

新刊書籍 発売！ 2012年10月10日 刊行

「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は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し、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>



放射線を科学的に理解する

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

東京大学教養学部 放射線講義 スライドのご案内

ごらんのファイル以外にも、別学期の講義シリーズのファイルがあります。

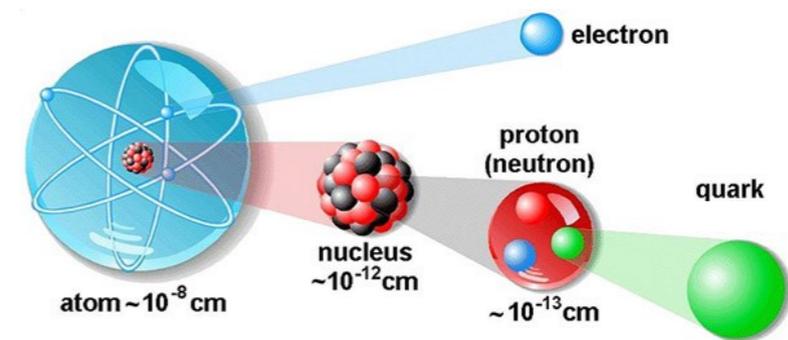
書籍「放射線を科学的に理解する — 基礎からわかる東大教養の講義 —」

とあわせて、どうぞご利用下さい。

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

2011年度夏学期
自主講義

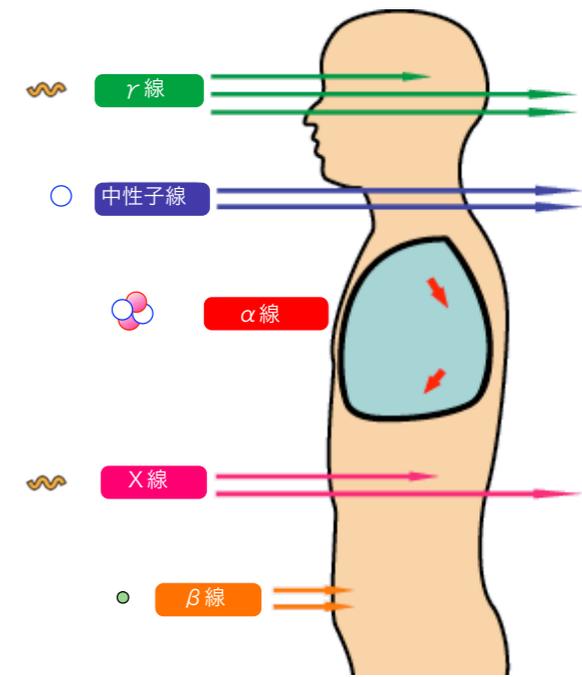
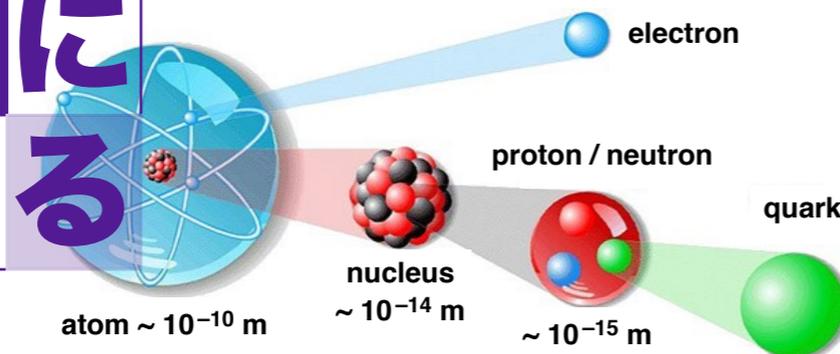
自主講義
放射線学



2011年度冬学期
主題科目テーマ講義

2012年度冬学期
主題科目テーマ講義

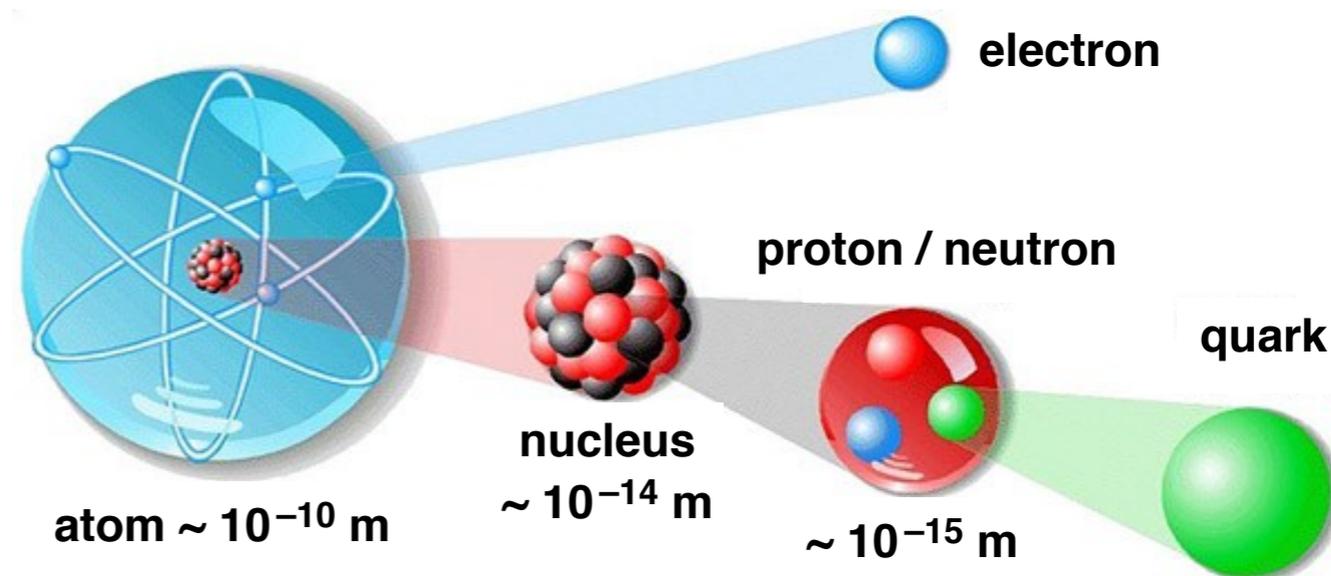
放射線を
科学的に
理解する



2011年度冬学期 主題科目テーマ講義

第9回：2011 / 12 / 9 (金)

放射線を
科学的に
理解する



金曜5限 @ 11号館 1101教室

放射線物理学 (II)

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

放射線を科学的に理解する

- 10/ 7 放射線入門【鳥居】
- 10/14 放射線物理学【鳥居】
- 10/21 放射線計測学【小豆川】
- 10/28 環境放射化学【小豆川】
- 11/ 4 放射線生物学【渡邊】
- 11/11 放射線医学【中川】
- 11/18 原子核物理学【鳥居】
- 12/ 2 原子力工学【石渡】
- 12/ 9 放射線物理学【鳥居】
- 12/16 環境放射化学【小豆川】
- 1/10 植物栄養・土壌肥料学
火曜【藤原】
- 1/20 放射線の利用【渡邊】
- 1/27 加速器科学・まとめ
【鳥居】

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

中川 恵一 《医学部附属病院放射線科》

石渡 祐樹 《工学系原子力国際専攻》

藤原 徹 《農学部応用生命科学》

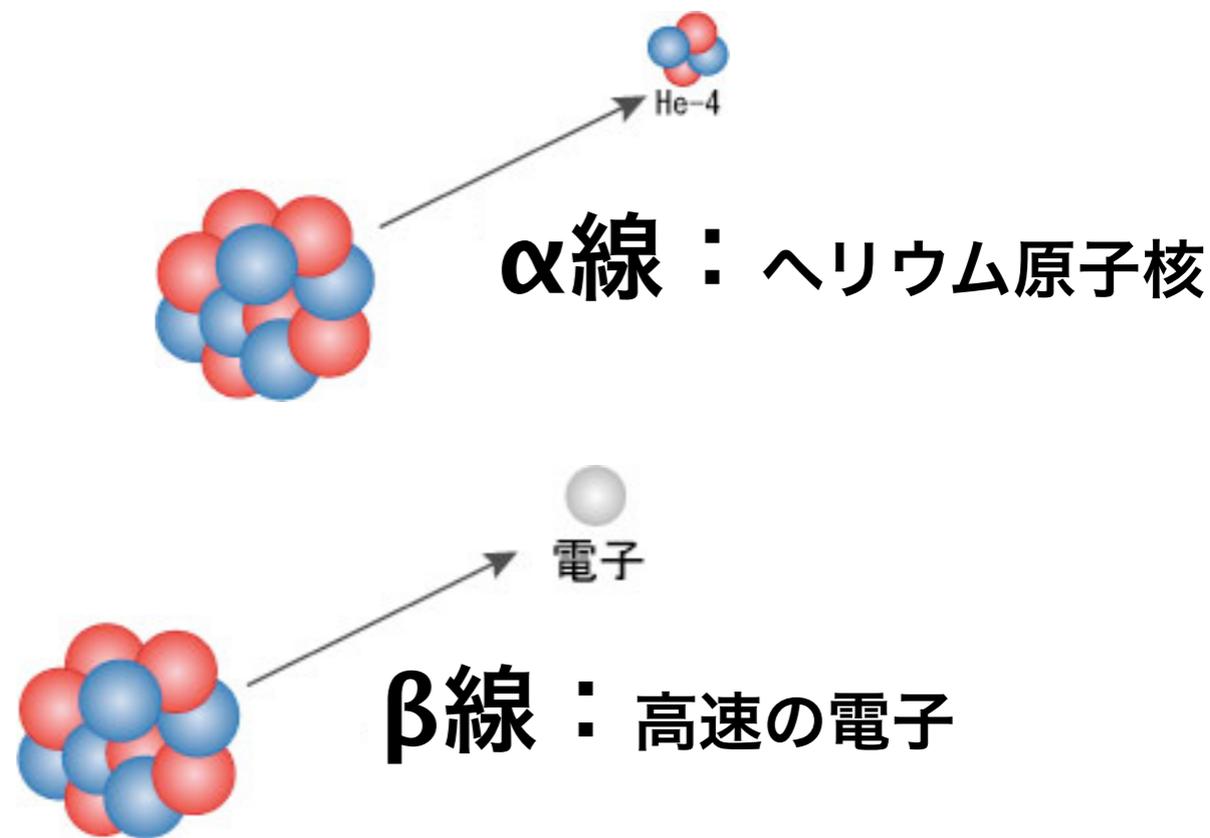
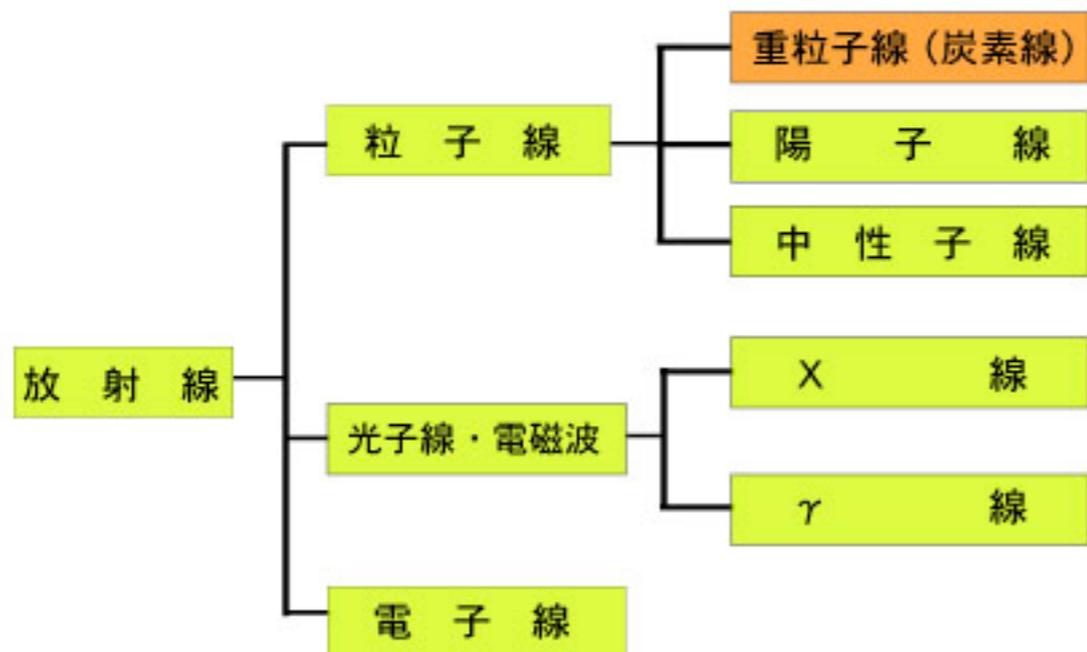
ゲスト講師

第2回

放射線物理学(I)

の復習

放射線の種類 (放射線治療分野で用いられる分類)

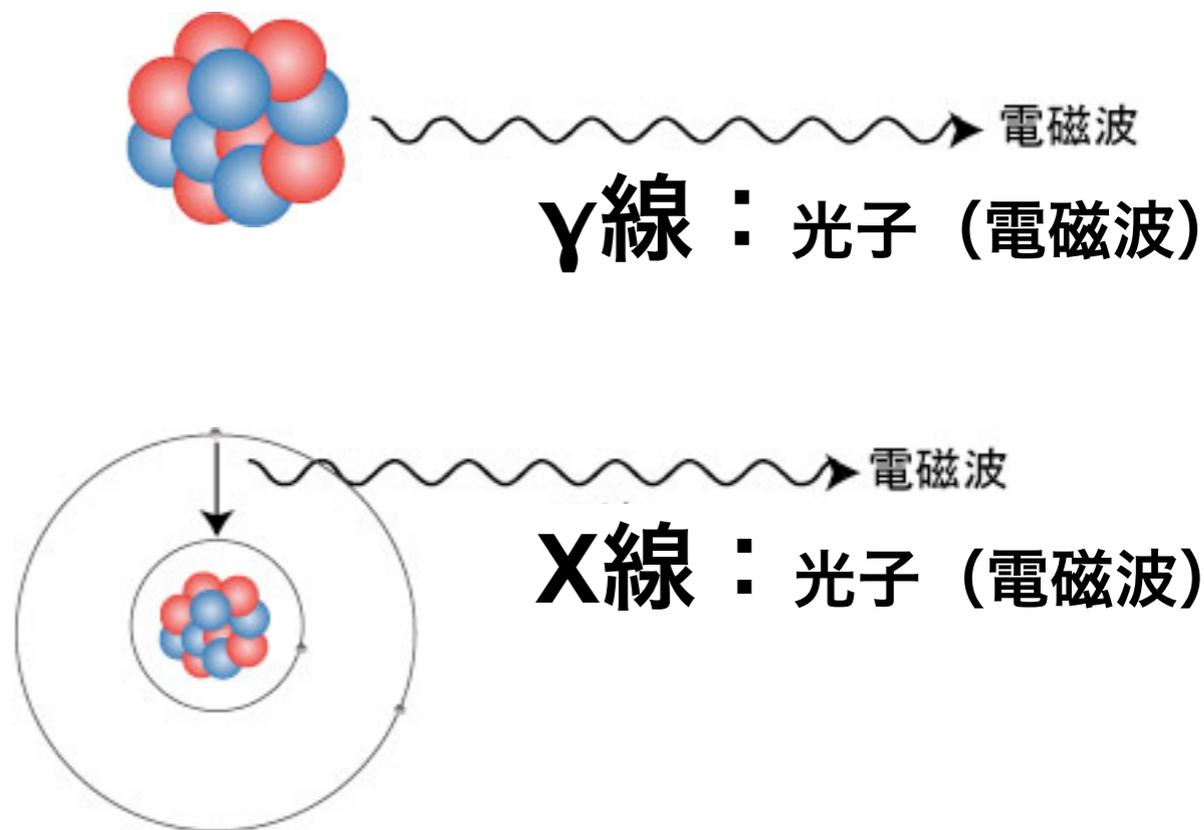


放射線のもつエネルギーは？

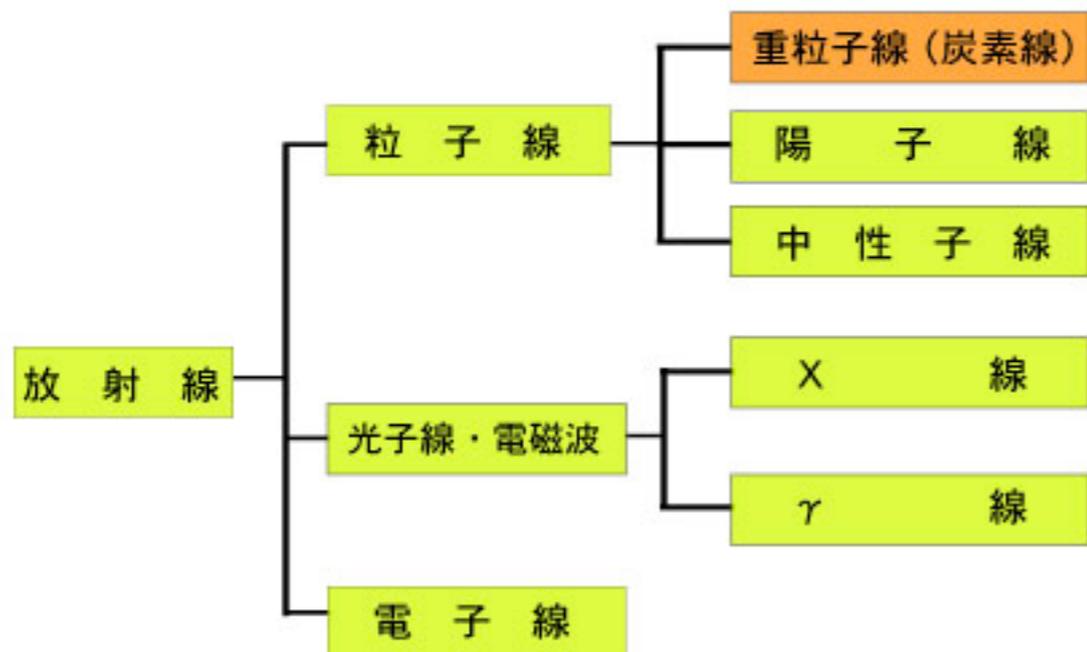
☞ **100 keV ~ MeV** for α/β/γ

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

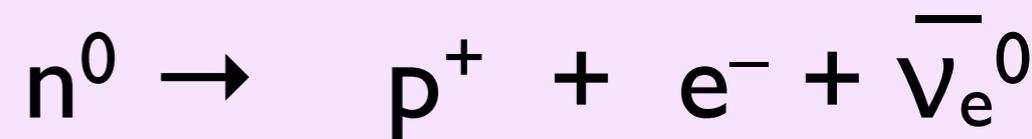
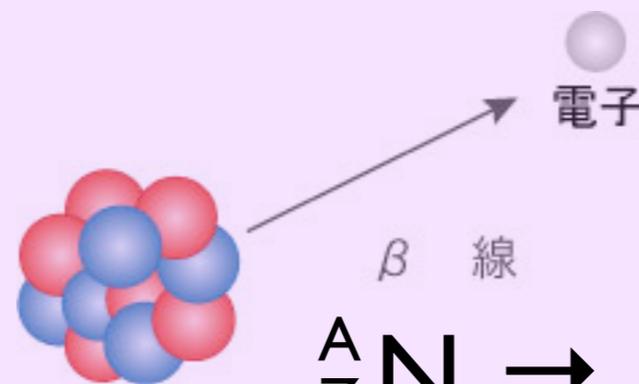
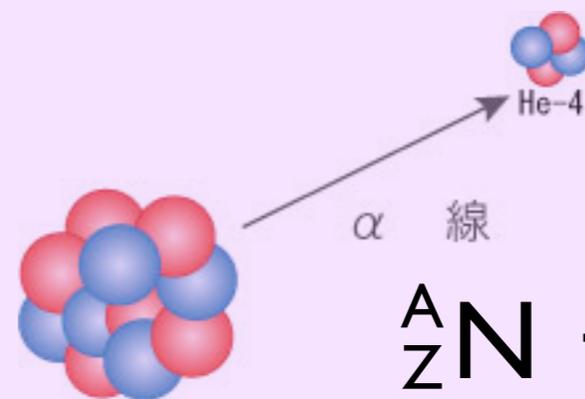
荷電粒子の質量は？



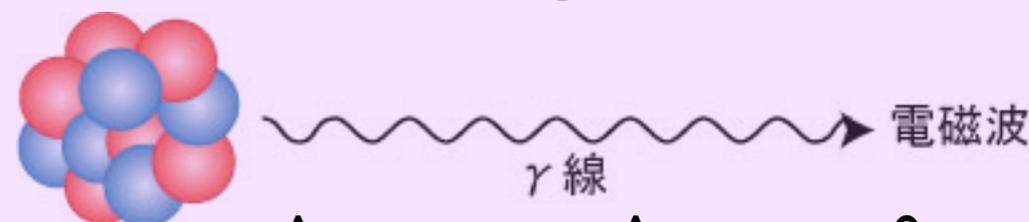
放射線の種類 (放射線治療分野で用いられる分類)



原子核 N



100 keV ~ MeV

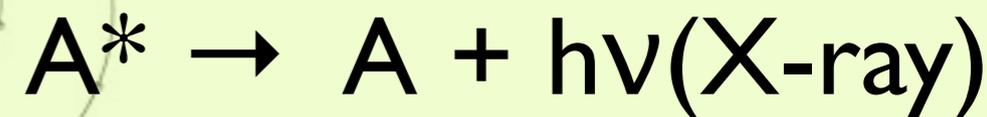
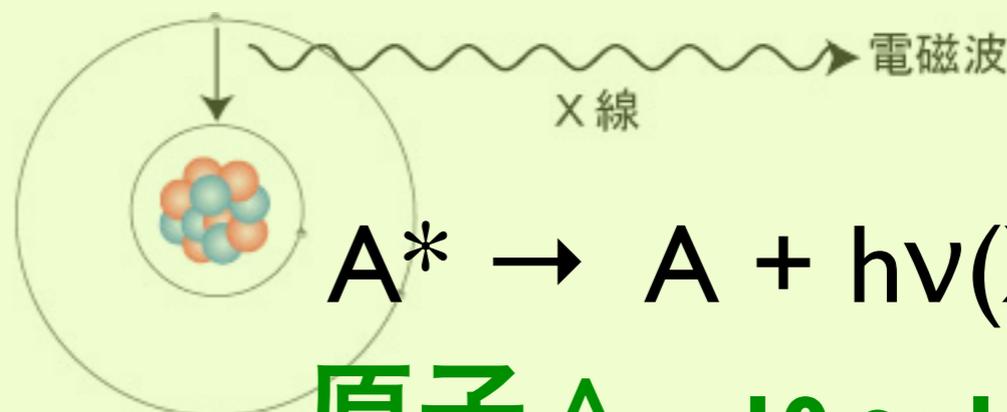


放射線のもつエネルギーは？

☞ 100 keV ~ MeV for $\alpha/\beta/\gamma$

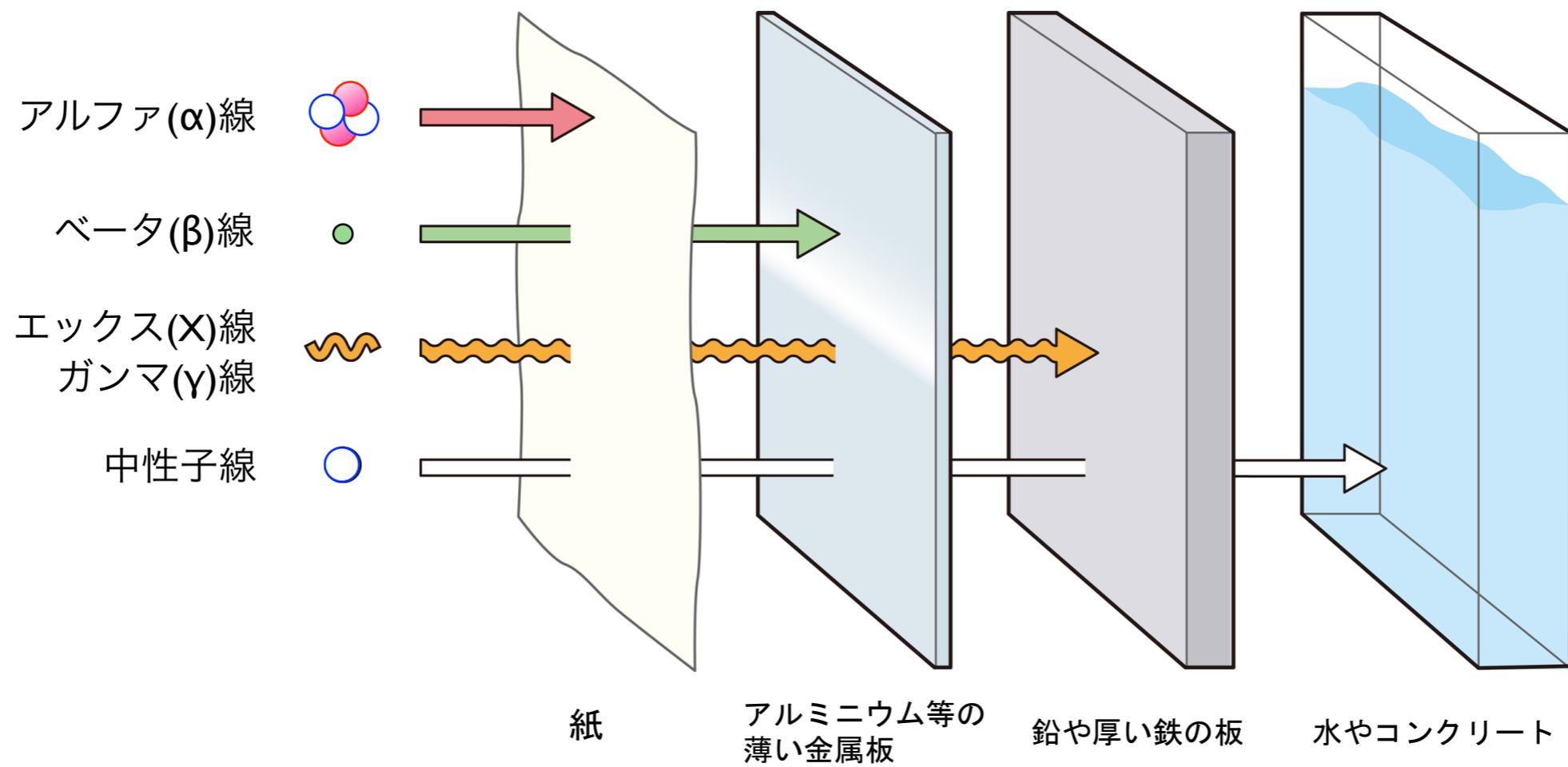
Cf. 原子の束縛エネルギーは？

荷電粒子の質量は？



原子 A 10 ~ 100 keV

放射線の種類と透過力



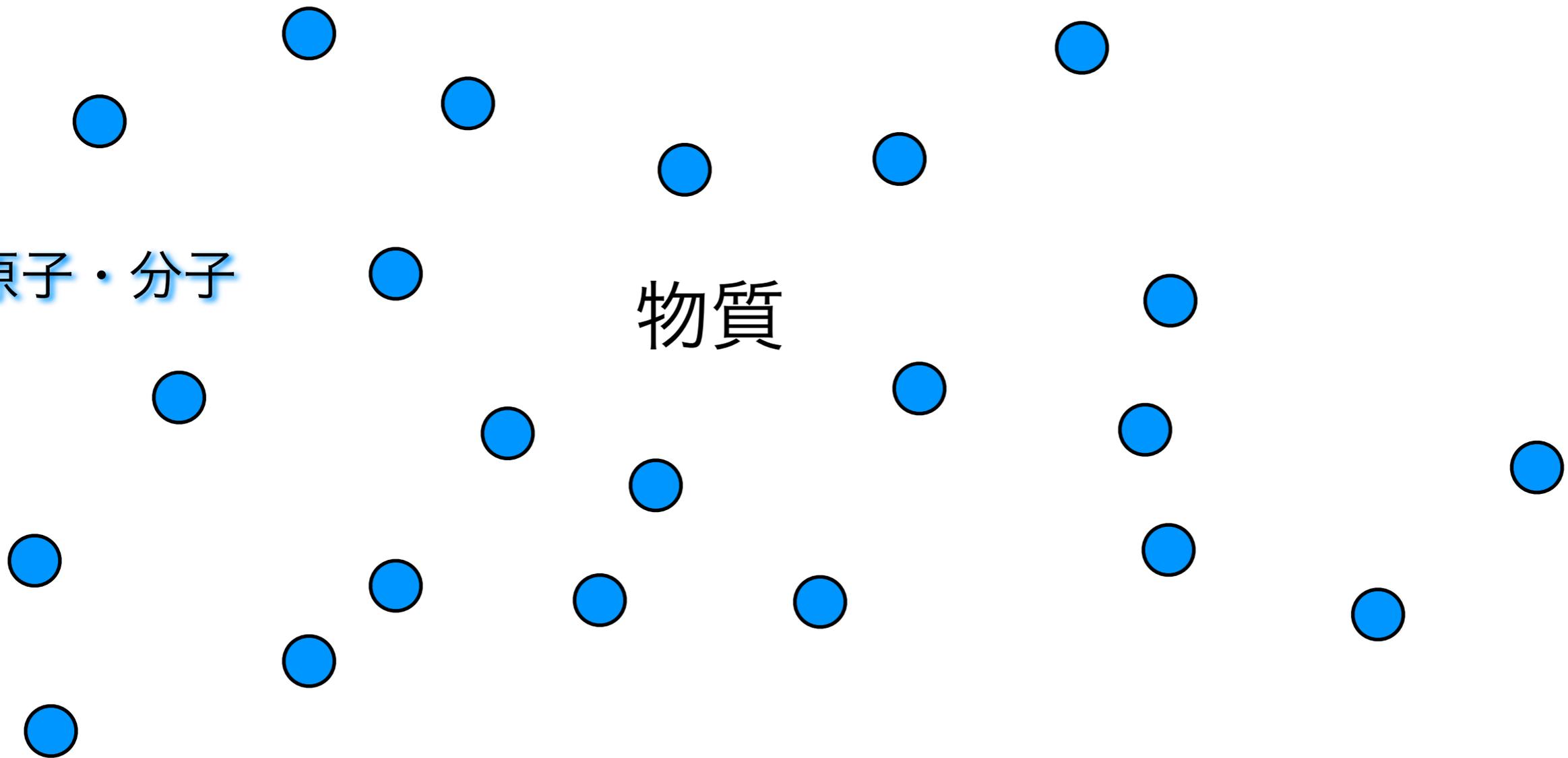
荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：
クーロン力

物質中の原子を電離・励起して電子に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、与える運動エネルギーは小さい。

原子・分子

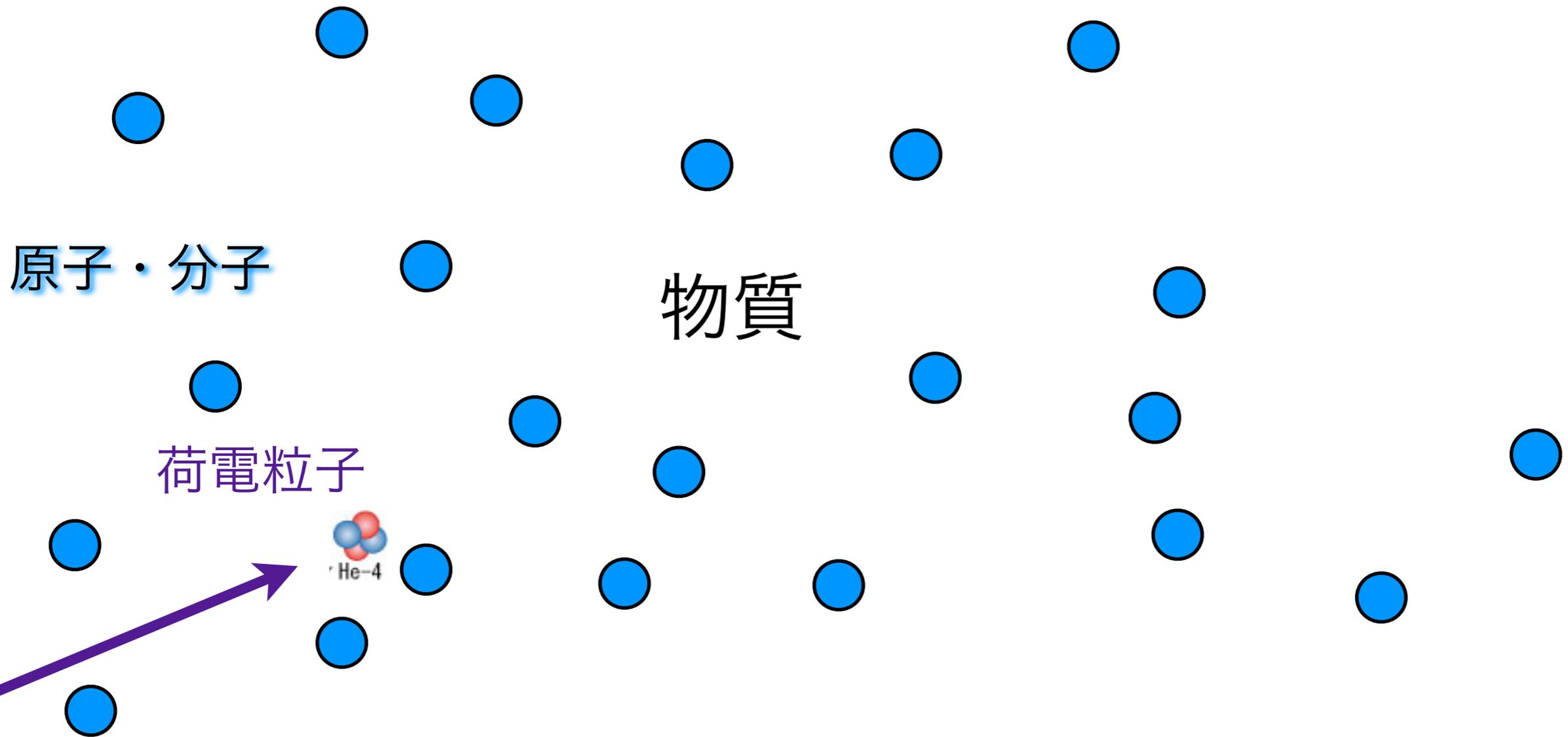
物質



荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：
クーロン力

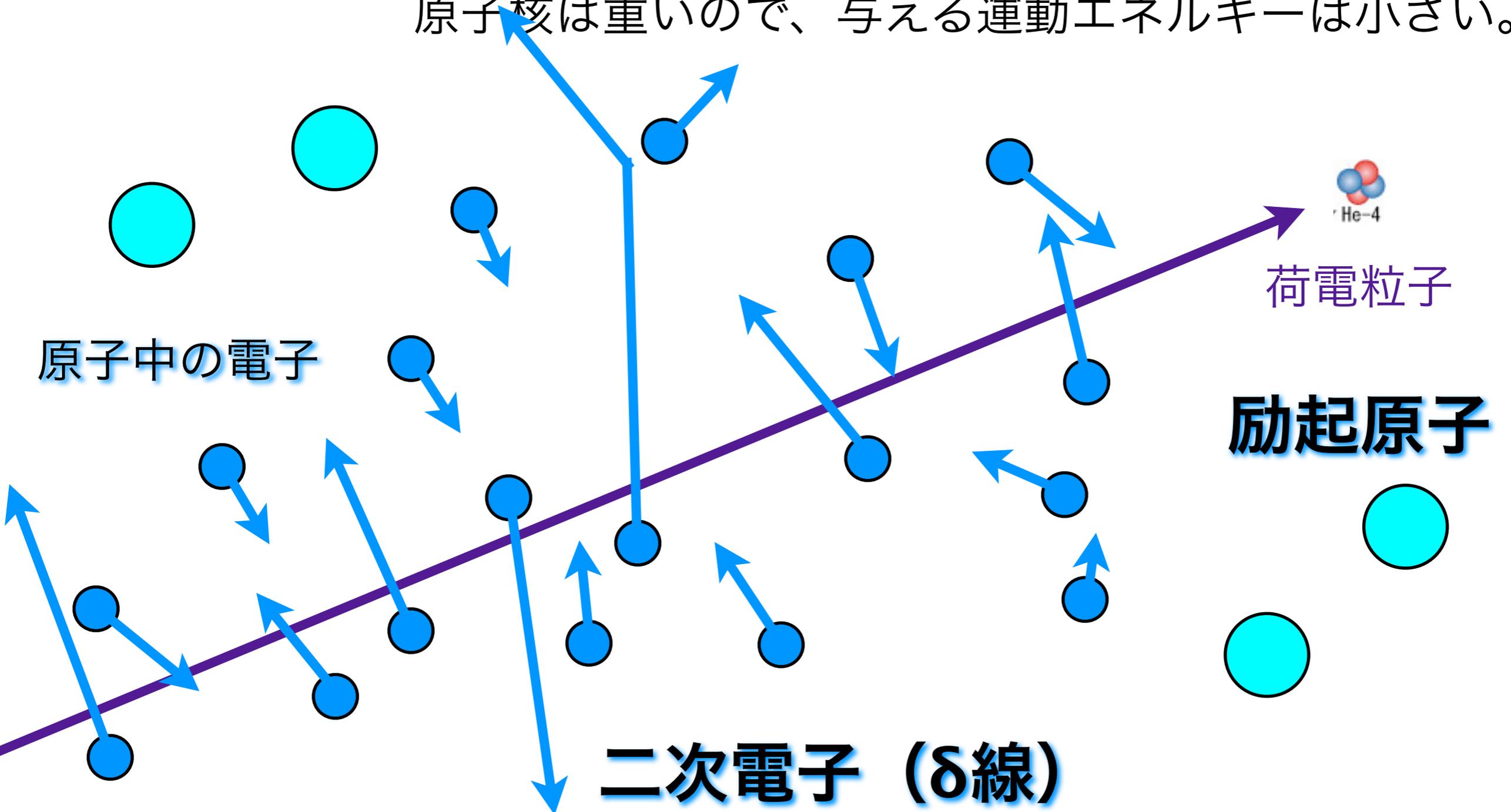
物質中の原子を電離・励起して電子に運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される（電子衝突阻止能）。
原子核は重いので、与える運動エネルギーは小さい。



荷電粒子のエネルギー損失過程

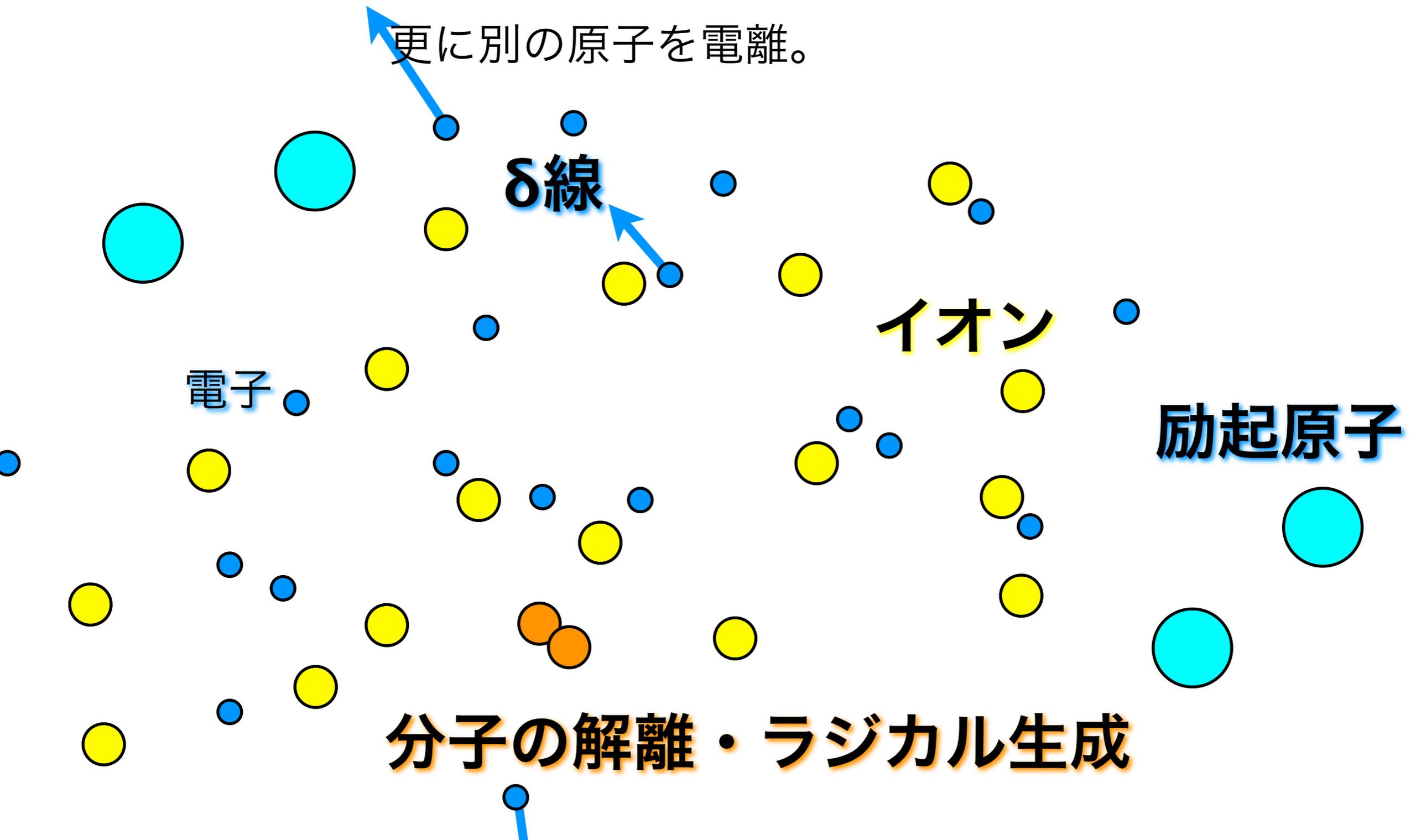
荷電粒子：
クーロン力

物質中の原子を電離・励起して電子に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、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。また再結合によりX線が発生。

励起原子

電子線

X線

再結合

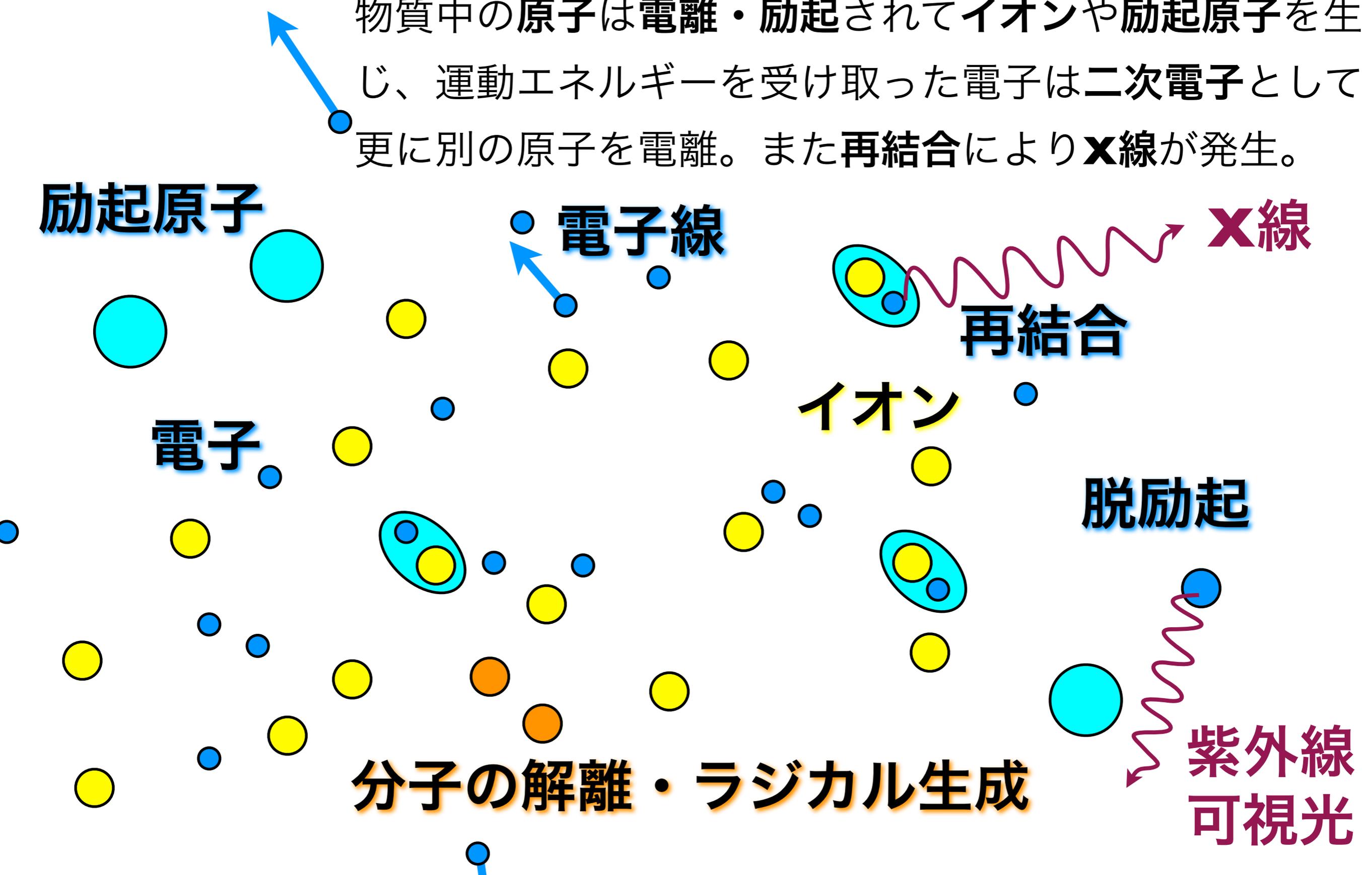
電子

イオン

脱励起

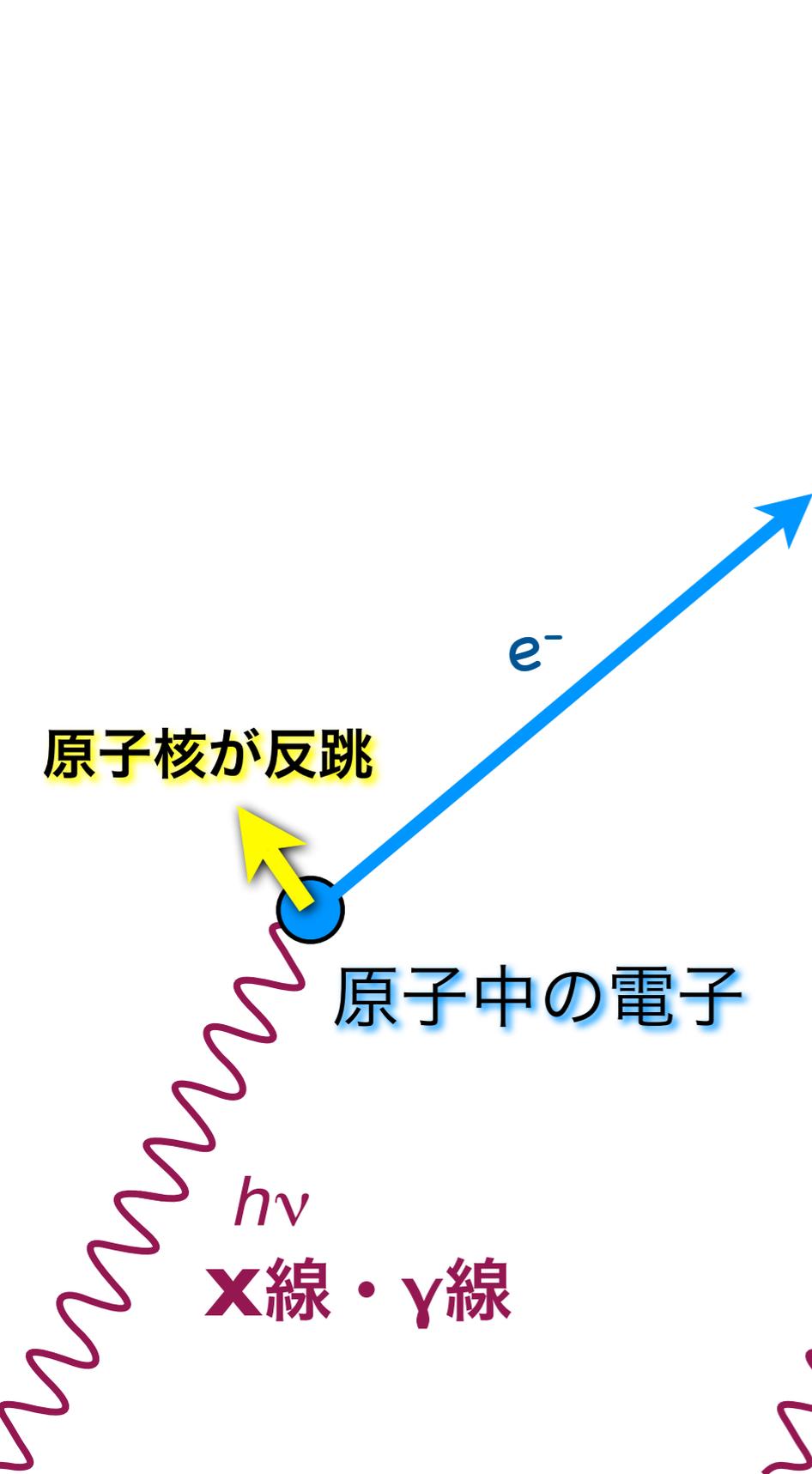
分子の解離・ラジカル生成

紫外線
可視光

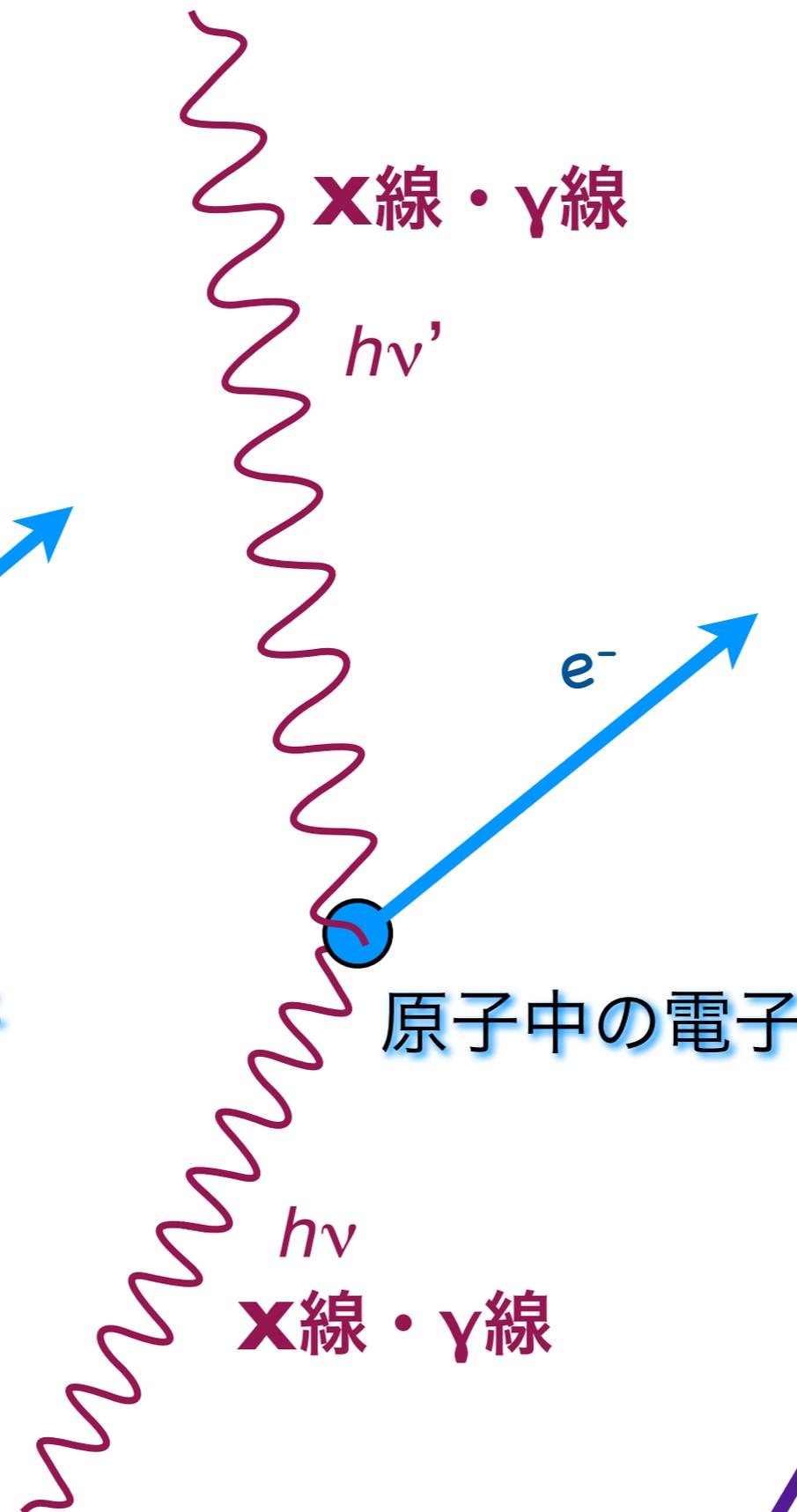


光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

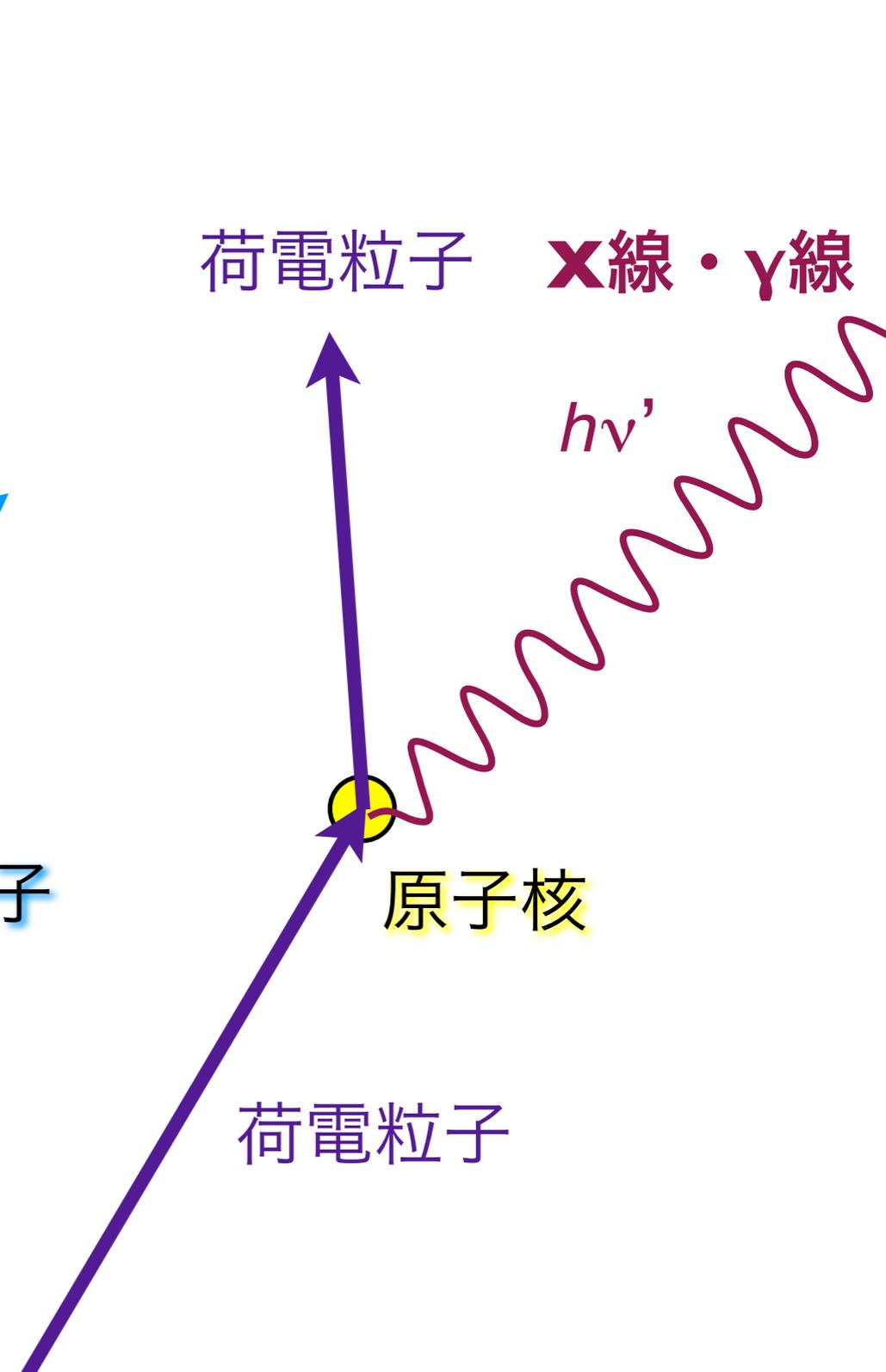
光電効果



コンプトン散乱



制動放射 (Bremsstrahlung)



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

荷電粒子

阻止能

(エネルギー損失) Stopping power (Energy loss)

荷電粒子：クーロン力

エネルギー損失

物質中の原子を電離・励起して電子に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、与える運動エネルギーは小さい。

● **重い粒子**：陽子線(p) / α 線 / 重粒子線 / π 中間子 / μ 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⁻)・陽電子(e⁺)

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。

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 δ 線 と呼ぶことがある。

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

荷電粒子

阻止能

(エネルギー損失) Stopping power (Energy loss)

荷電粒子：クーロン力

エネルギー損失

物質中の原子を電離・励起して電子に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、与える運動エネルギーは小さい。

● **重い粒子**：陽子線(p) / α 線 / 重粒子線 / π 中間子 / μ 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。

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 eV** 程度。

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) / α 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(β)線 : 低 LET 放射線

光子(X線, γ 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

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

飛程

Range

阻止能の逆数を積分。

陽子線(p) / α 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(β)線：p, α , 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

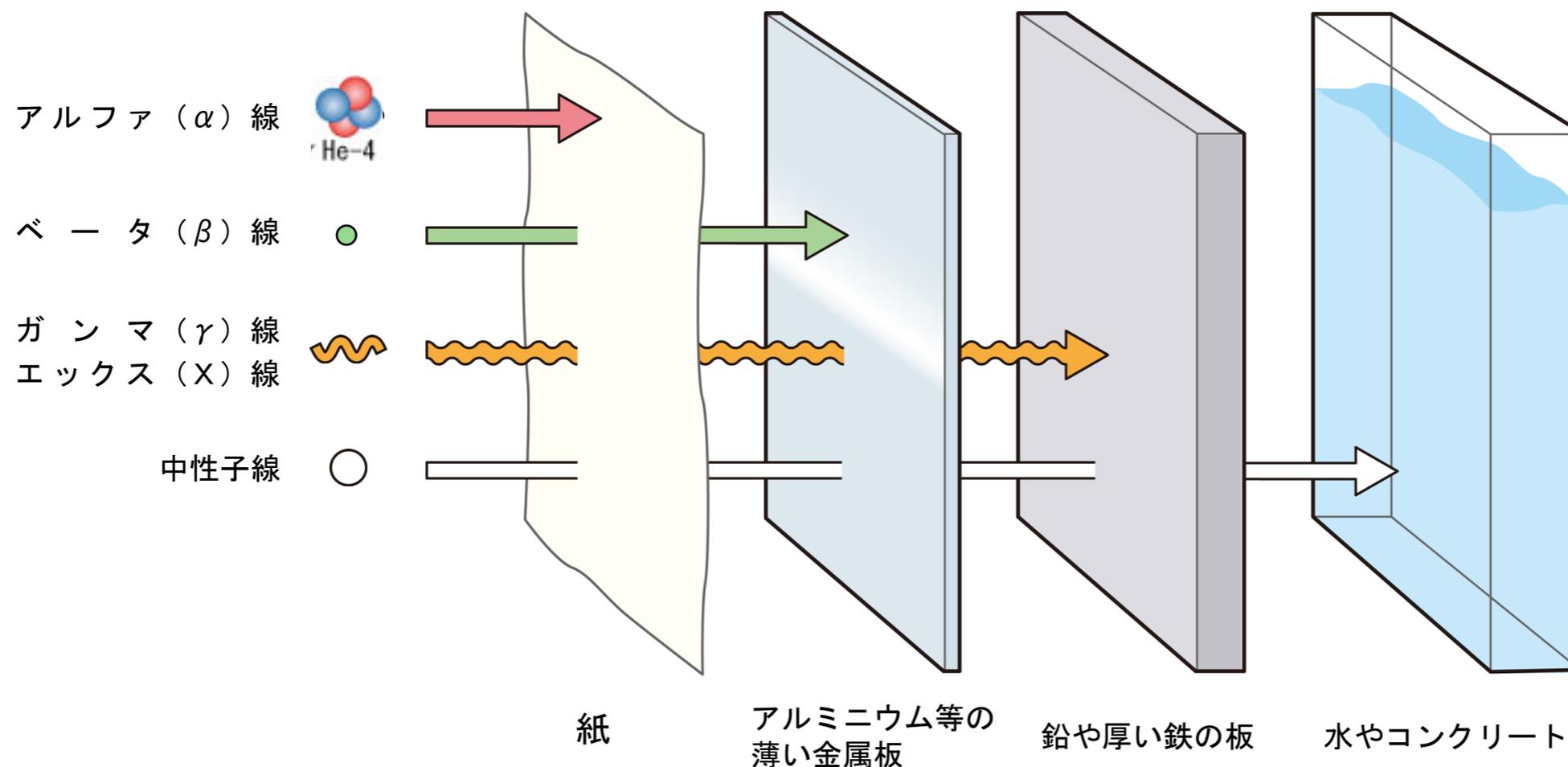
$$\begin{array}{l} \text{質量阻止能} \\ \text{MeV} / (\text{g} / \text{cm}^2) \end{array} \quad - \frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

飛程

Range

阻止能の逆数を積分。

α 線を止める β 線を止める γ 線、X線を止める 中性子線を止める



透過力が強い = なかなか反応しない

質量阻止能
MeV / (g / cm²)

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

放射線物理学(II)

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

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)

Bohr の計算

Linear Energy Transfer : LET

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

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

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

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

水素以外はほぼ $Z/A \approx 1/2$

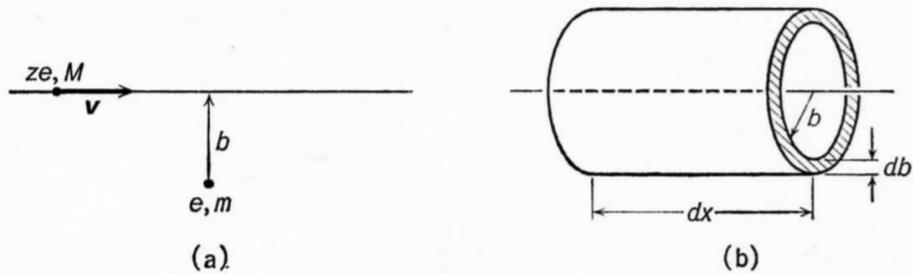
物質の種類にさほど依らない

質量阻止能
MeV / (g / cm²)

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

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
本書は CGS-Gauss 単位系での記述。~ に注意

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

$$I_{\perp} = \frac{2ze^2}{bv}$$

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。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 2π 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。また電子が軌道を一周する周期を τ 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 τ 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 $t = b/v \leq \tau = 1/\nu$ (ν 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

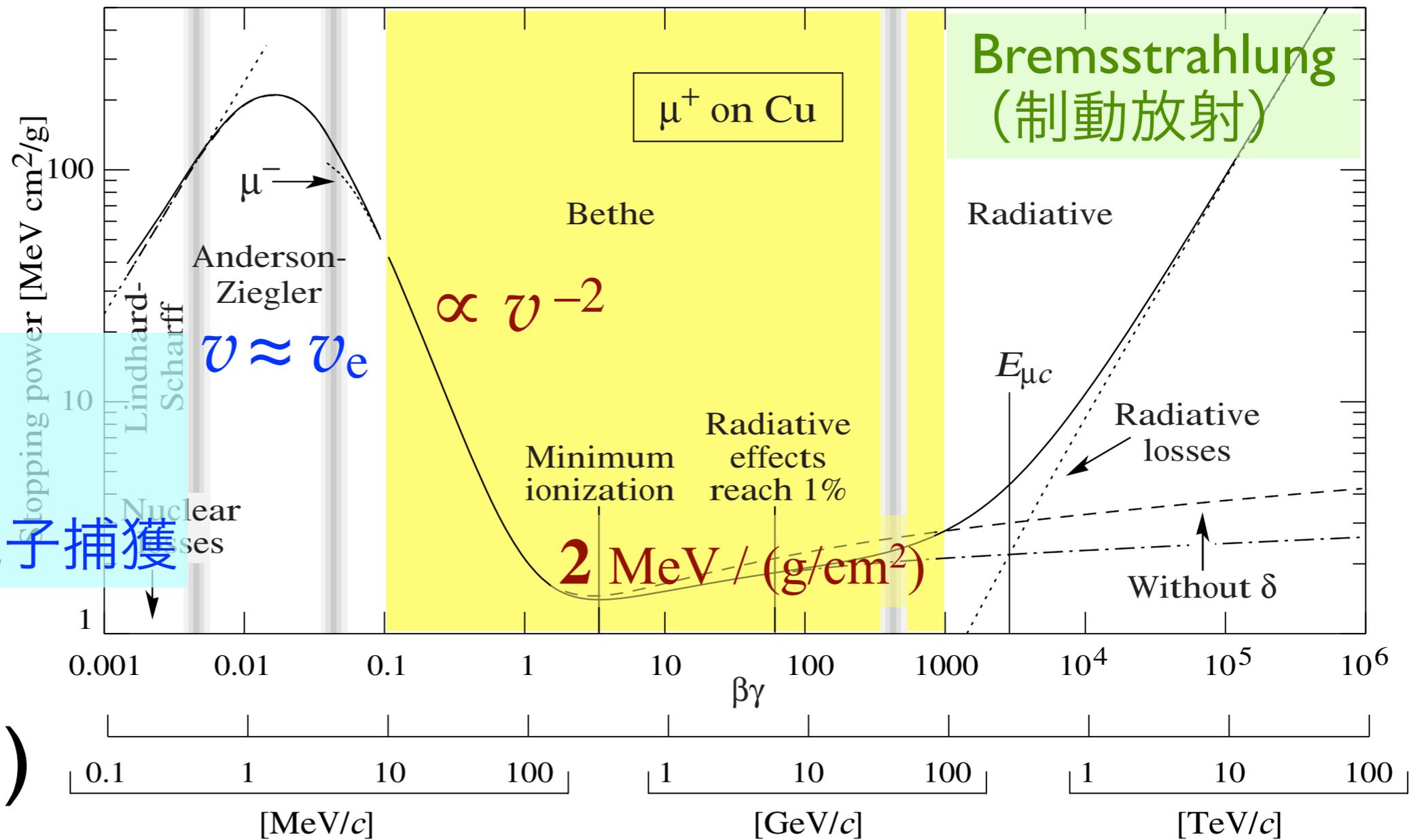
$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mv^2} n_e \ln \left| \frac{mv^2}{h\nu} \right| \quad (9)$$

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

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

高エネルギー物理学業界では ρ を書かない (x について、 ρ 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 / μm

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,

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

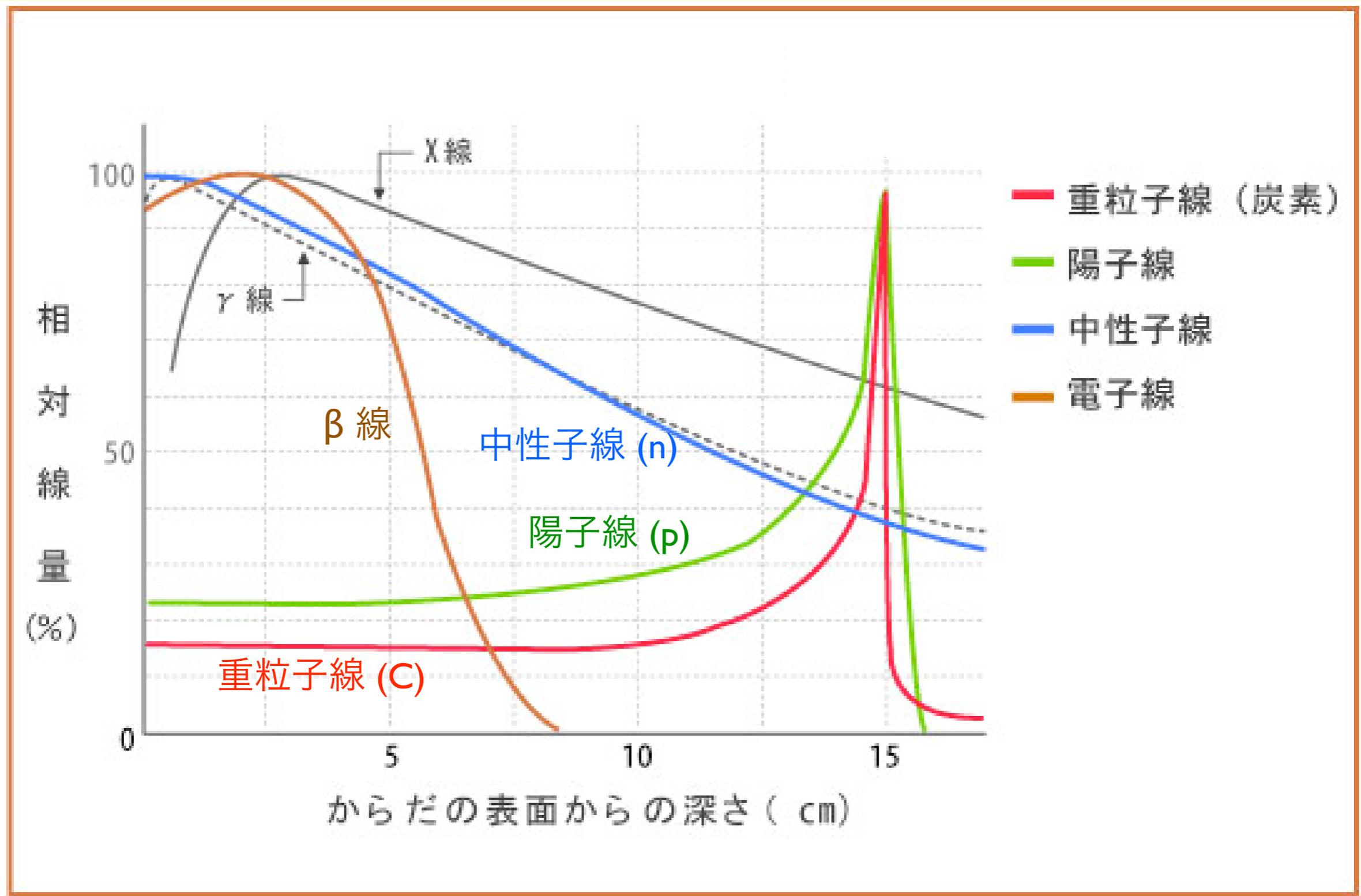
質量阻止能
MeV / (g / cm²)

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

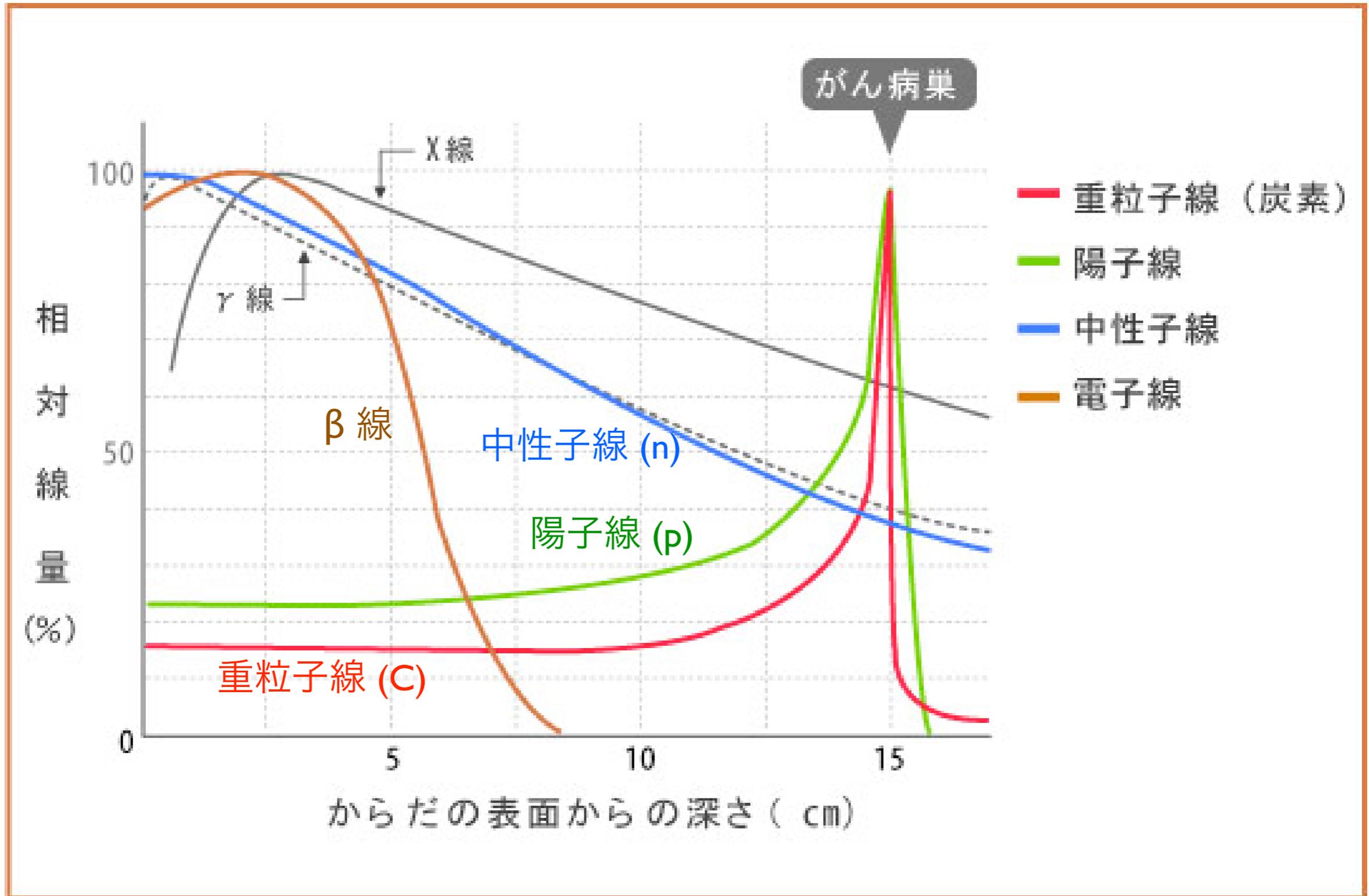
陽子(p)、 α 、重粒子線は飛程が揃っている。

電子(β)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, γ) は反応が確率的に起こるため、指数関数的減衰をする。



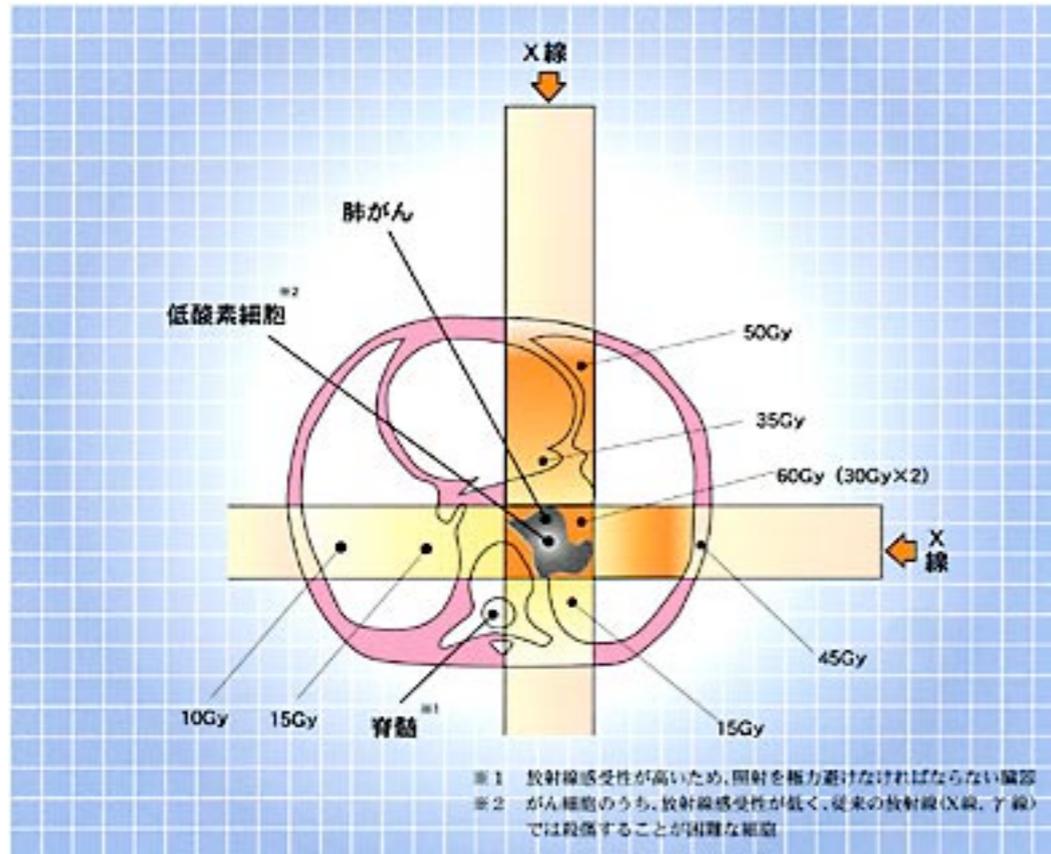
Bragg peak



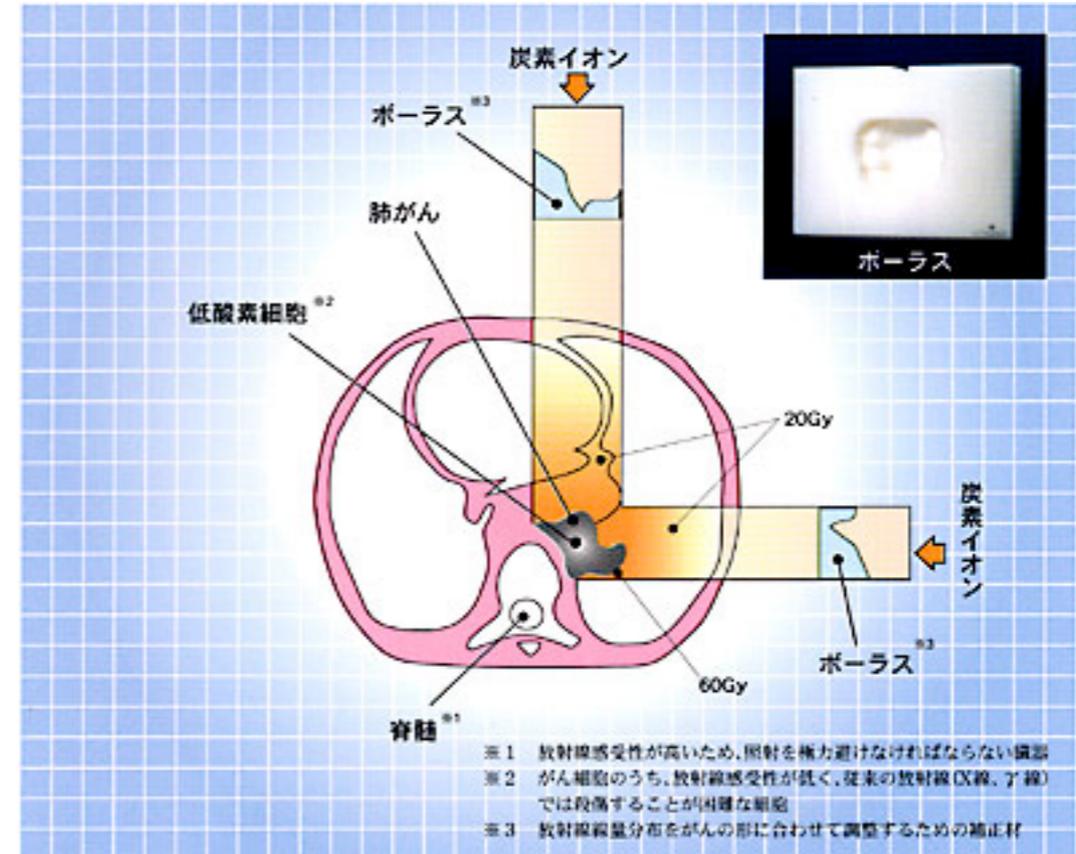
放射線医療：がん治療

数 Gy を複数回

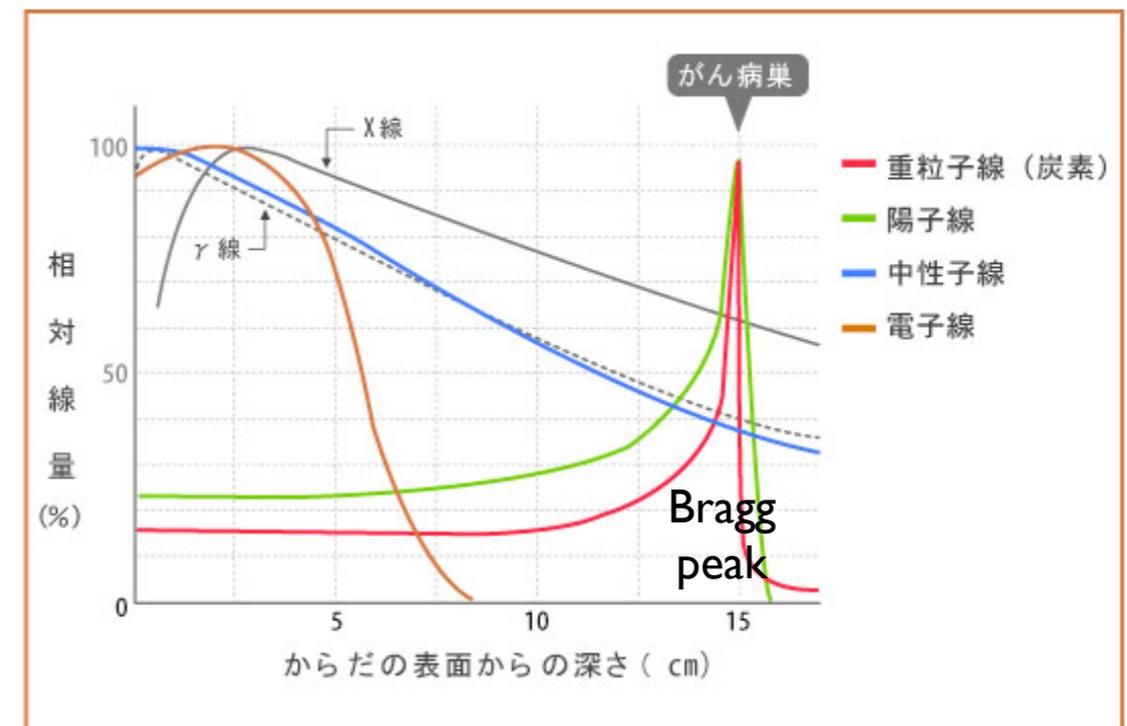
X線



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



原子物理学

連続状態 continuum

原子のエネルギー準位



黒板にて説明

束縛状態 bound states

離散的エネルギー準位 discrete energy levels

覚えにくい

$$-E_B = -\frac{2\pi^2 k_0^2 m_e e^4}{h^2} \frac{Z^2}{n^2} = -\frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} \frac{Z^2}{n^2}$$

$$-E_B = -hc R_\infty \frac{Z^2}{n^2} \quad R_\infty : \text{リュードベリ定数}$$

$$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}, \quad \alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad h : \text{プランク定数}$$

α : 微細構造定数
(無次元量)

$n=1$ $\frac{1s}{-13.6 \text{ eV}}$
(水素原子)

$$E_B(\text{H}) = \frac{M}{M+m} E_B$$

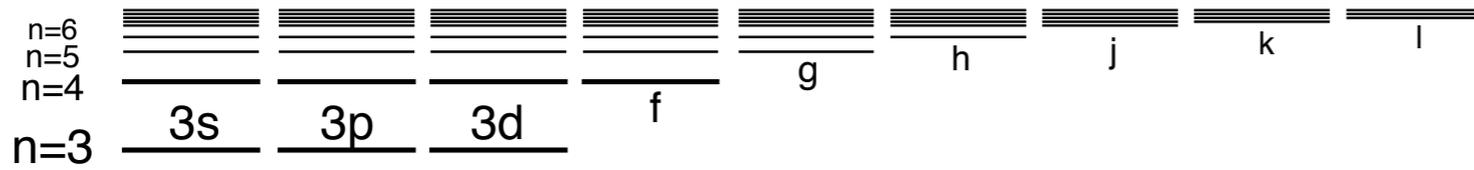
$$-E_B = -\frac{1}{2} m_e c^2 \alpha^2 \frac{Z^2}{n^2}$$

Z 大 $\rightarrow E_B = h\nu$ 大 : X線

$$v_e = c \alpha \frac{Z}{n}$$

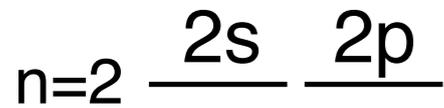
原子のエネルギー準位

連続状態 continuum



束縛状態 bound states

離散的エネルギー準位 discrete energy levels



$$-E_B = -hc R_\infty \frac{Z^2}{n^2}$$

R_∞ : リュードベリ定数

$$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}, \quad \alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

h : プランク定数

α : 微細構造定数

(無次元量)

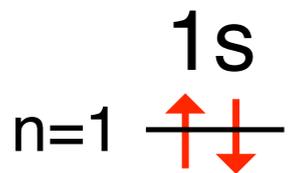
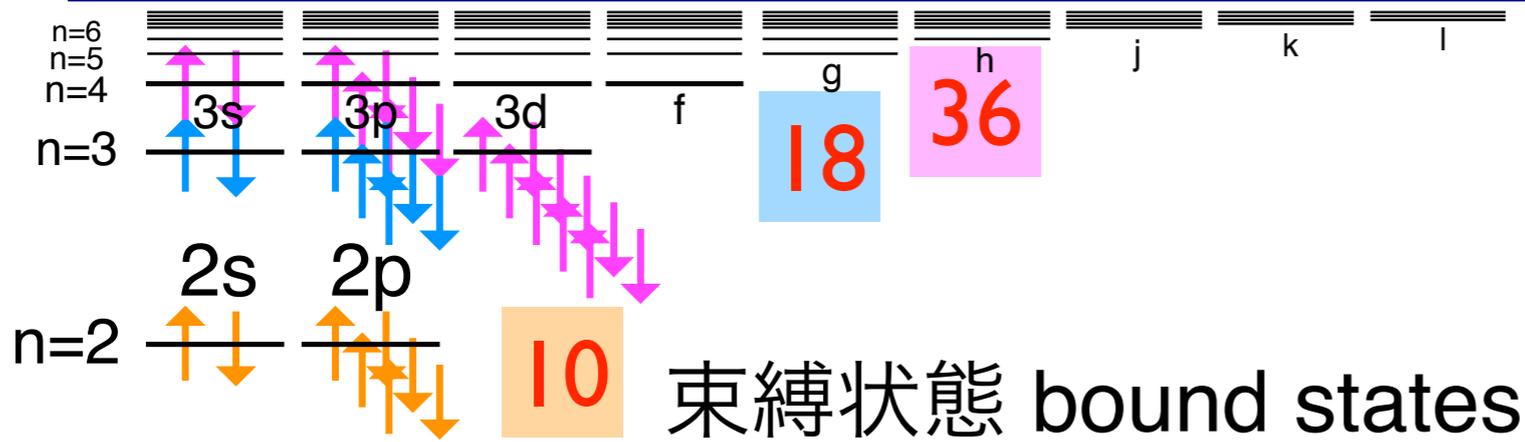
$n=1$ $\frac{1s}{-13.6 \text{ eV}}$
(水素原子)

$$E_B(\text{H}) = \frac{M}{M+m} E_B$$

$$-E_B = -\frac{1}{2} m_e c^2 \alpha^2 \frac{Z^2}{n^2}$$

原子のエネルギー準位

連続状態 continuum



2

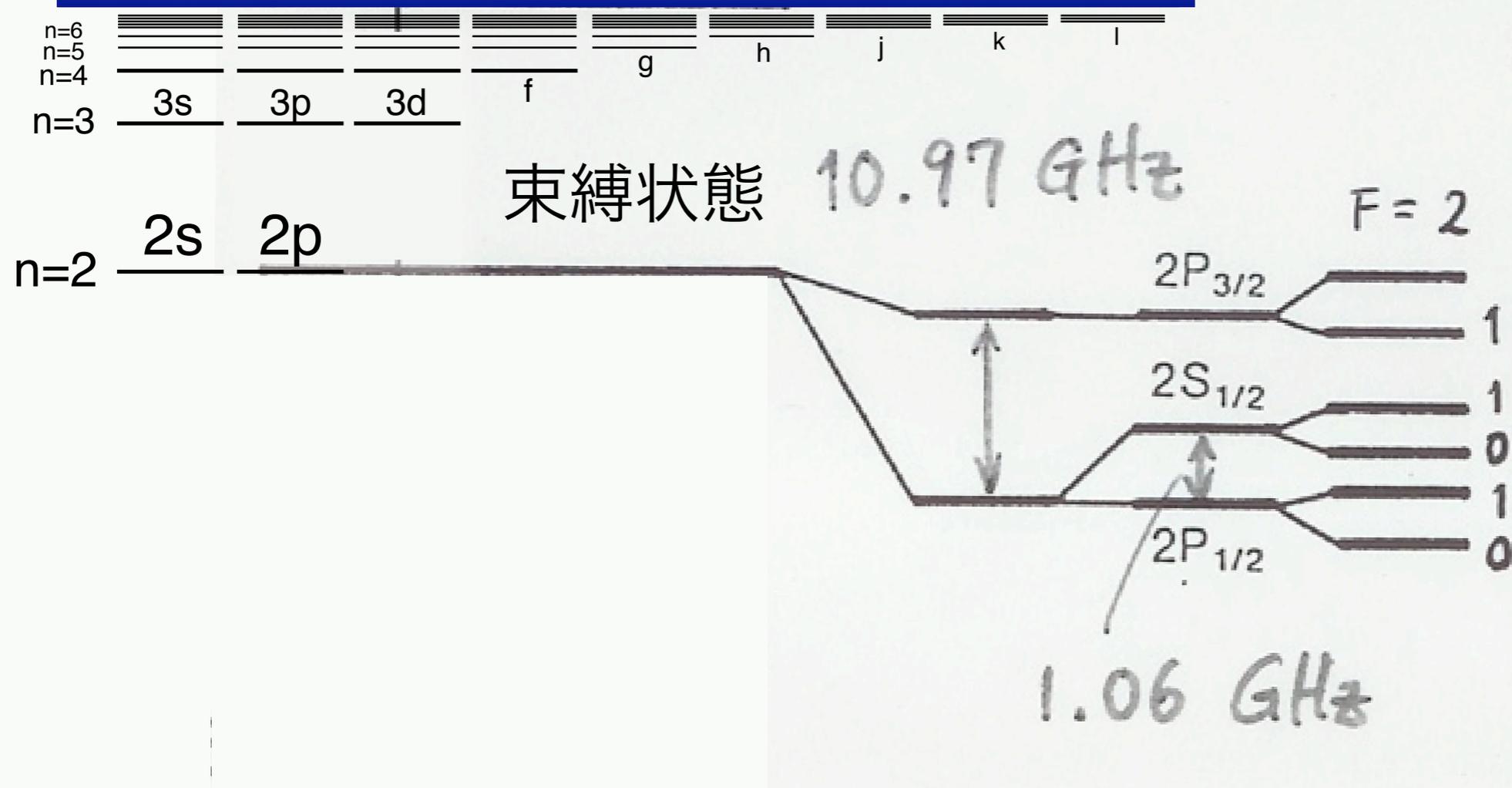
魔法数
magic number

閉殻
closed shell

魔法数	電子配置	元素
2	$1s^2$	He
10	$1s^2 2s^2 2p^6$	Ne
18	$[Ne] 3s^2 3p^6$	Ar
36	$[Ar] 4s^2 3d^{10} 4p^6$	Kr
54	$[Kr] 5s^2 4d^{10} 5p^6$	Xe
86	$[Xe] 6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6$	Rn

稀ガス

連続状態 continuum

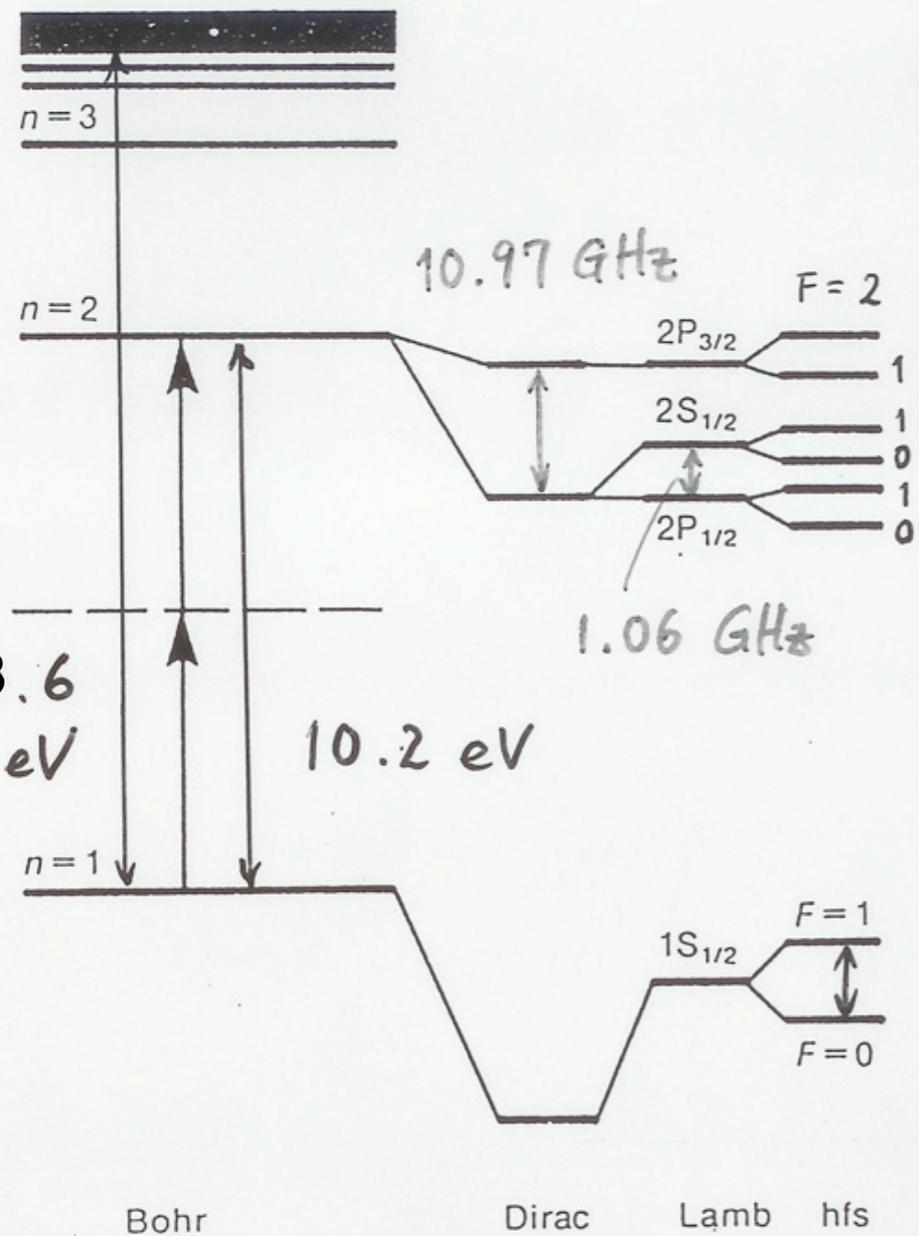


\updownarrow 24 MHz
 \updownarrow 178 MHz
 \updownarrow 59 MHz

1.42 GHz

水素原子
 子原素水

HYDROGEN



$$\frac{97492}{\text{cm}^{-1}}$$

$$\frac{82259.279}{\text{cm}^{-1}}$$

$$\frac{82258.949}{\text{cm}^{-1}}$$

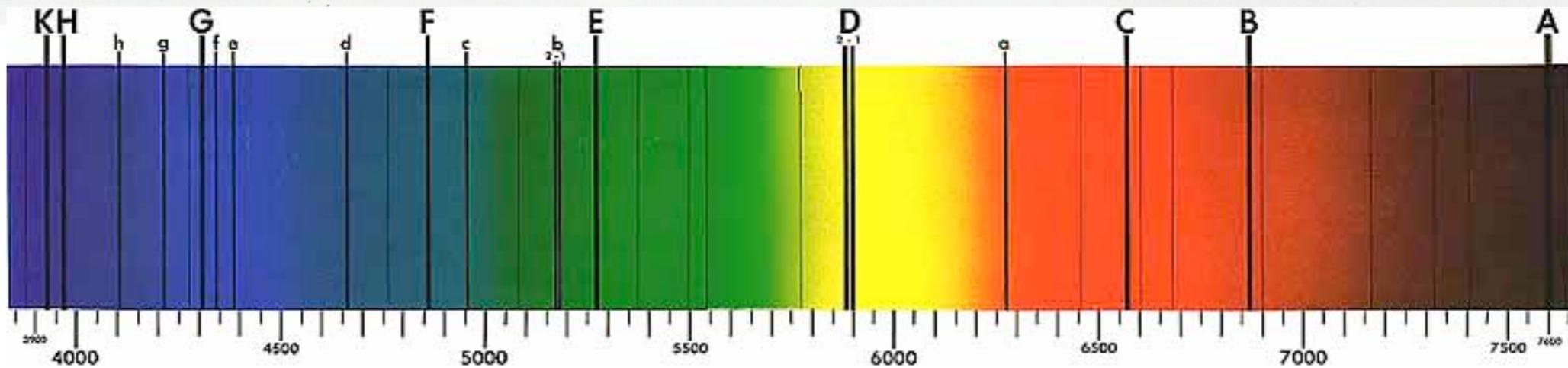
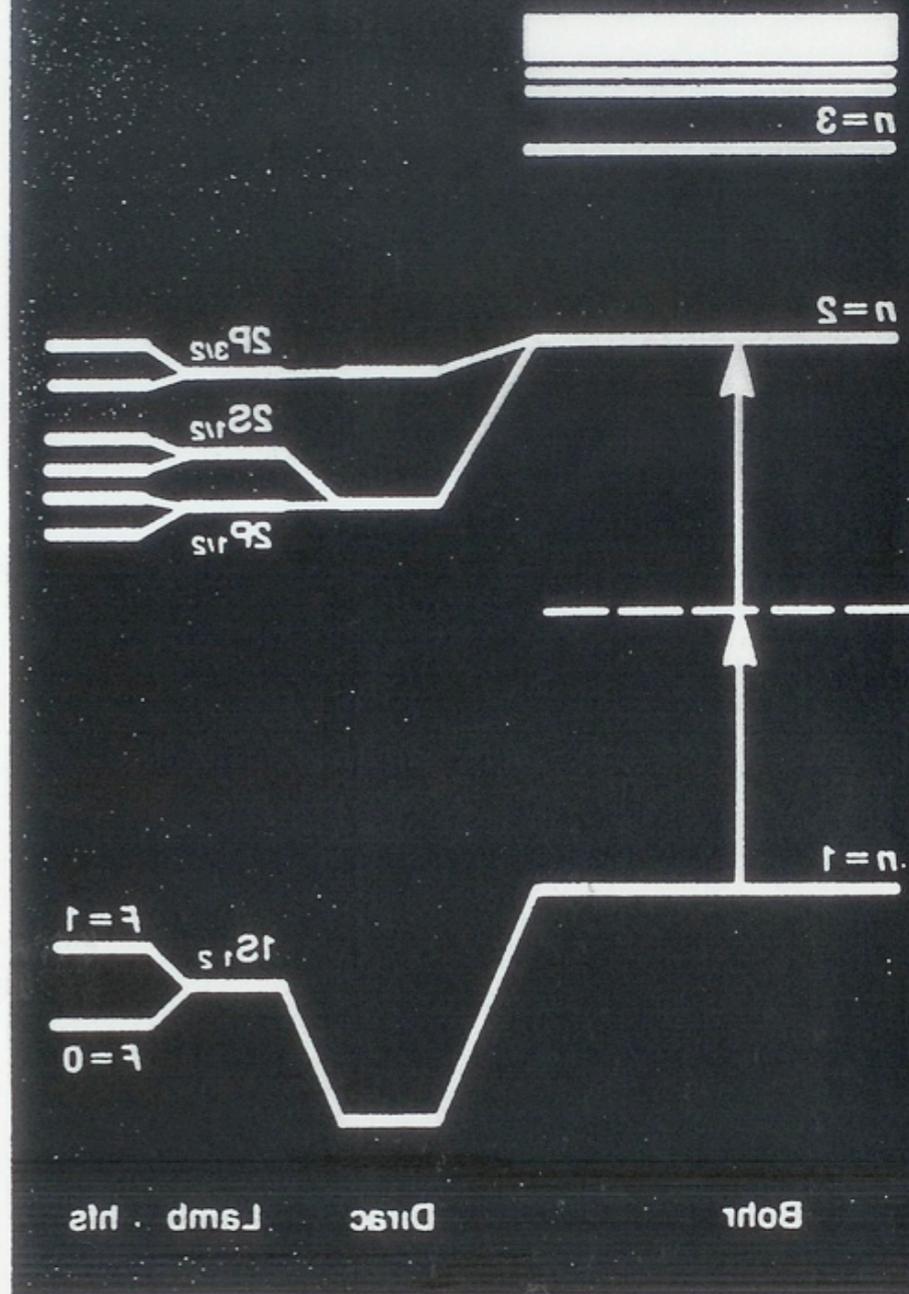
$$\frac{82258.913}{\text{cm}^{-1}}$$

$\updownarrow 24 \text{ MHz}$
 $\updownarrow 178 \text{ MHz}$
 $\updownarrow 59 \text{ MHz}$

1.42 GHz

0.000

АНТИДРОГЕН



線量計算

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 Φ [cm^{-2}]

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

線量計測量 dosimetric quantity : エネルギー変換

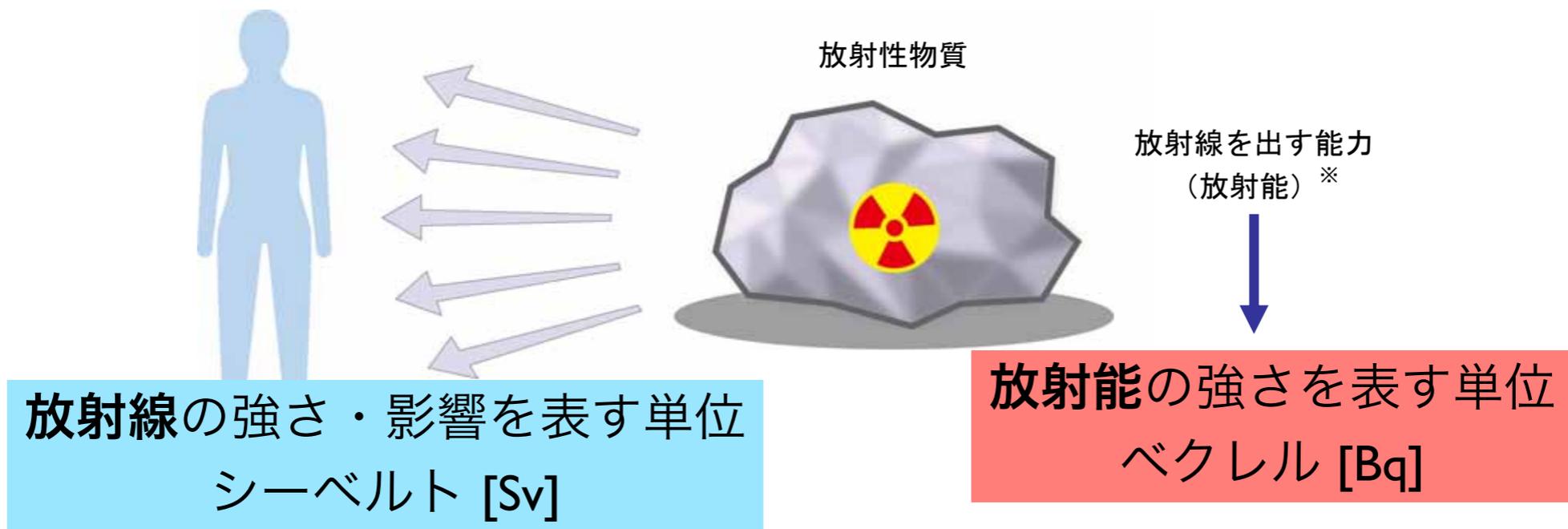
カーマ kerma (Kinetic Energy Released in MAterial / MAtter) 非荷電粒子線 K [J / kg] = [Gy]

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

照射線量 光子 (x線・γ線) X [C/kg], [R] | $\text{R} \approx 2.58 \times 10^{-4} \text{ C}/\text{kg}$

線量計測量 dosimetric quantity : エネルギー付与

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



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

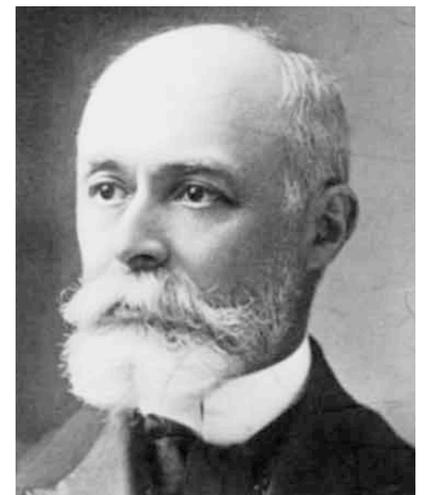
Gray



Sievert

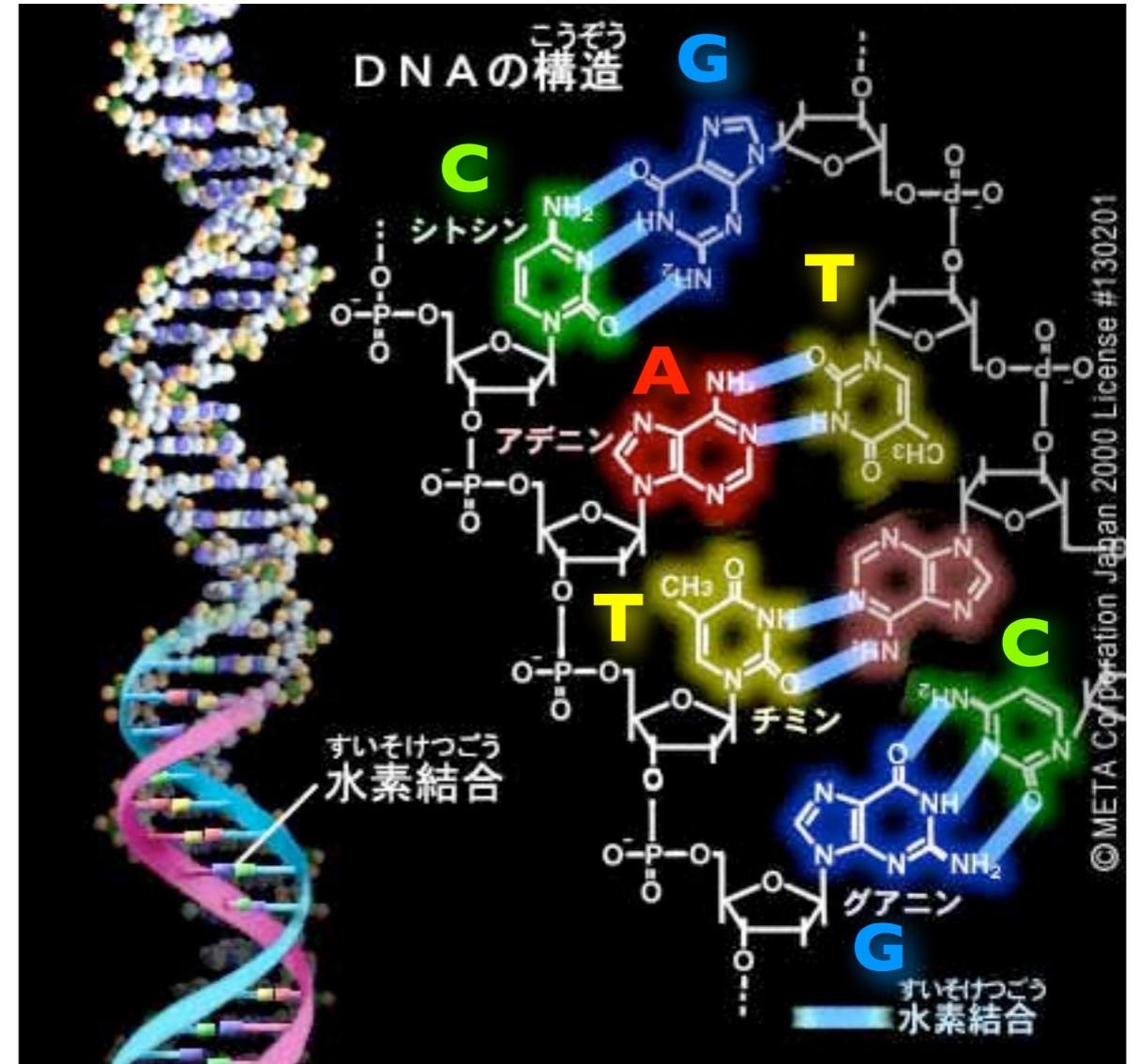
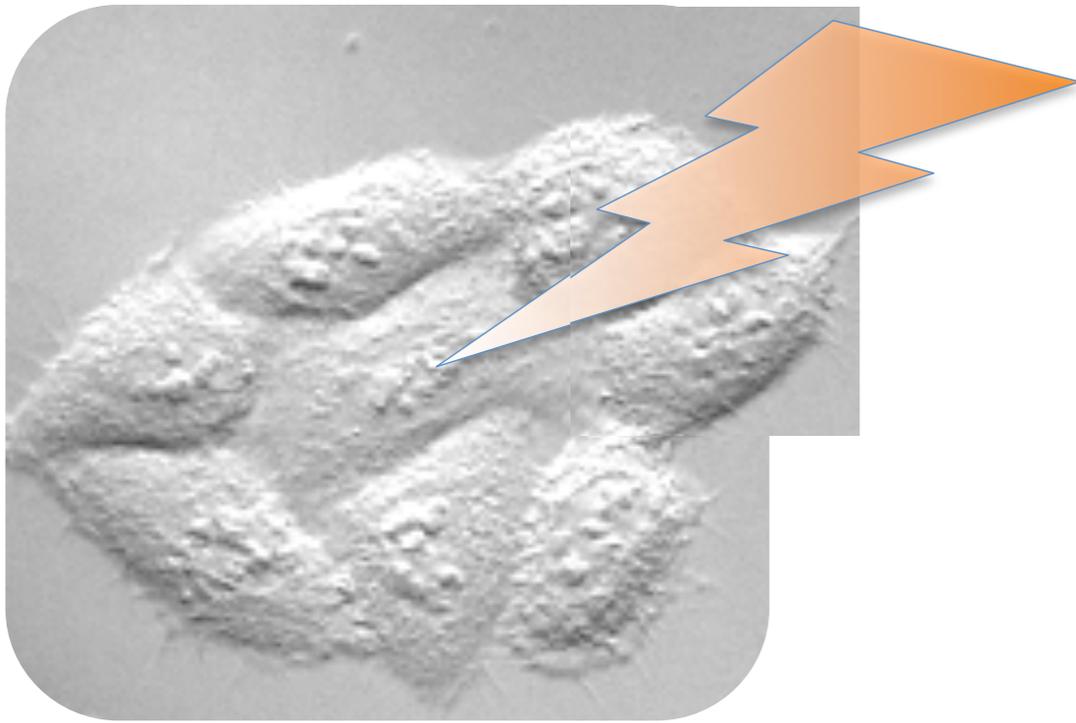


Becquerel

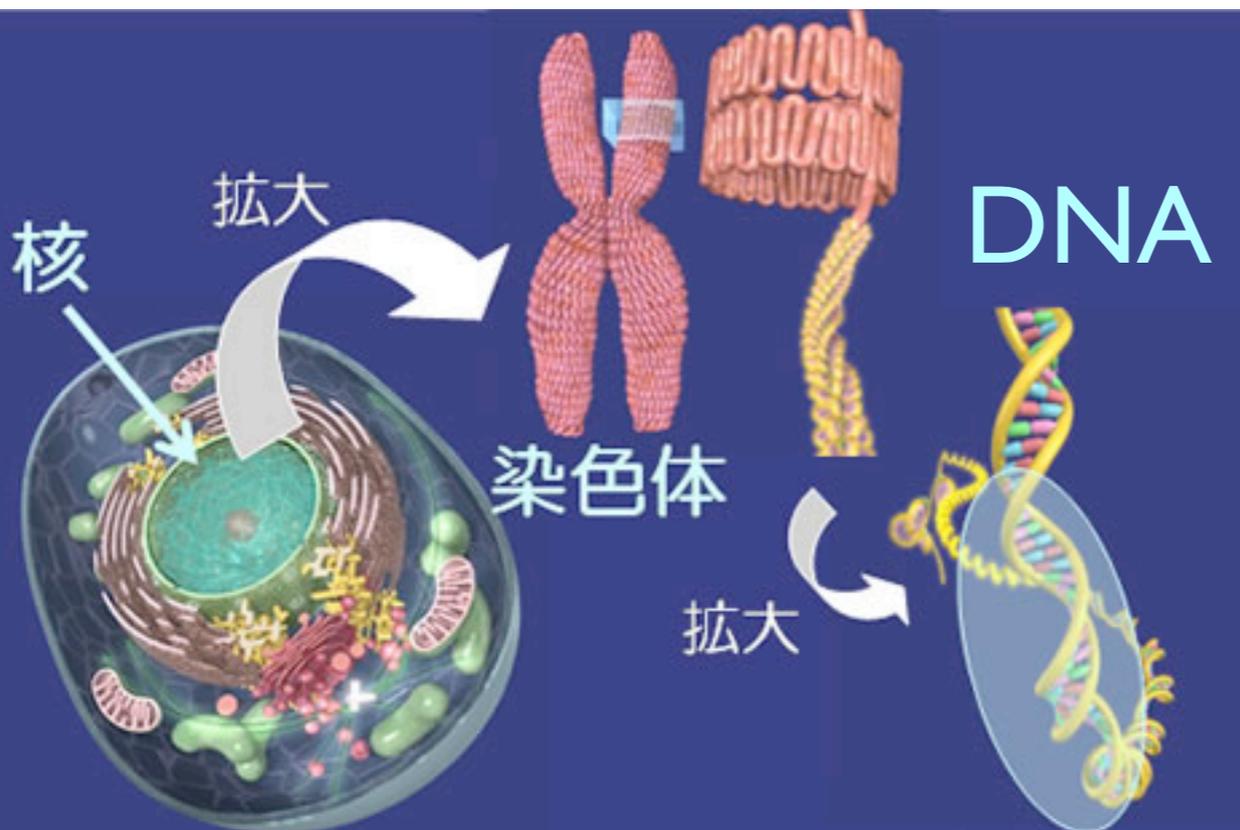


細胞の核に放射線が照射

DNA



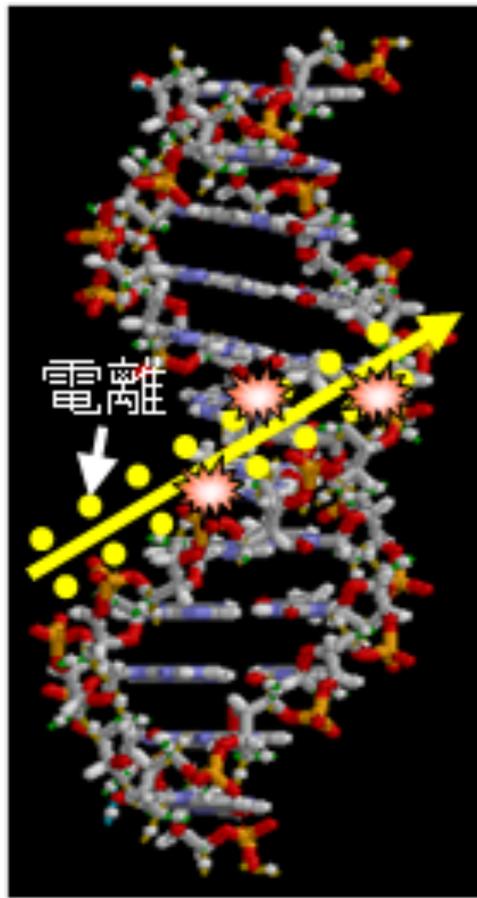
出典：IPA「教育用画像素材集サイト」 <http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



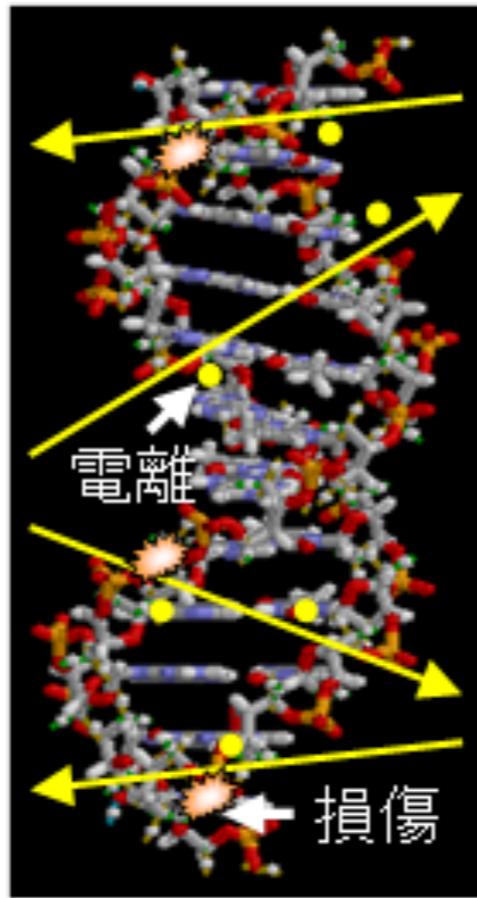
細胞(60兆個) 一部が遺伝子

図1 核、染色体、遺伝子

放射線による DNA 損傷



重イオン



電子

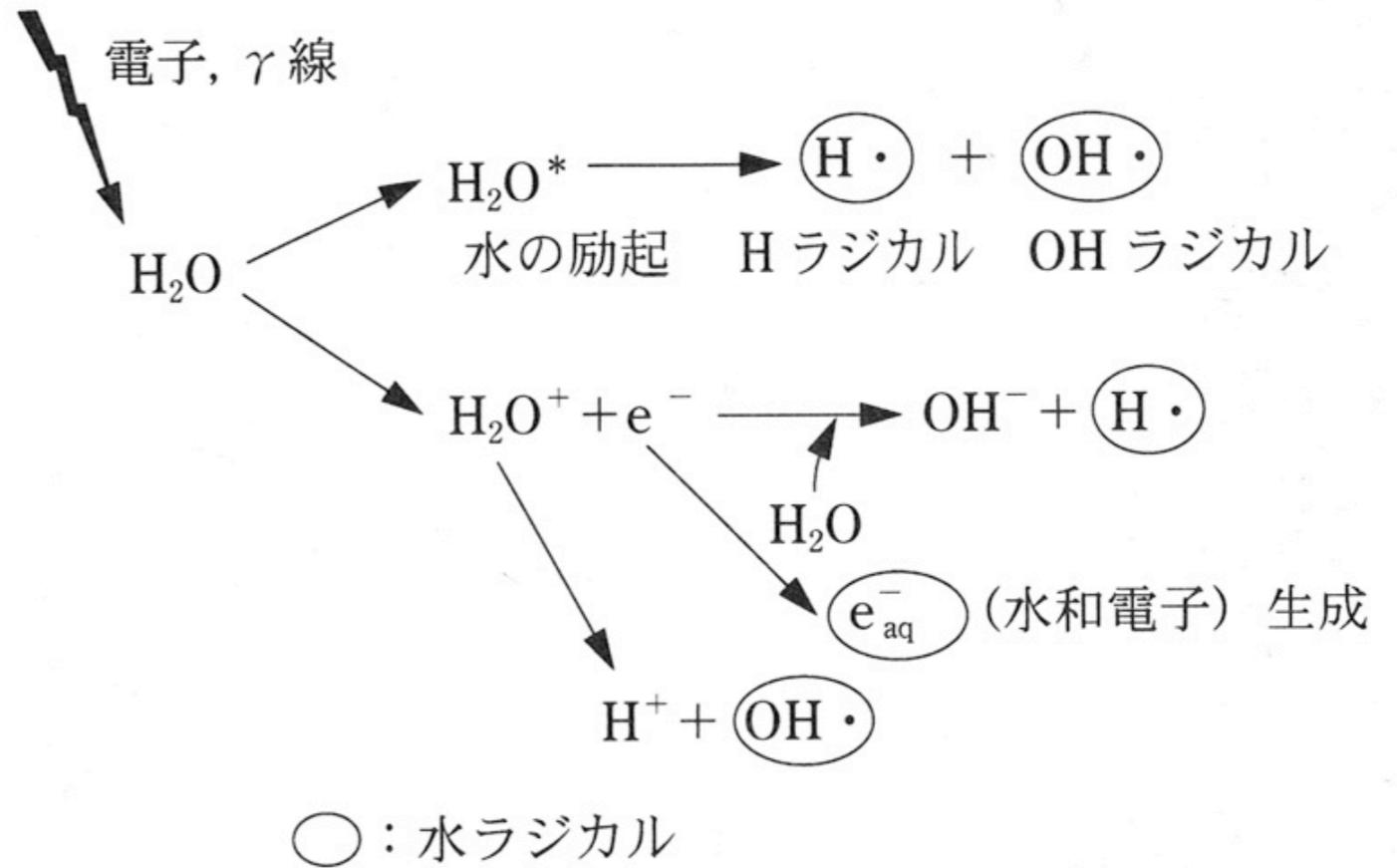


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

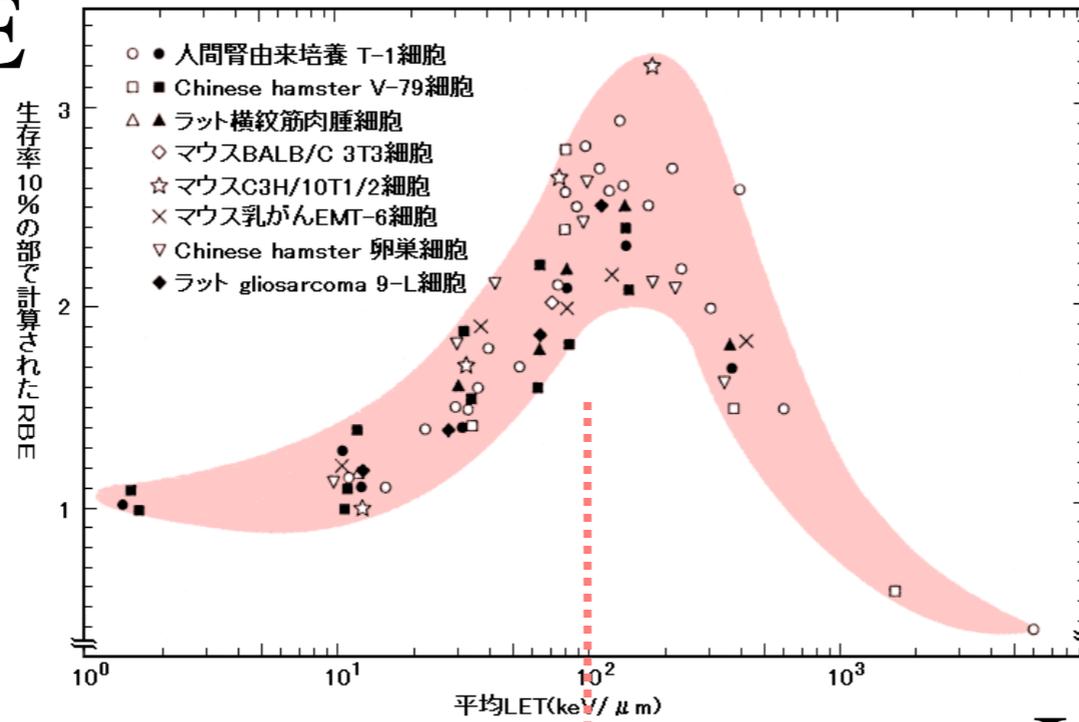
LET : 線エネルギー付与

放射線の直接作用 : 荷電粒子が直接 DNA 分子を叩く **高 LET 放射線**
 α 線

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
 β 線, γ 線

RBE

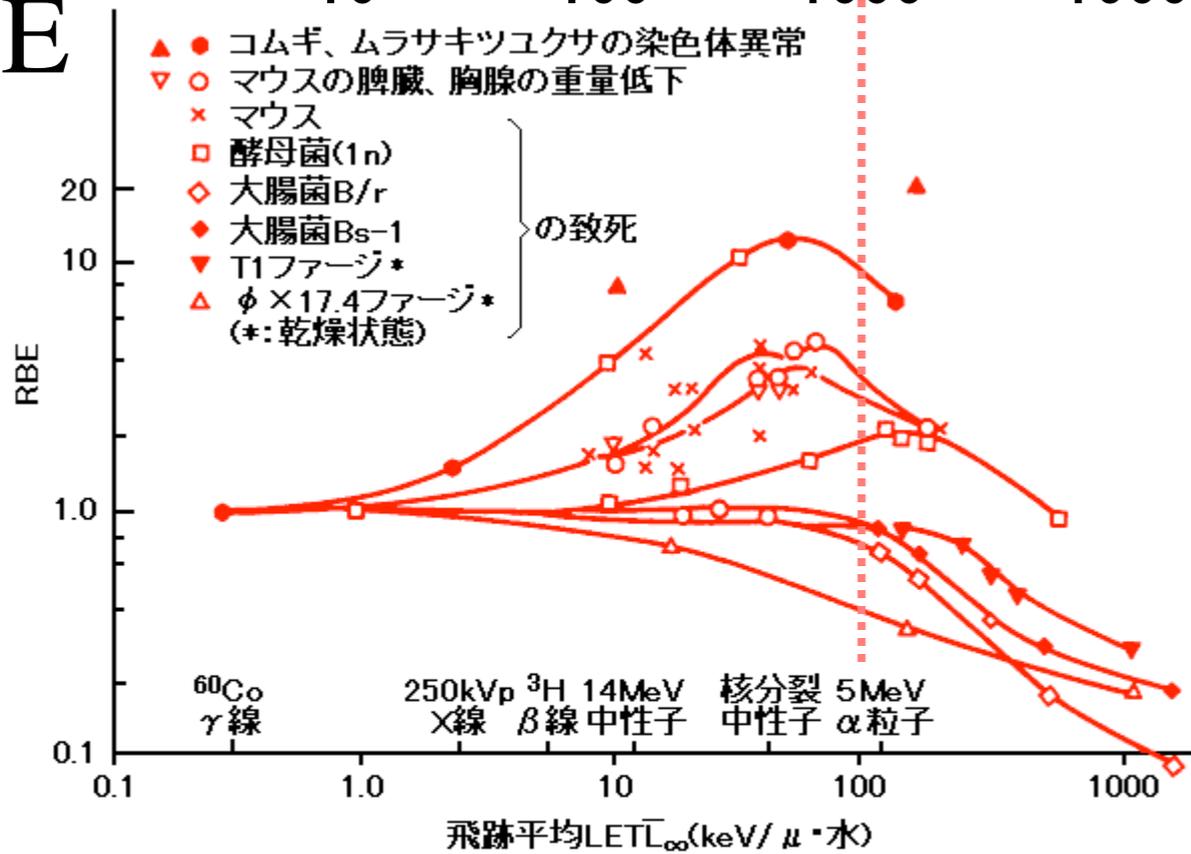


生物学的効果比 RBE

(Relative Biological Effectiveness)

黒印はピーク幅を広げたときのピークとプラトー部のRBE、白印はピーク幅を広げず、
本来ピーンが持つdeath-dose curveのピークとプラトー部のRBEである

RBE



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

LET

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

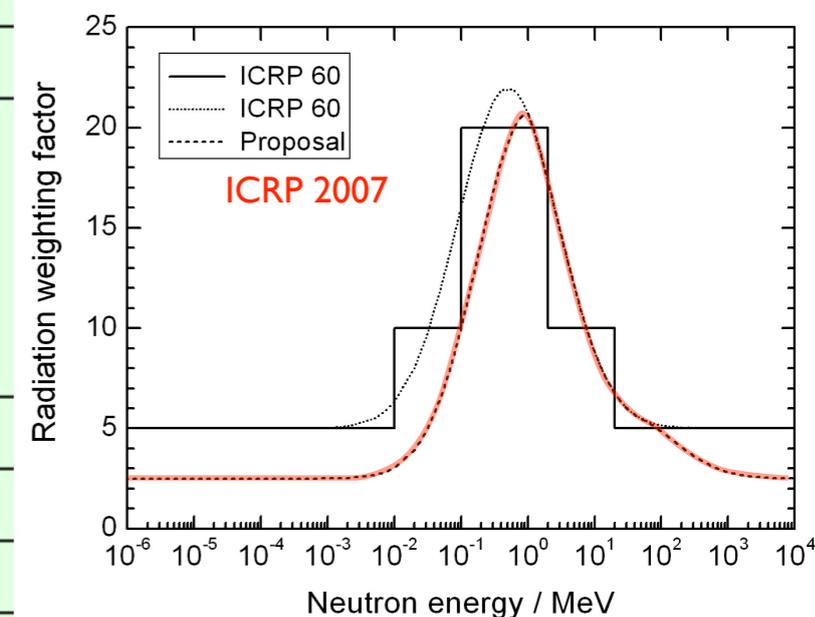
等価線量 equivalent dose $H_T [J / kg] = [Sv]$

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

等価線量 [Sv] R 放射線荷重係数 平均吸収線量 [Gy]

表 1 放射線荷重係数

放射線の種類・エネルギーの範囲	放射線荷重係数: 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	see graph
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

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 の組織荷重係数

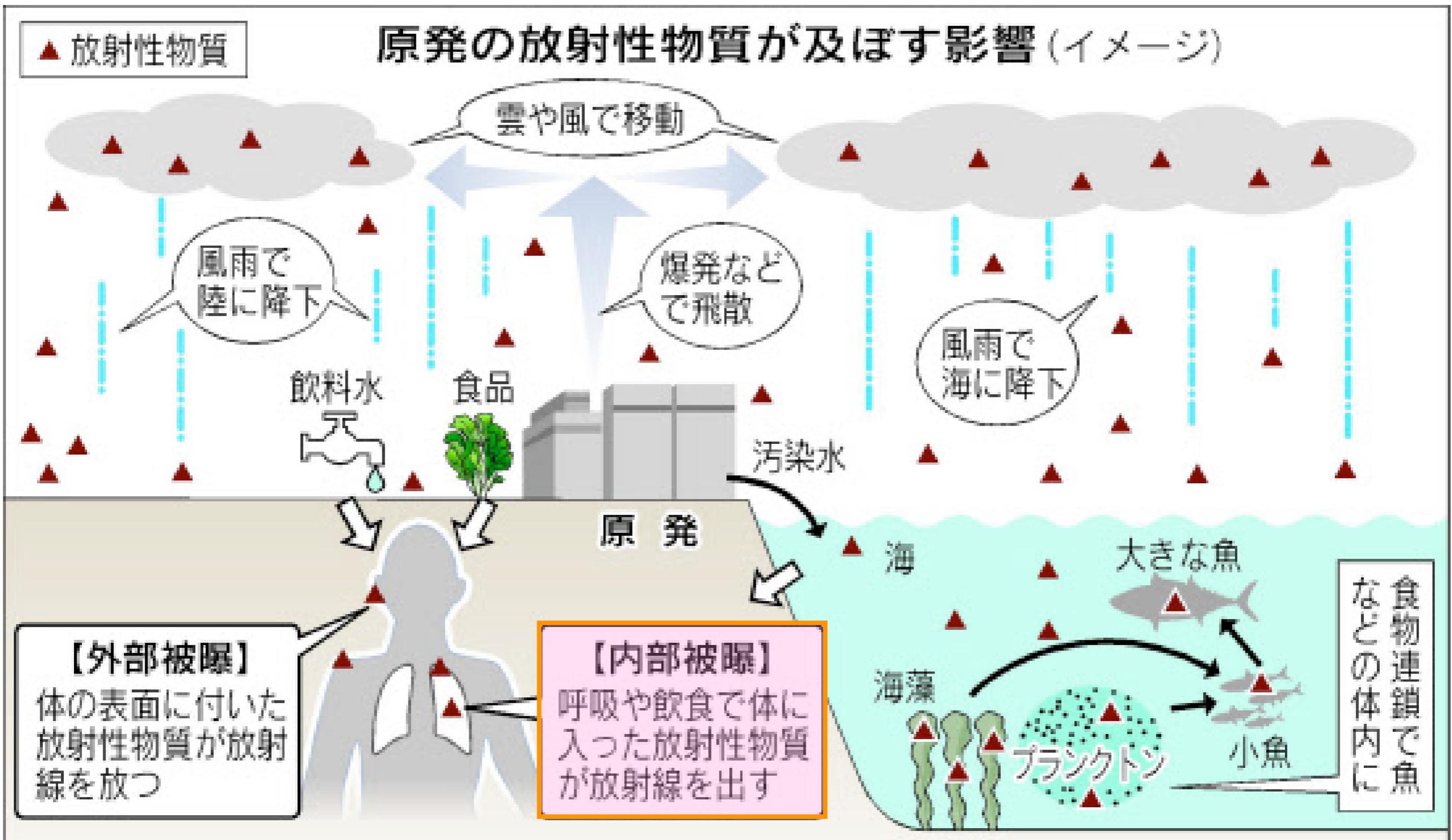
組織 T における
等価線量 [Sv]

組織 T における
平均吸収線量 [Gy]

器官・組織	組織荷重係数: 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 ^{※2}	0.05	0.12
合計(全身)	1.00	1.00

黒字 ICRP 1990

赤字 ICRP 2007



放射性物質が一部東京まで飛来。
放射線が直接東京に届いたのではない。

内部被曝の計算例

(^{131}I による甲状腺預託線量)

放射線防護のための線量 protection quantity

預託線量 committed dose (内部被曝) [Sv]

預託等価線量

預託実効線量

体内摂取した放射性物質から出るすべての放射線を、摂取した時点で被曝したと見なして計算をする。Bq から Sv への換算には、物理学的半減期のみならず排泄機能による生物学的半減期も考慮のうえ、50年間分の積分をする。

実効線量係数 (成人)

核種	半減期	経口摂取 (Sv/Bq)	吸入摂取 (Sv/Bq)
C-14	5730年	5.8×10^{-10}	5.8×10^{-9}
P-32	14.3日	2.4×10^{-9}	3.4×10^{-9}
K-40	12.8億年	6.2×10^{-9}	2.1×10^{-9}
I-131	8.04日	2.2×10^{-8}	7.4×10^{-9}
Sr-90	29.1年	2.8×10^{-8}	1.6×10^{-7}
Cs-137	30.0年	1.3×10^{-8}	3.9×10^{-8}

経口摂取	乳児 (3ヶ月)	幼児 (1歳)	子供 (2-7歳)	成人
I-131	1.8×10^{-7}	1.8×10^{-7}	1.0×10^{-7}	2.2×10^{-8}

$^{131}_{53}$ 8 days $7/2+$ β 248 keV max (2.1%)

β 線の最大エネルギーの平均値
0.574 MeV (= 9.2×10^{-14} J)

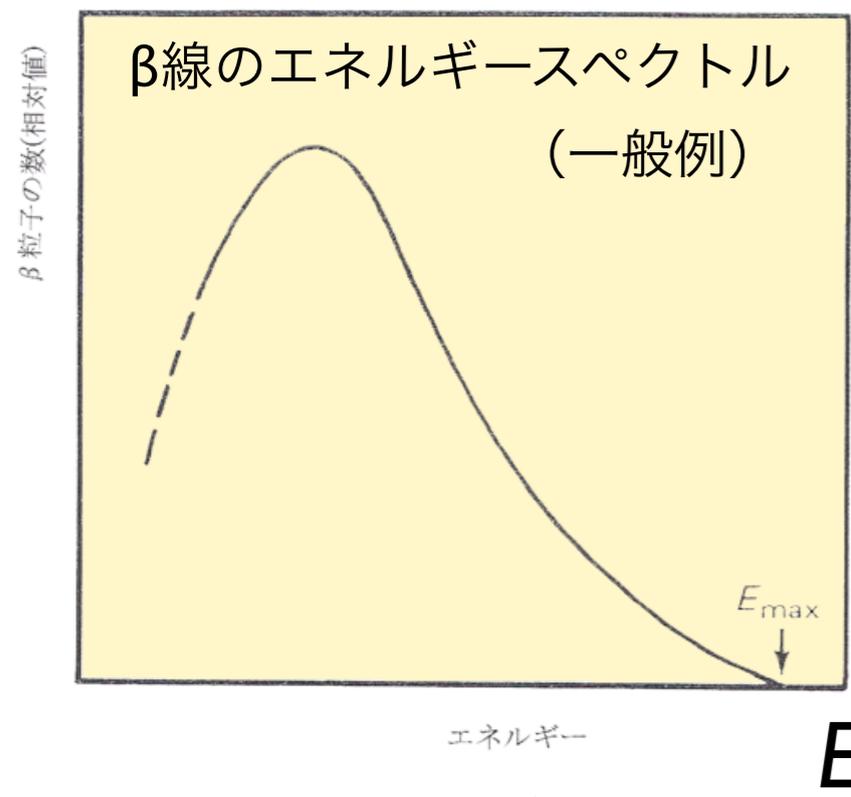
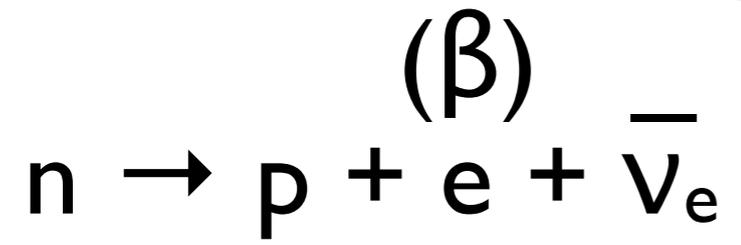
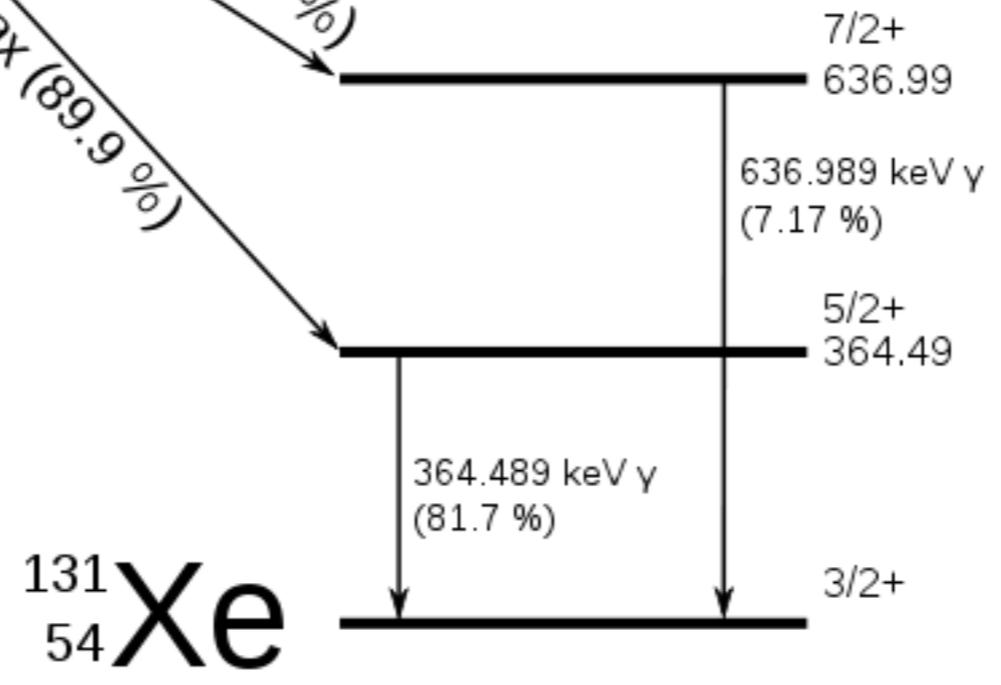
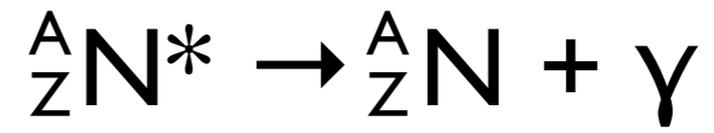


図2 β 粒子のエネルギースペクトル
[出典]石川友清(編):初級放射線、通商産業研究社、p.37

β 333.8 keV max (7.27%)
 β 606.3 keV max (89.9%)

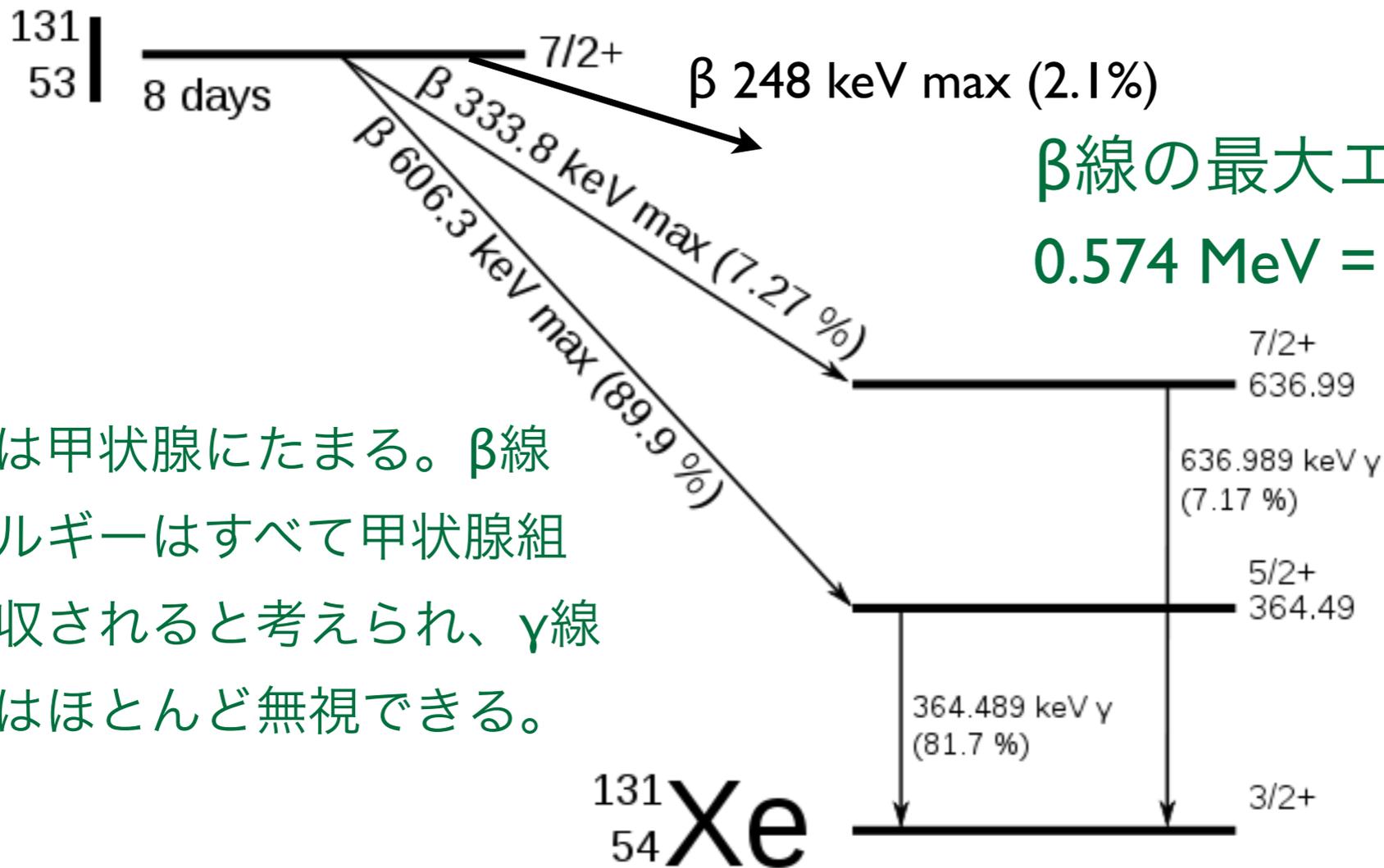


γ 線：原子核の脱励起



γ 線 (定まったエネルギー)

β 線 (連続スペクトル)
エネルギーの平均値 ~ 0.3 MeV



β線の最大エネルギーの平均値
 $0.574 \text{ MeV} = 9.2 \times 10^{-14} \text{ J}$

β線のエネルギー
 スペクトルの平均値
 $\sim 5 \times 10^{-14} \text{ J}$

ヨウ素は甲状腺にたまる。β線のエネルギーはすべて甲状腺組織に吸収されると考えられ、γ線の効果はほとんど無視できる。

1 Bq あたり $8.04 \text{ d} \times 86400 \text{ s/d} / \ln 2 = 1,000,000 \text{ decays}$

$5 \times 10^{-14} \text{ J} \times 1,000,000 / \text{Bq} = 5 \times 10^{-8} \text{ J/Bq}$

成人の場合

成人の場合

これのうち 20% が甲状腺に取り込まれる（残りは排泄）と見積もると、20 g の甲状腺の

吸収線量 = 等価線量は $5 \times 10^{-8} \text{ J/Bq} \times 0.2 / 0.02 \text{ kg} = 0.5 \mu\text{Sv/Bq}$

甲状腺は組織荷重係数が 0.05 なので、全身被曝量としての実効線量は

$0.5 \times 0.05 = 0.025 \mu\text{Sv/Bq}$ 。表の値 $2.2 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$ とほぼ一致。

外部被曝の計算例

(^{137}Cs による空間線量率)

コンプトン散乱

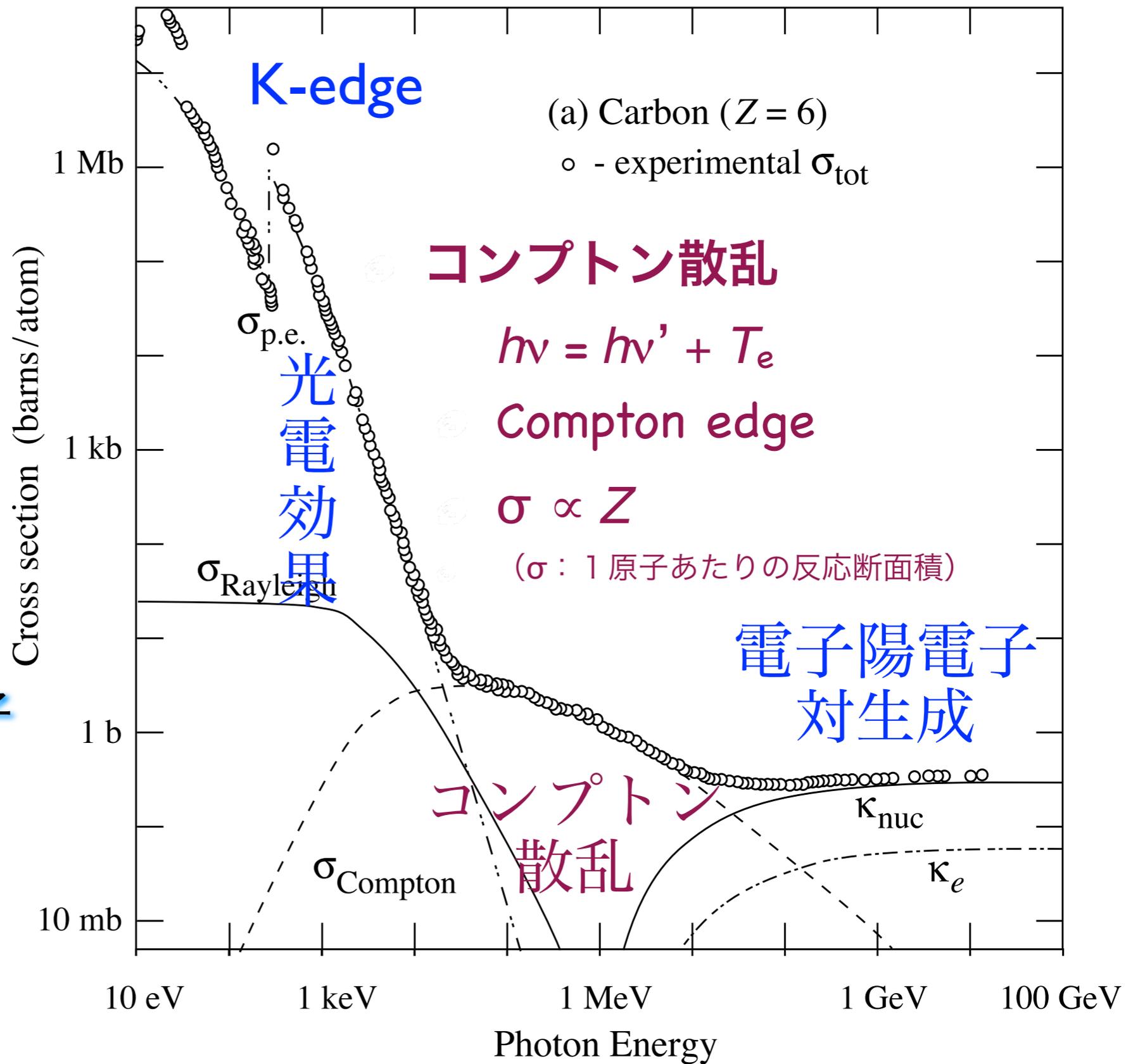
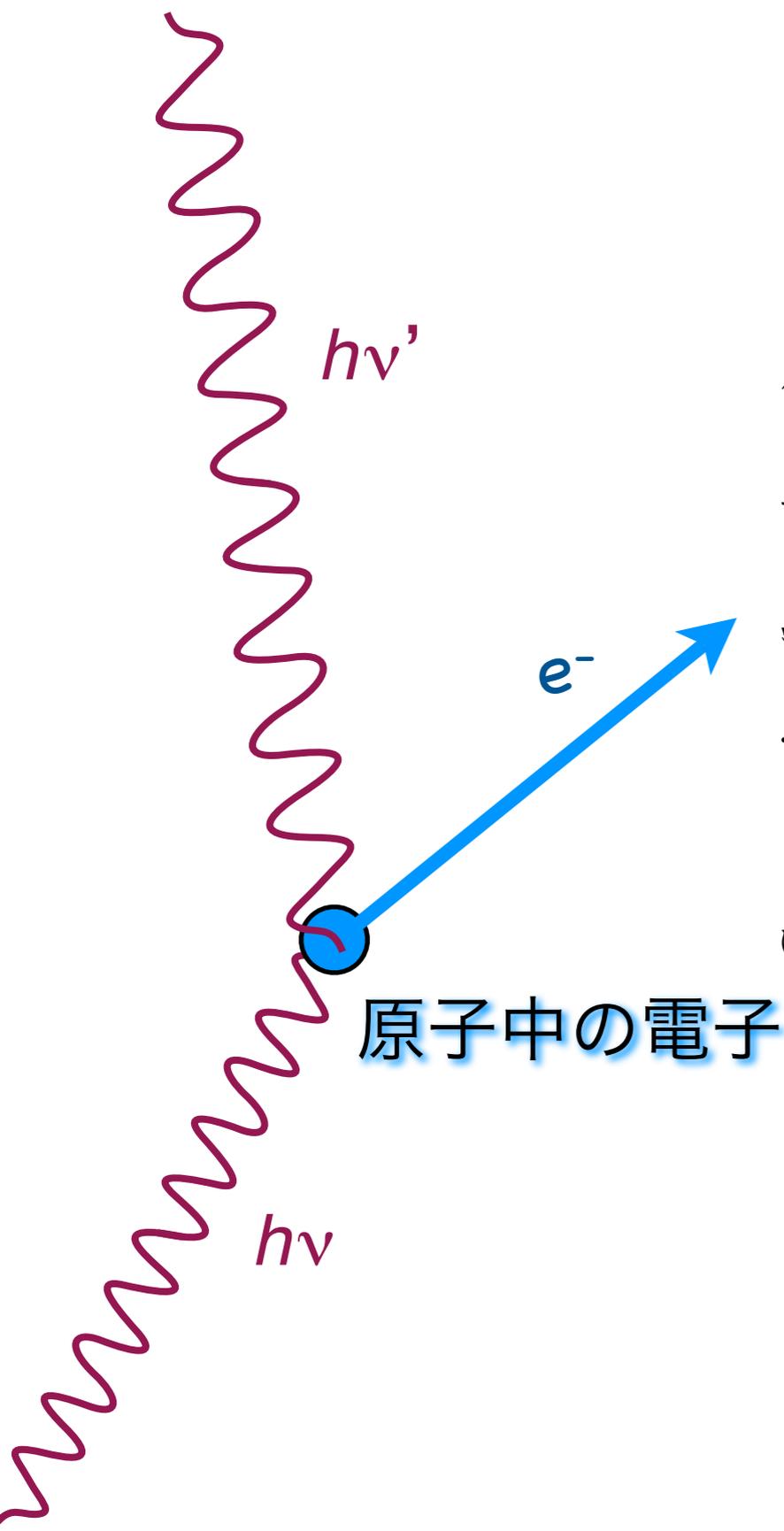
紫外線

X線

線

γ線

線



光子 (γ 線) の物質中での減衰と吸収

光子数の減衰

光電効果・コンプトン散乱などは確率的に起こる

$$\frac{d\dot{\Phi}(x)}{dx} = -\mu \dot{\Phi}(x)$$

$$\dot{\Phi}(x) = \dot{\Phi}(0) e^{-\mu x}$$

$$\dot{\Phi}(L) = \dot{\Phi}(0) / 2$$

$$L = \ln 2 / \mu$$

$\ln x$ は自然対数
 $\log_e x$ のこと。

$\dot{\Phi}$: 粒子フルエンス率

for γ ($h\nu = 0.66$ MeV) from ^{137}Cs

x : 距離, L : 半減距離

$$L_{\text{air}} = 69.2 \text{ m}$$

μ : 線減衰定数

$$\mu_{\text{air}} = 0.0100 \text{ m}^{-1}$$

μ/ρ : 質量減衰係数 $\mu_{\text{en}}/\rho < \mu/\rho$ $(\mu/\rho)_{\text{air}} = 0.077 \text{ (g/cm}^2\text{)}^{-1}$

μ_{en}/ρ : 質量エネルギー吸収係数 $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{water}} = 0.033 \text{ (g/cm}^2\text{)}^{-1}$

\dot{H} : 等価線量率 (γ 線では吸収線量率に等しい)

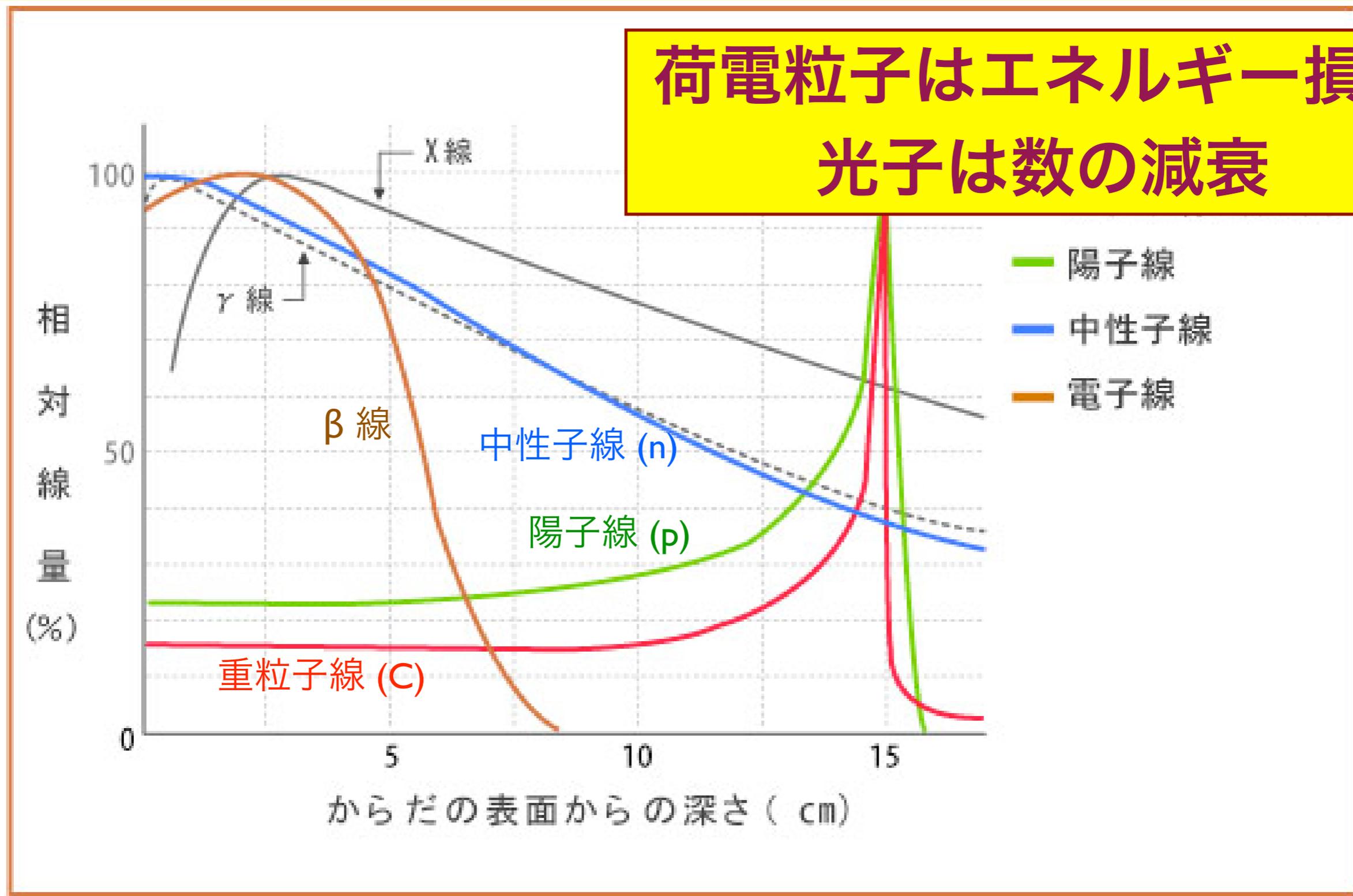
$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi}, \quad h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) = 3.5 \times 10^{-16} \text{ Sv m}^2$$

陽子(p)、 α 、重粒子線は飛程が揃っている。

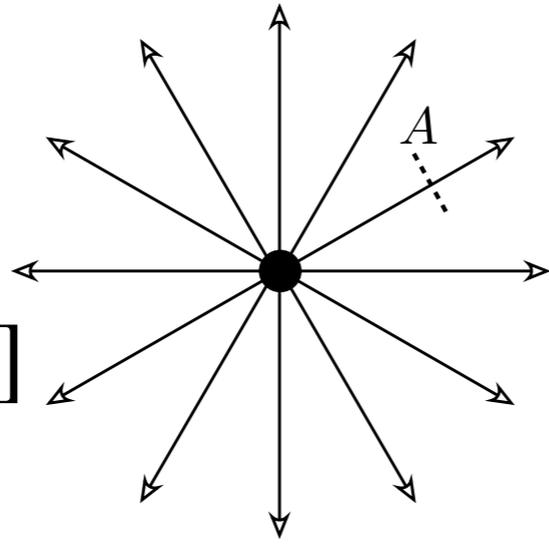
電子(β)は散乱されやすく、飛程を直線距離(物質厚)で測るとばらつきが大きい。

中性子(n)、光子(X, γ)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**



P : 放射能 [Bq]

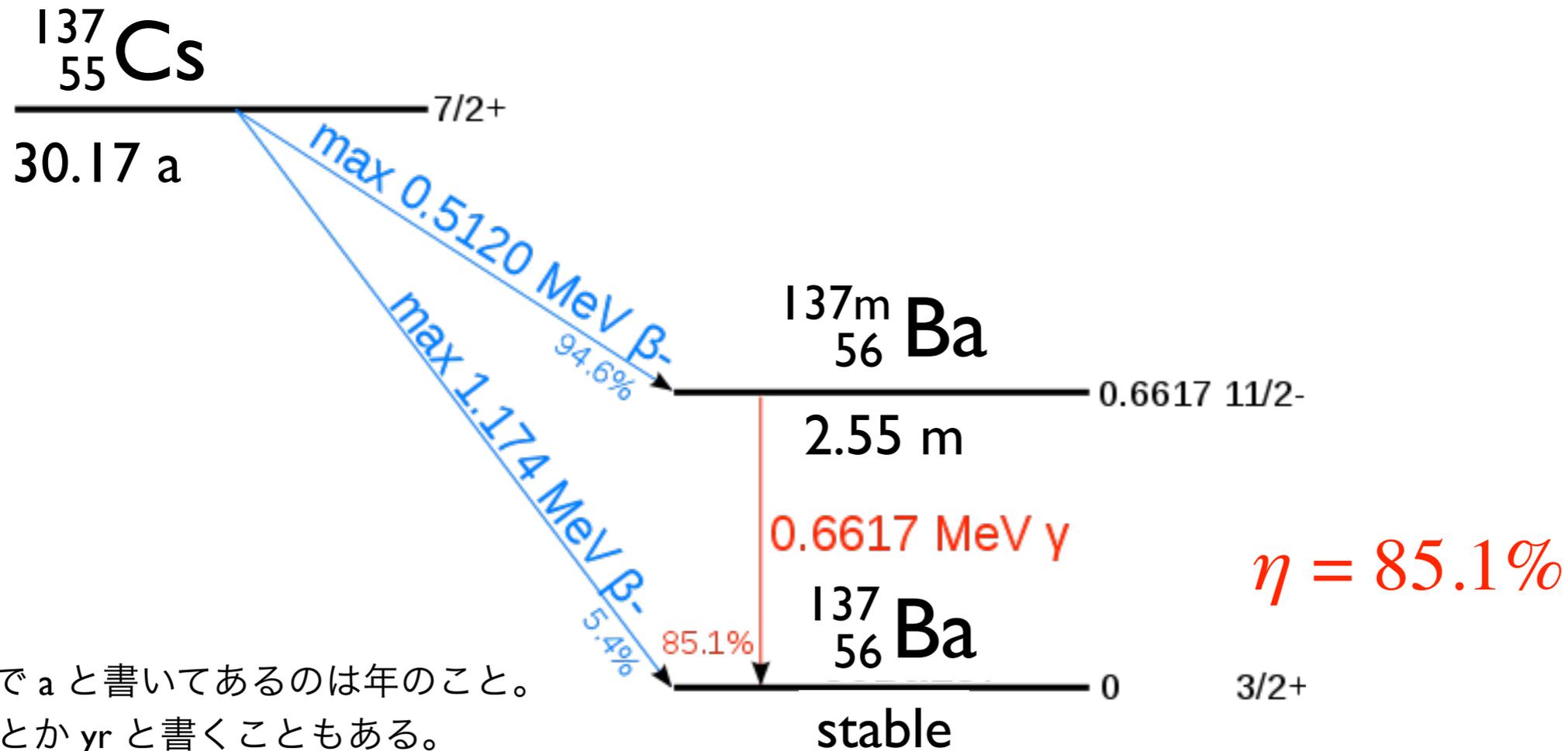


\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi}$$

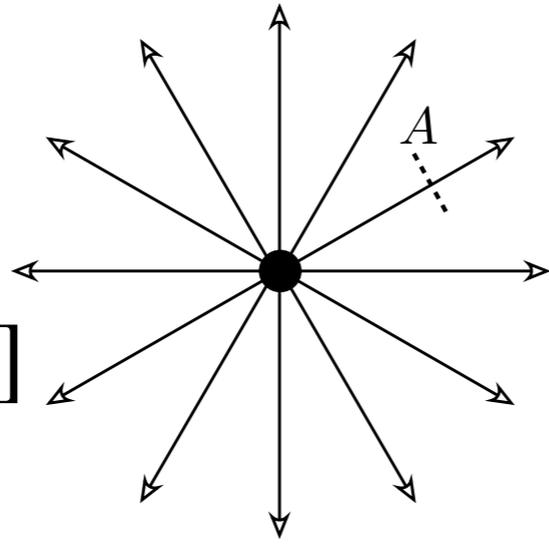
$$\dot{\Phi} = \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r} \eta P}{4\pi r^2}$$

図 5: 中央に放射線源があり、全方向に均等にガンマ線を出している。距離 r 離れた場所での微小面 A を通過する流束を考えると、その場所での吸収線量率がわかる。



半減期で a と書いてあるのは年のこと。
y とか yr と書くこともある。

P : 放射能 [Bq]



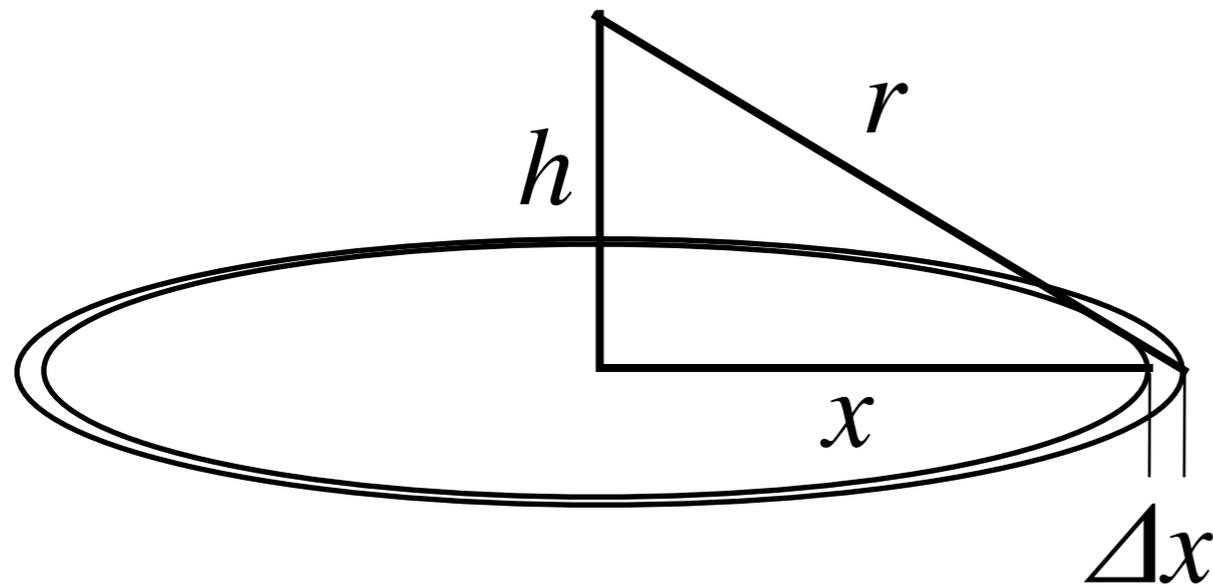
\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi}$$

$$\dot{\Phi} = \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r} \eta P}{4\pi r^2}$$

図 5: 中央に放射線源があり、全方向に均等にガンマ線を出している。距離 r 離れた場所での微小面 A を通過する流束を考えると、その場所での吸収線量率がわかる。

散乱された γ 線は消えると仮定して計算している。実際には、コンプトン散乱による低エネルギーの γ 線 (ビルドアップ束) による効果を加味する必要がある (50%くらい増える)。



p : 放射能の平面密度 [Bq/m²]

$$\dot{\Phi} = \int_0^\infty \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r} \eta p}{4\pi r^2} 2\pi x \, dx$$

$$= \frac{\eta p}{2} \int_h^\infty \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r}}{r} \, dr$$

$$\dot{\Phi} \approx \frac{\eta p}{2} \int_0^{L_{\text{air}}} \frac{x}{x^2 + h^2} \, dx$$

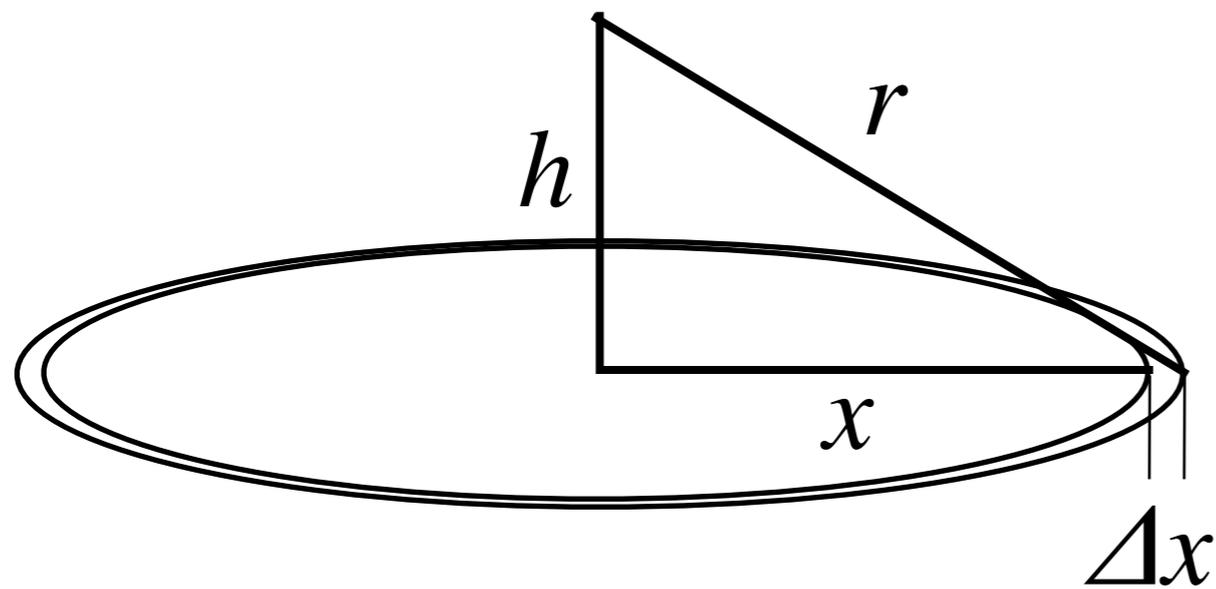
\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

$$\dot{H}/\dot{\Phi} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) = 3.5 \times 10^{-16} \text{ Sv m}^2$$

$$\int_0^{L_{\text{air}}} \frac{x}{x^2 + h^2} dx = \frac{1}{2} \ln (x^2 + h^2) \Big|_{x=0}^{L_{\text{air}}} = \frac{1}{2} \ln [(L_{\text{air}}/h)^2 + 1]$$

$$L_{\text{air}} = 69.2 \text{ m} \quad h = 1 \text{ m}$$

散乱された γ 線は消えると仮定して計算している。実際には、コンプトン散乱による低エネルギーの γ 線 (ビルドアップ束) による効果を加味する必要がある (50%くらい増える)。



p : 放射能の平面密度 [Bq/m²]

$$\begin{aligned} \dot{\Phi} &= \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r} \eta p}{4\pi r^2} 2\pi x dx \\ &= \frac{\eta p}{2} \int_h^{\infty} \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r}}{r} dr \end{aligned}$$

$$\eta = 0.851$$

$$\dot{\Phi} \approx \frac{\eta p}{2} \int_0^{L_{\text{air}}} \frac{x}{x^2 + h^2} dx$$

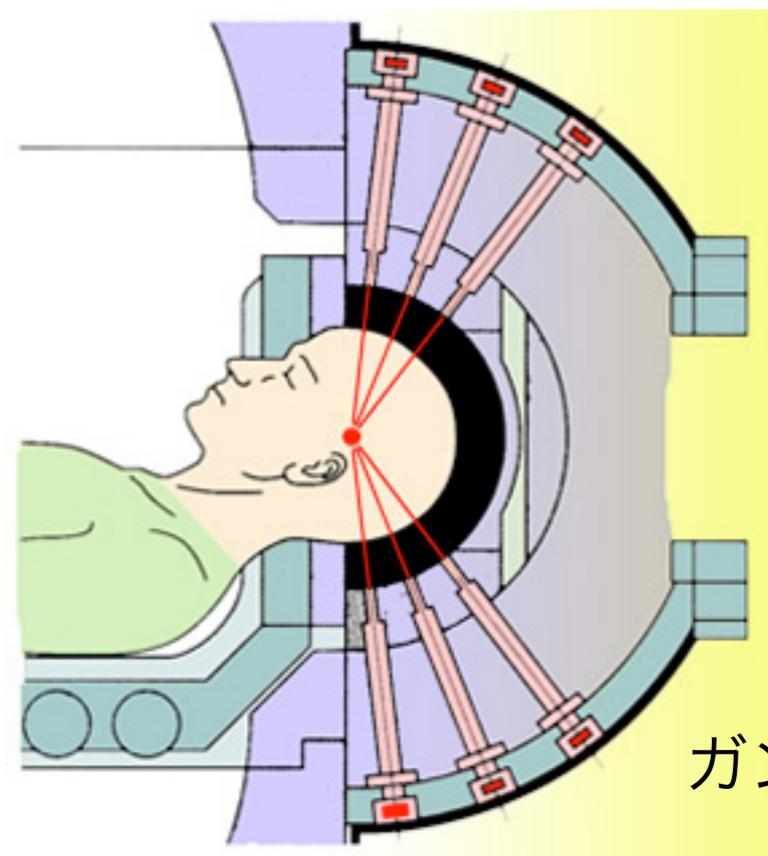
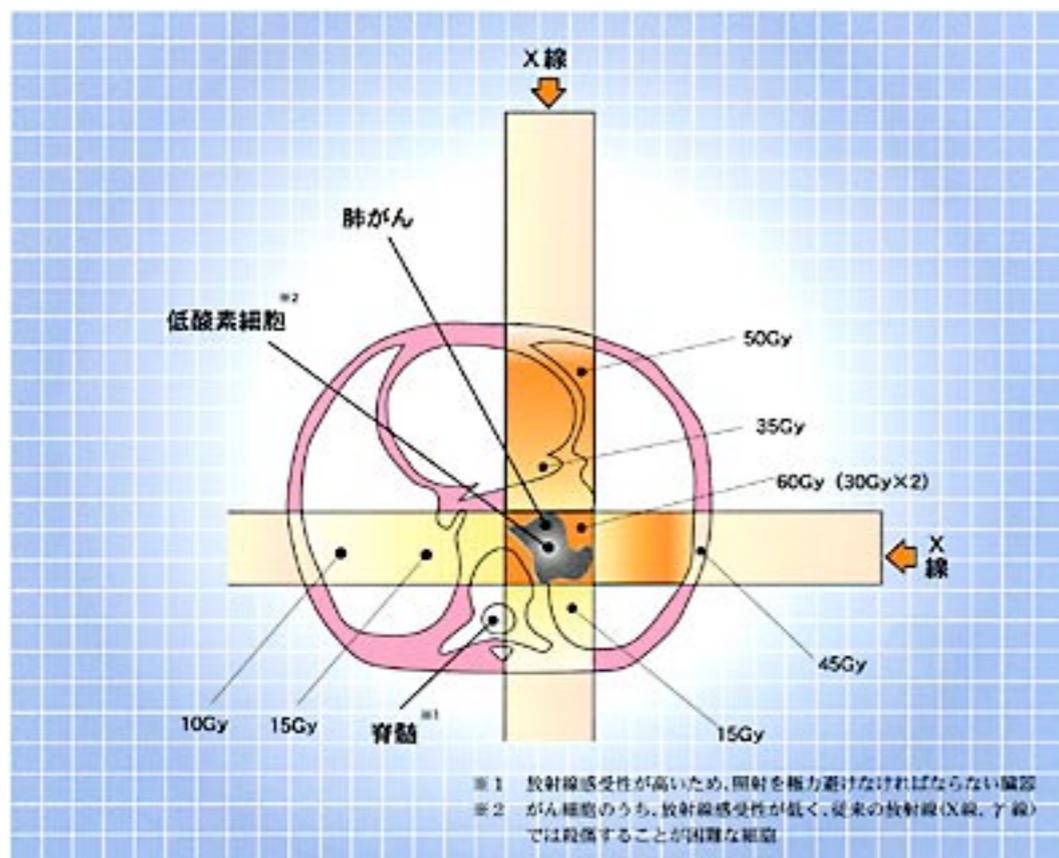
放射線医療

～ 治療 ～

放射線 がん治療

数 Gy を数十回

X線 外部照射



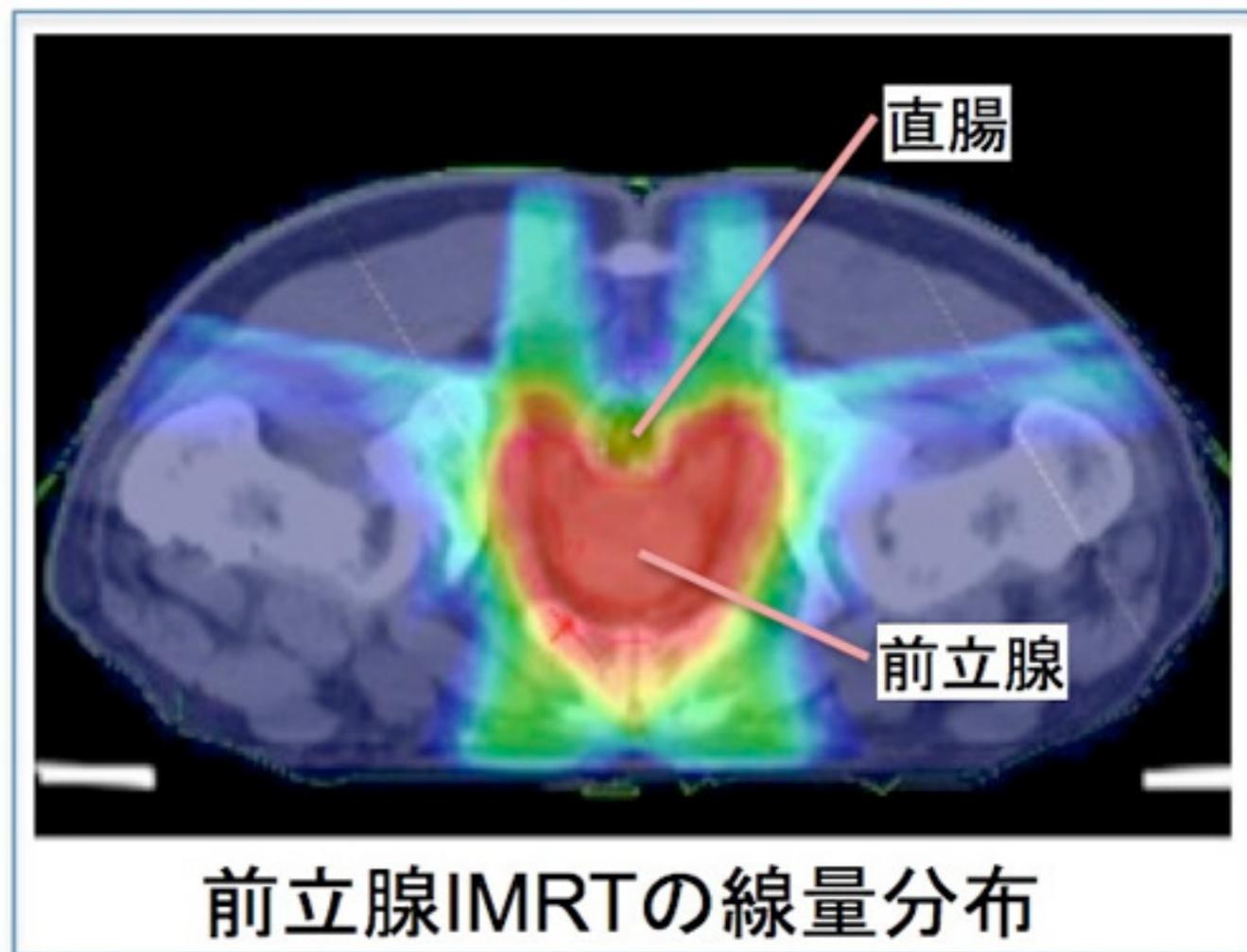
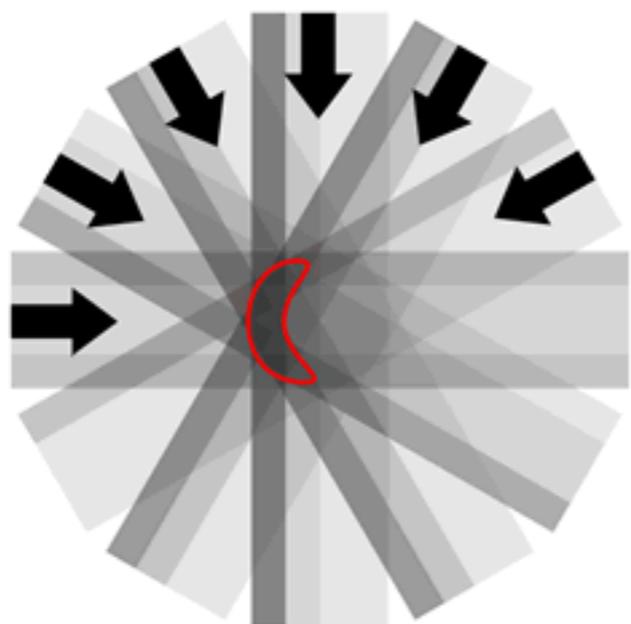
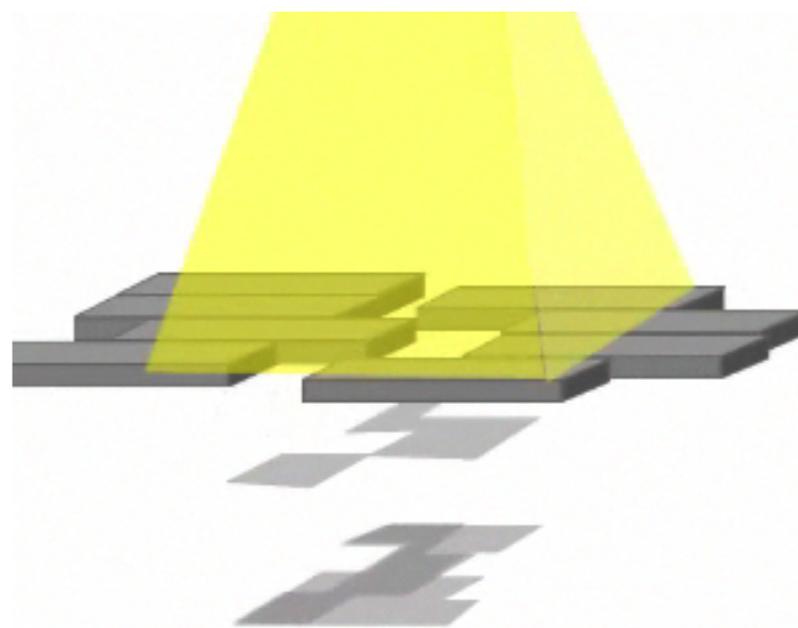
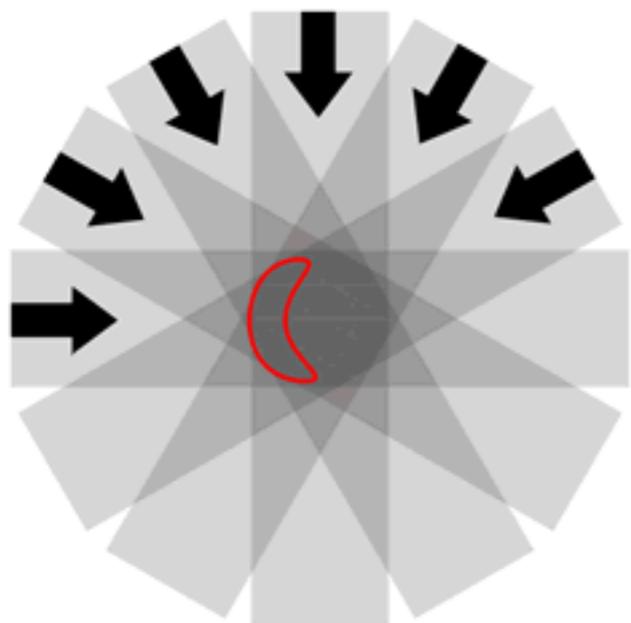
ガンマナイフ

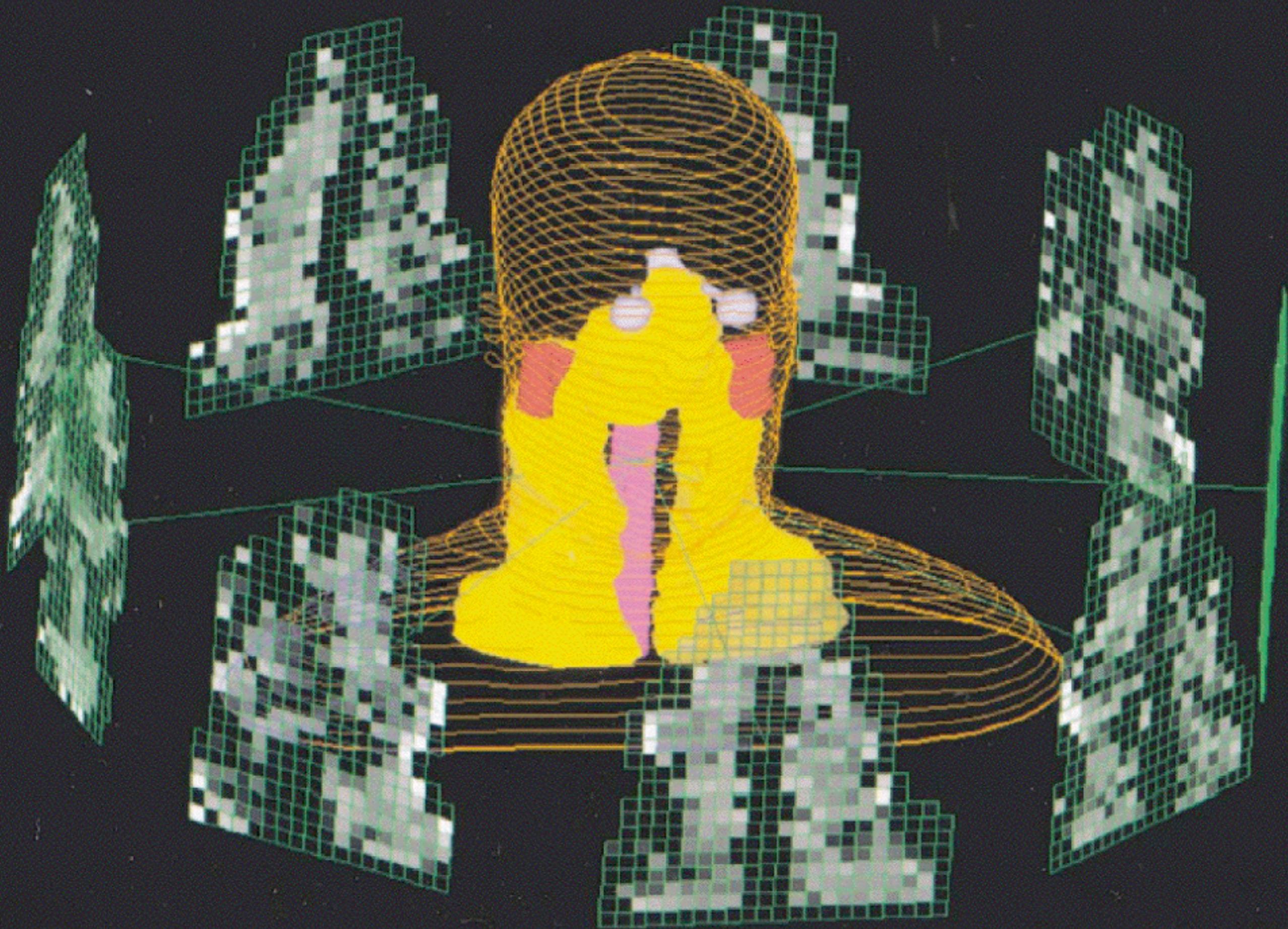
医療技術：ガンマナイフ (γ線)
サイバーナイフ (X線)



サイバーナイフ

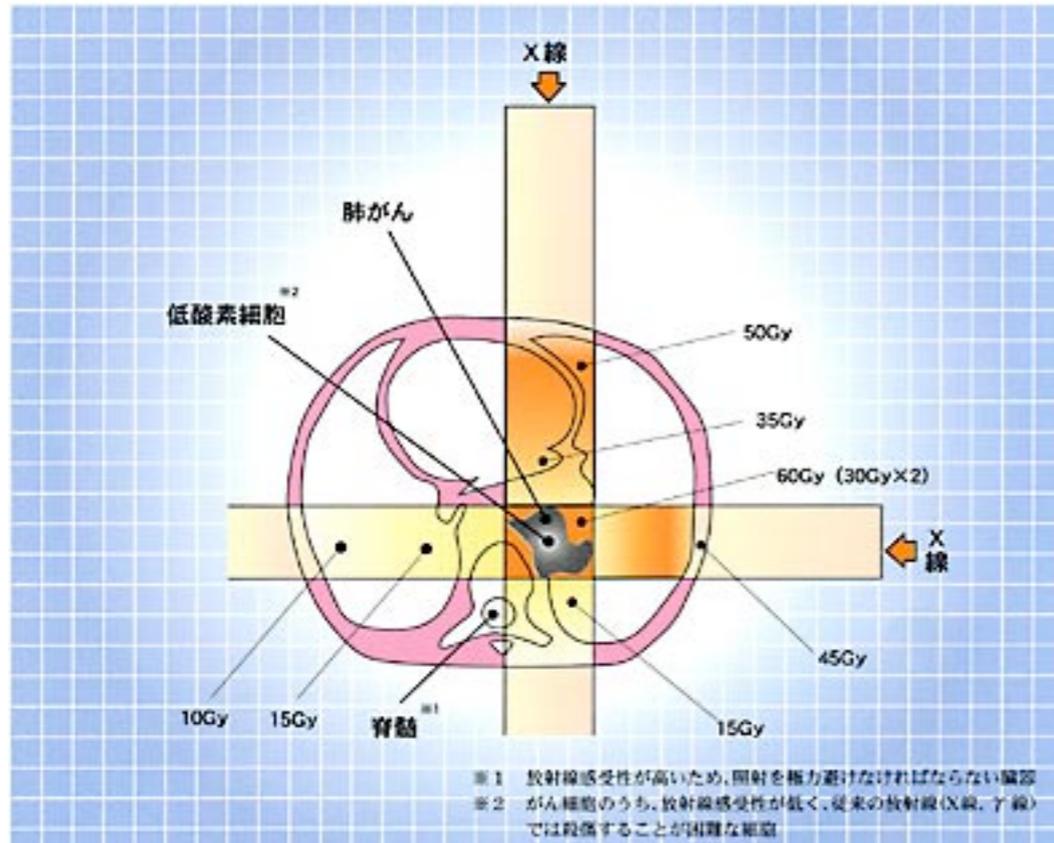
写真提供：(独)放射線医学総合研究所





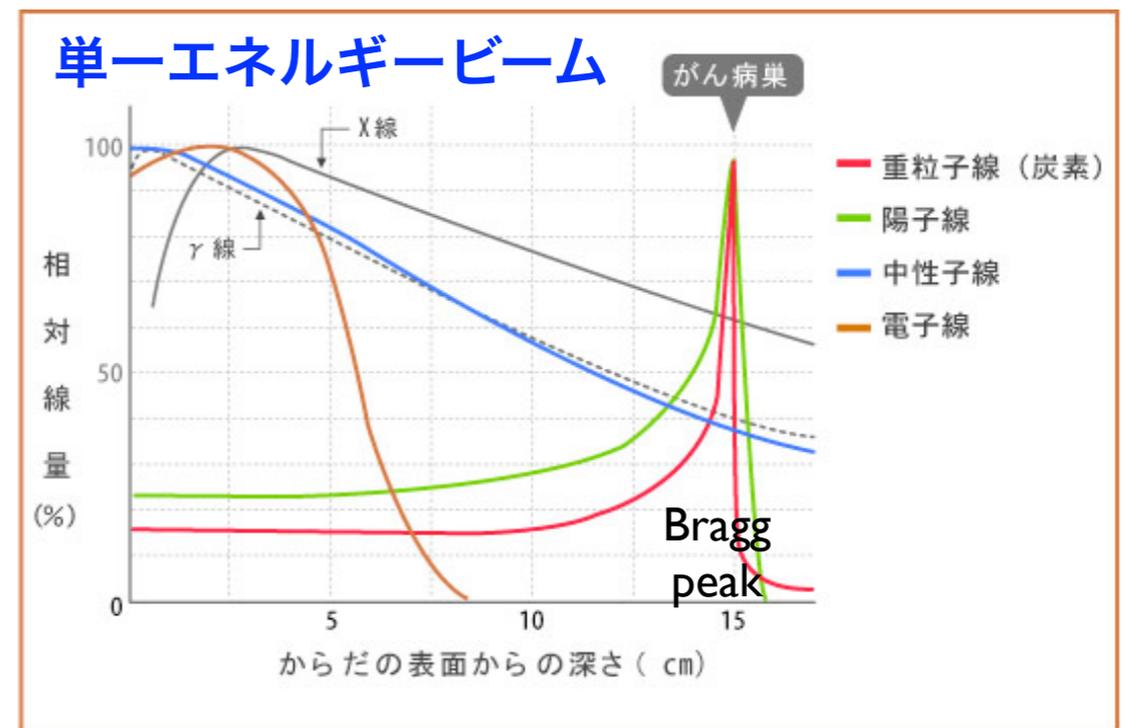
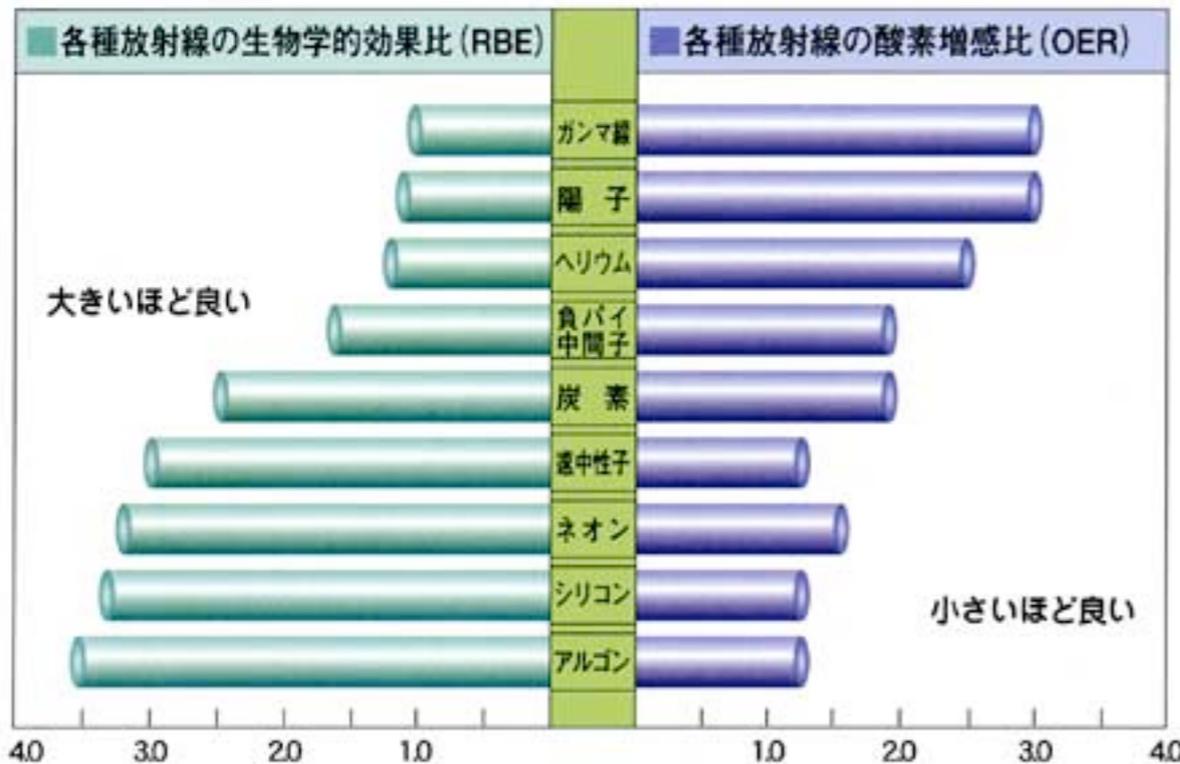
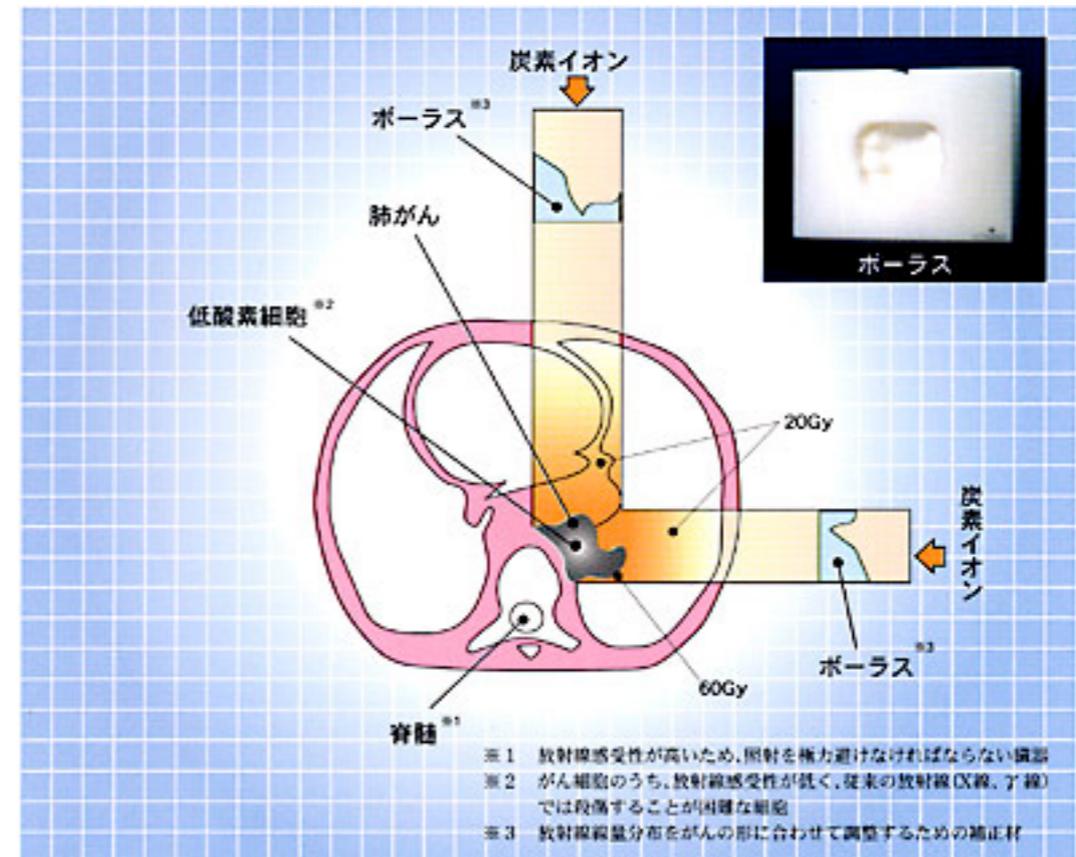
放射線 がん治療

X線



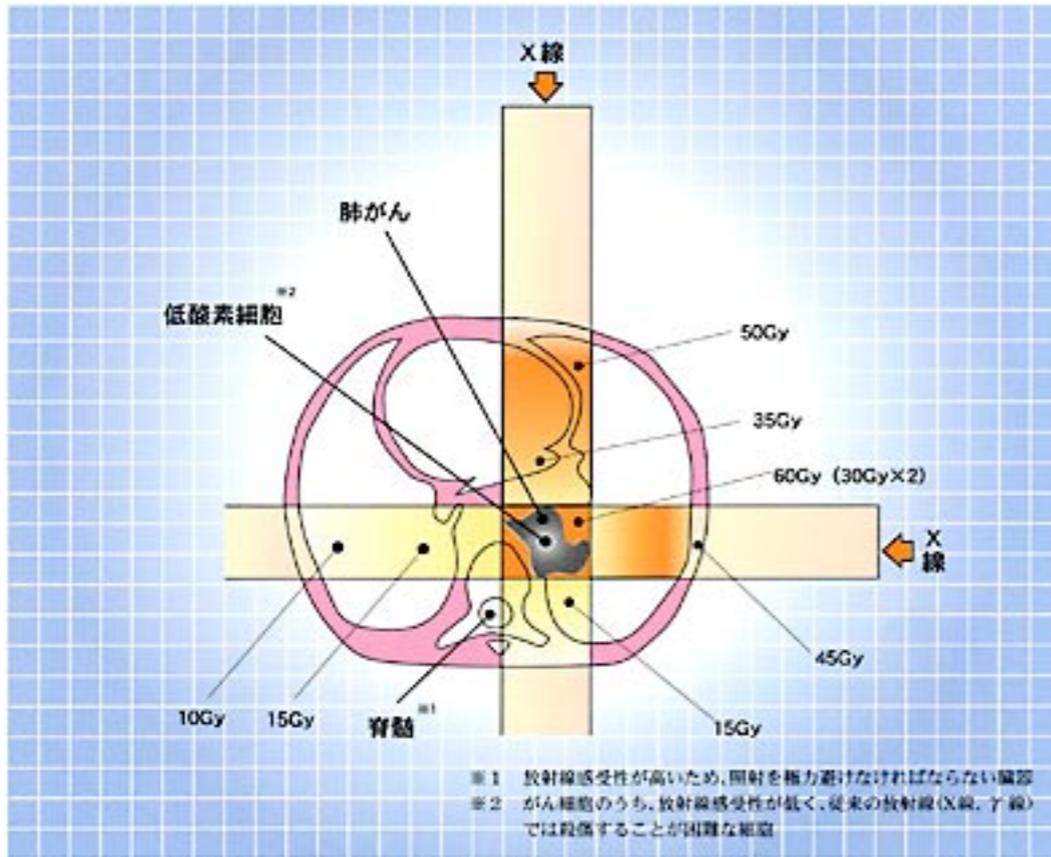
数 Gy を複数回

重粒子線 (炭素イオン)



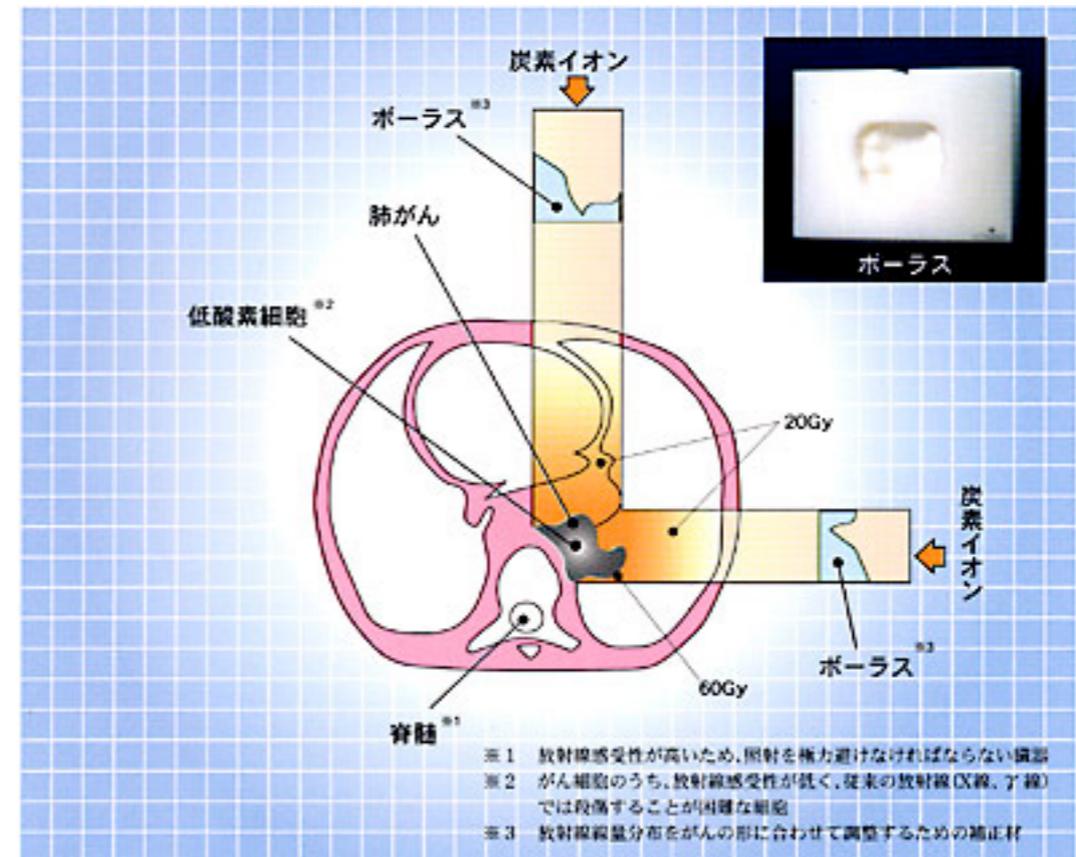
放射線 がん治療

X線



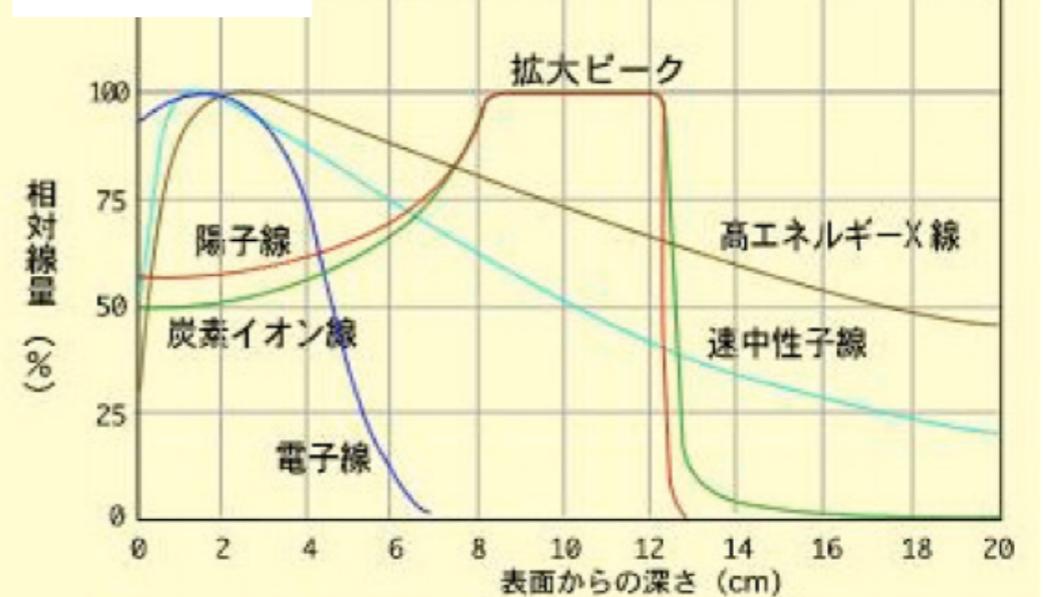
数 Gy を複数回

重粒子線 (炭素イオン)



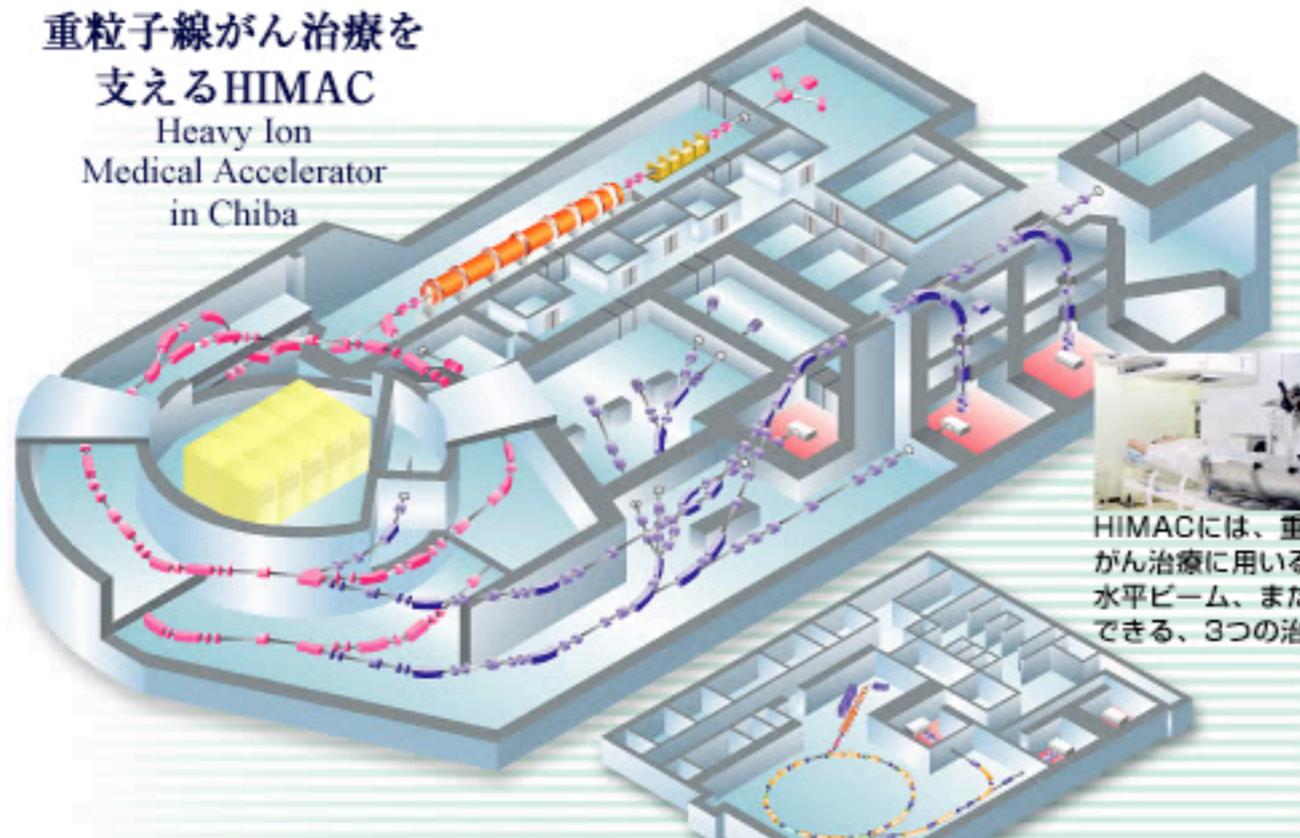
他には：ガンマナイフ、
 陽子線、パイ中間子
 研究中：反陽子

白色ビーム



放射線医学総合研究所（千葉）

重粒子線がん治療を
支えるHIMAC
Heavy Ion
Medical Accelerator
in Chiba



HIMACには、重粒子線を効率的にがん治療に用いるため垂直ビーム、水平ビーム、またはその両方を照射できる、3つの治療照射室があります。

■小型重粒子線がん治療装置

放医研における装置小型化開発研究の成果は、2006(平成18)年度から建設が開始される群馬大学の重粒子線がん治療装置に採用されています。放医研は群馬大学に装置を建設するための技術的な支援を行っています。



写真提供：(独)放射線医学総合研究所

放射線医療

～ 診断 ～

医療で活躍する放射線



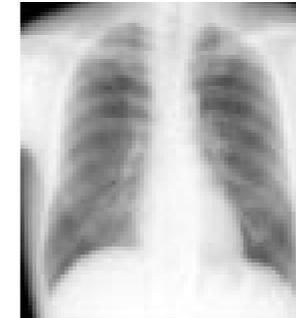
ウィルヘルム・レントゲン博士



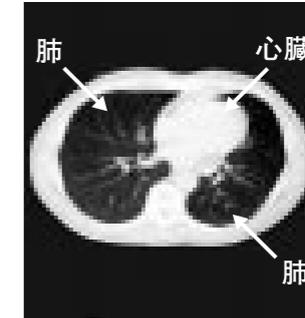
博士が撮った
夫人の手のX線写真

■ エックス線で体内を見る

エックス線(X線)が物質の中を通りぬける性質(透過性)を利用して、体の内部を見ることができます。体を透過するX線の量は、通りぬけた部分の状態(空気や水分量など)によって異なるので、これを白黒の画像として映し出し、腫瘍や炎症などを見分けます。X線を体のまわりに360度回転させて撮影し、コンピュータを使って画像を再構成するCT(コンピュータ断層撮影)では、鮮明な人体の断面図を作成することができます。CT検査により腫瘍や血管疾患などの診断が飛躍的に進歩しました。



レントゲン写真
(胸部の正面)



CT画像
(胸部の断面)

■ 放射性薬剤で病気を診断する

放射性薬剤を体内に投与すると、その化学的性質に応じて特定の臓器や組織に取り込まれます。この薬剤から出る放射線を検出し、病気を診断します。最近、がん診断で注目を集めているPET(陽電子放出断層撮影)では、ブドウ糖をたくさん取り込んで増殖するがん細胞の性質を利用して、ブドウ糖によく似た放射性薬剤を注射し、がんのある場所を診断します。

■ 放射線照射でがん細胞を取り除く

がん細胞は細胞分裂が盛んなため放射線の影響を受けやすい細胞です。そこで、体外から放射線を当てたり、体内に放射性物質を入れたりして、がん細胞を取り除く放射線治療が行われています。この方法は、手術や抗がん剤による化学療法と並んで、がんの一般的な治療法のひとつです。治療には、X線でエネルギーの高いものや、電子線、ガンマ線が用いられてきましたが、最近、陽子線や重粒子線などを用い、標的とするがん組織にエネルギーを集中し、周辺の正常な細胞への影響が少ない放射線治療法が注目されています。

放射線によるがん治療



細胞分裂が盛んながん細胞は
次々に死んでいく

レントゲン(X線)撮影

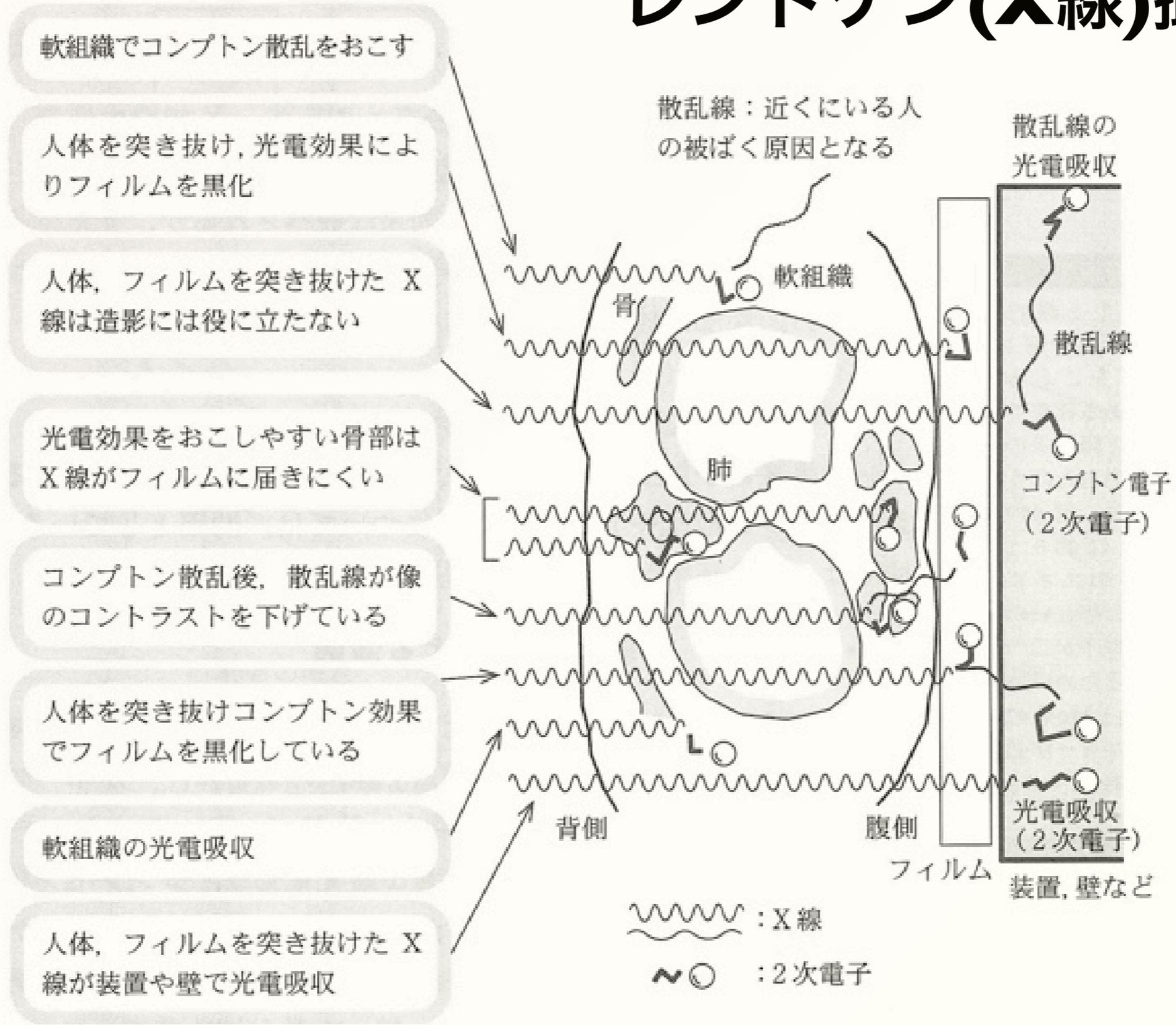
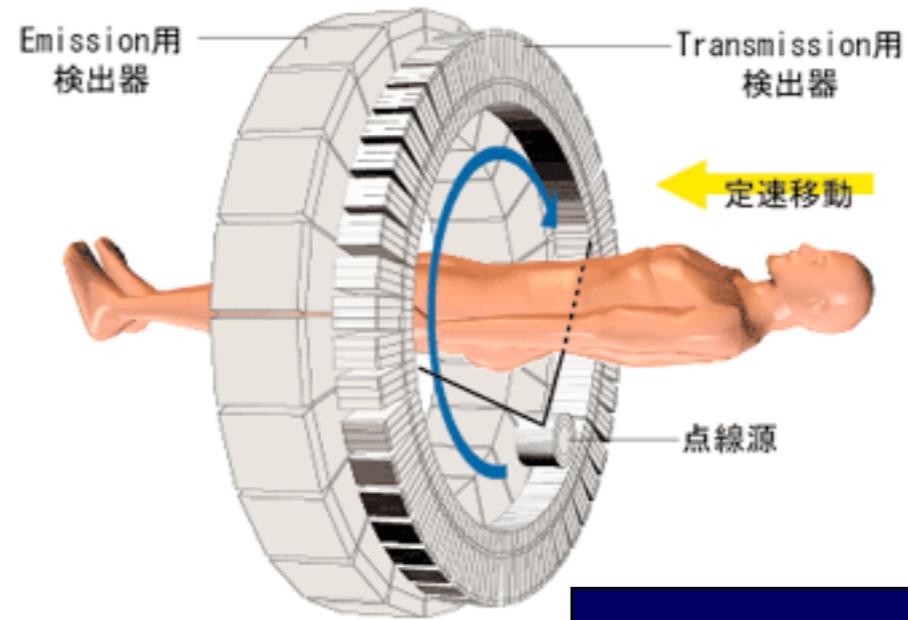


図 2・7 胸部撮影時の X 線と人体の相互作用

胸部単純X線撮影

胸部正面像

- ・立位
- ・吸気呼吸停止
- ・管電圧120kVp程度
- ・撮影時間～50ミリ秒
- ・X線投影：背→腹

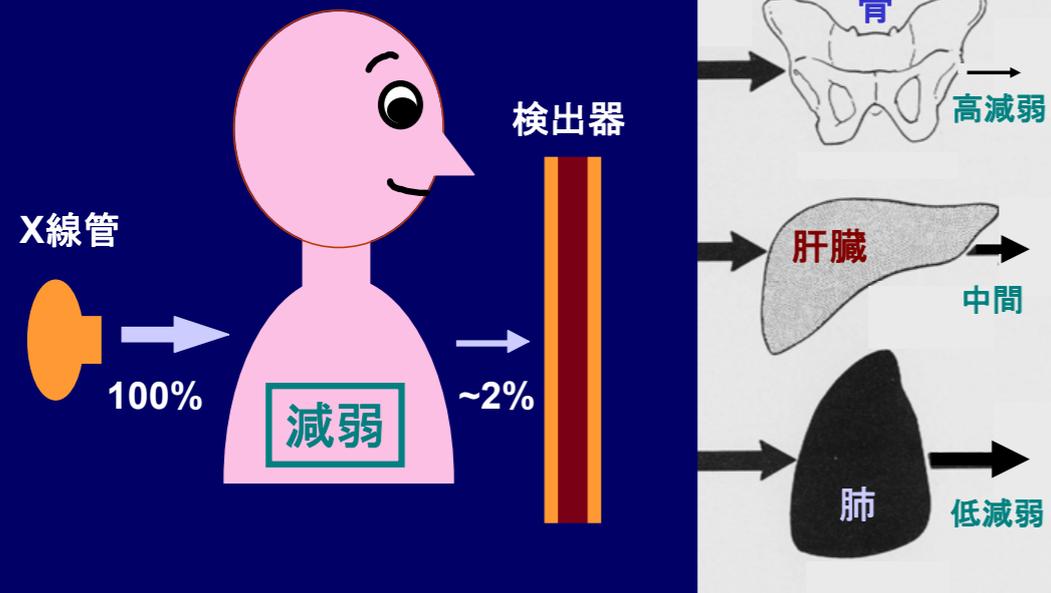
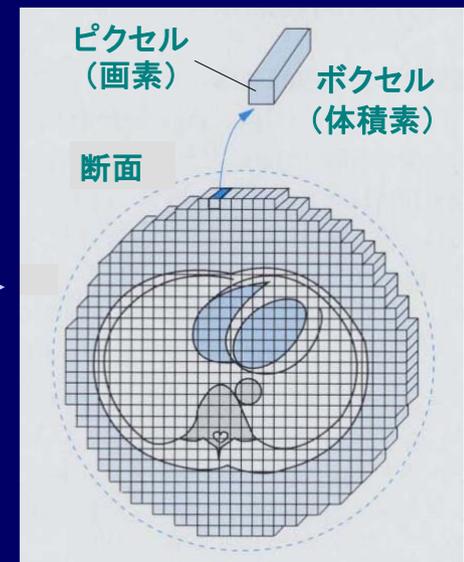
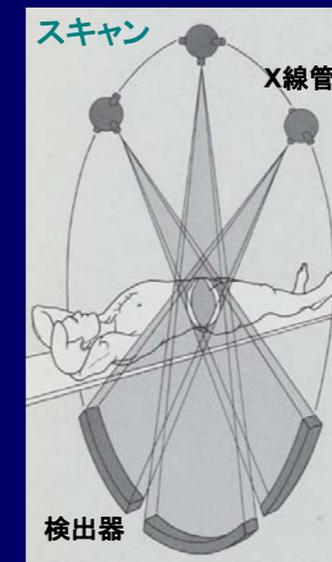


X線 CT

レントゲン(X線)撮影

国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用

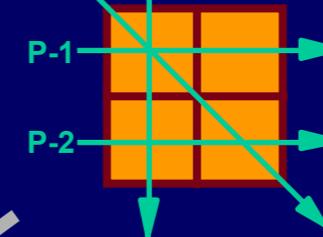
X線コンピュータ断層撮影法:CT



未知の線減弱係数

μ_1	μ_2
μ_3	μ_4

X線投影



連立方程式

- P-1; $\mu_1 + \mu_2 = 8$
- P-2; $\mu_3 + \mu_4 = 9$
- P-3; $\mu_1 + \mu_3 = 6$
- P-4; $\mu_1 + \mu_4 = 5$

解答

1	7
5	4

逆問題

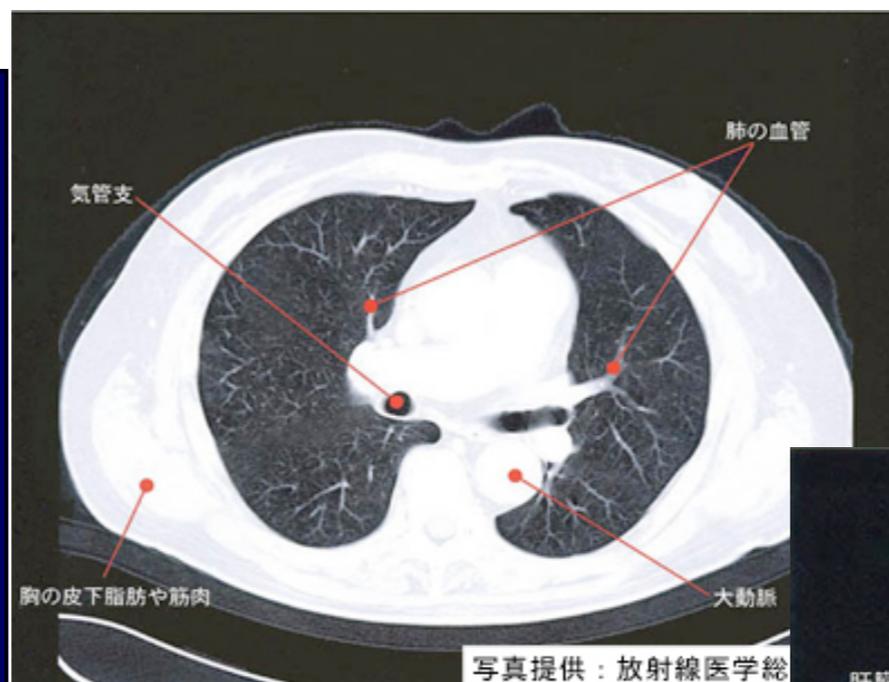
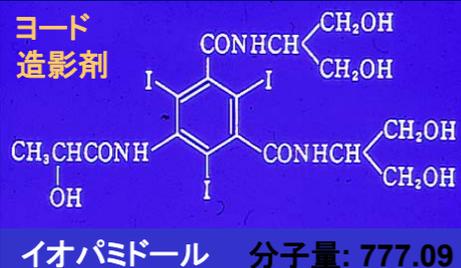
X線検査用造影剤

* 陽性造影剤

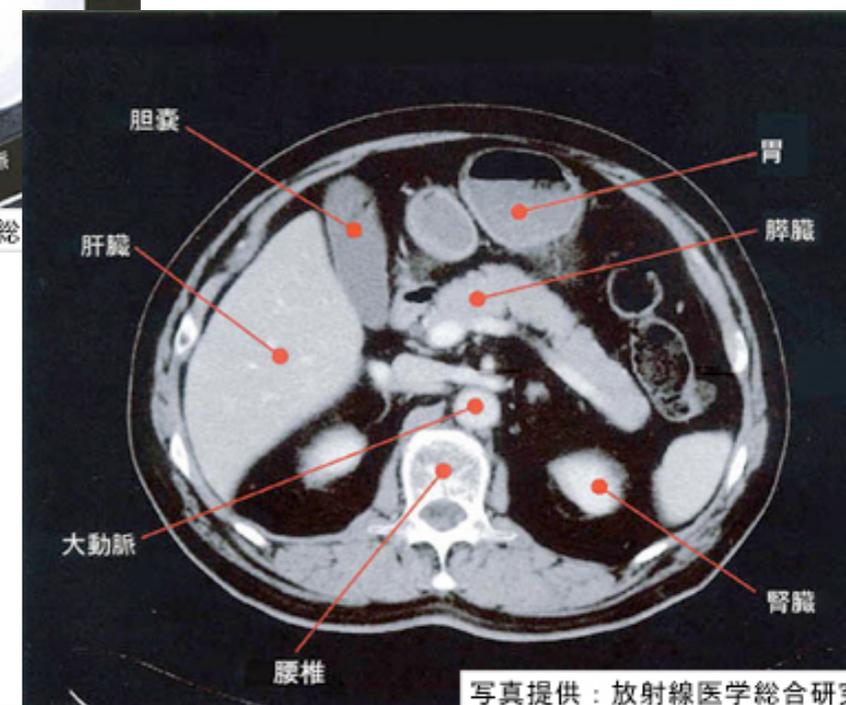
	元素	原子番号	K吸収端
・ヨード造影剤: 血管造影用	I	53	33.16 keV
・硫酸バリウム: 消化管造影用	Ba	56	37.41 keV
・キセノンガス(脳血流CT)	Xe	54	34.56 keV

* 陰性造影剤

- ・気体: 空気, 酸素, 炭酸ガス...
- ・オリーブ油(膀胱CT)



写真提供: 放射線医学総研



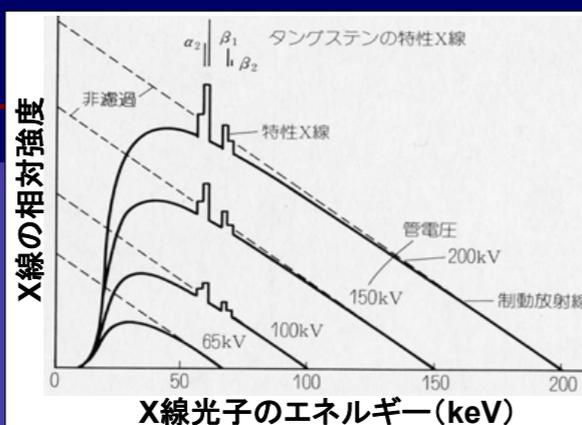
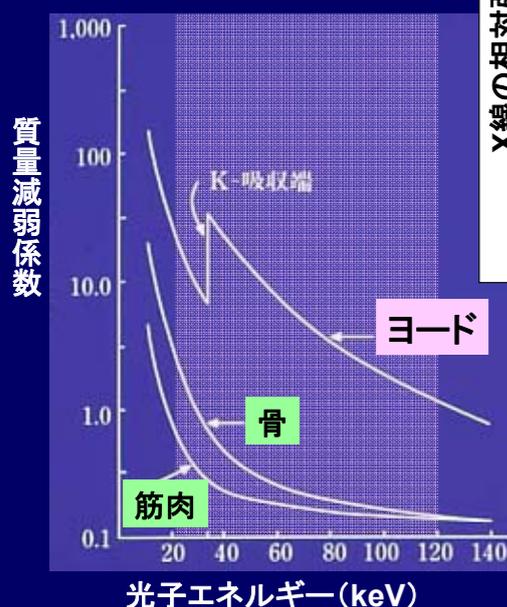
写真提供: 放射線医学総合研

(減弱)

造影剤 (I, Ba, Xe): Z 大 = 減衰係数 大

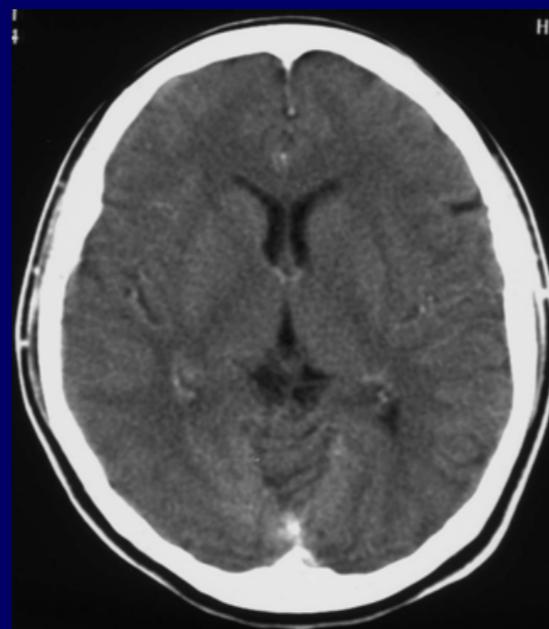
国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用

X線の発生と減弱

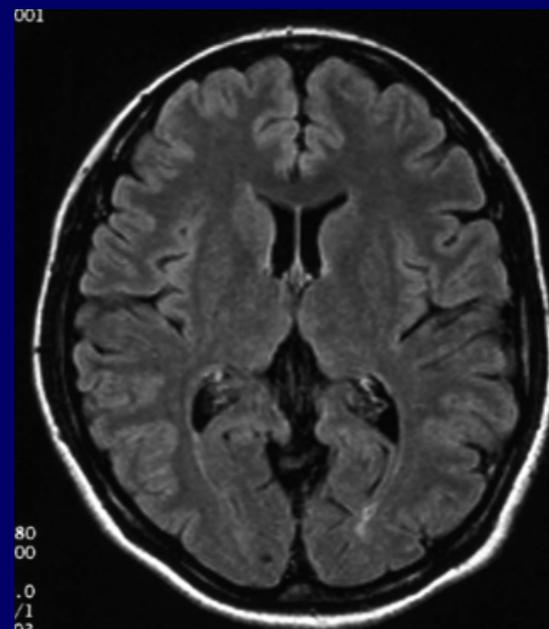


- * 光電効果: 光電吸収
- ・元素のK吸収端 (keV):
H 0.0136, C 0.283, O 0.531
- * コンプトン散乱: 非弾性散乱

X線コンピュータ断層撮影法
X-Ray CT:
Computed Tomography



磁気共鳴画像診断法
MRI: Magnetic
Resonance Imaging



PET (Positron Emission Tomography) 陽電子断層撮影法

組織の”はたらき”を知る

^{18}F -FDG (fluorodeoxy glucose), $^{15}\text{O}_2$, H_2^{15}O



放射線医療：診断

e^+

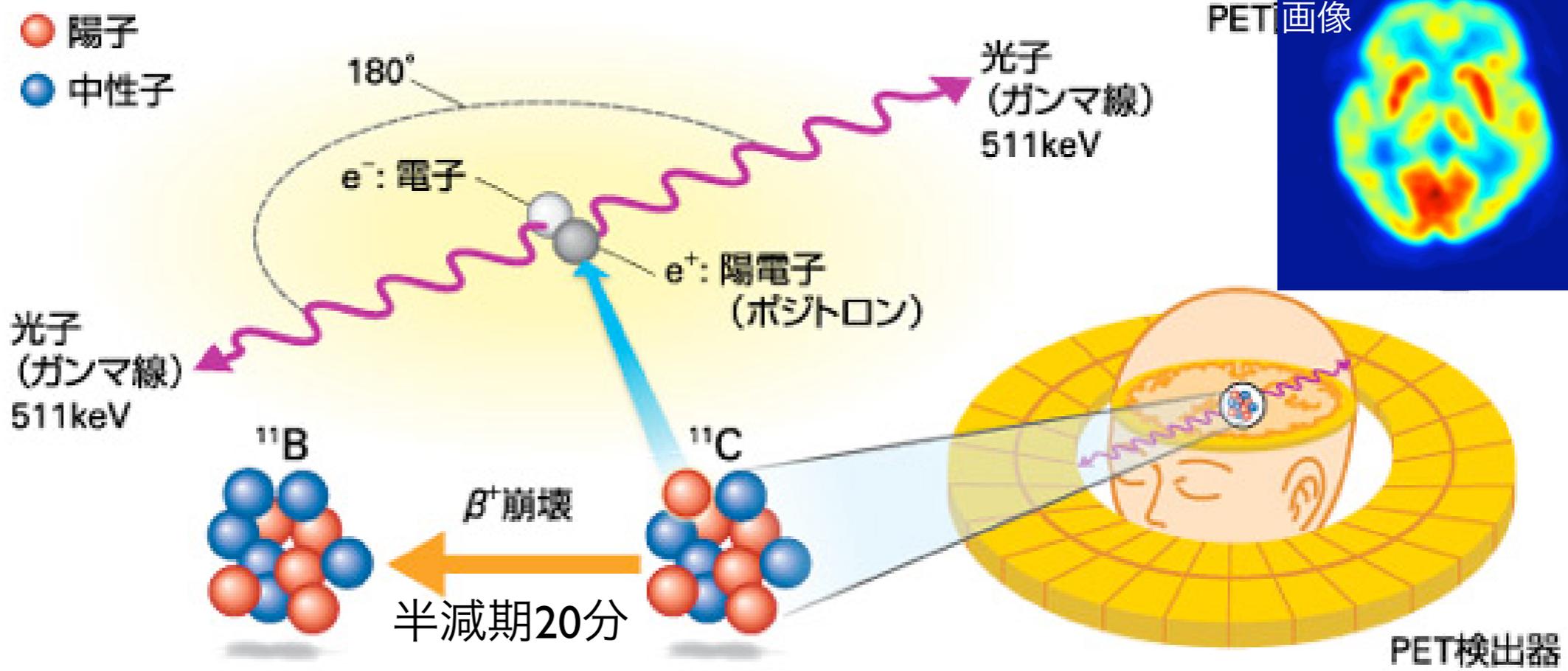


陽電子 positron

電子 electron



e^-



^{11}C , ^{13}N ,
 ^{15}O , ^{18}F

図1 PET (陽電子放射断層画像撮影法) の仕組み

調べたい分子に陽電子を放出する放射性核種を付け、静脈注射によって投与する。例えば、炭素 11 (^{11}C) はホウ素 11 (^{11}B) に崩壊するとき、陽電子を 1 個放出する。その陽電子が近くにある電子と衝突し、両方向にガンマ線が放出される。検出器がガンマ線をとらえることで断層画像が得られ、分子がどこに、どれだけ存在しているのかを知ることができる。

VIDEO

放射線診断

日本原子力文化振興財団：エネコチャンネルのビデオ映像「探検！身近な放射線」より抜粋

<http://eneco.jaero.or.jp/20110322/>

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)

• 物理分野 #3

締切：12月22日

物理：鳥居・石渡

化学：小豆川

生命：渡邊、中川、藤原

以下の計算課題 (A)~(E) から2題以上を選び回答。

(A) ^{40}K の内部被曝

(B) 放射性セシウムの除染と空間線量率

(C) ^{131}I の崩壊熱

(D) α 線の内部被曝

(E) 原子物理学

レポート 物理分野#3

(A)~(E) から 2 題以上を選択

(A) ^{40}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}K (半減期 12.8億年) である。

(i) この ^{40}K による放射能は何ベクレルか。

(ii) 1 Bq の ^{40}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}K による被曝は年間何 mSv/年 に相当するか。

レポート 物理分野#3

(B) 放射性セシウムの除染と空間線量率

福島市では今も空間線量率（地上 1 m）が $1 \mu\text{Sv/h}$ という高い値が続いている。以下の問いにおいて、放射性セシウムはすべて ^{137}Cs だと仮定して答えよ。余力のある人は放射能の半分が ^{137}Cs 、半分が ^{134}Cs であるとして計算できるとなおよい。

- (i) 地表に一様に付着した放射性セシウムがその主な原因だとすると、その密度は何 Bq/m^2 と見積もられるか。
- (ii) 周囲の半径 10 m を除染して、その範囲内で地表の放射性セシウムの量を 5 分の 1 に下げられるとする。（ただし半径 10 m の外はそのまま。）空間線量率はいくらに下がるだろうか。周りには建物などなく、平らな土地であるとして計算してみよ。

レポート 物理分野#3

(C) ^{131}I の崩壊熱

福島第一原発から放出された ^{131}I は15万TBq ($T=10^{12}$)とされている。原子炉の中には、当初その10倍前後の ^{131}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}I は全部で何グラムに相当するか。

(ii) 各炉内において、 ^{131}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 β 線と γ 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りと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}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。

レポート 物理分野#3

(D) α 線の内部被曝

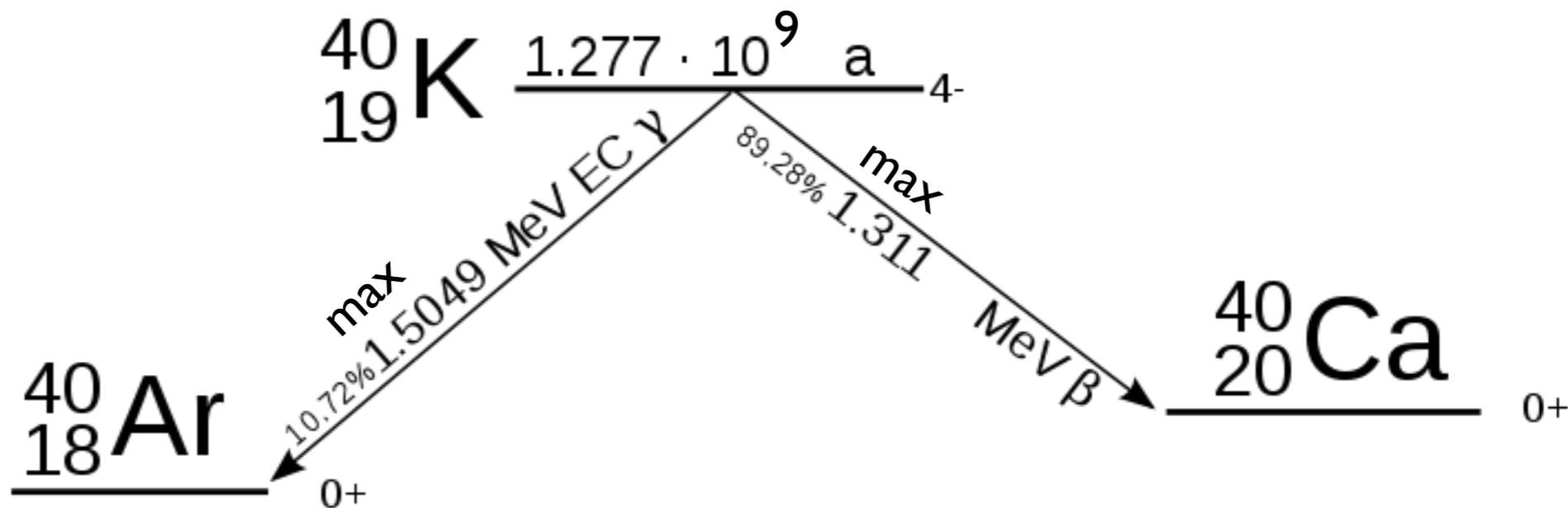
α 線の内部被曝に注意が必要な理由を述べ、何か例を選んでエネルギー付与や線量の計算を試してみよ。

(E) 原子物理学

(i) 5 MeV の α 線はいかほどの速さか。5 MeV の β 線ではどうか。光速と比較してみよ。

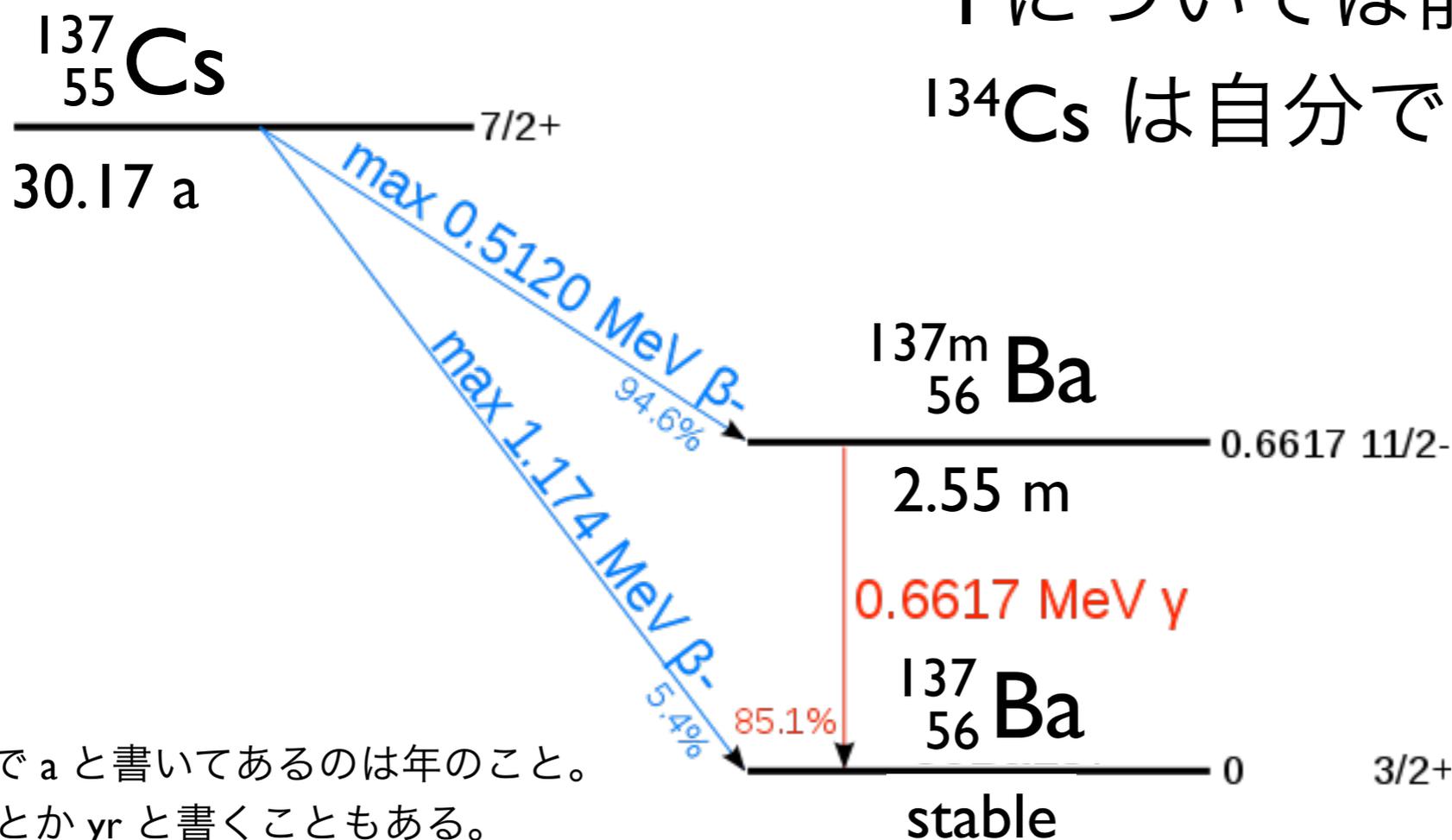
(ii) 鉛の $K\alpha$ -X線 (2p準位から 1s準位に遷移するときを発するX線) のエネルギーを求めよ。

参考



^{131}I については前のページで既出。

^{134}Cs は自分で調べてみることに。



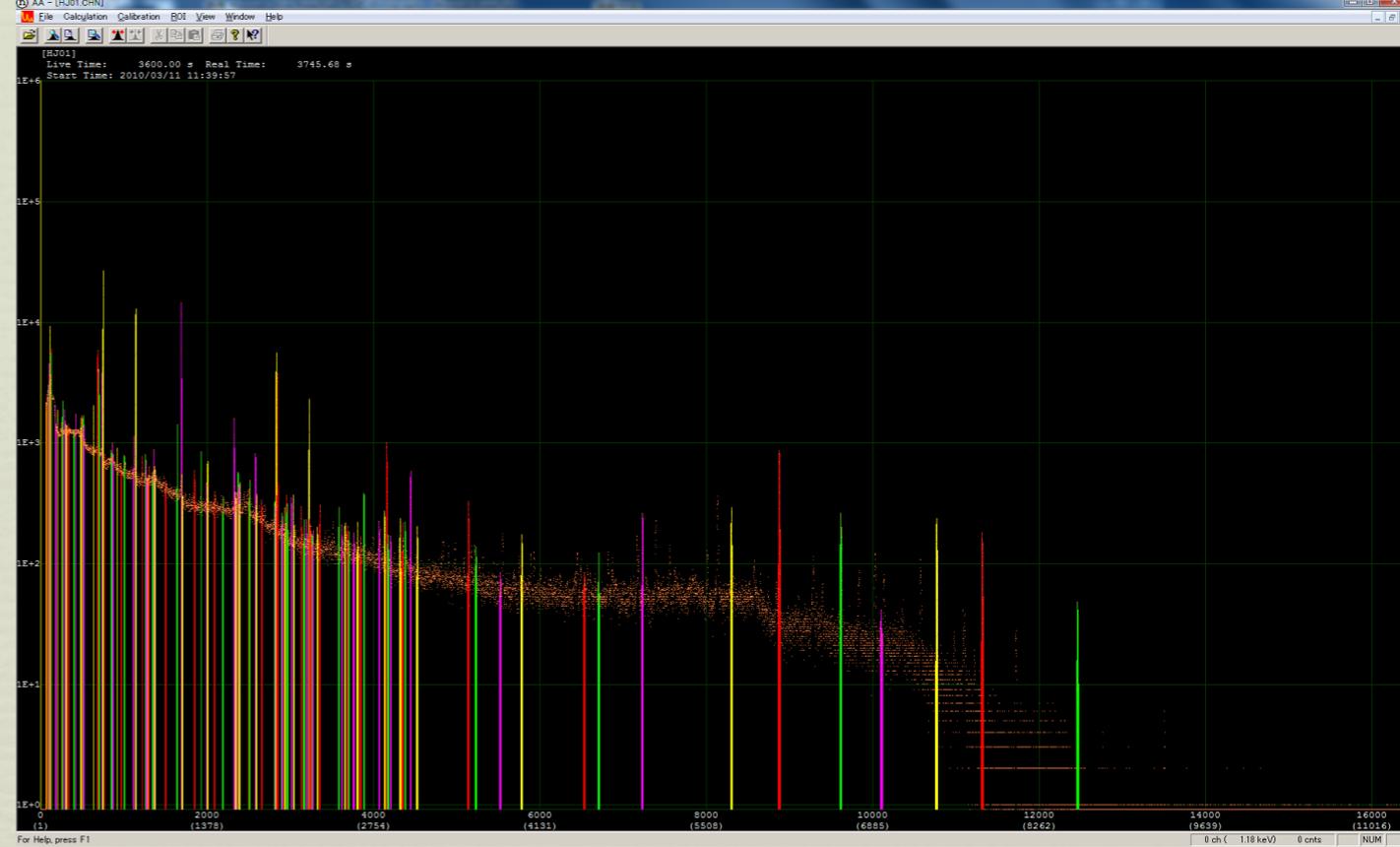
半減期で a と書いてあるのは年のこと。
y とか yr と書くこともある。

次回予告

第10回 (12/16)

● 環境放射化学

● 予想される今後の放射線量の推移
(小豆川先生)



日立アロカ社ウェブサイトより



HORIBA社ウェブサイトより



放射線を科学的に理解する

- 10/ 7 放射線入門【鳥居】
- 10/14 放射線物理学【鳥居】
- 10/21 放射線計測学【小豆川】
- 10/28 環境放射化学【小豆川】
- 11/ 4 放射線生物学【渡邊】
- 11/11 放射線医学【中川】
- 11/18 原子核物理学【鳥居】
- 12/ 2 原子力工学【石渡】
- 12/ 9 放射線物理学【鳥居】
- 12/16 環境放射化学【小豆川】
- 1/10 植物栄養・土壌肥料学
火曜【藤原】
- 1/20 放射線の利用【渡邊】
- 1/27 加速器科学・まとめ
【鳥居】

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

中川 恵一 《医学部附属病院放射線科》

石渡 祐樹 《工学系原子力国際専攻》

藤原 徹 《農学部応用生命科学》

ゲスト講師

講義スライド、講義予定

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

連絡先

torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp

担当教員:鳥居 寛之

東大教養 放射線 テーマ講義



検索!

Fine. Per oggi è tutto.

Fini pour aujourd'hui

That's all for today.

Всё за сегодня.

오늘은 여기까지 하겠습니다.

Ci vediamo la prossima settimana.

On se voit la semaine prochaine.

See you next week.

Увидимся на следующей неделе.

다음 주에 또 만납시다.