



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、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

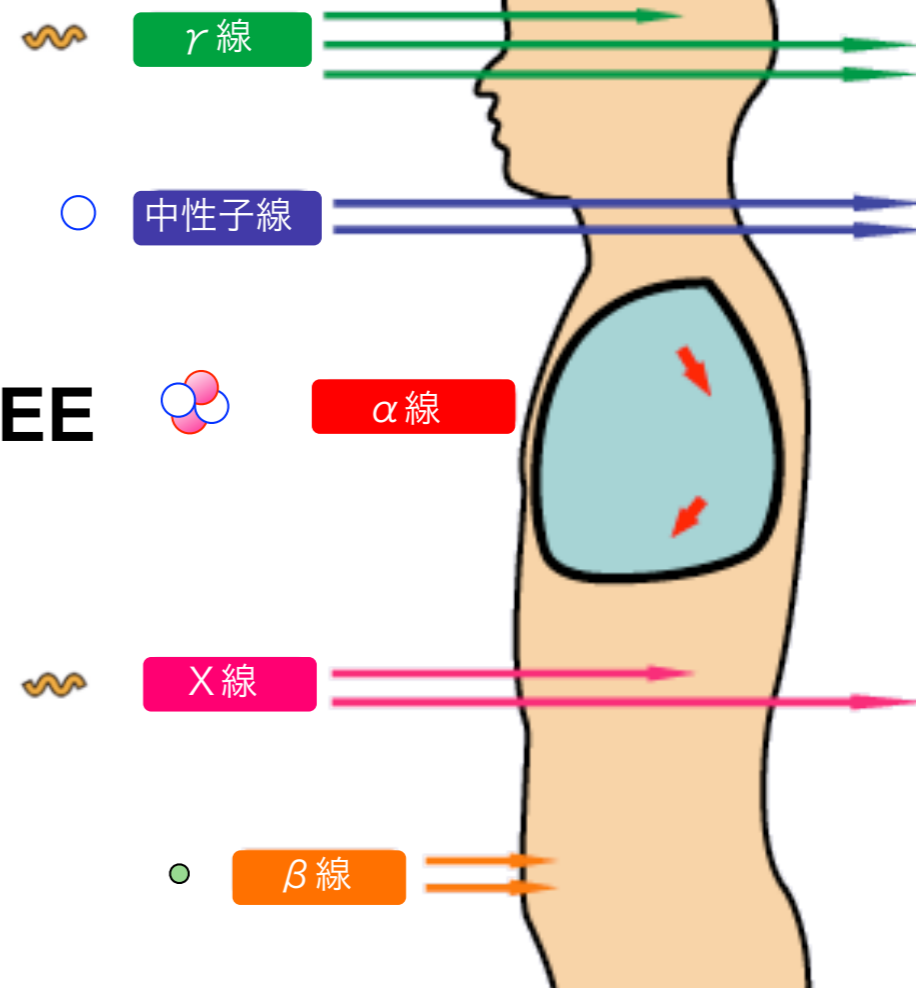
理解する

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE
(West)

K303教室

& @ Zoom



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

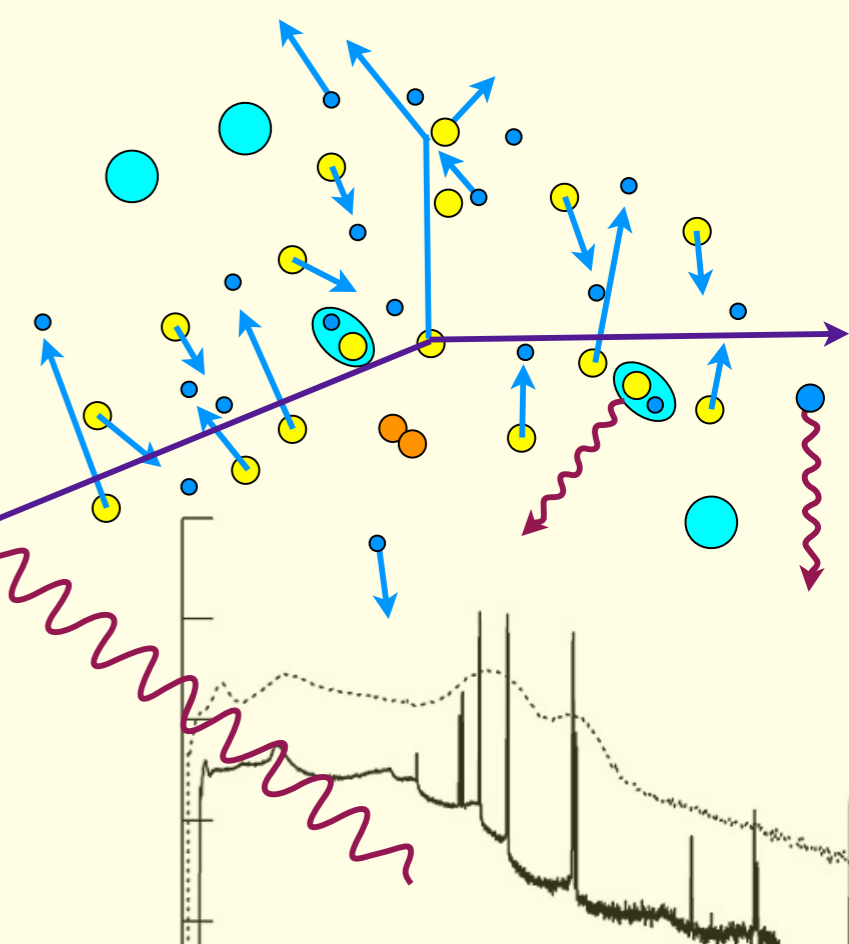
放射線

を

科学的に

理解する

2021 / 10 / 15 (金)



第2回

放射線物理学

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
- 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

生命科学 : 渡邊、坪倉、藤原

講義形態

対面とオンライン併用の
ハイフレックス授業。

対面：KOMCEE West K-303 スタジオ

オンライン：Zoom

(担当講師ごとに URL が変わります。)

放射性崩壊と放射能



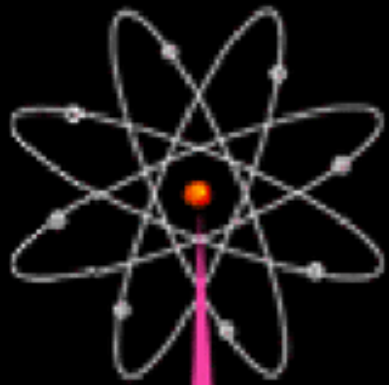
分子
molecule

nm (10^{-9} m) 化学
ナノメートル

eV Chemistry
電子ボルト

原子: atom < atomus < ατομος < a- + témnein + -os
(切ることができない)

原子物理学 Atomic Physics



原子
atom

Å (10^{-10} m)
オングストローム Ångström

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

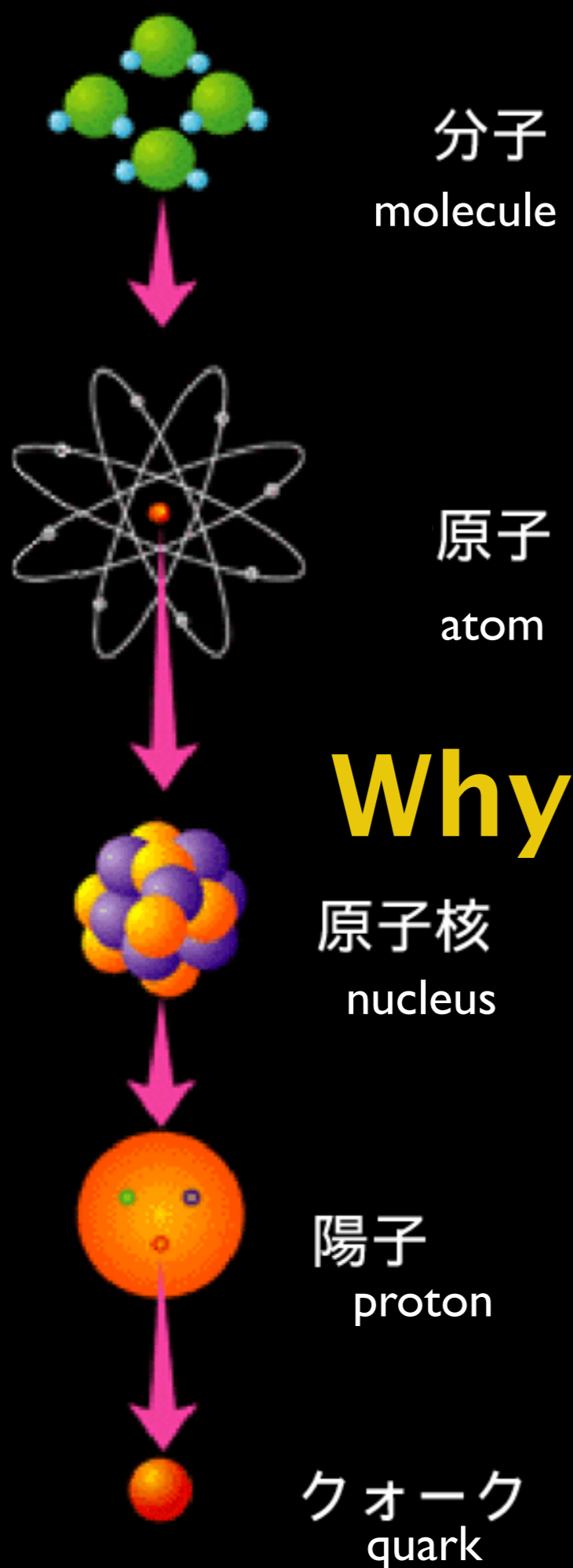
素粒子物理学 Particle Physics

am (10^{-18} m)
アトメートル

GeV
ギガ電子ボルト



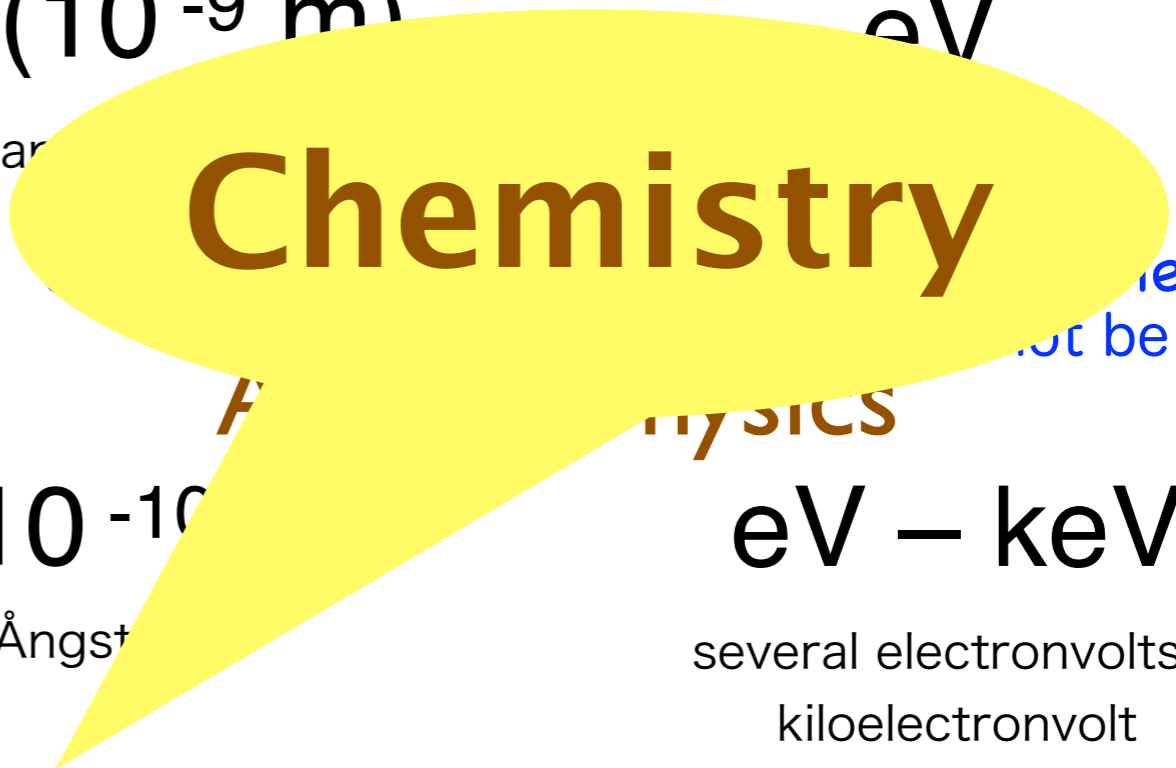
クォーク
quark



Why

did alchemy fail?

nm (10^{-9} m) eV



Å (10^{-10} m)
Ångström

eV – keV
several electronvolts –
kiloelectronvolt

Nuclear Physics

fm (10^{-15} m)
femtometer

MeV
megaelectronvolt

Particle Physics

am (10^{-18} m)
attometer

GeV
gigaelectronvolt

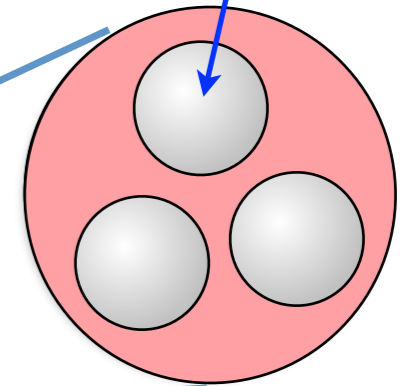
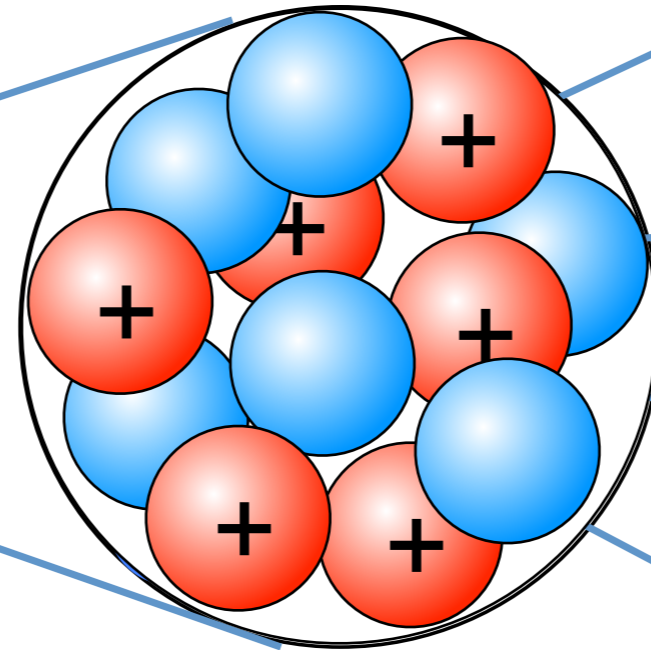
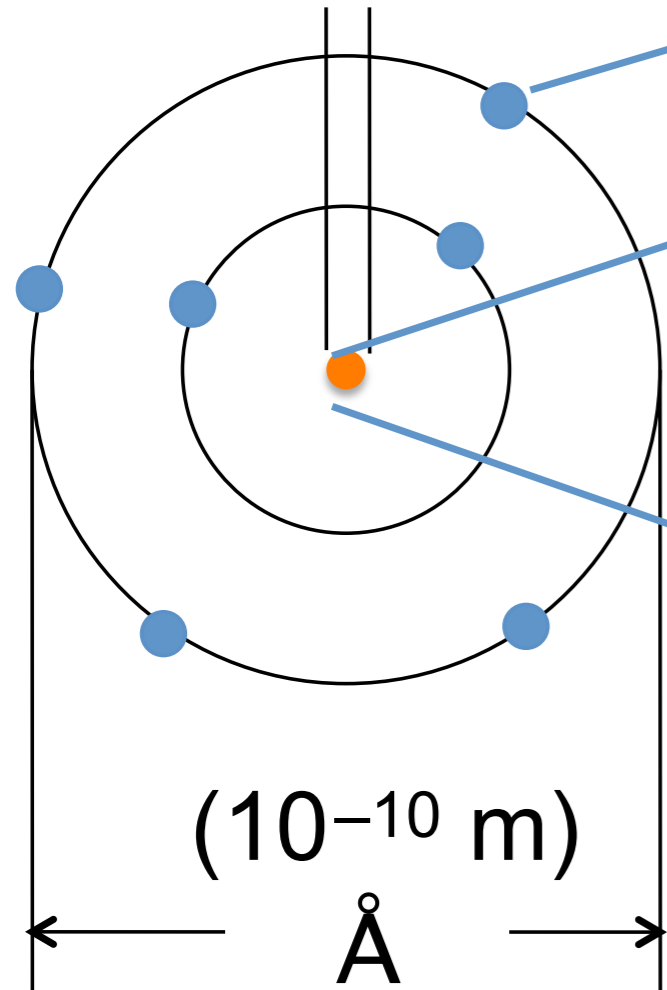
原子と原子核

$(10^{-15} - 10^{-14} \text{ m})$
1 - 10 fm

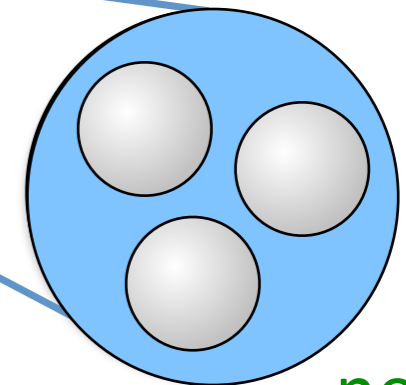
orbital electron

軌道電子

クォーク
quark



陽子
proton



neutron

中性子

原子核
nucleus

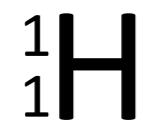
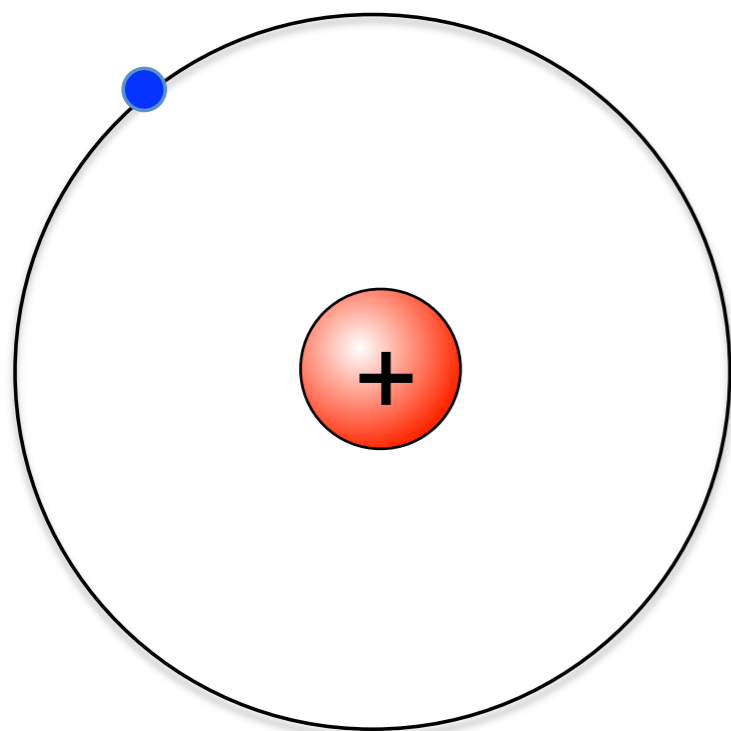
nucleon

核子 = 陽子 or 中性子

原子
atom

炭素原子 ${}^6_6\text{C}$ の模式図

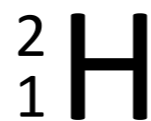
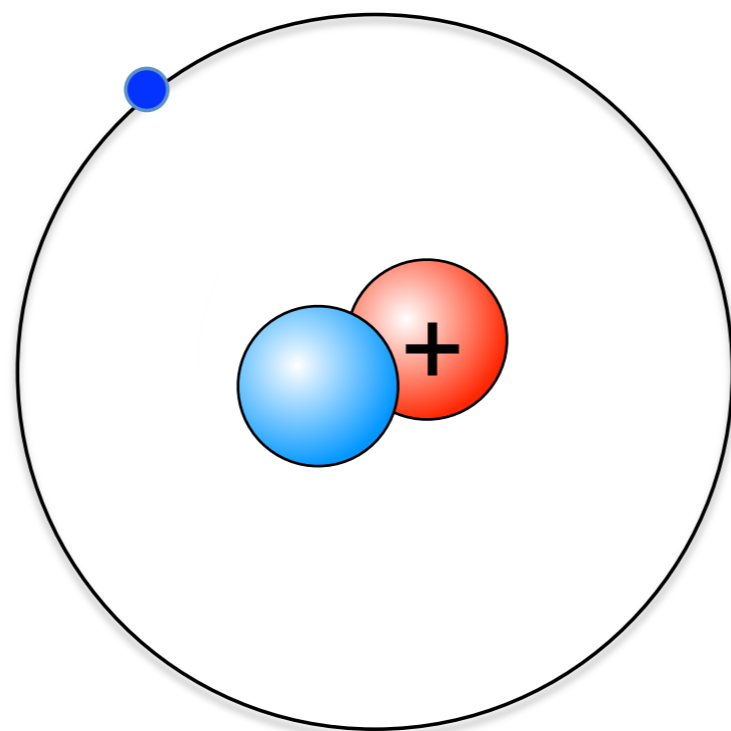
水素の3種類の同位体



Hydrogen

水素

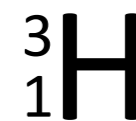
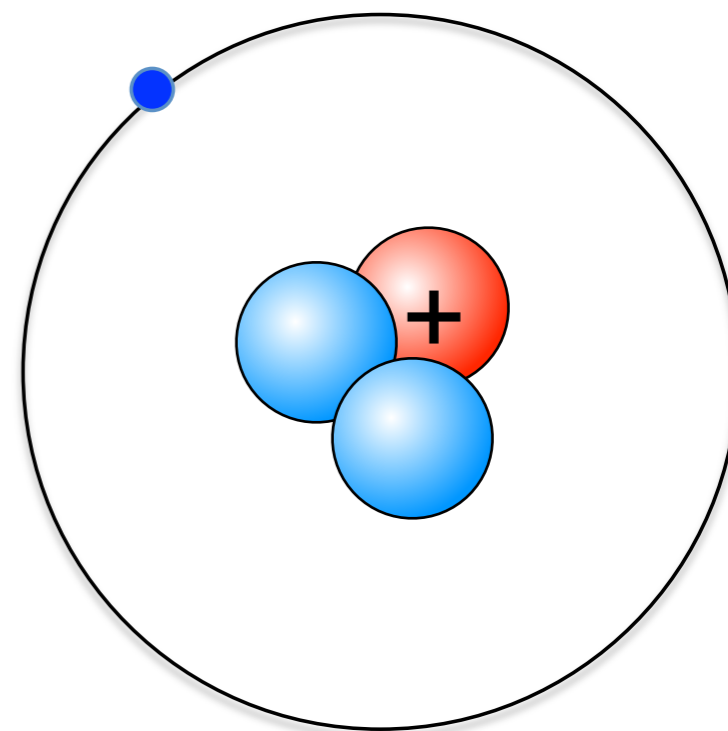
安定



Deuterium

重水素

安定



Tritium

三重水素

放射性

放射性物質とは

放射性核種

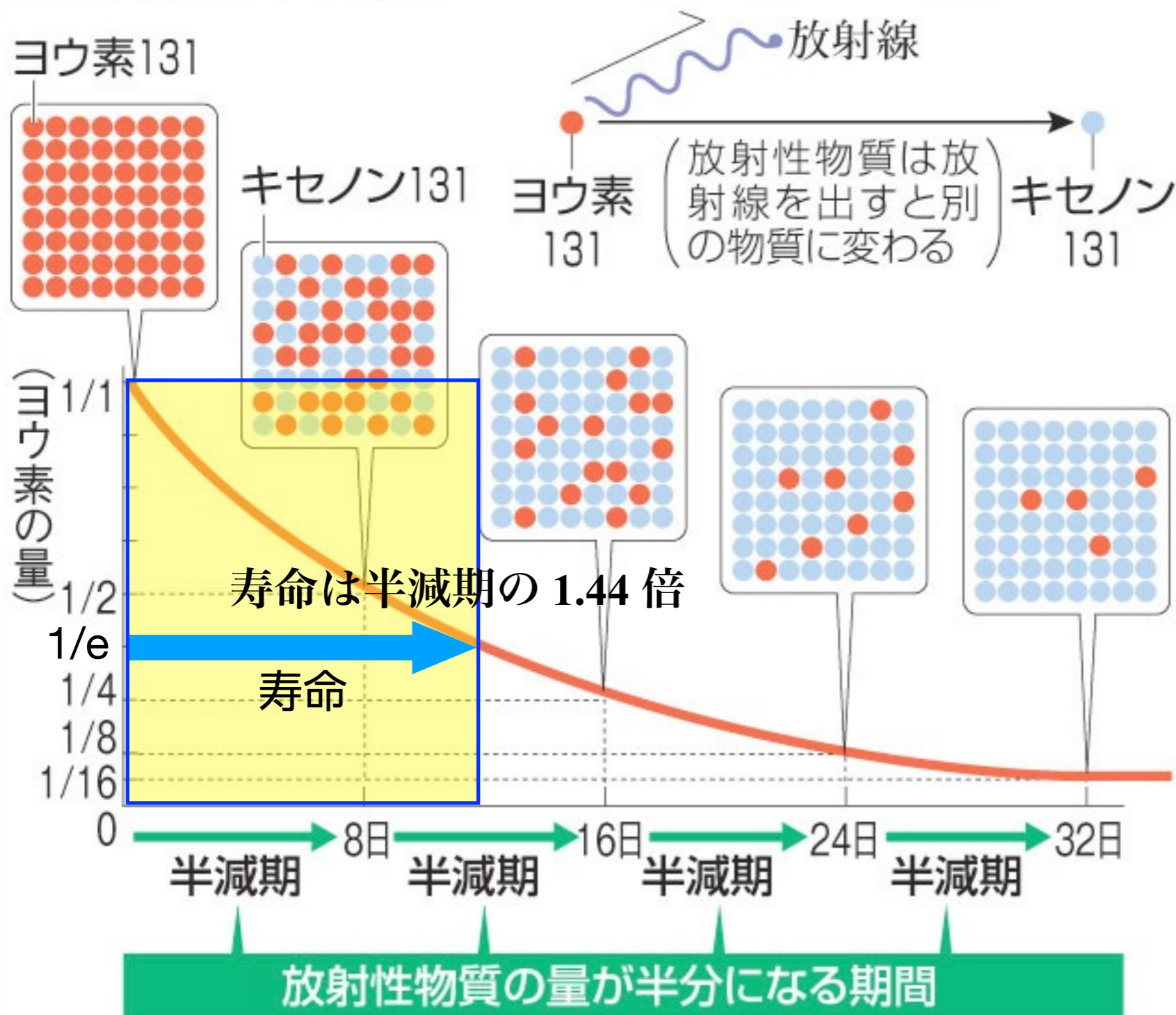
= 放射性同位体

= 不安定原子核

から成る原子を含む物質

(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, ?)

放射性物質の半減期のしくみ(ヨウ素131の例)



注：ヨウ素等価換算は、環境や人への影響を勘案して係数を決めている。ヨウ素以外の核種の質量を計算するには適していない。ヨウ素131については、15万テラベクレルの放出と言われているので、その質量は上の問いに対する計算値の4分の1となる。また、半減期の長いセシウム137などでは、同じベクレル数でも、モル数も質量もヨウ素に比べてずっと大きくなる。

放射性物質とは

放射性核種
= 放射性同位体
= 不安定原子核

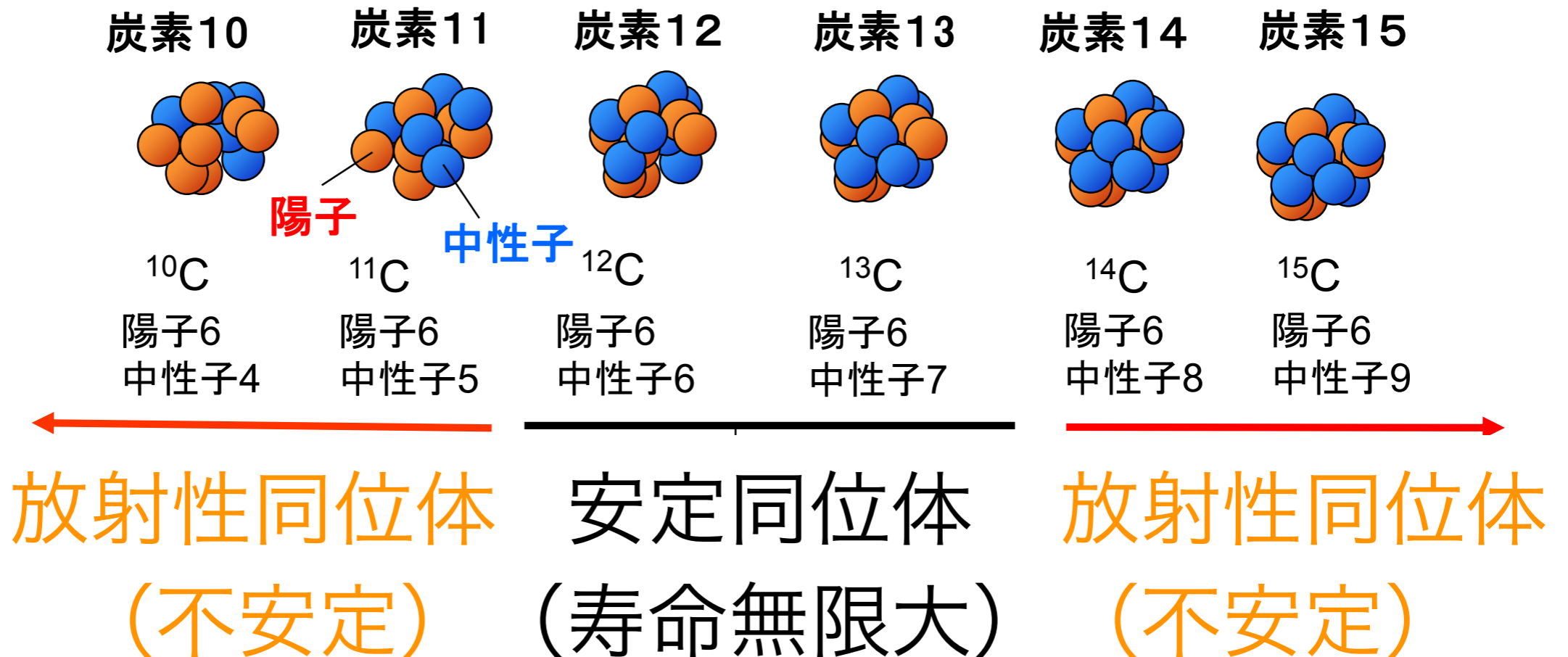
から成る原子を含む物質

質量数 $A = Z + N$



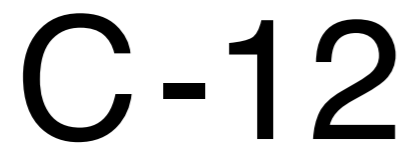
陽子数 Z が同じなら化学的には同じ元素
中性子数 N が違う原子核が多種存在する

炭素原子核の例



核種の表記法

nuclide



炭素12



$$A = Z + N$$

質量数

Z 陽子数

N 中性子数

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

半減期

19.3秒

20.3分

99%

1%

存在比

5730年

2.4秒

炭素10

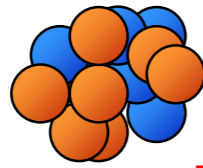
炭素11

炭素12

炭素13

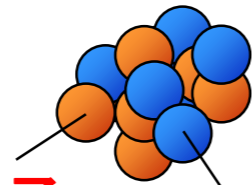
炭素14

炭素15



^{10}C

陽子6
中性子4



^{11}C

陽子6
中性子5



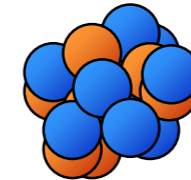
^{12}C

陽子6
中性子6



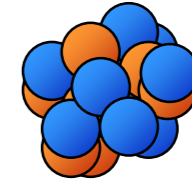
^{13}C

陽子6
中性子7



^{14}C

陽子6
中性子8



^{15}C

陽子6
中性子9

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)

放射性同位体

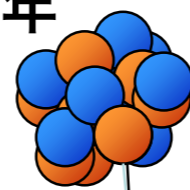
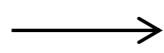
半減期

5730 ± 40年



中性子

炭素14
(放射性同位体)



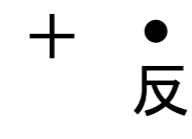
陽子

窒素14
(安定)



電子

(β 線:放射線)



反ニュートリノ

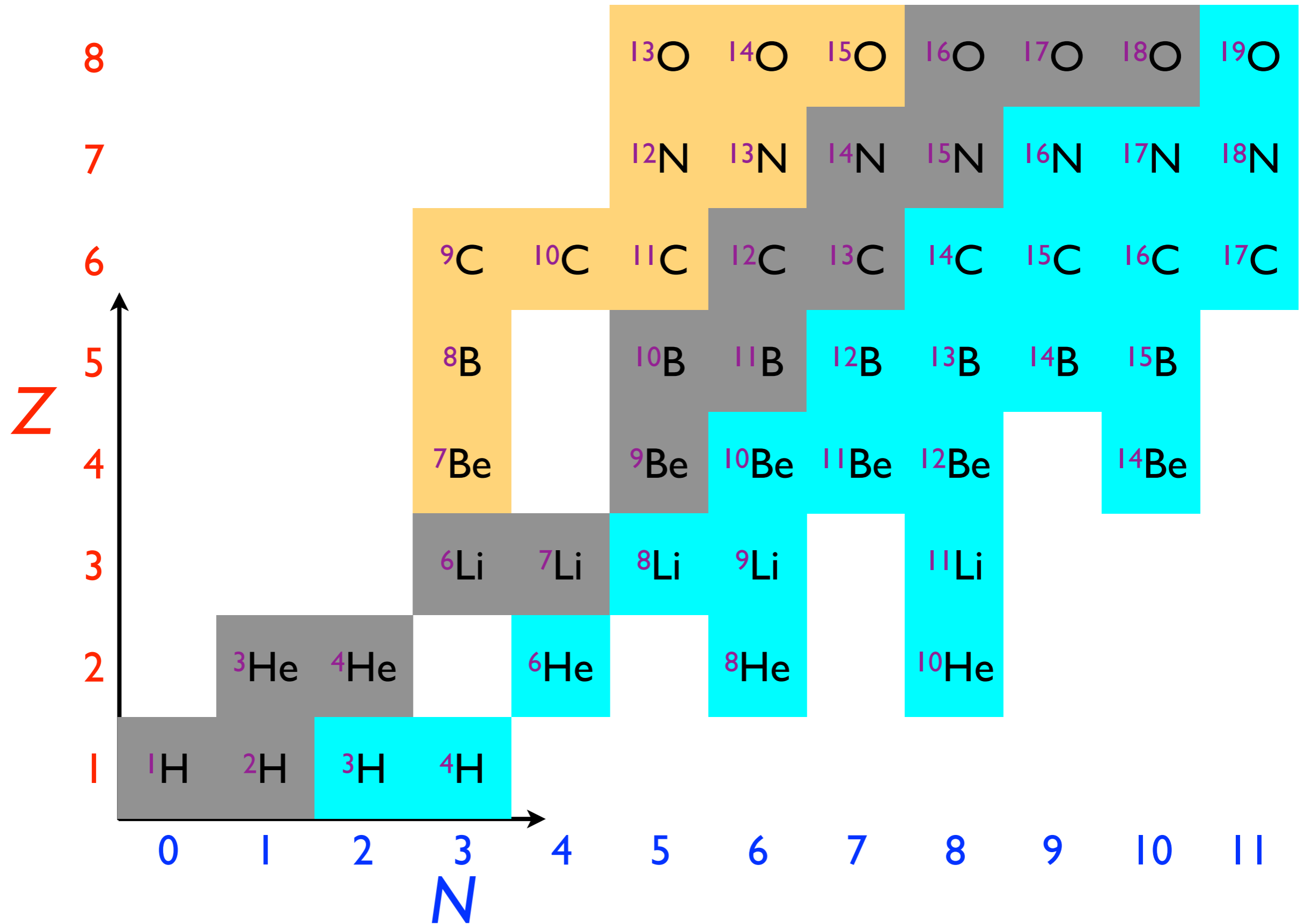
放射性同位体

ベータマイナス崩壊 (壊変)

β^- decay



核图表



核種の数

安定核種 約300種

実験的に確認 3000種

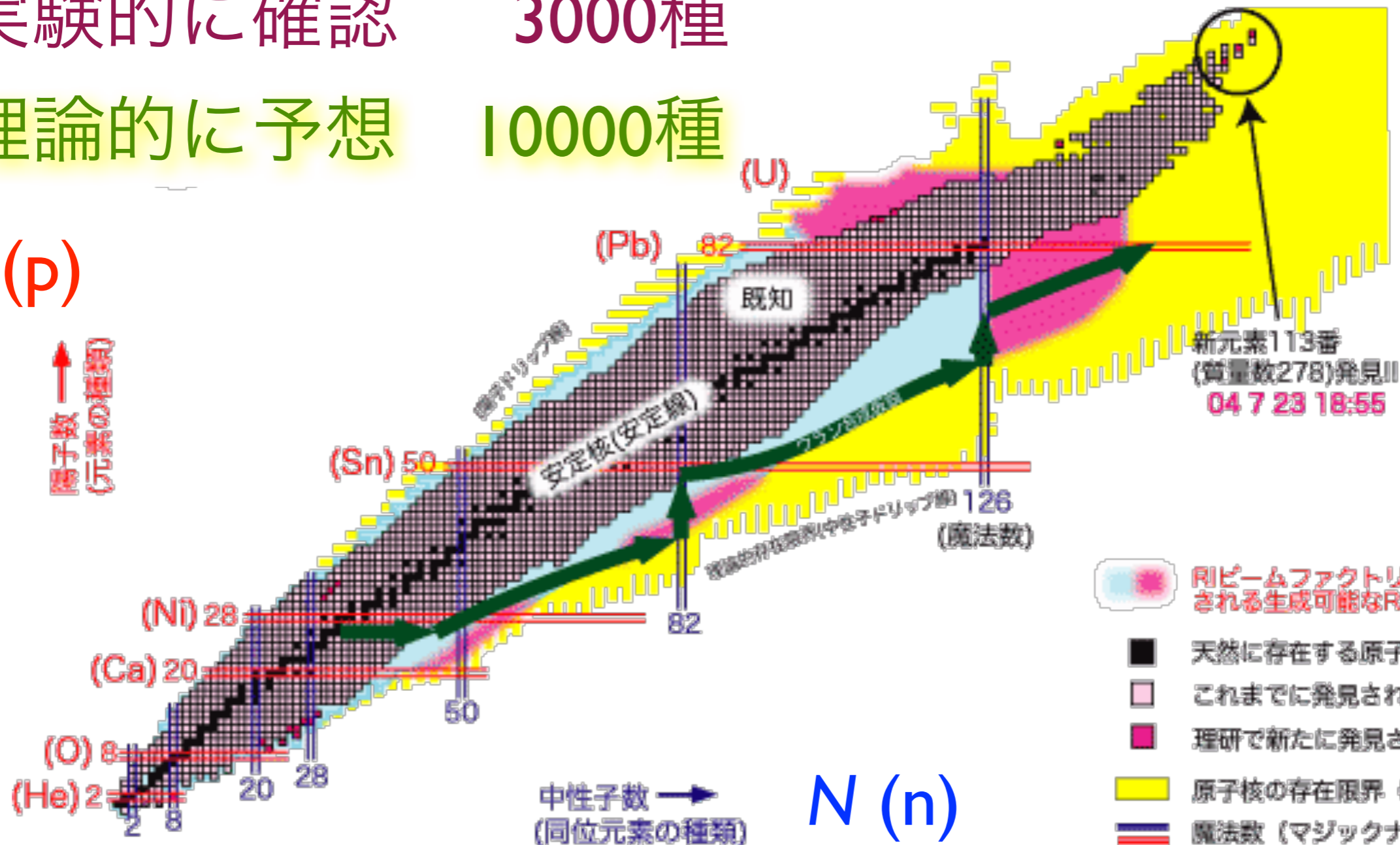
理論的に予想 10000種

原子核物理学

Nuclear Physics

Z (p)

↑
陽子数
(元素の種類)



Nuclear Chart 核図表

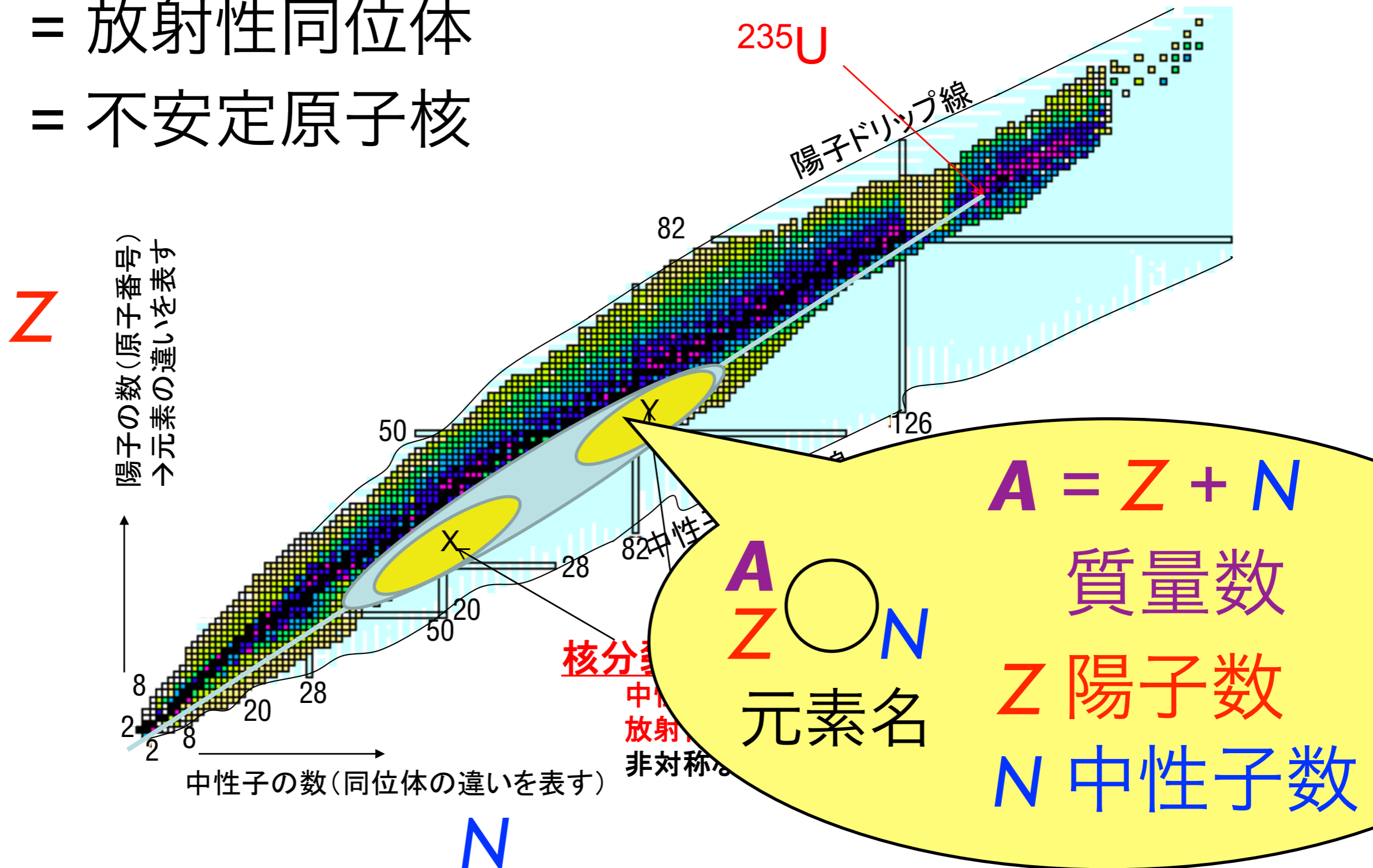
放射性物質とは

放射性核種

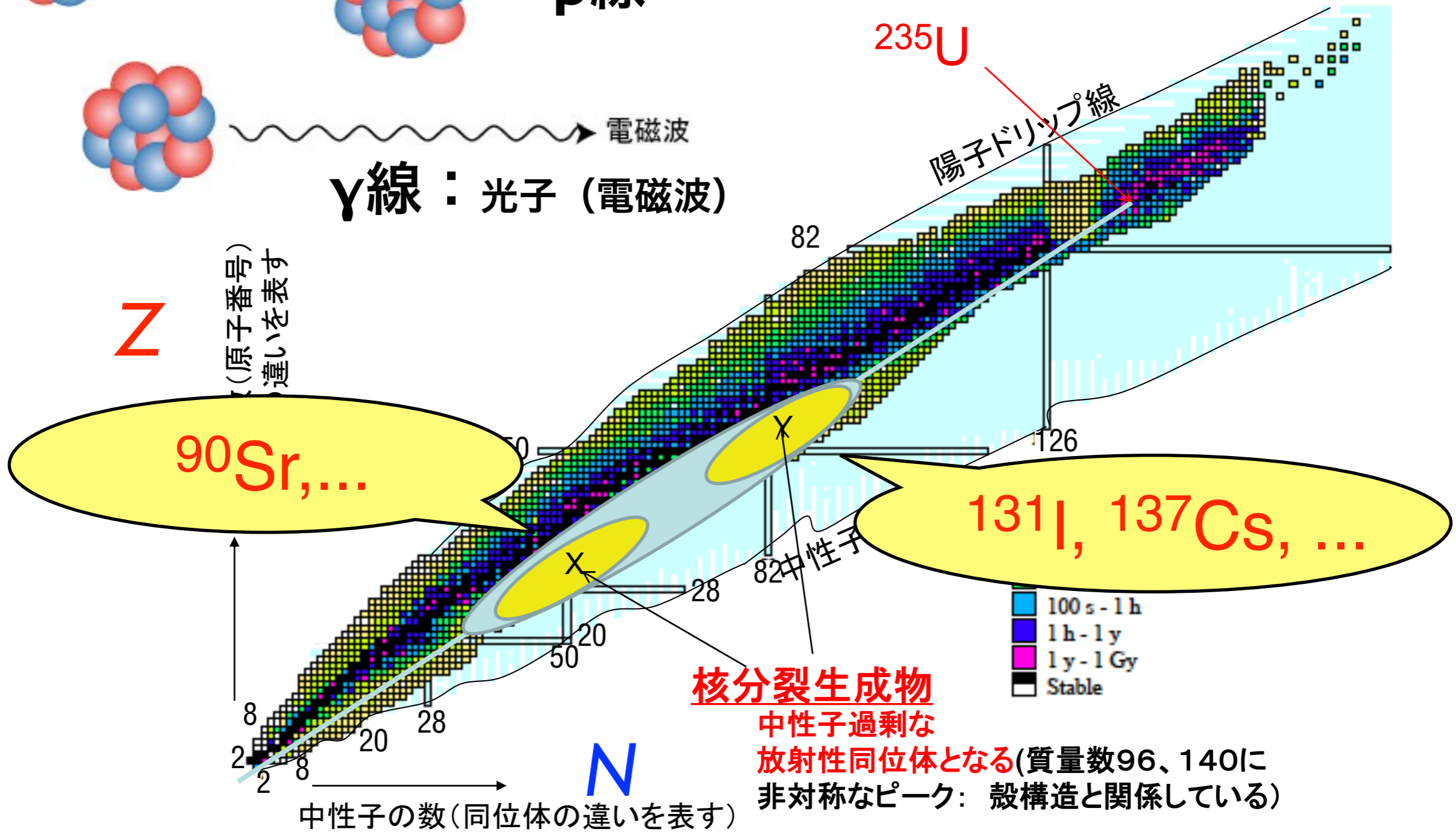
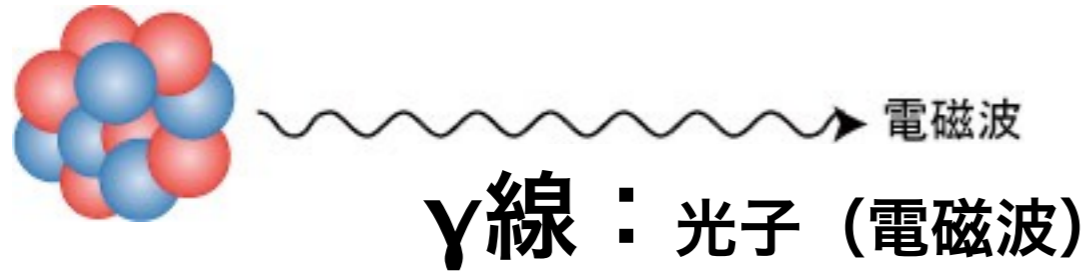
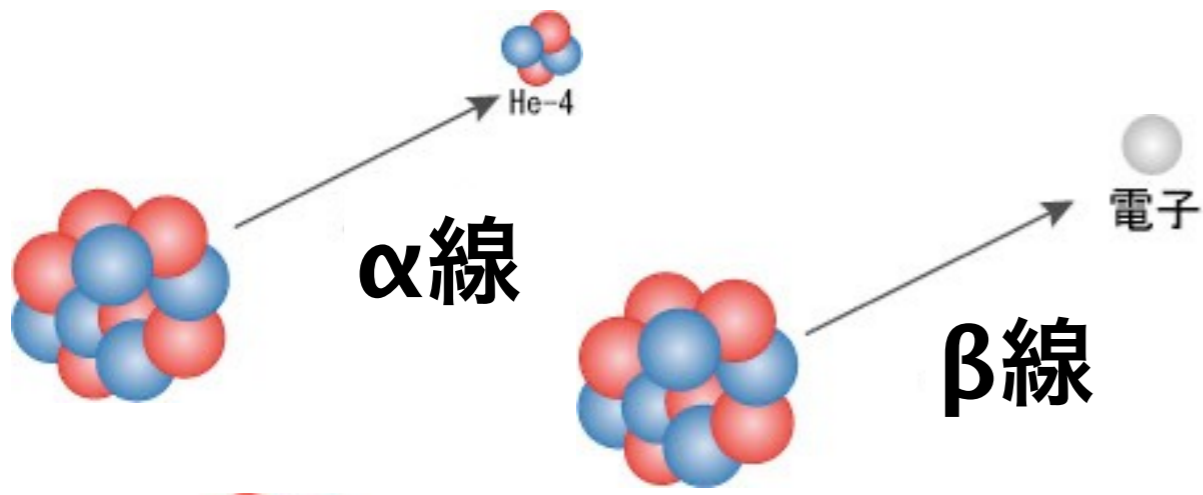
= 放射性同位体

= 不安定原子核

核図表



放射能とは 放射性物質が放射線を出す能力のこと。



Nuclear Chart 核図表

α 崩壊 (壊変)

decay

β⁻ 崩壊 (壊変)

γ 崩壊 (壊変)

(核異性体転移)

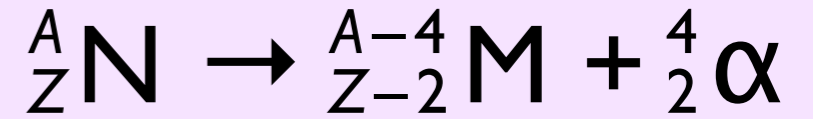
Isomeric Transition (IT)

原子の脱励起
制動放射

原子核 N



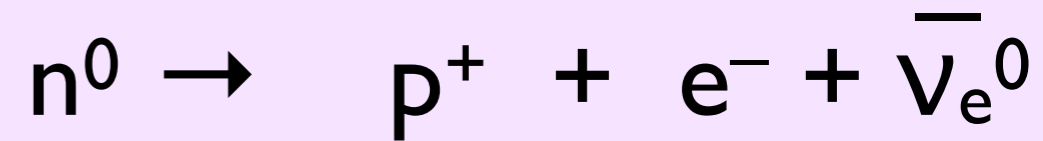
α線



β線

電子

数十 keV ~ MeV

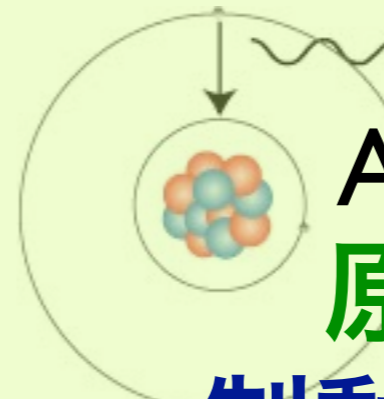


γ線

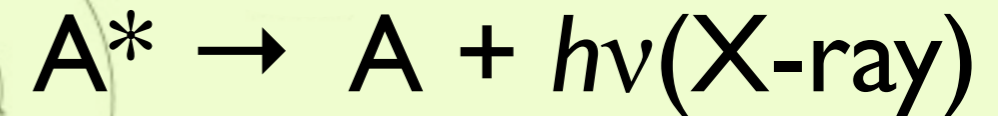
電磁波



X線



電磁波



原子 A

I ~ 100 keV

制動放射

~ 数 MeV

関連する核種の分類

isotope

同位体

Z



isobar

同重体

A



isomer

核異性体

Z, N



原子核物理学

Nuclear Physics

β 崩壊

isobar
同重体

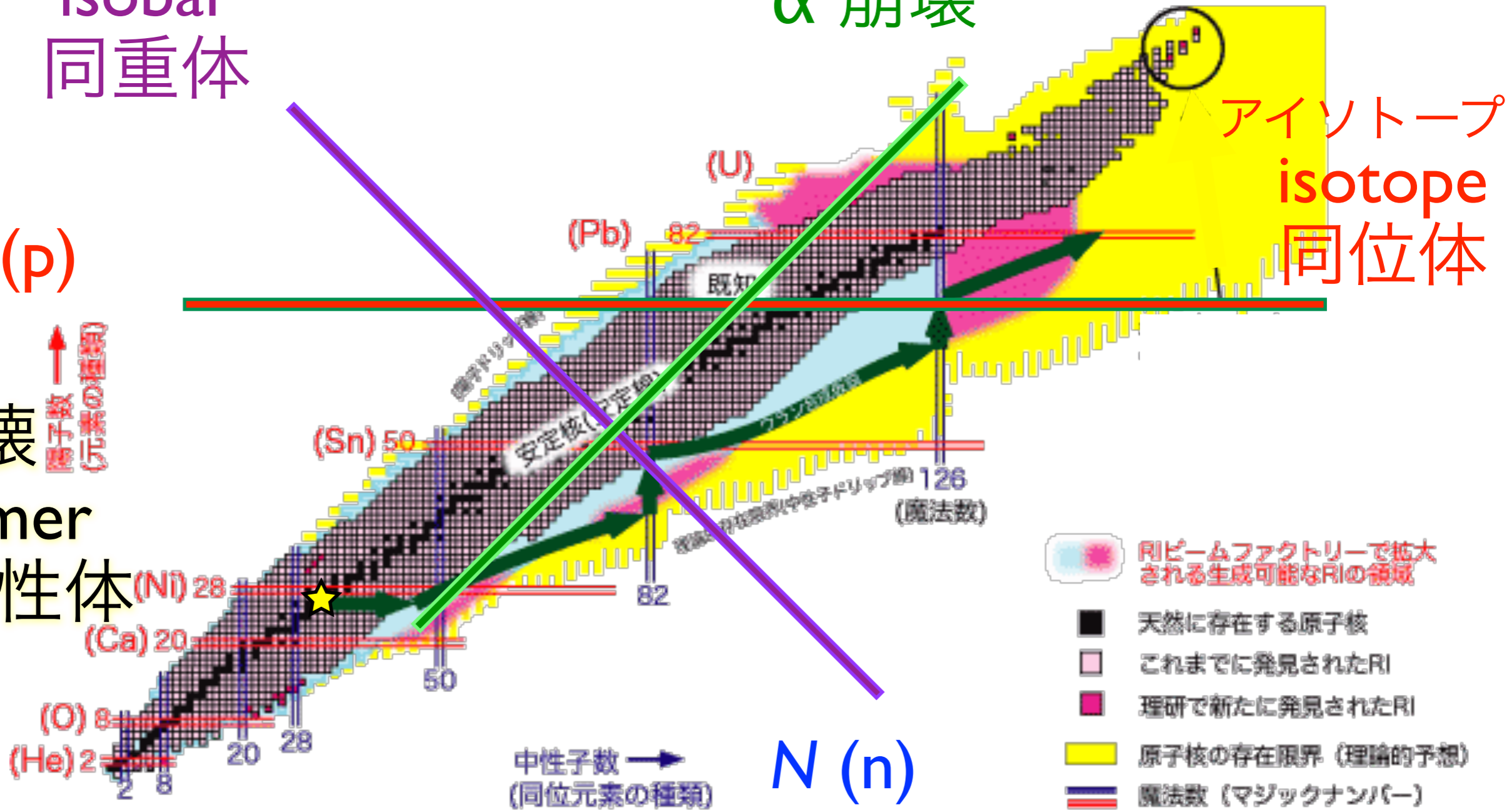
α 崩壊

Z (p)

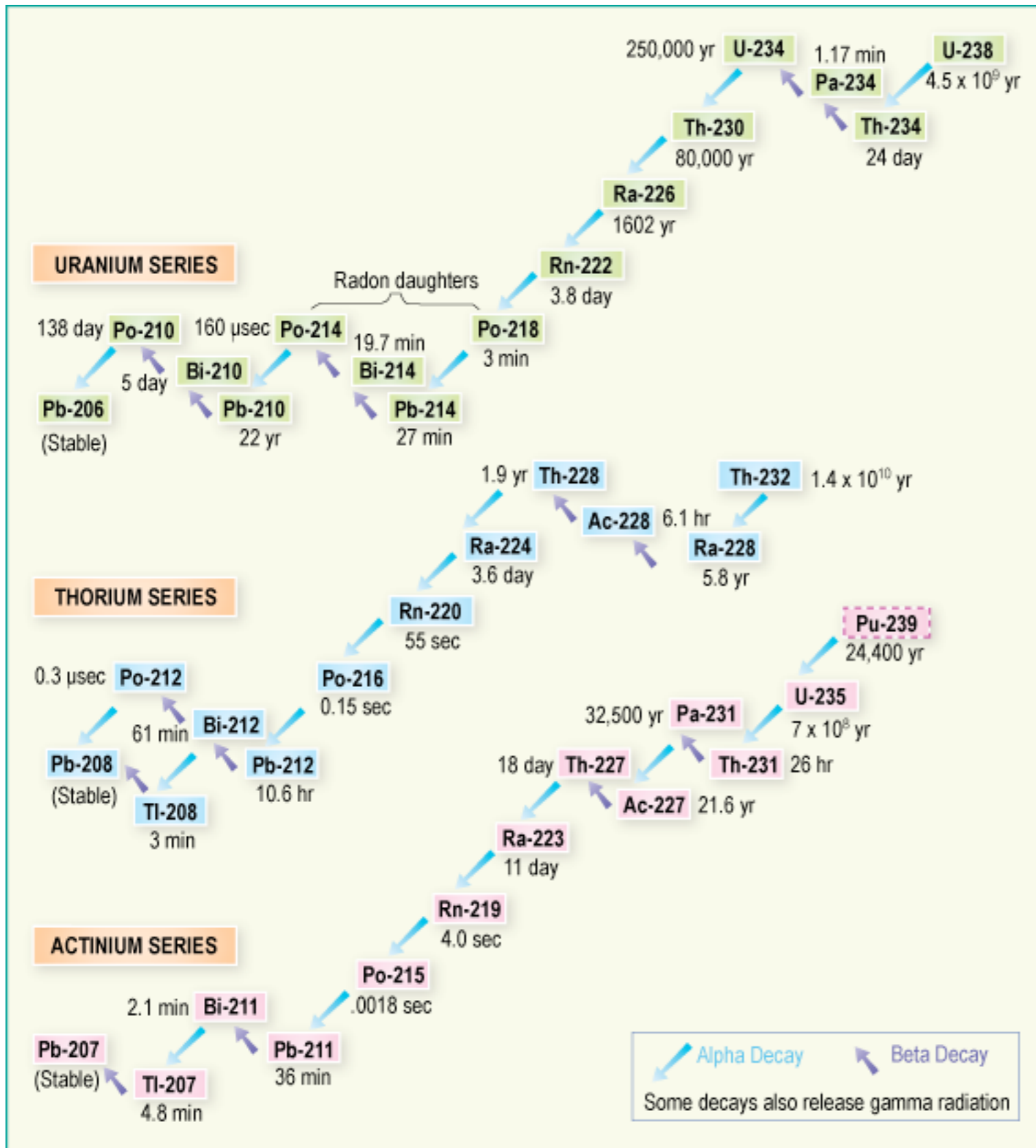
γ 崩壊

isomer

核異性体



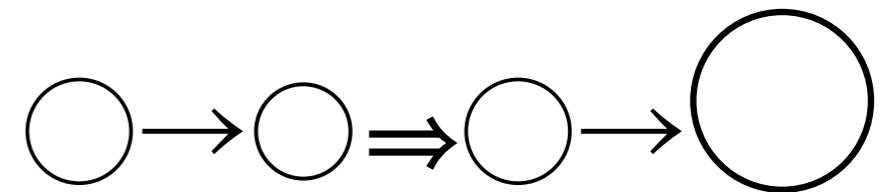
Nuclear Chart 核図表



壊変 (崩壊) 系列

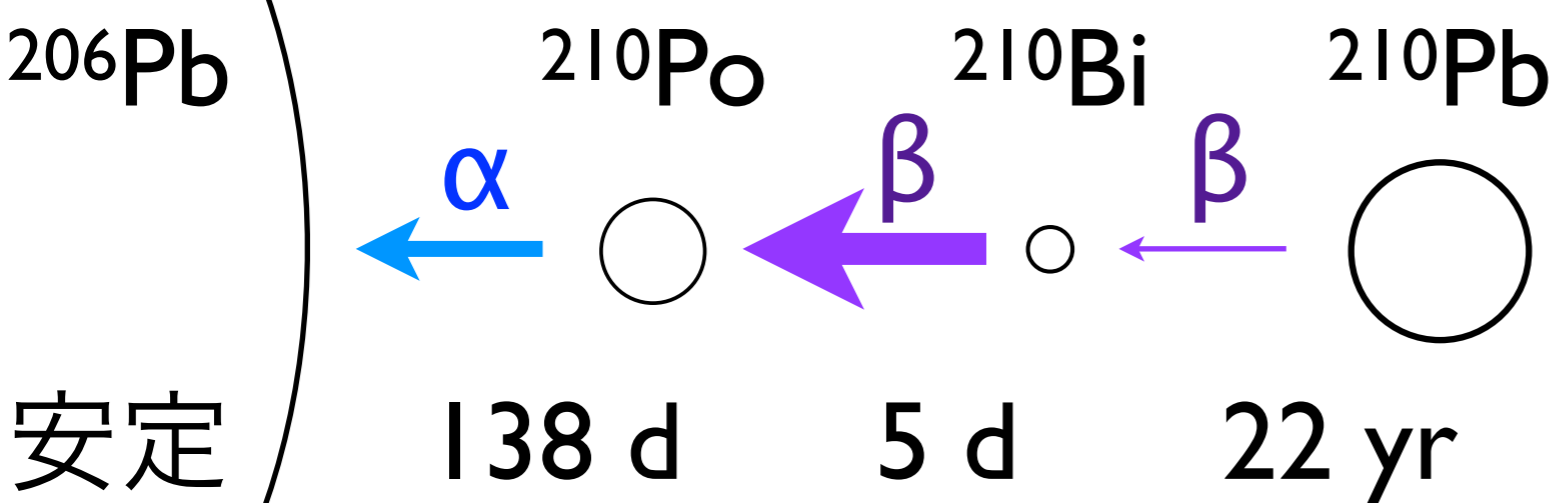
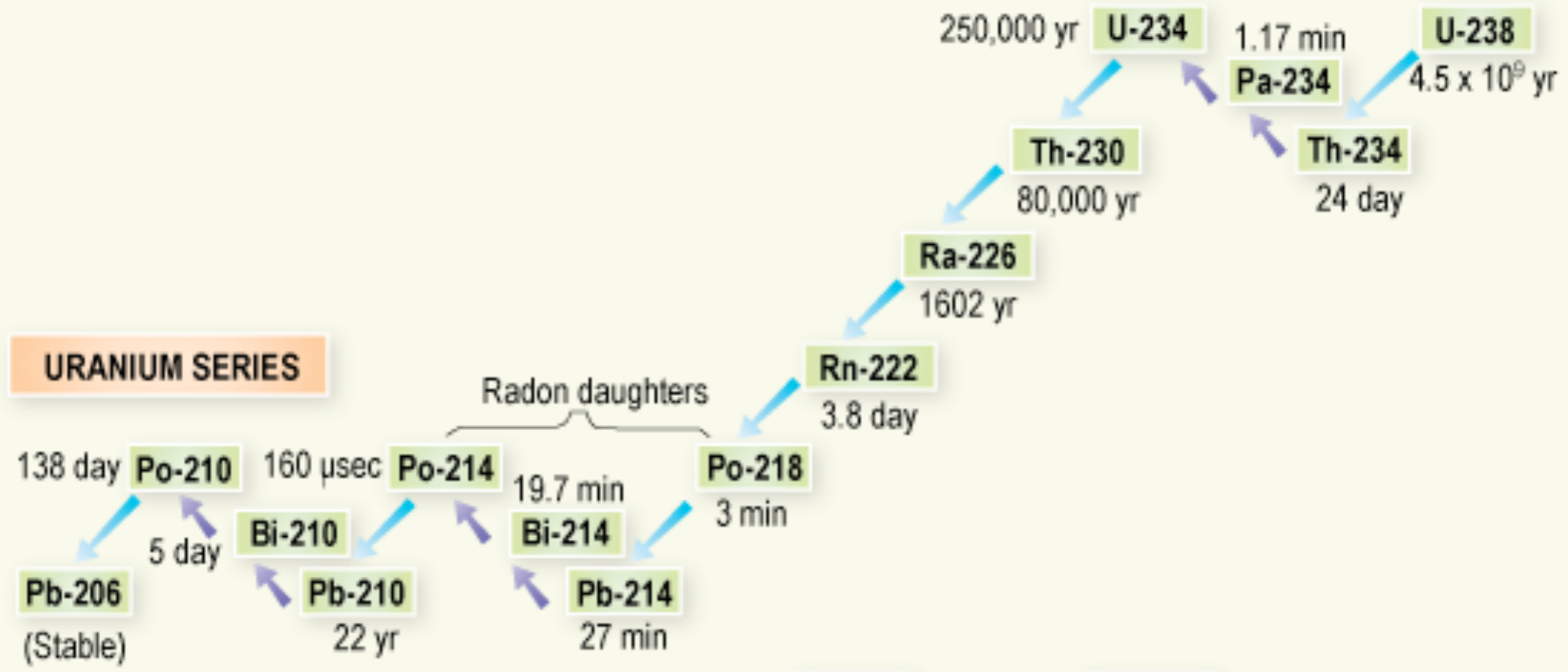
- (4n) トリウム系列
- (4n+1) ネプツニウム系列
- (4n+2) ウラン系列
- (4n+3) アクチニウム系列

放射平衡



壊変 (崩壊) 系列

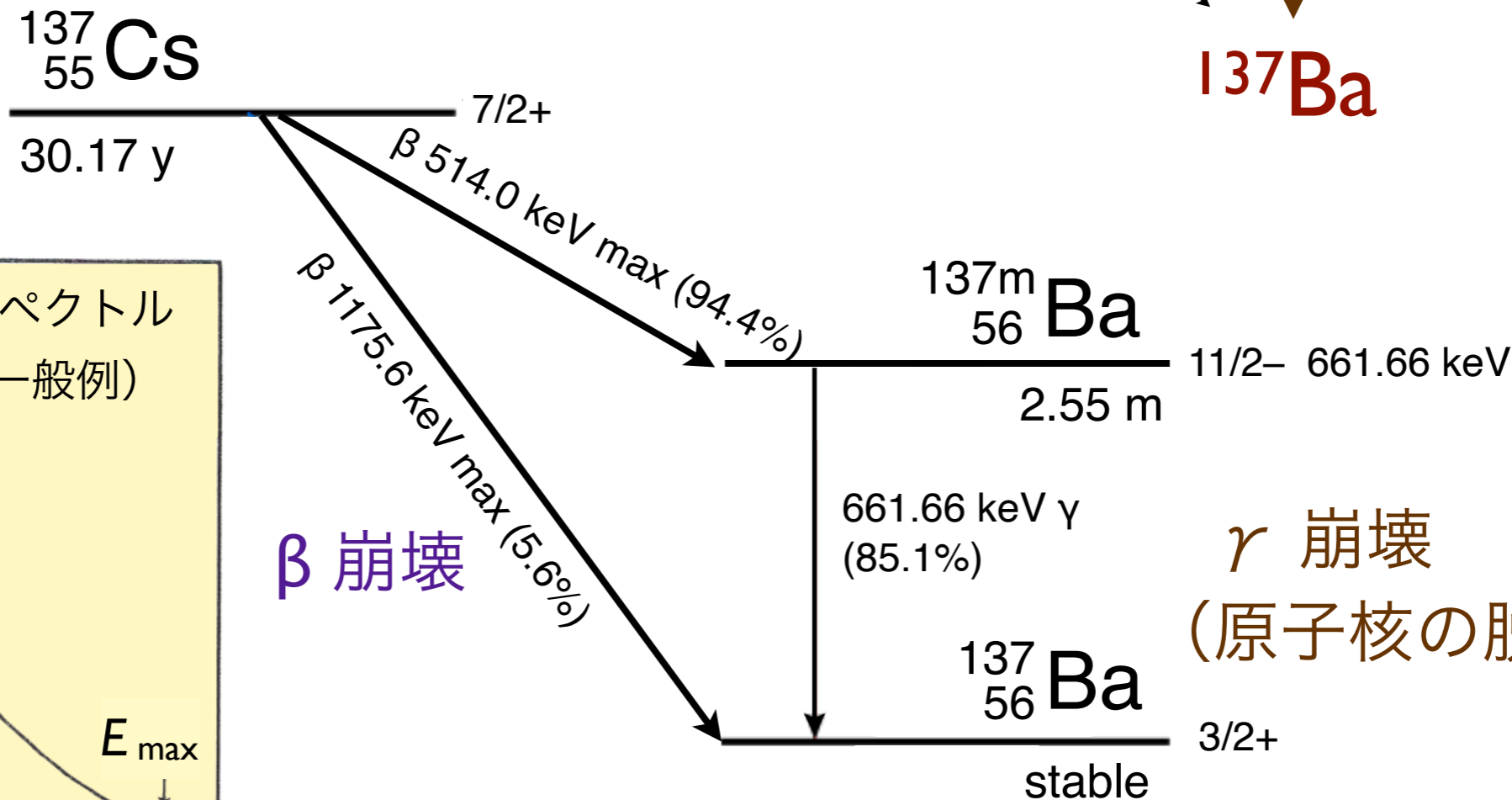
(4n+2) ウラン系列



放射平衡

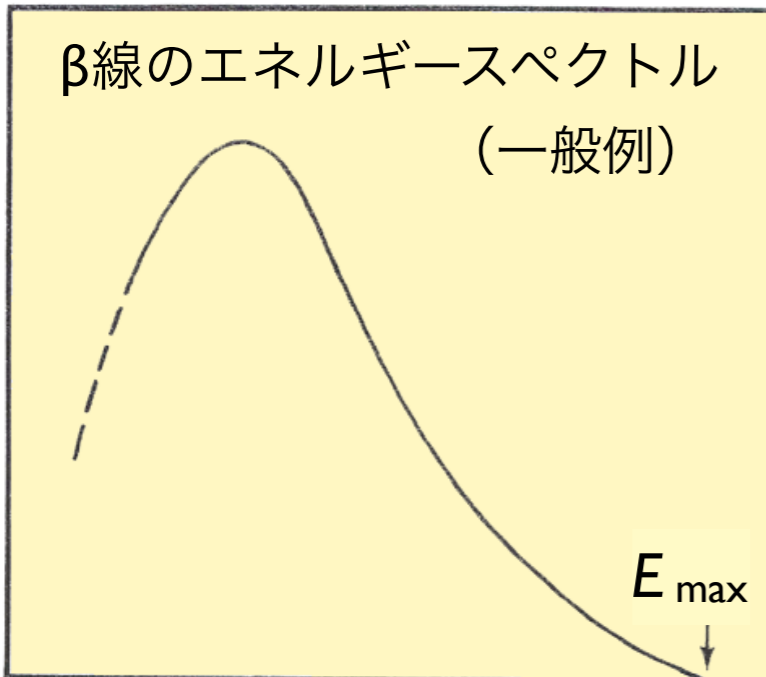


例： ^{137}Cs

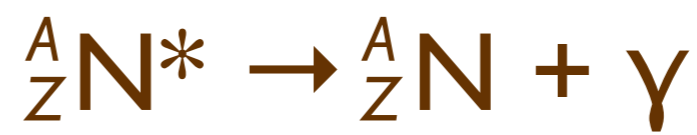
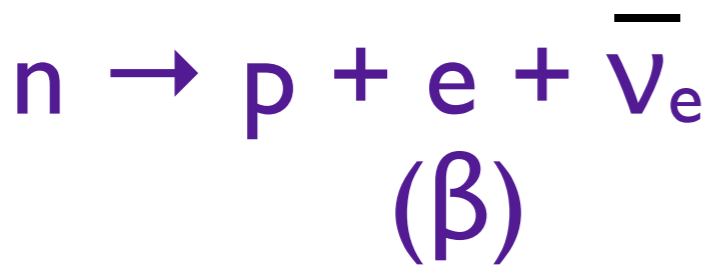


γ 崩壊
(原子核の脱励起)

粒子数の分布

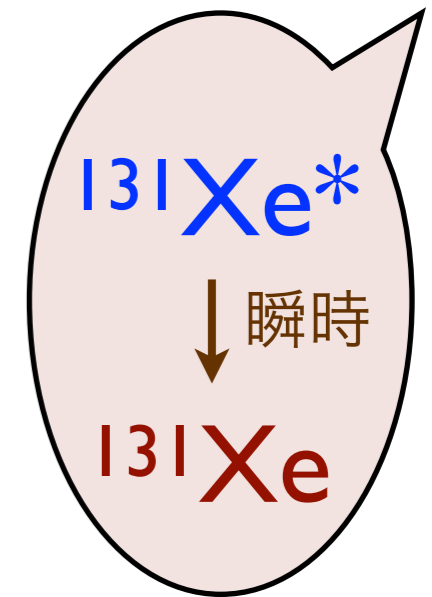
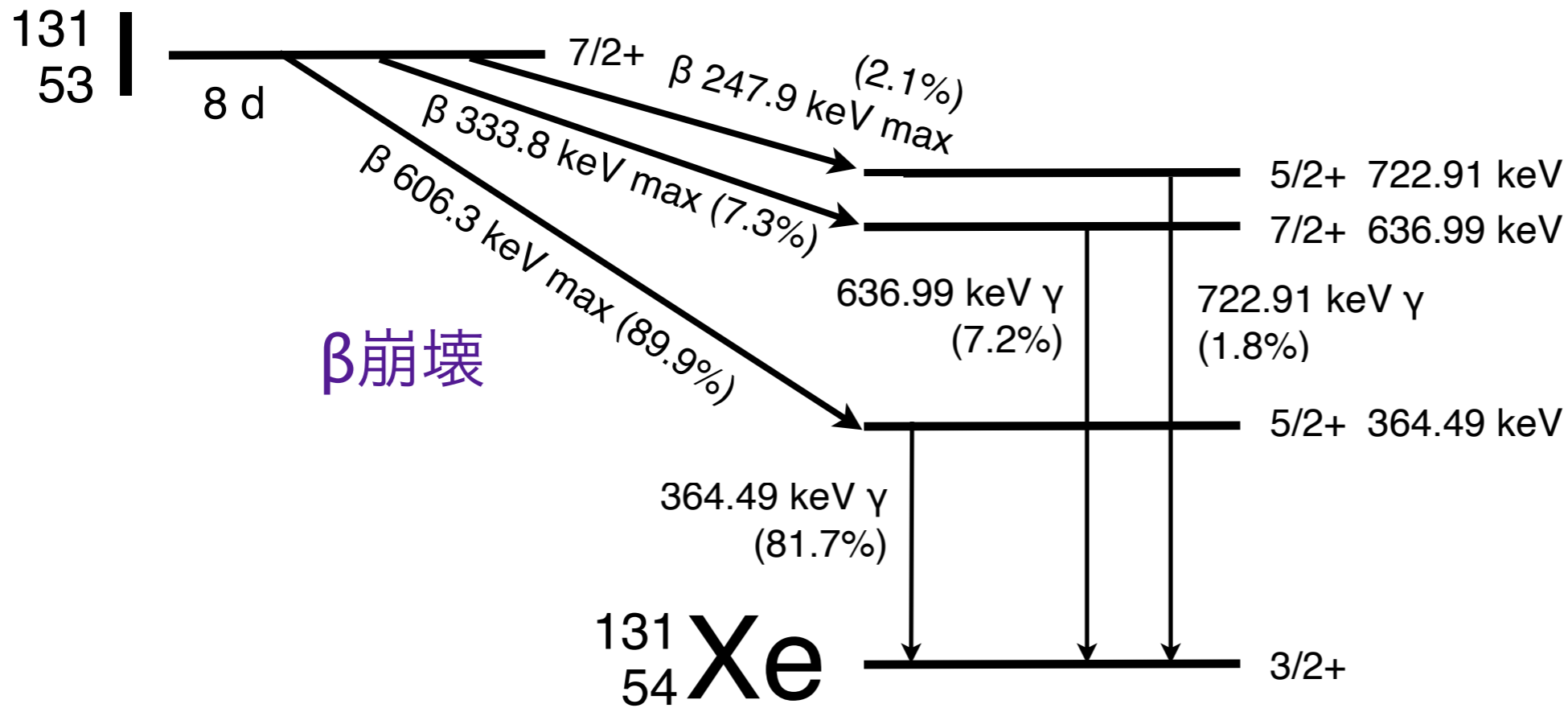


β 線 (連続スペクトル)

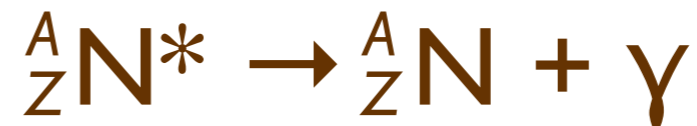


γ 線 (定まったエネルギー)

γ 線のエネルギーで核種を同定

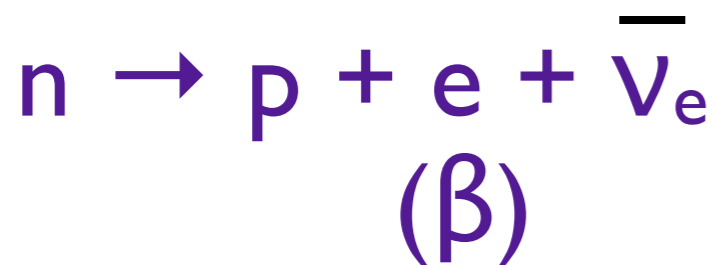


γ 線：原子核の脱励起



γ 線（定まったエネルギー）

β 線（連続スペクトル）



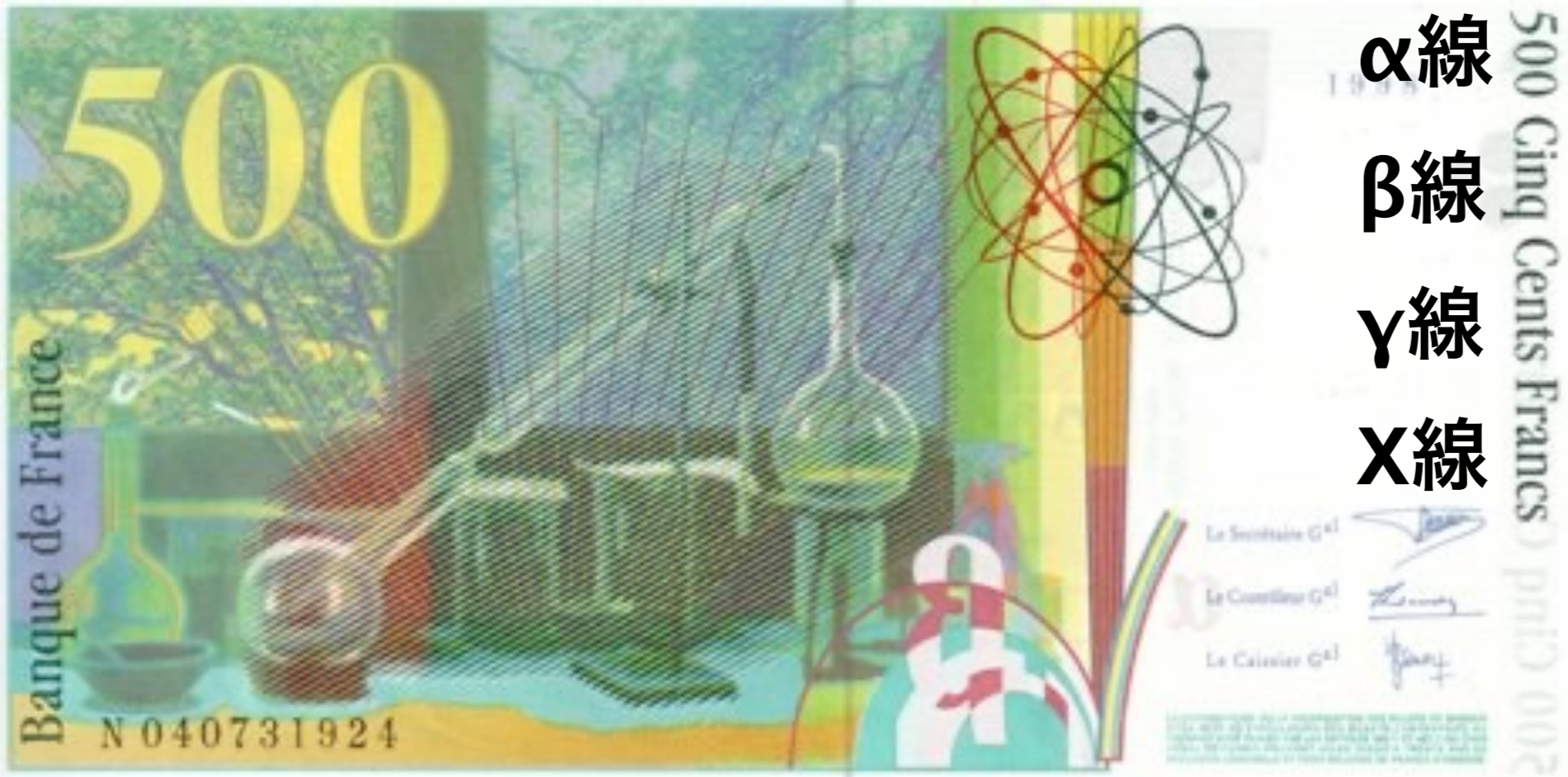
放射線とは？



M. Curie & P. Curie



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）

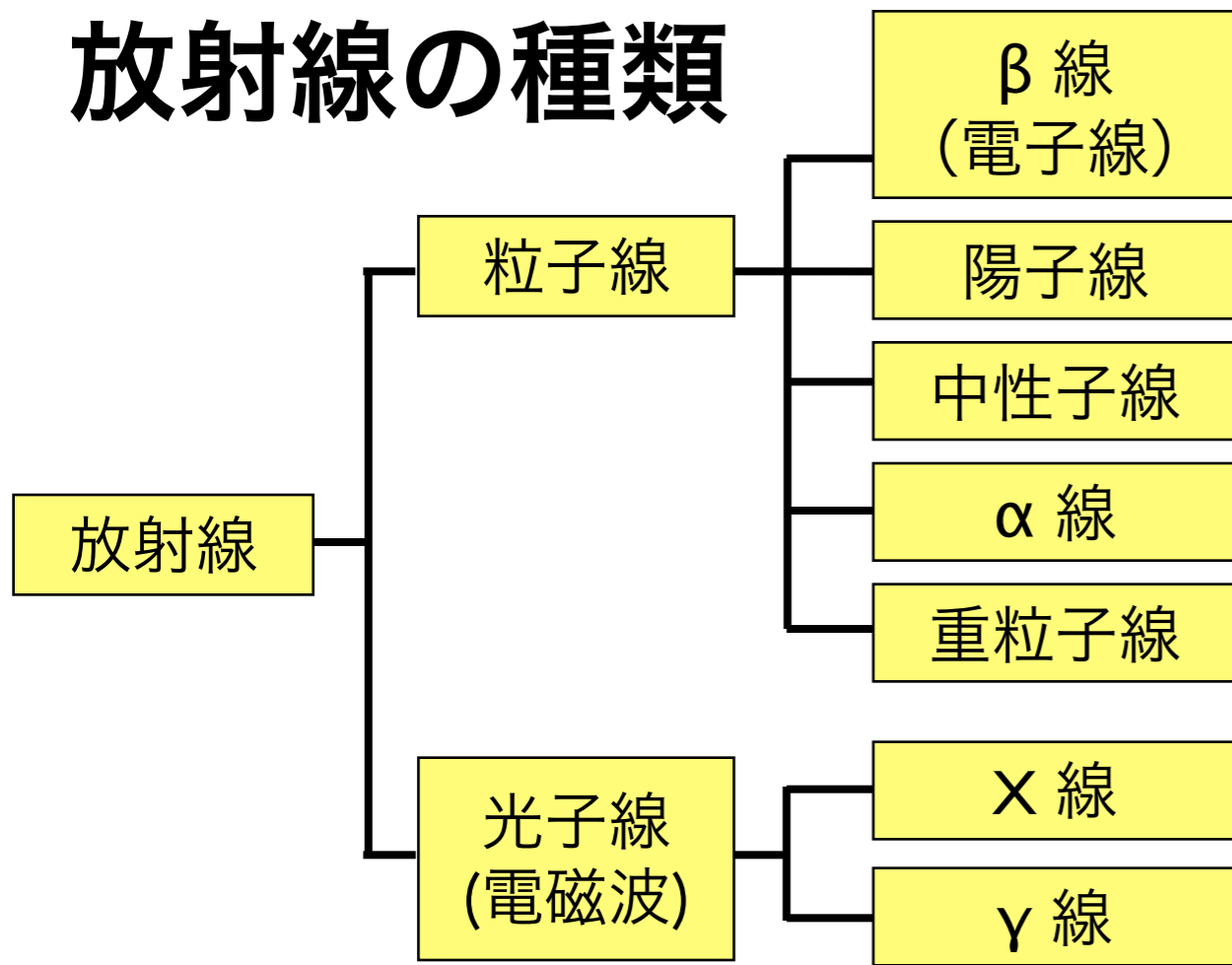
VIDEO

放射線とは

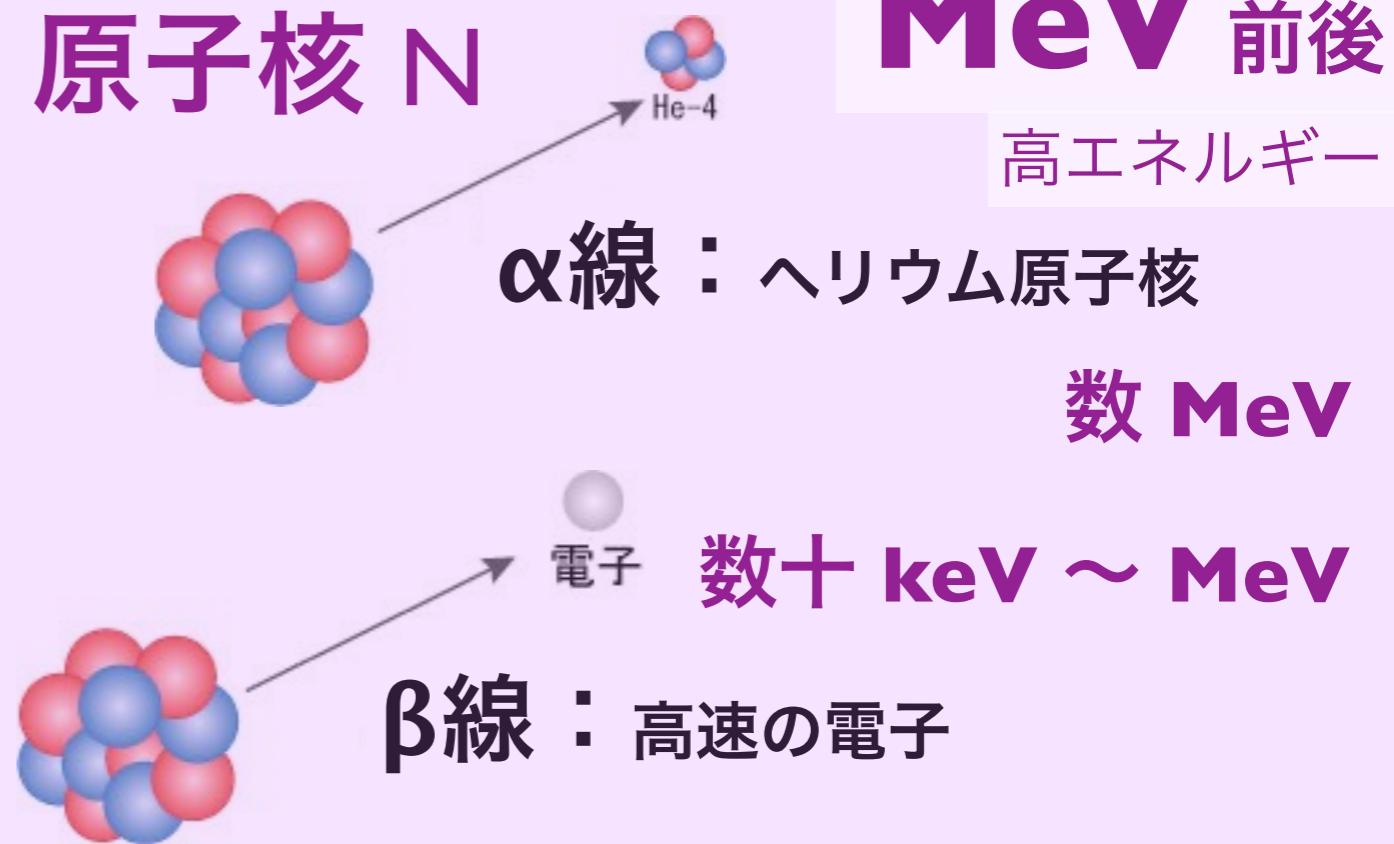
日本原子力文化振興財団：エネコチャンネルのビデオ映像「探検！身近な放射線」より抜粋

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

放射線の種類



原子核 N



MeV 前後

高エネルギー

数 MeV

数十 keV ~ MeV

数十 keV ~ MeV

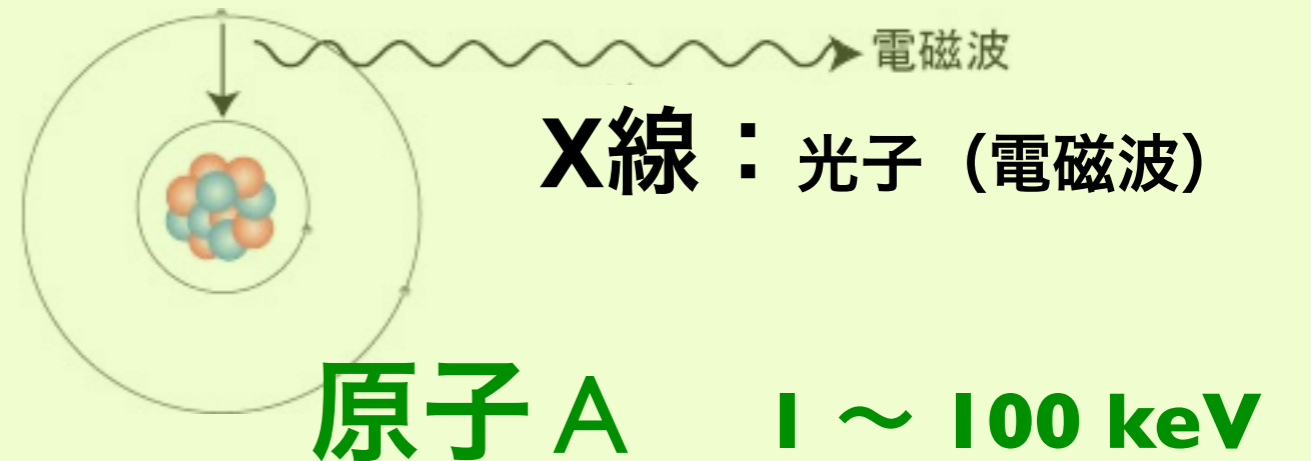
放射線のもつエネルギーは？

☞ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

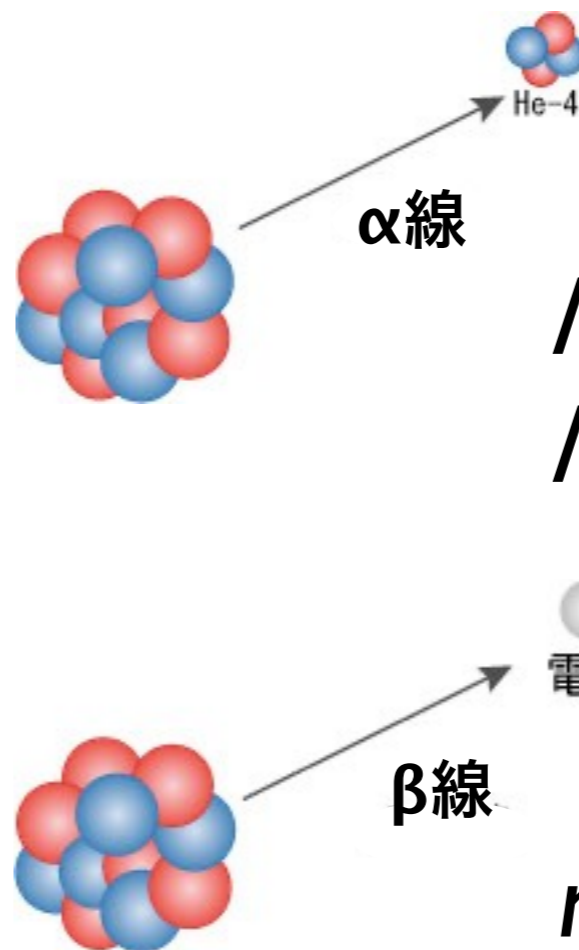
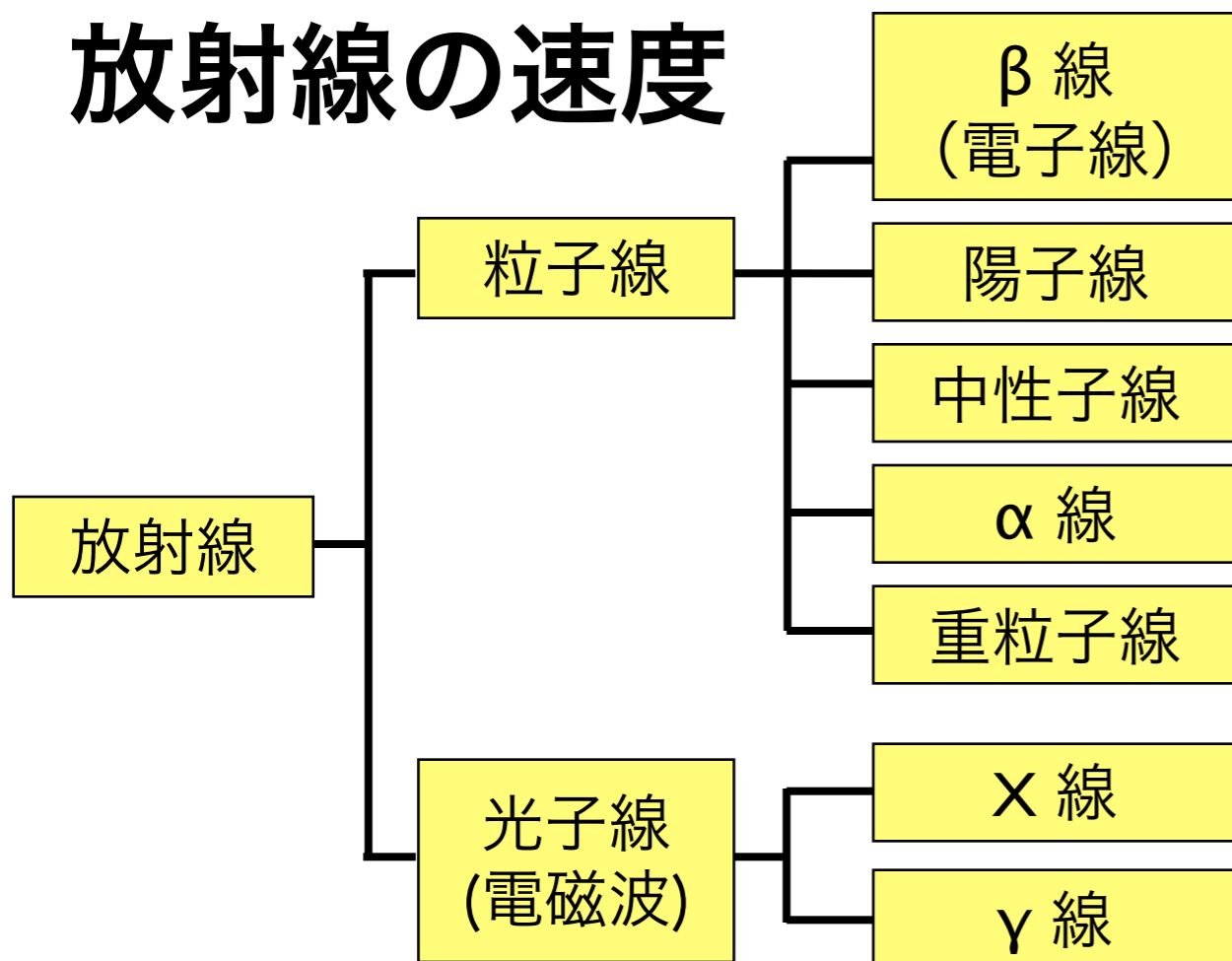
高エネルギー **MeV** 前後

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

(例：水素原子 1s 基底準位)



放射線の速度



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

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

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

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



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

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

$$\approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

放射線のもつエネルギーは？

☞ 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)

荷電粒子の質量は？

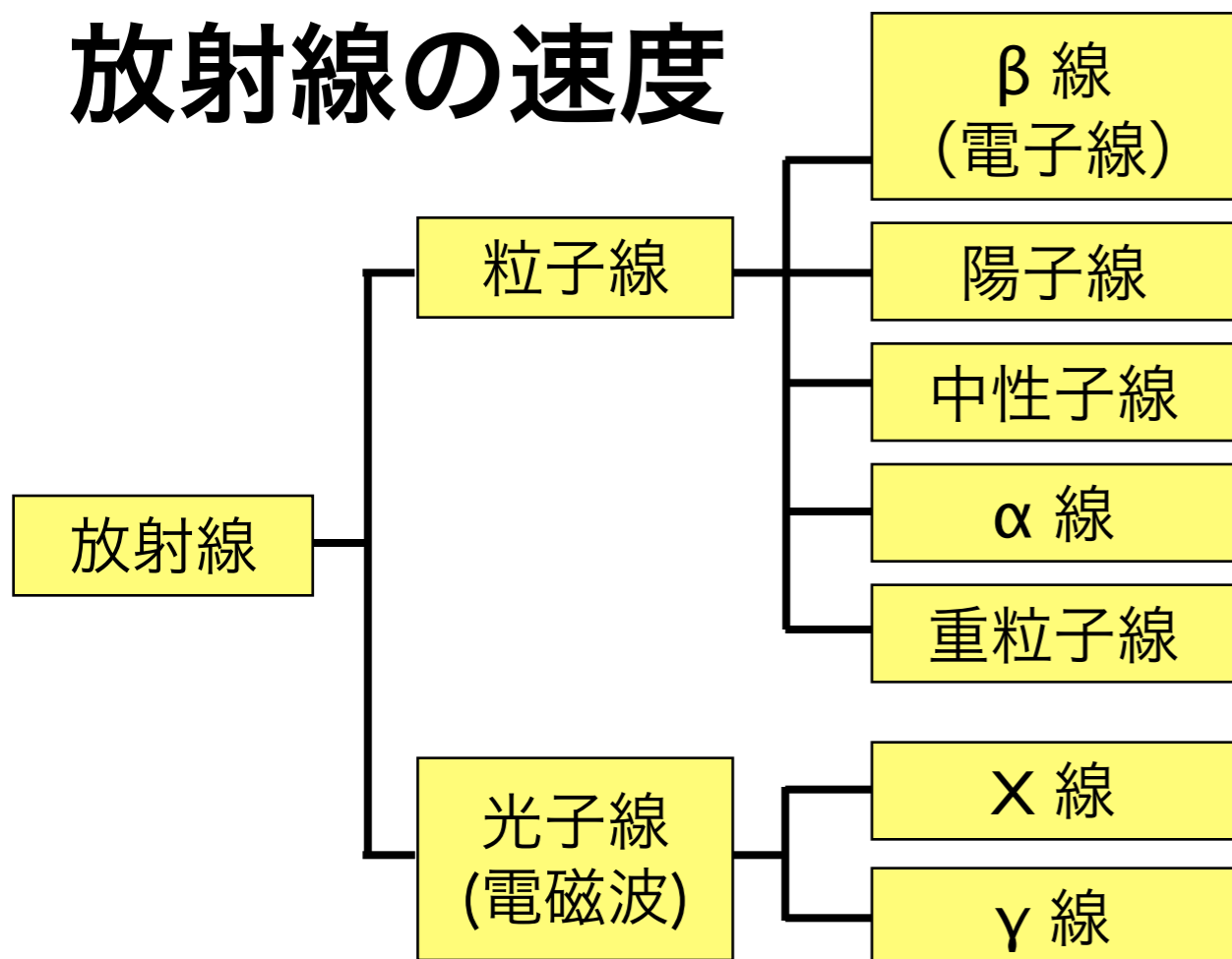
$$T = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} mc^2 \beta^2$$

$$\beta = v/c$$

5 MeV の α線の速度は？

1 MeV の β線の速度は？

放射線の速度



α線

β線

電子

約1800倍

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

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

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

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

荷電粒子の質量は？

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

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

$\approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$

放射線のもつエネルギーは？

☞ 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)

荷電粒子の速度は？

5 MeV の α線は？ / 1 MeV の β線は？

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

$$\beta = v/c$$

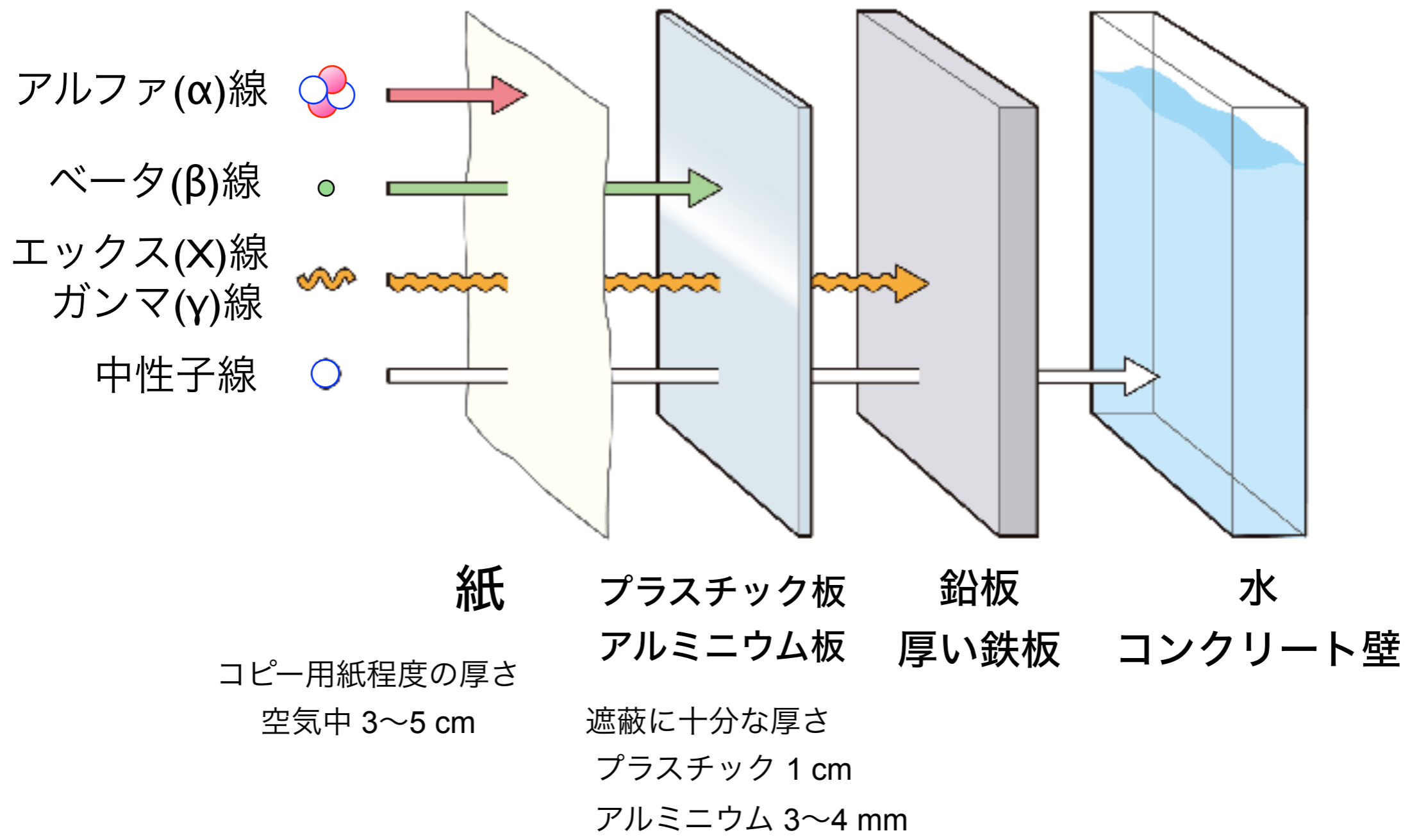
$$T = E - mc^2$$

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

放射線と物質との相互作用

荷電粒子の減速

放射線の種類と透過力



荷電粒子 (α 線・ β 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・ γ 線) の減衰 (減弱)

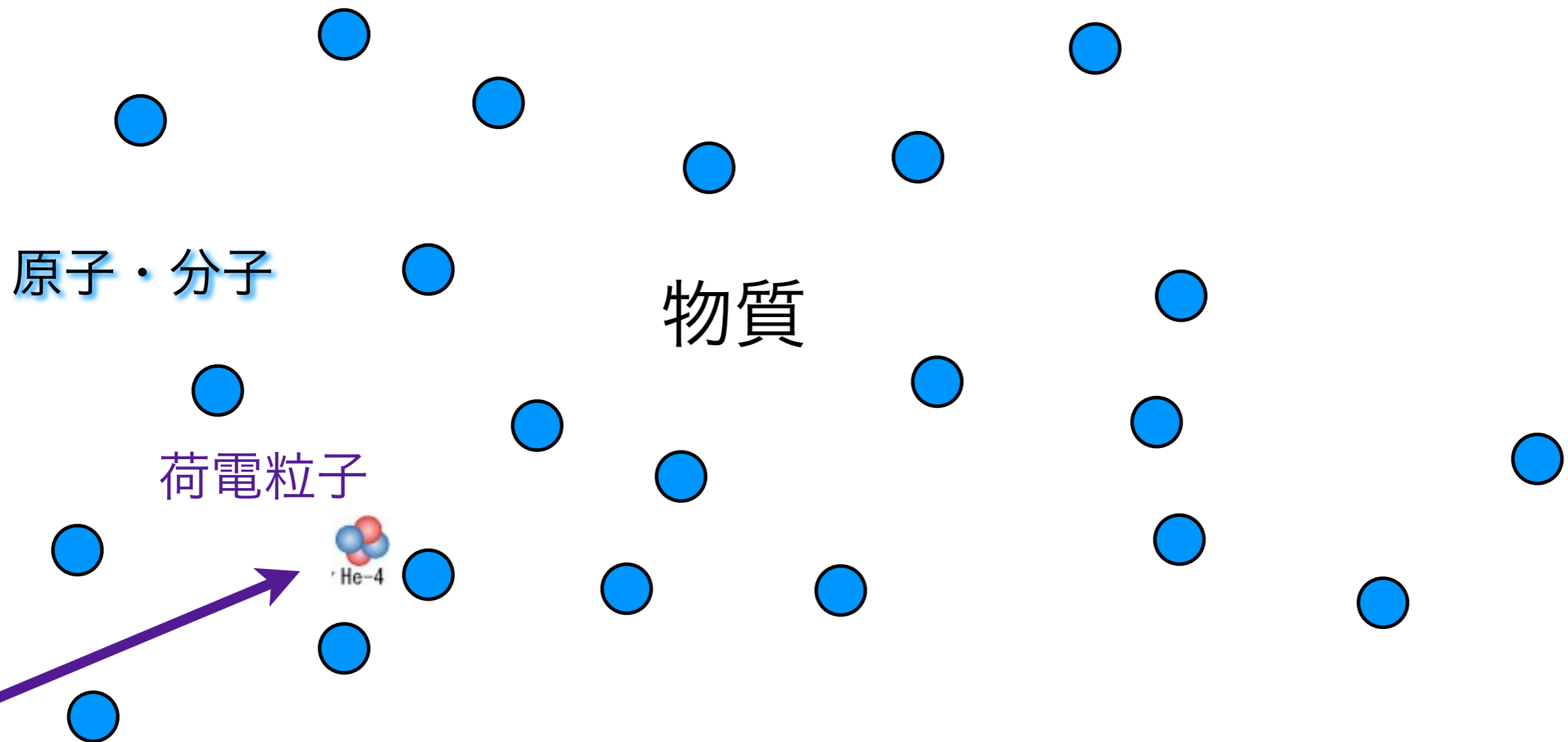
光子は原子に吸収されたり、大きく散乱されて
一気にエネルギーを失う反面、何も相互作用せず
素通りするものも多い。☞

光子数の指数関数的減少

反応断面積 σ (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



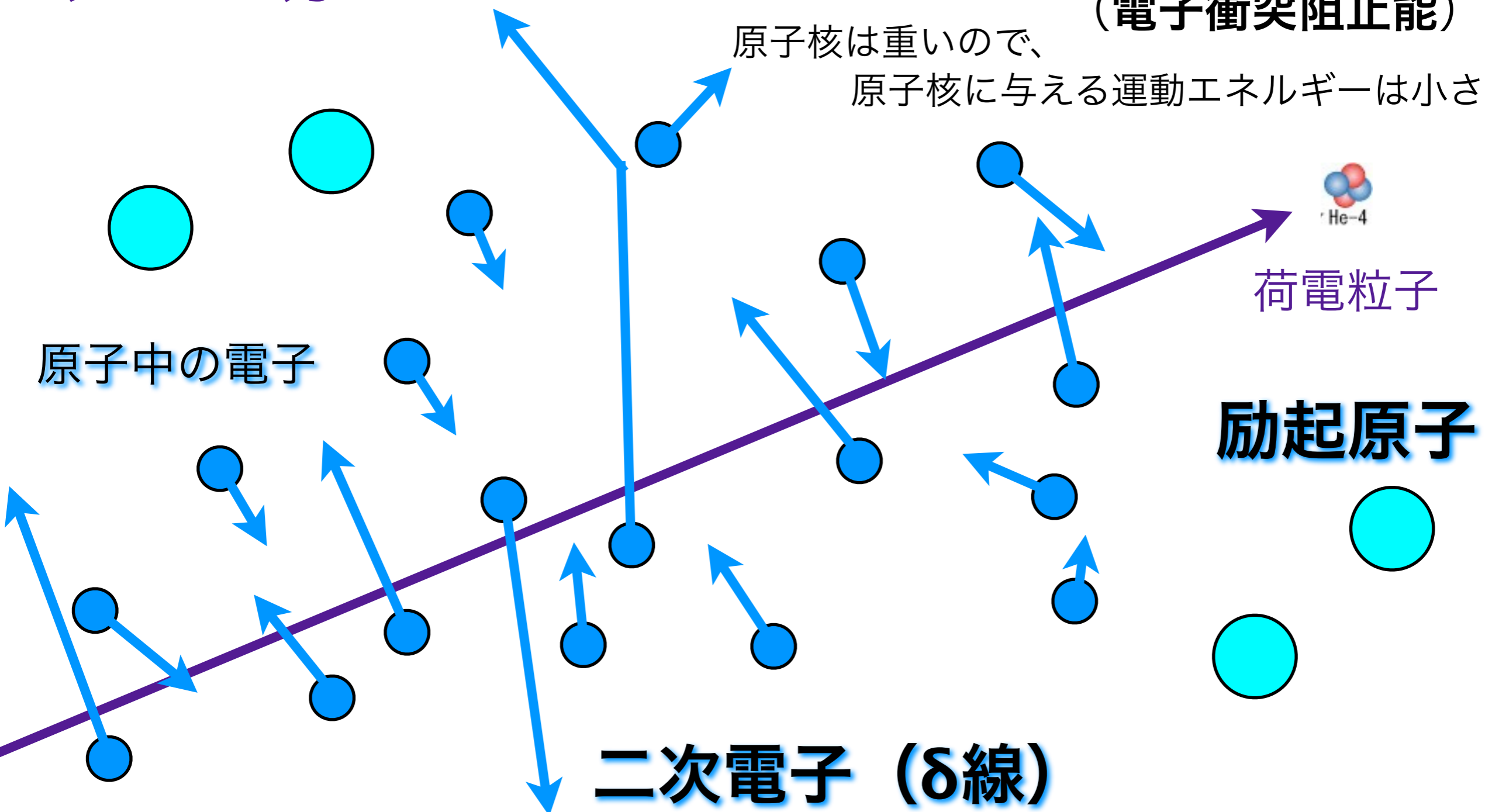
荷電粒子のエネルギー損失過程

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。

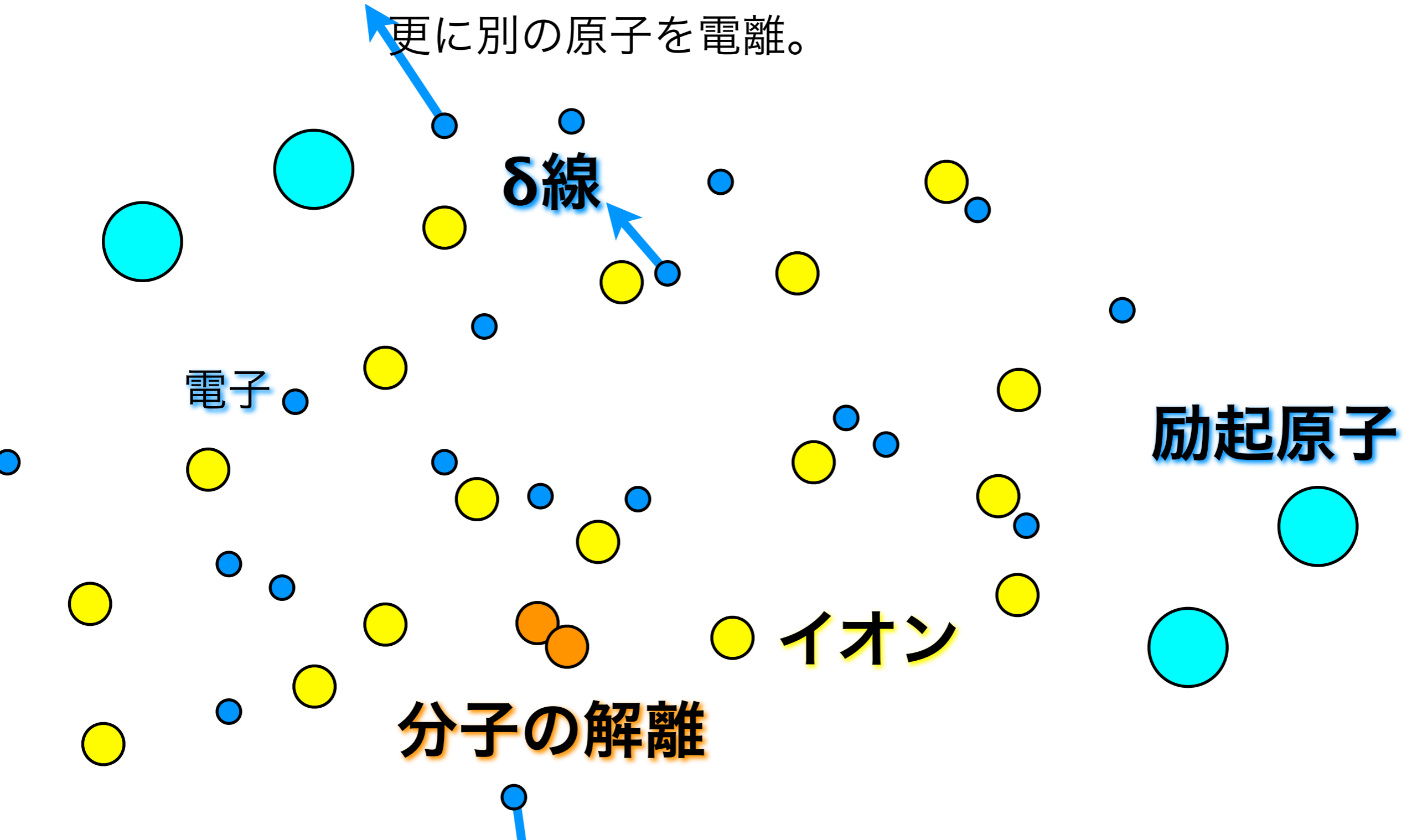
(電子衝突阻止能)

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

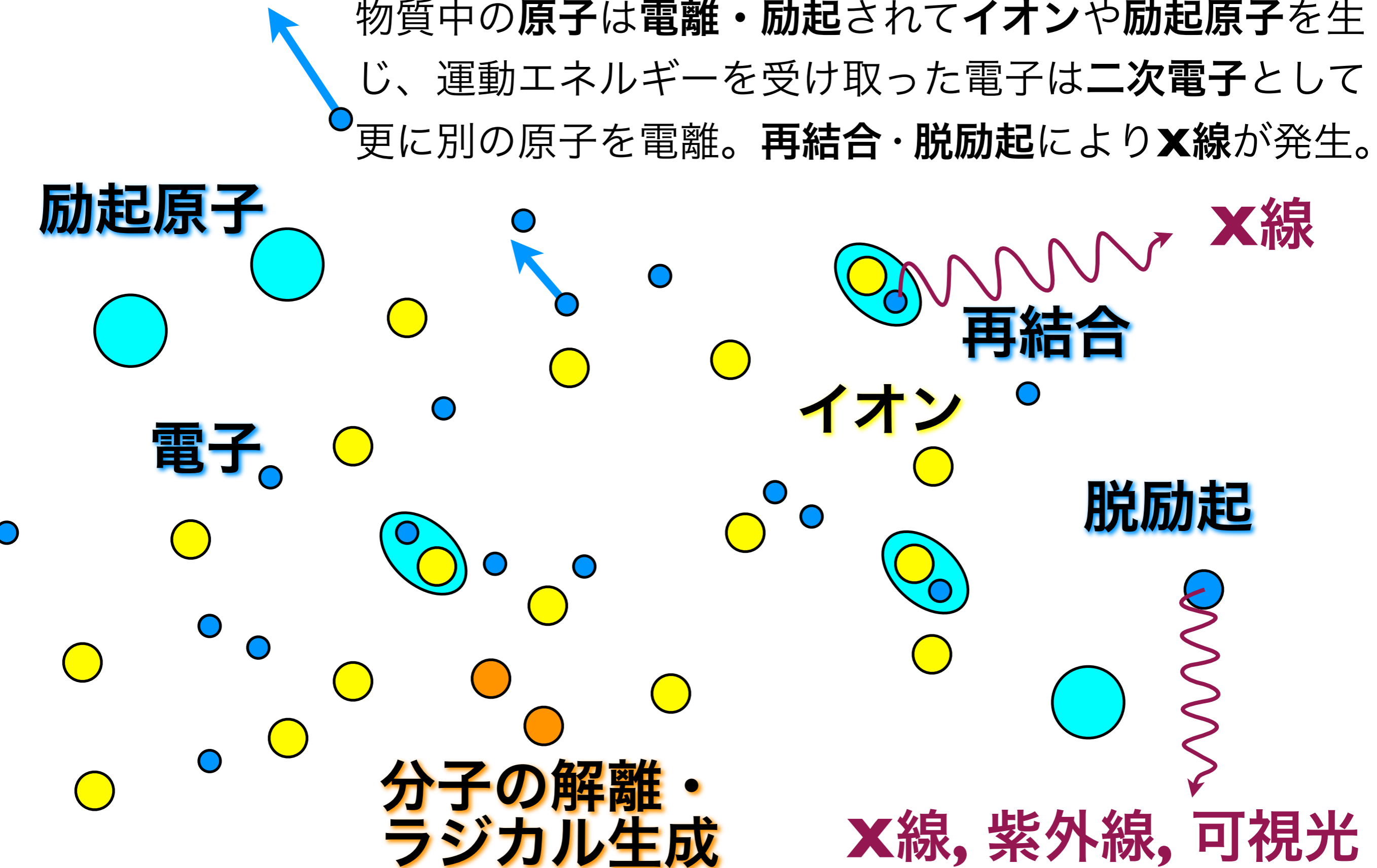
分子の解離・ラジカル生成

再結合

脱励起

X線

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

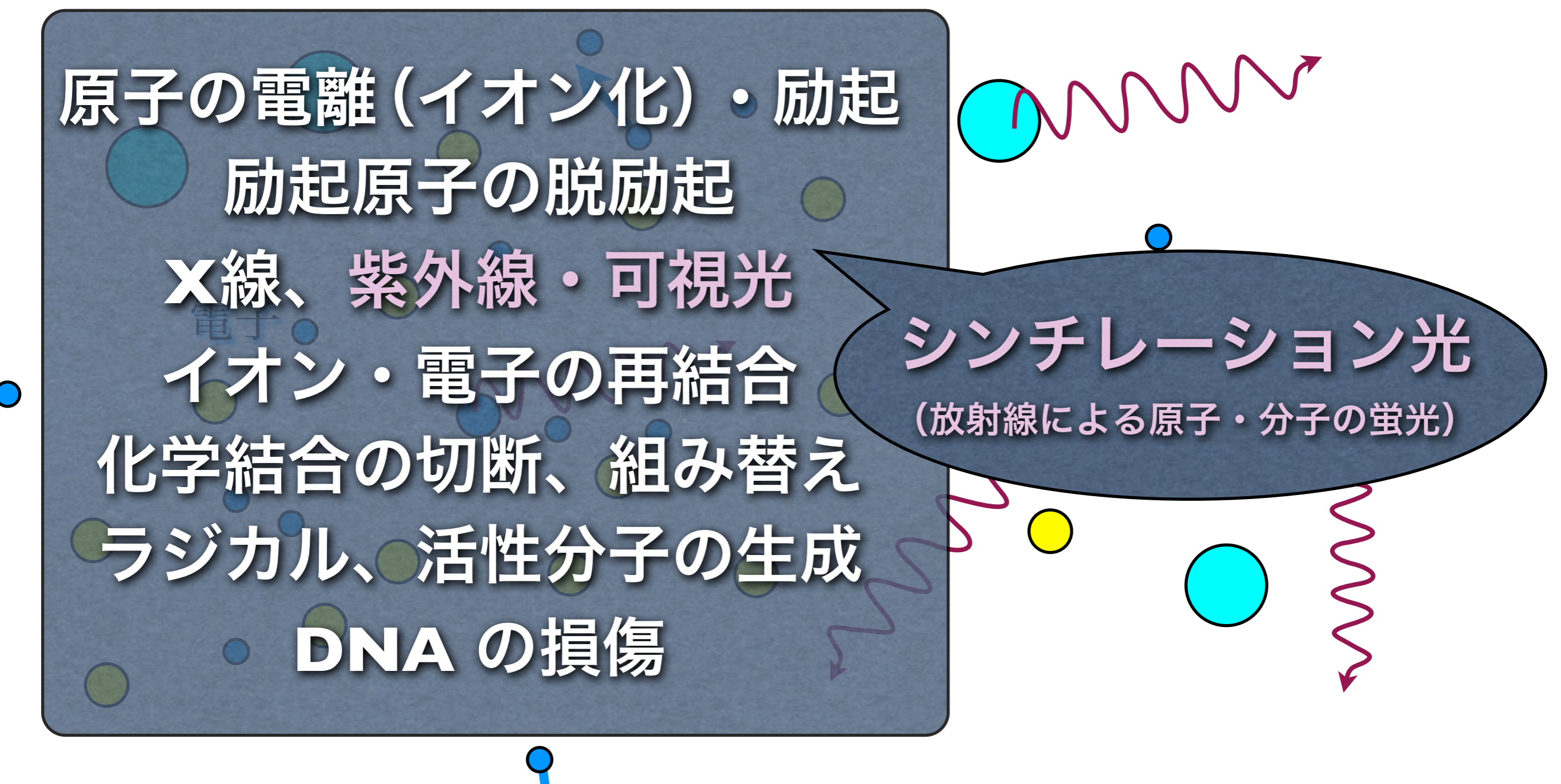
化学結合の切断、組み替え

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)



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) / 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。

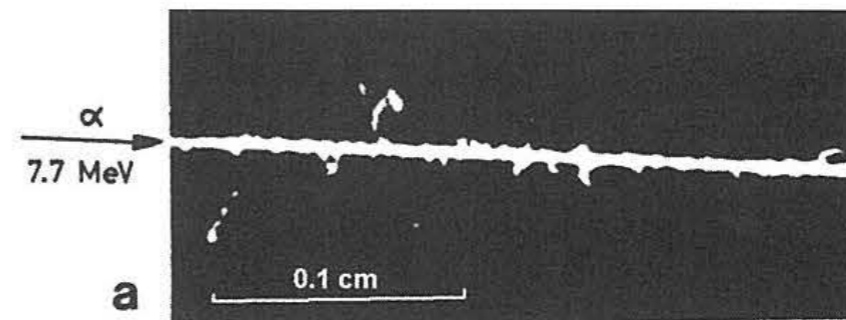
● **軽い粒子**：電子(e⁻)・陽電子(e⁺)

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。

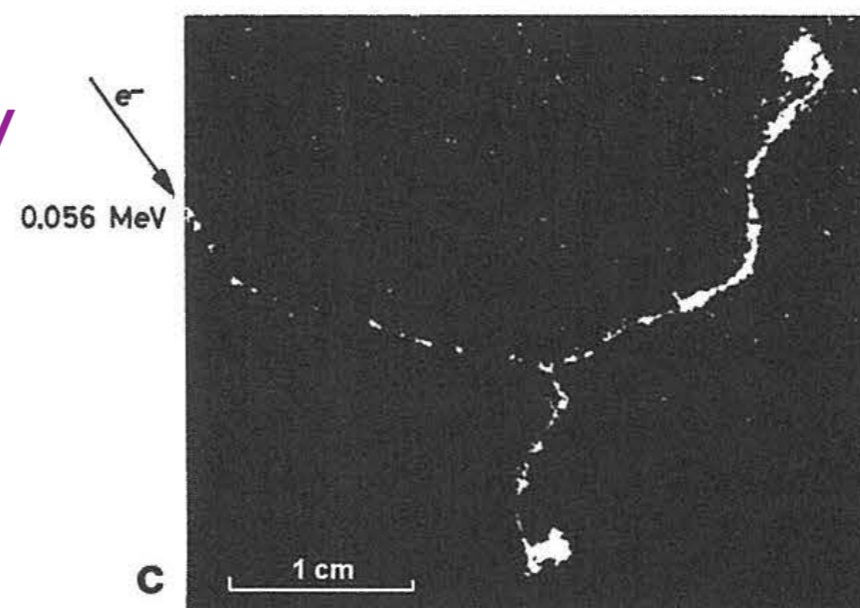
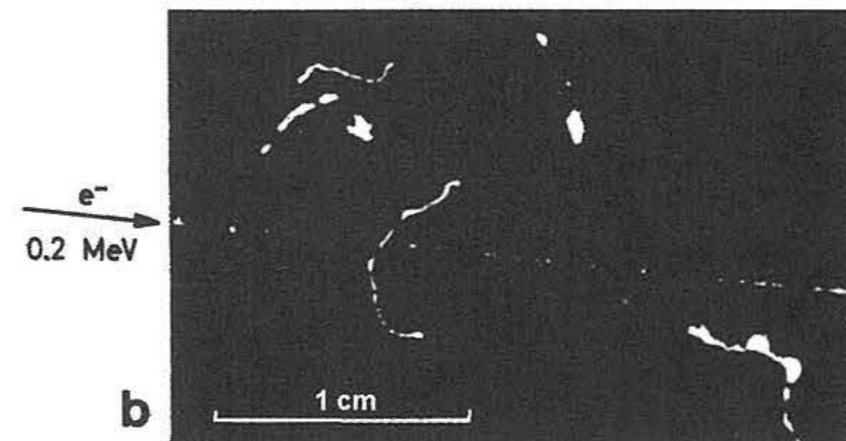
放射線の軌跡

霧箱による観察

α -ray
7.7 MeV



0.2 MeV
 β -ray
0.056 MeV



γ -ray
0.047 MeV

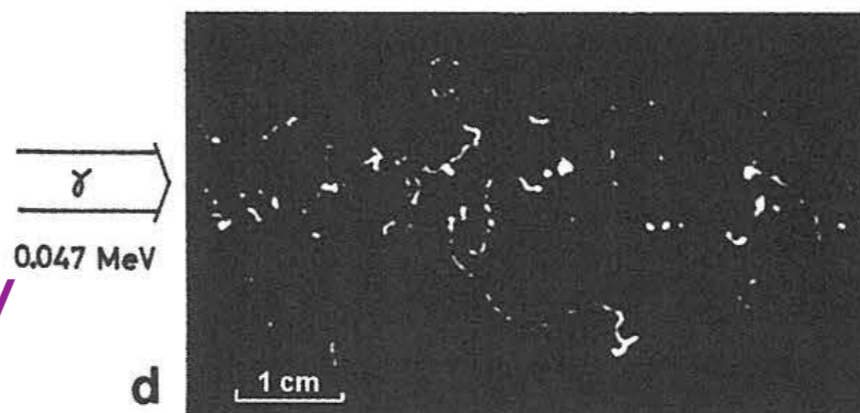


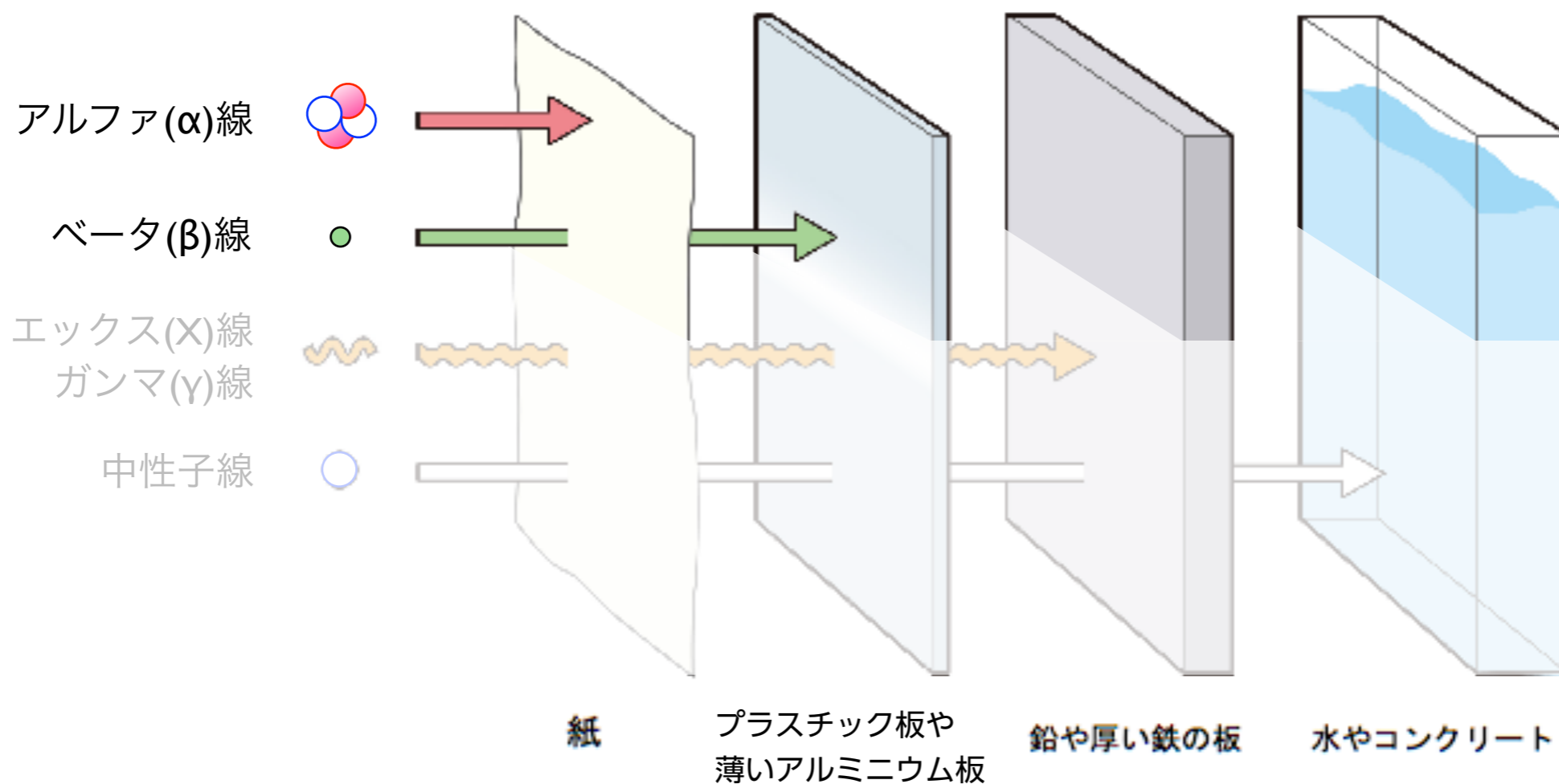
Figure 7.5 Cloud chamber tracks of α , β , (e^-), and γ -rays at 1 bar in air ((a), (b), and (c)) and in methane (d). (From W. Gentner, H. Maier-Leibnitz, and H. Bothe.)

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 / cm²)

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

放射線の種類と被ばく

- **α 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。
- **β 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**。
- **γ 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 γ 線と同様。
数十 keV 程度以下の場合は**皮膚**への影響が**問題**。

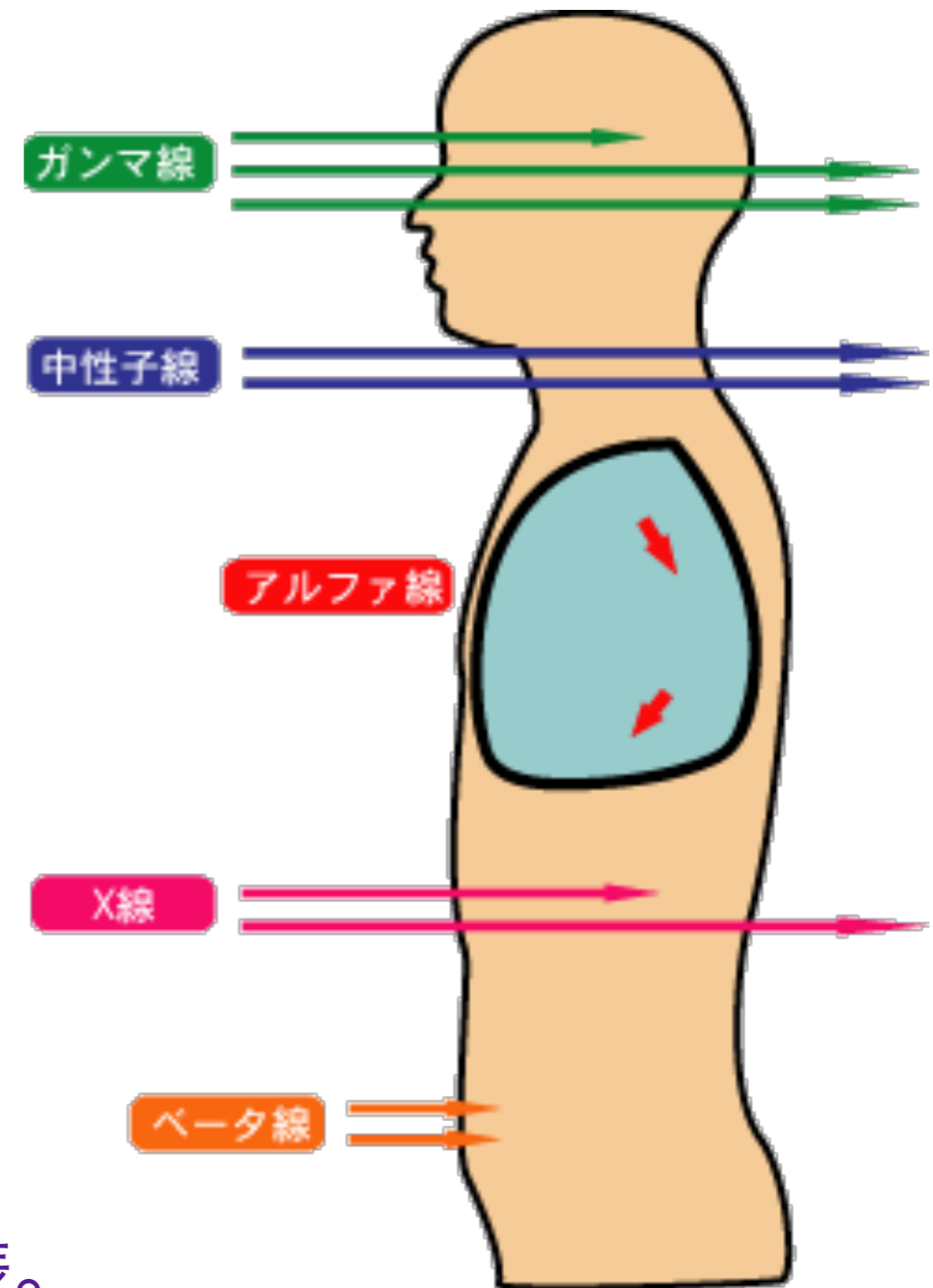


図3 人体を透過する放射線

原発北西方向の汚染と「ホットスポット」

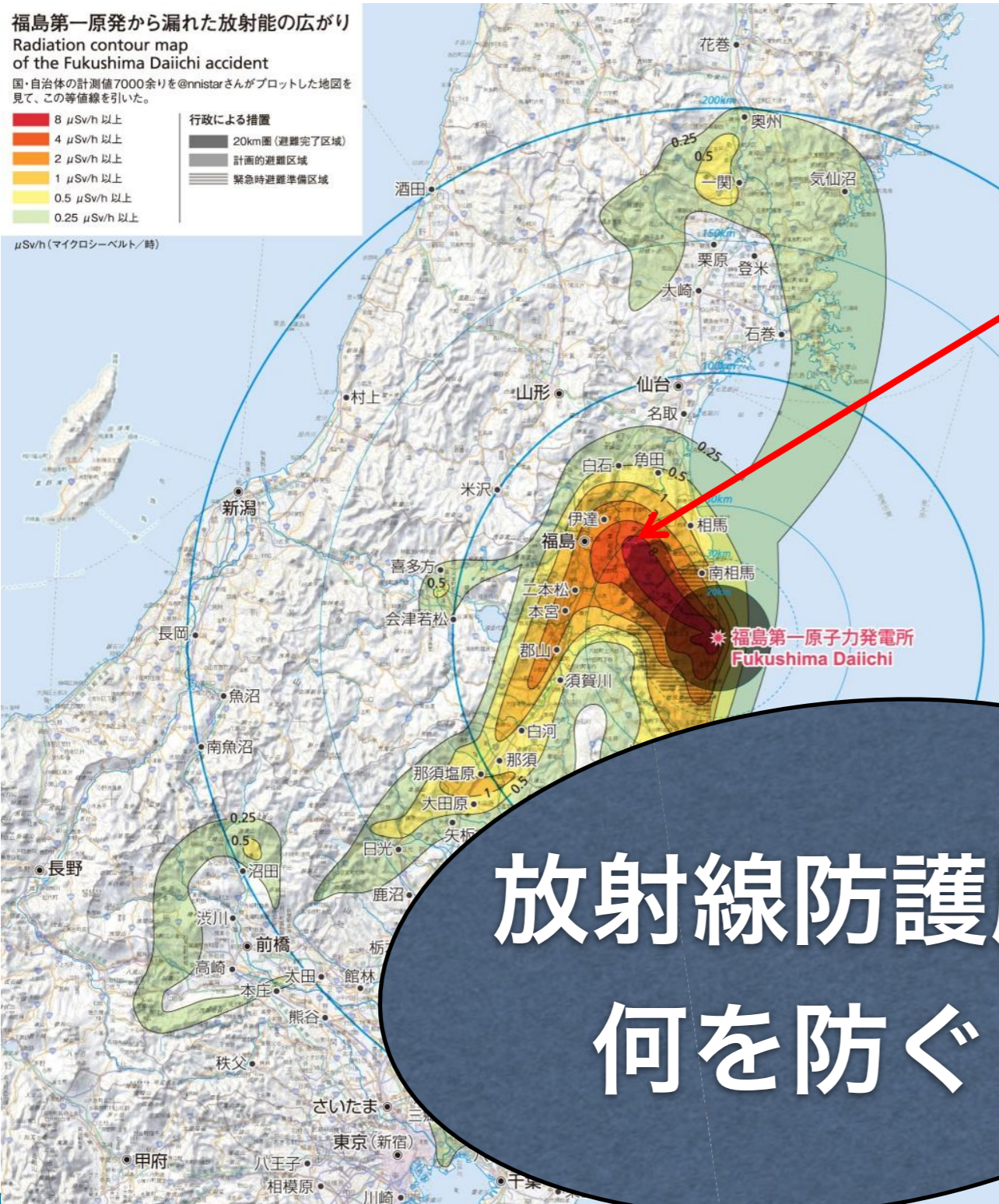
福島第一原発から漏れた放射能の広がり
Radiation contour map
of the Fukushima Daiichi accident

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

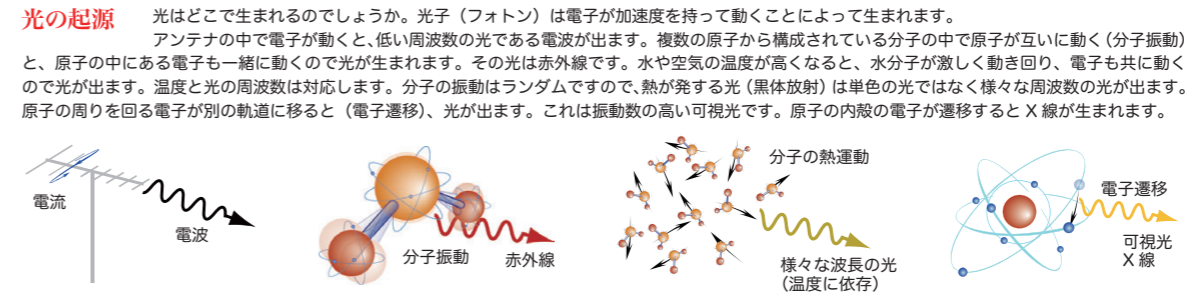
三訂版7月26日(初版4月21日)
等値線作成: 早川由紀夫(群馬大学) (kipuka.blog70.fc2.com/)
@nnistarさんの地図 (www.nnistar.com/gmap/fukushima.html)
Contour lines drawn by Yukio Hayakawa (Gunma Univ.),
Source: @nnistar
地図製図: 萩原佐知子
背景地図には電子国土ポータル (portal.cyberjapan.jp) の地図を使用しました。

放射線と物質との相互作用

光子の減衰

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。

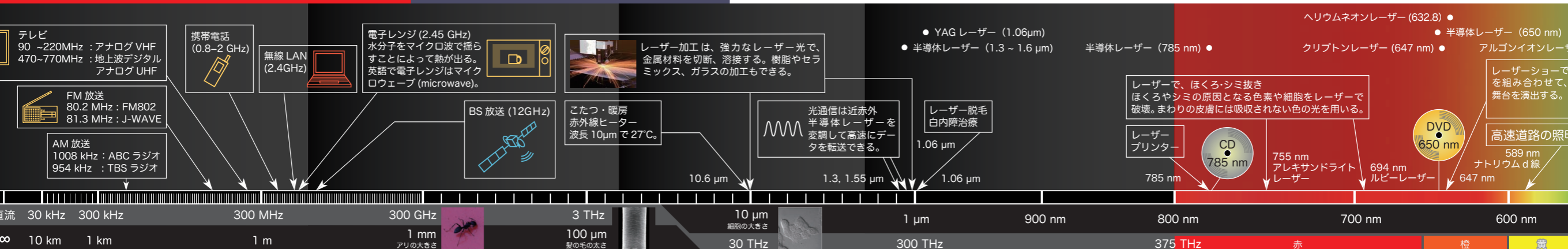


波としての光

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す。光子のエネルギーは振動数に比例しています。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
- レーザー脱色: 785 nm
- 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
- 647 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。

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

花火の色は、金属元素の炎色反応の色。それぞれの元素特有の色を出し燃える。

発光ダイオードは、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と赤が必要。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。もとの光から色が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。スティブン・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。

ハレー彗星

アメリカで光で進む宇宙船

一家に1枚 光マップ 科学技術週間 <http://stw.mext.go.jp>

第1版発行: 2008年3月31日 製作・著作: 文部科学省 監修: 河田 聡 (独立行政法人理化学研究所) 制作: 河田 聡、藤田克昌、庄司 暁 協力: NPO 法人フロンティア・アソシエイツ、河田芹葉 編集: 株式会社アドスリー 参考文献: 『超解題』 写真・資料提供: 出雲科学館、株式会社 INAX、株式会社 Impress Watch、独立行政法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、大久保浩一、大阪大学、金沢大学、川瀬見道、株式会社キャッツ、桑畑 進、財団法人高輝度光科学研究センター、国立天文台、コスモレーベン株式会社、株式会社テクノックス工房、株式会社ニコン、株式会社...

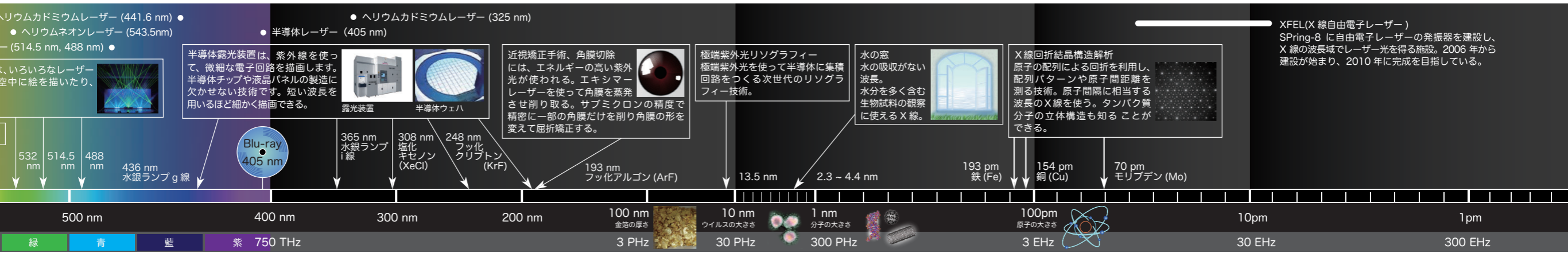
一家に1枚 光マップ <http://stw.mext.go.jp/>

「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) 光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、 3×10^8 m/s です。

光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。光を光子 (フォトン) といい、光子の粒々がたくさん集まって「電子」の流れの集まりで、水が「水分子」の集まりなように、速度が決まります。光子一つ一つは、光の色、つまり波長 (あるいは周波数) を持っています。

光に関連するノーベル賞

- | | | | |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1901年 X線の発見 (W. レントゲン) | 1924年 X線分光学 (K. M. G. シーグバーン) | 1961年 γ 線の共鳴吸収とメスbauer効果の発見 (R. L. メスbauer) | 1997年 レーザークーリング法の開発 (S. チュー、C. コーエンタウジ、W. D. フィリップス) |
| 1907年 干渉計の考案と分光学の研究 (A. マイケルソン) | 1927年 コンプトン効果の発見 (A. H. コンプトン) | 1964年 レーザー、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) | 1999年 フェムト秒化学 (A. H. ズウェイル) (化学賞) |
| 1908年 光の干渉を利用した天然色写真 (G. リップマン) | 1930年 ラマン効果の発見 (C. V. ラマン) | 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) | 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) |
| 1909年 無線通信 (G. マルコーニ、C. F. ブラウン) | 1932年 量子力学の創始 (W. K. ハイゼンベルグ) | 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) | 2002年 宇宙ニュートリノ検出 (R. デービス Jr.、小柴昌俊) |
| 1914年 結晶によるX線回折 (M. フォン・ラウエ) | 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) | 1966年 光ポンピング法による原子の励起 (A. カスレ) | 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) |
| 1915年 X線結晶解析 (W. H. ブラッグ、W. L. ブラッグ) | 1953年 位相差顕微鏡の発明 (F. ツェルニケ) | 1971年 ホログラフィーの発明 (D. ガボア) | 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) |
| 1918年 エネルギー量子説 (M. K. E. L. プランク) | 1954年 波動関数の統計的解釈の提唱 (M. ボルン) | 1974年 電波天文学における先駆的研究 (M. ライル) | 2005年 光コヒーレンスの量子理論 (R. J. グラウバー) |
| 1921年 光電効果の法則の発見 (A. アインシュタイン) | 1954年 原子核反応と γ 線に関する研究 (W. ボーテ) | 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) | 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. ヘンシュ) |
| 1923年 光電効果の研究 (R. A. ミリカン) | 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) | 1981年 レーザー分光学 (N. ブルームバーク、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) | |

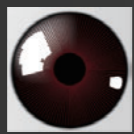


紫外光	軟X線 (極短紫外を含む)	X線	γ 線
目に見えない光、外殻電子遷移エネルギー	内殻電子遷移エネルギー、水に吸収されない	内殻電子遷移エネルギー	原子核・素粒子の遷移エネルギー
<p>光学顕微鏡は微小な物体を拡大して観察できる。物体の反射率や光吸収、蛍光発光の分布をもとに観察像をつくる。分子の振動や偏光特性を観察する顕微鏡もある。紫外から近赤外の広い波長範囲の光が使われる。</p> <p>昆虫の可視域 ミツバチの可視域は紫外から黄色の光まで。人間には見えない花の模様が見える。</p> <p>ブラックランプの発する紫外線は目に見えないが、周りの物質を発光させる。</p> <p>地球上の生物に害のある紫外線を遮ってくれる。</p> <p>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。</p> <p>酸化チタン</p> <p>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。</p>	<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>ウォルター鏡</p> <p>ゾーンプレートでX線を回折して集光する方法もある。</p> <p>フレネルゾーンプレート</p> <p>反射には、Mo/Si や Cr/Sc などの多層膜が用いられる。</p> <p>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。</p>	<p>レントゲン写真 からだが見えぬ。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。</p> <p>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。</p> <p>X線天文衛星さく 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。</p> <p>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。</p>	<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>放射線治療 弱い放射線を使えばがん細胞を退治できる。</p> <p>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。</p>

<p>光は横波</p> <p>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。</p> <p>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ろえ、光の透過を偏光制御します。</p>	<p>光の速度は</p> <p>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。</p> <p>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。</p>	<p>太陽の七変化</p> <p>太陽の色は、黄色が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、一瞬だけ赤が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であらに見る珍しい現象です。</p>	<p>色の見え方</p> <p>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。</p> <p>絵の具やインクは光を吸収して色をつくり出します。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てつくり出します。</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

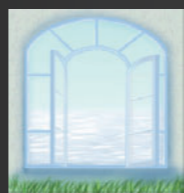
325 nm

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。



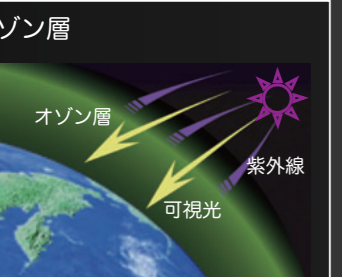
XFEL(X線自由電子レーザー)
SPring-8に自由電子レーザーの発振器を建設し、X線の波長域でレーザー光を得る施設。2006年から建設が始まり、2010年に完成を目指している。



紫外光

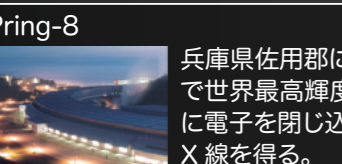
紫外線洗浄
半導体基板や金属、セラミックス、プラスチック表面の洗浄、品質に紫外線を使う。

紫外線殺菌
水と与えずに、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。

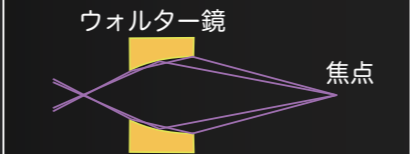
アト秒レーザー
アト秒(atto)は0.000000000000000001秒(0が18個)。そんな一瞬しか光らないパルスレーザー。このレーザーを使えば、電子が止まって見える。100アト秒では光はたった30nmしか進めない。真空紫外線や軟X線の光でつくられる。

軟X線 (極短紫外を含む)

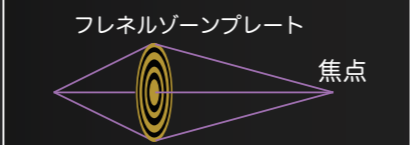
レーザープラズマ光源
高出力のレーザー光をターゲットに当てて発生するプラズマから軟X線を出す。未来の半導体製造光源。

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。

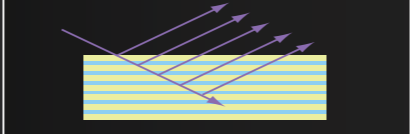
X線のレンズ
軟X線やX線の領域では、ガラスも金属も屈折率がほぼ1.0で、反射も屈折もしない。浅い角度の反射でX線の進行方向を変えて集光する。



ゾーンプレートでX線を回折して集光する方法もある。



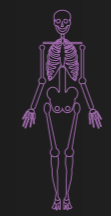
反射には、Mo/SiやCr/Scなどの多層膜が用いられる。



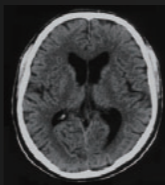
静電気除去
空気中の分子を分解してイオンを発生し、基板の帯電を除去する。

X線

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。



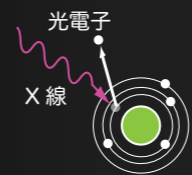
X線CT (コンピュータ断層撮影)
様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。



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。

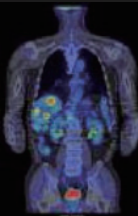


XPS(X線光電子分光)
X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。

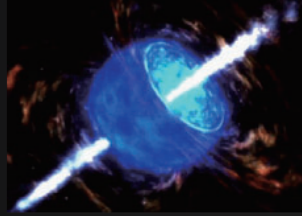


γ線

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/>

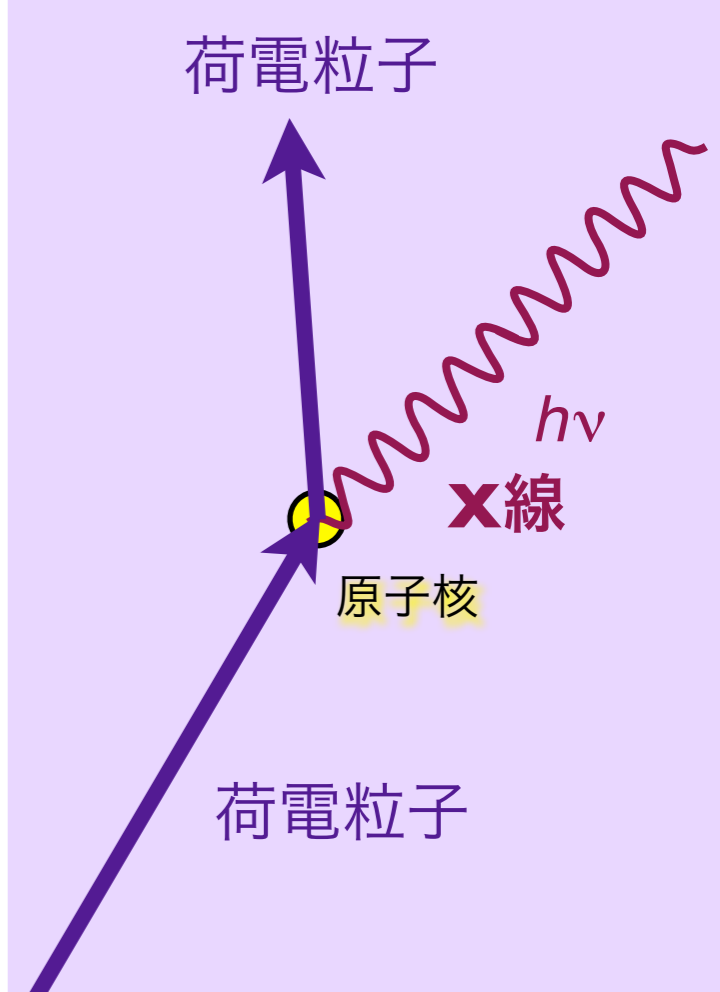
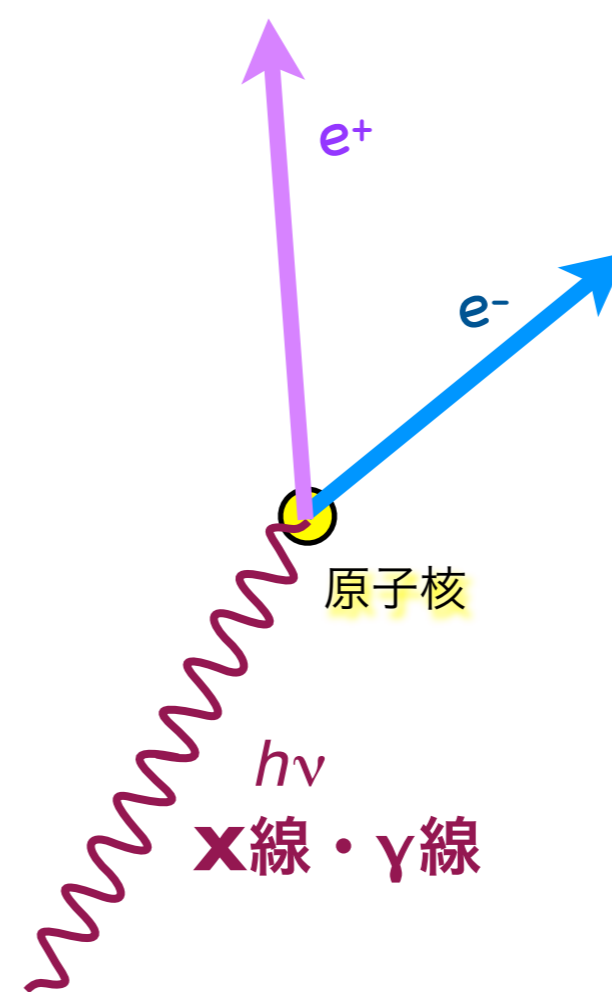
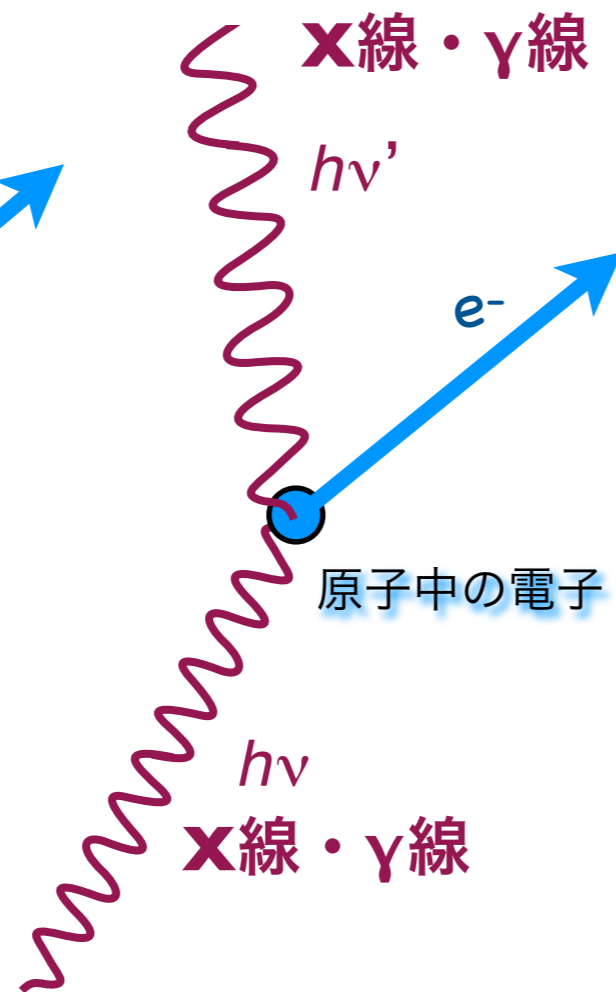
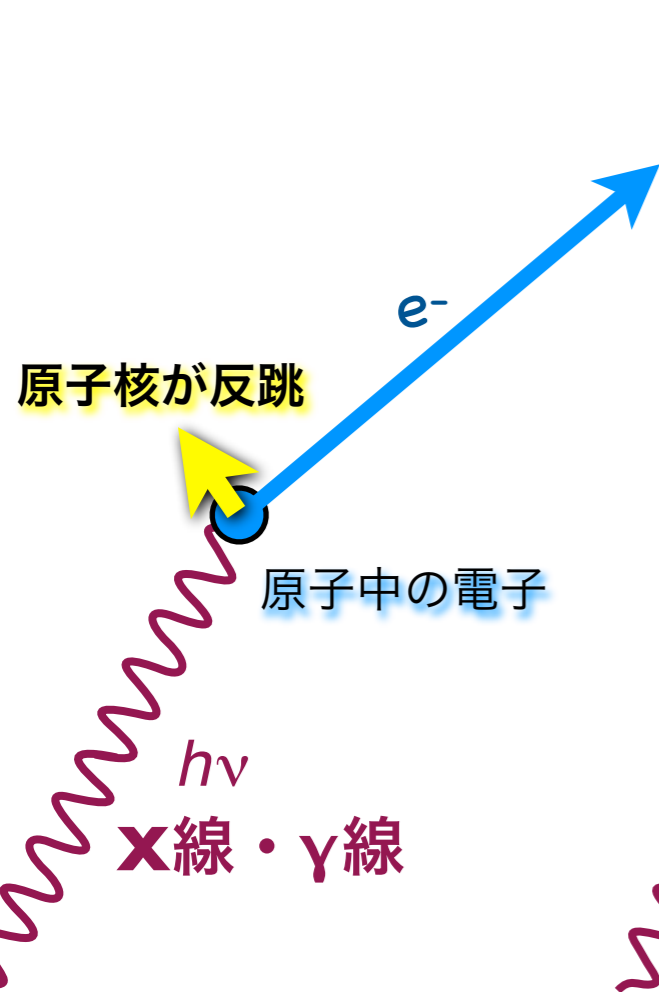
光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

光電効果

コンプトン散乱

電子対生成

制動放射



高エネルギーの電子線 (β線と同じ) が発生

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

「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7刷** を推奨

丸善出版

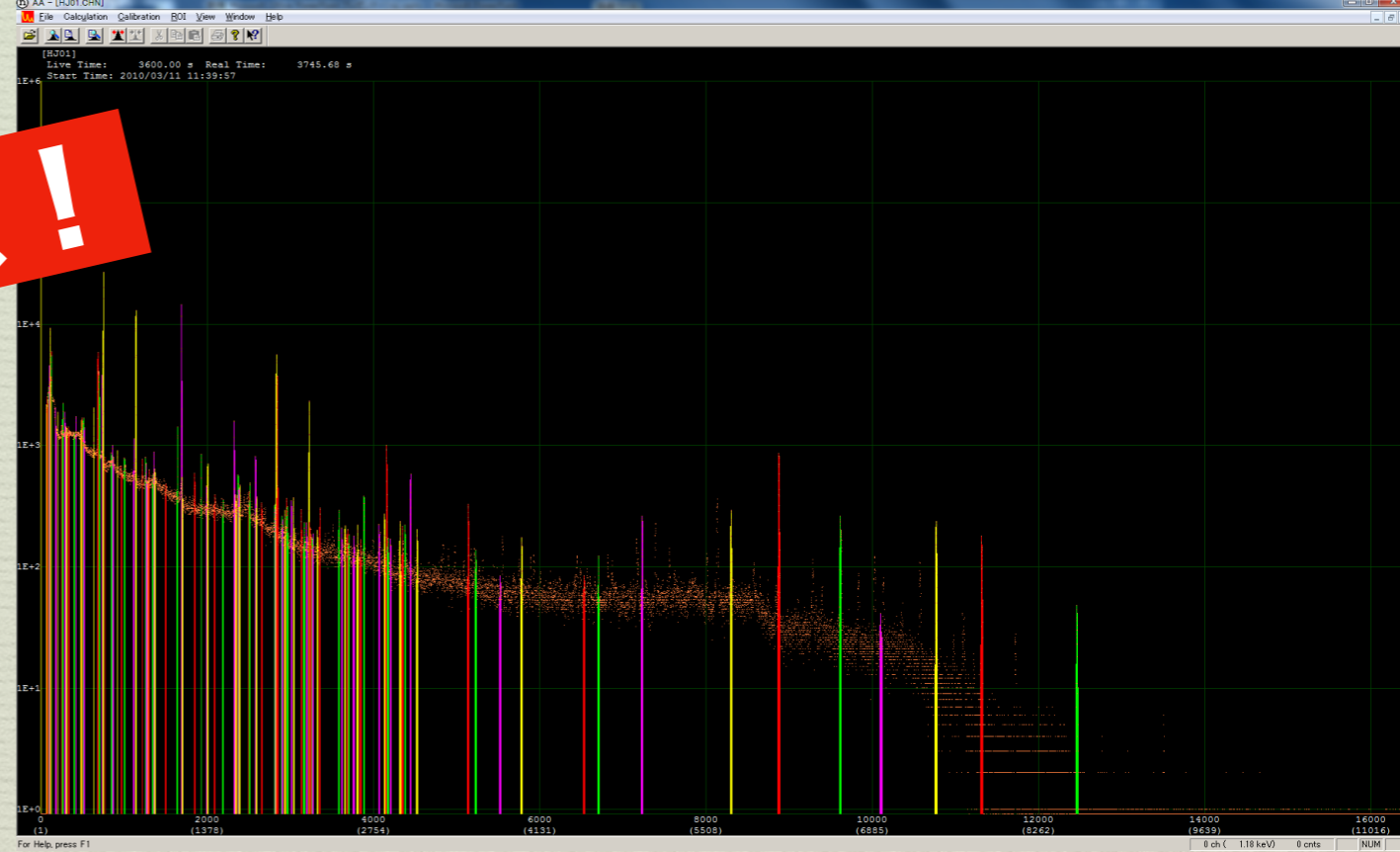
本体 2500円＋税

ご購入は生協書籍部の
教科書販売所で

次回予告

Zoom URL に注意!

第3回 (10/22)



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

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

担当教員：鳥居 寛之

Fine. Per oggi è tutto.

Fini pour aujourd'hui

That's all for today.

Всё за сегодня.

오늘은 이만 마치겠습니다.

今天就学到这儿了。

Ci vediamo la prossima settimana.

On se voit la semaine prochaine.

See you next week.

Увидимся на следующей неделе.

다음 주에 또 만납시다.

下周见。