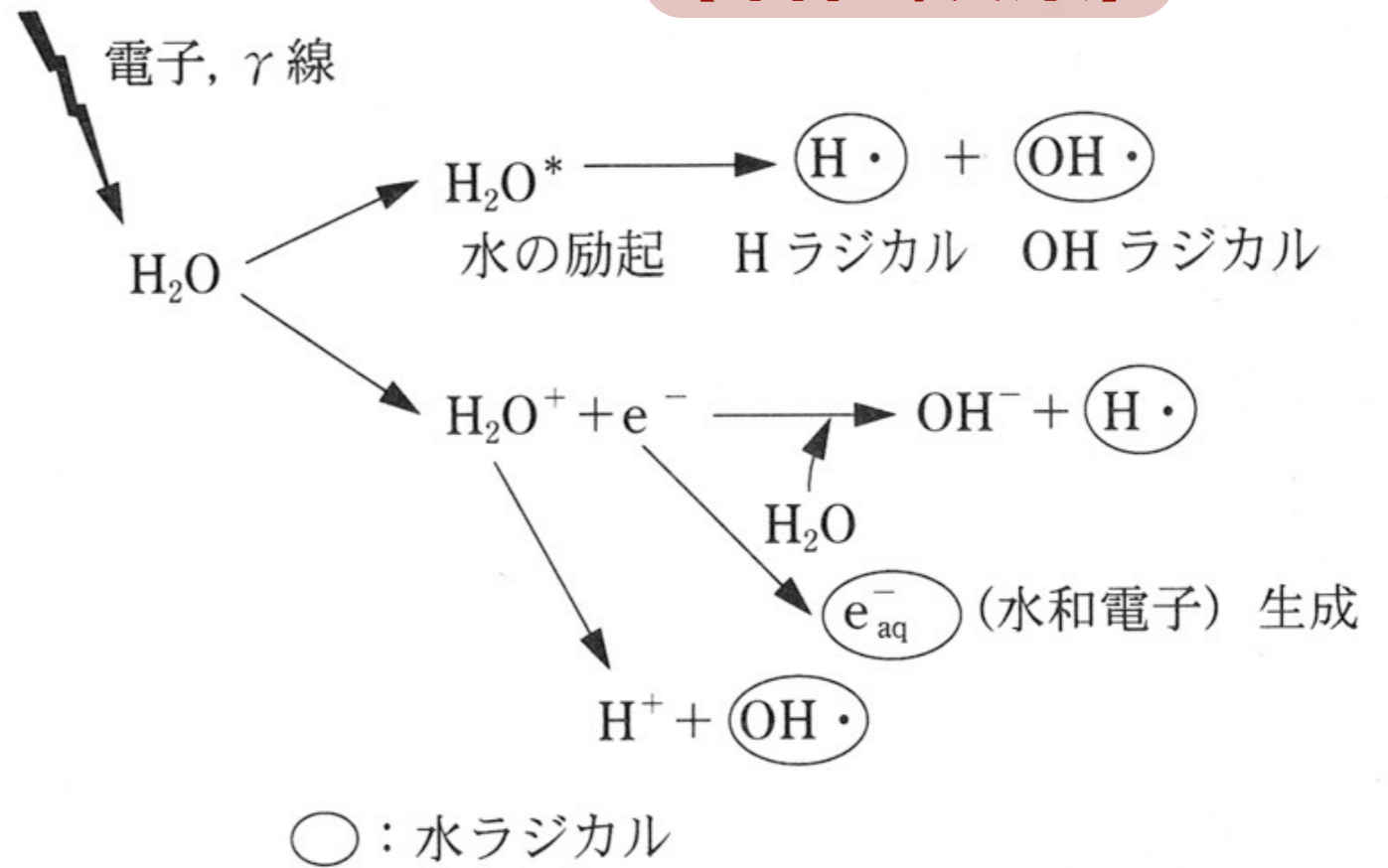


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略  
(書籍「図解 放射性同位元素等取扱者必携」オーム社、より引用)

## LET : 線エネルギー付与

**高 LET 放射線**  
 $\alpha$ 線, 重粒子線

放射線の直接作用 : 荷電粒子が直接 DNA 分子を叩く

と間接作用 : 水の電離で生じるラジカルが DNA 分子に作用

**低 LET 放射線**  
 $\beta$ 線,  $\gamma$ 線

何もなくても DNA 損傷は自然発生している（複製ミスなど）

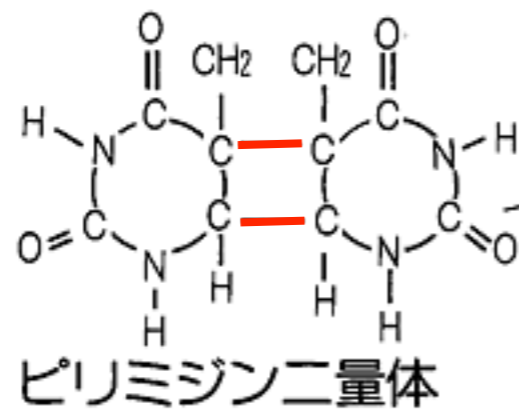
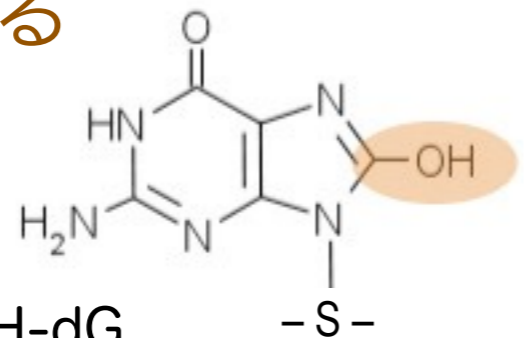
表5 増殖期のヒト細胞における DNA 損傷の自然発生率と放射線誘発率の比較<sup>1)</sup>

傷の種類	自然の傷(/細胞/日)	X線誘発の傷(/細胞/1 Sv)
塩基損傷	20,000	300
1本鎖切断	50,000	1,000
2本鎖切断	50(推定 <sup>2,19)</sup> )	40

特定の化学物質によっても DNA 損傷が起きる

・OH ラジカルによる酸化

8-OH-dG



紫外線照射でも頻発

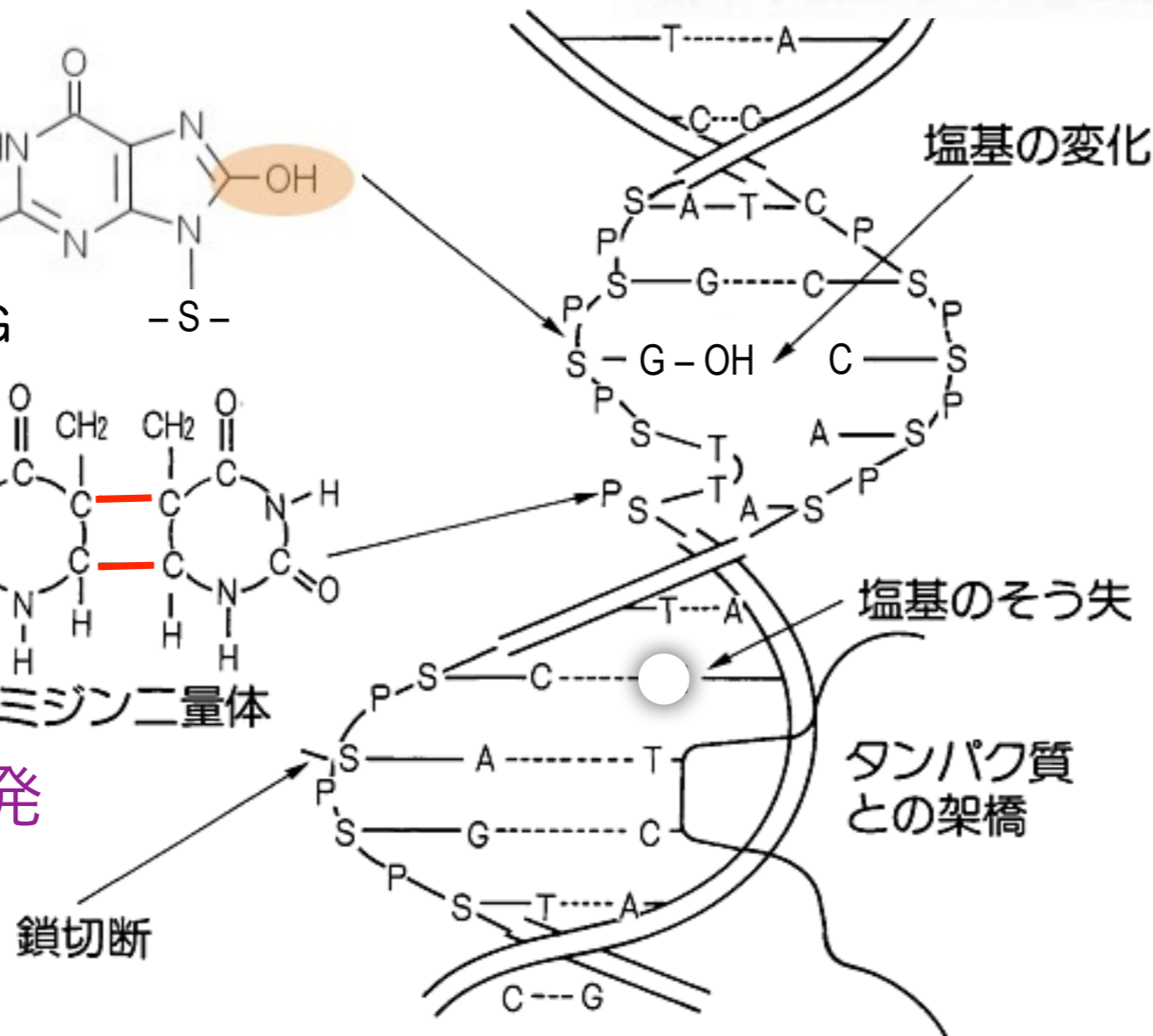


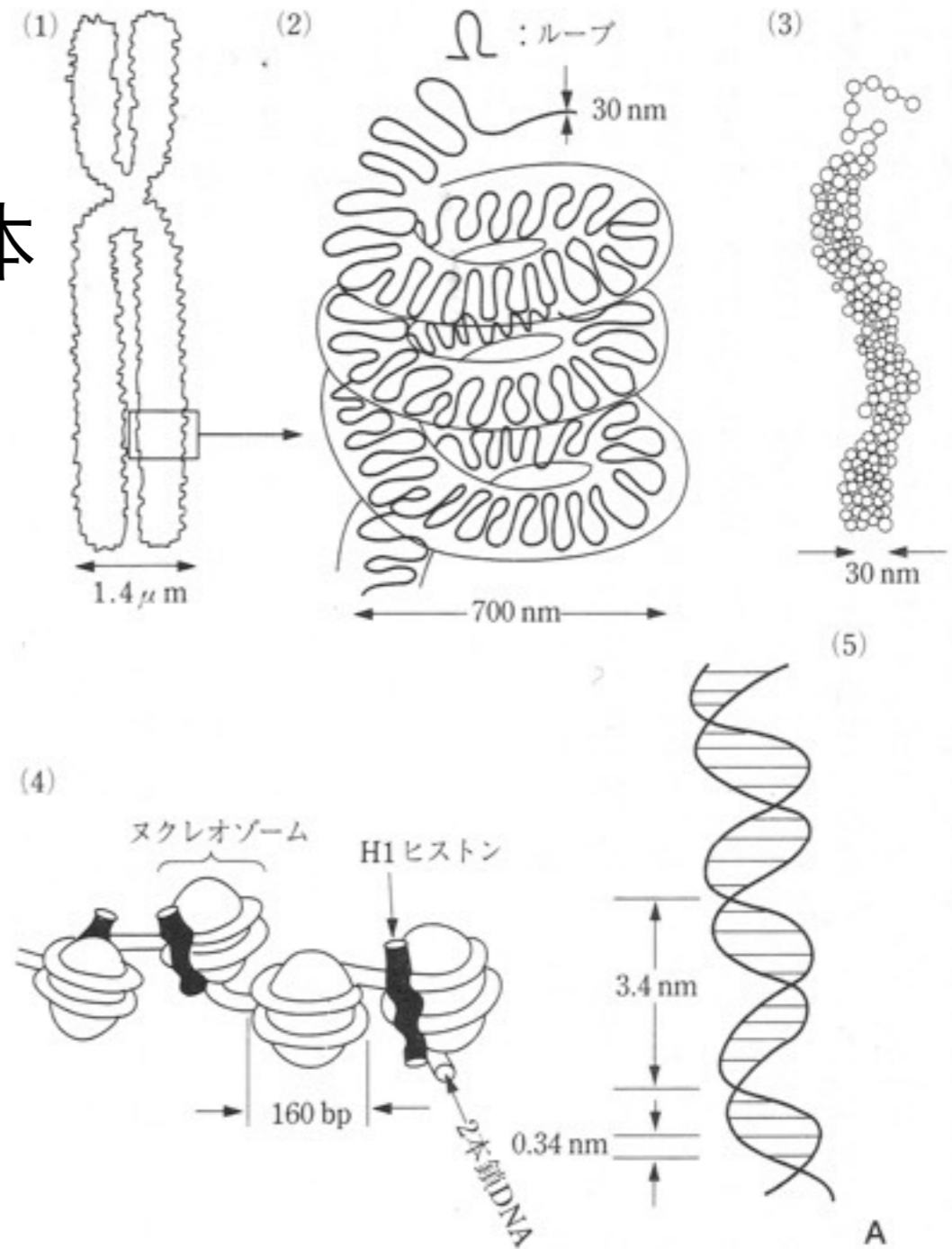
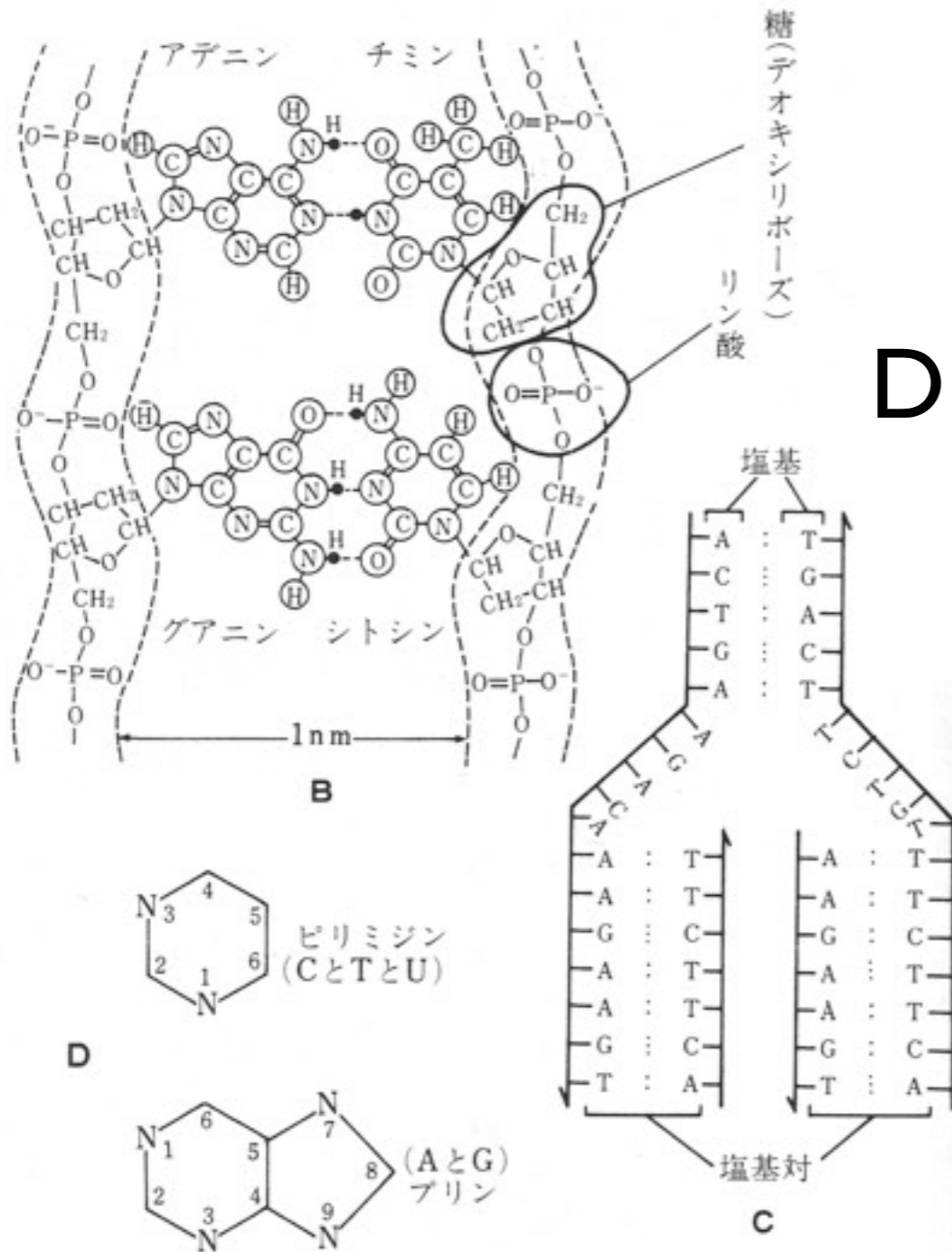
図2 放射線照射を受けた細胞から抽出された DNA に見られる種々の損傷

[出典] 江上信雄：生き物と放射線、東京大学出版会、1975

図は一部内容を改変。

# 染色体

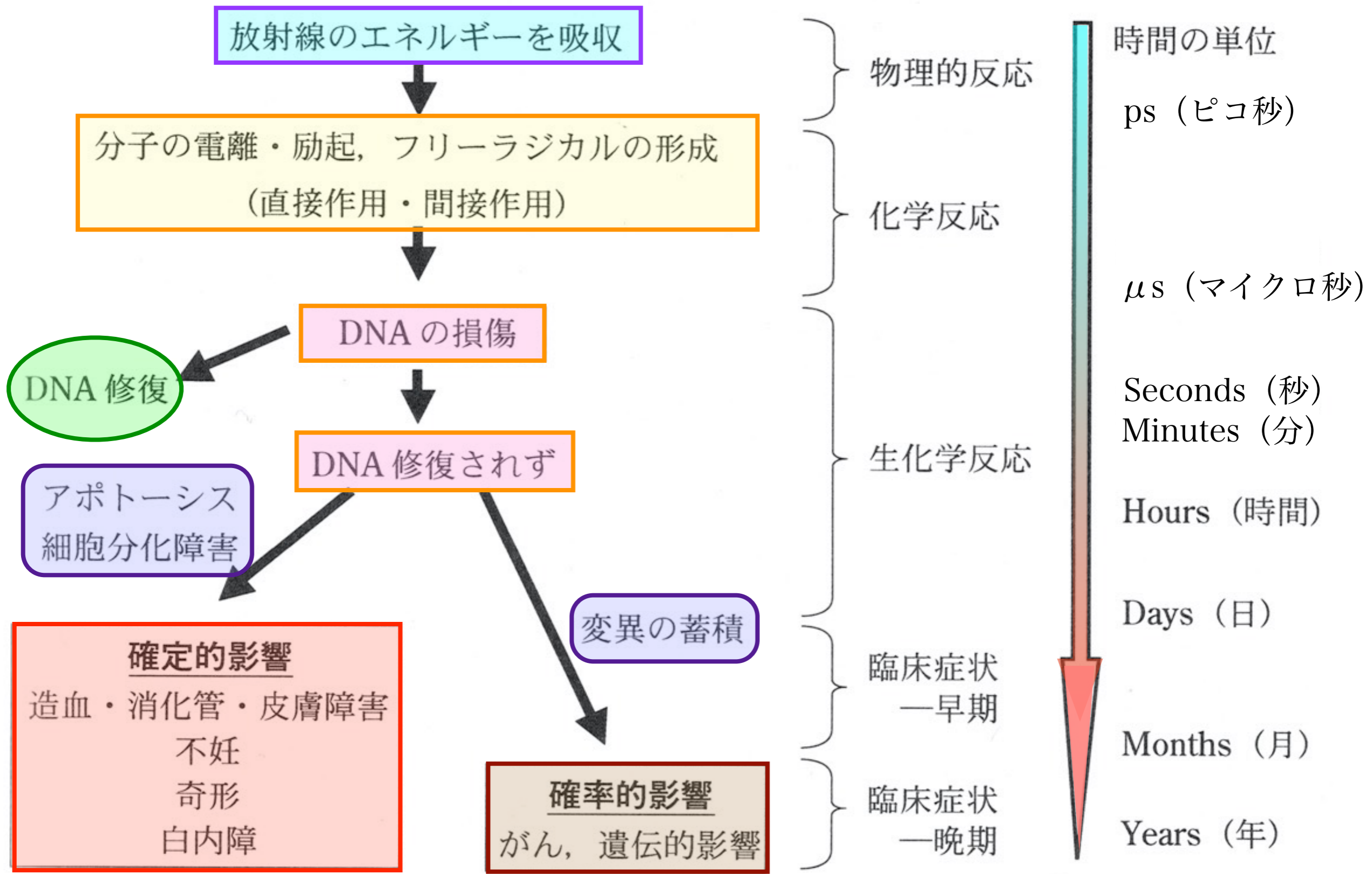
# DNA



図III-16 ヒト染色体からDNAまで。

A. 染色体の構造。(1) ヒトの染色体。(2) クロマチンの高次構造（模式図）クロマチンはループ状になり，それがさらに高次の折りたたみ構造をとってコンパクトになる。(3) クロマチンの凝縮した線維構造とほどけた状態（先端部，○印はヌクレオゾーム）。(4) クロマチンの微細構造の模型：ヌクレオゾーム（ヒストンタンパク質に巻きついたDNA鎖）が単位となり，その相互作用で連带的会合体の線維構造をつくる。(5) DNAの二重らせん型の構造。（文献5より改写）

図III-16(つづき) DNAの化学構造と複製の模式図。  
 B. DNAの化学構造。  
 C. DNA複製の模式図。  
 D. 塩基内の炭素または窒素の位置を示す番号によるよび名。



放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

# レポート

各分野ごとに1本選択、合計3本  
(それより多く提出してもよい)

物理：鳥居

環境化学：小豆川

生命：渡邊・坪倉・藤原

- 物理分野

締切：12月20日 (月)

## • 物理分野 #1 (a), (b) 両方に回答。

(a) 放射線と物質（原子・分子）との相互作用の知識をもとに、 $\alpha$ 線・ $\beta$ 線・ $\gamma$ 線の場合のそれぞれについて、内部被曝と外部被曝の影響の違いについて述べよ。

(b)  $\gamma$ 線の遮蔽に鉛が有効なのはなぜか。一方で、 $\beta$ 線の遮蔽にはアクリルやアルミの板が用いられ、鉛を使ってはいけない。なぜだろうか。

## • 物理分野 #2

放射線と物質（原子・分子）との相互作用の知識をもとに、

(a) GM管 (b) NaI シンチレータ の2種類の放射線検出器について、放射線計測の動作原理について説明した後、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線のそれぞれの場合について、反応過程と検出効率を論ぜよ。

GM管についての参考文献：基礎物理学実験教科書 GM管・霧箱 種目

この課題(#1, #2)は誰でも選択可。

# レポート

## • 物理分野 #3

この課題の選択は、文系または、理科 II, III 類で高校時代に物理を履修しなかった学生に限る。

自然放射線は、日本各地あるいは世界各地で、場所ごとに線量が異なる。具体的に特徴的な場所を複数選んで、その地域の放射線量および放射線の種類を述べ、その要因について解説せよ。

また、放射線の規制はどうあるべきか。自然放射線量が年間数 mSv 以上の地域がある一方で、法律は公衆の追加線量を年間 1 mSv までとしているが、医療被曝は対象としないこと、低線量被曝の人体への影響の知見も踏まえて、考えを述べよ。福島県の避難区域について、帰還の目安はどうするのがよいと思うか。

# レポート

## • 物理分野 #4

(a)~(f) のうち 4 題 (またはそれ以上) に回答。

(a) 5 MeV の  $\alpha$  線の速度を、光速との比として求めよ。質量は  $\text{MeV}/c^2$  の単位で計算すること。(第 2 回講義中に計算したことの復習)

(b) 5 MeV の  $\alpha$  線の軌跡周辺に生じるイオン・電子対はいくつできるか。 $\alpha$  線の運動エネルギーのうち、6 割程度は原子・分子の励起に費やされて、イオン化には寄与しないことに注意せよ。

(c) 放射性セシウムの濃度が  $8000 \text{ Bq/kg}$  を超える焼却灰は指定放射性廃棄物として管理・処分する必要がある。この基準丁度の灰に含まれる原子核のうち、放射性セシウムの割合はどの程度か。【ヒント：1 Bq とは 1 秒に平均 1 個、放射性核種が崩壊する放射能強度である。放射性核種は長期にわたって、時間とともに指数関数的に減少しながら次々に崩壊していくが、その数を積算(積分)すれば、もともと存在した放射性核種の個数を求めることができる。】

この課題(#4)は誰でも選択可。



## ・物理分野 #4 (つづき)

(d)  $\beta$ 線や $\gamma$ 線による被曝では、 $Sv = Gy = J/kg$  と考えてよい。がんの放射線治療では、典型的に1回あたり  $2 Sv = 2000 mSv$  という大量の照射をし、日をおいてこれを数十回繰り返す。 $2 Sv$  の線量を浴びることによる、照射部位の温度上昇は (血流による熱の拡散がないと仮定した場合) どの程度と計算されるか。このことから、放射線による影響はその熱の効果ではないことが分かるであろう。

★ 光速に匹敵する速度の粒子は Newton力学ではなく、Einsteinの相対性理論に従って取り扱う必要がある。運動量は  $p = mv\gamma = mc\beta\gamma$  で与えられる。ここに  $\beta = v/c$ ,  $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$  である。質量エネルギー  $mc^2$  を含めた全エネルギーは  $E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$  で与えられ、運動エネルギーは  $T = E - mc^2$  で定義される。

(e) 全エネルギーは質量エネルギー  $mc^2$  の何倍か。記号で表せ。

(f) 電子の質量は  $0.511 MeV/c^2$  である。運動エネルギー  $1 MeV$  の $\beta$ 線の速度を求めよ。光速の何%か。

この課題(#4)は誰でも選択可。

## ● 物理 課題 #5

原子炉内で核分裂または放射化により生成する放射性核種にはどんなものがどんな割合で存在するか。それら核種の崩壊についても説明せよ。そうした多種多様な核種のうち  $^{131}\text{I}$  や  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  などが特に問題となるのはなぜか。

## ● 物理 課題 #6

なにかひとつ、工学・医療などに利用されている放射性核種を選び、その寿命や崩壊の種類、放出される放射線のエネルギーなどを調べてみよ。その核種が利用される特徴はどこにあるか。余力があれば、その元素の他の同位体についても調べてみよ。

## ● 物理 課題 #7

に関連した課題

以下の計算課題 (A), (B) の両方に回答せよ。

### (A) $^{40}\text{K}$ の内部被曝

体重 60 kg の人の体内にはカリウム元素が通常 130 g 程度含まれている。このうち 0.0117% は放射性同位体の  $^{40}\text{K}$  (半減期 12.8億年) である。

- (i) この  $^{40}\text{K}$  による放射能は何ベクレルか。
- (ii) 1 Bq の  $^{40}\text{K}$  が体全体に与える実効線量率は何  $\mu\text{Sv/h}$  と見積もられるか。
- (iii) 体内にある  $^{40}\text{K}$  による被曝は年間何 mSv/年 に相当するか。

### (B) $^{131}\text{I}$ の崩壊熱

福島第一原発から放出された  $^{131}\text{I}$  は 15万 TBq ( $T=10^{12}$ ) と言われている。原子炉の中には、当初その10倍前後の  $^{131}\text{I}$  が、1号機から3号機までの各々の炉内に存在していた。

- (i) 放出された  $^{131}\text{I}$  は全部で何グラムに相当するか。
- (ii) 各炉内において、 $^{131}\text{I}$  による崩壊熱は当初何ワットであったと推定されるか。放出される  $\beta$  線と  $\gamma$  線のどちらも炉内の水で全てのエネルギーを失うとして計算するとよい。(※ 実際の炉内では他のあらゆる核種による崩壊熱が積算される。)
- (iii) 原子炉容器内の適当な水量を仮定して、 $^{131}\text{I}$  の寄与による温度上昇率を見積もってみよ。なお、水の冷却循環装置は電源喪失のため止まっていた。

この課題(#7)は誰でも選択可。

# 準教科書

「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 —」

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著  
中川恵一 執筆協力

初版 **第5刷～第8刷** を推奨

丸善出版 本体 2500円＋税

ご購入は生協書籍部で

# 放射線

鳥居 寛之  
小豆川勝見  
渡辺雄一郎 著  
中川 恵一  
執筆協力

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

# 準教科書

- 1章 放射線とは？ 《放射線入門》
- 2章 放射線の性質 《放射線物理学Ⅰ》
- 3章 原子力発電で生み出される放射性物質  
《原子核物理学・原子力工学》
- 4章 放射線量の評価 《放射線物理学Ⅱ》
- 5章 放射線の測り方 《放射線計測学》
- 6章 環境中での放射性物質 《環境放射化学》
- 7章 放射線の細胞への影響 《放射線生物学》
- 8章 放射線の人体への影響 《放射線医学》
- 9章 放射性物質と農業  
《植物栄養学・土壌肥料学》
- 10章 放射線の防護と安全 《放射線防護学》
- 11章 役に立つ放射線  
《放射線の利用・加速器科学》

Q&A

本日の講義内容  
次回の講義内容

## 「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 —

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

初版 **第5刷～第8刷** を推奨

丸善出版

本体 2500円＋税

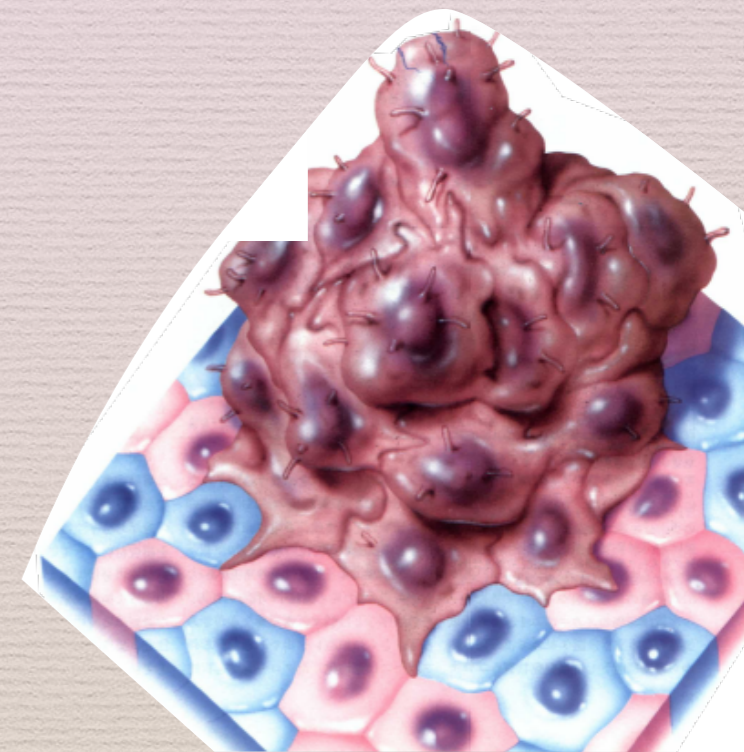
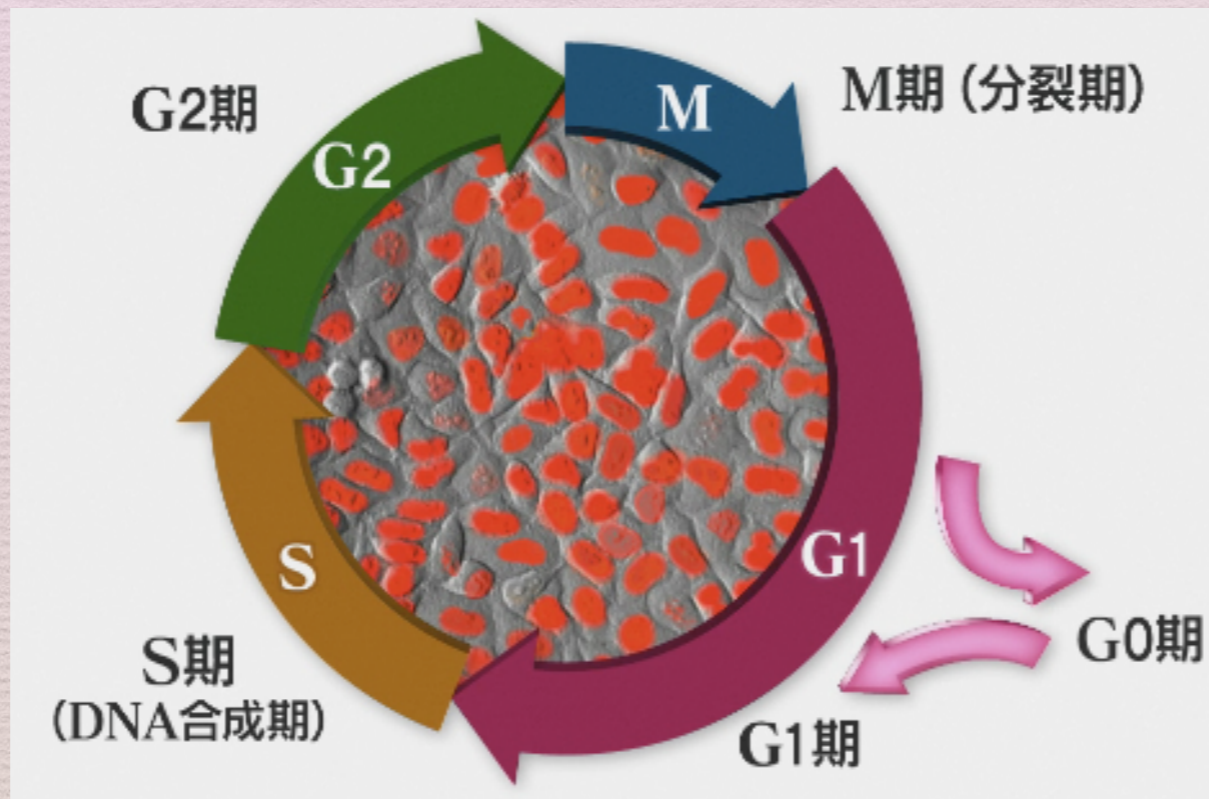
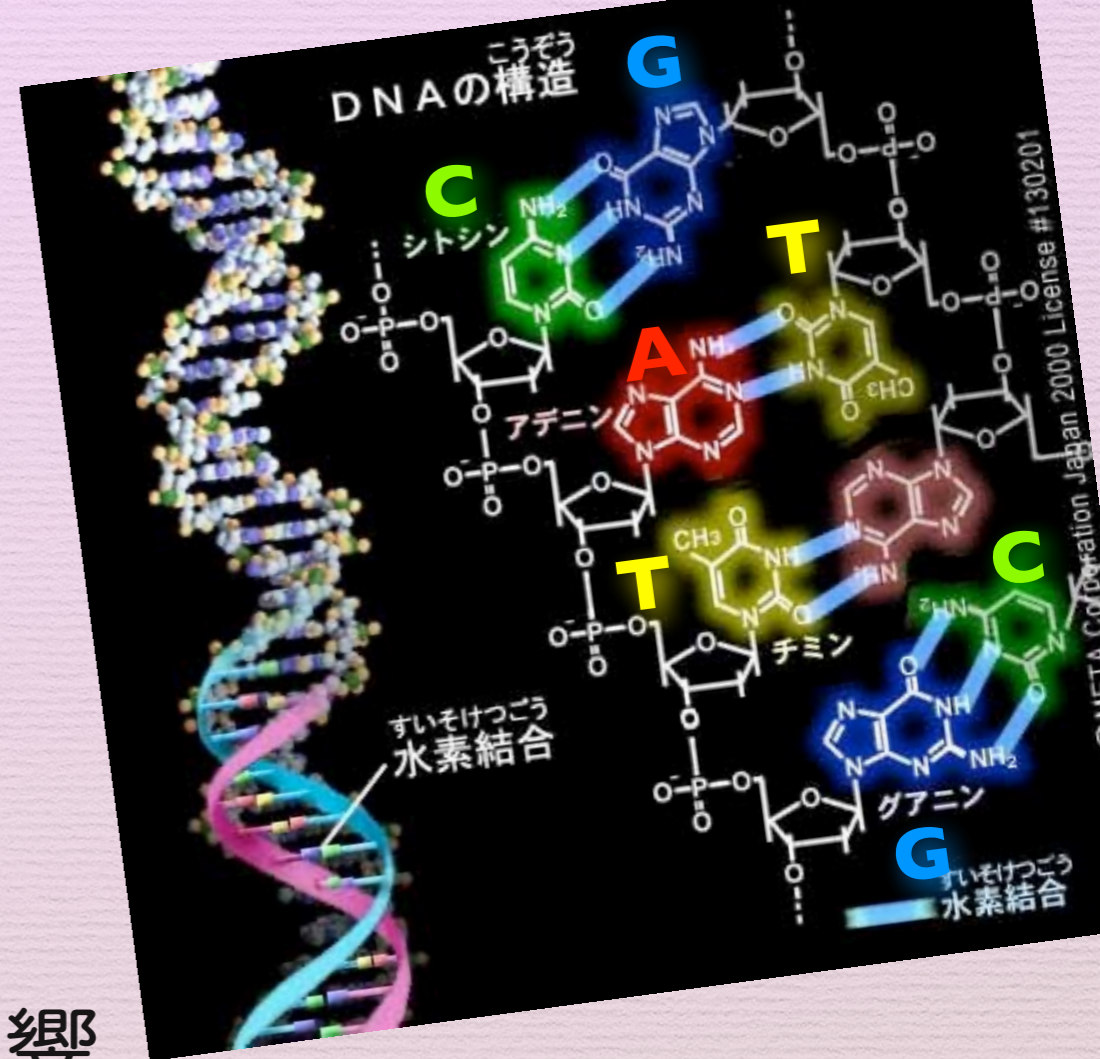
ご購入は生協書籍部で

# 次回予告

## 第5回 (11/5)

### 放射線生物学

### 放射線の細胞および生体への影響



# 講義スライド、講義予定

ITC-LMS を参照。または、講義 web page

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/>

東大教養 放射線 講義



検索

## 連絡先

[torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp](mailto:torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp)

担当教員：鳥居 寛之

# Fine.

Grazie per la vostra attenzione.

Gratias ago pro audientia vestra.

Спасибо за внимание.

Dankon pro via atento.

Merci de votre attention.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Thank you for your attention.

경청해 주셔서 감사합니다.

感謝您的聆聽。

谢谢您的关注。

ご清聴ありがとうございました。

鳥居 寛之

**Hiroyuki A. TORII**