

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。

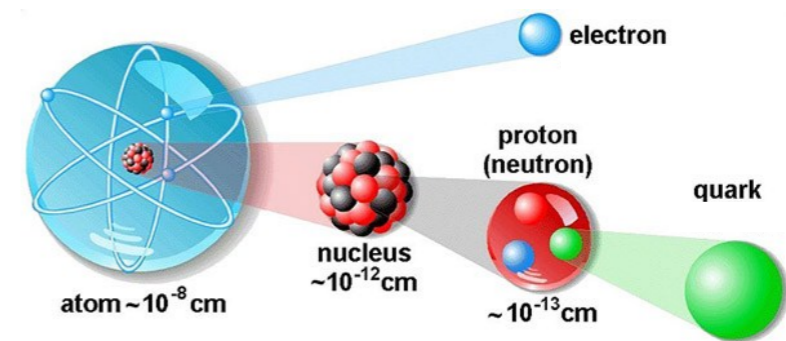
書籍「放射線を科学的に理解する — 基礎からわかる東大教養の講義 —」

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

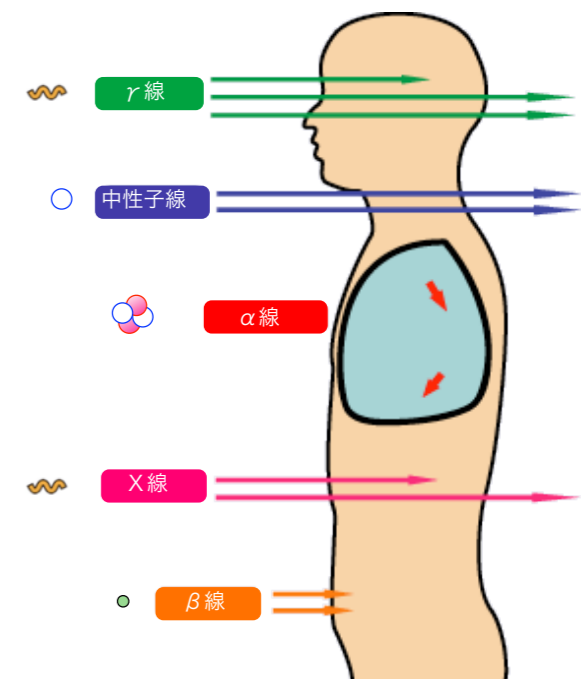
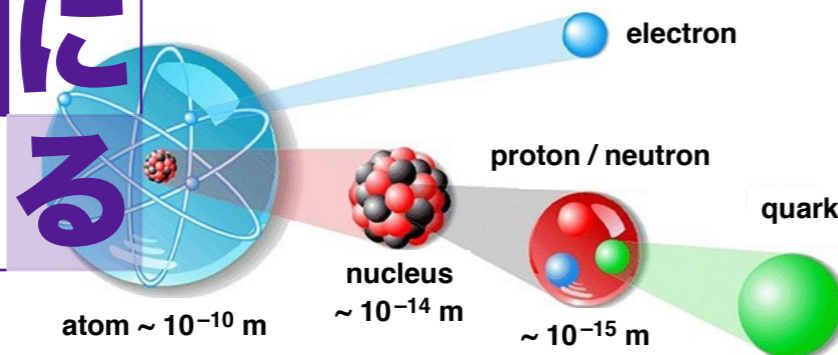
自主講義
放射線学



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

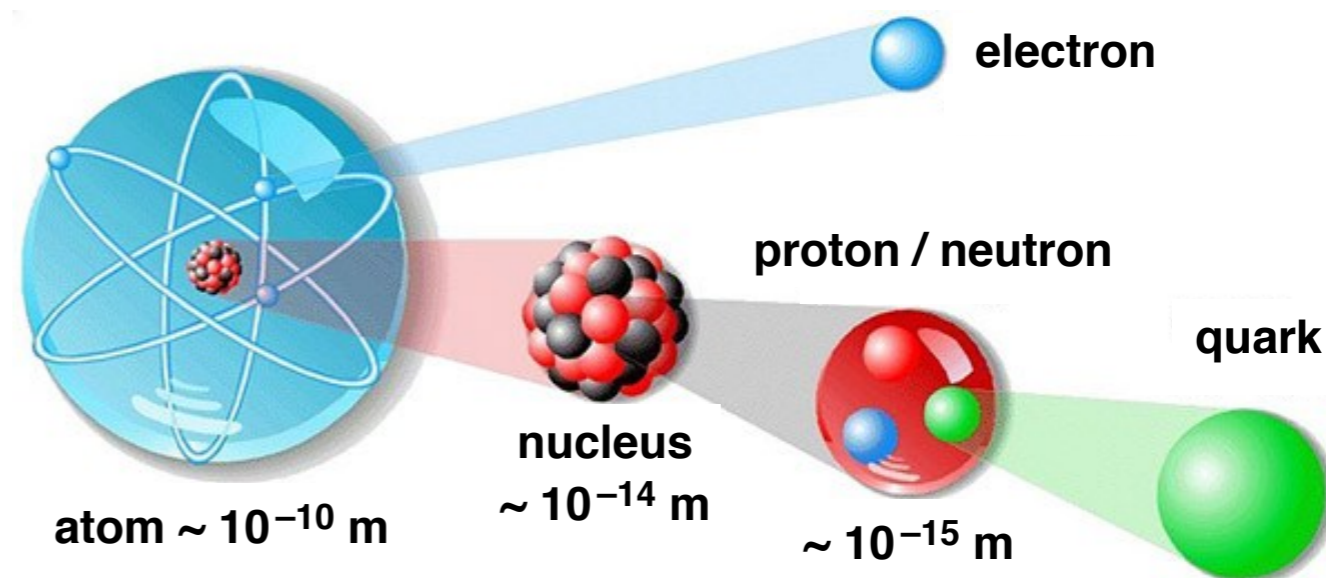
放射線を
科学的に
理解する



2011年度冬学期 主題科目テーマ講義

第2回：2011 / 10 / 14 (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 (I)

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 【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



分子
molecule

nm (10^{-9} m)

ナノメートル

化学

eV

電子ボルト

Chemistry



原子
atom

Å (10^{-10} m)

オングストローム

原子物理学

Atomic Physics

eV – keV

数電子ボルト～

キロ電子ボルト

錬金術はなぜ失敗したか



原子核
nucleus

原子核物理学

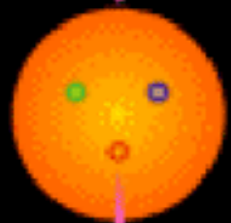
Nuclear Physics

fm (10^{-15} m)

フェムトメートル

MeV

メガ電子ボルト



陽子
proton

素粒子物理学

Particle Physics

am (10^{-18} m)

アトメートル

GeV

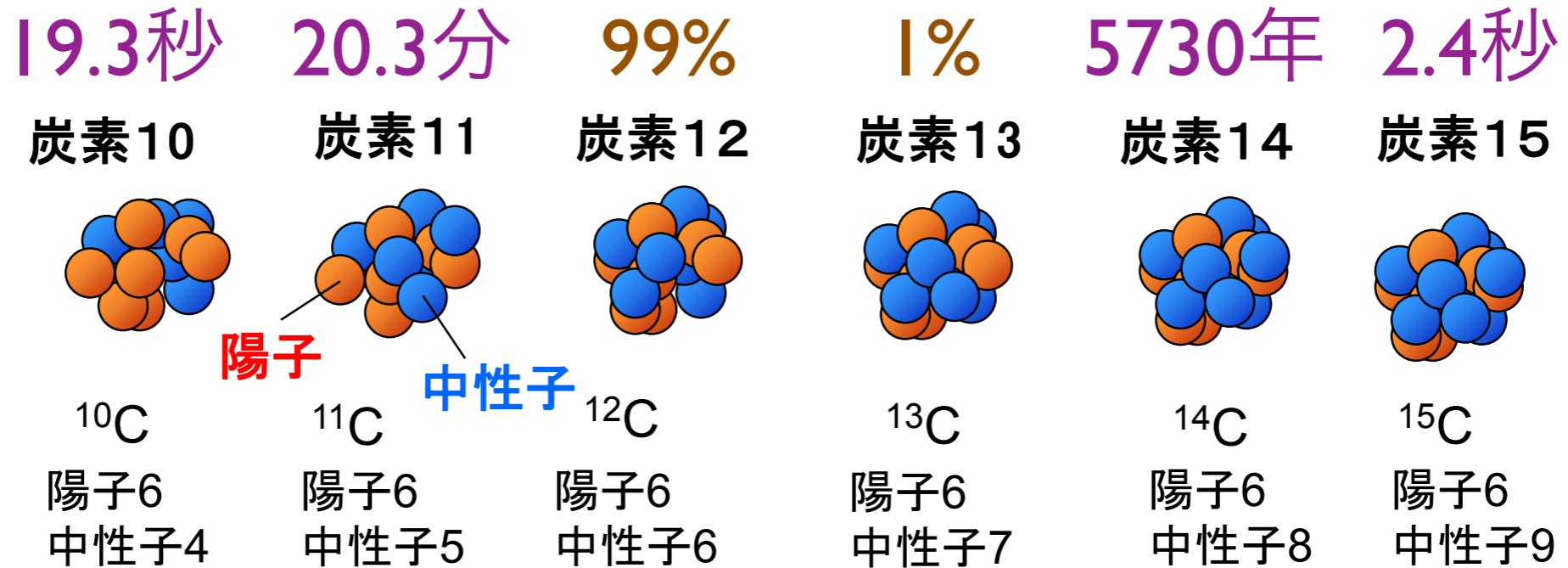
ギガ電子ボルト



クォーク
quark

同位体(原子番号(=陽子数)は同じで中性子数が異なる**原子核**)

同位体間では化学的性質は同じ



陽子過剰になると？

(寿命がある： β^+ 壊変、電子捕獲(EC))

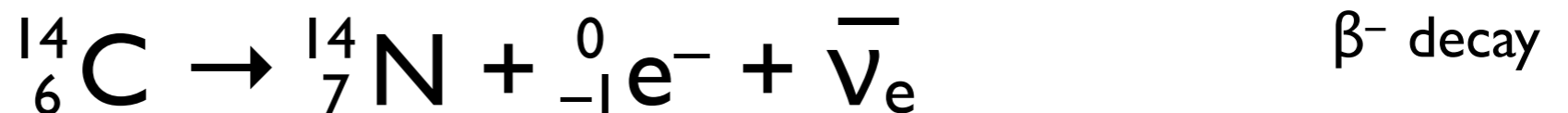
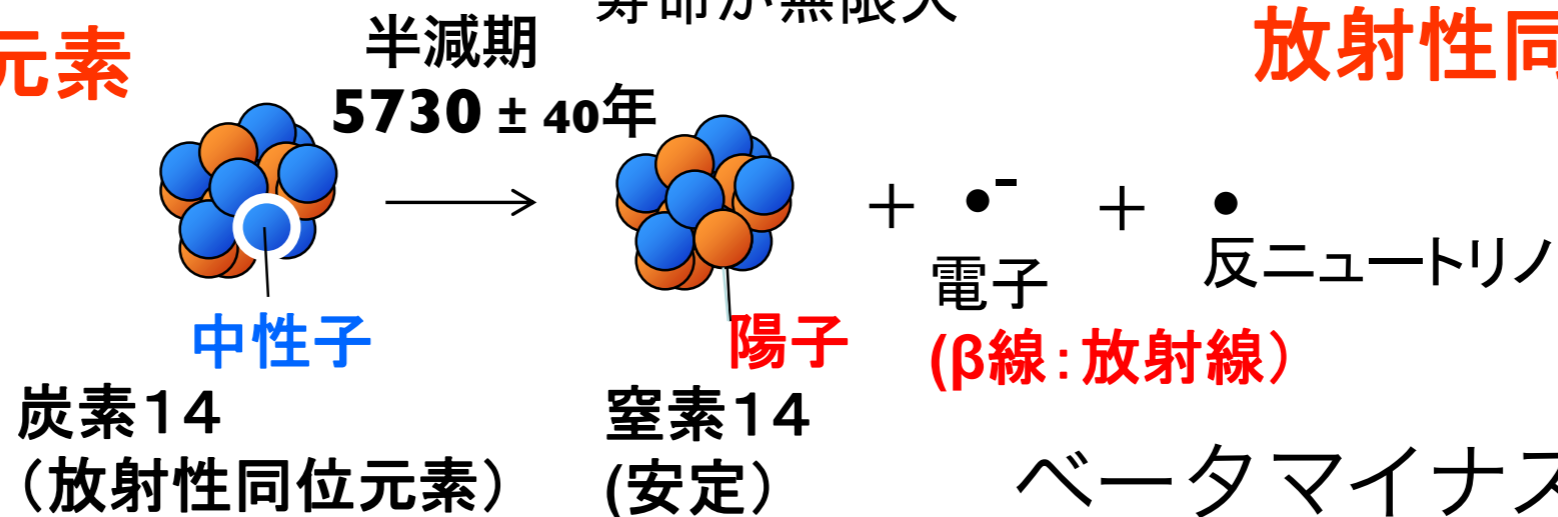
天然に存在=**安定同位体**
寿命が無限大

中性子過剰になると？

(寿命がある： β^- 壊変)

放射性同位元素

放射性同位元素



Nuclear Science

Nuclear Science is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as "Why do nuclei stay in the nucleus?" "What combinations of protons and neutrons are possible?" "What happens when nuclei are compressed or rapidly rotated?" "What is the origin of the nuclei found on Earth?"

Legend

- electron (e^-)
- positron (e^+)
- neutrino (ν)
- antineutrino ($\bar{\nu}$)
- quark
- gluon field
- gluon
- photon (γ)
- Nucleon: $A = Z + N$

Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about 10^{-35} second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the Universe, T_{univ} , cooled to about 10^{12} K, this soup condensed into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, most of the protons and neutrons formed deuterium, helium, and lithium nuclei. Still later, electrons combined with protons and these low-mass nuclei to form neutral atoms. Due to gravity, clouds of atoms condensed into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Expanding and impermeable from the most massive elements and dispersed them into space. Our earth was formed from supernova debris.



Phases of Nuclear Matter



Unstable Nuclei

Stable nuclei form a narrow white band on the Chart of the Nuclides. Scientists produce unstable nuclei far from this band and study their decays, thereby learning about the extremes of nuclear conditions. In its present form, this chart contains about 2500 different nuclides. Nuclear theory predicts that there are at least 4000 more to be discovered with $Z \leq 112$.



Radioactivity

Alpha Decay: ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$ (alpha particle)

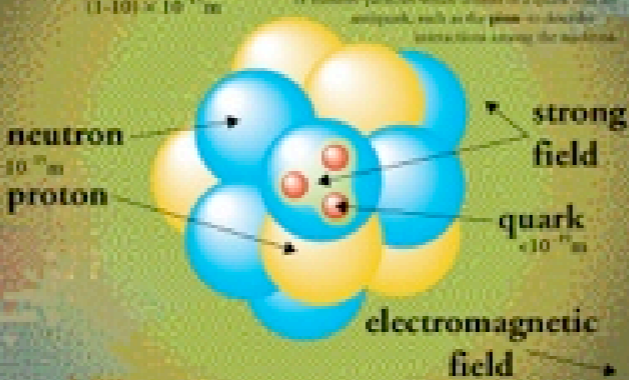
Beta Minus Decay: ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$ (beta particle)

Beta Plus Decay: ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + e^+ + \nu_e$ (beta particle)

Gamma Decay: ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{27}\text{Co} + \gamma$ (gamma ray)

Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a ${}^4_2\text{He}$ nucleus—an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino for a proton and neutron or captures an atomic electron and emits a positron and neutrino. A positron is the same for the antiparticle of the electron. Antineutrino is composed of anti-particle. Both alpha and beta decays change the original nucleus into a nucleus of a different chemical element. In gamma decay, the nucleus lowers its internal energy by emitting a photon—a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.

The Nucleus



In an alpha emission, energy is carried away from the nucleus at different speeds, up to 10^7 m/s, from the nucleus decaying. If the electron cloud were shown to follow the alpha particle, it would appear almost inert.

Nuclear Energy

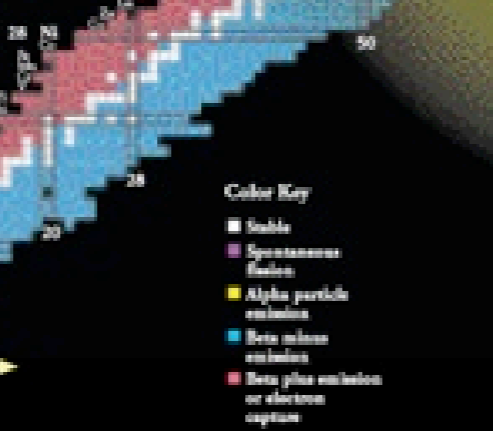
Fission: ${}^{235}_{92}\text{U} + n \rightarrow {}^{141}_{54}\text{Xe} + {}^{92}_{38}\text{Sr} + 2n$

Fusion: ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + n$

In the early stages of nuclear reactions of our sun and other stars, hydrogen fuses to form helium, releasing energy in the form of photons (light) and neutrinos. During the later stages of stellar evolution, more massive nuclei up to and beyond iron are synthesized by fusion. By measuring the number of reactions that come from the Sun, scientists recently have demonstrated that neutrinos must have a mass greater than zero.

Chart of the Nuclides

The Chart of the Nuclides presents in graphic form all known nuclei with atomic number, Z , and neutron number, N . Each nuclide is represented by a box colored according to its predominant decay mode. Magic numbers (2 or $Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82$ and 126) are indicated by a rectangle on the chart. They correspond to major closed shells and show regions of greater nuclear binding energy.



Applications

Radioactive Dating: Recently, exciting radioactive isotopes such as ${}^{14}\text{C}$ are used to date objects that were once living, such as wood. For example, from a study of pollen found at the site, scientists determined that Pompeii was built nearly 4,000 years ago.

Smoke Detectors: Many smoke detectors use a small amount of the alpha emitter ${}^{241}\text{Am}$ to ionize the air. Smoke entering the detector reduces the current and sets off the alarm.

Nuclear Medicine: Radioactive isotopes such as ${}^{99m}\text{Tc}$, ${}^{131}\text{I}$, and ${}^{18}\text{F}$ are commonly used in the diagnosis and treatment of illness. Nuclear medicine such as ${}^{18}\text{F}$ is used in Positron Emission Tomography (PET) to produce images of brain activity.

Space Exploration: Excess heat and alpha particles in naturally occurring thorium isotopes present in thorium oxide. On Earth, nuclear reactions are used to supply heat from geothermal sources or as an alternative.

Nuclear Reactors: Nuclear reactions on the fission of ${}^{235}\text{U}$ or ${}^{239}\text{Pu}$ nuclei to produce atomic power. Reactors will have other nuclear applications generate radioactive waste, depend of the way in a subject of current research.

Magnetic Resonance Imaging: Magnetic Resonance Imaging (MRI) utilizes an array of nuclei reactions involving the magnetic field of a nucleus to study the local chemical environment. This technique accurately maps the density of hydrogen to produce three-dimensional images of the human body.

www.CPEPweb.org

Nuclear Science

Nuclear Science is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and shapes of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as "Why do nucleons stay in the nucleus?" "What combinations of protons and neutrons are possible?" "What happens when nuclei are compressed or rapidly rotated?" "What is the origin of the nuclei found on Earth?"

Legend

- electron (e^-)
- positron (e^+)
- neutrino (ν)
- antineutrino ($\bar{\nu}$)
- quark
- gluon field
- photon
- photon (γ)
- Nucleon: $A - Z$

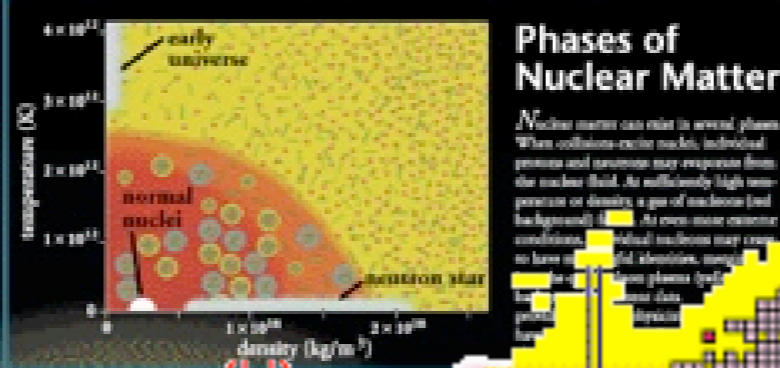
Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about 10^{-35} second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the Universe, T_{univ} , cooled to about 10^9 K, this soup condensed into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, most of the protons and neutrons formed deuterium, helium, and lithium nuclei. Still later, electrons combined with protons and these low-mass nuclei to form neutral atoms. Due to gravity, clouds of atoms condensed into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Expanding star temperatures from the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.



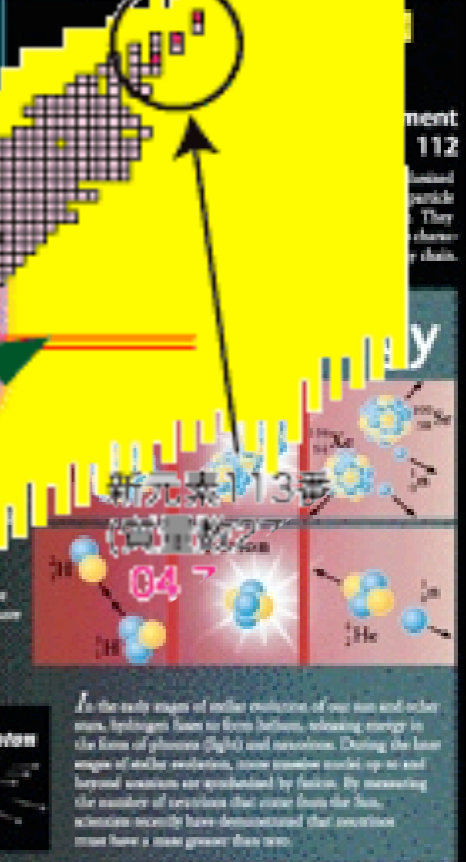
Phases of Nuclear Matter

Nuclei matter can exist in several phases. When collisions excite nuclei, individual protons and neutrons may evaporate from the nuclear field. At sufficiently high temperature or density a gas of nucleons (and background μ) is formed. At even more extreme conditions, individual nucleons may cease to have identifiable identities, merging into a new phase (quark-gluon plasma). At still higher temperatures, protons and neutrons may melt into a liquid phase. At even higher temperatures, the liquid phase may melt into a gas phase.

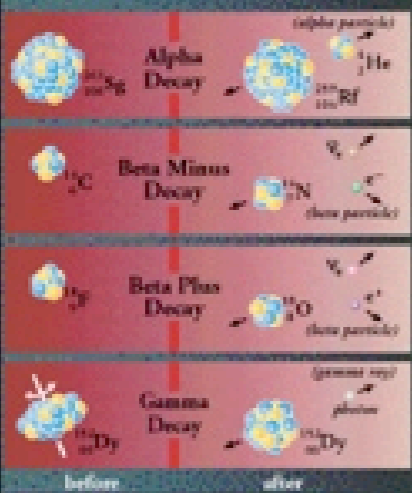


Unstable Nuclei

Stable nuclei form a narrow white band on the Chart of the Nucleides. Scientists produce unstable nuclei far from this band and study their decays, thereby learning about the extremes of nuclear conditions. In its present form, this chart contains about 2500 different nuclei. Nuclear theory predicts that there are about 5000 more.



Radioactivity



Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a ${}^4_2\text{He}$ nucleus, an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino for a positron and neutrino or captures an orbital electron and emits a neutrino. A positron is the same as the antiparticle of the electron. Antineutrino is composed of anti-particle. Both alpha and beta decays change the original nucleus into a nucleus of a different chemical element. In gamma decay, the nucleus liberates internal energy by emitting a photon—a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.

The Nucleus

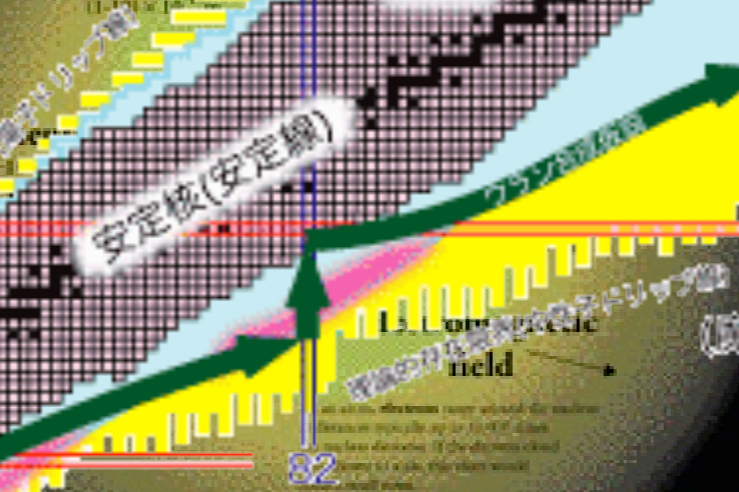
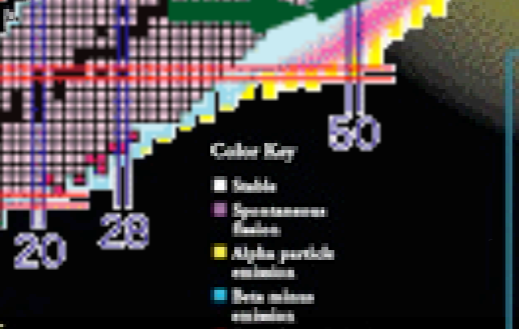


Chart of the Nuclides

The Chart of the Nuclides presents in graphic form all known nuclei with atomic number, Z, and neutron number, N. Each nuclide is represented by a square according to its predominant mode of decay. Magic numbers (2 or Z, 2, 8, 20, 28, 50, 82 and 126) are indicated by a rectangle on the chart. They correspond to major shell shells and show regions of greater nuclear binding energy.



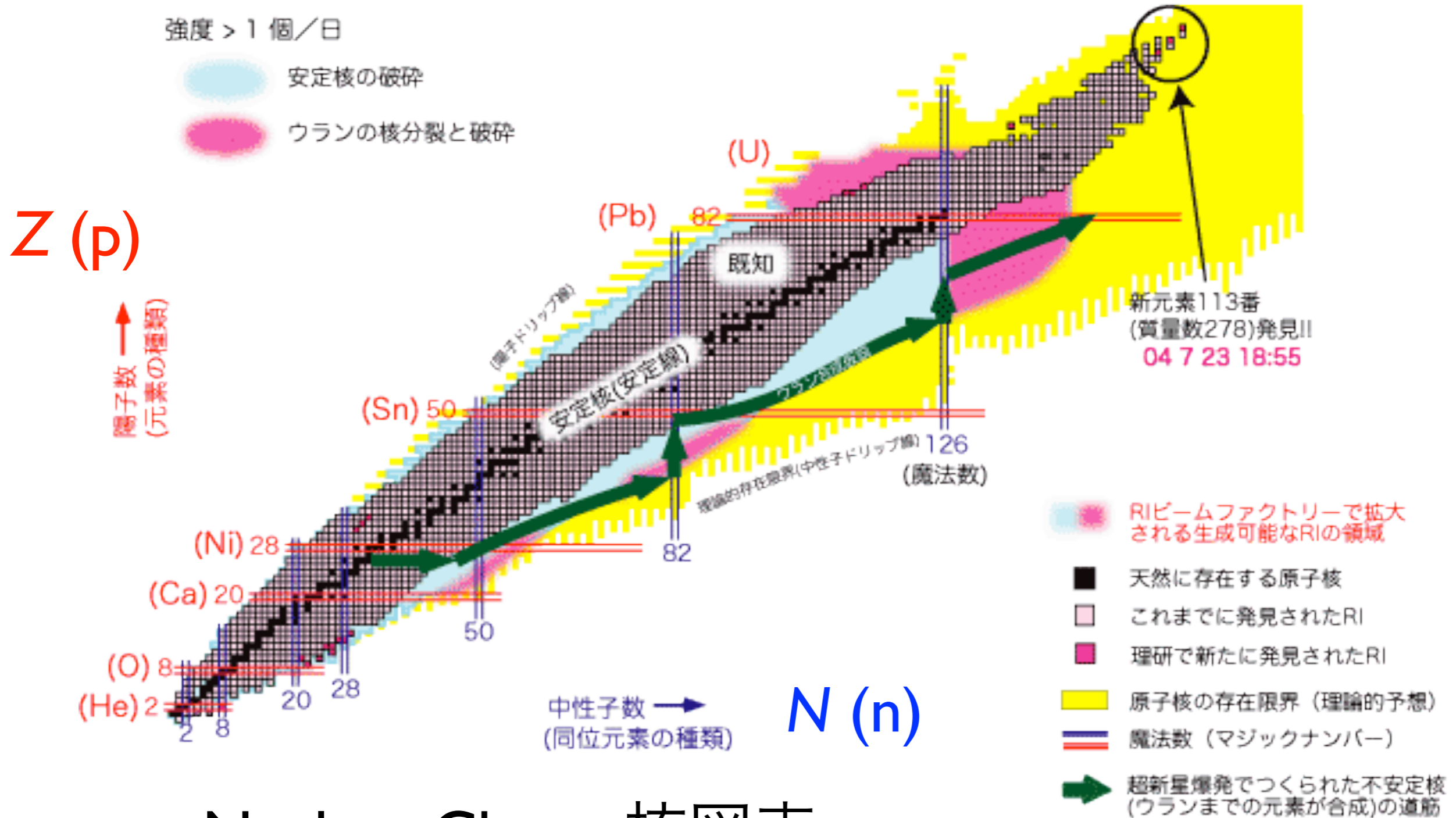
Applications

- Radioactive Dating:** Recently discovered radioactive isotopes such as ${}^{14}\text{C}$ are used to date objects that were once living, such as wood. The example here is a study of pollen found at the site, indicating that the landscape was built only 4,000 years ago.
- Smoke Detectors:** Many smoke detectors use a small amount of the alpha emitter ${}^{241}\text{Am}$ to ionize the air. Smoke entering the detector reduces the current and sets off the alarm.
- Nuclear Medicine:** Radioactive isotopes such as ${}^{99m}\text{Tc}$, ${}^{131}\text{I}$, and ${}^{18}\text{F}$ are commonly used in the diagnosis and treatment of disease. Nuclear medicine such as ${}^{131}\text{I}$ is used in thyroid hormone therapy (HIT) to prevent spread of breast cancer.
- Space Exploration:** Exposure and alpha particles in specially designed detectors placed in Martian rovers. On Earth, nuclear reactions are used to supply power from terrestrial powerplants or an environment.
- Nuclear Reactors:** Nuclear reactors on the basis of ${}^{235}\text{U}$ or ${}^{239}\text{Pu}$ nuclei to produce electric power. Reactors and other nuclear applications generate radioactive waste, disposal of the waste is a subject of current research.
- Magnetic Resonance Imaging:** Magnetic Resonance Imaging (MRI) utilizes an external magnetic field to study the local chemical environment. The technique accurately maps the density of hydrogen to produce three-dimensional images of the human body.

www.CPEPweb.org



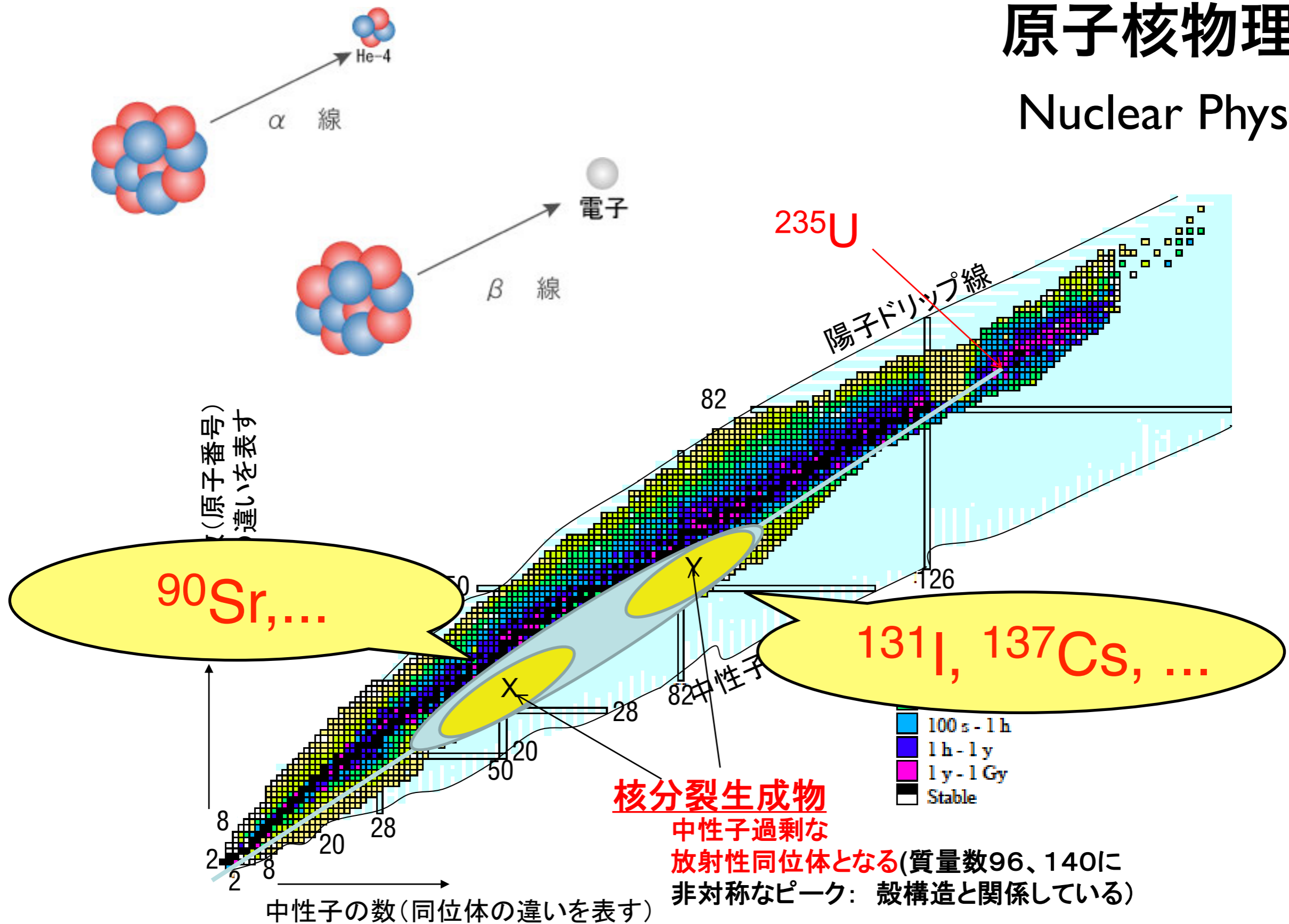
RIKEN



Nuclear Chart 核図表

原子核物理学

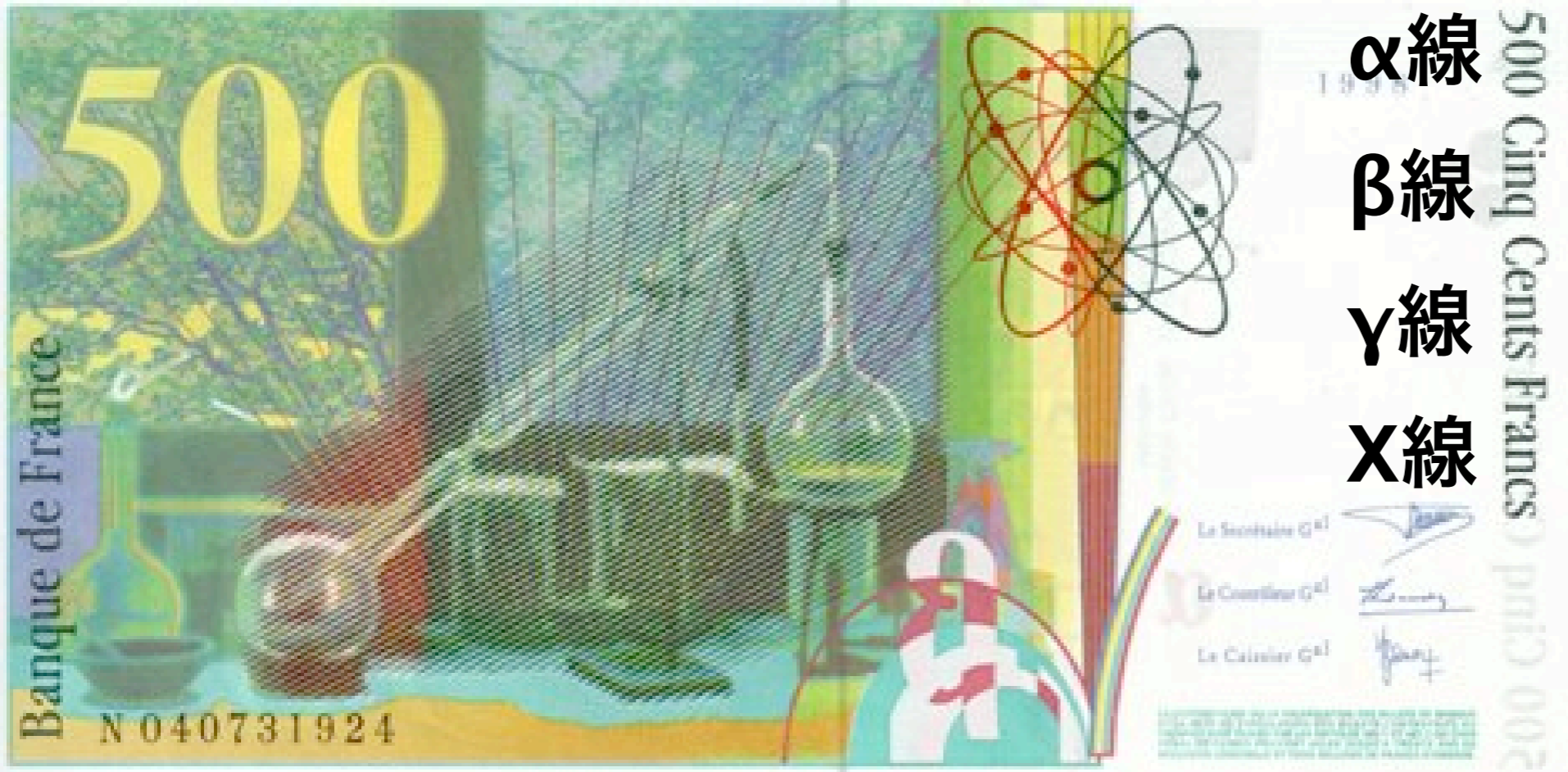
Nuclear Physics



Nuclear Chart 核図表



Billet de 500 Francs Français
en circulation: 1993–1999



- α 線 ヘリウム原子核
- β 線 高速の電子
- γ 線 光子（電磁波）
- X線 光子（電磁波）

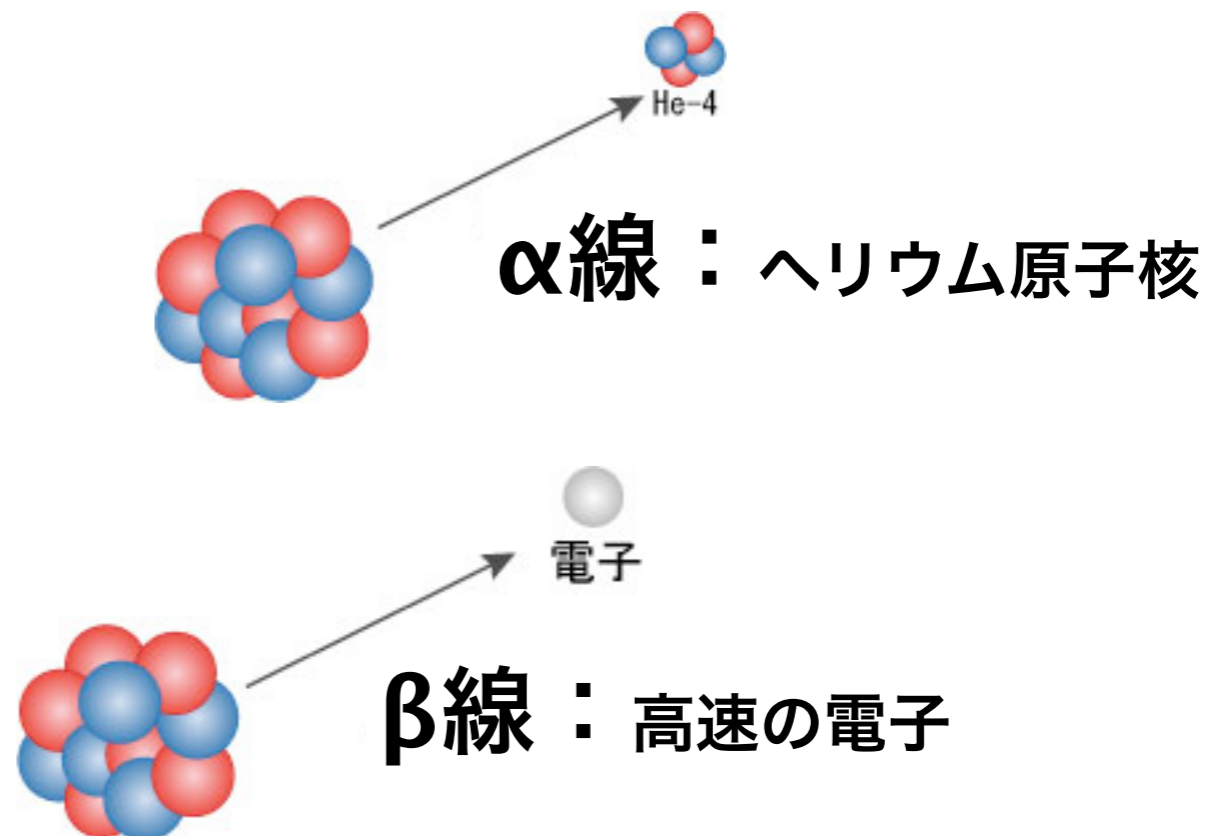
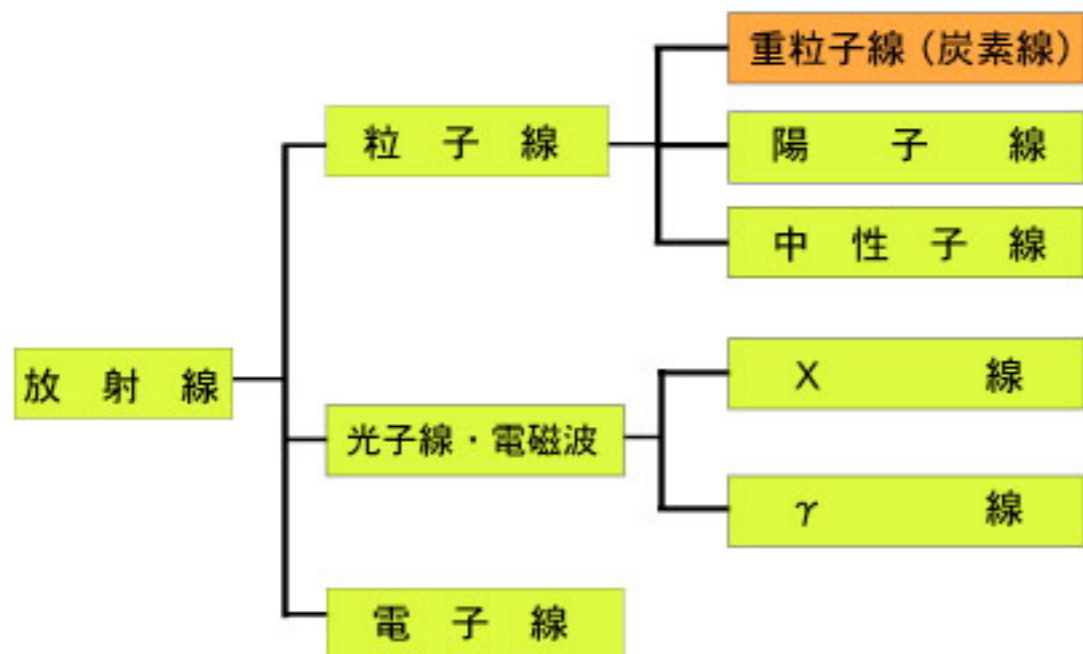
VIDEO

身の周りの放射線

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/>

放射線の種類 (放射線治療分野で用いられる分類)

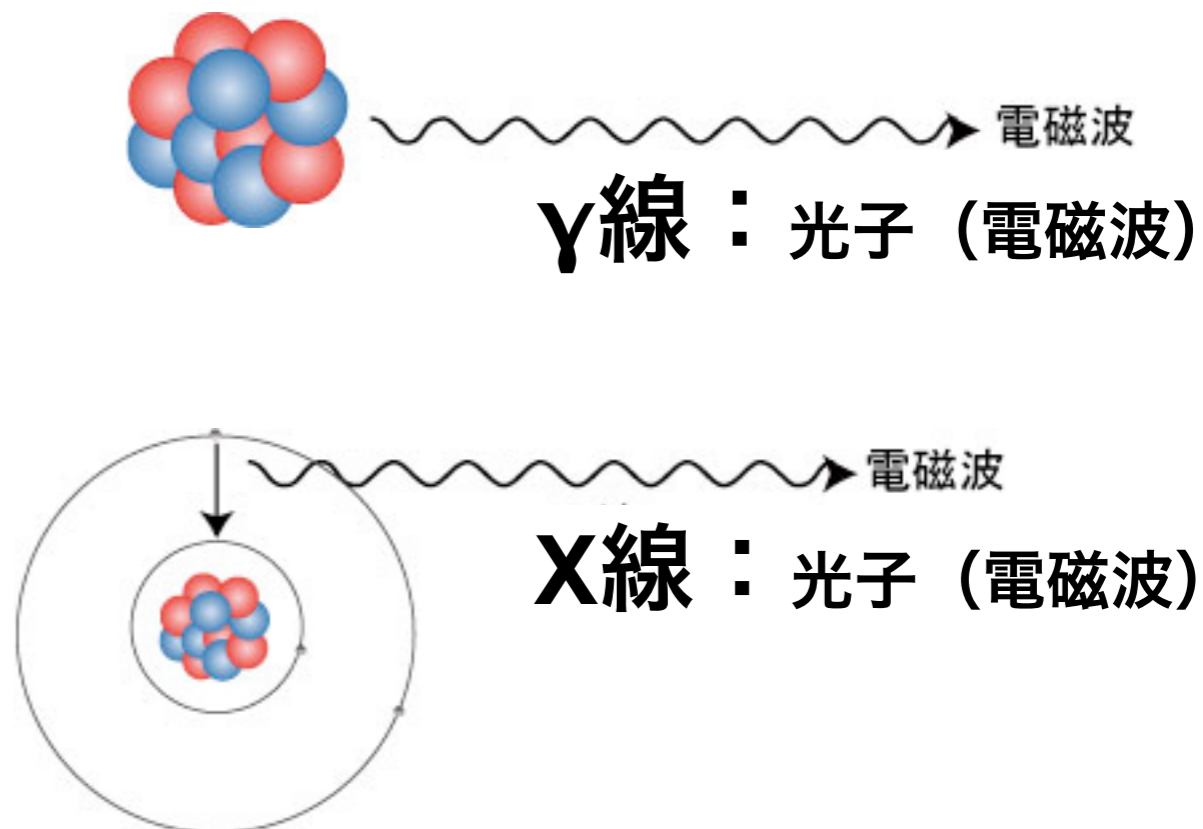


放射線のもつエネルギーは？

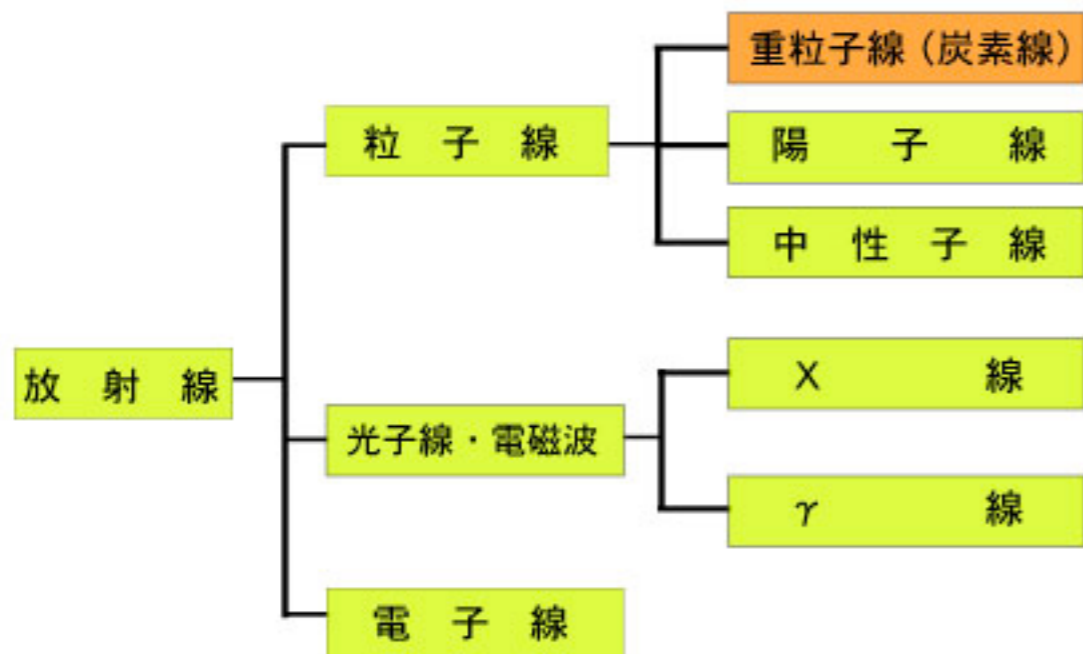
☞ **100 keV ~ MeV** for α/β/γ

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

α 線

$${}^A_Z N \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} M + {}^4_2 \alpha$$

β 線

$${}^A_Z N \rightarrow {}^A_{Z+1} M + {}^0_{-1} \beta + \bar{\nu}_e$$

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e^0$$

γ 線

$${}^A_Z N^* \rightarrow {}^A_Z N + {}^0_0 \gamma$$

100 keV ~ MeV

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？

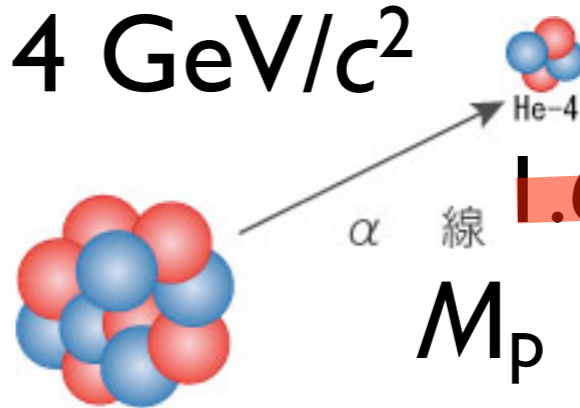
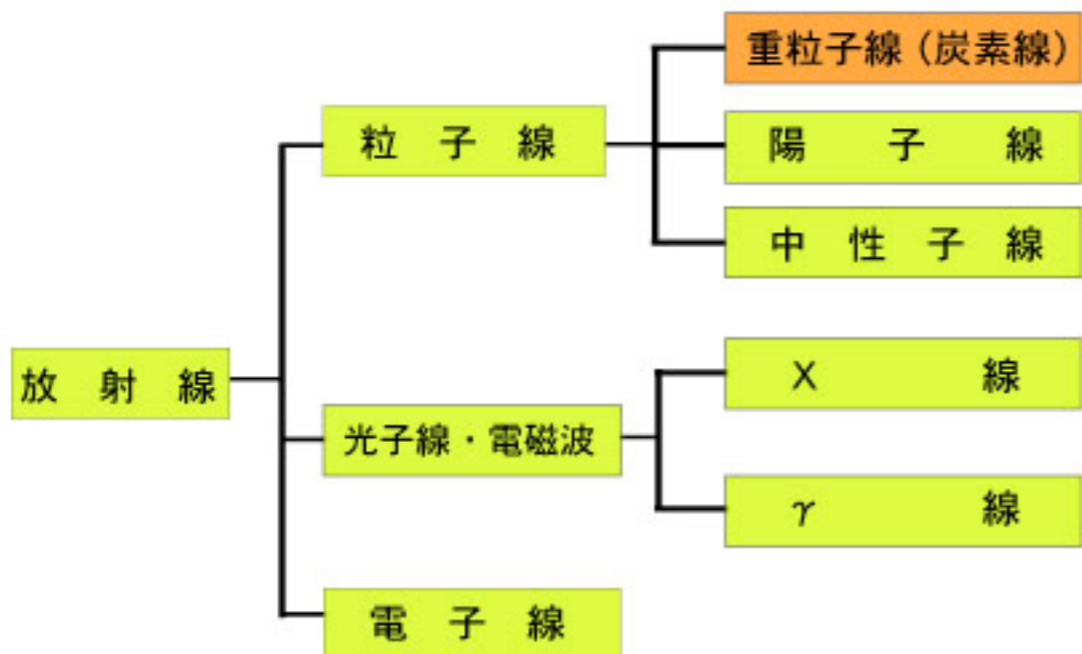
X 線

$$A^* \rightarrow A + h\nu(\text{X-ray})$$

原子 A 10 ~ 100 keV

放射線の種類 (放射線治療分野で用いられる分類)

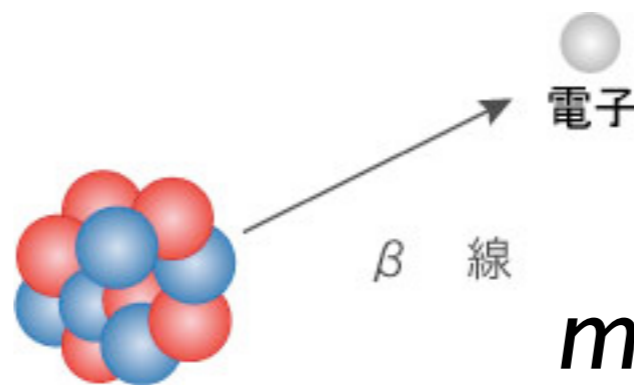
$$M_{\alpha} \approx 4 \text{ GeV}/c^2$$



~~$$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 4$$~~

$$M_p = 938 \text{ MeV}/c^2$$

$$M_n = 940 \text{ MeV}/c^2$$



~~$$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$~~

$$m_e = 511 \text{ keV}/c^2 \approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

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？

$$E = mc^2 \gamma = mc^2 \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

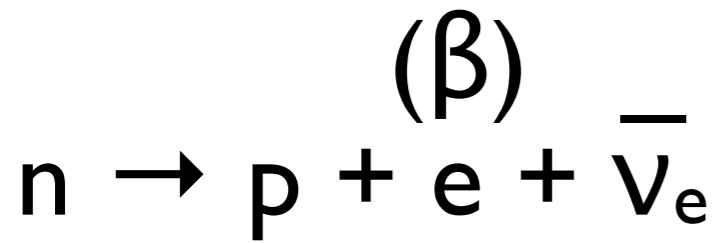
$$\beta = v/c$$

$$T = E - mc^2$$

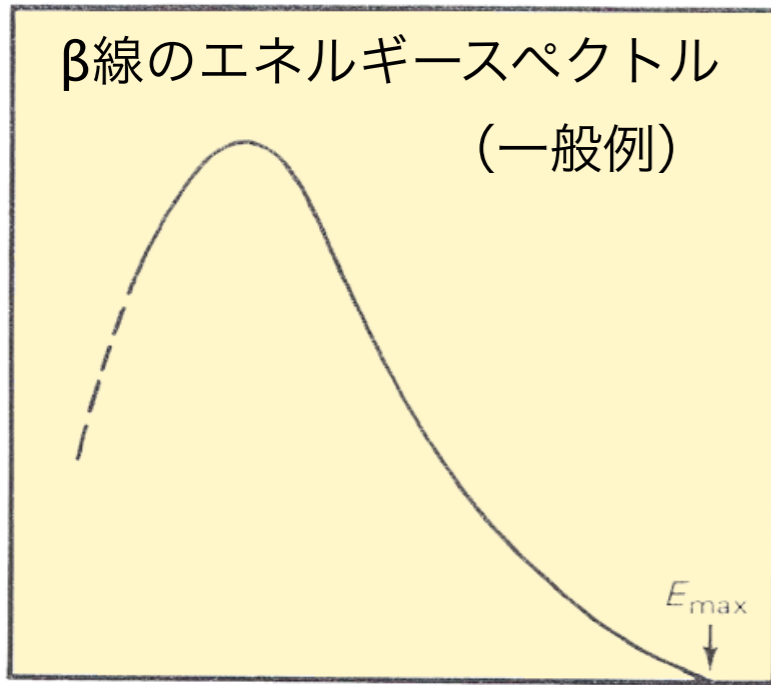
$$\approx \frac{1}{2} mv^2 \quad (v \ll c)$$

$^{131}_{53}$ 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)



β 粒子の数(相対値)



エネルギー

E_β

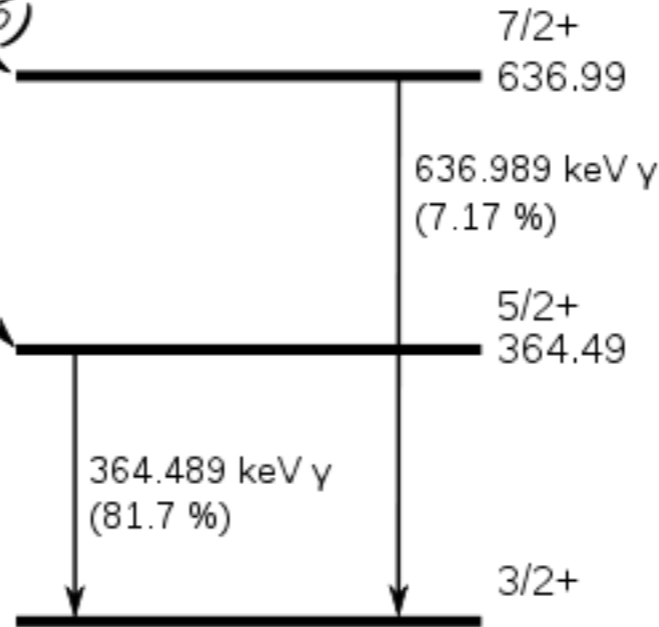
図2 β 粒子のエネルギースペクトル

[出典]石川友清(編):初級放射線、通商産業研究社、p.37

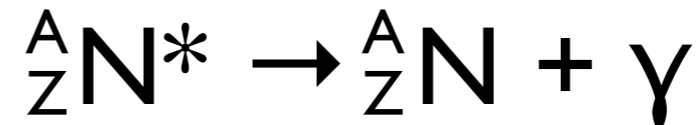
β 線 (連続スペクトル)
エネルギーの平均値 ~ 0.3 MeV

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

$^{131}_{54}$ Xe



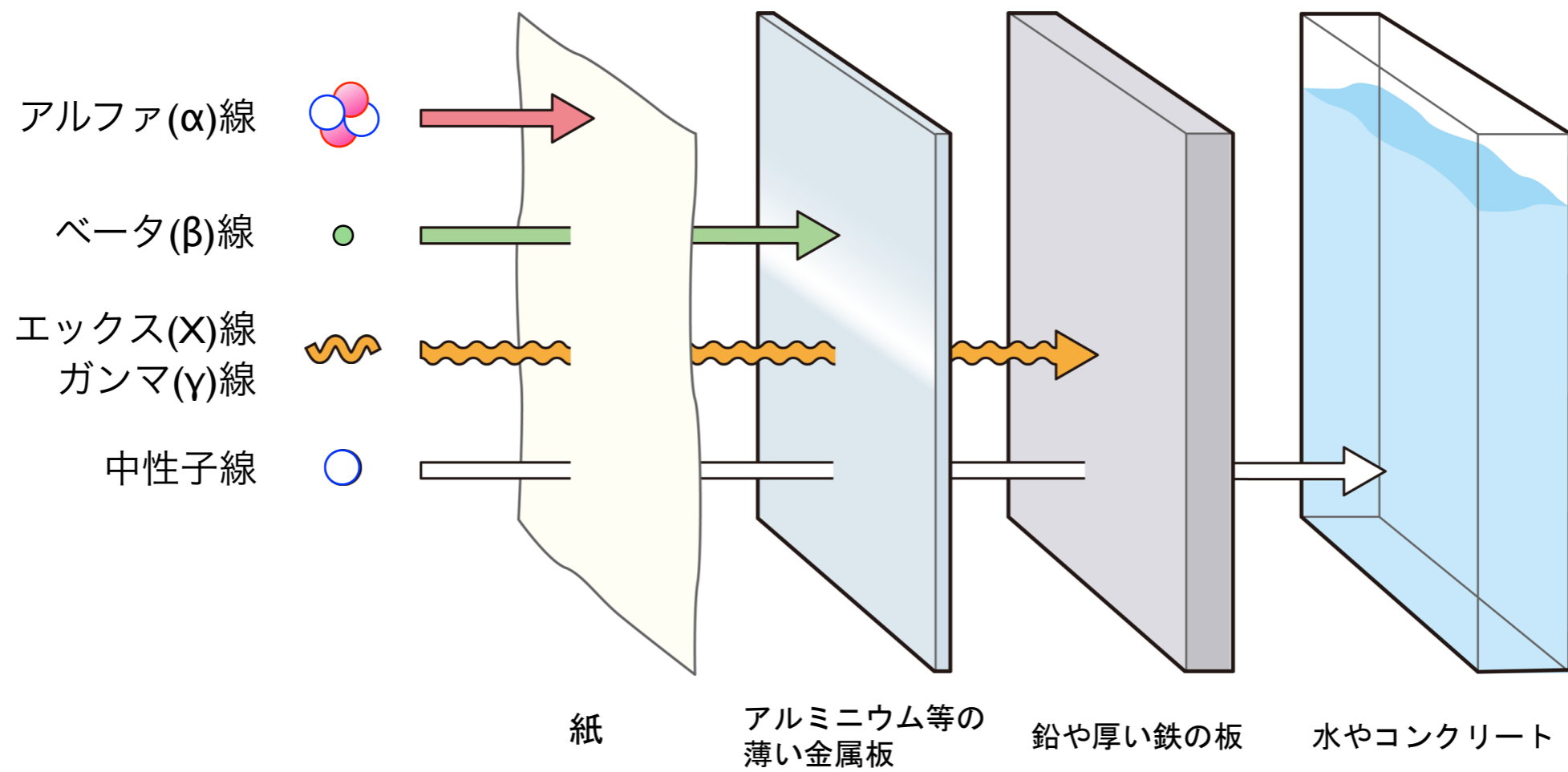
γ 線：原子核の脱励起



γ 線 (定まったエネルギー)

詳しくは第7回：
原子核物理学にて。

放射線の種類と透過力



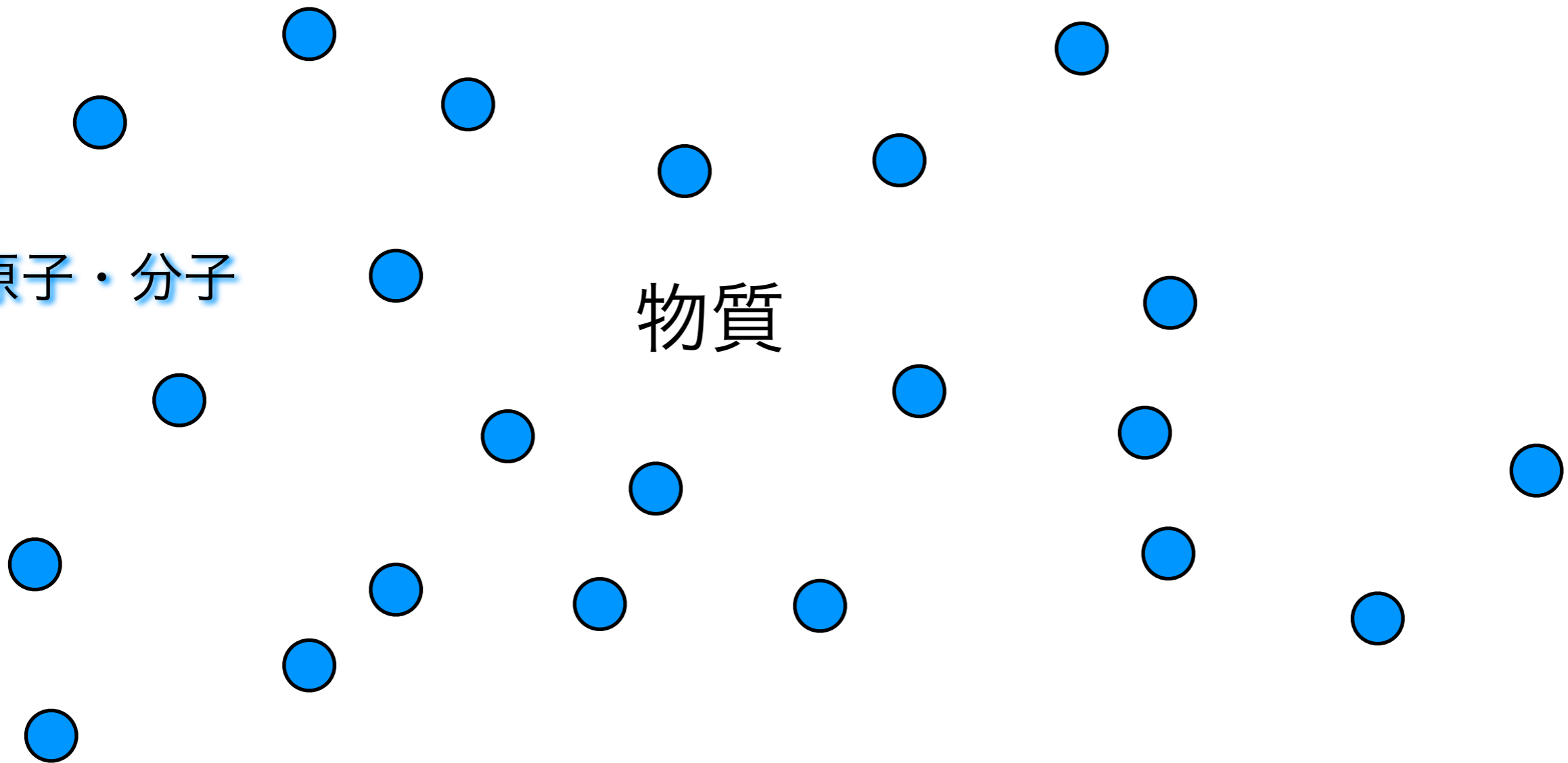
荷電粒子のエネルギー損失過程

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

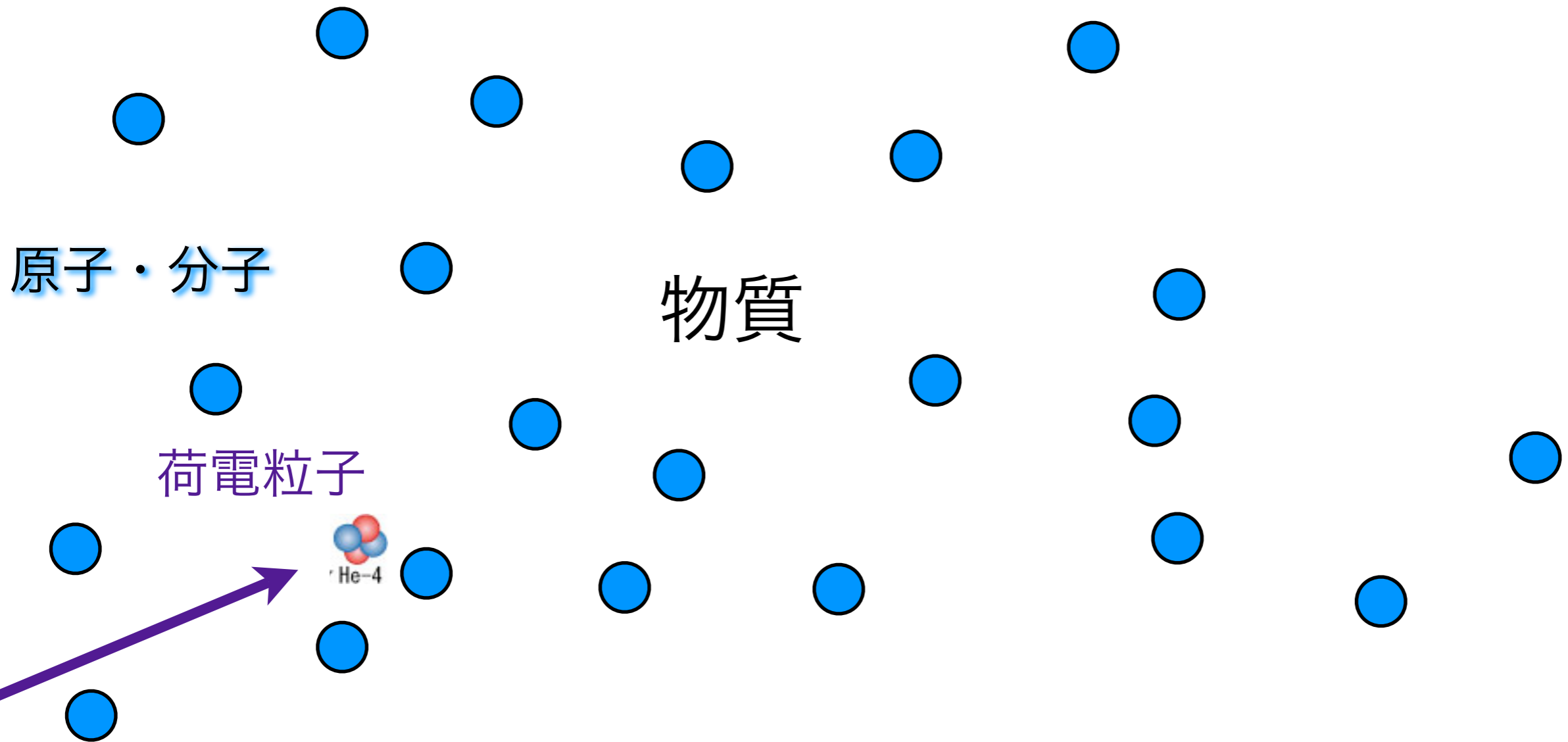
物質



荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：
クーロン力

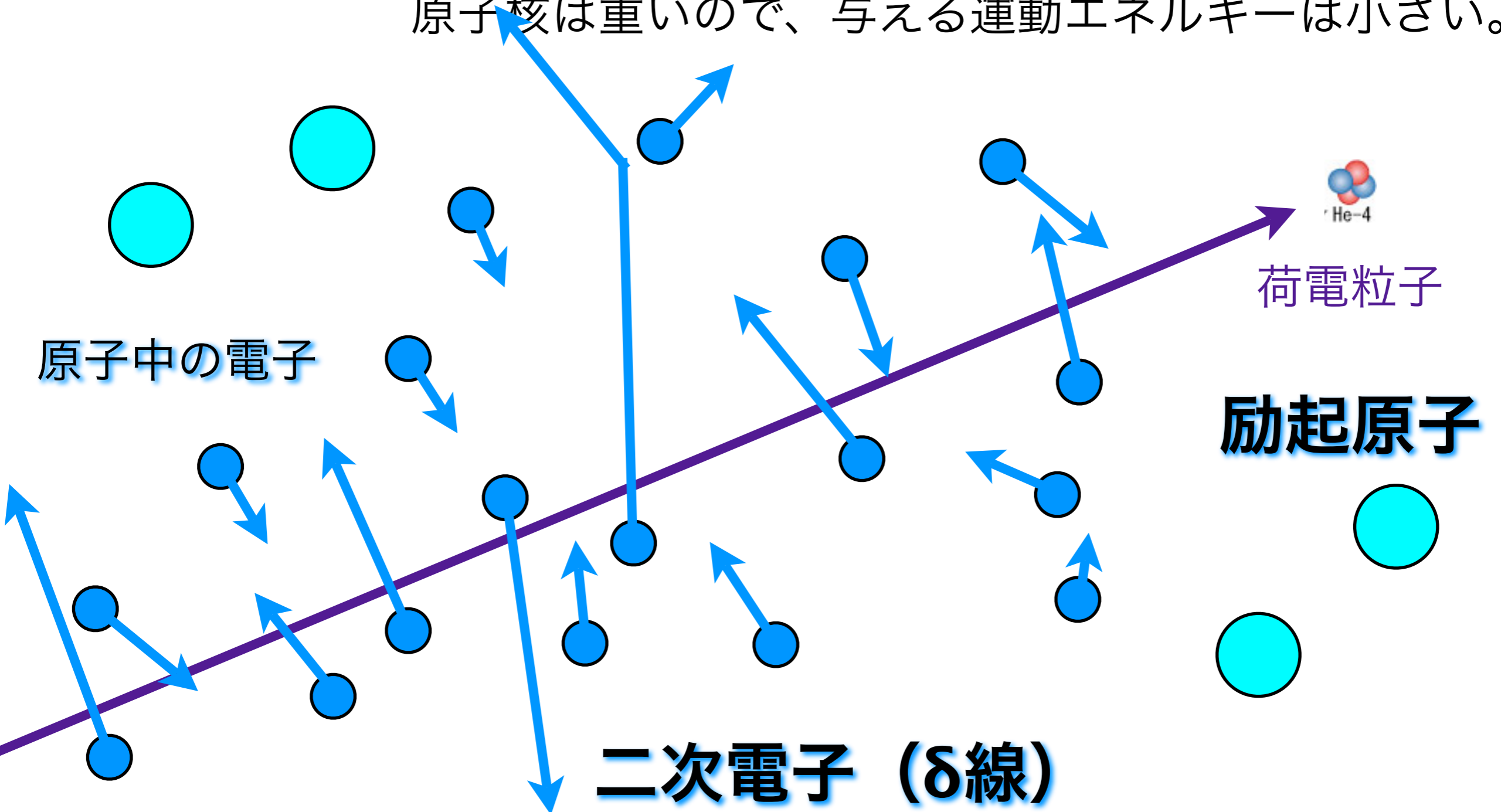
物質中の原子を電離・励起して電子に運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される（電子衝突阻止能）。
原子核は重いので、与える運動エネルギーは小さい。



荷電粒子のエネルギー損失過程

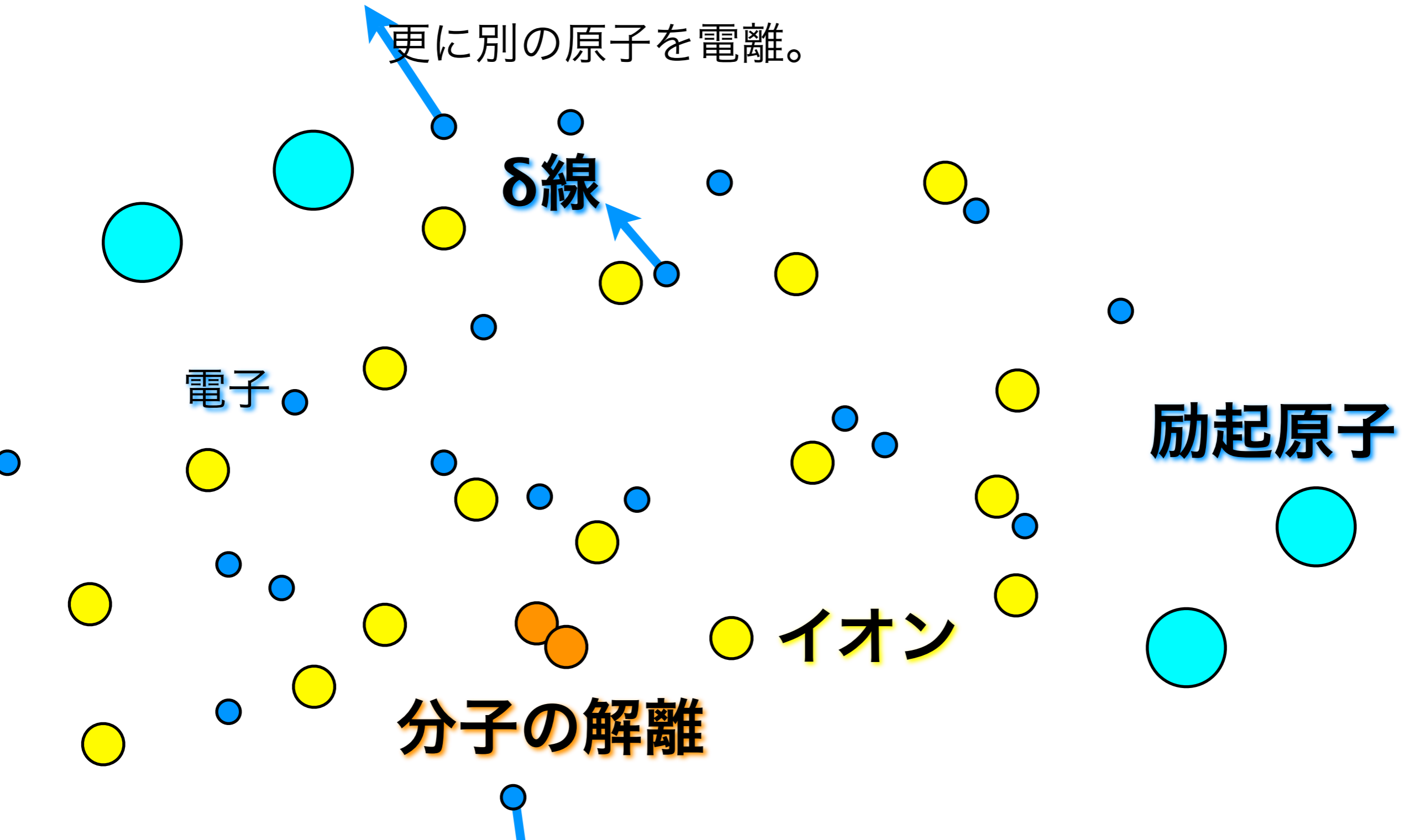
荷電粒子：
クーロン力

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。



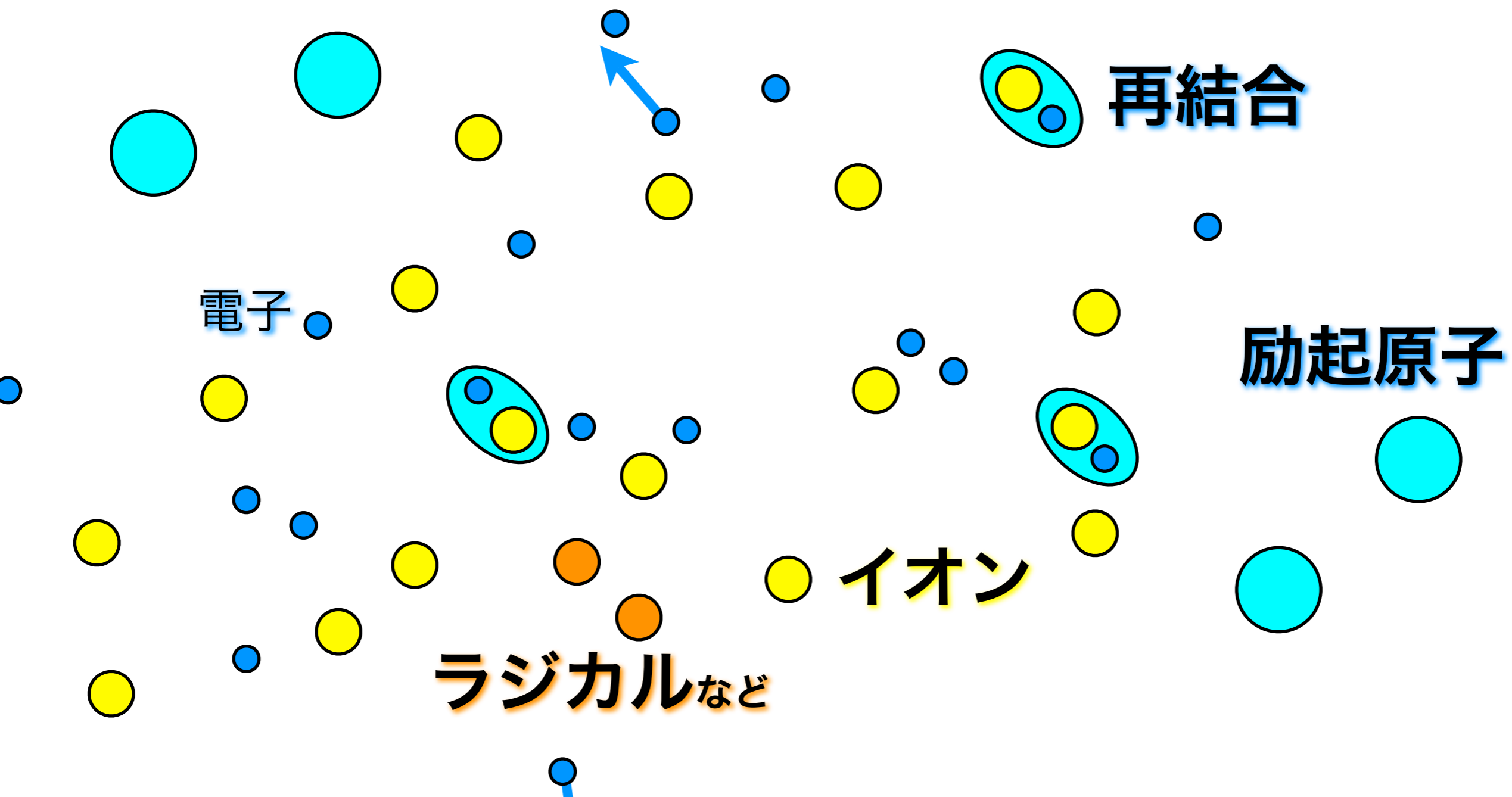
荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

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。



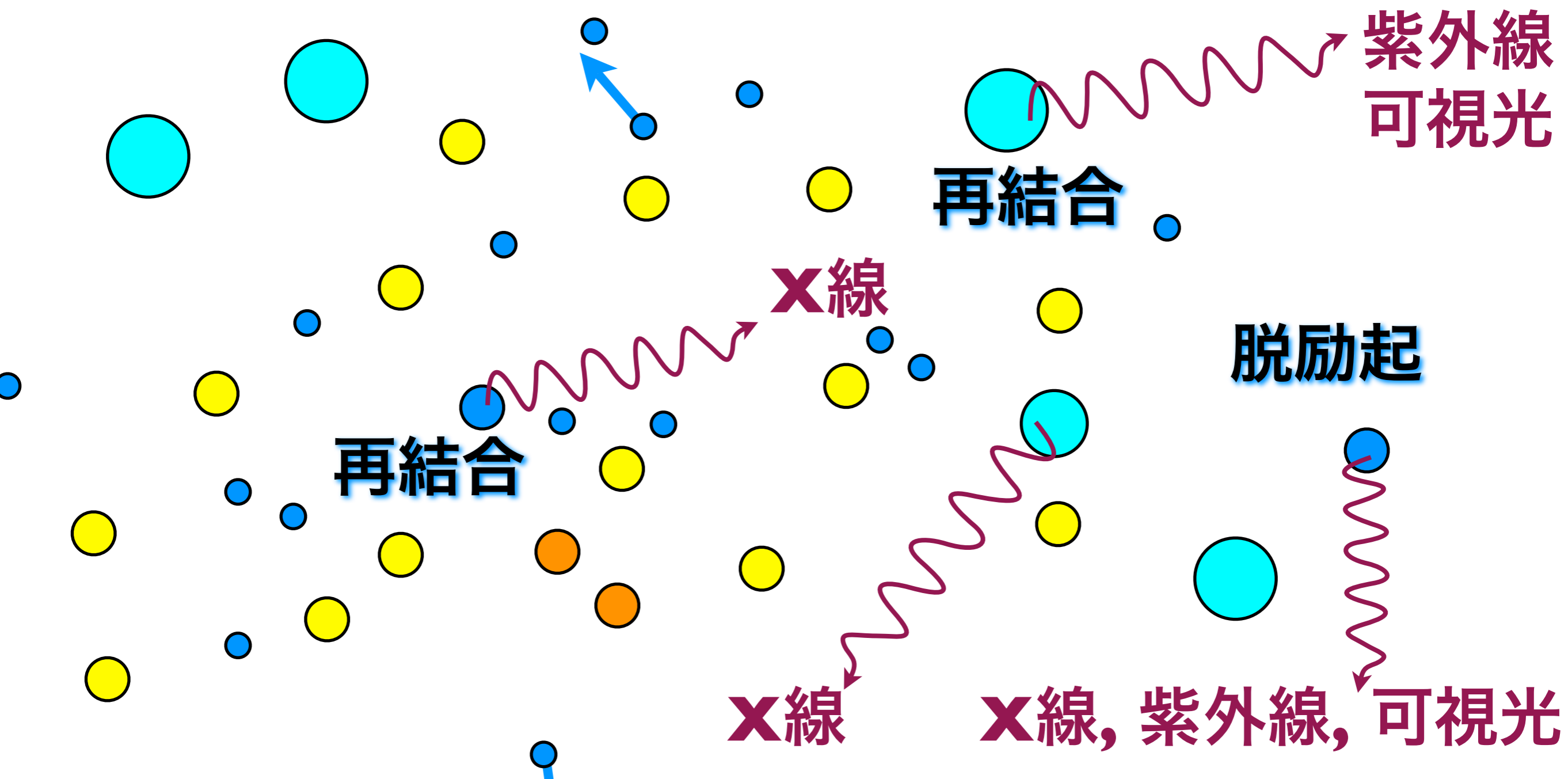
荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

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。



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。



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)

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

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

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

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 ≈ 30 eV** 程度。

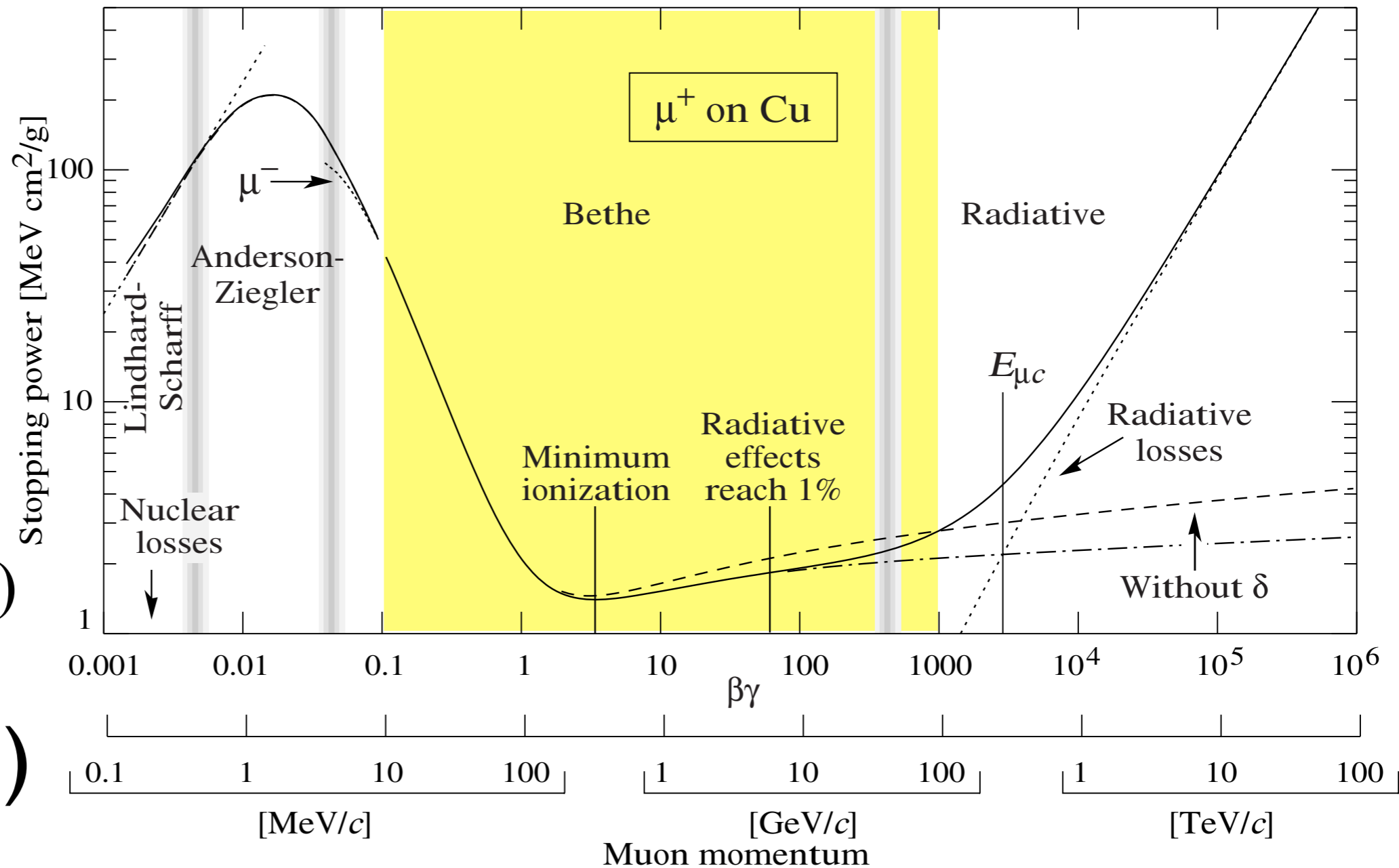
$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$
荷電粒子

阻止能

(エネルギー損失)

MeV / (g / cm²)

(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,

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

It de
inter
proj

詳しくは第9回：放射線物理学(II)にて。

and at the upper limit radiative effects begin to be important (Sec. 27.6). Both

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

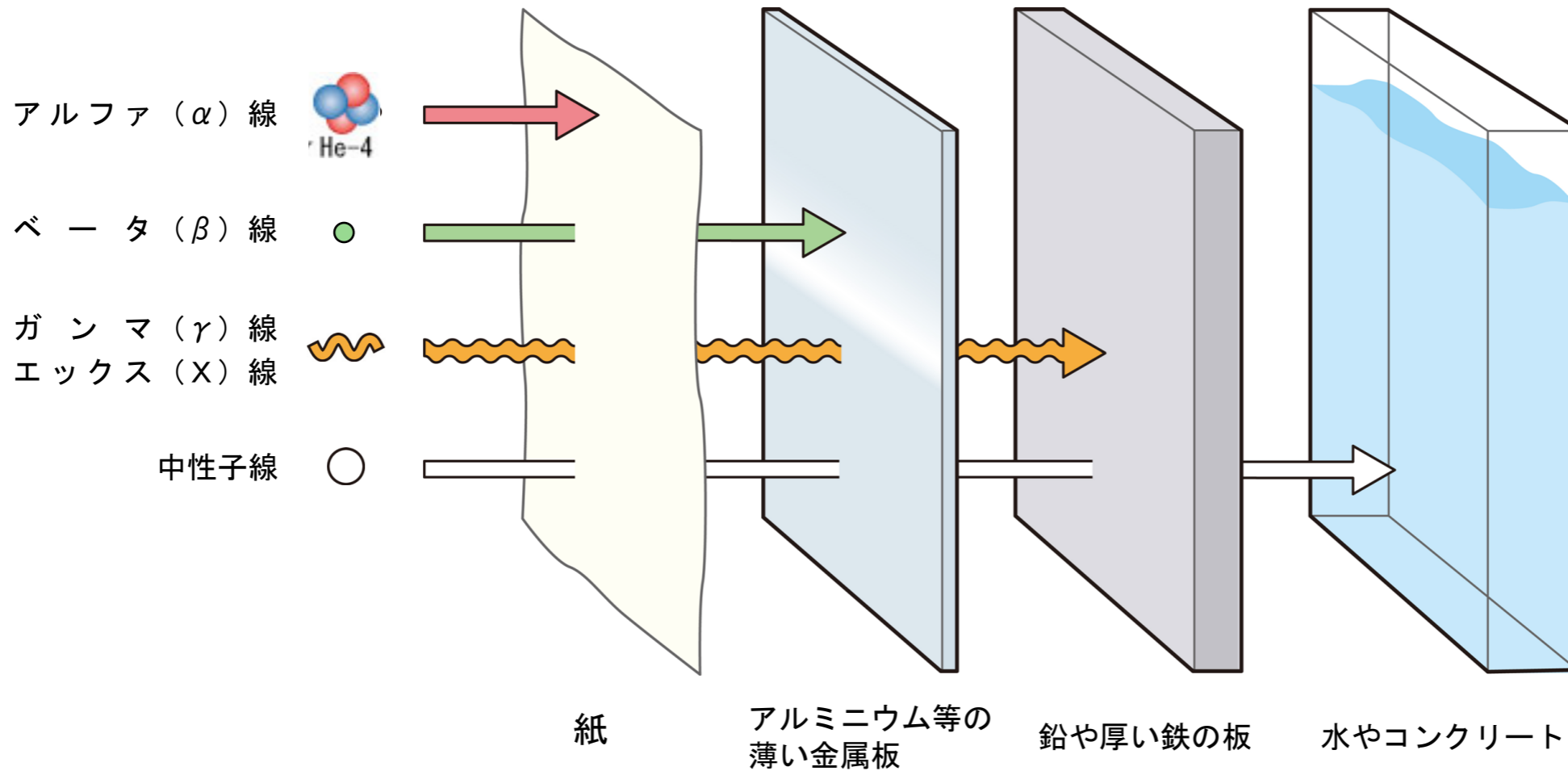
$$\begin{array}{l} \text{質量阻止能} \\ \text{MeV} / (\text{g} / \text{cm}^2) \end{array} \quad - \frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

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



質量阻止能
MeV / (g / cm²)

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

光マップ THE LIGHT MAP

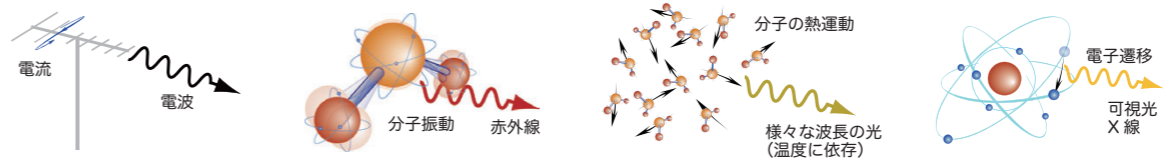
光は、自然界にいつも存在していて、あらゆる植物や生物、人類の生命と営みを支えています。太陽からの光は、地球上に温度をもたらす、植物の光合成のエネルギーとなります。蛍光灯やランプは私たちの生活を明るく照らします。レーザーは材料を加工したり、手術や治療をします。

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。

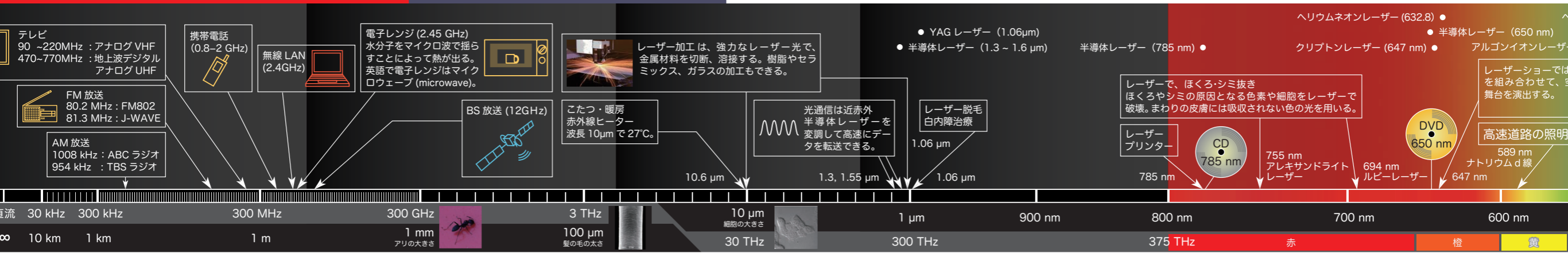


波としての光

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すことができます。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すことができます。



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)。

BS放送 (12GHz)

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

電流: 30 kHz, 300 kHz, 300 MHz, 300 GHz, 3 THz

長さ: 10 km, 1 km, 1 m, 100 μm, 30 THz

MRI (核磁気共鳴): 磁場と電波を使って体の輪切りに見せる。脳梗塞などの早期発見に有効。

ICカード: 電車に乗るのもラク。速度取締りも、レーダーの原理。

レーダー: 電波を照射して反射波を検出し、飛行機の位置を捕捉したり、降雨や降雪を観測する。ステルス戦闘機は奇抜な外形や電波吸収材料で電波の反射を抑える。

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。

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。

ハッブル宇宙望遠鏡は、近赤外光検出で63光年離れた惑星でメタンと水を見つけ、太陽系外で有機物が確認された。宇宙の他の星にも生物がいるかも？

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。

血糖値測定、果実糖度計: 糖の分子の振動エネルギーが近赤外に相当する。果実を傷つけずに糖度を簡単に測ることができる。

リサイクル識別: 様々なプラスチックの種類を近赤外領域の吸収スペクトルの違いから識別し、リサイクルする。

光CT: 脳の中の酸素濃度を断層画像として取得する。

白熱灯 (2,500°C) の黒体放射のピークは、1 μm 付近。

可視光

人間の目に見える光、外殻電子遷移エネルギー

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800nm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。

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

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。

発光ダイオードは、発光効率の高光源として、信号機、パラボラアンテナ、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。

ホタ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ますが、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。

もとの光が赤がずれて散乱する光があります。**ラマン散乱**といい、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。最先端の光科学には、**負の屈折率**の物質(逆方向に光が曲がる)を人工的につく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**といえます。

モルフォ蝶、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るのを見て、太陽からの光の圧力のせいだと考えました。ステーブン・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。

「波」として伝わります。粗密波（縦波）の音波とは異なり、光は進行方向と直交する方向に電場と磁場が交流して振動する電磁波です。単位は Hz)、波長は1回振動する間に真空中を進む距離(単位は m)が一秒間に進む距離、つまり速度を表します。真空中の光の速度は、

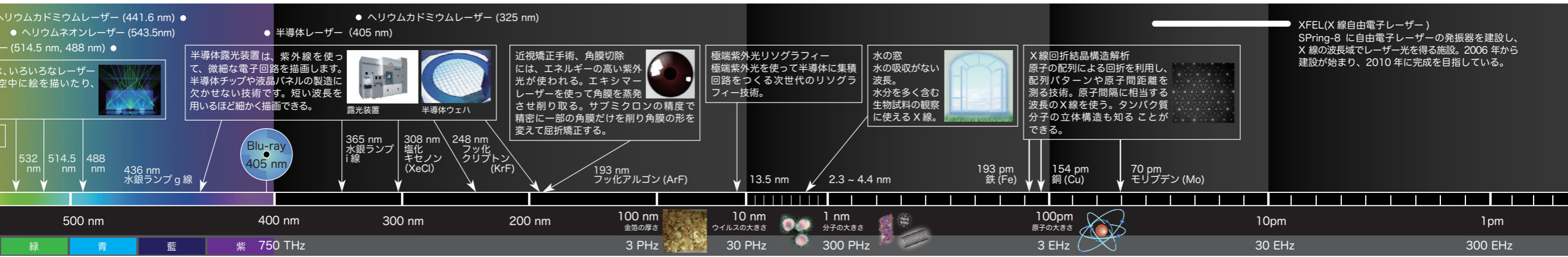
が非常に弱くなってくると、光が粒々であることが見えてきます。を光子(フォトン)といいます。光は光子の粒々がたくさん集まってが「電子」の流れの集まりで、水が「水分子」の集まりなように。度で決まります。光子一つ一つは、光の色、つまり波長(あるいは)を持っていて、

光に関連するノーベル賞

- 1901年 X線の発見 (W. レントゲン)
- 1907年 干渉計の考案と分光学的研究 (A. マイケルソン)
- 1908年 光の干渉を利用した天然色写真 (G. リップマン)
- 1909年 無線通信 (G. マルコーニ、C. F. ブラウン)
- 1914年 結晶によるX線回折 (M. フォン・ラウエ)
- 1915年 X線結晶解析 (W. H. ブラッグ、W. L. ブラッグ)
- 1918年 エネルギー量子説 (M. K. E. L. プランク)
- 1921年 光電効果の法則の発見 (A. アインシュタイン)
- 1923年 光電効果の研究 (R. A. ミリカン)
- 1924年 X線分光学 (K. M. G. シーグバーン)
- 1927年 コンプトン効果の発見 (A. H. コンプトン)
- 1930年 ラマン効果の発見 (C. V. ラマン)
- 1932年 量子力学の創始 (W. K. ハイゼンベルグ)
- 1936年 X線、電子線回折による分子構造の研究 (P. J. W. デバイ) (化学賞)
- 1953年 位相差顕微鏡の発明 (F. ツェルニケ)
- 1954年 波動関数の統計的解釈の提唱 (M. ボルン)
- 1954年 原子核反応とγ線に関する研究 (W. ボーテ)
- 1958年 チェレンコフ効果の発見 (P. A. チェレンコフ、I. M. フランク、I. E. タム)

- 1961年 γ線の共鳴吸収とメスバウアー効果の発見 (R. L. メスバウアー)
- 1964年 メーザー、レーザーの発明 (C. H. タウンズ、N. G. バソフ、A. M. プロホロフ)
- 1964年 X線回折法による生物物質の分子構造の研究 (D. M. ホジキン) (化学賞)
- 1965年 量子電磁力学 (朝永振一郎、J. シュウィンガー、R. P. ファインマン)
- 1966年 光ポンピング法による原子の励起 (A. カスレ)
- 1971年 ホログラフィーの発明 (D. ガボア)
- 1974年 電波天文学における先駆的研究 (M. ライル)
- 1979年 X線CT(G. N. ハウンズフィールド、A. M. コーマック) (生物・医学賞)
- 1981年 レーザー分光学 (N. ブルームバークン、A. L. ショーロー)
- 1981年 高分解能光電子分光法 (K. M. シーグバーン)

- 1997年 レーザークーリング法の開発 (S. チュー、C. コーエンタヌージ、W. D. フィリップス)
- 1999年 フェルト秒化学 (A. H. ズウェイル) (化学賞)
- 2000年 高速/光電子技術のための半導体ヘテロ構造の開発 (Z. I. アルフォーロフ、H. クレーマー)
- 2002年 宇宙ニュートリノ検出 (R. デービス Jr., 小柴昌俊)
- 2002年 タンパクのレーザーイオン化法 (J. B. フェン、田中耕一) (化学賞)
- 2003年 核磁気共鳴画像化法 (P. ラウターバー、P. マンスフィールド) (生物・医学賞)
- 2005年 光コヒーレンスの量子理論 (R. J. グラウパー)
- 2005年 光周波数コム技術などレーザー精密分光法の開発 (J. L. ホール、T. W. ハンシュ)



紫外線 500 nm 青 400 nm 藍 300 nm 紫 200 nm 750 THz

紫外光

目に見えない光、外殻電子遷移エネルギー

光学顕微鏡は微小な物体を拡大して観察できる。物体の反射率や光吸収、蛍光発光の分布をもとに観察像をつくる。分子の振動や偏光特性を観察する顕微鏡もある。紫外から近赤外の広い波長範囲の光が使われる。

昆虫の可視域 ミツバチの可視域は紫外から黄色の光まで。人間には見えない花の様相が見える。

ブラックランプの発する紫外線は目に見えないが、周りの物質を発光させる。

地球上の生物に害のある紫外線を遮ってくれる。

光触媒は、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

SPring-8 兵庫県佐用郡にある大型の放射光施設。X線から赤外線まで広い波長範囲で世界最高輝度の光をつくる。周長 1.4 km の蓄積リングと呼ばれる軌道に電子を閉じ込め、光速近くまで加速した電子からのシンクロトロン放射でX線を得る。

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のまま観察できる。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。

ウォルター鏡

ゾーンプレートでX線を回折して集光する方法もある。

フレネルゾーンプレート

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 からだが見え隠れする。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線天文衛星すざく 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。

光は横波

水面や金属の表面、照葉樹の葉の表面で反射すると、電場が反射面に垂直な方向に揺れている光がよく反射され、光の揺れる方向に偏りが生じます。これを偏光といいます。

偏光フィルターは、特定の方向に揺れる光だけをカットします。偏光メガネやカメラのフィルターに使われます。テレビやパソコンの液晶ディスプレイは偏光を利用した表示装置です。電圧で液晶分子の向きをそらす、光の透過を偏光制御します。

偏光メガネは右目と左目に違う映像が入る

液晶ディスプレイは偏光を利用して画像を表示

光の速度は

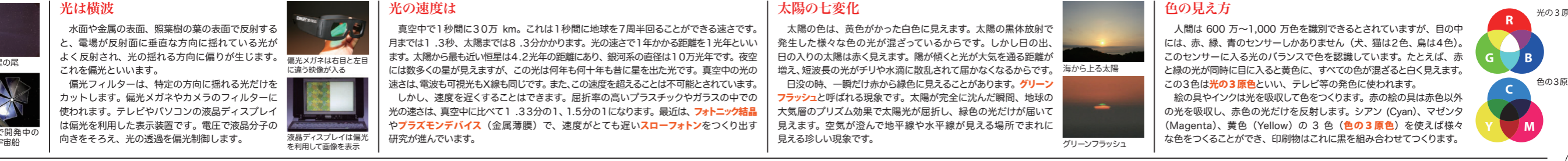
真空中で1秒間に30万 km。これは1秒間に地球を7周半回ることができる速さです。月までは1.3秒、太陽までは8.3分かかります。光の速さで1年かかる距離を1光年といいます。太陽から最も近い恒星は4.2光年の距離にあり、銀河系の直径は10光年です。夜空には数多くの星が見えますが、この光は何年も何十年も昔に星を出た光です。真空中の光の速さは、電波も可視光もX線も同じです。また、この速度を超えることは不可能とされています。しかし、速度を遅くすることはできます。屈折率の高いプラスチックやガラスの中での光の速さは、真空中に比べて1.33分の1、1.5分の1になります。最近、**フォトリソグラフィ** や**プラズマディスプレイ** (金属薄膜) で、速度がとても遅い**スローフォトン**をつくり出す研究が進んでいます。

太陽の七変化

太陽の色は、黄色がかかった白色に見えます。太陽の黒体放射で発生した様々な色の光が混ざっているからです。しかし日の出、日の入りの太陽は赤く見えます。陽が傾くと光が大気を通る距離が増え、短波長の光がチリや水滴に散乱されて届かなくなるからです。日没の時、一瞬だけ赤から緑色に見えることがあります。**グリーンフラッシュ**と呼ばれる現象です。太陽が完全に沈んだ瞬間、地球の大気層のプリズム効果で太陽光が屈折し、緑色の光だけが届いて見えます。空気が澄んで地平線や水平線が見える場所にまれに見られる珍しい現象です。

色の見え方

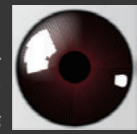
人間は600万~1,000万色を識別できるとされていますが、目の中には、赤、緑、青のセンサーしかありません(犬、猫は2色、鳥は4色)。このセンサーに入る光のバランスで色を認識しています。たとえば、赤と緑の光が同時に目に入ると黄色に、すべての色が混ざると白く見えます。この3色は**光の3原色**といい、テレビ等の発色に使われます。絵の具やインクは光を吸収して色をつくり、赤の絵の具は赤色以外の光を吸収し、赤色の光だけを反射します。シアン(Cyan)、マゼンタ(Magenta)、黄色(Yellow)の3色**(色の3原色)**を使えば様々な色をつくることができ、印刷物はこれに黒を組み合わせることができます。



一家に1枚 光マップ <http://stw.mext.go.jp/>

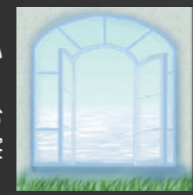
325 nm)

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。

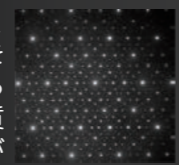


極端紫外光リソグラフィー 極端紫外光を使って半導体に集積回路をつくる次世代のリソグラフィー技術。

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、質に紫外線を使う。

紫外線殺菌 水、食品、薬品などを殺菌する。

オゾン層 紫外線 可視光

酸化チタン 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。

SPring-8 兵庫県佐用郡にある大型の放射光施設。X線から赤外線まで広い波長範囲で世界最高輝度の光をつくる。周長1.4kmの蓄積リングと呼ばれる軌道に電子を閉じ込め、光速近くまで加速した電子からのシンクロトロン放射でX線を得る。

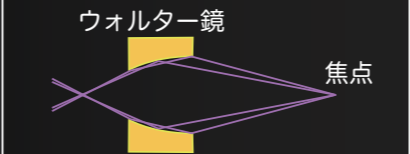
軟X線 (極短紫外を含む)

内殻電子遷移エネルギー、水に吸収されない

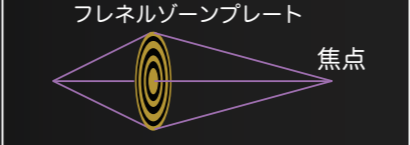
レーザープラズマ光源 高出力のレーザー光をターゲットに当てて発生するプラズマから軟X線を出す。未来の半導体製造光源。

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。

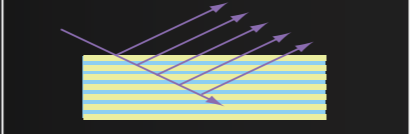
X線のレンズ 軟X線やX線の領域では、ガラスも金属も屈折率がほぼ1.0で、反射も屈折もしない。浅い角度の反射でX線の進行方向を変えて集光する。



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。

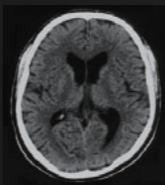
X線

内殻電子遷移エネルギー

レントゲン写真 からだが透けて見える。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。



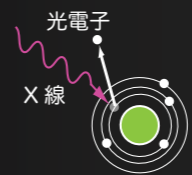
X線CT (コンピュータ断層撮影) 様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。



X線天文衛星すざく 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。



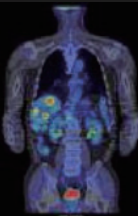
XPS(X線光電子分光) X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。



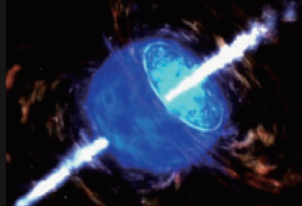
γ線

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。



光子

紫外線

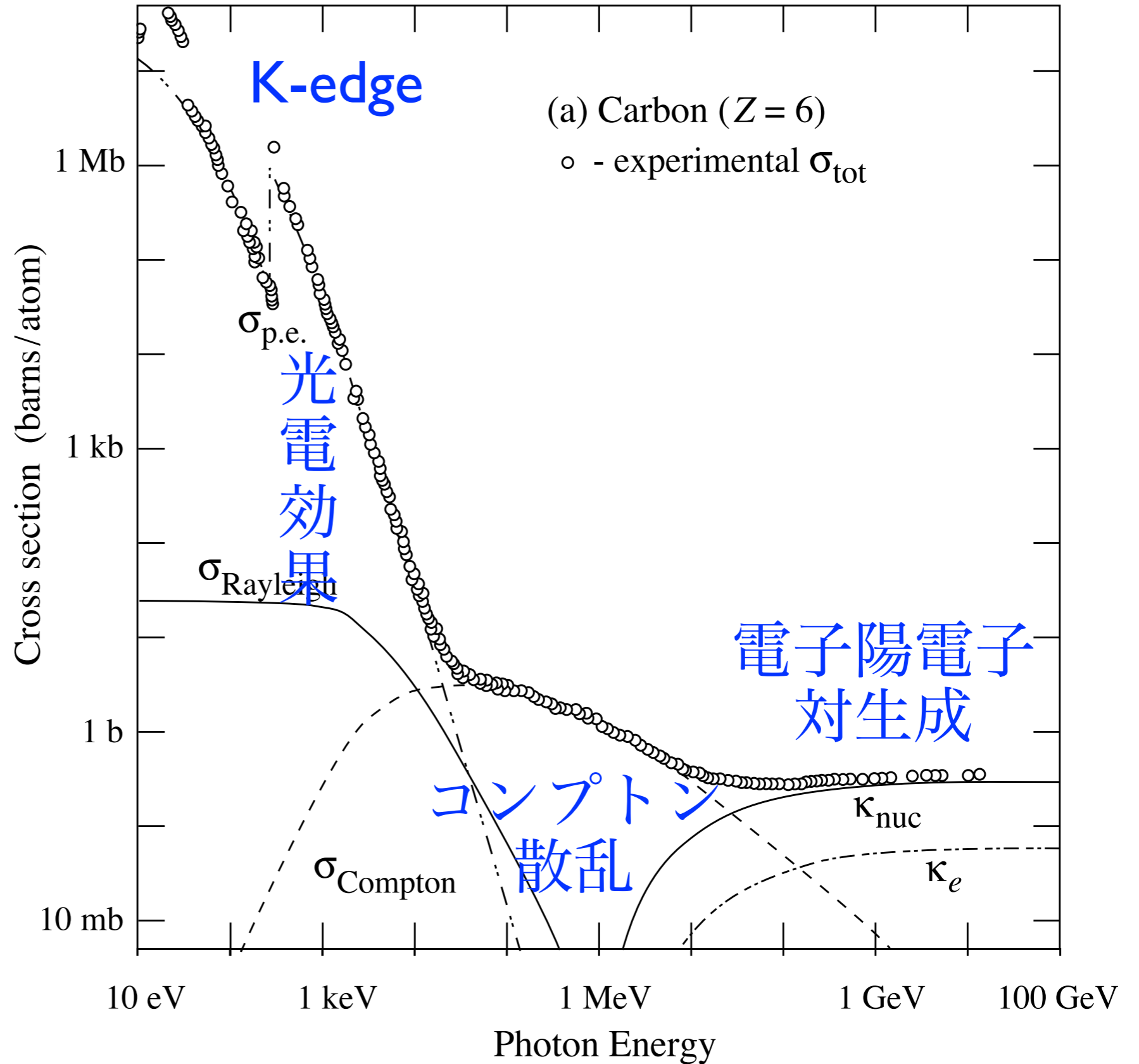
X線

γ線

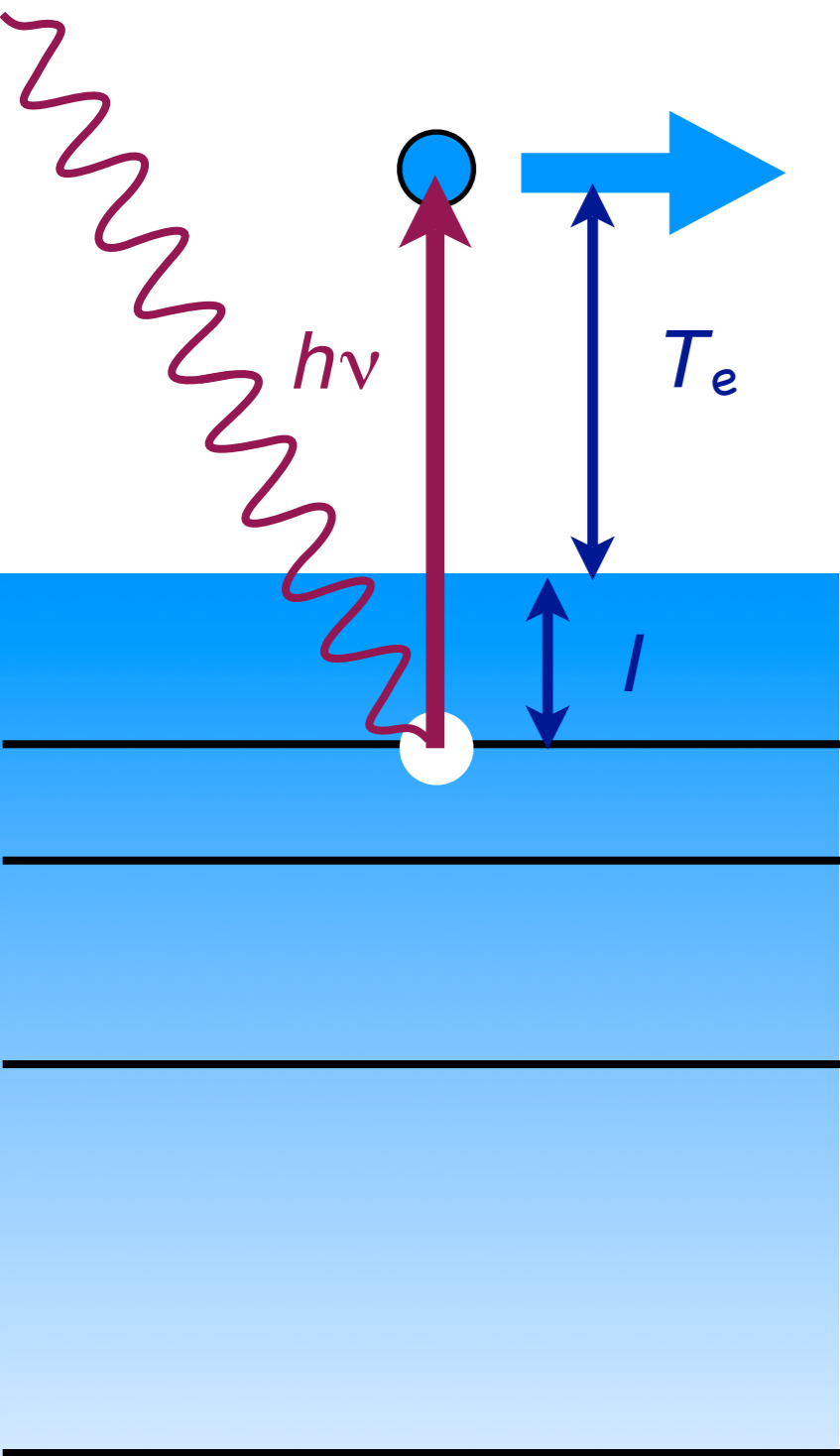
線

反応断面積

1 barn
= 10^{-28} m^2
= 100 fm^2



光電効果



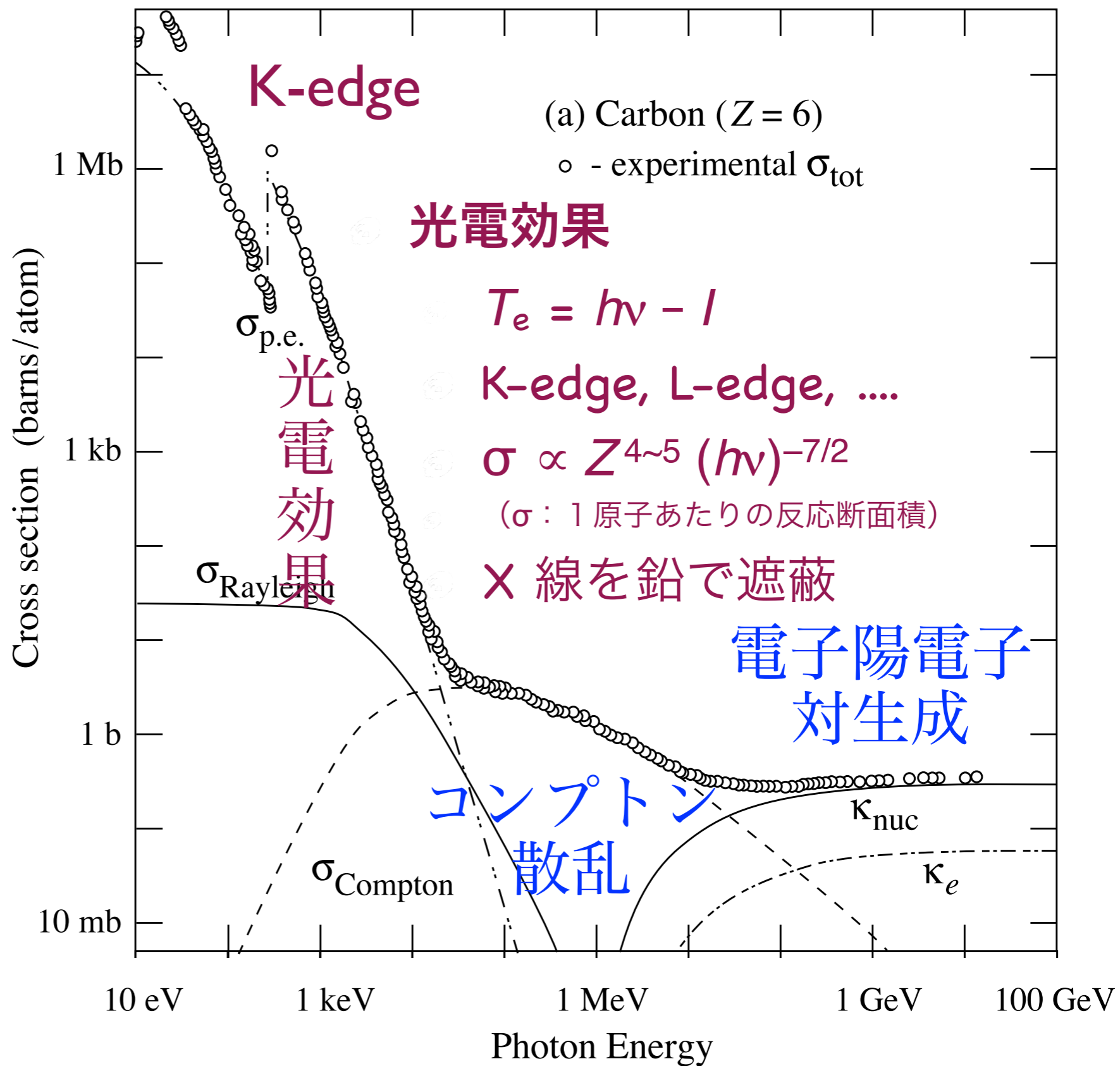
紫外線

X 線

線

γ 線

線



コンプトン散乱

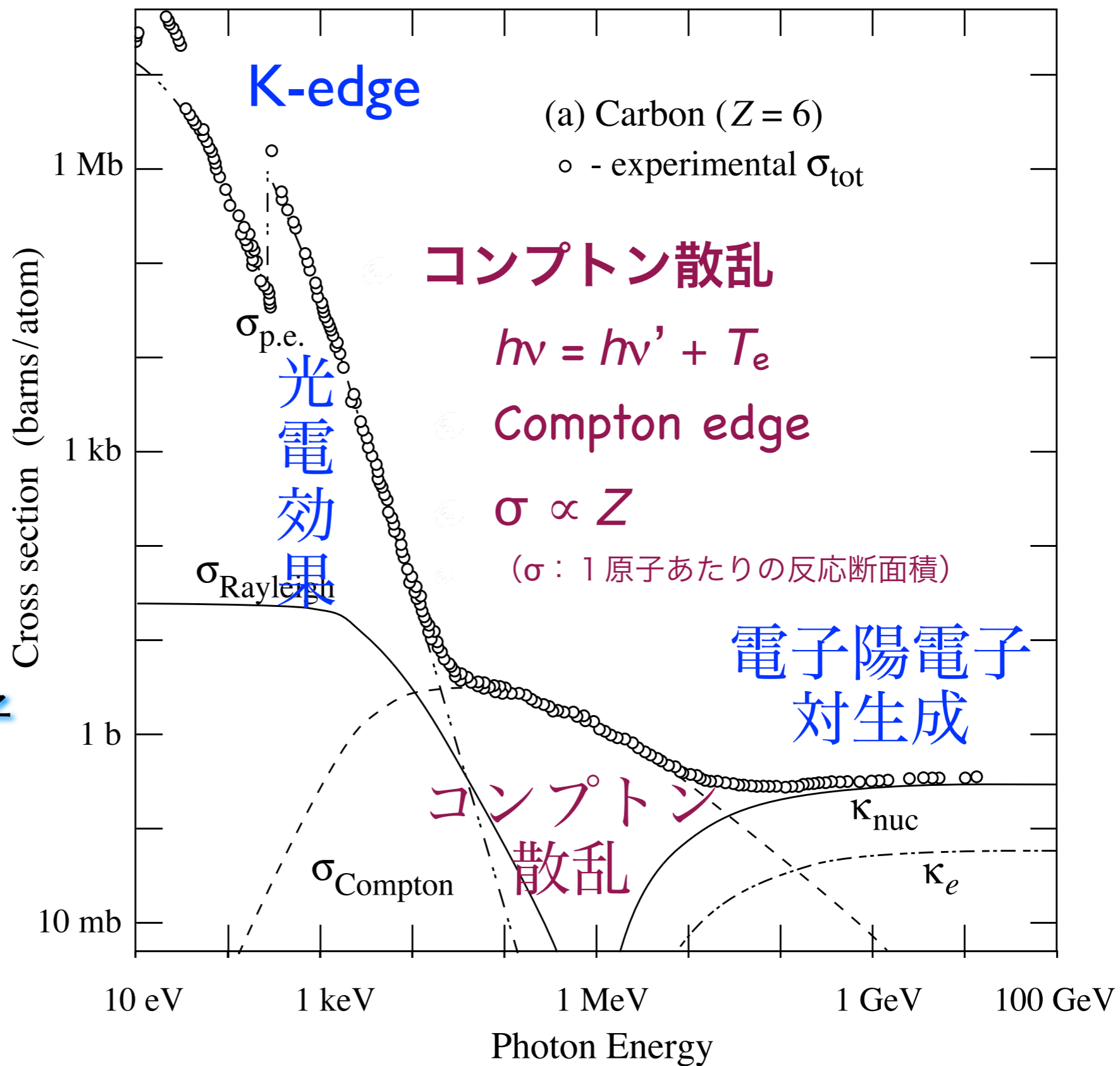
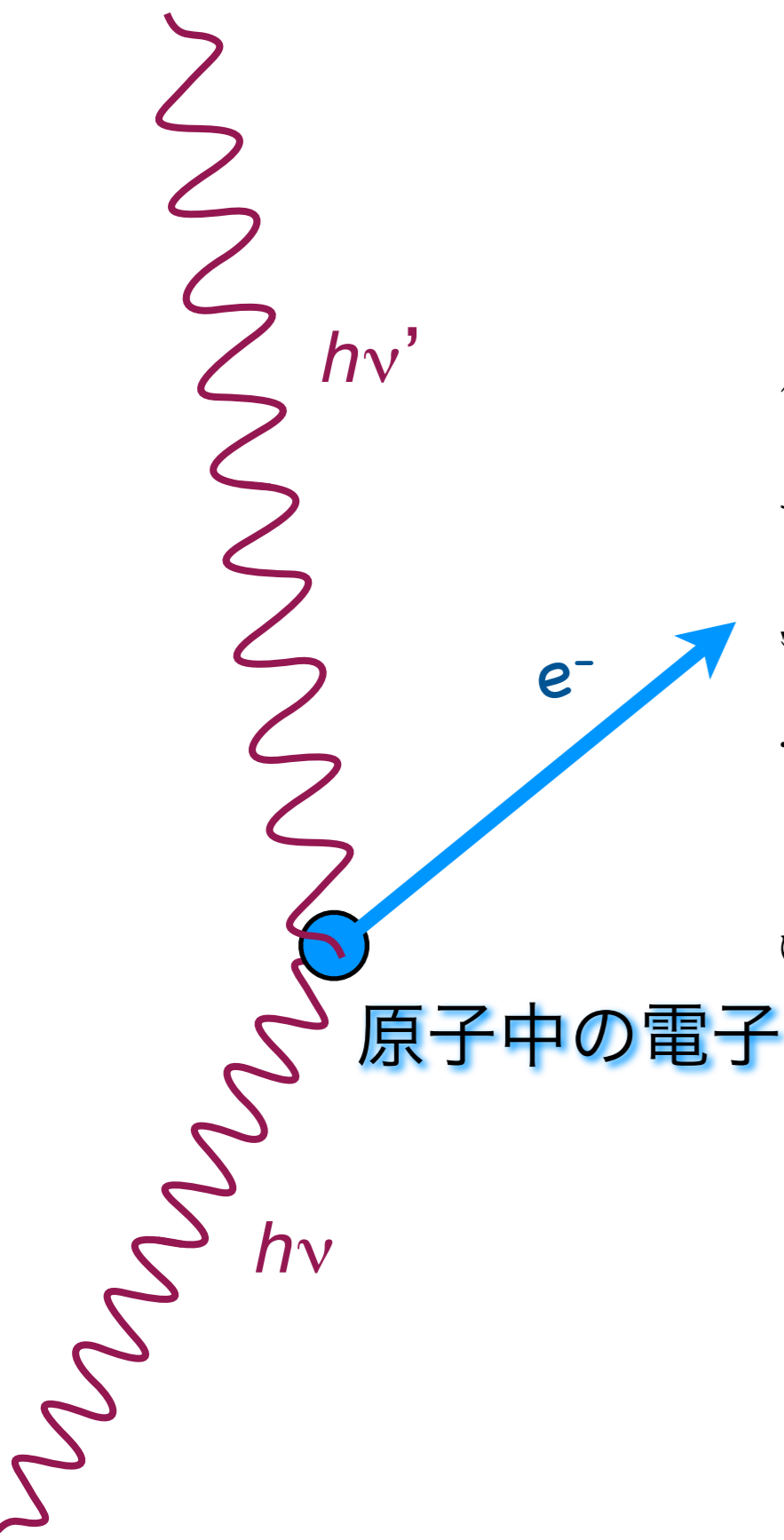
紫外線

X線

線

γ線

線



電子対生成

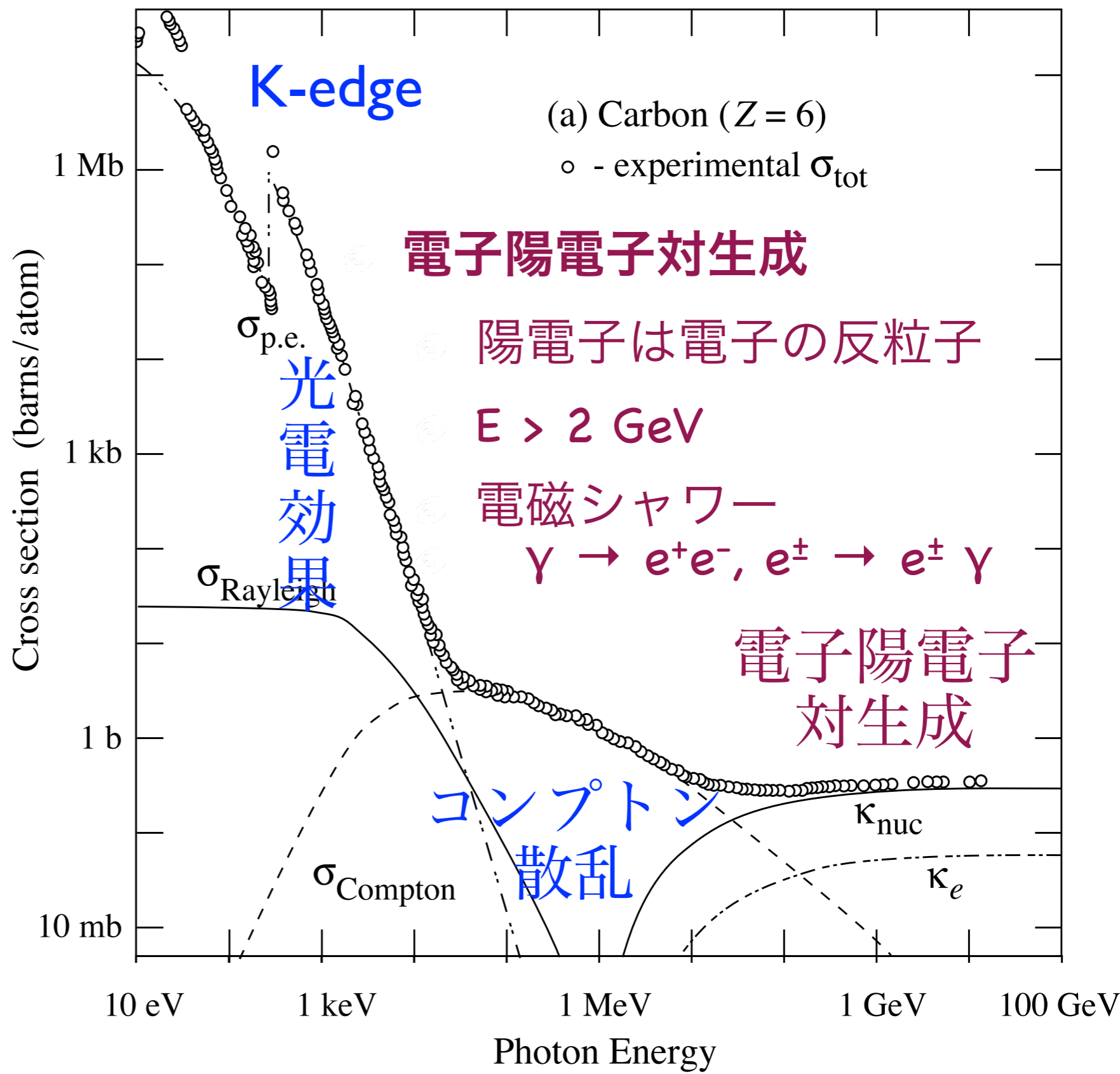
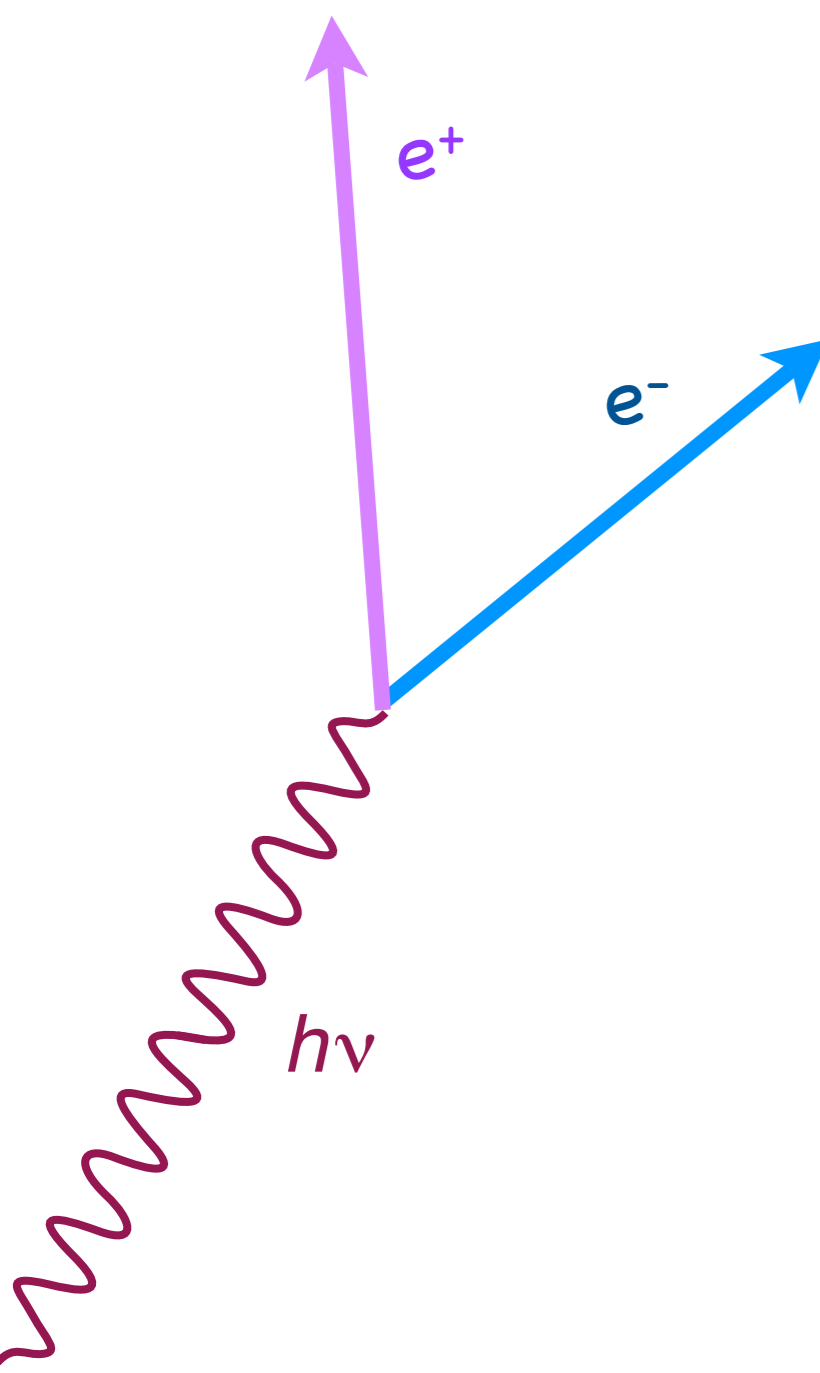
紫外線

X線

線

γ

線



制動放射 (Bremsstrahlung)

紫外線

X線

線

γ線

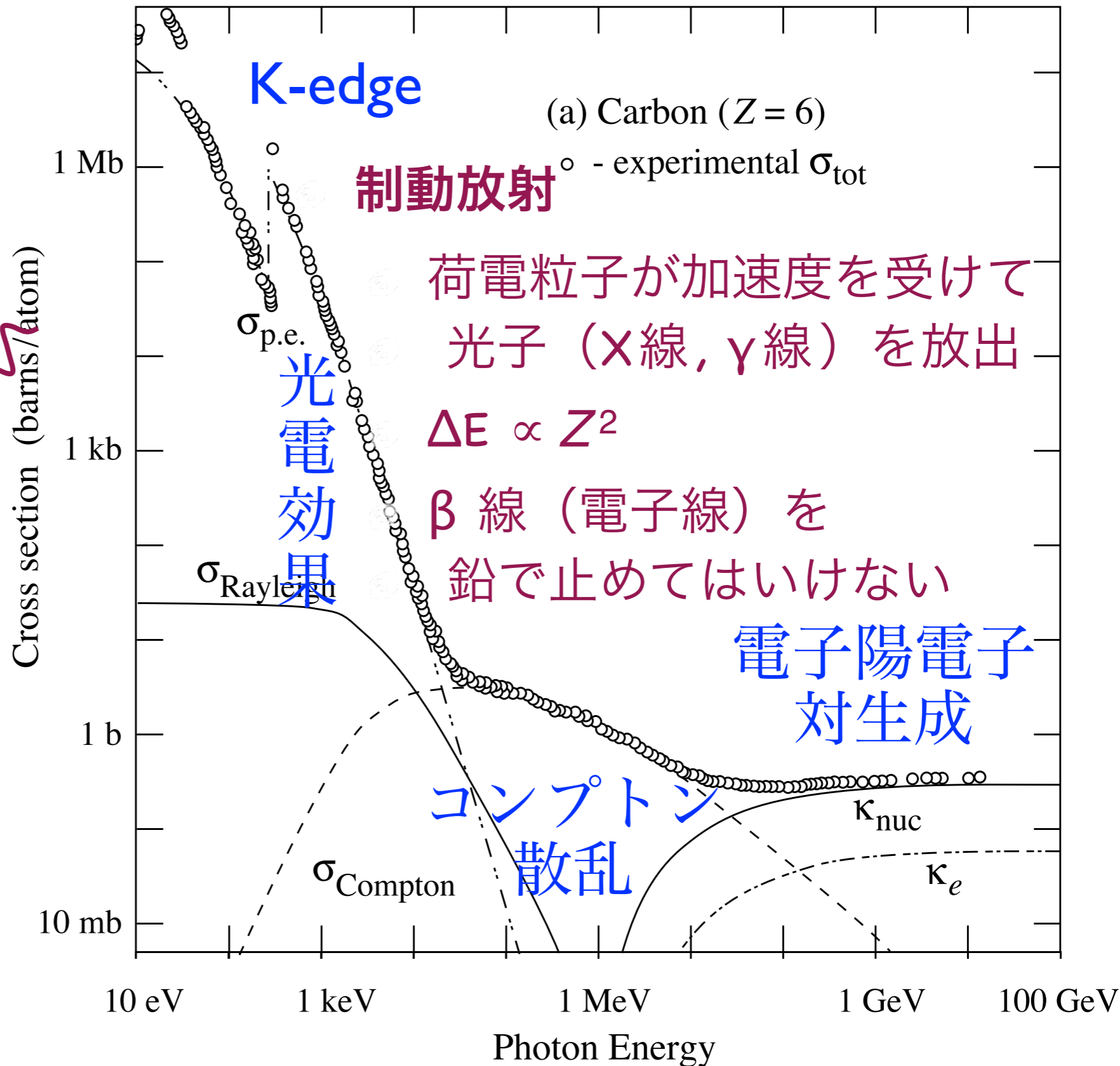
線

荷電粒子



原子核

荷電粒子



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

電子線

X線

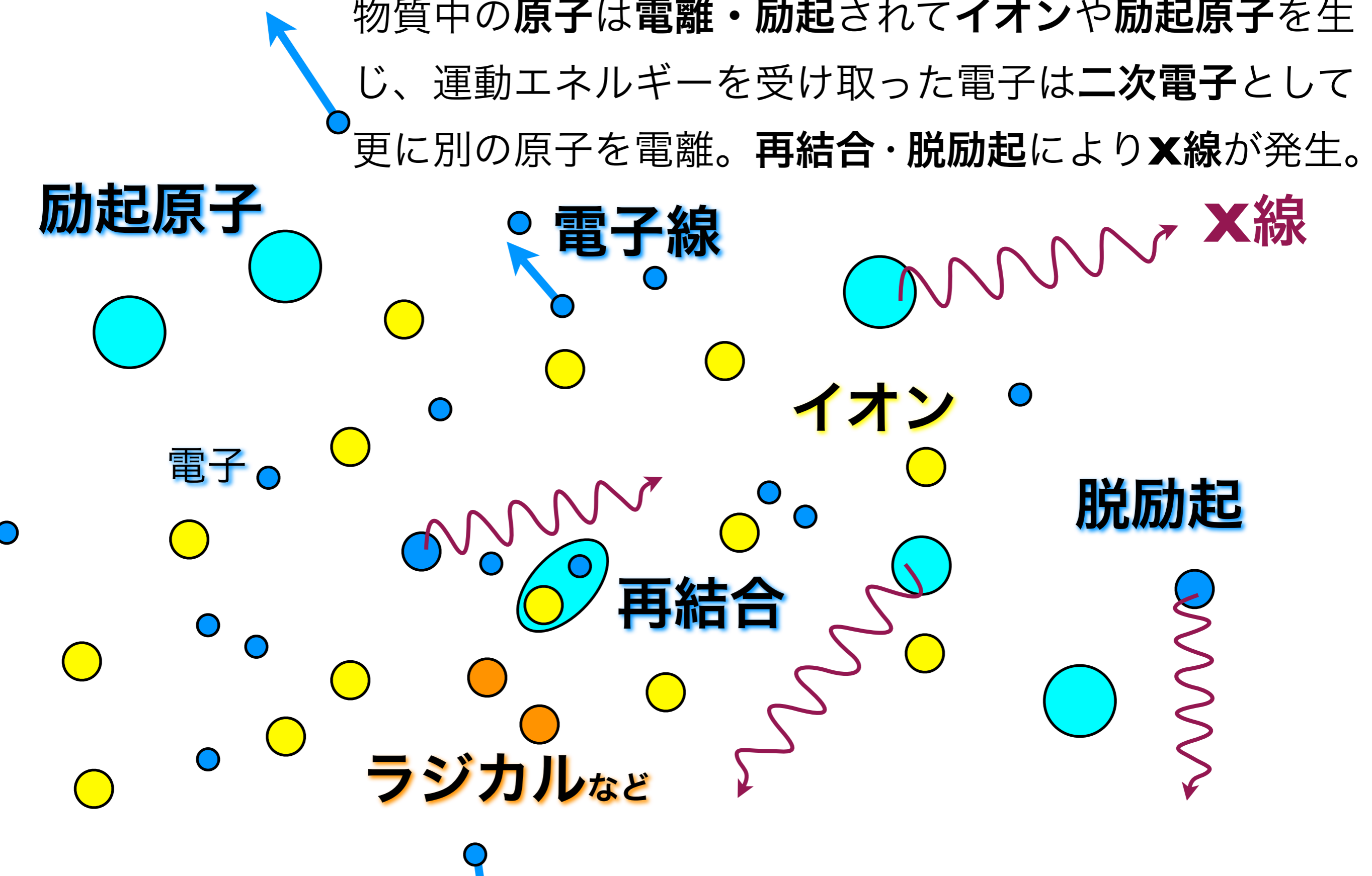
イオン

電子

脱励起

再結合

ラジカルなど

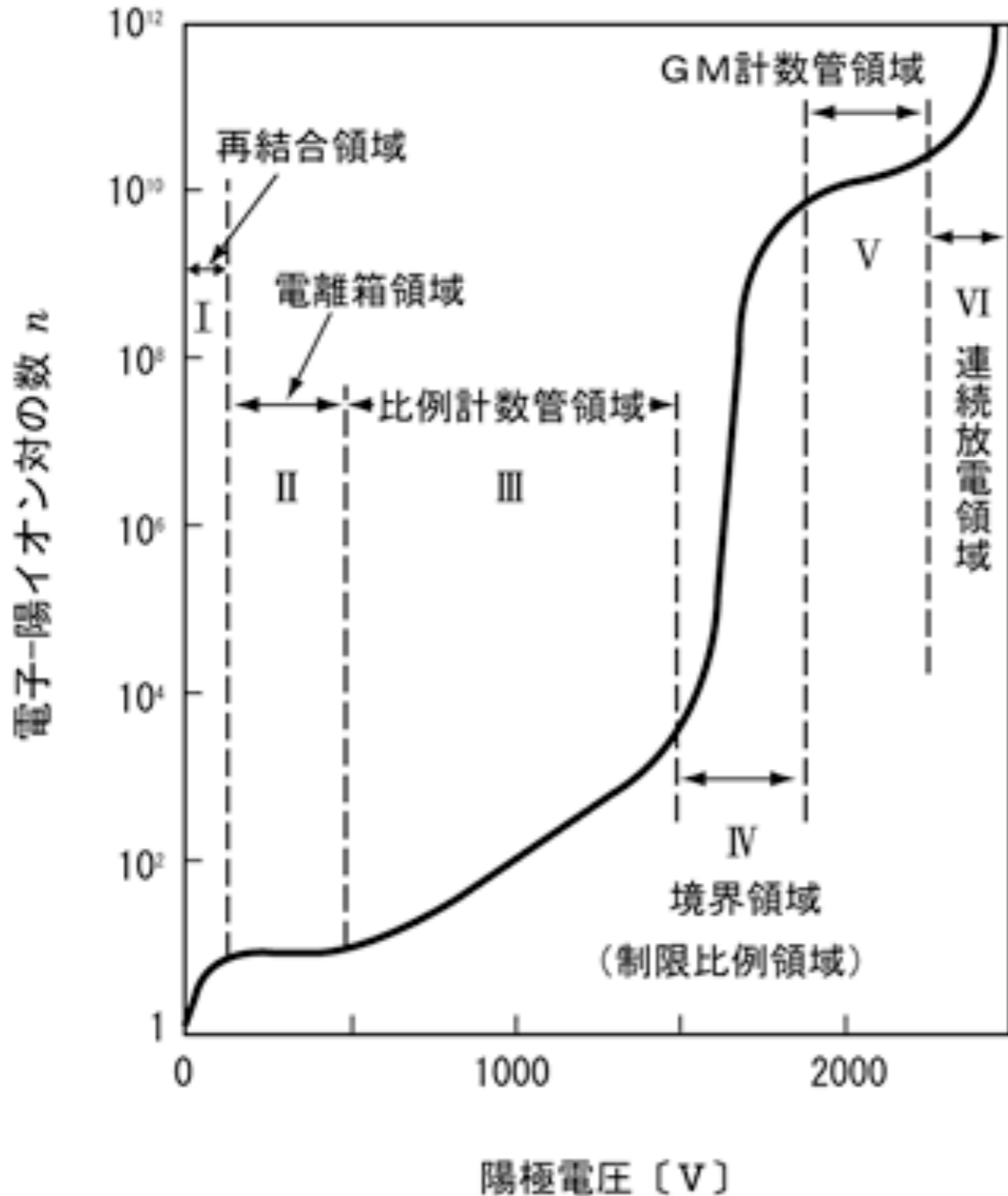


放射線計測学

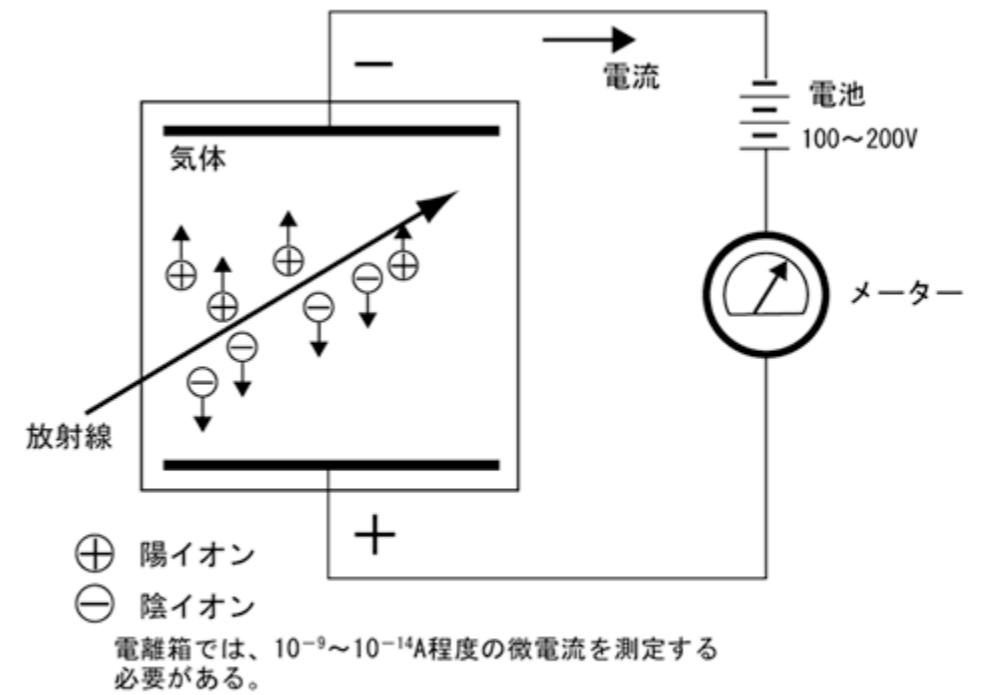
気体の電離を利用する放射線計測

電離箱, 比例計数管, GM管

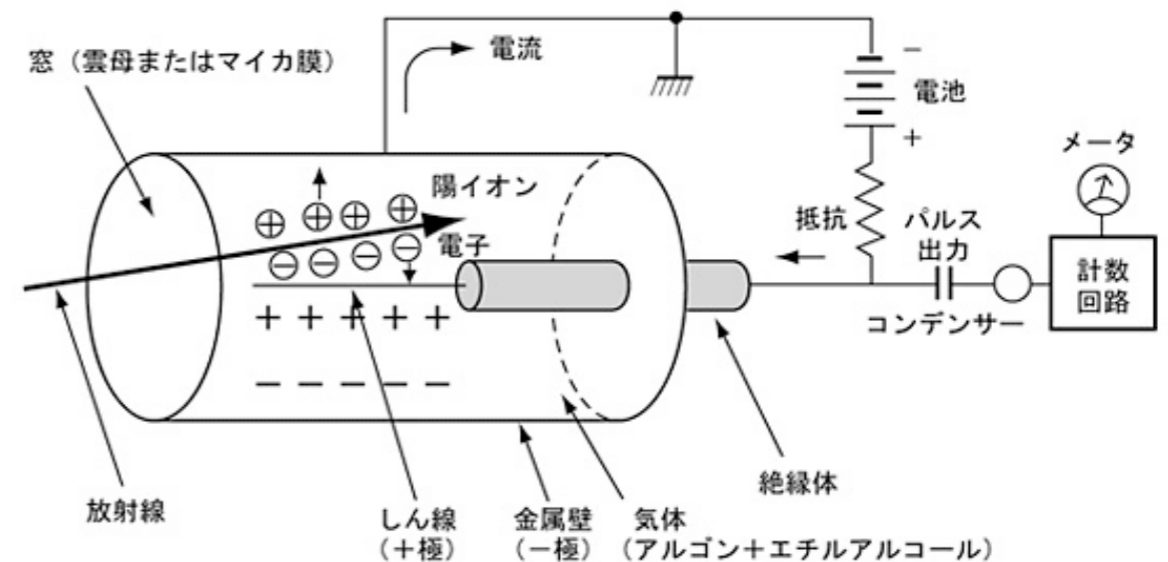
(ガイガー・ミュラー管)



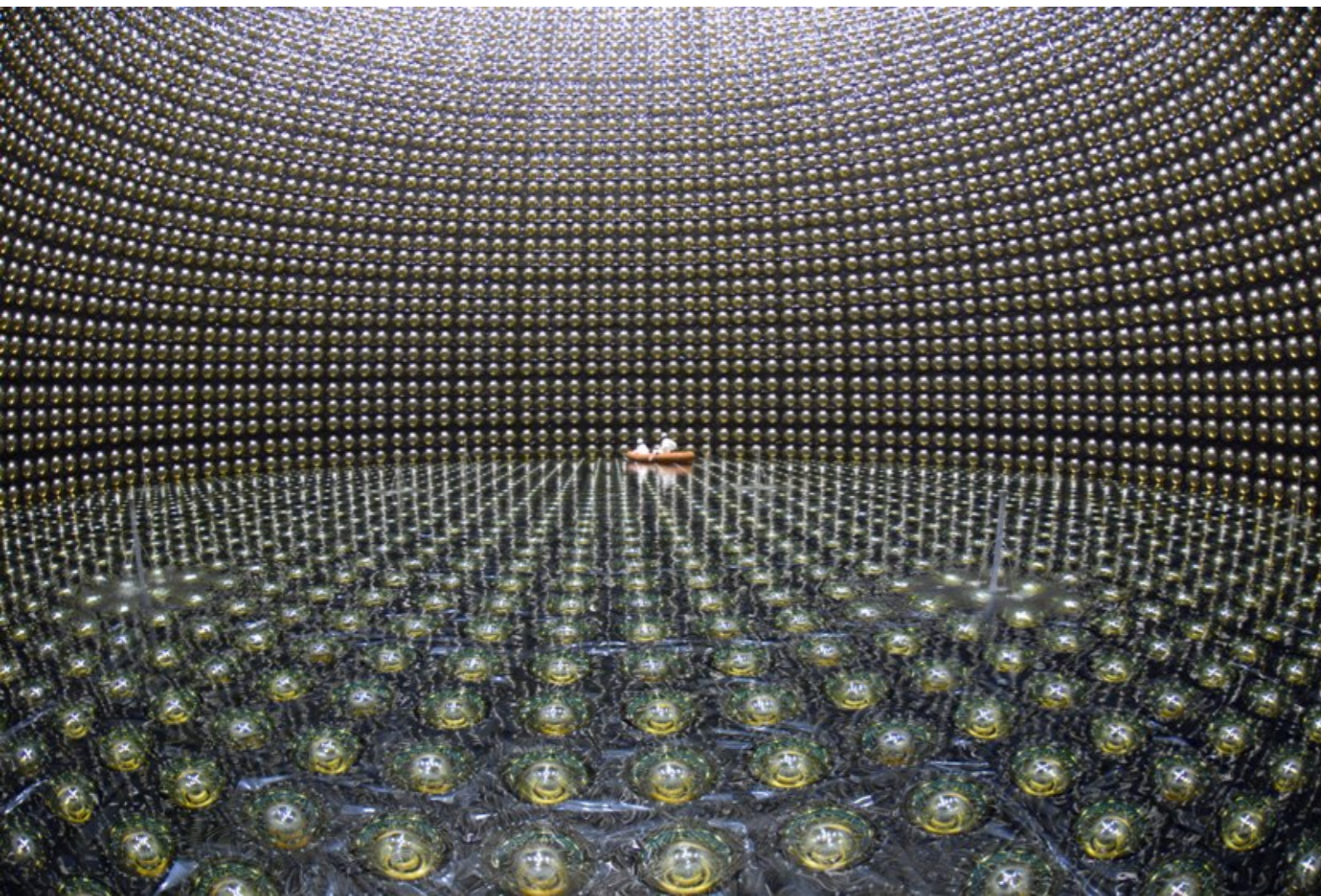
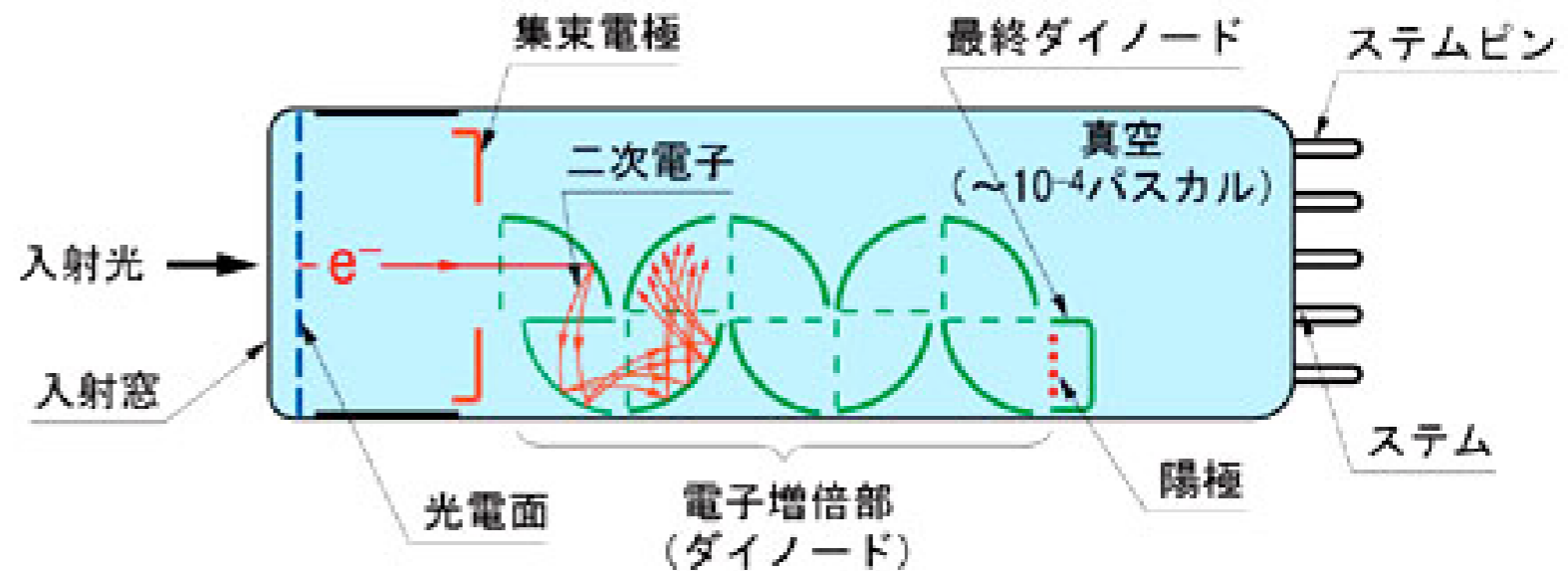
電離箱



GM管



光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier tube)



光 \Rightarrow 光電効果 \Rightarrow 電子増幅
 \Rightarrow 電流

シンチレータとの組み合わせ
Scintillator

放射線 \Rightarrow 分子の励起 \Rightarrow 蛍光
光 \Rightarrow 光電子増倍管

シンチレータ (Scintillators)

プラスチックシンチレータ
およびライトガイド

無機 : NaI (Tl), CsI, ZnS, BaF₂,
BGO, GSO など (γ線、X線)
Bi₄Ge₃O₁₂ Gd₂SiO₅

有機 : プラスチックシンチレータ (電子線)
例 : PPO, POPOP / ポリスチレン (荷電粒子)

: 液体シンチレータ

例 : p-テルフェニル / トルエン



ゲルマニウム検出器 (Ge detector)

半導体検出器 (Semiconductor detectors)



例 : Si(Li) 検出器、Ge 検出器 (高エネルギー分解能) (γ線)

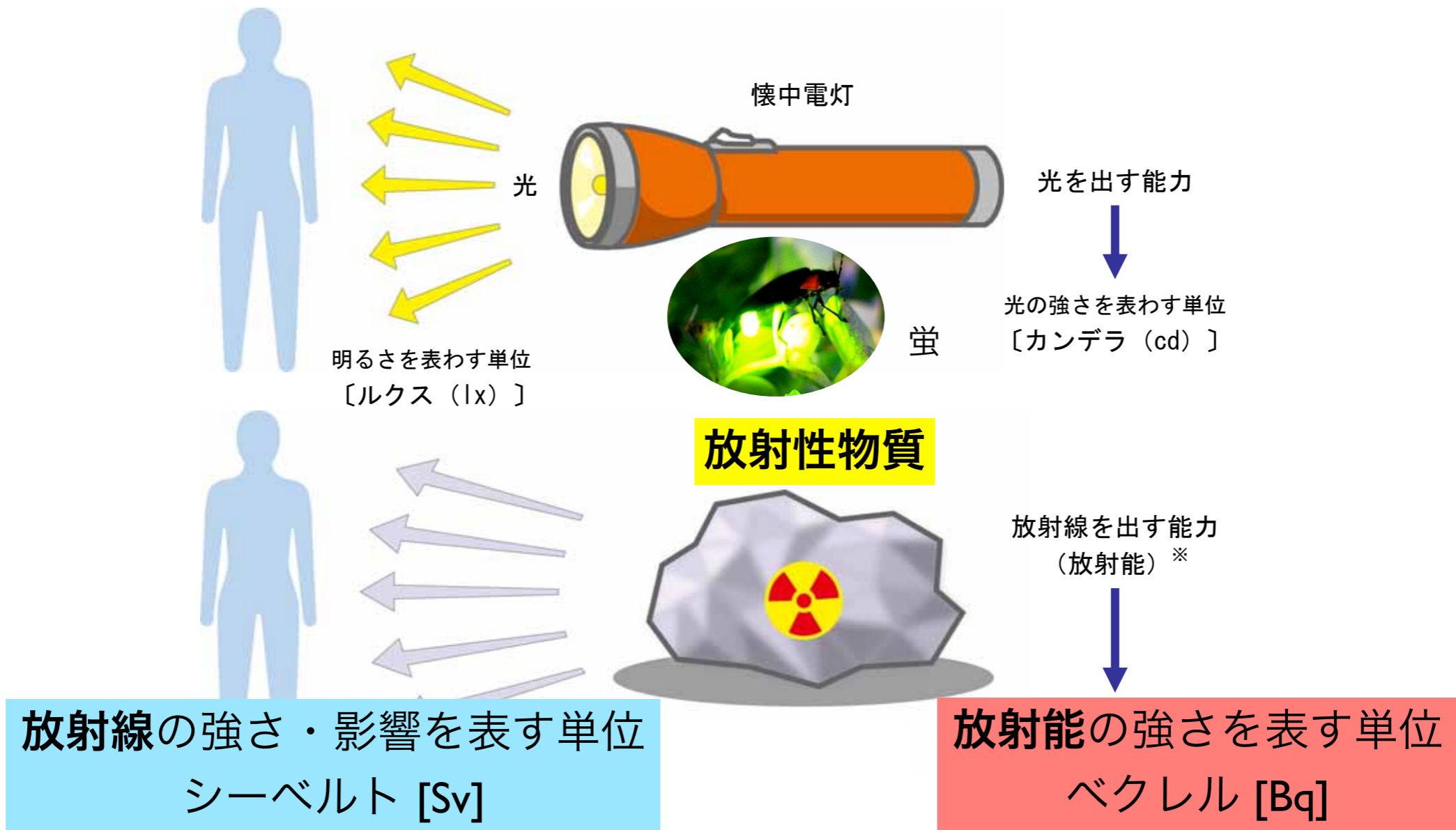
放射線 ⇒ 電離 ⇒ 電子正孔対 ⇒ 電荷測定

電気パルス : タイミング : 粒子透過時刻

: パルス高 : エネルギー

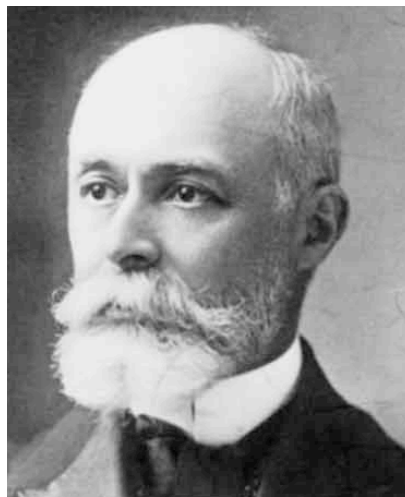
放射線の単位

放射能と放射線



6-1

出典：資源エネルギー庁「原子力2010」



放射能 (radioactivity) の単位

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

Becquerel

decay/disintegration
per second

Curie



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] | R $\approx 2.58 \times 10^{-4}$ C/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] | Gy = 100 ram

放射線量の単位

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

吸収線量 absorbed dose $D [J / kg] = [Gy]$ Gray
[erg / g] = [ram] | Gy = 100 ram

放射線防護のための線量 **protection quantity**

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

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

[erg / g] = [rem] | Sv = 100 rem

係数

生物学的効果比 RBE (Relative Biological Effectiveness) 放射線生物学の観測量

線質係数 Q 放射線防護のための取り決め

放射線荷重係数 w_R 放射線防護のための取り決め



放射線量 (radiation dose) の単位

Gray



吸収線量 absorbed dose $D [J / kg] = [Gy]$

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

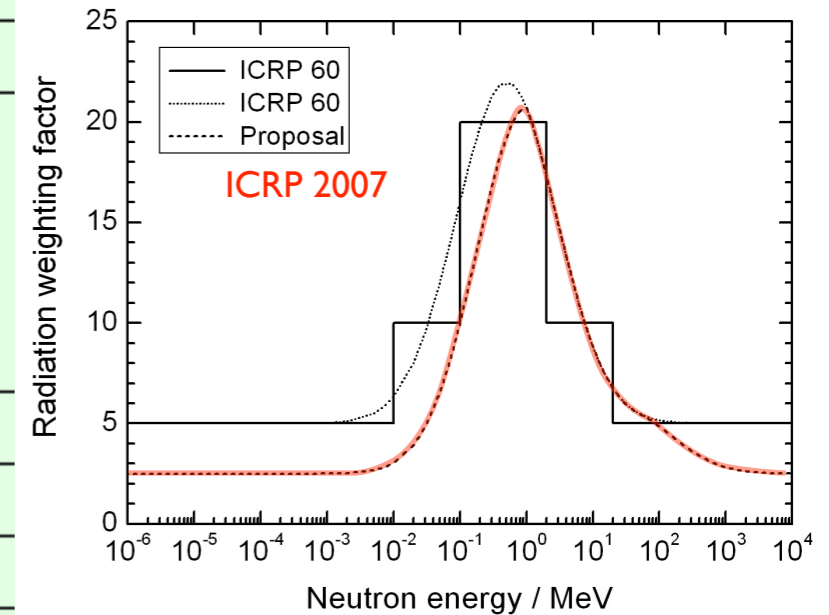
実効線量 effective dose $E [J / kg] = [Sv]$

Sievert



表 1 放射線荷重係数

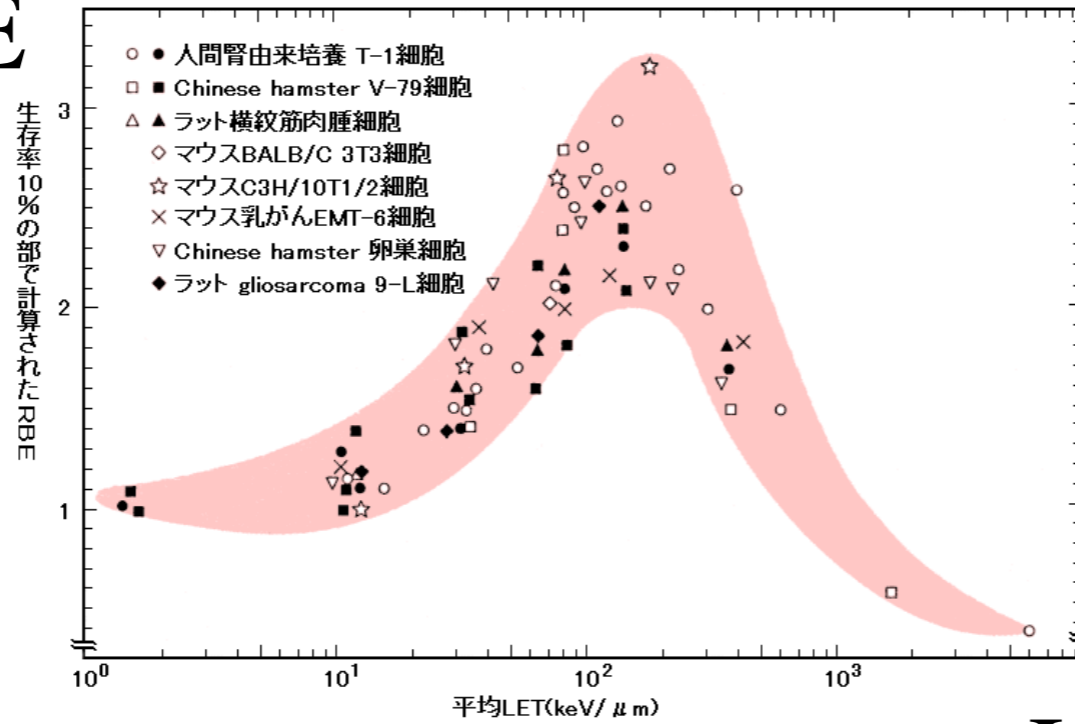
放射線の種類・エネルギーの範囲	放射線荷重係数: W_R	
光子(X線・γ線); 全てのエネルギー	1	1
電子(β線)およびミュー粒子; 全てのエネルギー	1	1
中性子; 10keV 以下	5	see graph
10keV~100keV	10	
100keV~2MeV	20	
2MeV~20 MeV	10	
20MeV以上	5	
反跳陽子以外の陽子; エネルギー 2MeV 以上	5	2 (正負パイオンも)
アルファ粒子(α線)	20	20
核分裂片	20	20
重原子核	20	20



[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

RBE



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、本来ビームが持つdepth-dose curveのピークとプラトー部のRBEである。

生物学的効果比 RBE

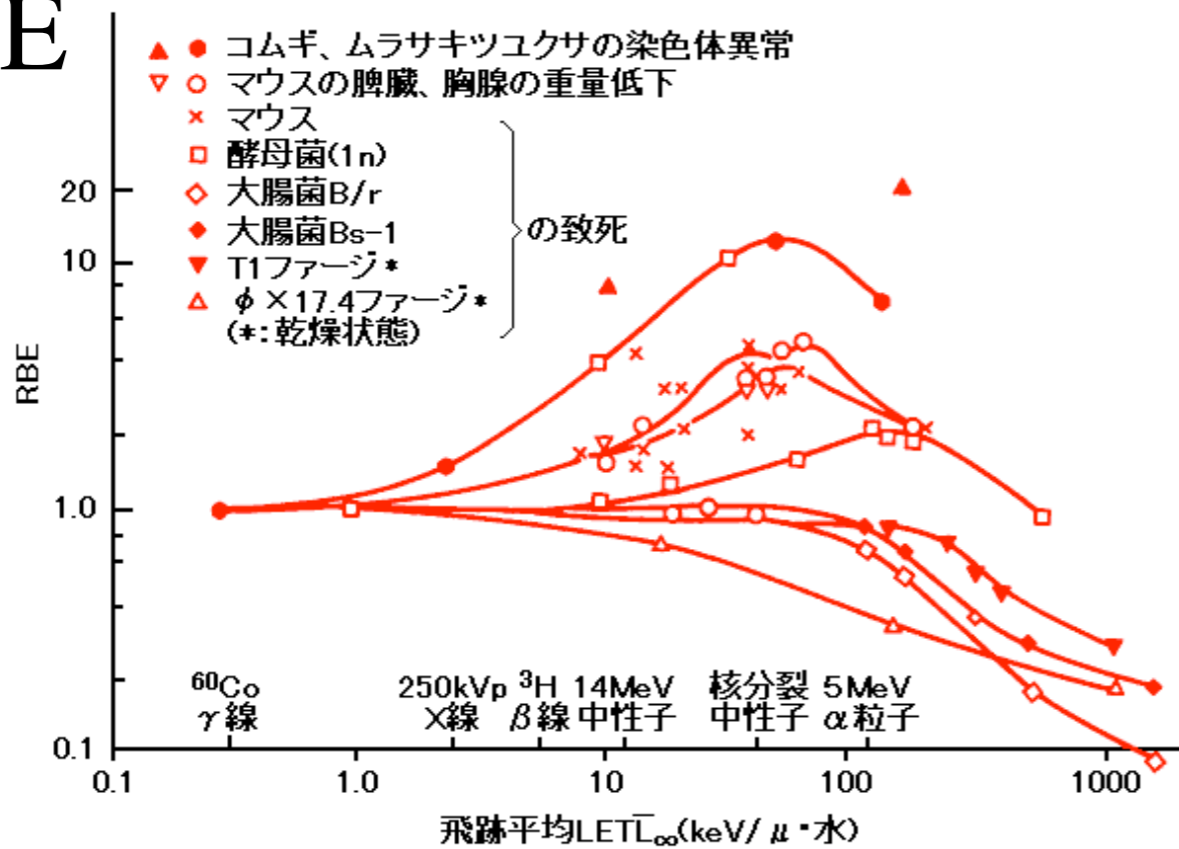
(Relative Biological Effectiveness)

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

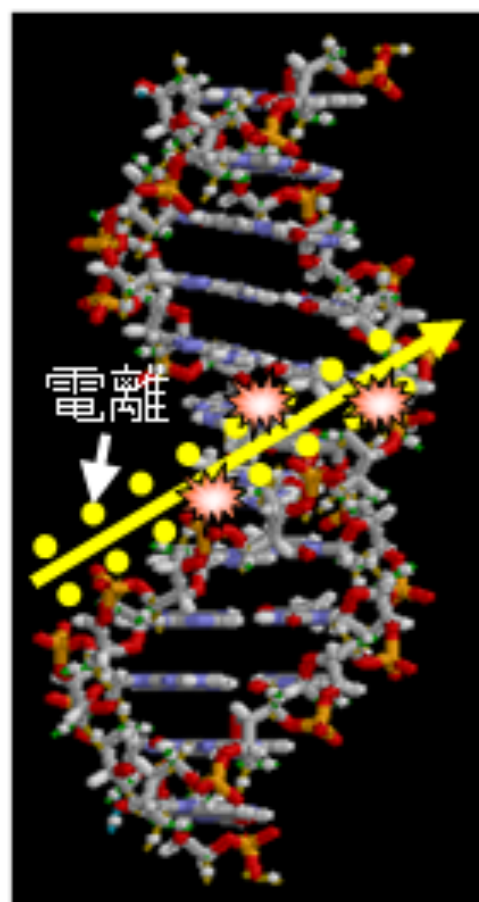


様々な生物反応(マウスの臓器の重量低下や致死、高等植物の染色体異常等)において、いずれも約80keV/μm付近のLET値をもつ放射線が最大のRBE値を示す。

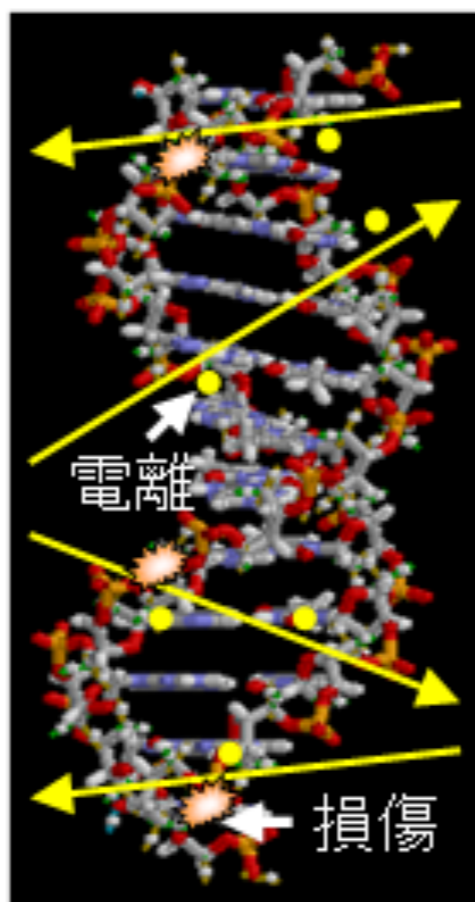
LET

図2 体細胞的効果に対する各種放射線のRBEとLETの関係

放射線による DNA 損傷



重イオン



電子

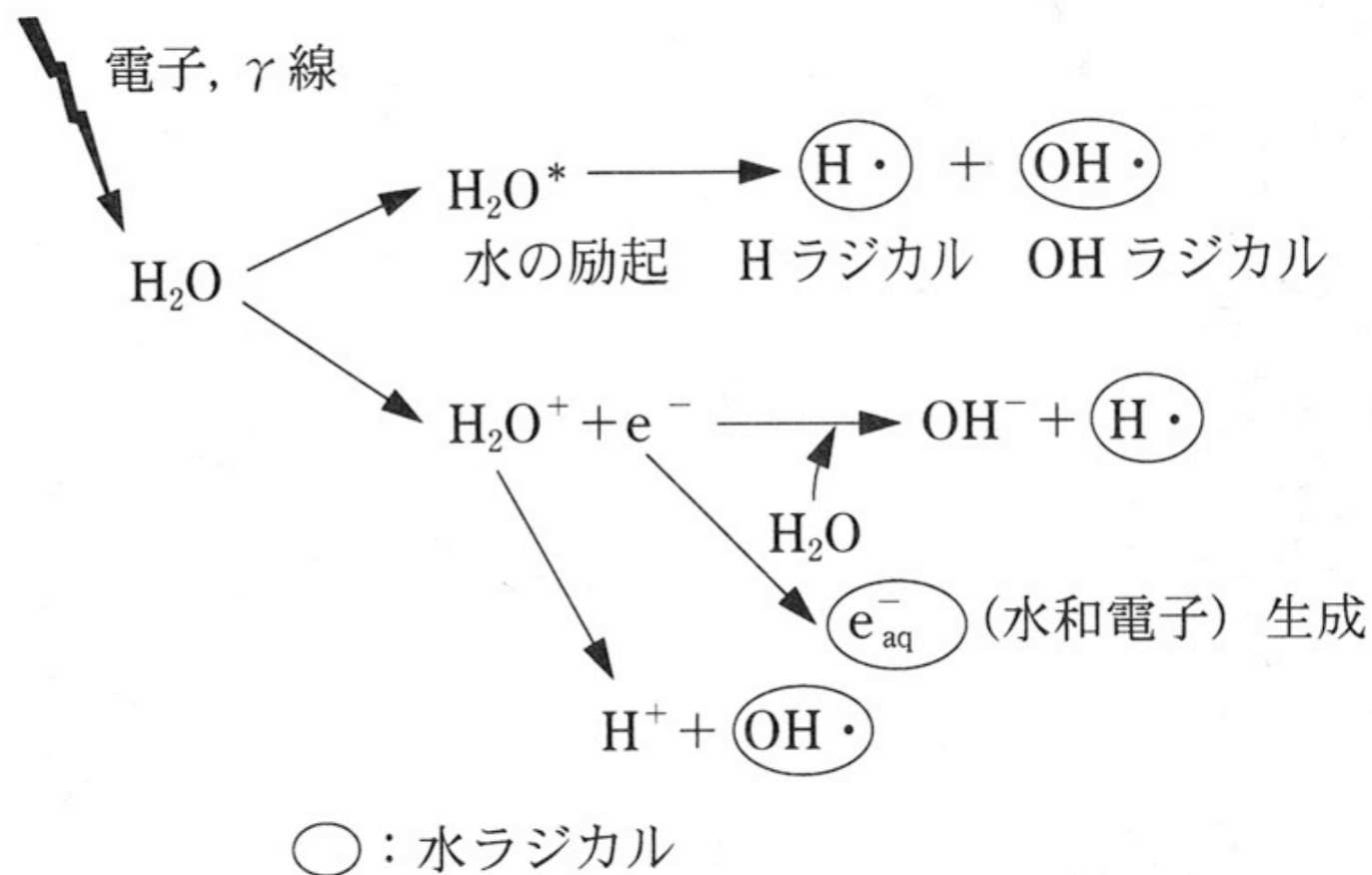


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

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**

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

先週の課題

(ヨウ素換算63万テラベクレル, <http://bit.ly/fRxmkt> これを放射性ヨウ素131の質量に焼き直すと, およそ1) 100トン 2) 100 キログラム 3) 100 グラム 4) 100ミリグラム, ?)

計算してみよう。

放射線のもつエネルギーは? (eV, J)

MeV を J や K に変換計算してみよう。

1 ミリシーベルトを熱エネルギーに直すと? (K)

$mSv = J / kg$ 体重 60 kg の人の全身被曝の場合

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 #1

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

放射線と物質（原子・分子）との相互作用の知識をもとに、GM管がどうやって放射線を計測するのか、その動作原理について説明した後、 α 線、 β 線、 γ 線が入射したとき、それぞれの場合について反応過程と検出効率について述べよ。

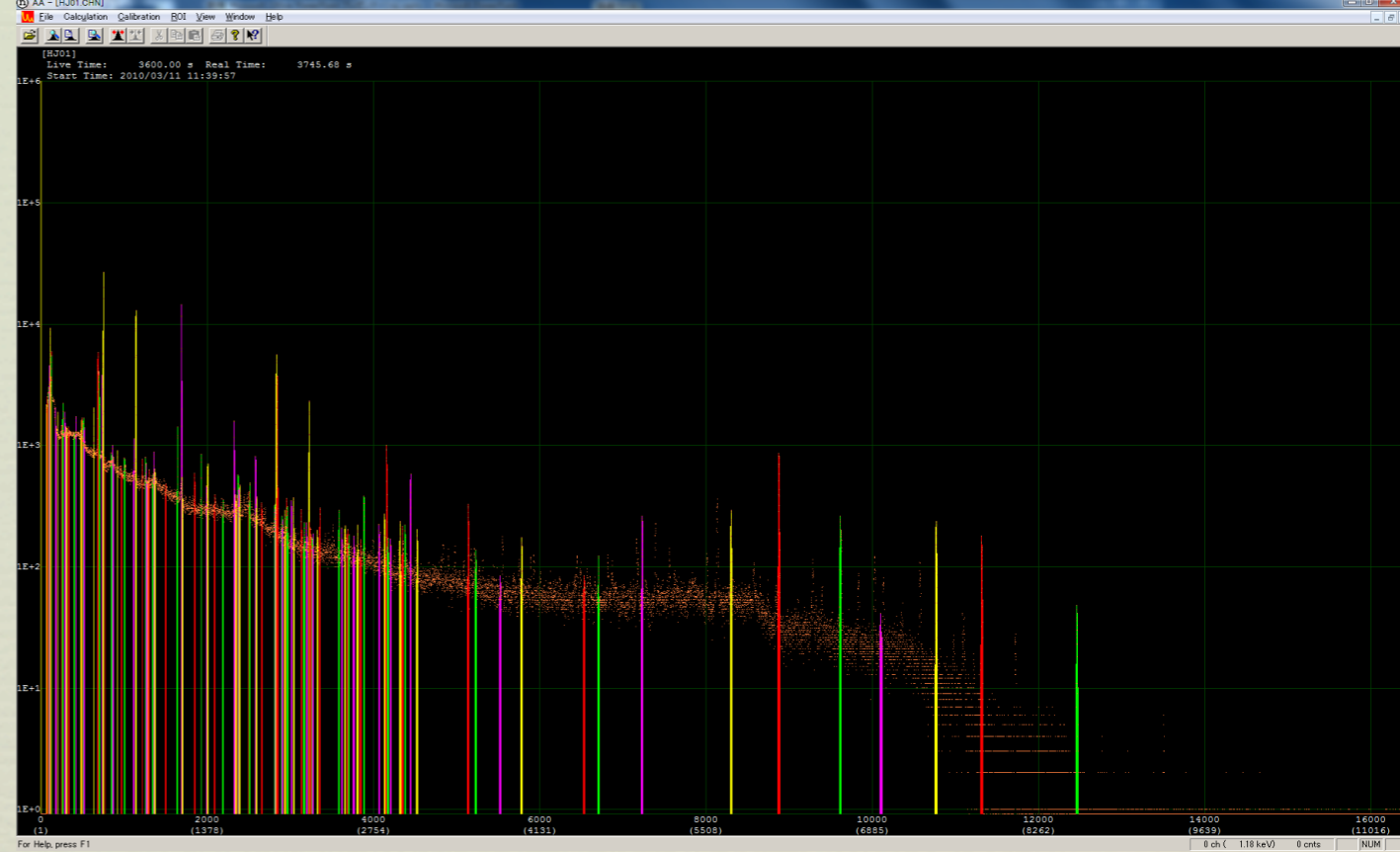
参考文献：基礎物理学実験教科書 霧箱・GM管

次回予告

第3回 (10/21)

● 放射線計測学

● 放射線の測定原理・方法・問題点



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 【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

教養学部報 (10月5日号) 配布

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.