



# 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>

# 2015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



$\gamma$ 線



中性子線



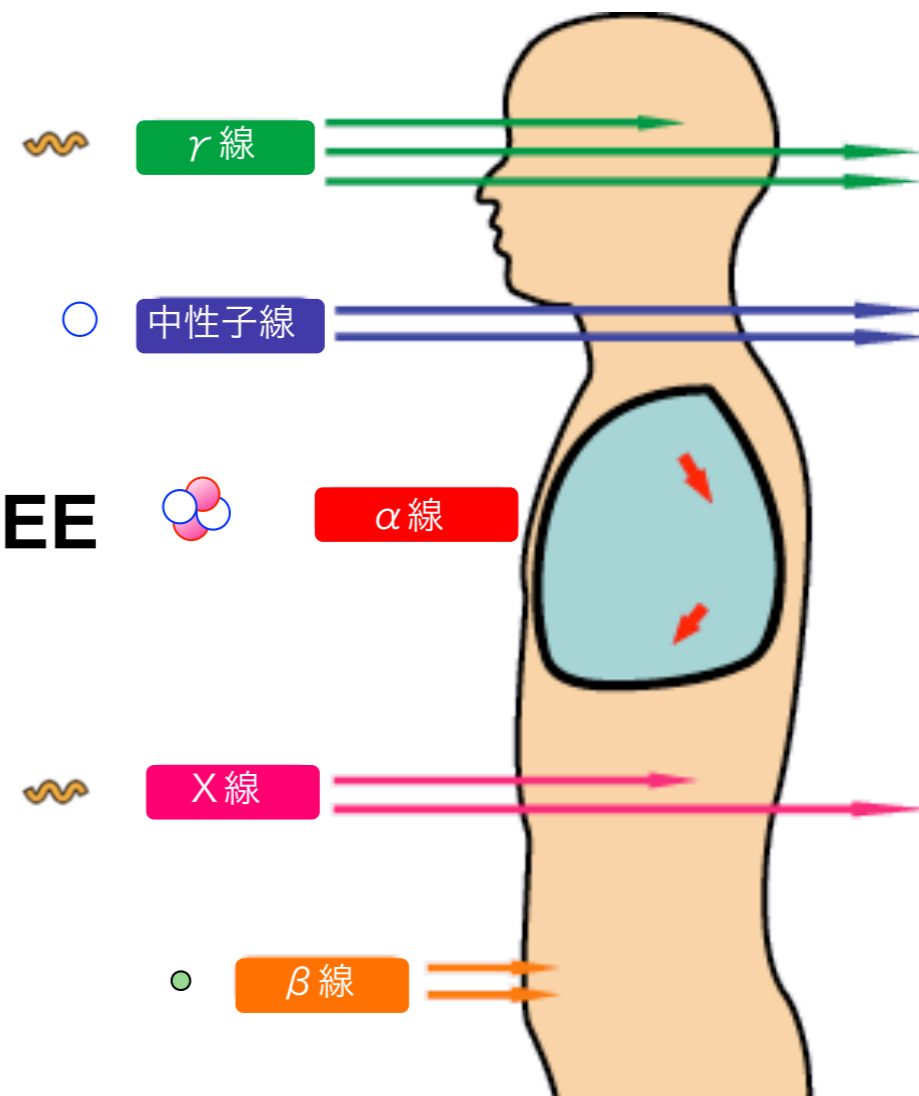
$\alpha$ 線



X線



$\beta$ 線



担当教員 鳥居 寛之 (粒子線物理学)

小豆川 勝見 (環境分析化学)

渡邊 雄一郎 (生命環境応答学)

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

# 2015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

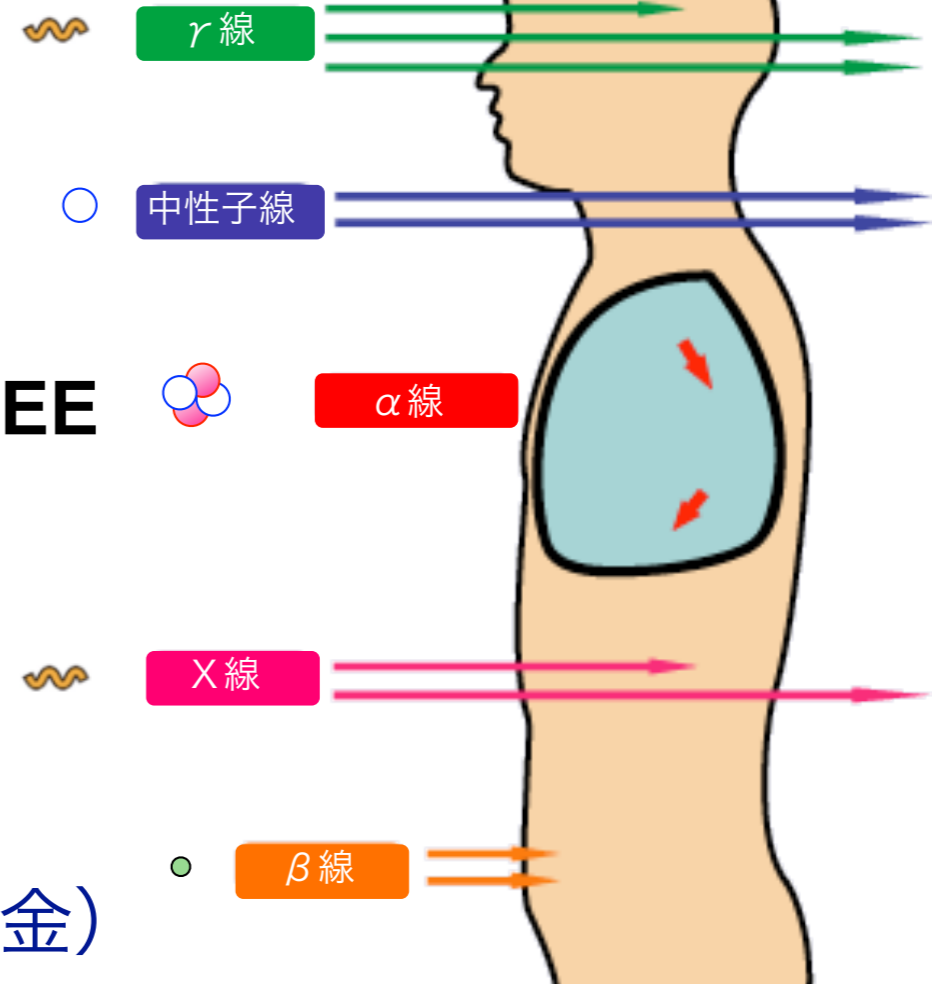
理解する

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE  
(West)

K303教室

2015 / 9 / 25 (金)



第2回

## 放射線物理学

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

- 9/18 放射線入門 【鳥居】
- 9/25 放射線物理学 【鳥居】
- 10/ 2 放射線計測学 【小豆川】
- 10/ 9 放射線物理・化学 【鳥居】
- 10/16 放射線生物学 【渡邊】
- 10/23 被曝調査・医療支援 【坪倉】
- 10/30 原子核物理学・原子力工学 【鳥居】
- 11/ 6 環境放射化学 【小豆川】
- 11/13 環境放射化学 【小豆川】
- 11/24 放射線医療 【芳賀】
- 11/27 放射性物質汚染と農業 【藤原】
- 12/ 4 放射線の利用 【渡邊】
- 12/11 加速器科学・放射線防護学 【鳥居】

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

坪倉 正治 《医科学研究所》

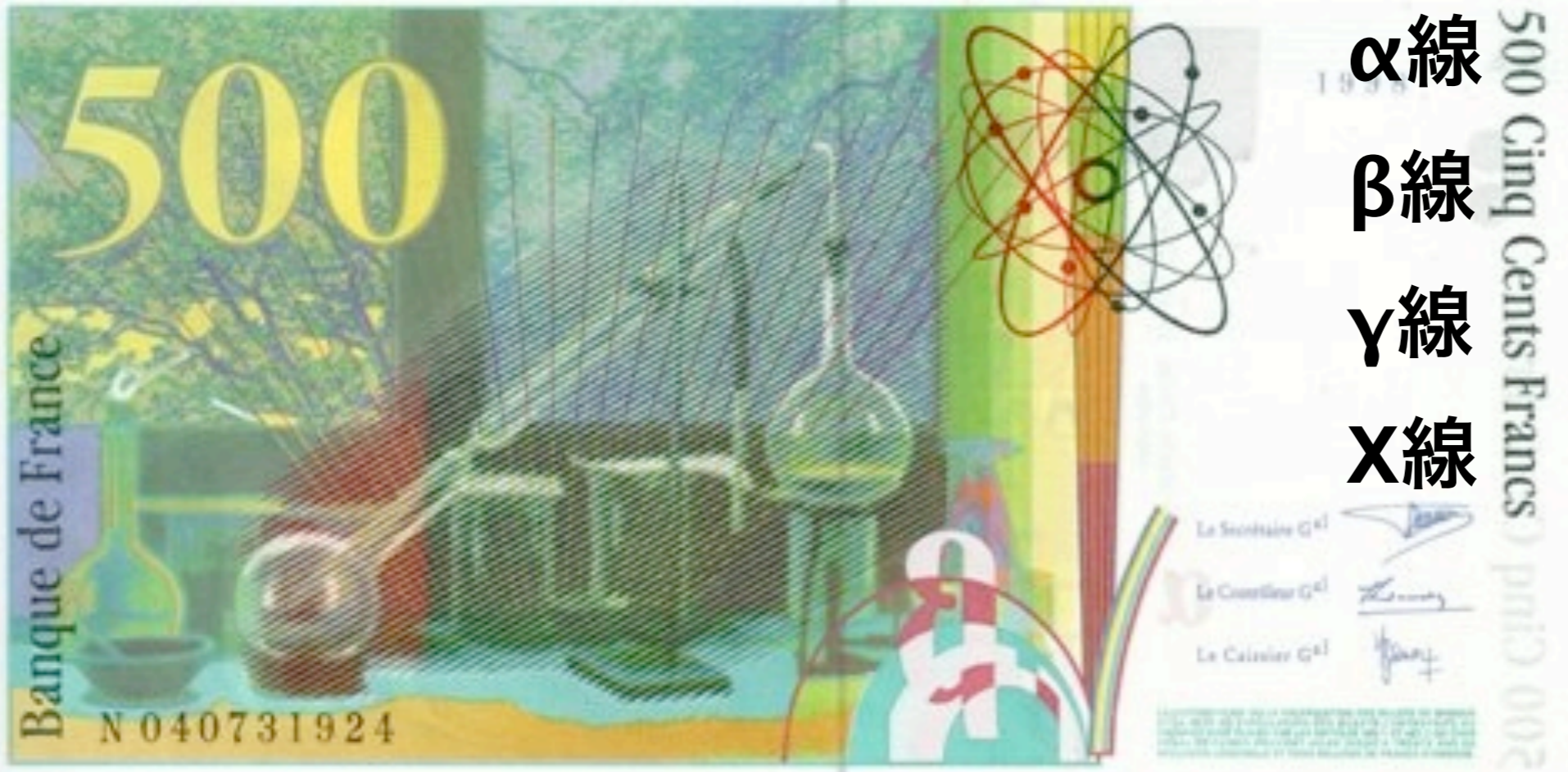
芳賀 昭弘 《医学部附属病院放射線科》

藤原 徹 《農学部応用生命化学》

ゲスト講師



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）

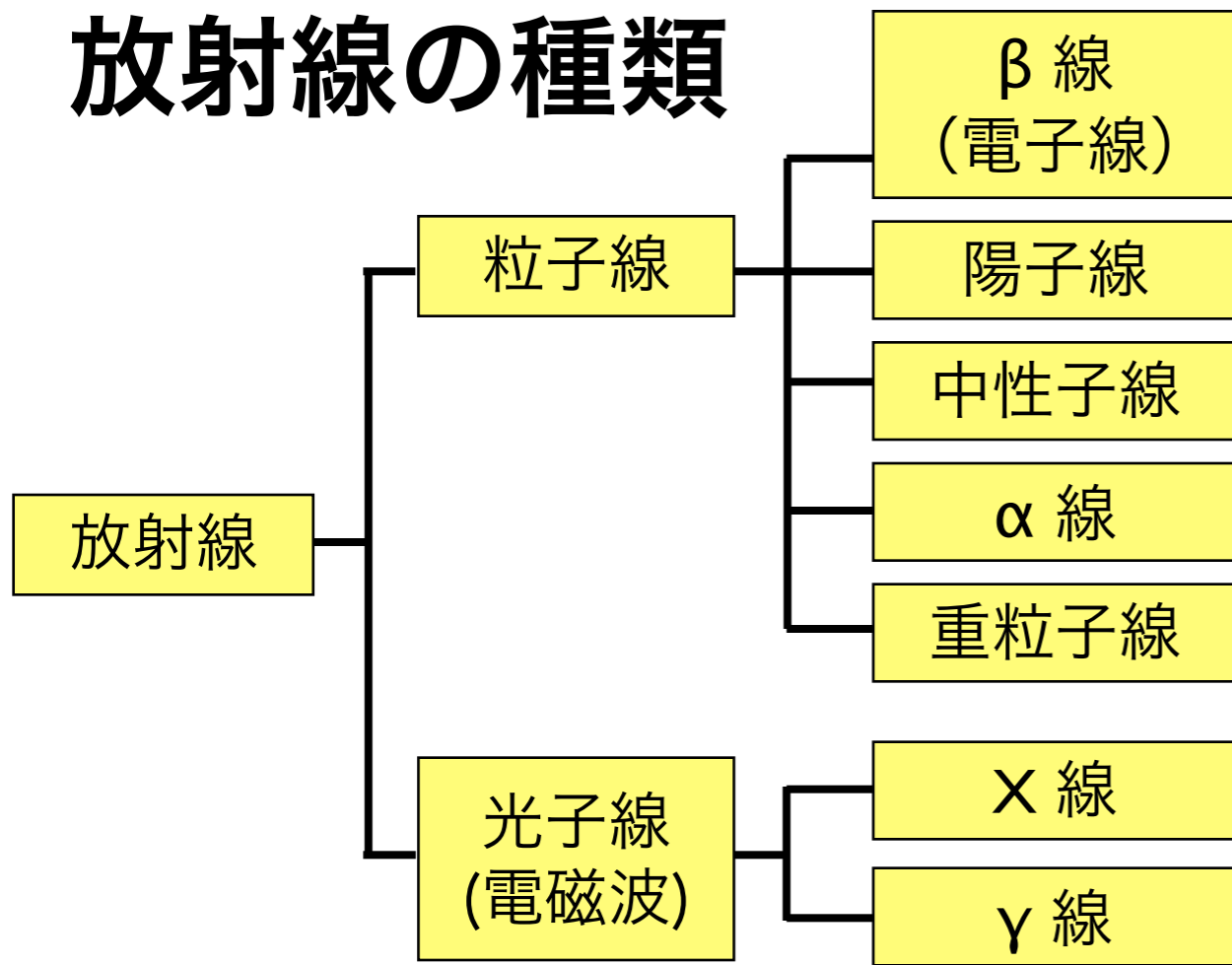
**VIDEO**

# 放射線とは

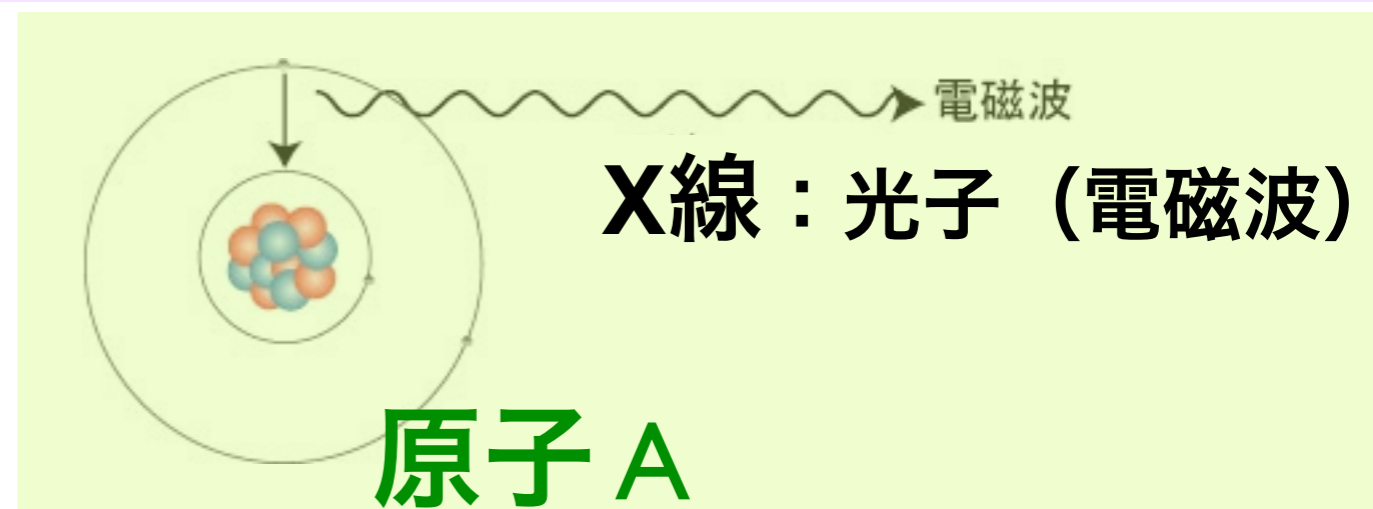
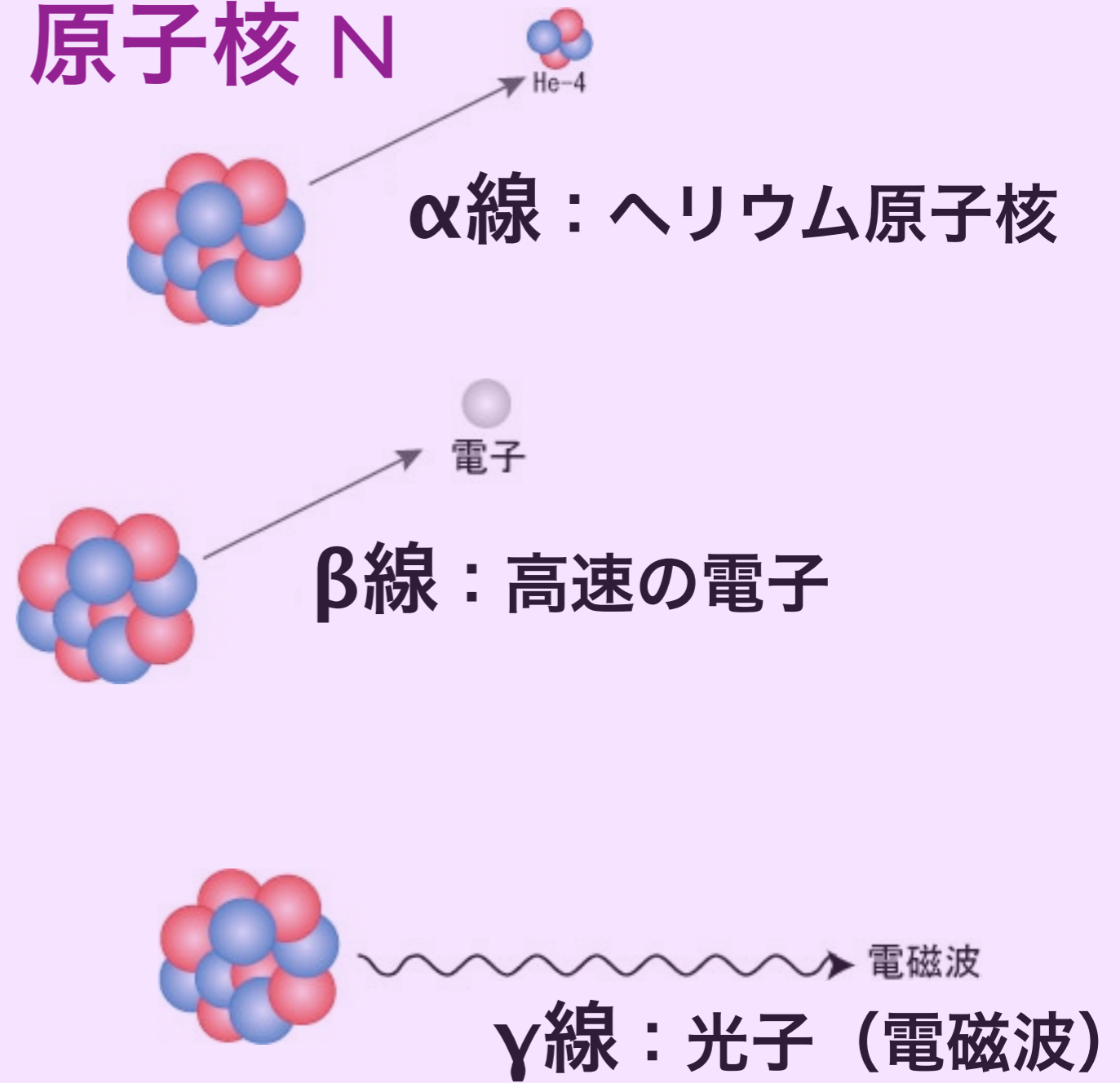
日本原子力文化振興財団：エネコチャンネルのビデオ映像「探検！身近な放射線」より抜粋

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

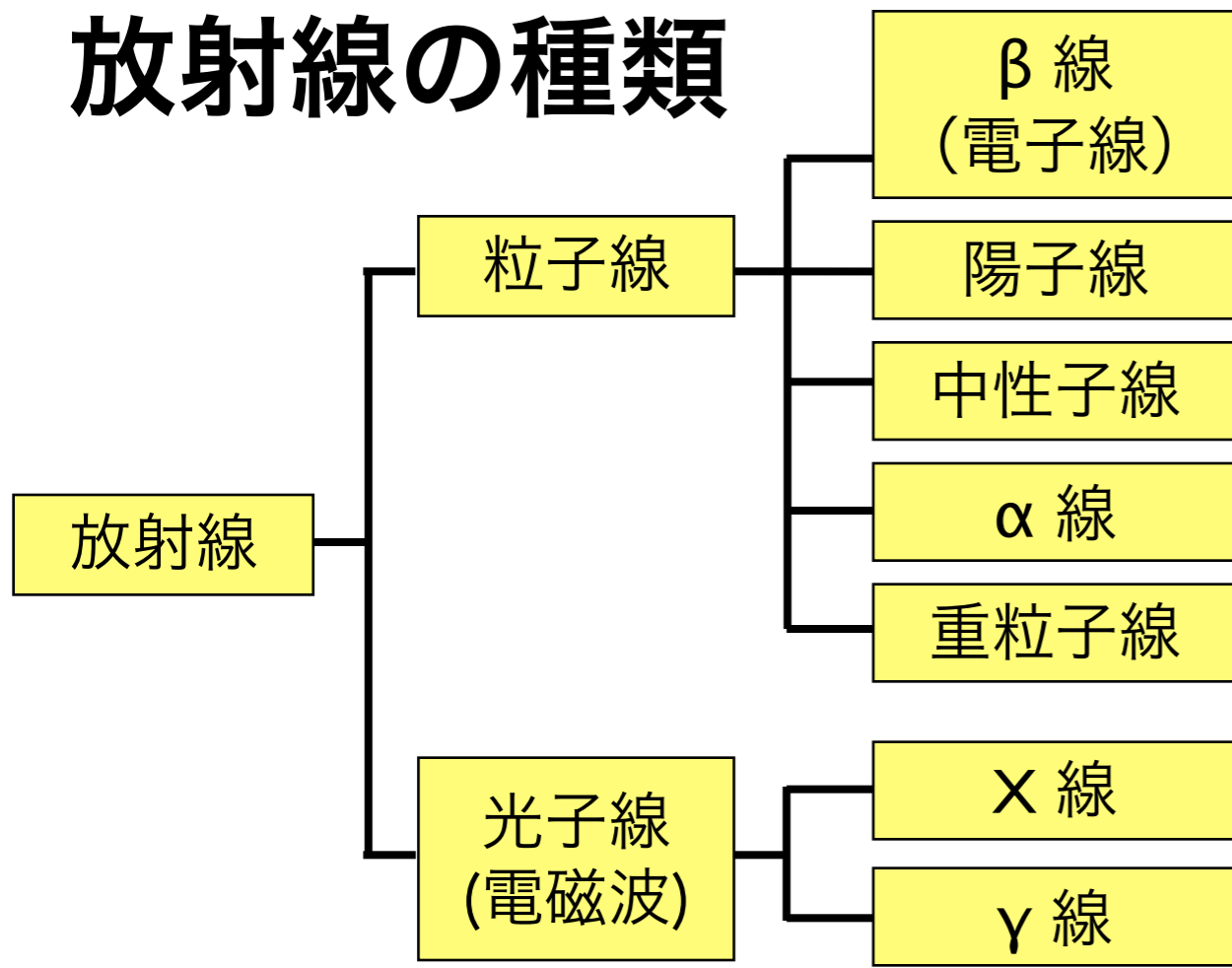
# 放射線の種類



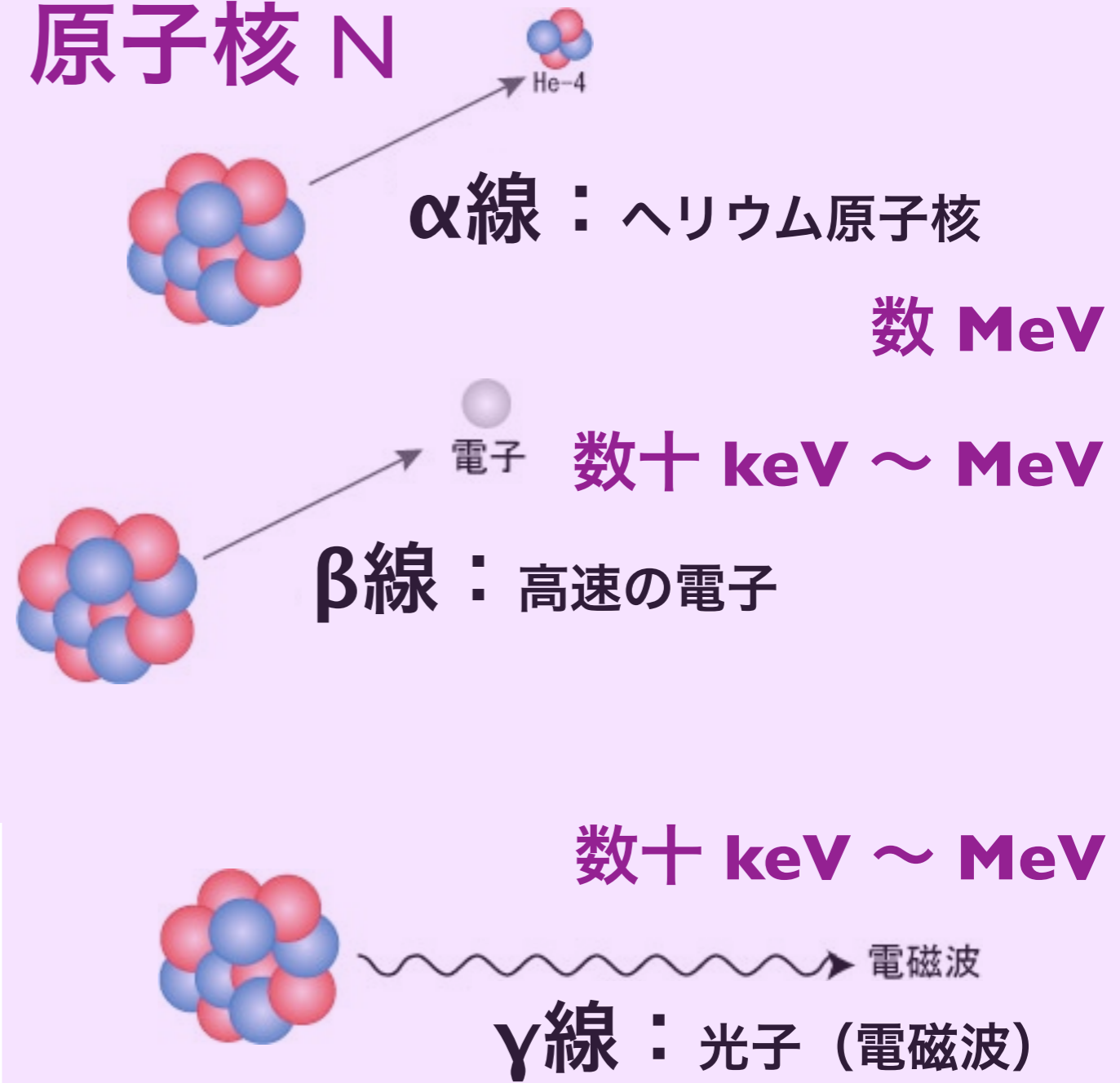
## 原子核 N



# 放射線の種類



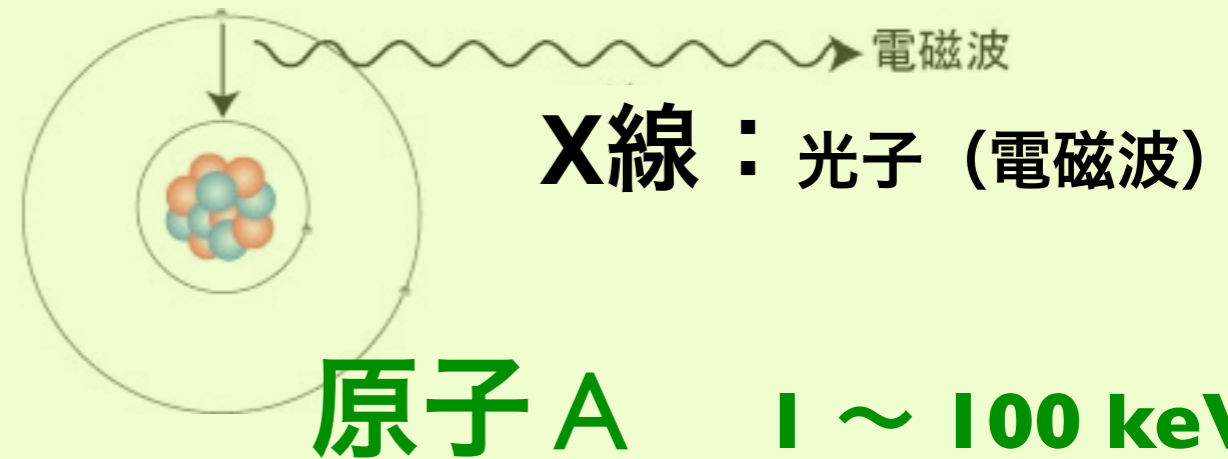
## 原子核 N



放射線のもつエネルギーは？

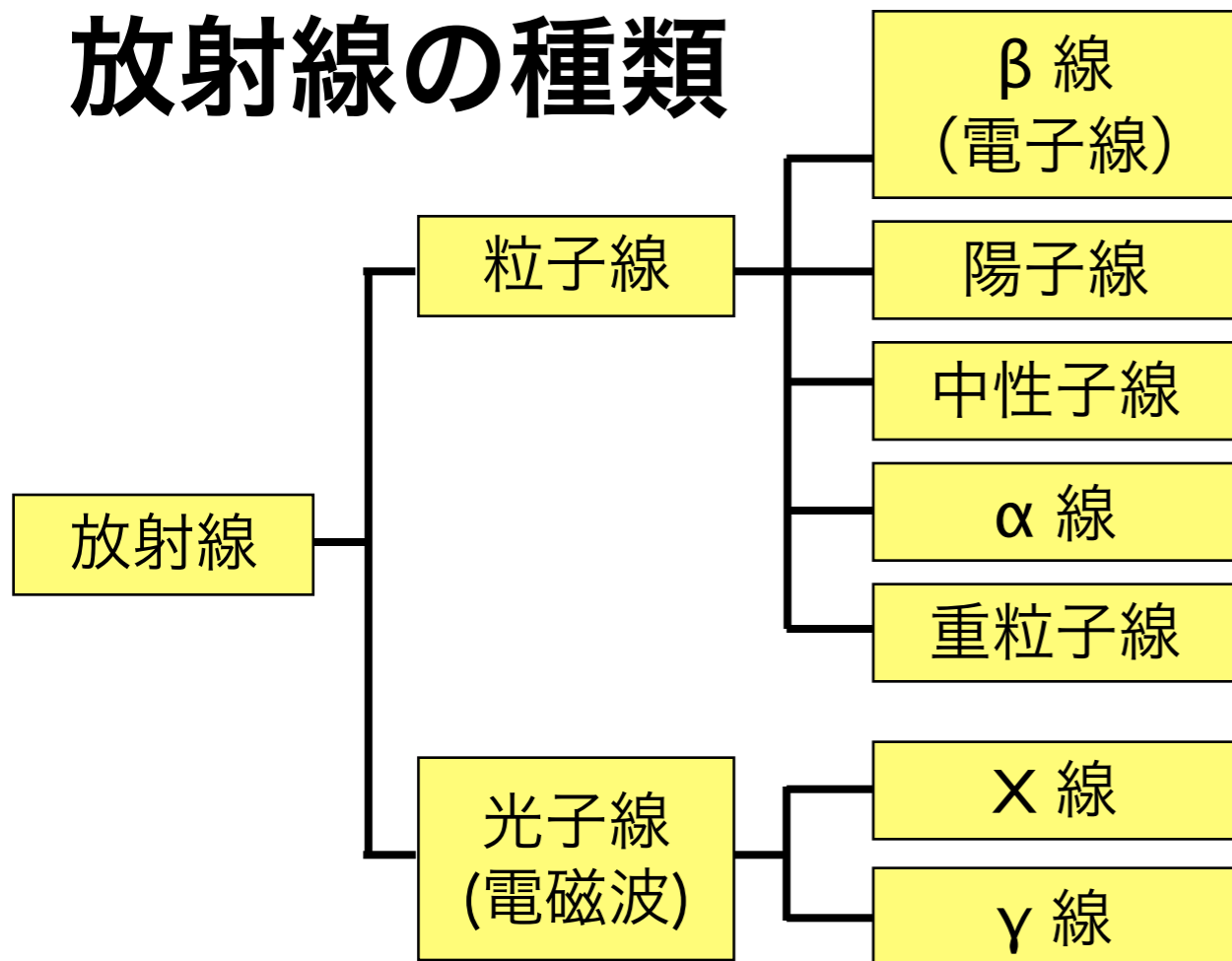
☞ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

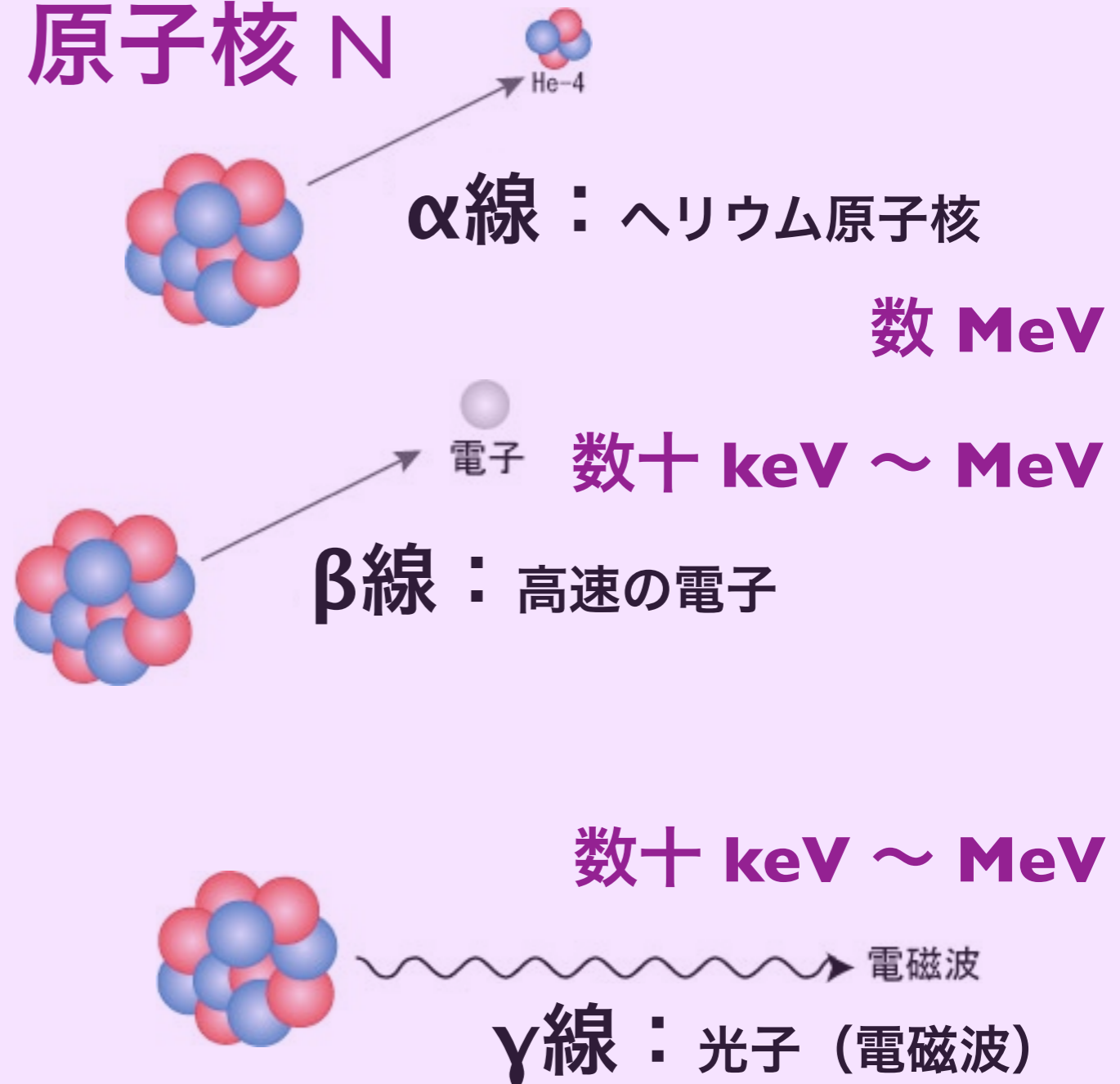




# 放射線の種類



## 原子核 N

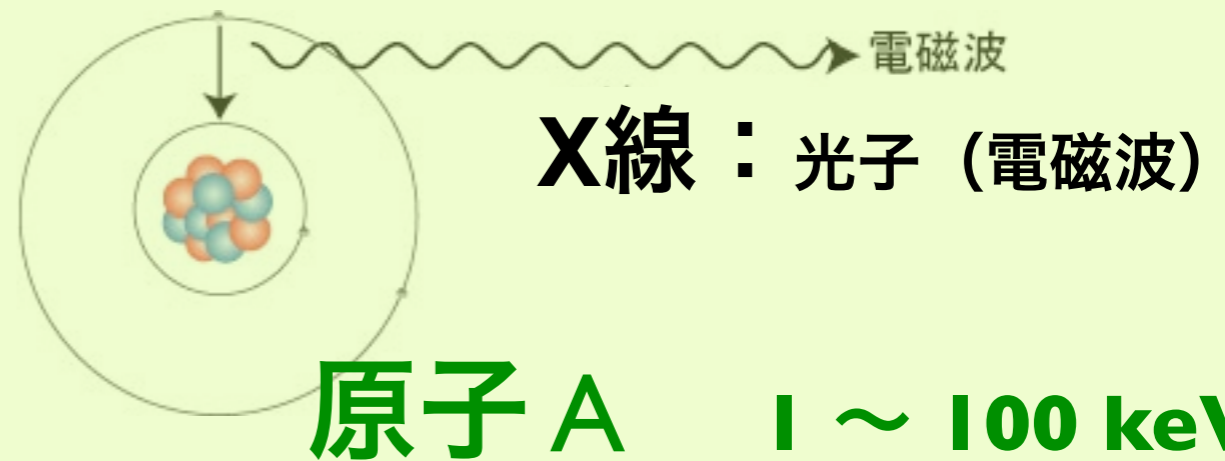


## 放射線のもつエネルギーは？

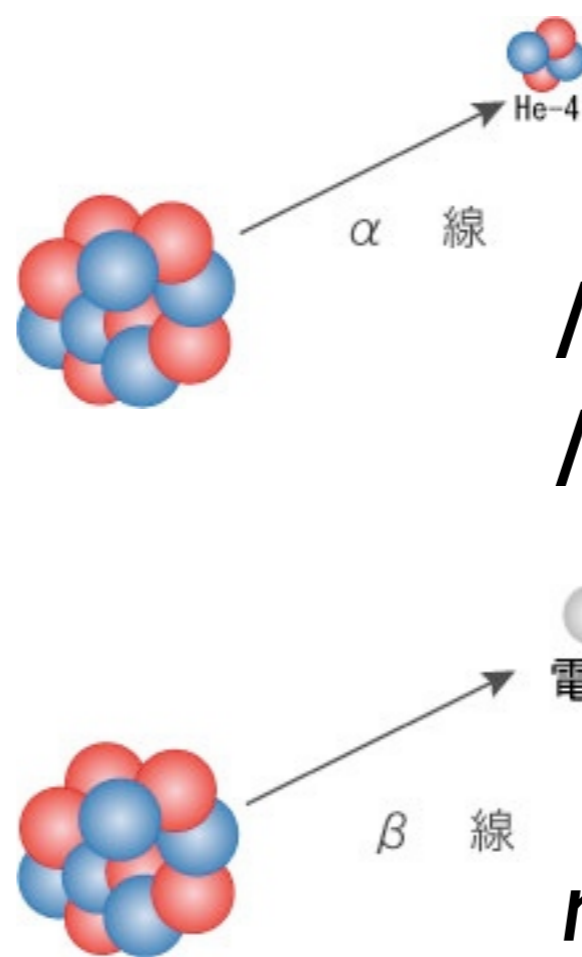
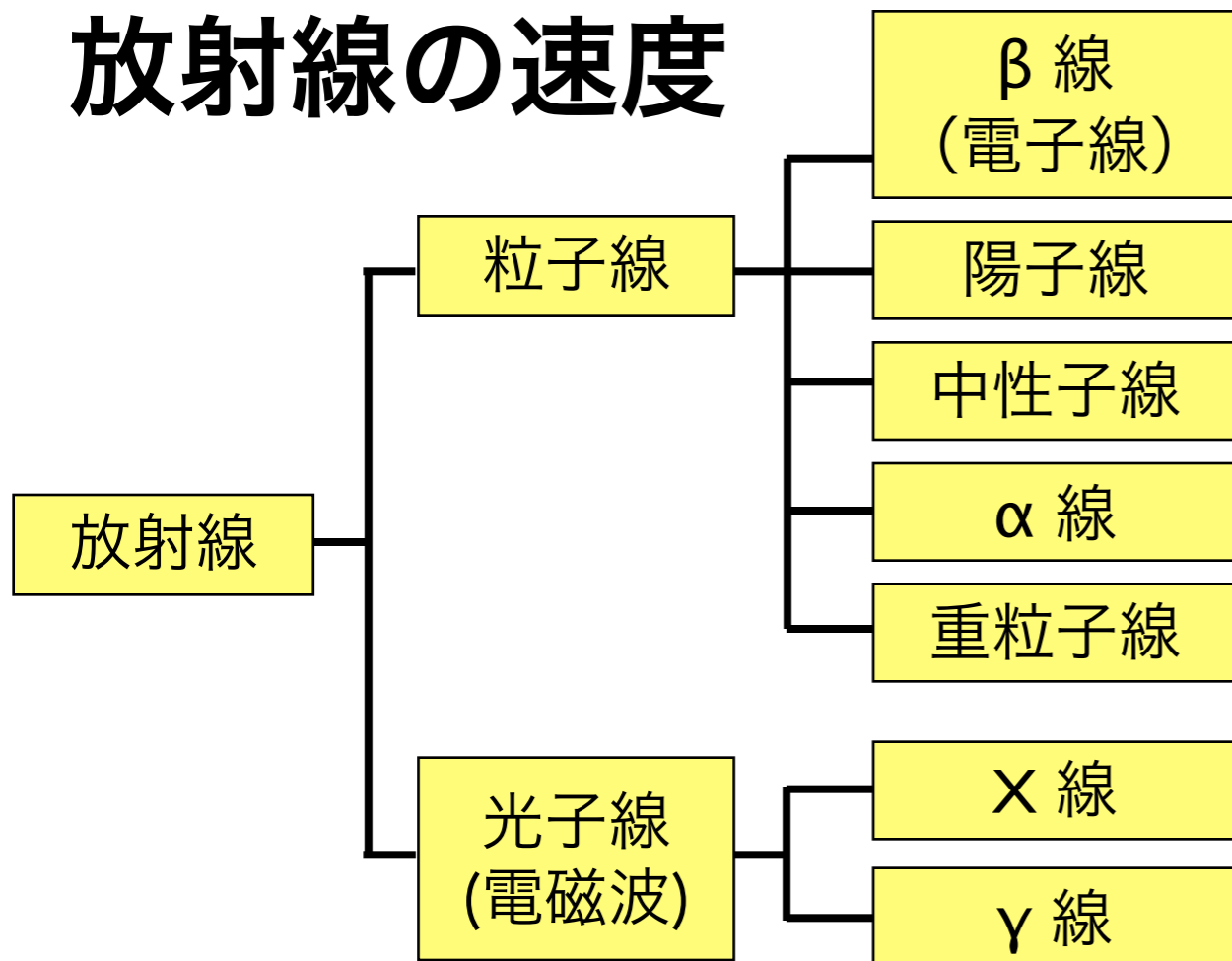
☞ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

## Cf. 原子の束縛エネルギーは？

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



# 放射線の速度



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

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

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

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

電子

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

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

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

放射線のもつエネルギーは？

☞ 数十 keV ~ 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？

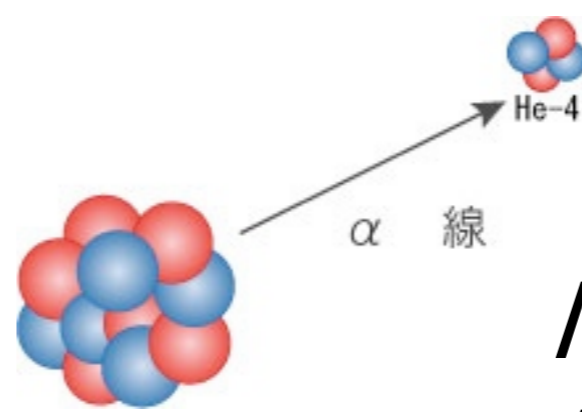
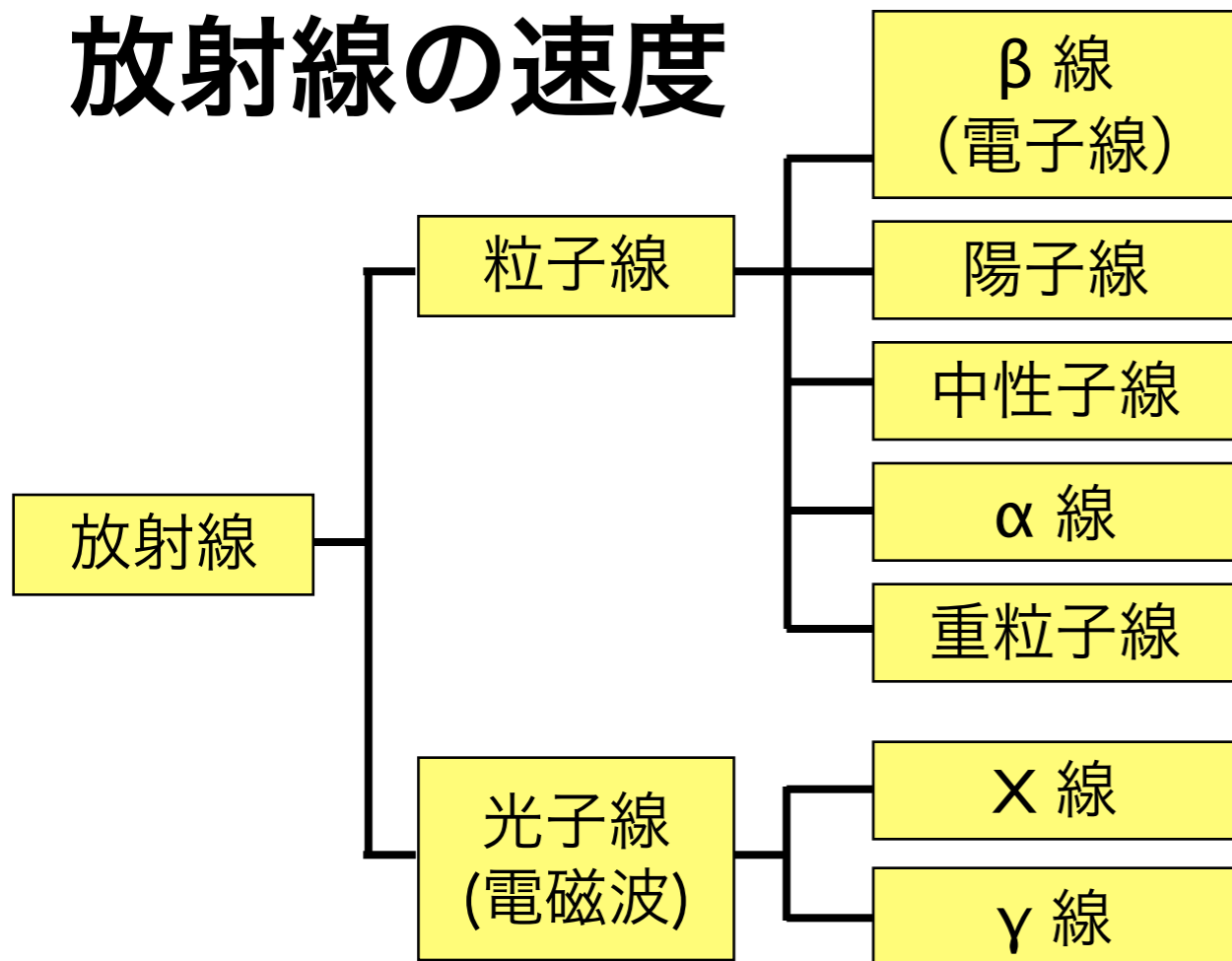
~~$$T = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} mc^2 \beta^2$$~~

$$\beta = v/c$$

5 MeV の α線の速度は？

1 MeV の β線の速度は？

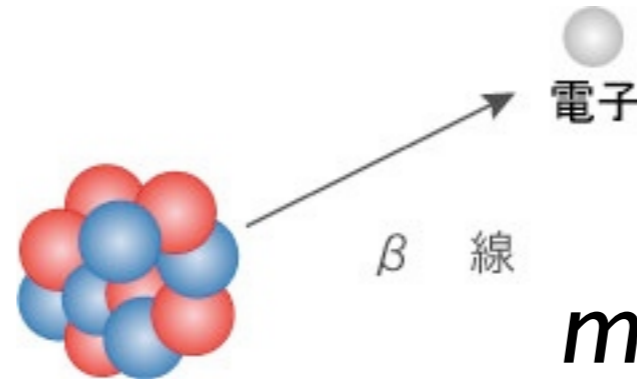
# 放射線の速度



$$M_{\alpha} \approx 4 \text{ GeV}/c^2$$
~~$$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 4$$~~

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

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



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

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

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

放射線のもつエネルギーは？

☞ 数十 keV ~ MeV for α/β/γ

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

荷電粒子の速度は？

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

$$\beta = v/c$$

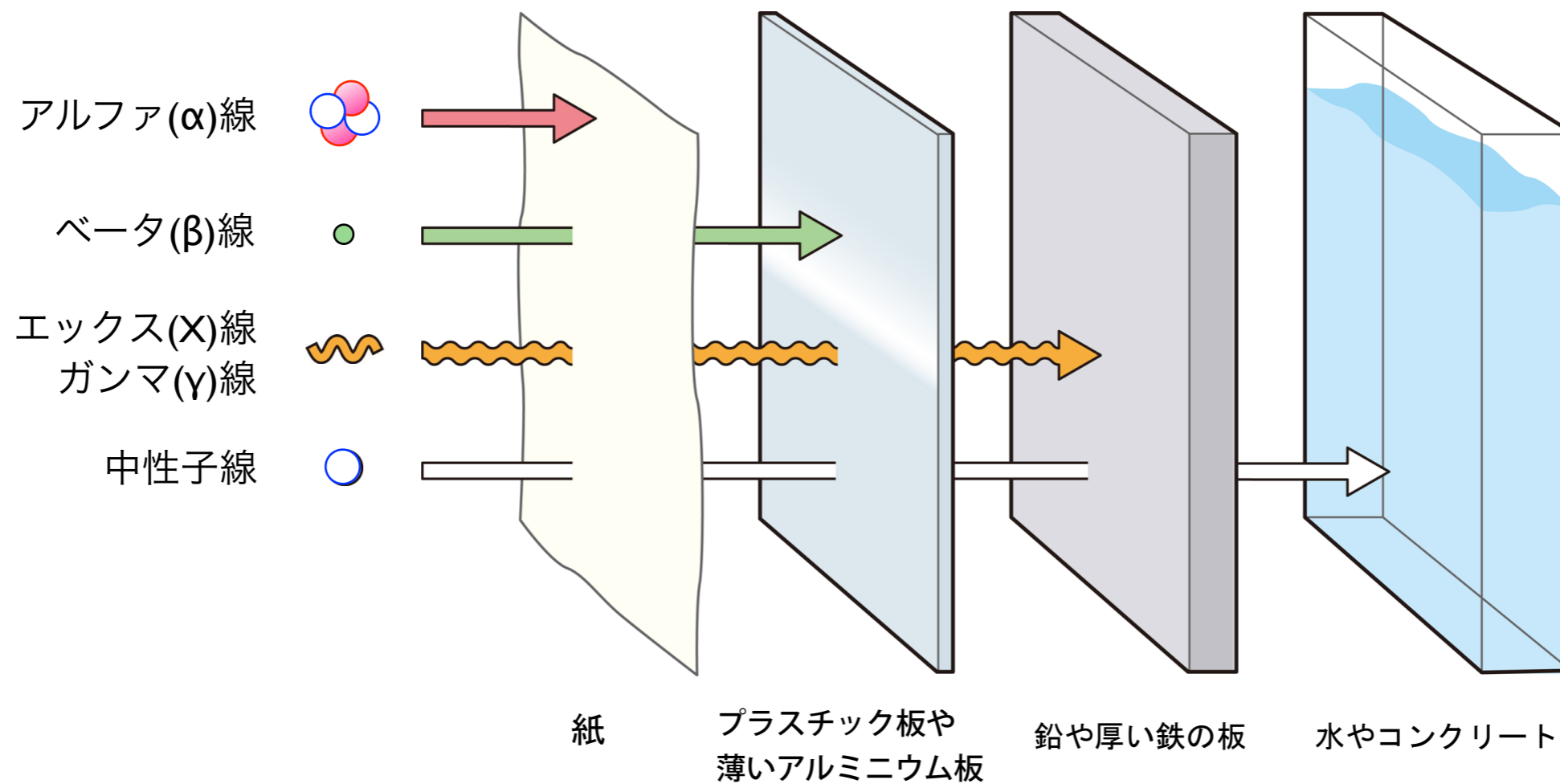
$$T = E - mc^2$$

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

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

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

重い粒子は飛程がほぼ揃っている。

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

## 光子（X線・ $\gamma$ 線）の減衰（減弱）

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

**光子数の指数関数的減少**

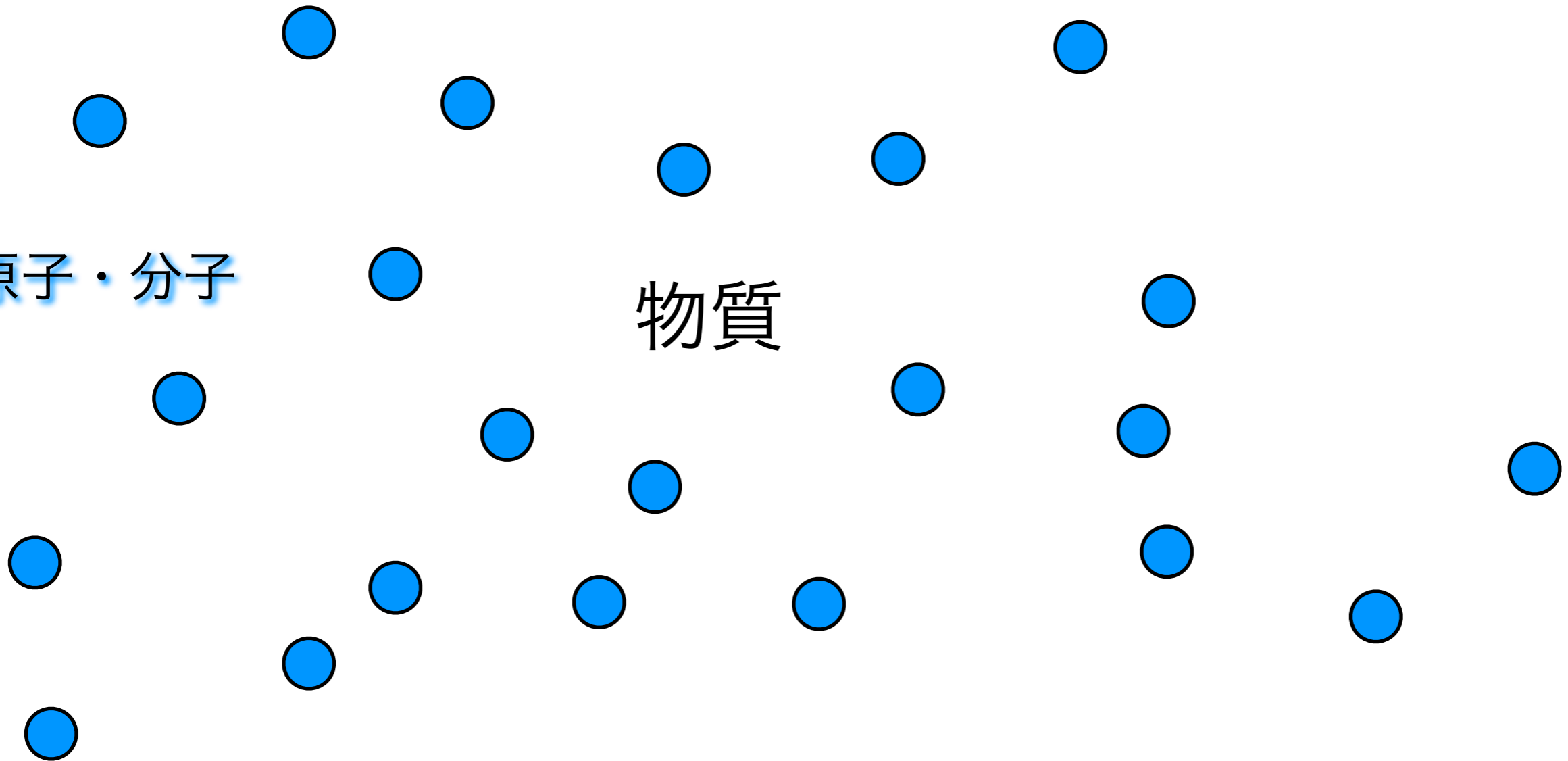
**反応断面積  $\sigma$** （単位距離当たりの**反応確率**を与える）が重要

# 荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：  
クーロン力

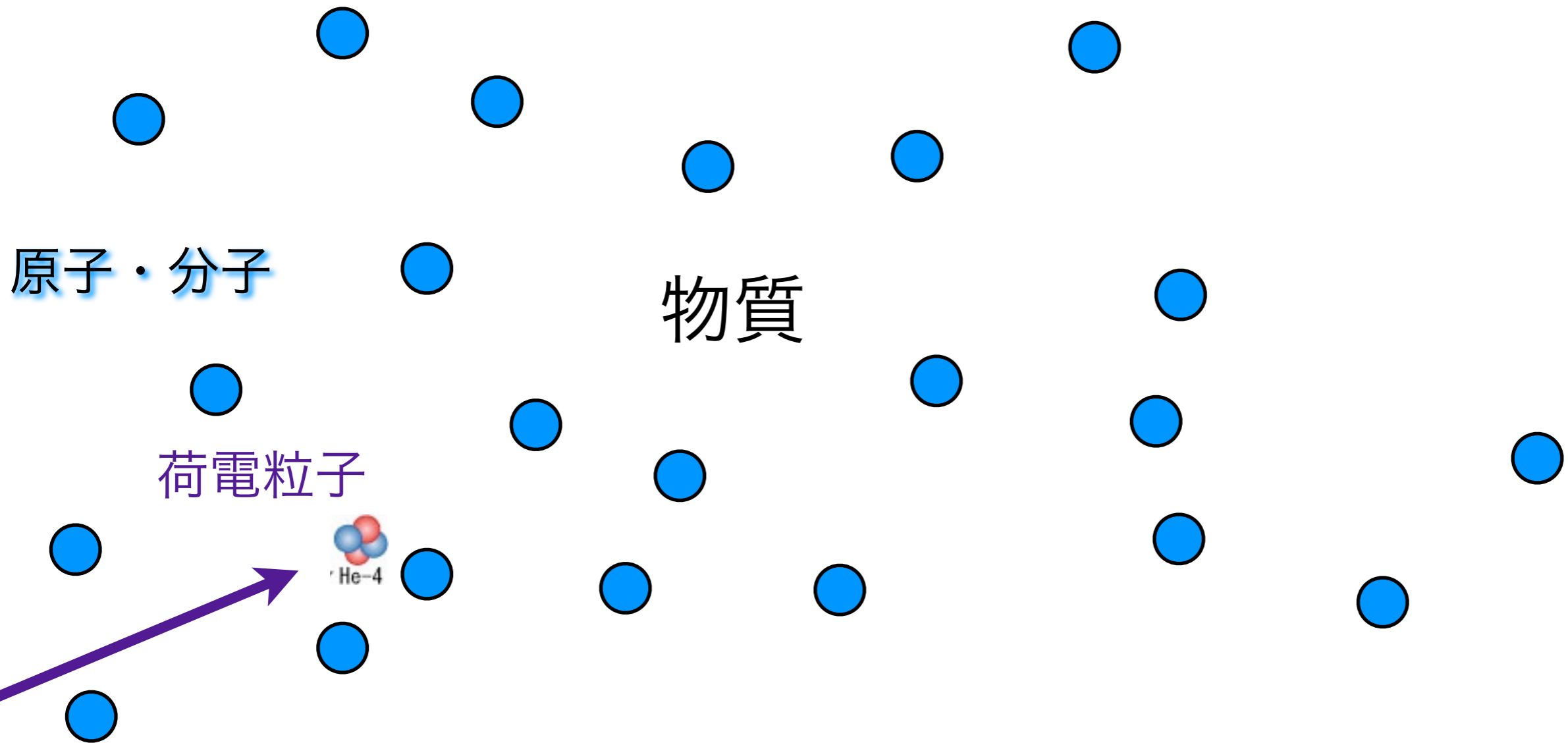
原子・分子

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





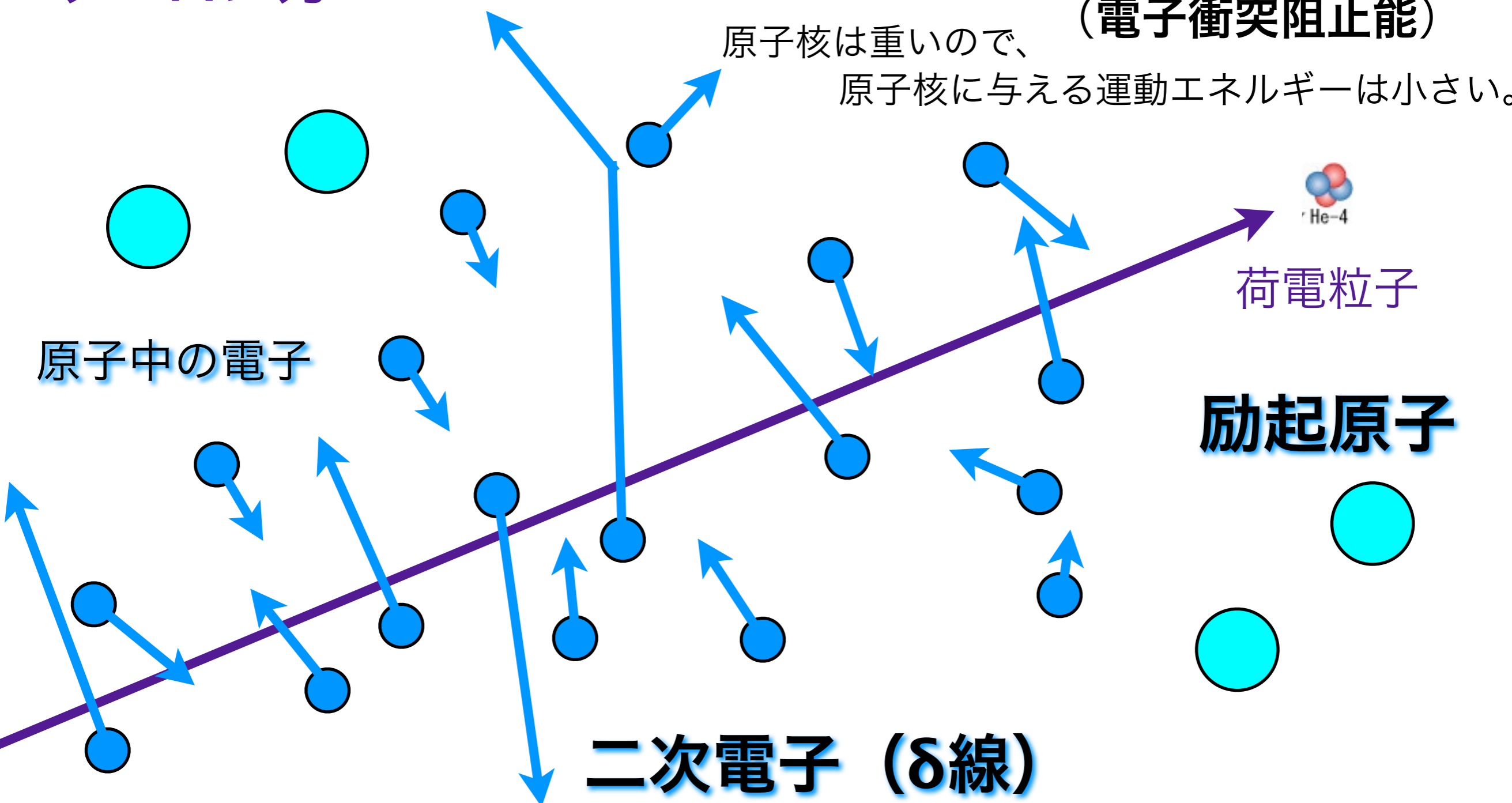
# 荷電粒子のエネルギー損失過程

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。

荷電粒子：  
クーロン力

(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

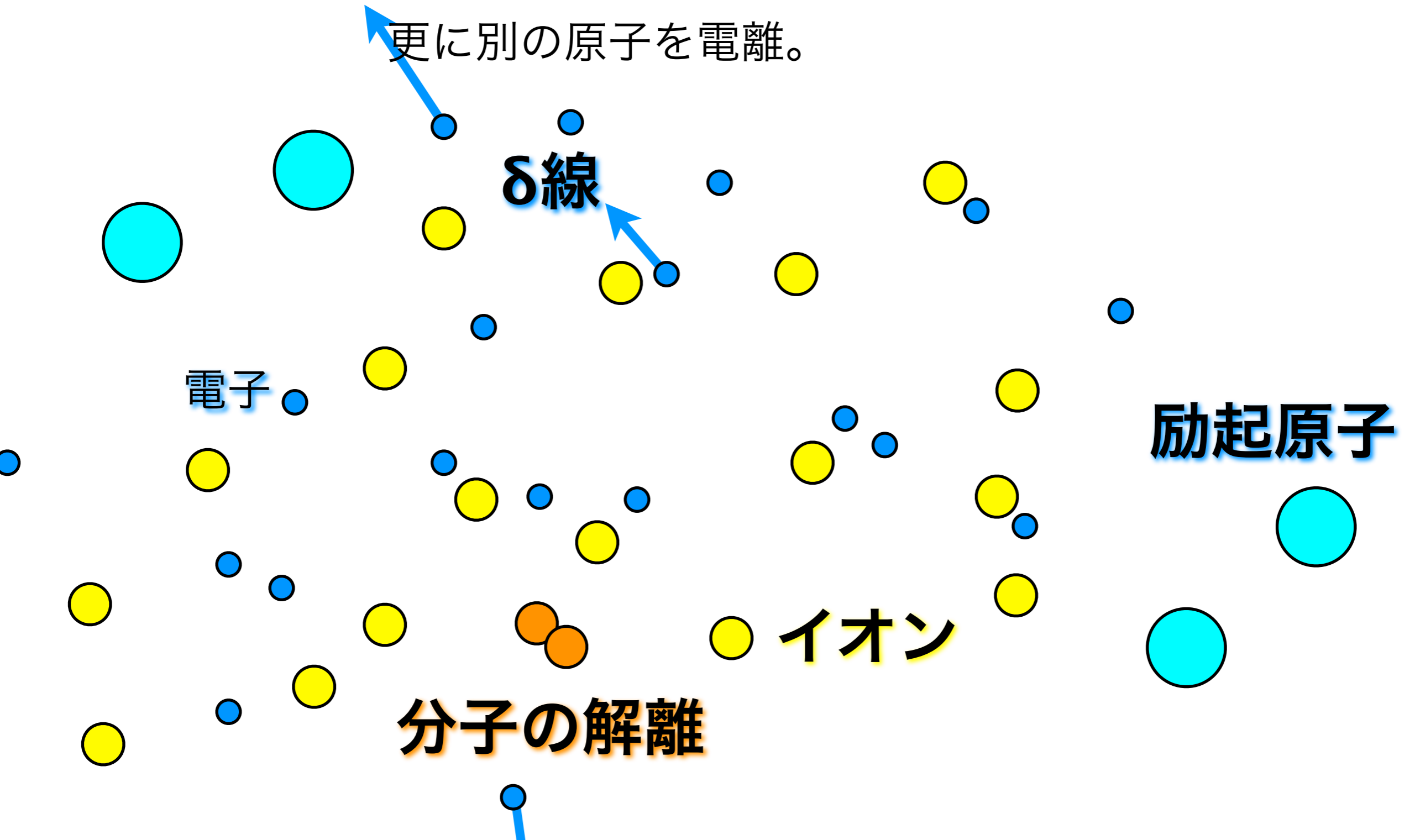
励起原子

二次電子 (δ線)

原子中の電子

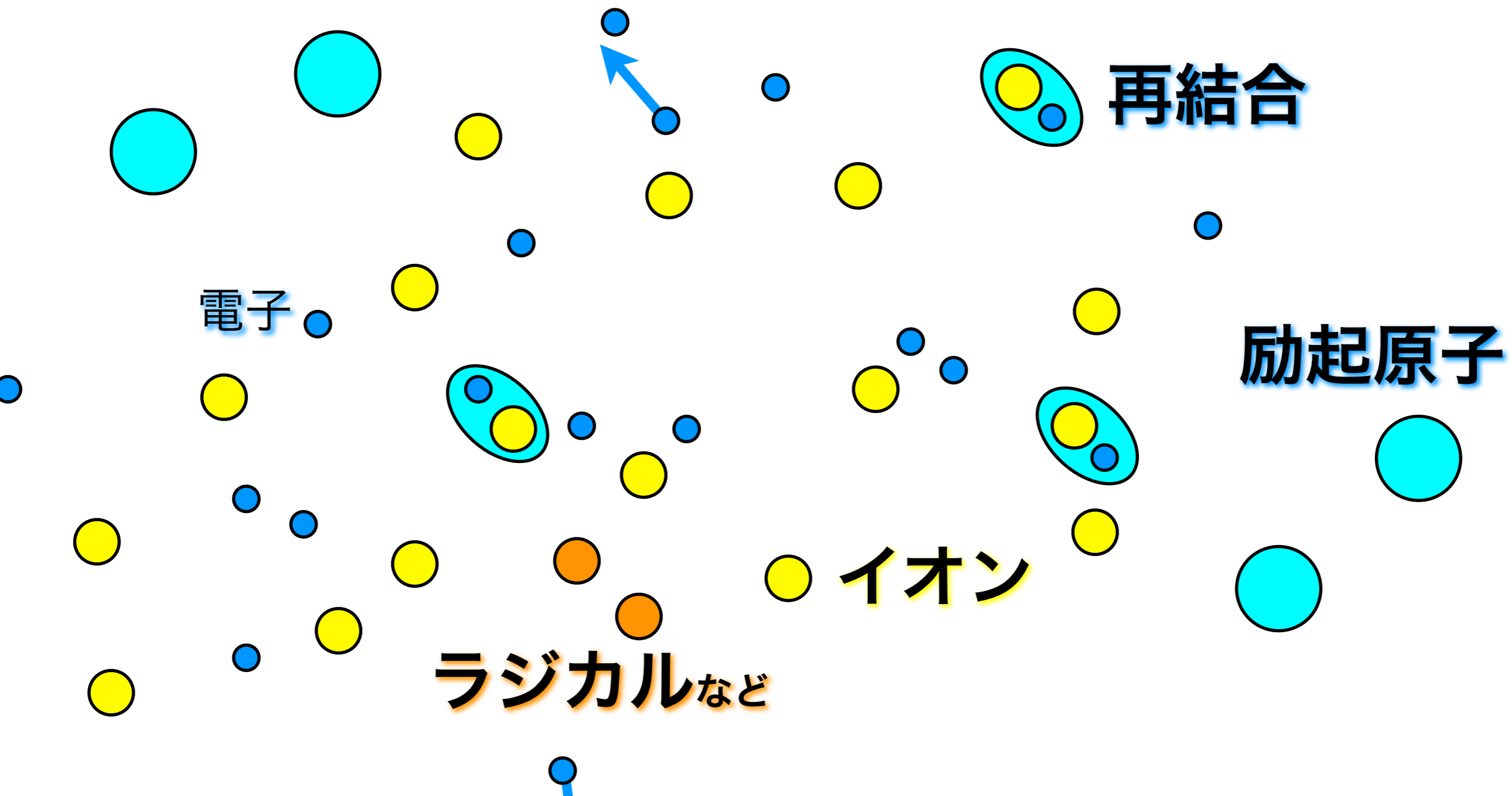
# 荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

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。



# 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。

励起原子

電子

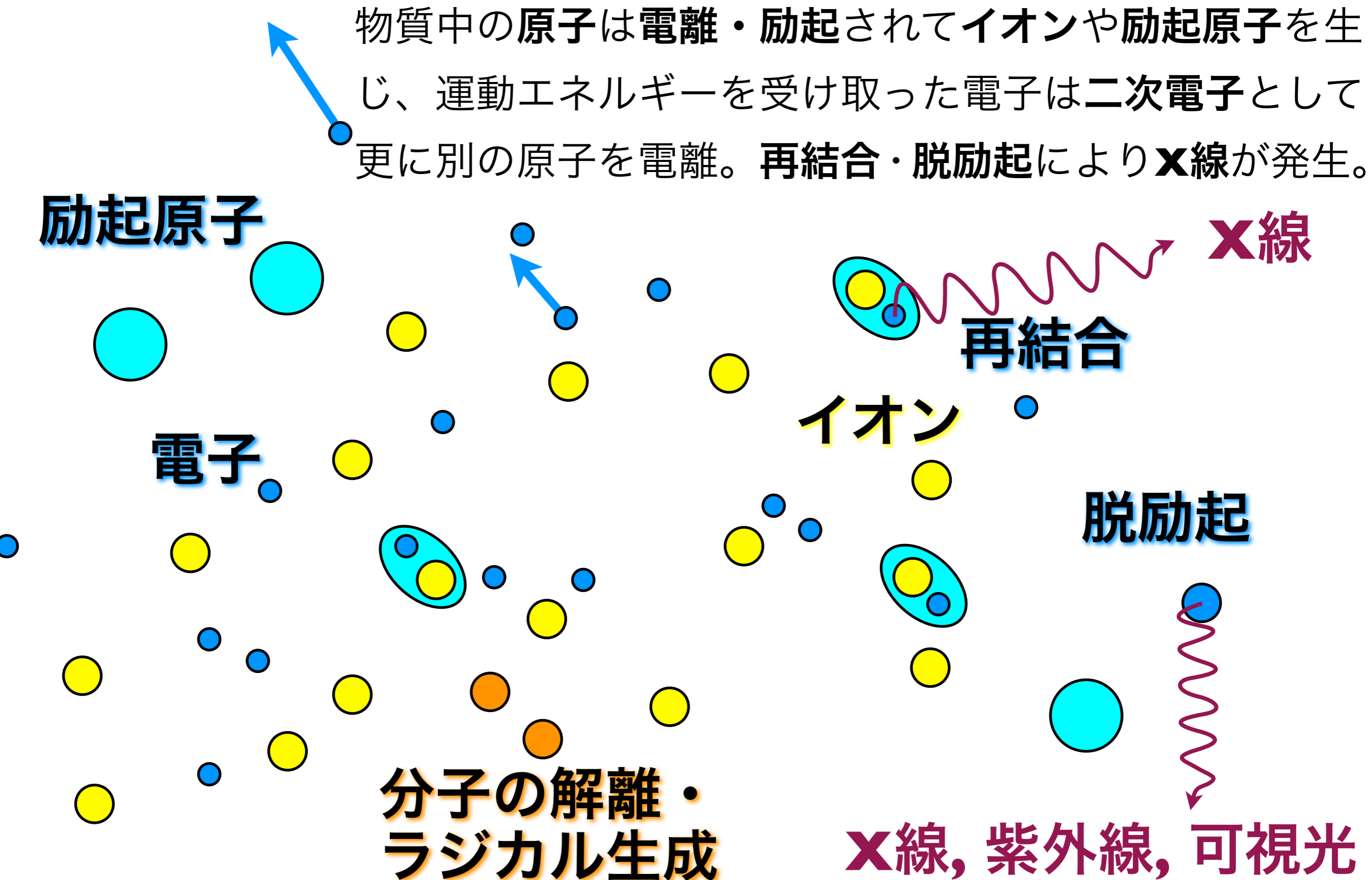
イオン

再結合

脱励起

分子の解離・ラジカル生成

X線, 紫外線, 可視光



# 荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

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

原子の電離（イオン化）・励起

励起原子の脱励起

X線、紫外線・可視光

イオン・電子の再結合

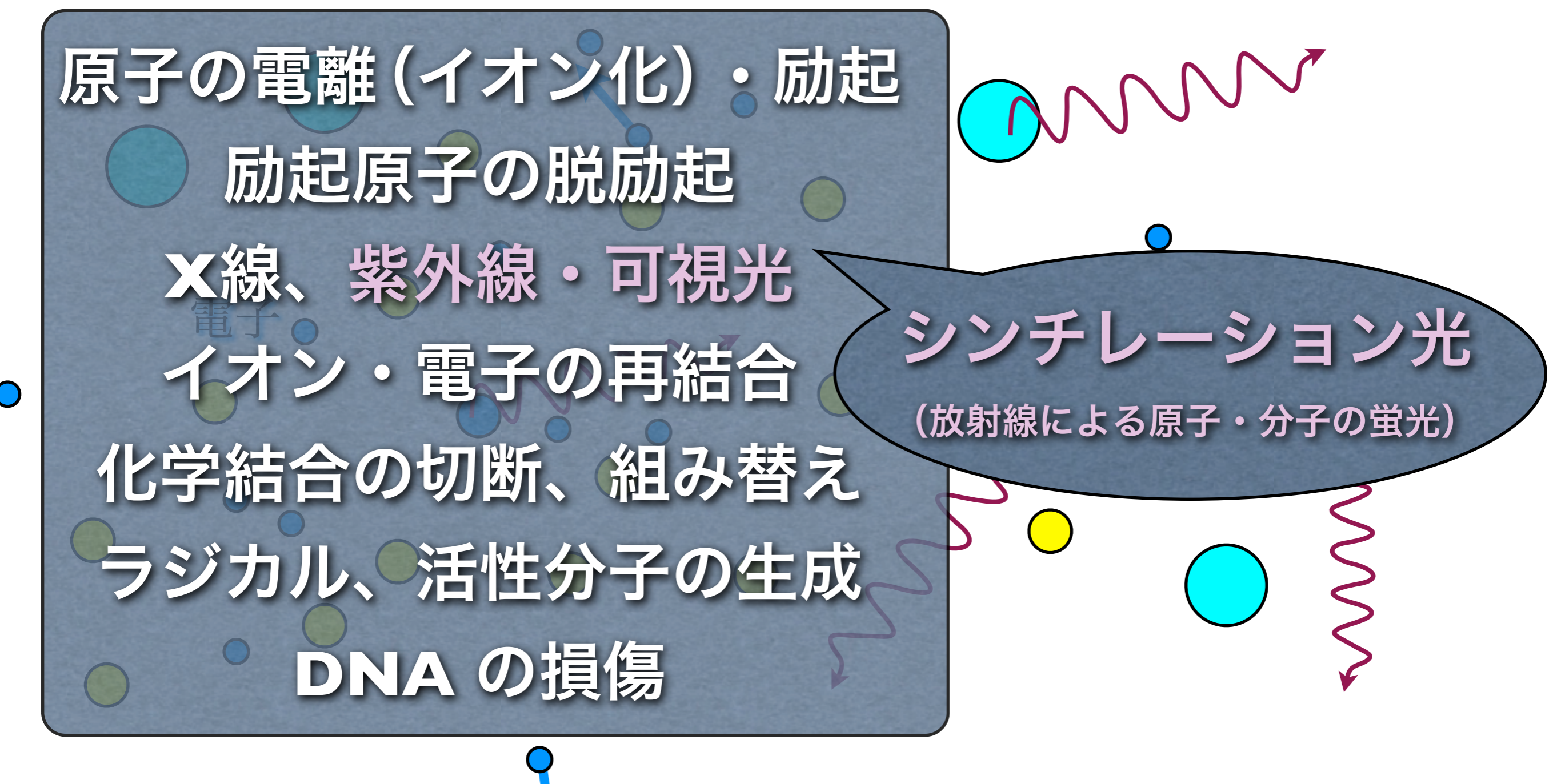
化学結合の切断、組み替え

ラジカル、活性分子の生成

DNA の損傷

シンチレーション光

(放射線による原子・分子の蛍光)



# 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<sup>-</sup>)・陽電子(e<sup>+</sup>)

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

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

## 荷電粒子

## 阻止能

(エネルギー損失)

荷電粒子：クーロン力

**エネルギー損失**

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)。

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。

Stopping power (Energy loss)

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

単位長あたりの電離 (電子・イオン対) 数 = 比電離

阻止能 ÷ 比電離 = **W 値**

W 値：1つの電離を生じるに要する平均エネルギー。

荷電粒子の種類やエネルギーによらない。

イオン化エネルギーより大きな値となる (励起による損失があるため)

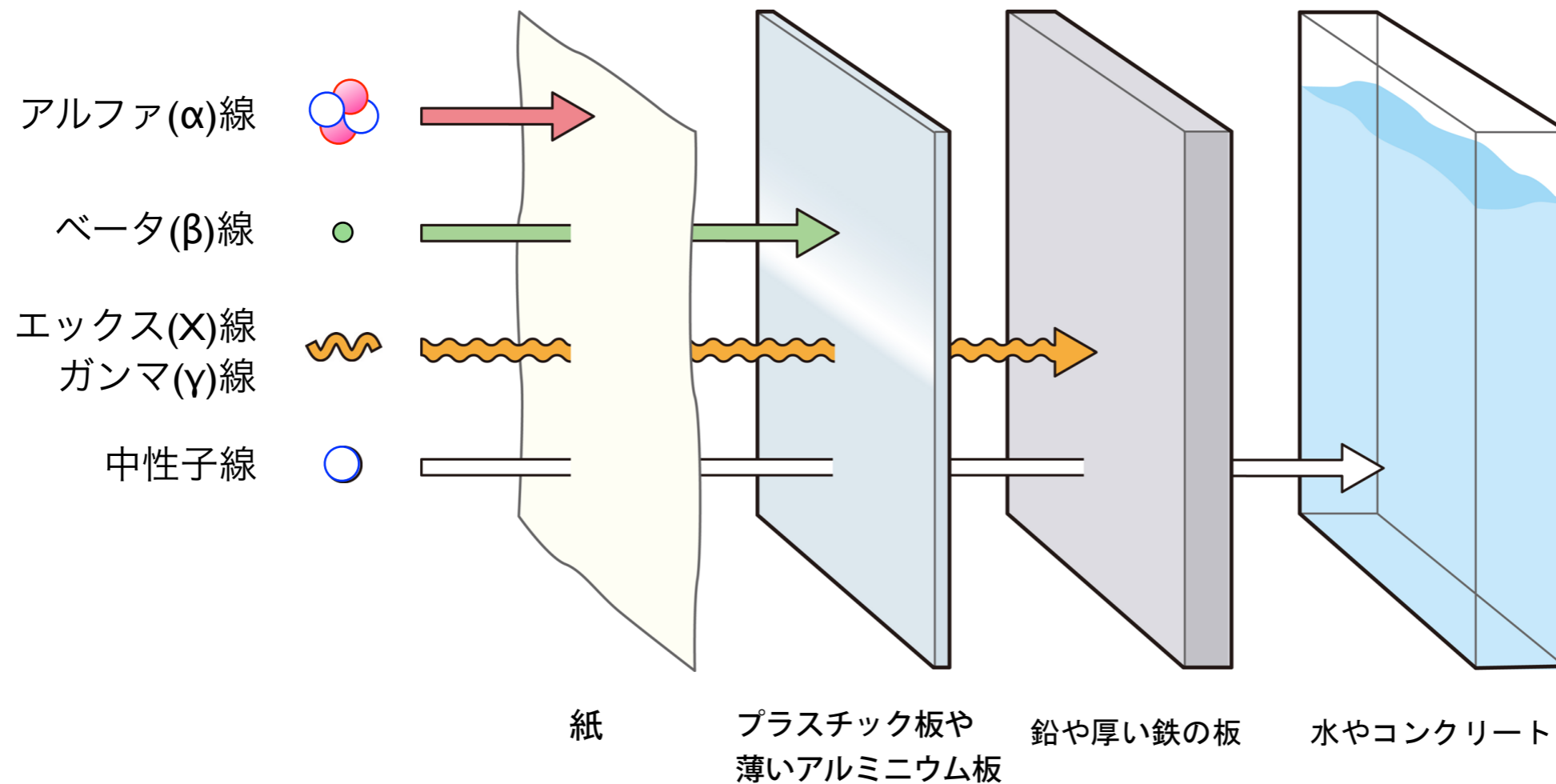
物質によらず **W ≈ 30 eV** 程度。

# 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。



質量阻止能  
MeV / (g / cm<sup>2</sup>)

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



# 放射線の種類と被ばく

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

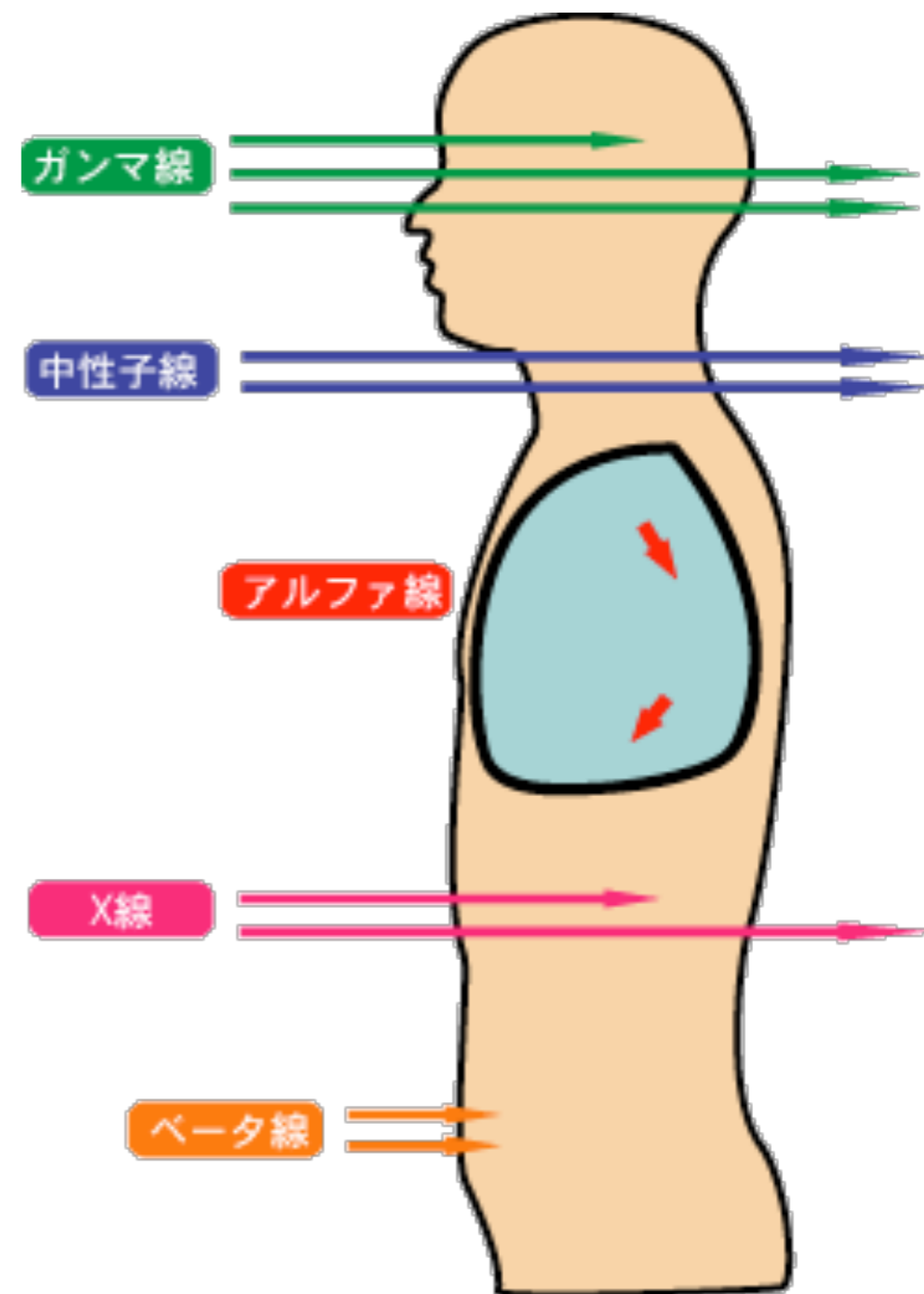


図3 人体を透過する放射線

# 原発北西方向の汚染と「ホットスポット」

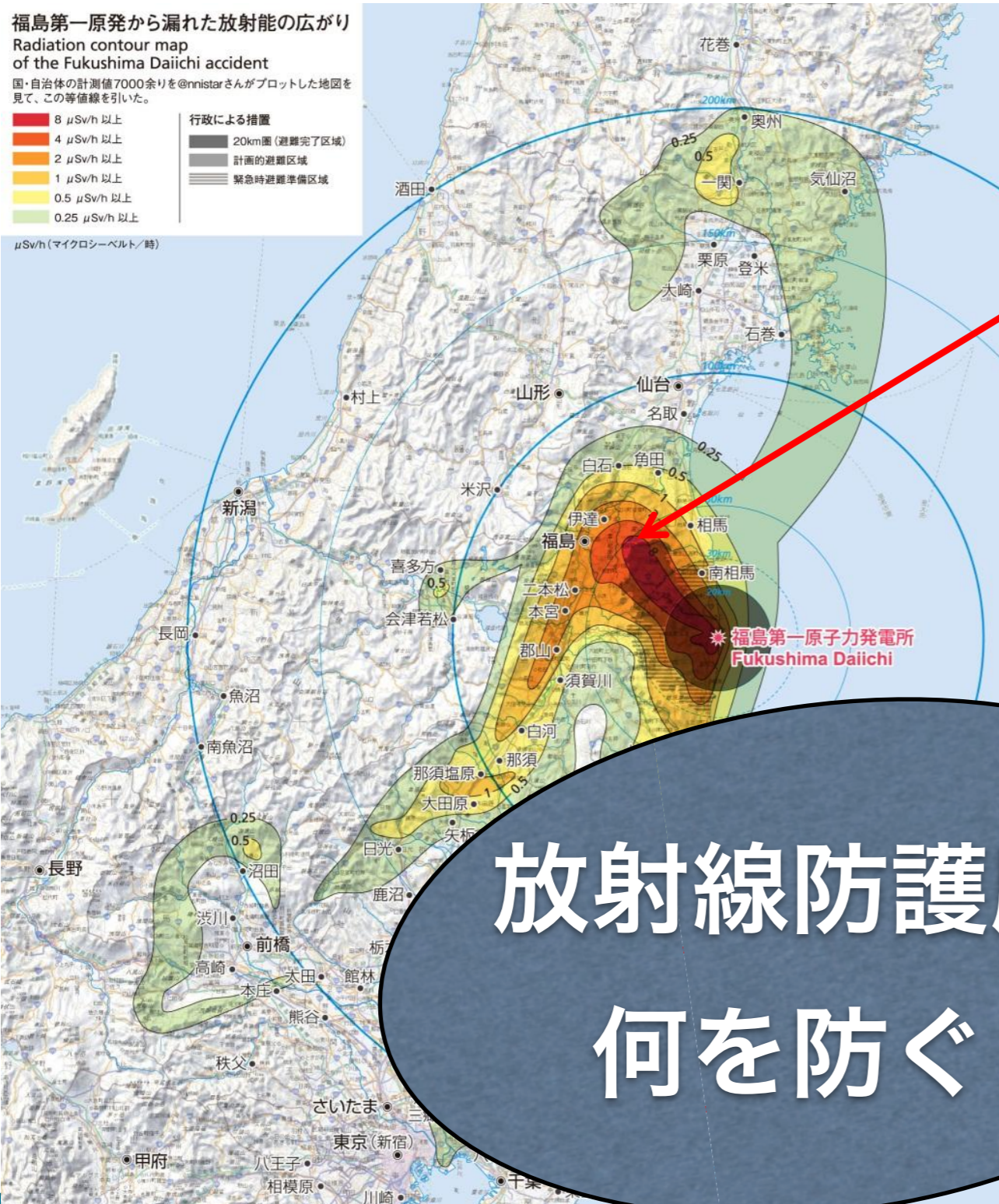
福島第一原発から漏れた放射能の広がり  
Radiation contour map  
of the Fukushima Daiichi accident

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。

# 原発北西方向の汚染と「ホットスポット」



放射線防護服は  
何を防ぐ？



早川由紀夫教授(群馬大学)作成、7月26日版



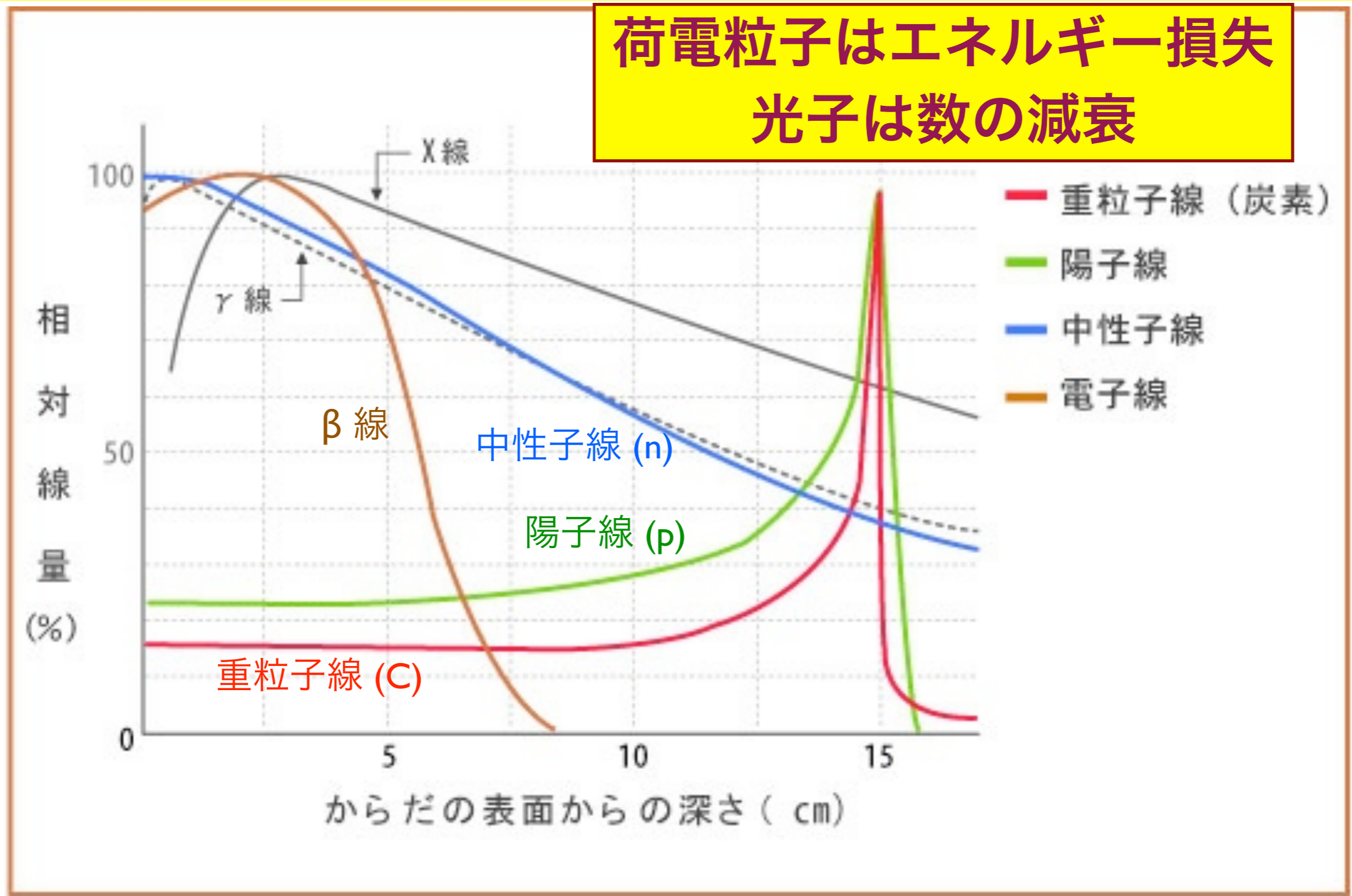
三訂版7月26日(初版4月21日)  
等値線作成: 早川由紀夫(群馬大学) (kipuka.blog70.fc2.com/  
@nnistarさんの地図 (www.nnistar.com/gmap/fukushima.html)  
Contour lines drawn by Yukio Hayakawa (Gunma Univ.),  
Source: @nnistar  
地図製図: 萩原佐知子  
背景地図には電子国土ポータル(portal.cyberjapan.jp)の地図を使用しました。

陽子(p)、 $\alpha$ 、重粒子線は飛程が揃っている。

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

中性子(n)、光子(X,  $\gamma$ ) は反応が確率的に起こるため、指数関数的減衰をする。

**荷電粒子はエネルギー損失  
光子は数の減衰**



# 放射線と物質との相互作用

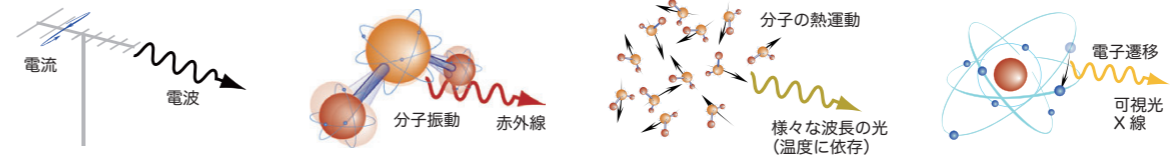
## 光子の減衰

# 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で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。

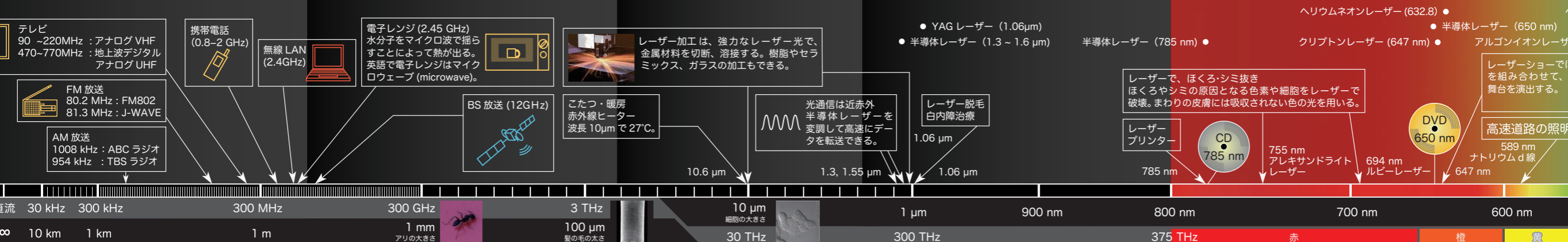


## 波としての光

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)。
- ラジオ: 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)

### 遠赤外光

低温の黒体放射

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

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

### 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

### 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。

### 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 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。

紅葉: アントシアン、カロテノイド、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テノイドの黄色に、その後、アントシアンがつくられて赤色に変わる。

発光ダイオードは、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。

### 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、互いにめっけ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。

### 空の青色は光の散乱

光が小さな粒子（分子）に当たると散乱します。波長の短い光は長い波長の光よりよく散乱します。空が青いのも夕焼けが赤いのも光の散乱の効果です。もとの光から色ずれて散乱する光があります。**ラマン散乱**といひ、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。

### 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ひます。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。

### 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。

### 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ひわれています。天文学者のケプラーは彗星 (ほうき星) の尾がいつも太陽と反対側にのびのびを見て、太陽からの光の圧力のせいだと考えました。スティブン・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。

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。

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

モルフォ蝶と、羽の電子顕微鏡写真

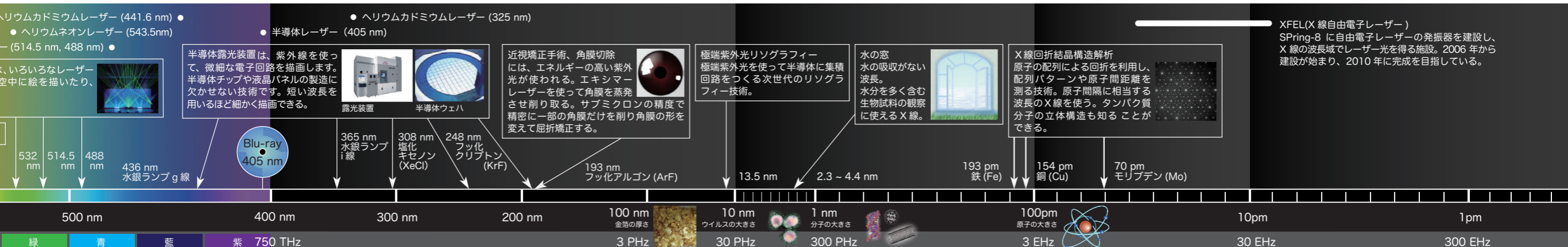
七色に光るCDの表面

「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、 $3 \times 10^8$  m/s です。

光が非常に弱くなると、光が粒々であることが見えてきます。光を光子（フォトン）といいます。光は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 | $\gamma$ 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)        | 1997年 | レーザー冷却法による中性原子の凝縮 (E. アーノルト)                     |
| 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、レーザー効果の発見 (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線回折法による生体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 | 原子核反応と $\gamma$ 線に関する研究 (W. ボーテ)               | 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. グラウパー)                       |
| 1921年 | 光電効果の法則の発見 (A. アインシュタイン)       | 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) | 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)    |



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。

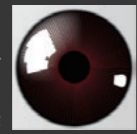
紫外光	軟X線 (極短紫外を含む)	X線	$\gamma$ 線
目に見えない光、外殻電子遷移エネルギー	内殻電子遷移エネルギー、水に吸収されない	内殻電子遷移エネルギー	原子核・素粒子の遷移エネルギー
<p>光学顕微鏡は微小な物体を拡大して観察できる。物体の反射率や光吸収、蛍光発光の分布をもとに観察像をつくる。分子の振動や偏光特性を観察する顕微鏡もある。紫外から近赤外の広い波長範囲の光が使われる。</p> <p>昆虫灯で昆虫を引き寄せ、電気ショックで駆除する。紫外線は昆虫の可視域。</p> <p>動物の目には2色から4色を見分けるセンサーがあり、それらに入る光のバランスで色を認識する。人間は、550nmの波長を、最も明るく感じる。</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様相が見える。</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線は大気をは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。</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 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><math>\gamma</math>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<math>\gamma</math>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><math>\gamma</math>線滅菌 弱い<math>\gamma</math>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<math>\gamma</math>線を照射する。</p>

光は横波	光の速度は	太陽の七変化	色の見え方
<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>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10万光年です。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、<b>フォトリソグラフィ</b>や<b>プラズマディスプレイ</b> (金属薄膜) で、速度がとても遅い<b>スローフォトン</b>をつくり出す研究が進んでいます。</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。<b>グリーンフラッシュ</b>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もまれに見られる珍しい現象です。</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<b>光の3原色</b>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 (<b>色の3原色</b>) 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と色をつくり出します。</p>

# 一家に1枚 光マップ <http://stw.mext.go.jp/>

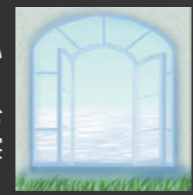
325 nm)

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。

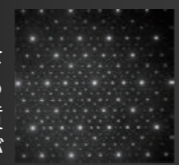


極端紫外光リソグラフィー 極端紫外光を使って半導体に集積回路をつくる次世代のリソグラフィー技術。

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

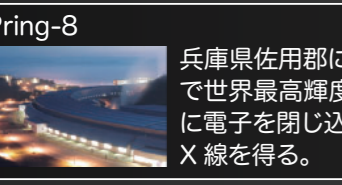
外殻電子遷移エネルギー

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。



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。



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0.0000000000000001秒(0が18個)。そんな一瞬しか光らないパルスレーザー。このレーザーを使えば、電子が止まって見える。100アト秒では光はたった30nmしか進めない。真空紫外線や軟X線の光でつくられる。

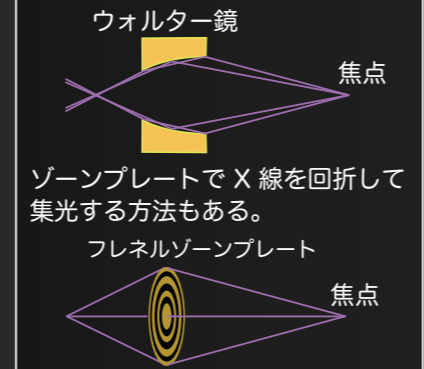
### 軟X線 (極短紫外を含む)

内殻電子遷移エネルギー、水に吸収されない

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

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

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



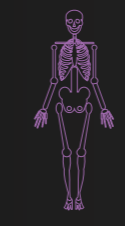
反射には、Mo/SiやCr/Scなどの多層膜が用いられる。

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。

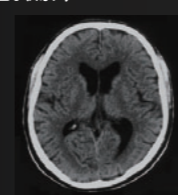
### X線

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。



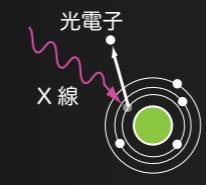
X線CT (コンピュータ断層撮影) 様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。



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。



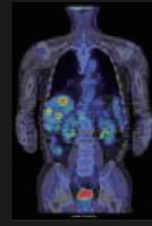
XPS(X線光電子分光) X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。



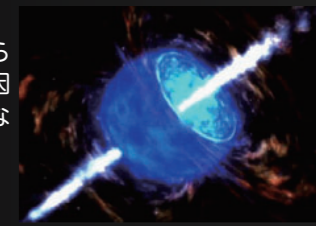
### γ線

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。





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

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

重い粒子は飛程がほぼ揃っている。

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

## 光子（X線・ $\gamma$ 線）の減衰（減弱）

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

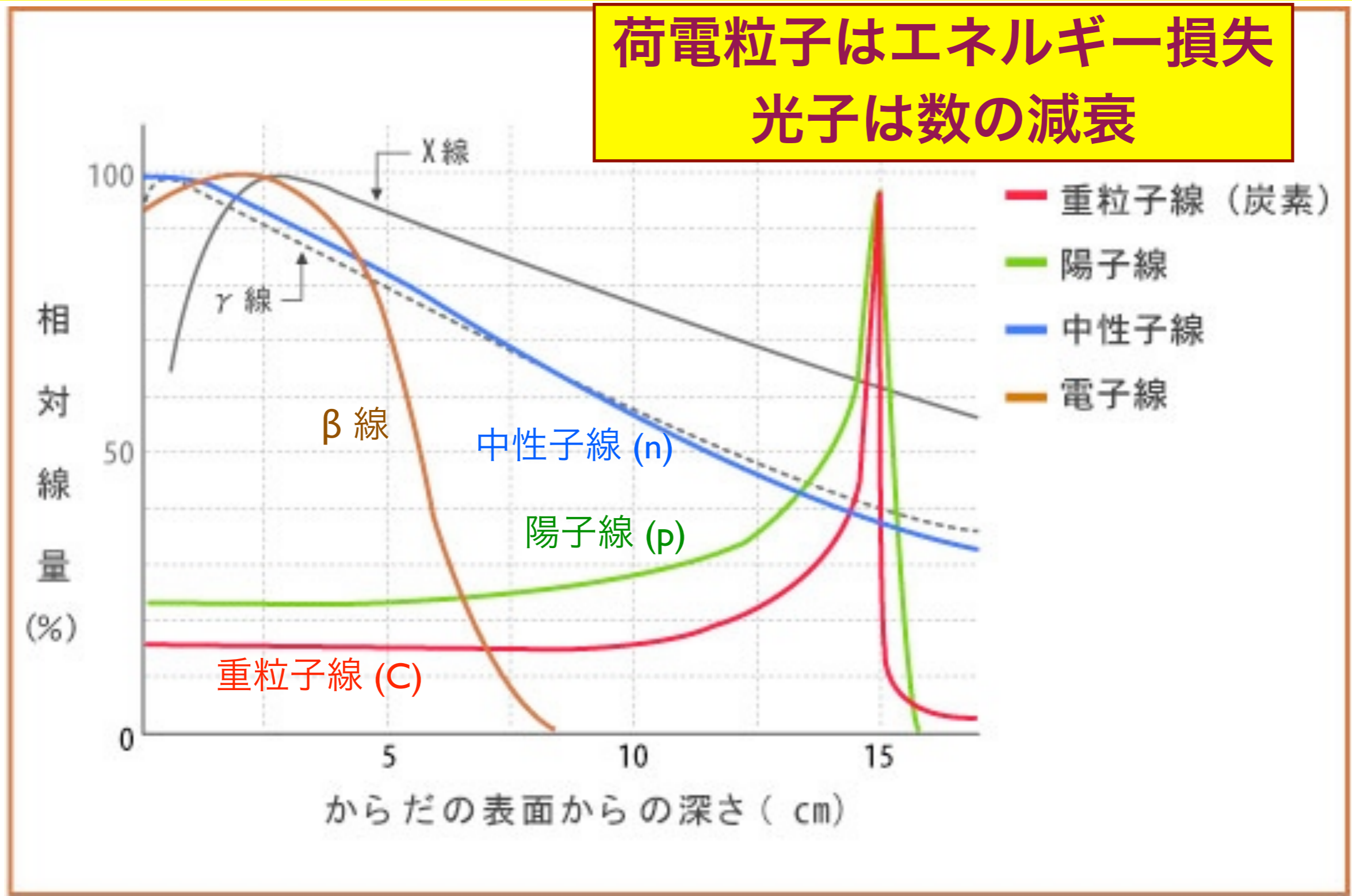
**反応断面積  $\sigma$** （単位距離当たりの**反応確率**を与える）が重要

陽子(p)、 $\alpha$ 、重粒子線は飛程が揃っている。

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

中性子(n)、光子(X,  $\gamma$ ) は反応が確率的に起こるため、指数関数的減衰をする。

**荷電粒子はエネルギー損失  
光子は数の減衰**



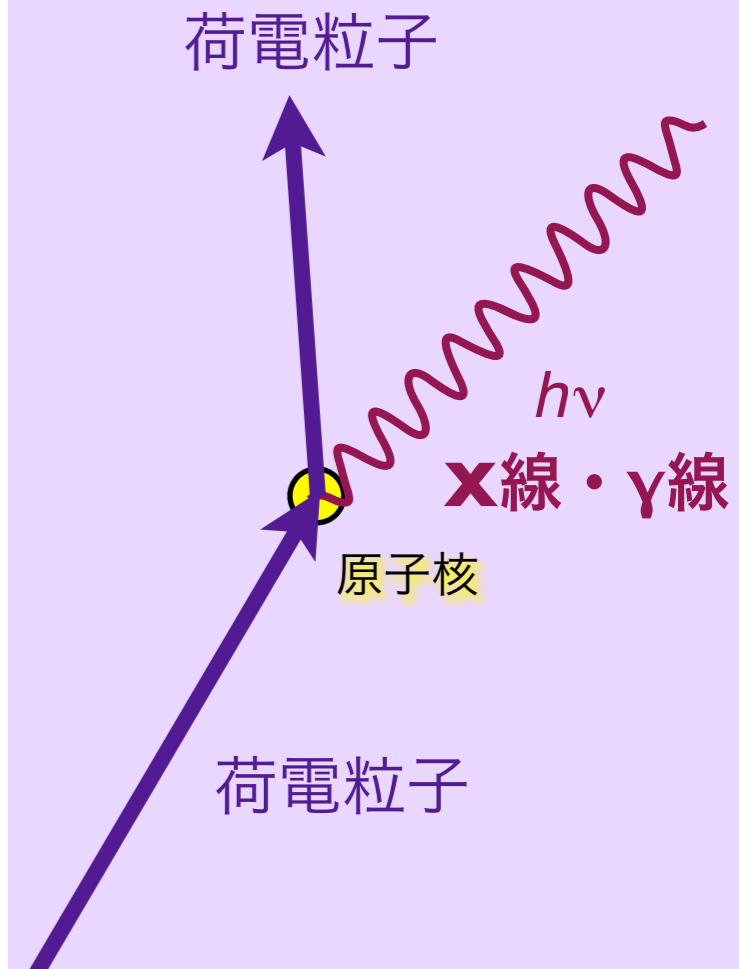
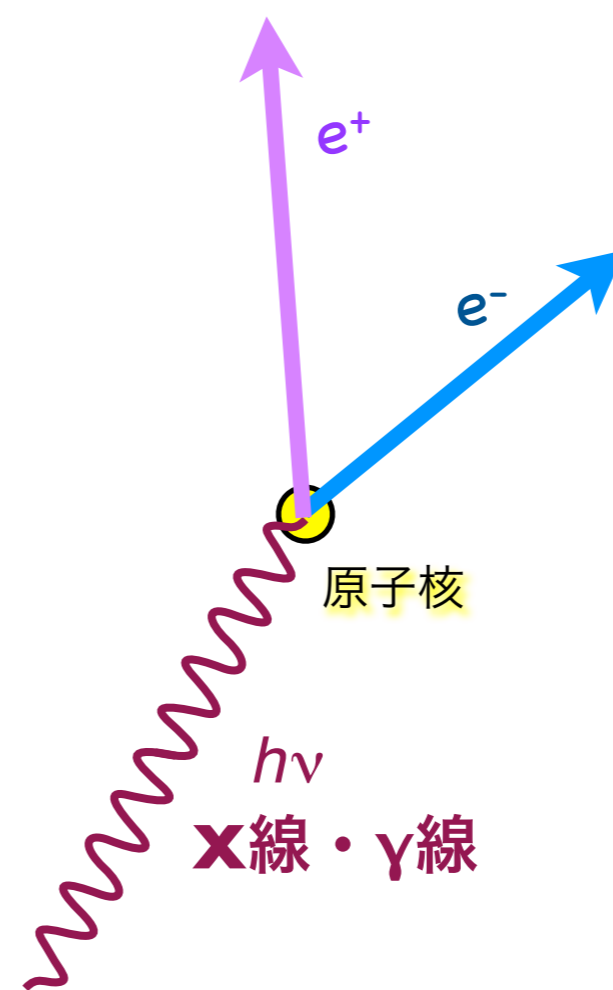
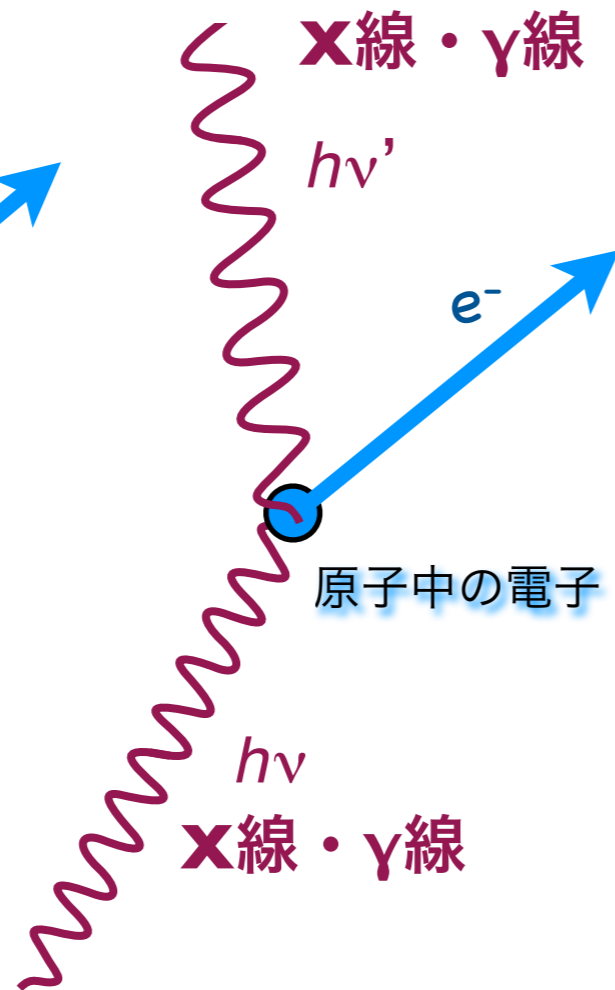
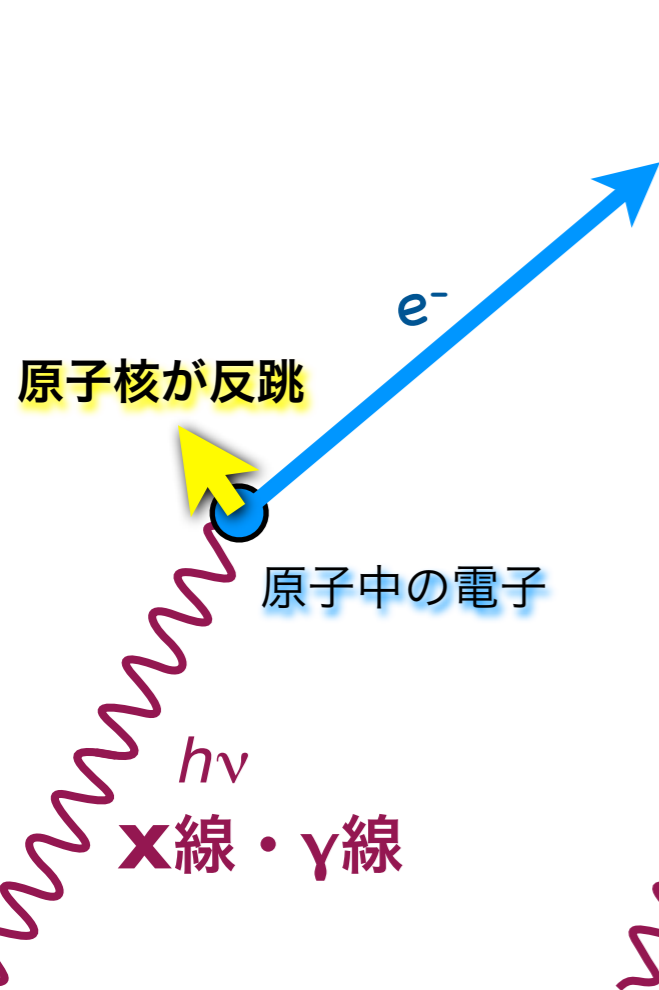
# 光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

## 光電効果

## コンプトン散乱

## 電子対生成

## 制動放射



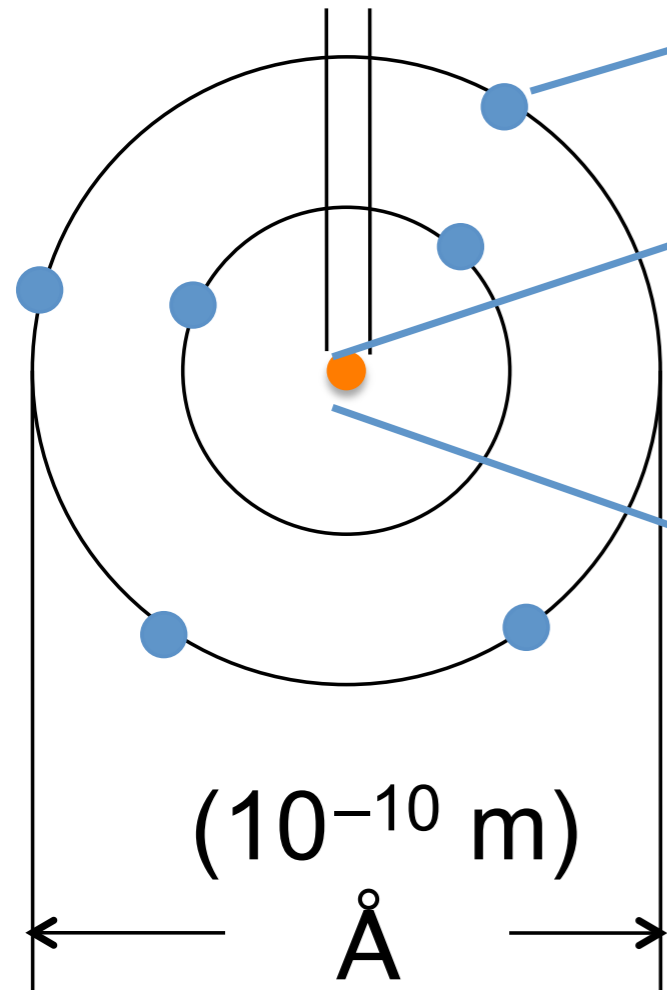
高エネルギーの電子線 (β線と同じ) が発生

# 放射性崩壊と放射能

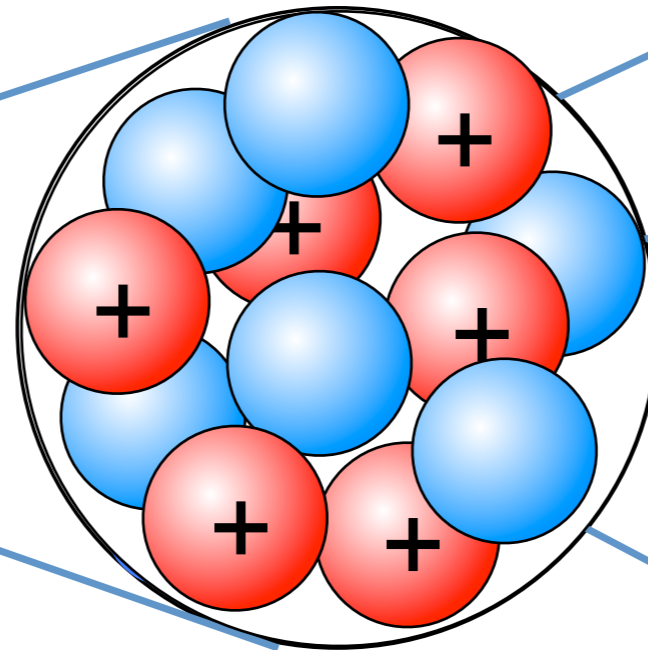
# 原子と原子核

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

軌道電子

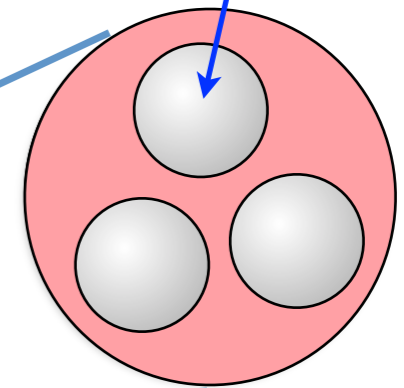


原子

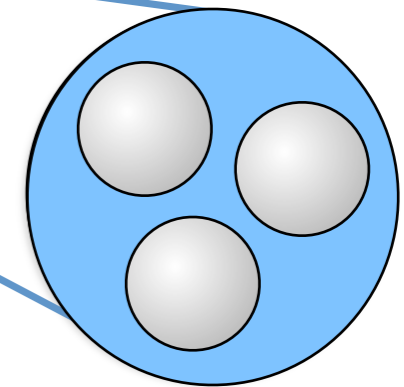


原子核

クォーク



陽子



中性子

炭素原子  ${}^6_{12}\text{C}$  の模式図

# 放射性物質とは

放射性核種

= 放射性同位体

= 不安定原子核

を含む原子からできている物質

# 放射性物質とは

放射性核種  
= 放射性同位体  
= 不安定原子核

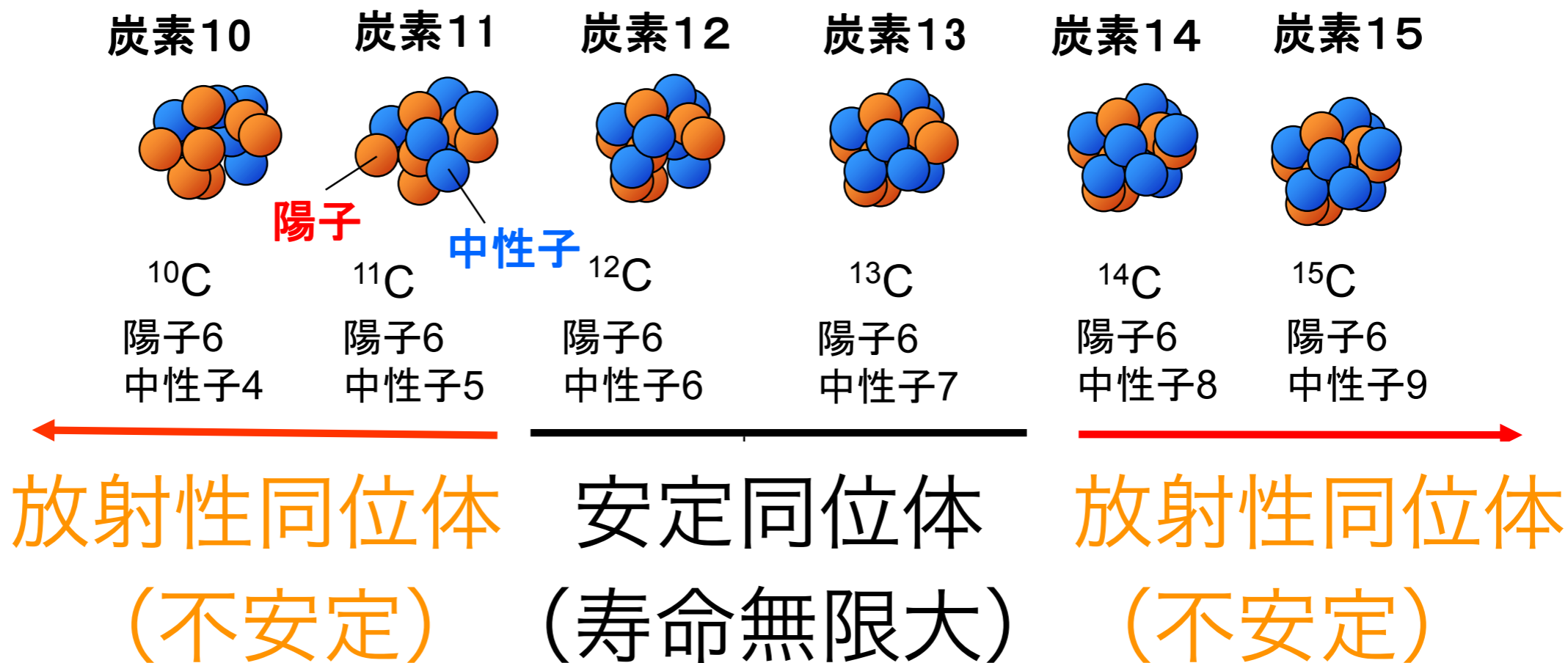
を含む原子からできている物質

$$\text{質量数 } A = Z + N$$



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



C-12

炭素12



# 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

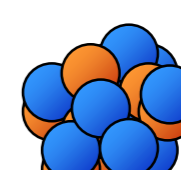
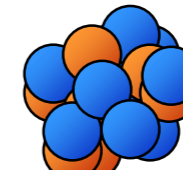
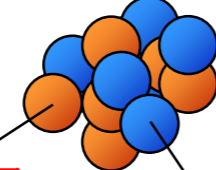
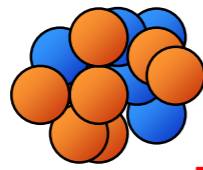
炭素11

炭素12

炭素13

炭素14

炭素15



$^{10}\text{C}$

$^{11}\text{C}$

$^{12}\text{C}$

$^{13}\text{C}$

$^{14}\text{C}$

$^{15}\text{C}$

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

中性子4

中性子5

中性子6

中性子7

中性子8

中性子9

陽子過剰になると？

(寿命がある:  $\beta^+$ 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:  $\beta^-$ 壊変)

**放射性同位体**

半減期

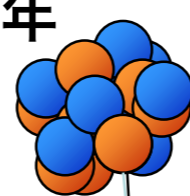
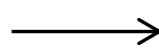
5730 ± 40年



中性子

炭素14

(放射性同位体)



陽子

窒素14

(安定)

+  $e^-$

電子

( $\beta$ 線: 放射線)

+  $\bar{\nu}_e$

反ニュートリノ

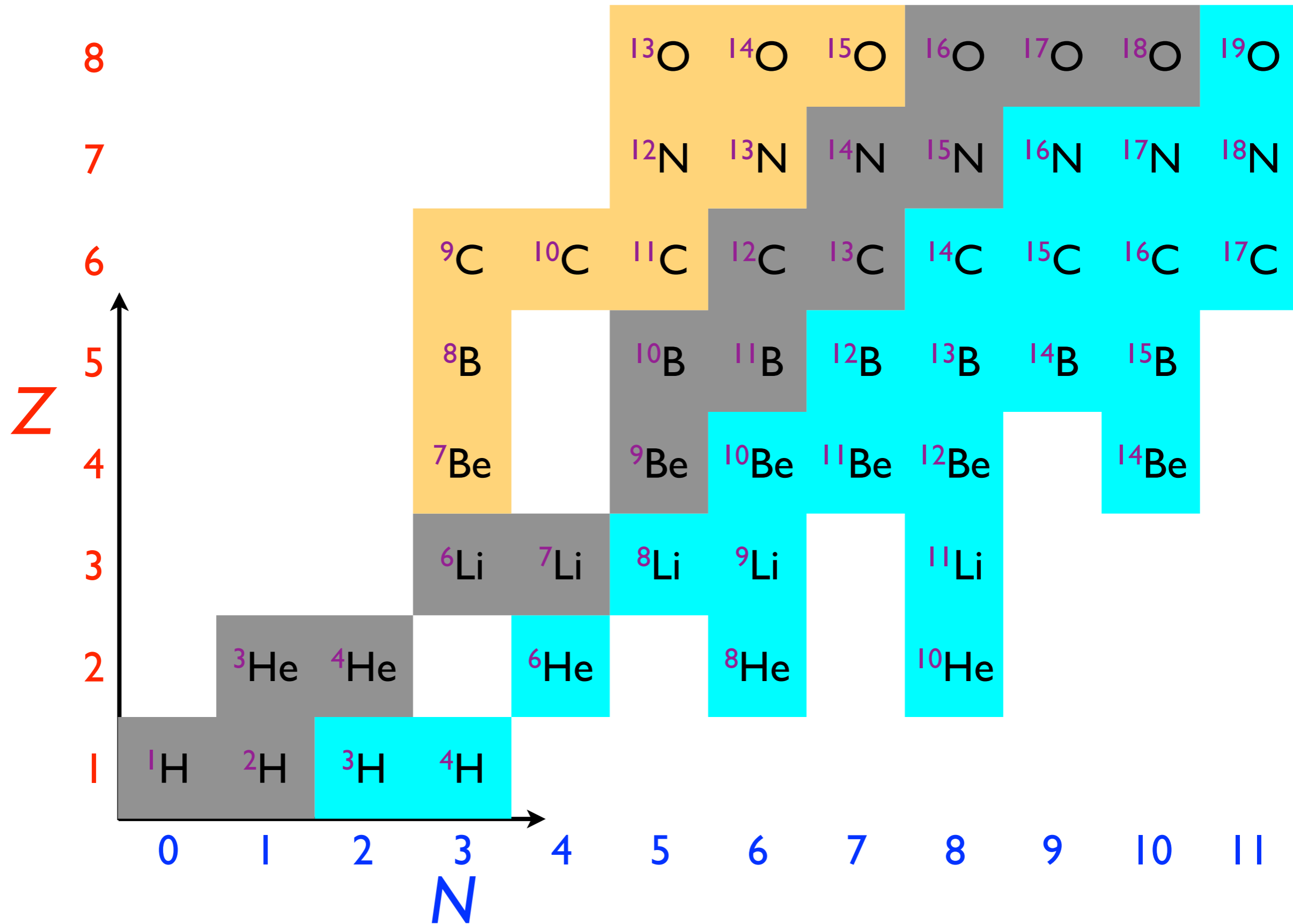
**放射性同位体**

ベータマイナス壊変 (崩壊)



$\beta^-$  decay

# 核图表



# Nuclear Science

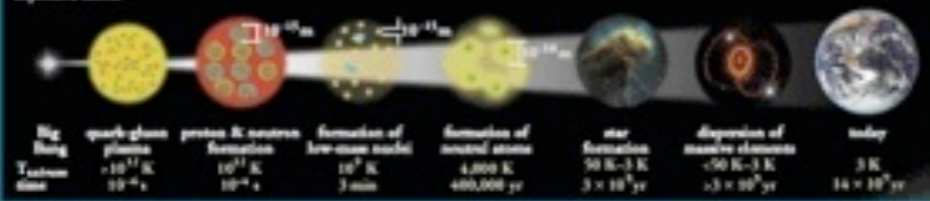
**Nuclear Science** is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as "Why do nucleons stay in the nucleus? What combinations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

**Legend**

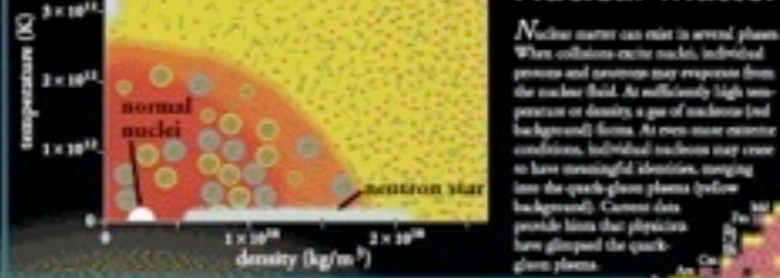
- electron ( $e^-$ )
- quark
- photon ( $\gamma$ )
- gluon field
- gluon
- neutrino ( $\nu$ )
- gluon
- photon ( $\gamma$ )
- Neutron =  $A - Z$
- Proton =  $Z$
- Atomic Number =  $Z$
- Mass Number =  $A$

## 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, some 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 stars (supernovae) from the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.

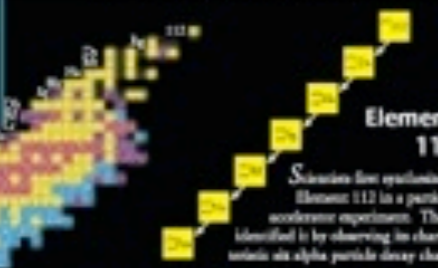


## Phases of Nuclear Matter



## Unstable Nuclei

Stable nuclei form a narrow white band on the Chart of the Nuclides. Scientists produce unstable nuclei for 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**  
 $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + ^4_2\text{He}$

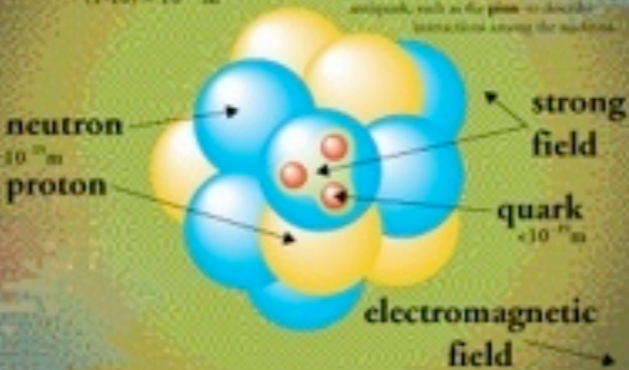
**Beta Minus Decay**  
 $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$

**Beta Plus Decay**  
 $^{11}_6\text{C} \rightarrow ^{11}_5\text{B} + e^+ + \nu_e$

**Gamma Decay**  
 $^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow ^{60}_{27}\text{Co} + \gamma$

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 neutrino for a neutron. A positron is the antiparticle of the electron. Antineutrino is composed of anti-particles. 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 event, the nucleus at distance  $r$  emits an  $\alpha$  particle. When the nucleus decays, it changes from one element to another, the element would have a smaller mass.

## Nuclear Energy

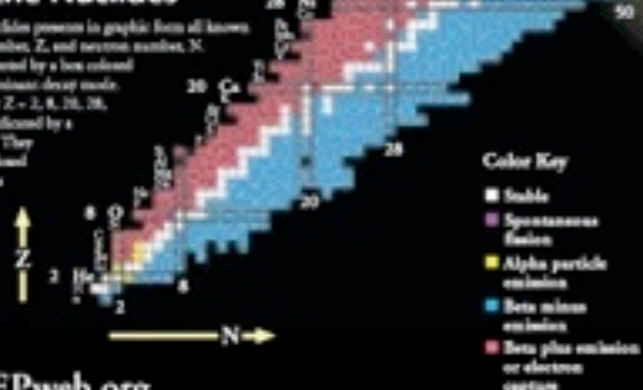
**Fission**  
 $^{235}_{92}\text{U} + n \rightarrow ^{141}_{54}\text{Xe} + ^{90}_{38}\text{Sr} + 2n$

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

In the early stages of nuclear evolution, 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 nuclear evolution, more massive nuclei up to and beyond uranium are synthesized by fusion. By measuring the number of reactions that come from the Sun, scientists recently have demonstrated that reactions must have a mass greater than iron.

## 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 ( $2, 8, 20, 28, 50, 82$  and  $126$ ) are indicated by a rectangle on the chart. They correspond to major shell gaps and show regions of greater nuclear binding energy.



## Applications

**Radioactive Dating**  
 Recently excavated 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 artifacts found at the site, scientists determined that the landscape 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  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , and  $^{131}\text{I}$ , are commonly used in the diagnosis and treatment of illness. Positron emission tomography (PET) is used in medical diagnosis. Technetium-99m ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) is generally regarded as the most important of these isotopes.

**Space Exploration**  
 Radioisotopes and alpha particles to identify chemical elements present in Martian rocks. On Earth, nuclear reactors are used to study some form, structural components or an environment.

**Nuclear Reactors**  
 Nuclear reactions are 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 this waste is a subject of current research.

**Magnetic Resonance Imaging**  
 Magnetic Resonance Imaging (MRI) makes use of atomic transitions 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

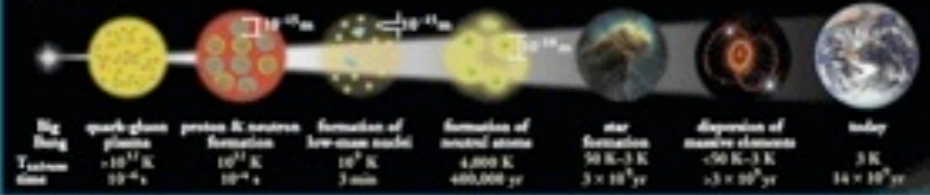
Nuclear Science is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as "Why do nucleons stay in the nucleus? What combinations of 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**

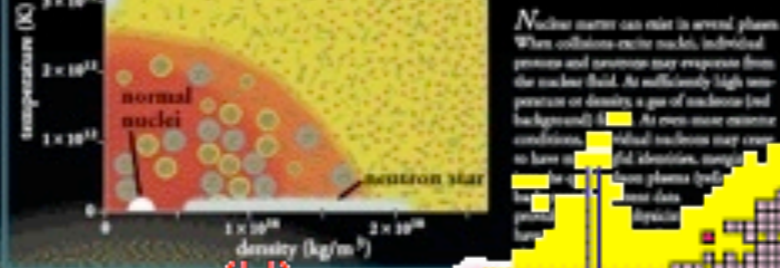
- electron ( $e^-$ )
- positron ( $e^+$ )
- neutrino ( $\nu$ )
- antineutrino ( $\bar{\nu}$ )
- quark
- gluon field
- gluon
- photon ( $\gamma$ )
- Neutron =  $A - Z$

## 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, some 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 stars (supernovae) from the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.

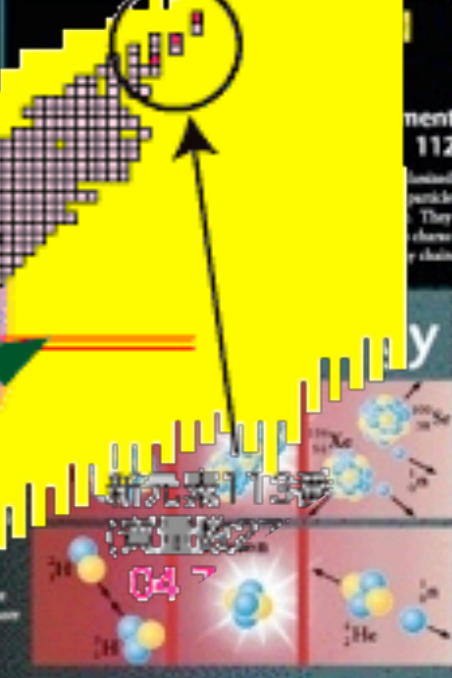


## Phases of Nuclear Matter



## Unstable Nuclei

Stable nuclei form a narrow white band on the Chart of the Nuclides. Scientists produce unstable nuclei for 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 1000 more nuclei that have not yet been discovered.



## 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 an antineutrino for a neutron or captures an electron and emits a neutrino. A positron is the name for the antiparticle of the electron. Antineutrino is composed of anti-particles. 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.

**Alpha Decay:**  $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\text{He}$

**Beta Minus Decay:**  $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}$

**Beta Plus Decay:**  $^{11}_6\text{C} \rightarrow ^{11}_5\text{B} + e^+ + \nu$

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

## 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 decay mode. Magic numbers (2 or Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82 and 126) are indicated by a triangle on the chart. They correspond to major shell shells and show regions of greater nuclear binding energy.

## Applications

**Radioactive Dating:** Nearly-sentient 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 carbon 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  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , and  $^{131}\text{I}$ , are commonly used in the diagnosis and treatment of disease. Positive electron emitters such as  $^{18}\text{F}$  are used in Positron Emission Tomography (PET) to generate images of brain activity.

**Space Exploration:** Uranium and alpha particles to identify chemical elements present in Martian rocks. On Earth, nuclear reactors are used to study some form, structural components or an environment.

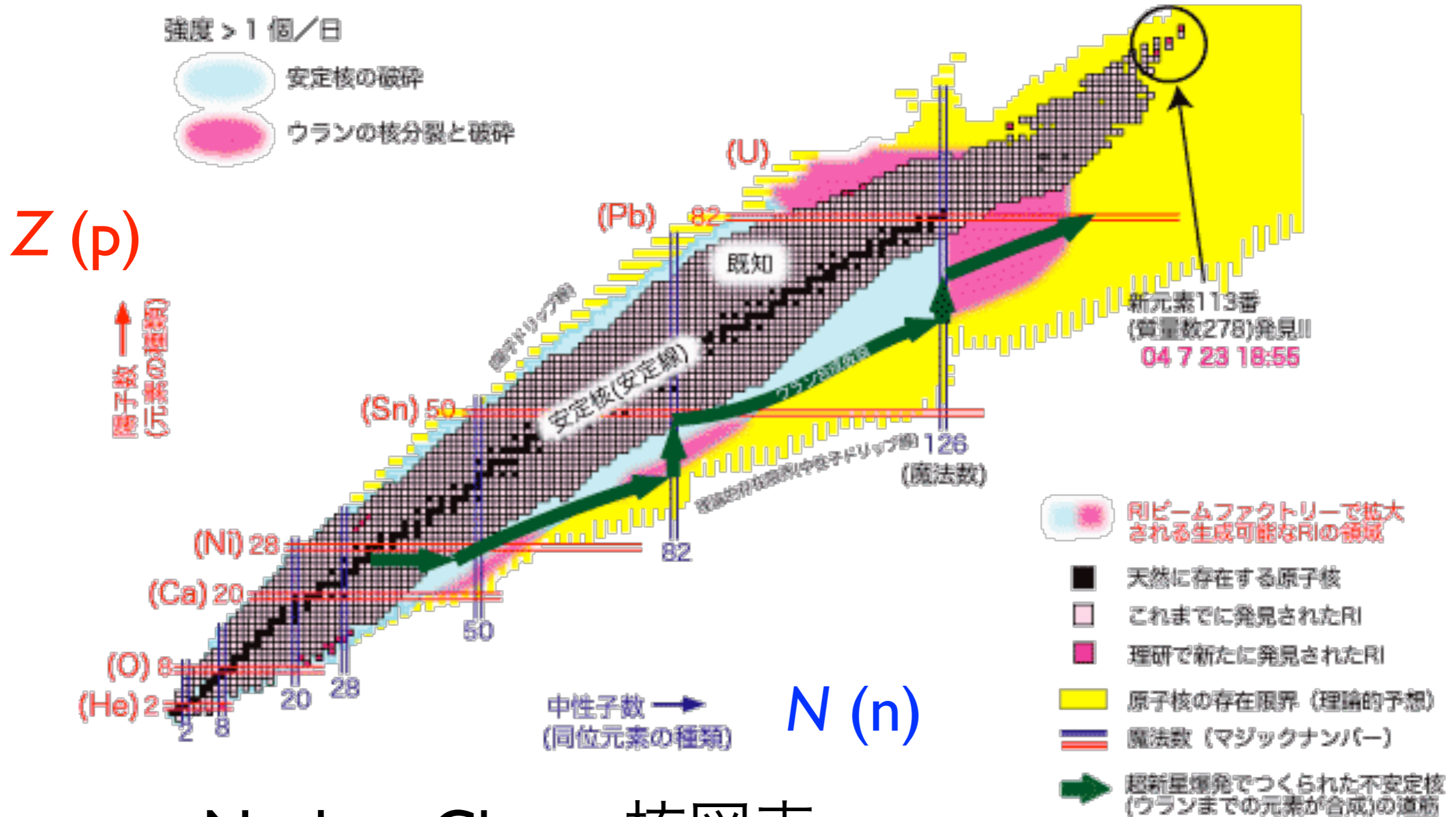
**Nuclear Reactors:** Nuclear reactions are the basis of  $^{235}\text{U}$  or  $^{239}\text{Pu}$  nuclei to produce electric power. Reactors and other nuclear applications generate radioactive waste, disposal of the waste is a subject of current research.

**Magnetic Resonance Imaging:** Magnetic Resonance Imaging (MRI) makes use of atomic transitions 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



# RIKEN



## Nuclear Chart 核図表

# 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

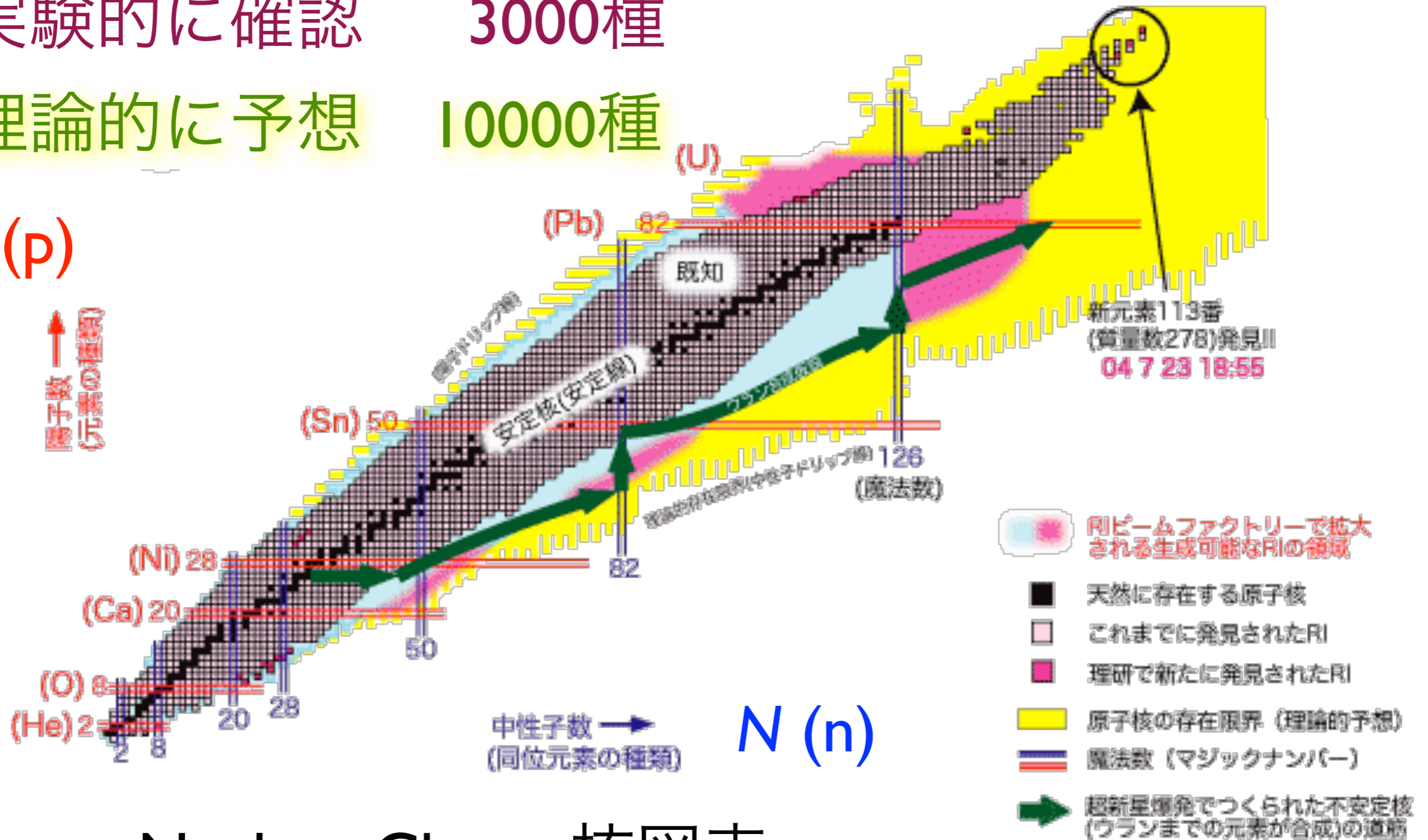
10000種

# 原子核物理学

Nuclear Physics

Z (p)

↑ 陽子数  
(元素の種類)



Nuclear Chart 核図表

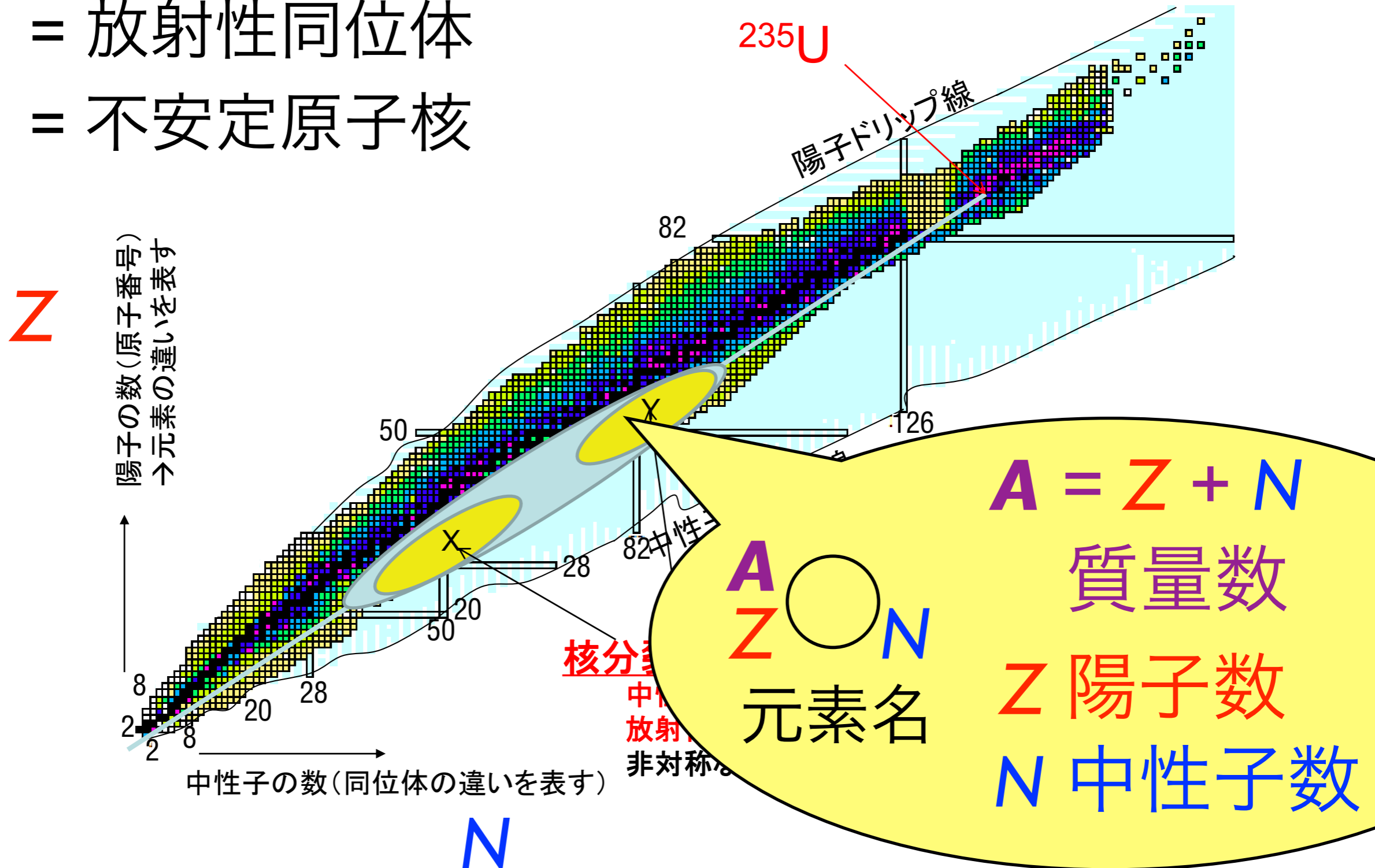
# 放射性物質とは

放射性核種

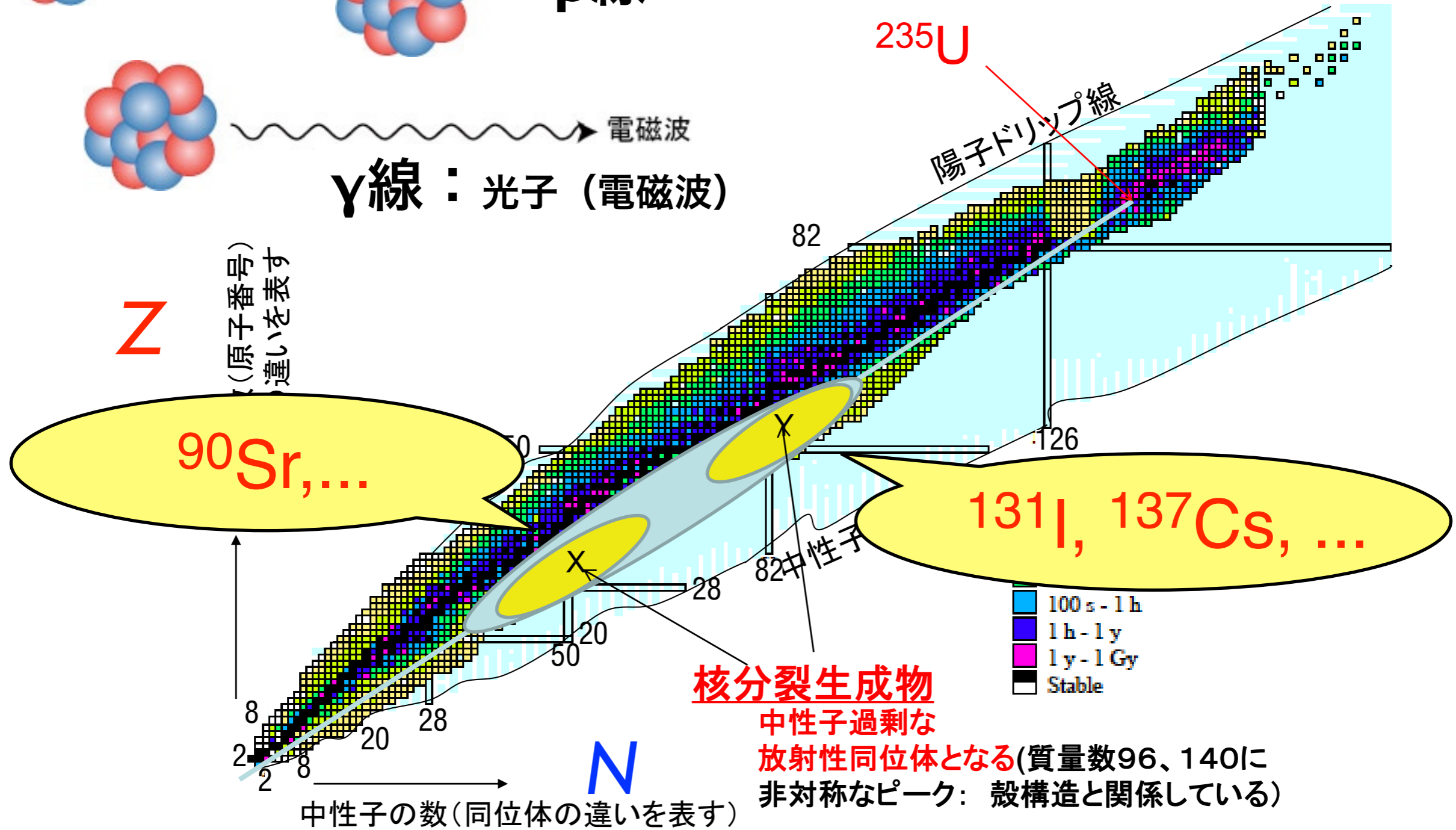
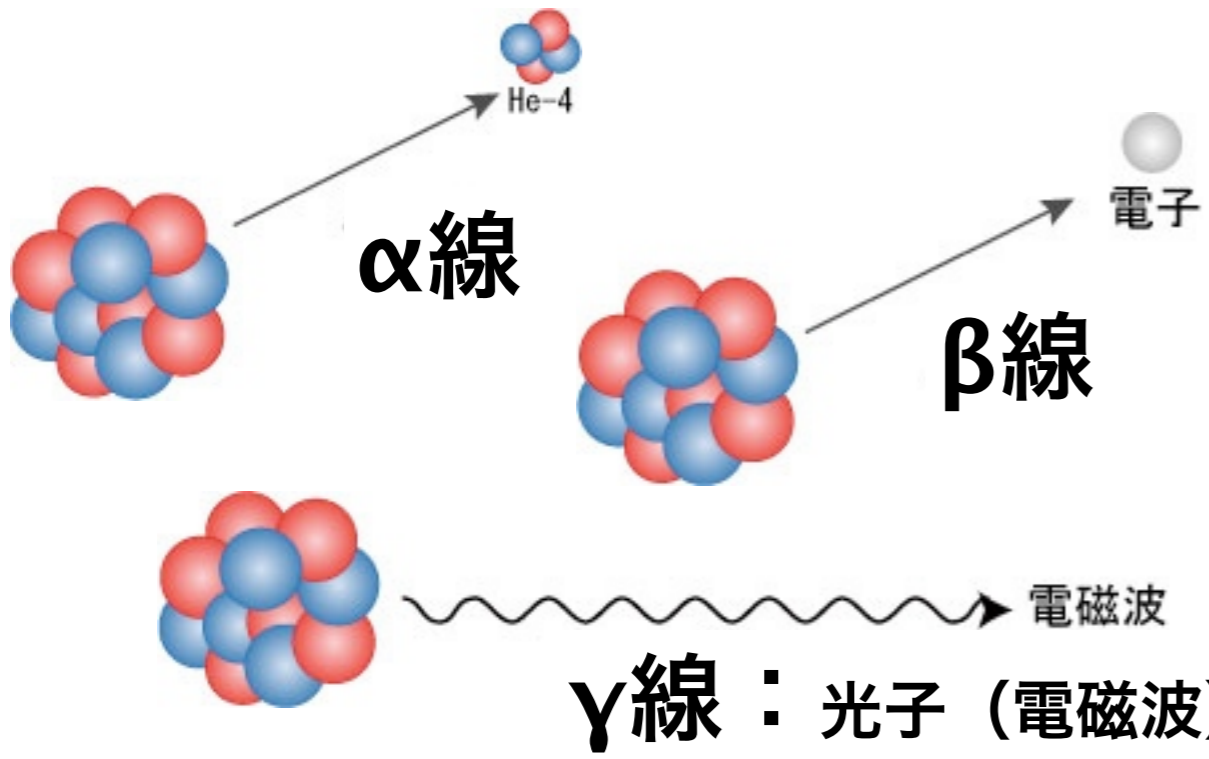
= 放射性同位体

= 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。



**核分裂生成物**  
 中性子過剰な放射性同位体となる(質量数96、140に非対称なピーク: 殻構造と関係している)

Nuclear Chart 核図表



# α 崩壊 (壊変)

decay

# β<sup>-</sup> 崩壊 (壊変)

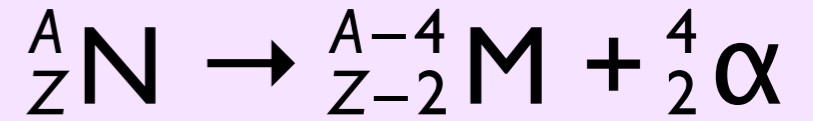
# γ 崩壊 (壊変)

# 原子の脱励起 制動放射

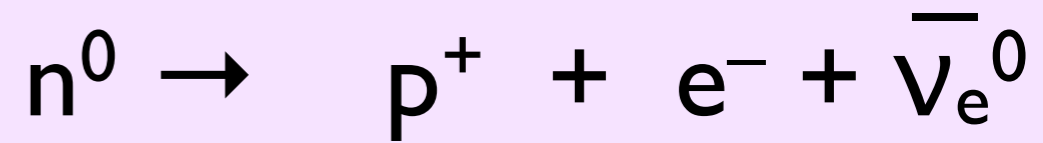
原子核 N



α線



β線



電子

数十 keV ~ MeV

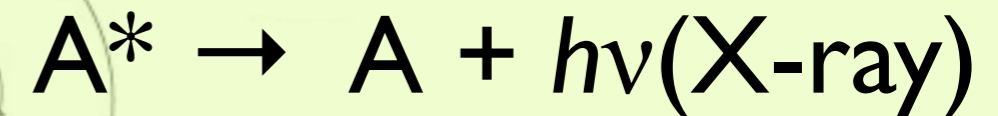


γ線

電磁波



X線



原子 A 0.1 ~ 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

$Z, N$



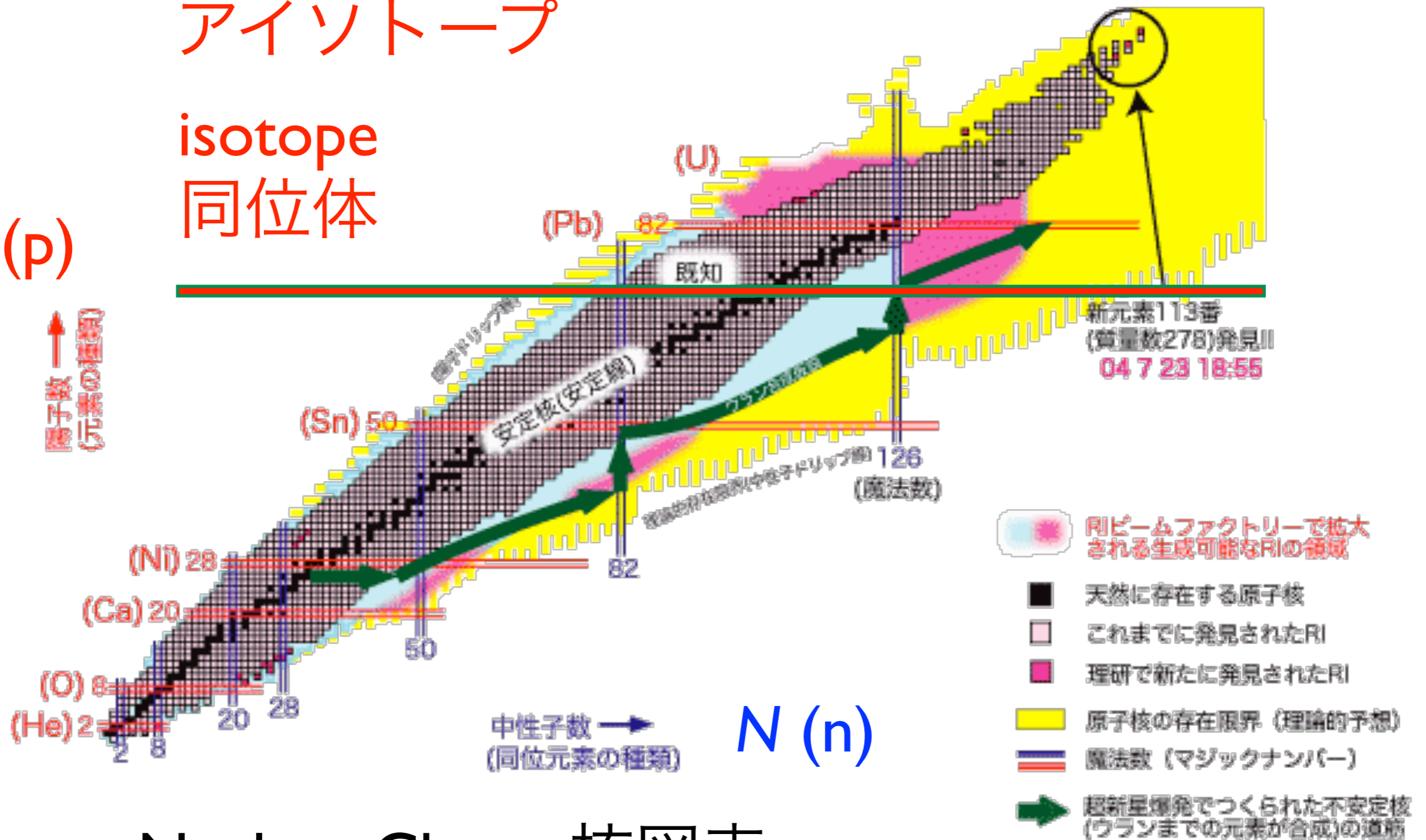
# 原子核物理学

## Nuclear Physics

アイソトープ

isotope  
同位体

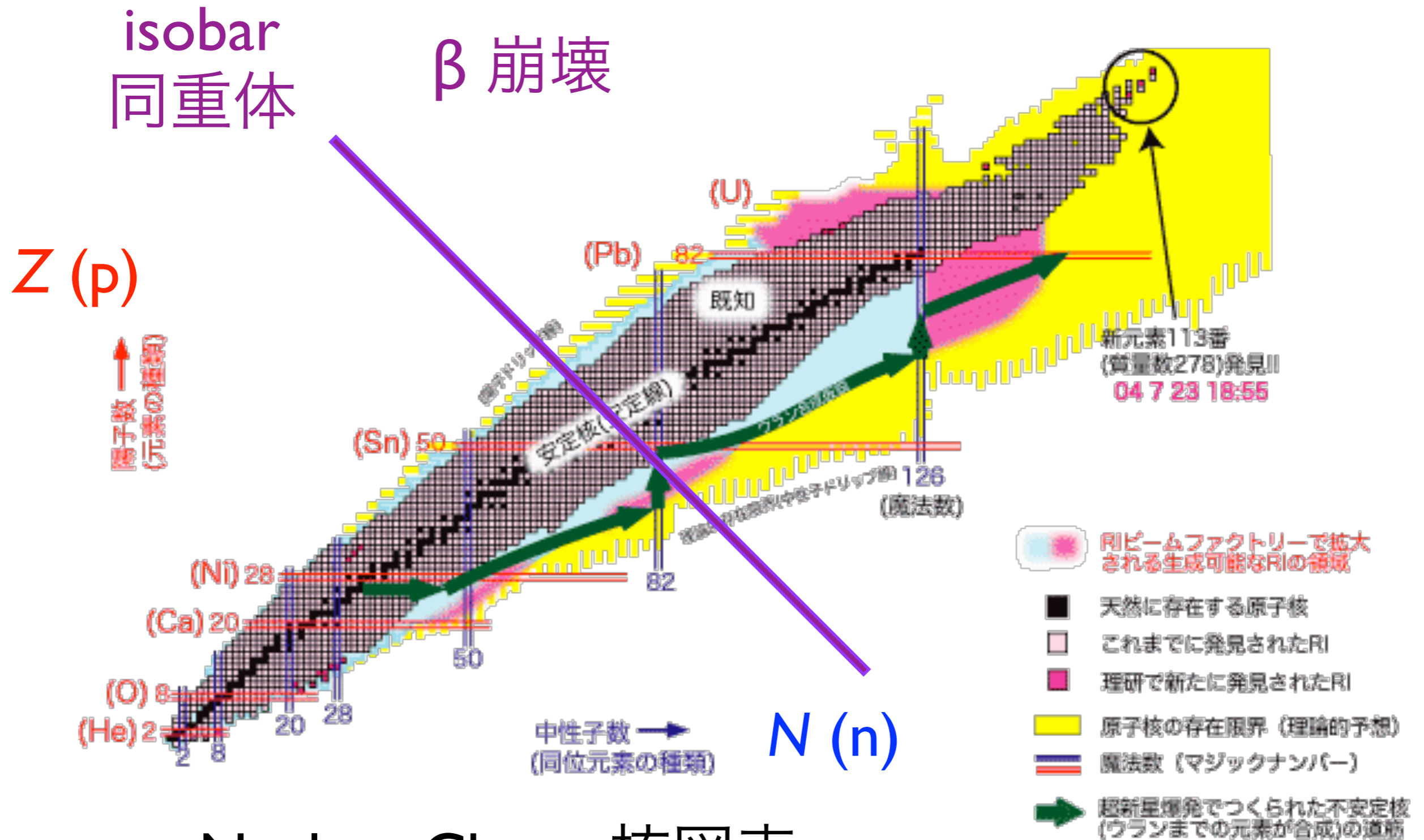
Z (p)



Nuclear Chart 核図表

# 原子核物理学

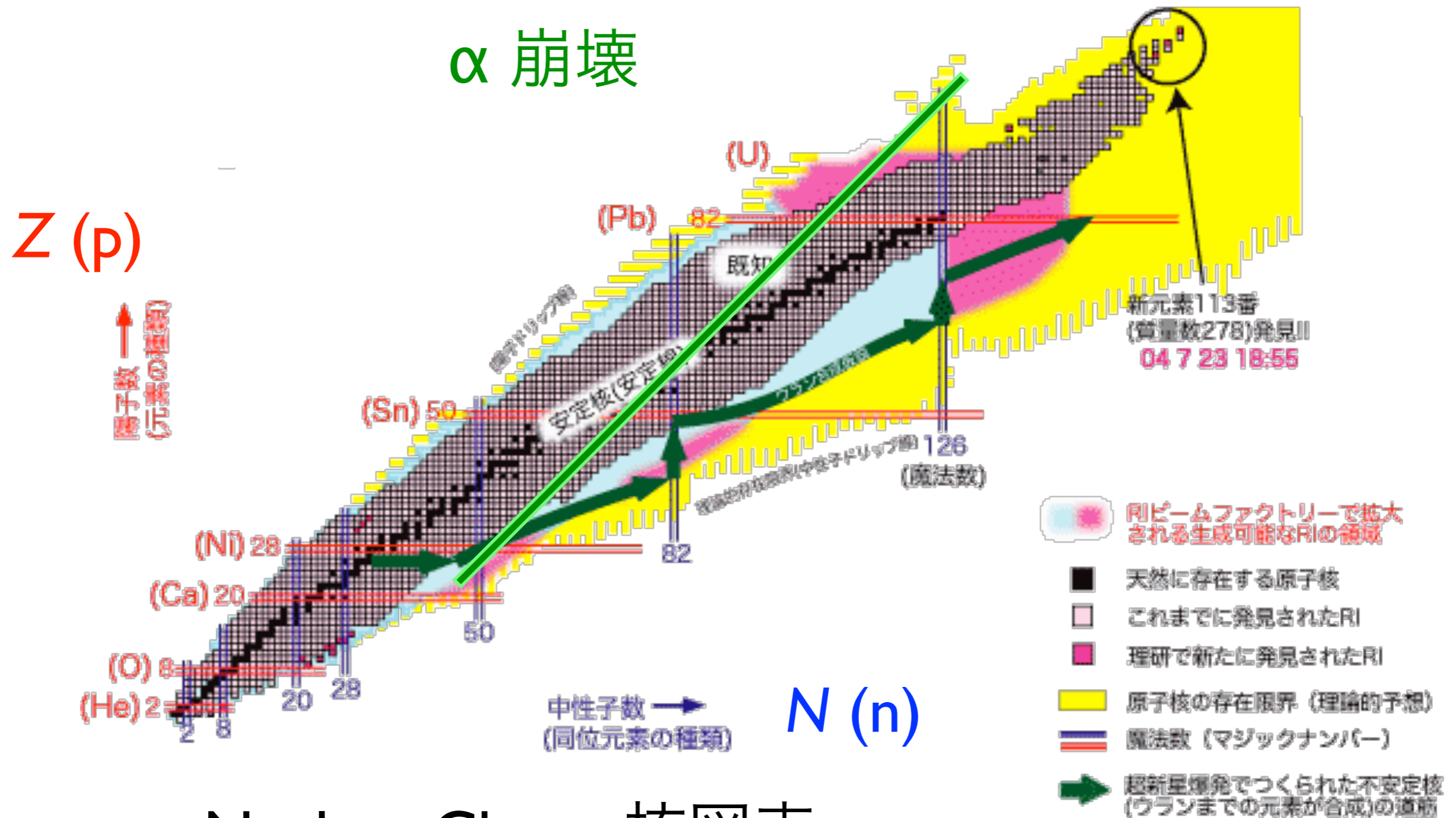
## Nuclear Physics



Nuclear Chart 核図表

# 原子核物理学

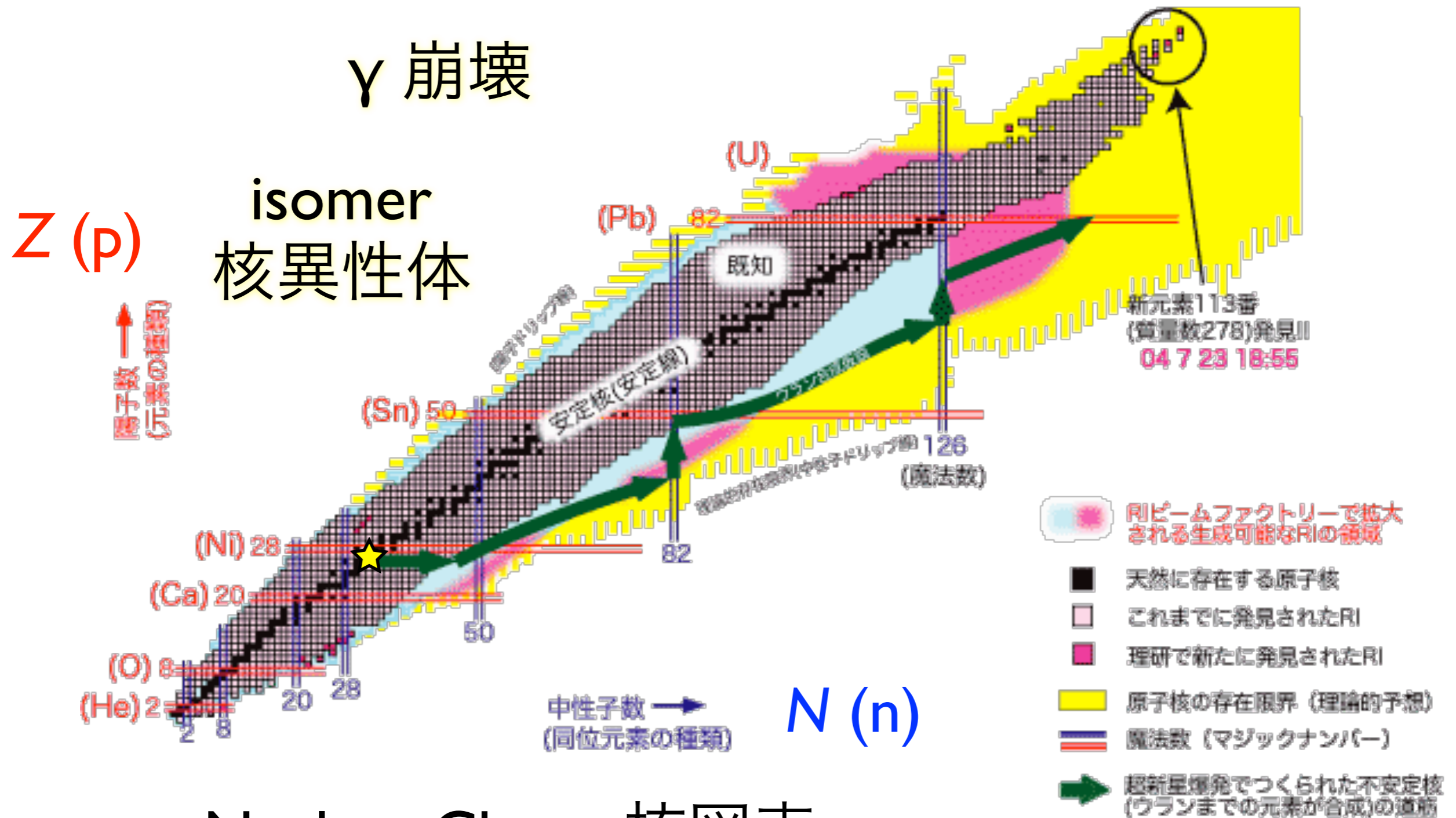
## Nuclear Physics



Nuclear Chart 核図表

# 原子核物理学

## Nuclear Physics



Nuclear Chart 核図表

# 原子核物理学

## Nuclear Physics

$\beta$  崩壊

isobar  
同重体

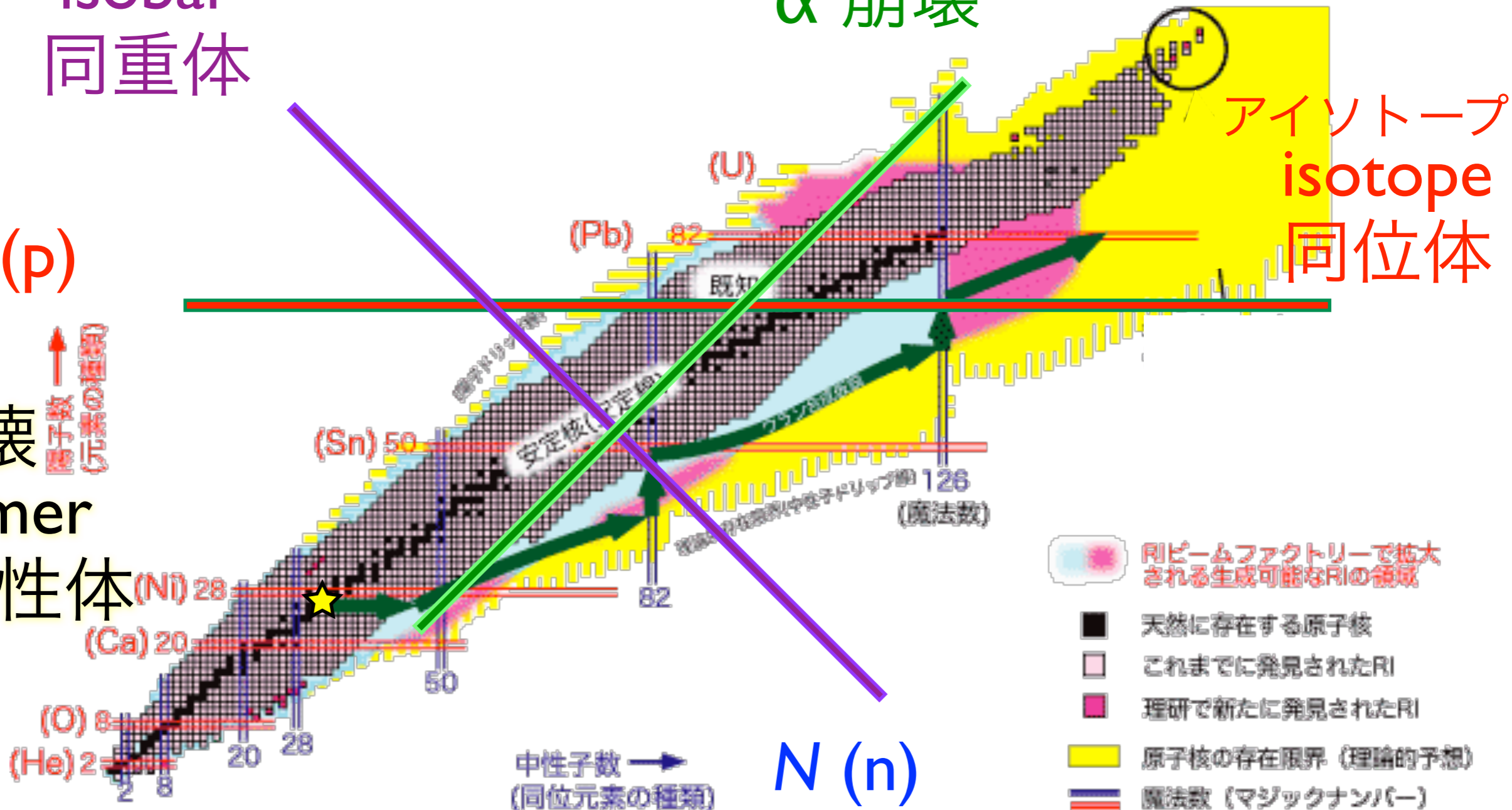
$\alpha$  崩壊

$Z$  (p)

$\gamma$  崩壊

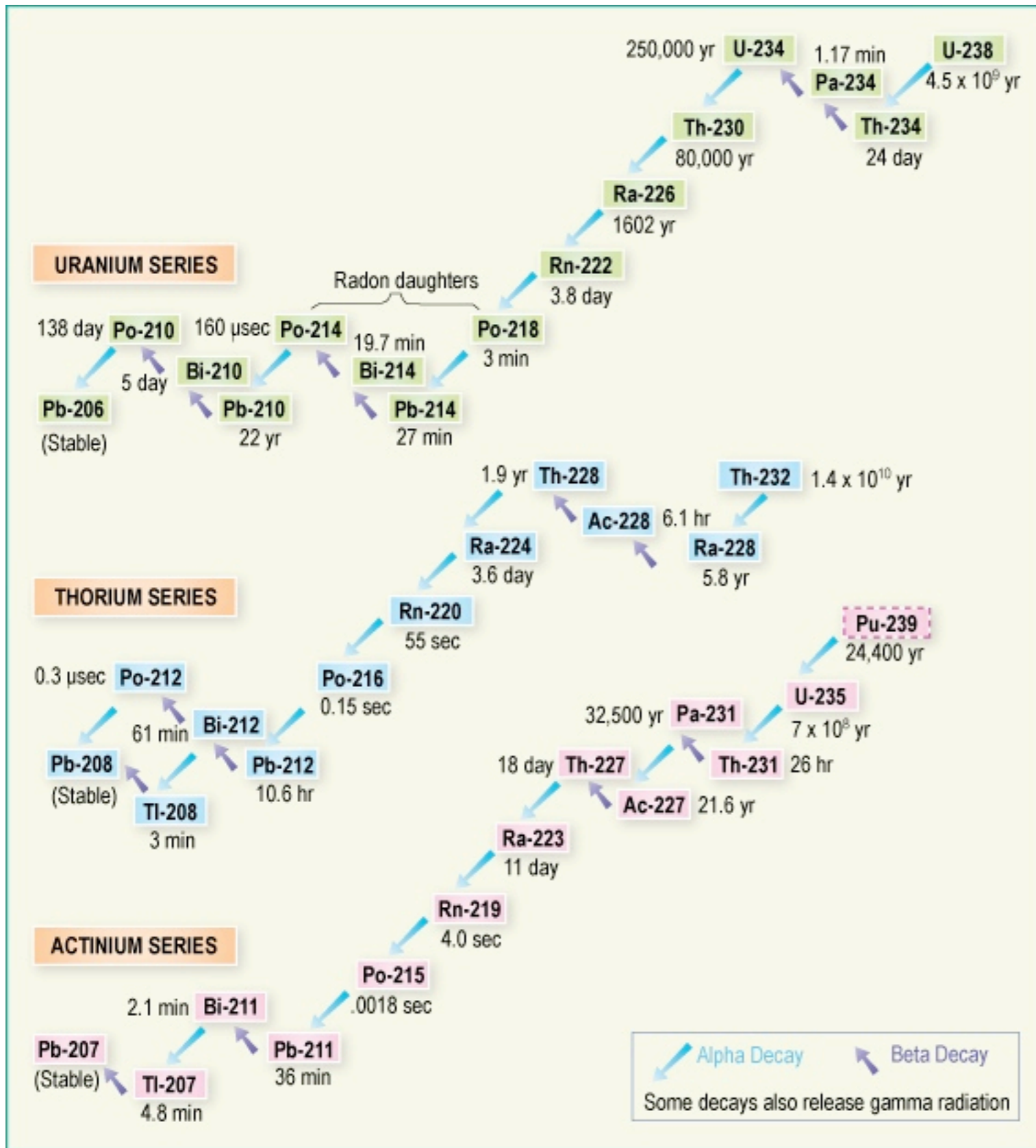
isomer

核異性体



Nuclear Chart 核図表

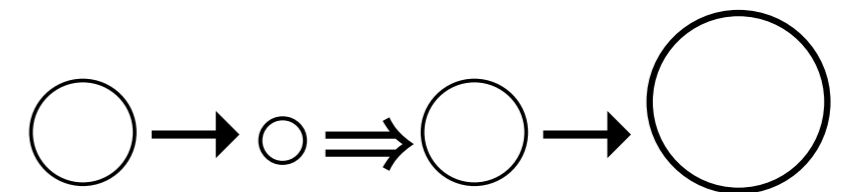
- RIビームファクトリーで拡大される生成可能なRIの領域
- 天然に存在する原子核
- これまでに発見されたRI
- 理研で新たに発見されたRI
- 原子核の存在限界 (理論的予想)
- 魔法数 (マジックナンバー)
- 超新星爆発で作られた不安定核 (ウランまでの元素が合成)の道筋



# 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

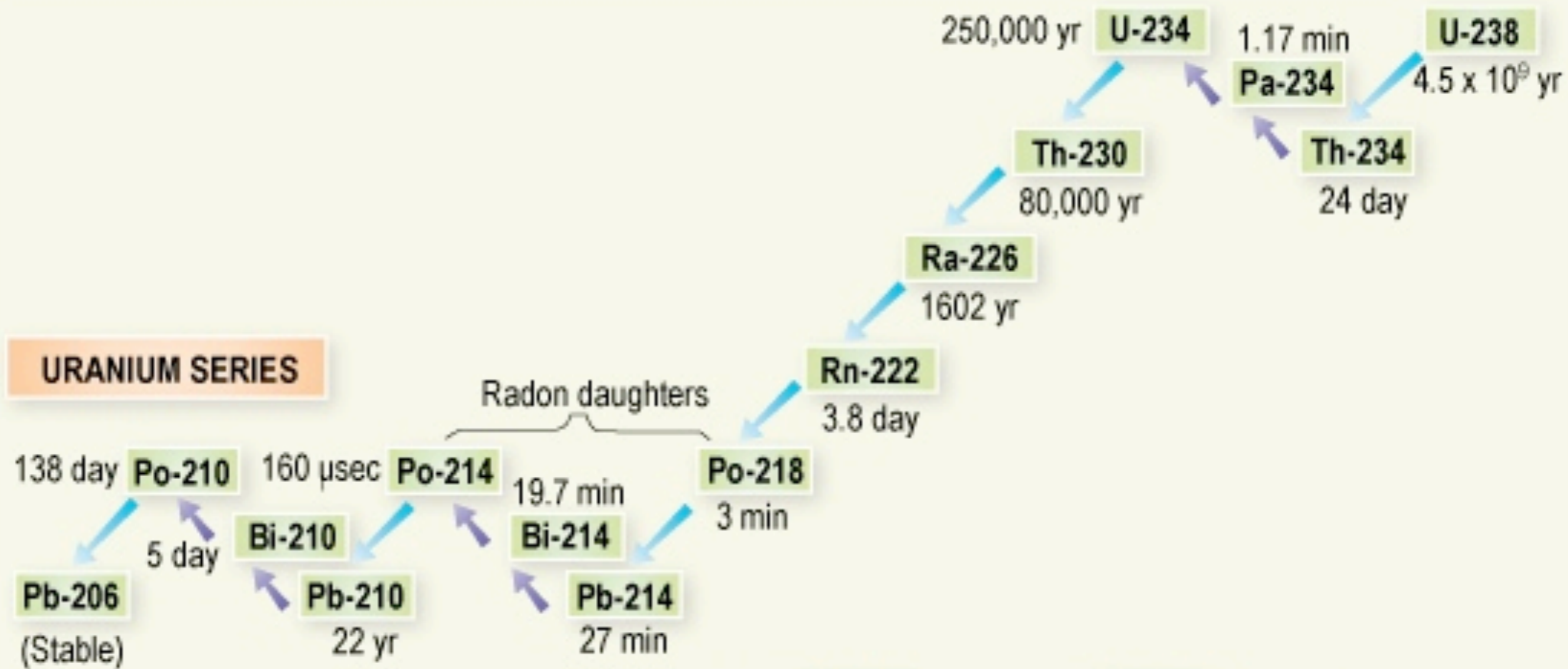
# 放射平衡



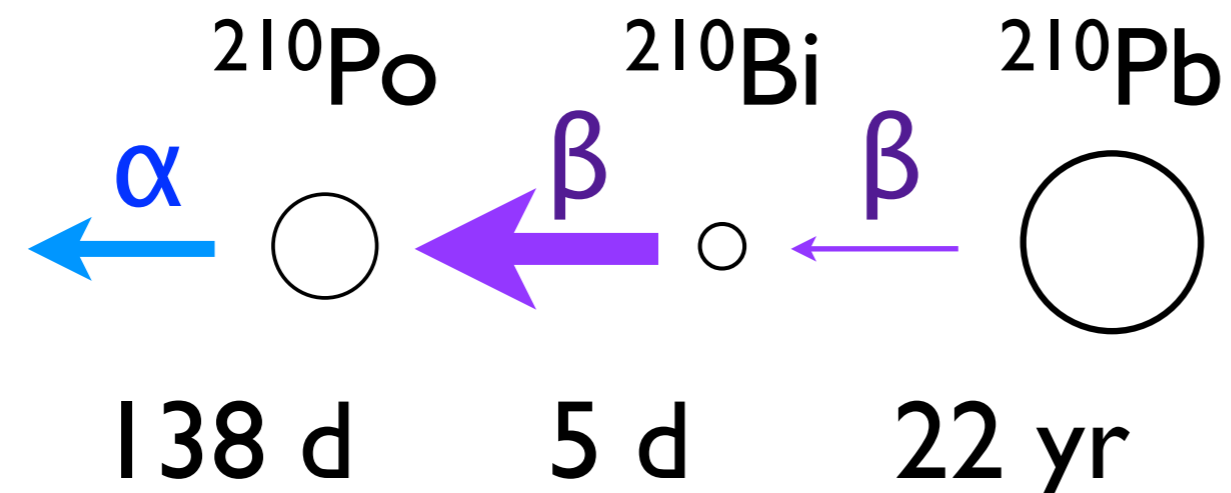


# 壊変 (崩壊) 系列

## (4n+2) ウラン系列



安定



放射平衡

# 壊変 (崩壊) 系列

## (4n+2) ウラン系列

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

$$\frac{dN_4}{dt} = \dots\dots\dots$$

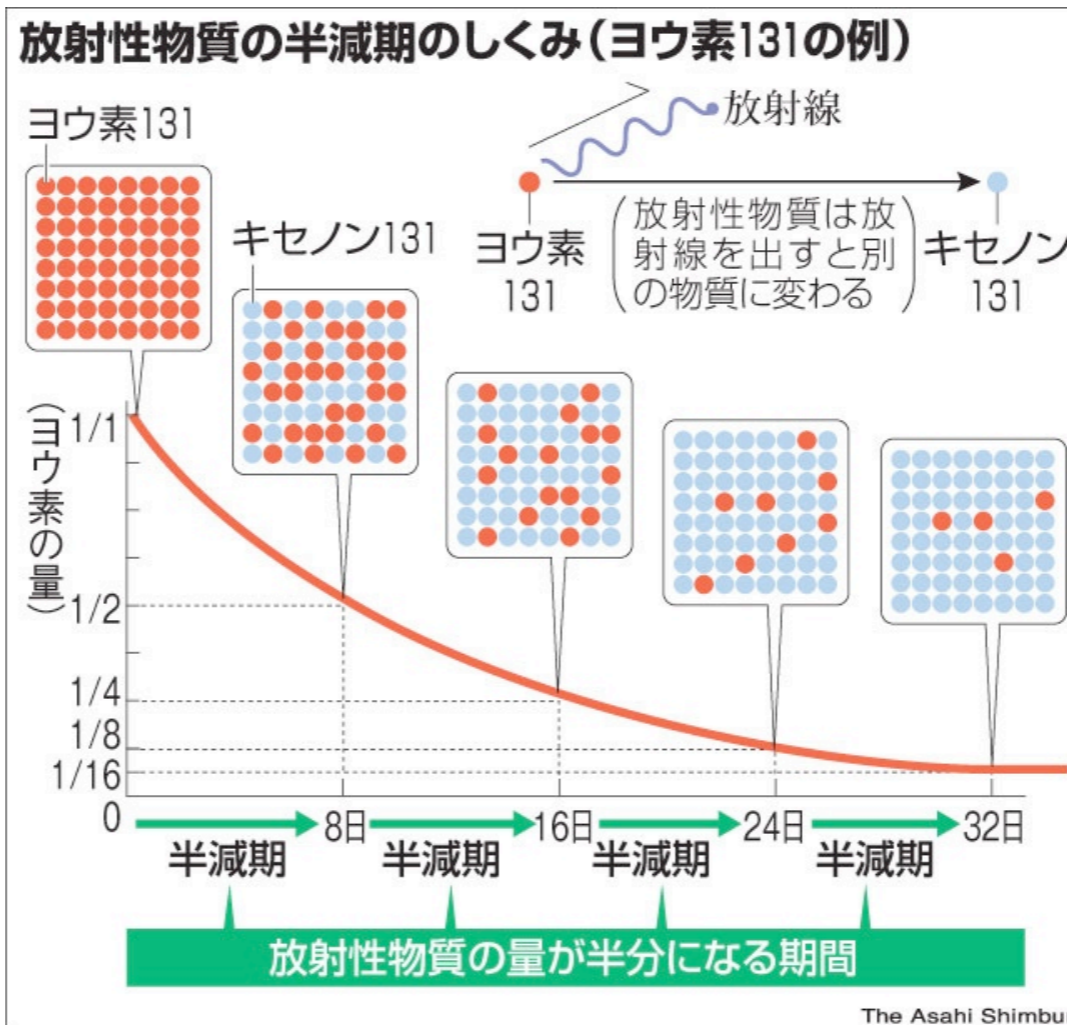
$\lambda = 1/\tau$        $\lambda$ : 崩壊レート、 $\tau$ : 寿命

半減期の1.44倍

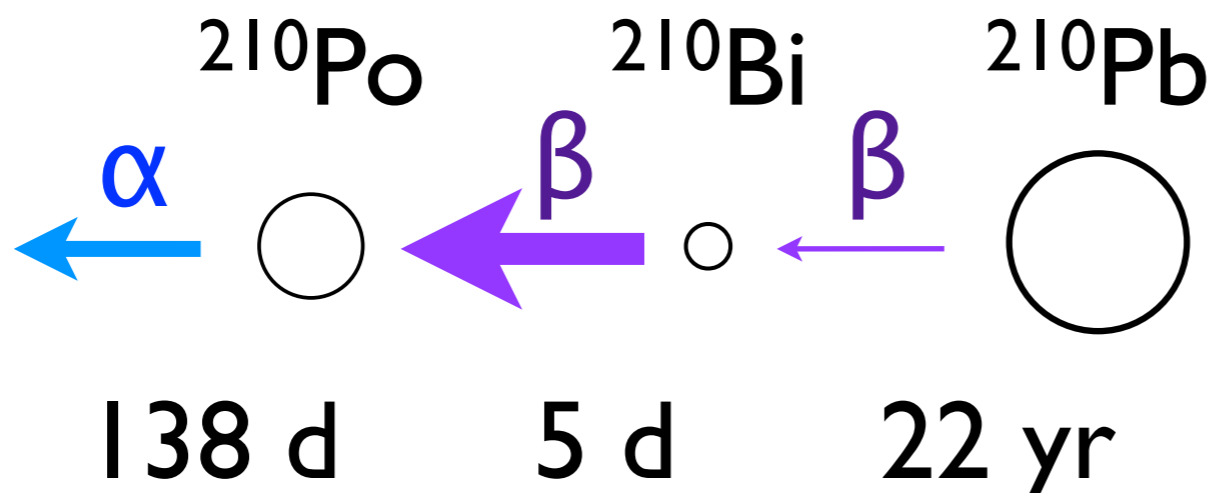
$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

崩壊レートは定数

個々の崩壊は  
**確率的**に起こる



$^{206}\text{Pb}$   
安定



放射平衡

# 壊変 (崩壊) 系列

## (4n+2) ウラン系列

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

$$\frac{dN_4}{dt} = \dots\dots\dots$$

$\lambda = 1/\tau$        $\lambda$ : 崩壊レート、 $\tau$ : 寿命  
 半減期の1.44倍

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \{e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\} + N_{20} e^{-\lambda_2 t}$$

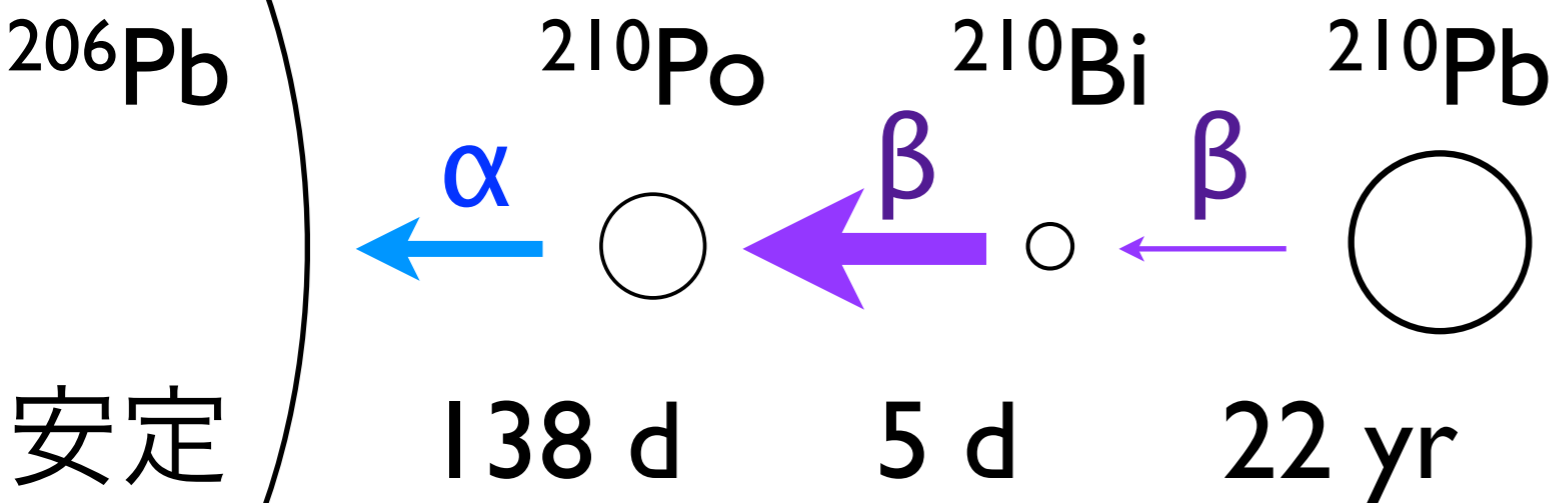
$$N_2 \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

**過渡平衡**  
 ( $\lambda_1 < \lambda_2$ ,  $t$  が十分長い)

$$N_2 \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1$$

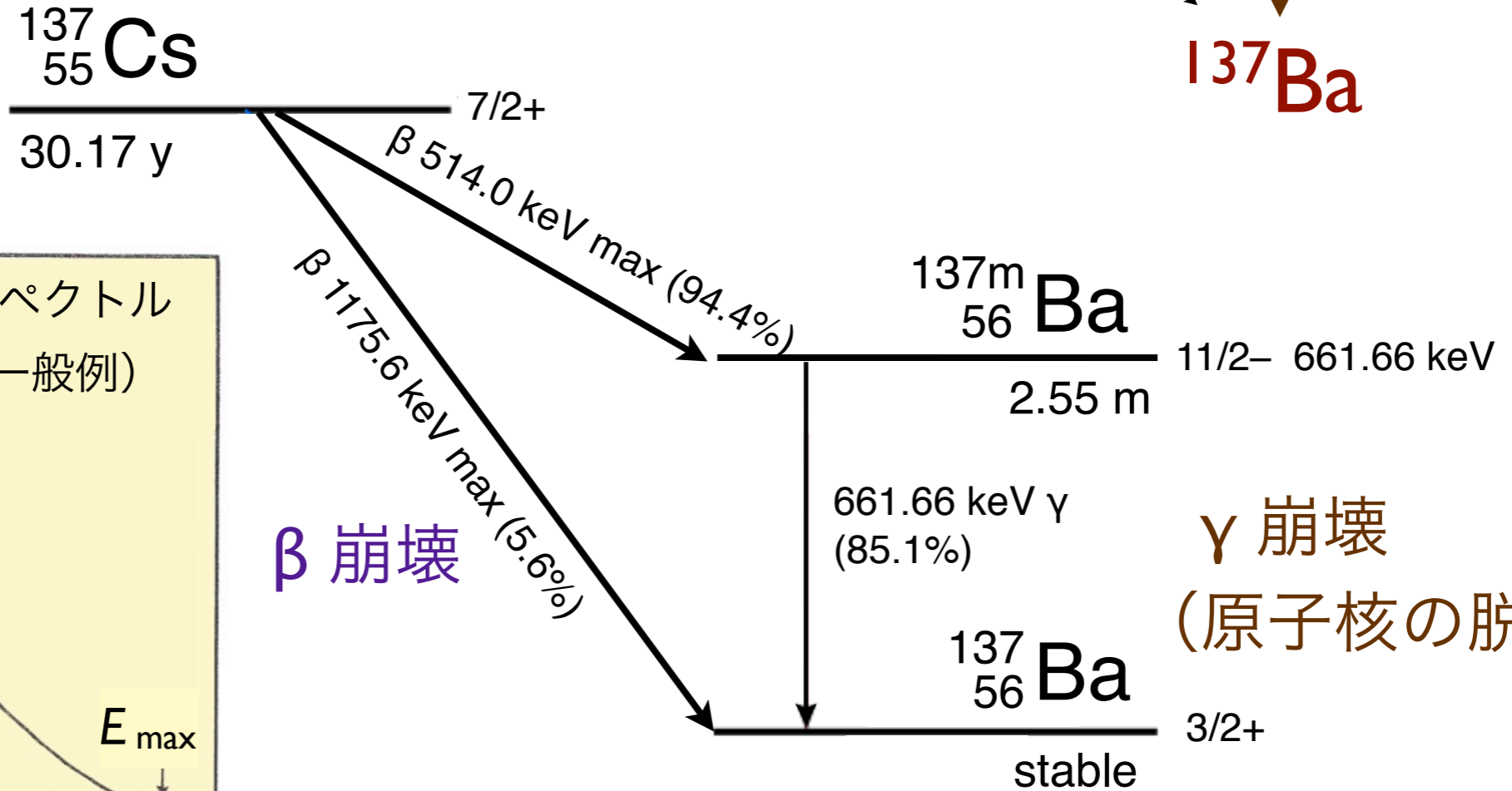
**永続平衡**  
 ( $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ,  $\tau_1$  がとても長い)

### 放射平衡





例： $^{137}\text{Cs}$

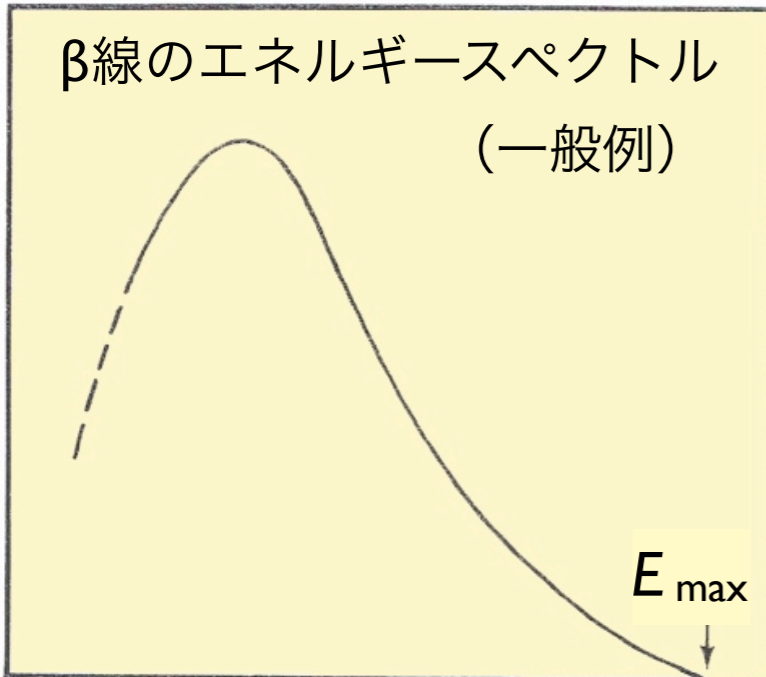


2分半

$^{137}\text{Ba}$

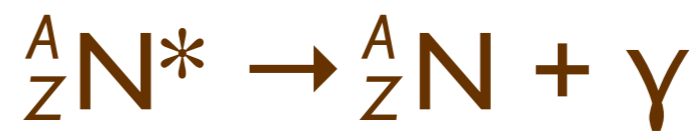
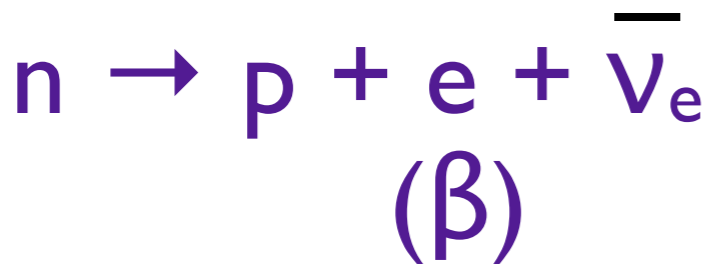
$\gamma$  崩壊  
(原子核の脱励起)

粒子数の分布



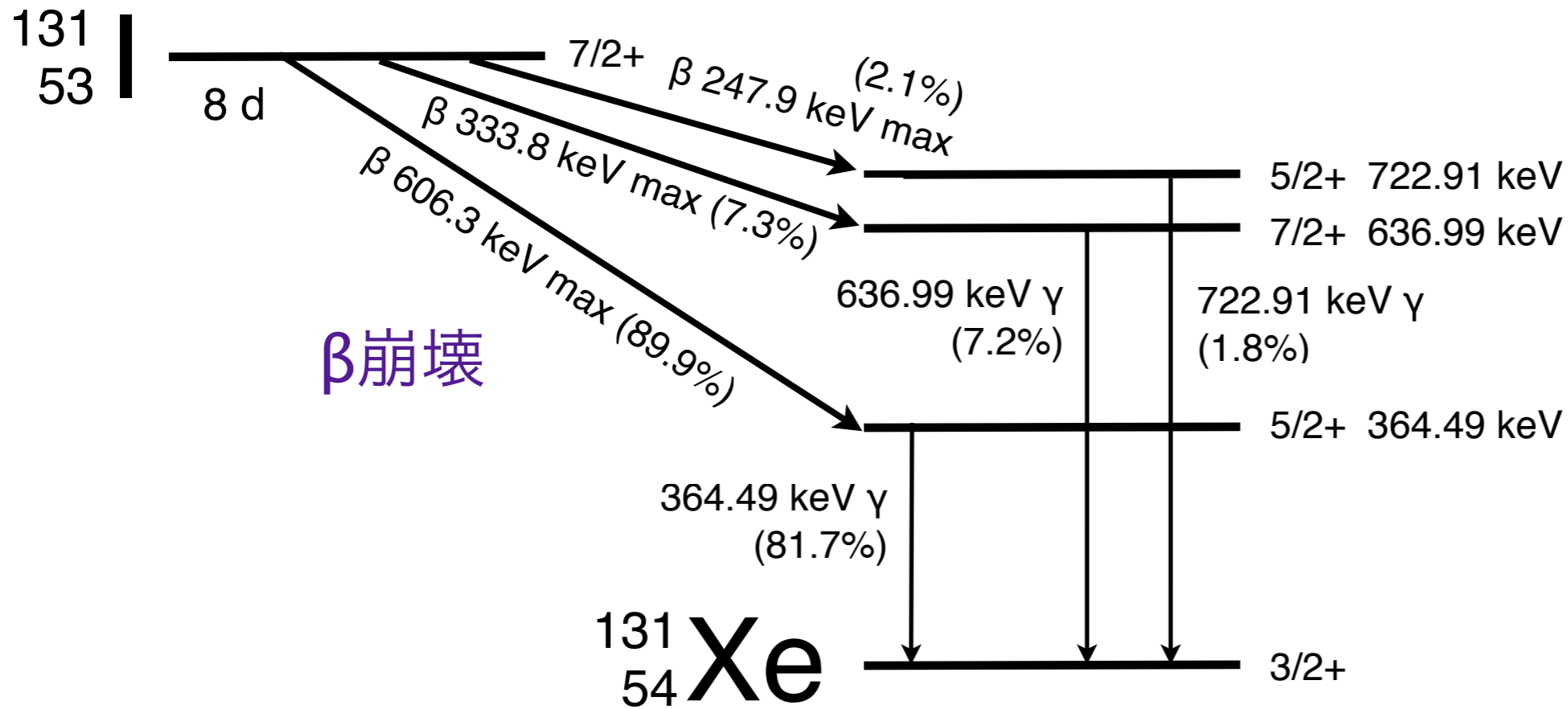
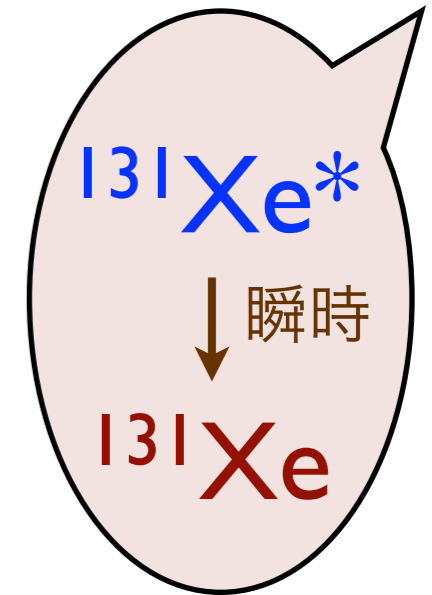
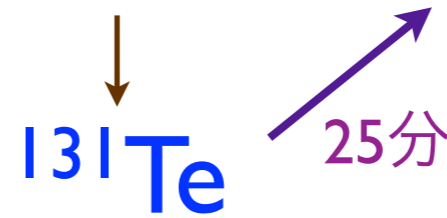
エネルギー  $E_{\beta}$

$\beta$ 線 (連続スペクトル)

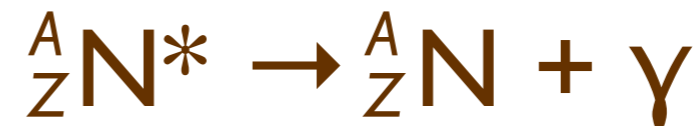


$\gamma$ 線 (定まったエネルギー)

$\gamma$ 線のエネルギーで核種を同定

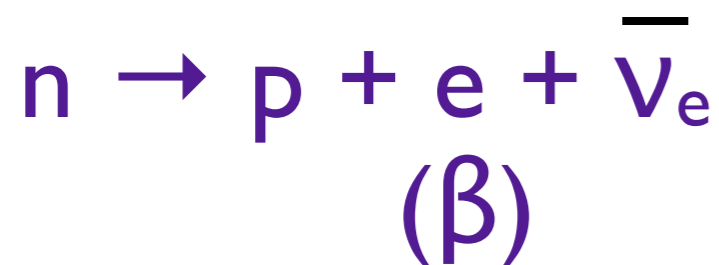


γ線：原子核の脱励起



γ線（定まったエネルギー）

β線（連続スペクトル）



# 準教科書

「放射線を科学的に理解する  
— 基礎からわかる東大教養の講義 —」

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著  
中川恵一 執筆協力

初版 **第3刷** 以降  
初版 **第5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



放射線

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

科学的に  
理解する

基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

# 準教科書

1章 放射線とは？《放射線入門》

2章 放射線の性質《放射線物理学Ⅰ》

3章 原子力発電で生み出される放射性物質  
《原子核物理学・原子力工学》

4章 放射線量の評価《放射線物理学Ⅱ》

5章 放射線の測り方《放射線計測学》

6章 環境中での放射性物質《環境放射化学》

7章 放射線の細胞への影響《放射線生物学》

8章 放射線の人体への影響《放射線医学》

9章 放射性物質と農業

《植物栄養学・土壌肥料学》

10章 放射線の防護と安全《放射線防護学》

11章 役に立つ放射線

《放射線の利用・加速器科学》

Q&A

## 「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3刷** 以降

初版 **第5刷** を推奨

丸善出版

本体 2500円＋税

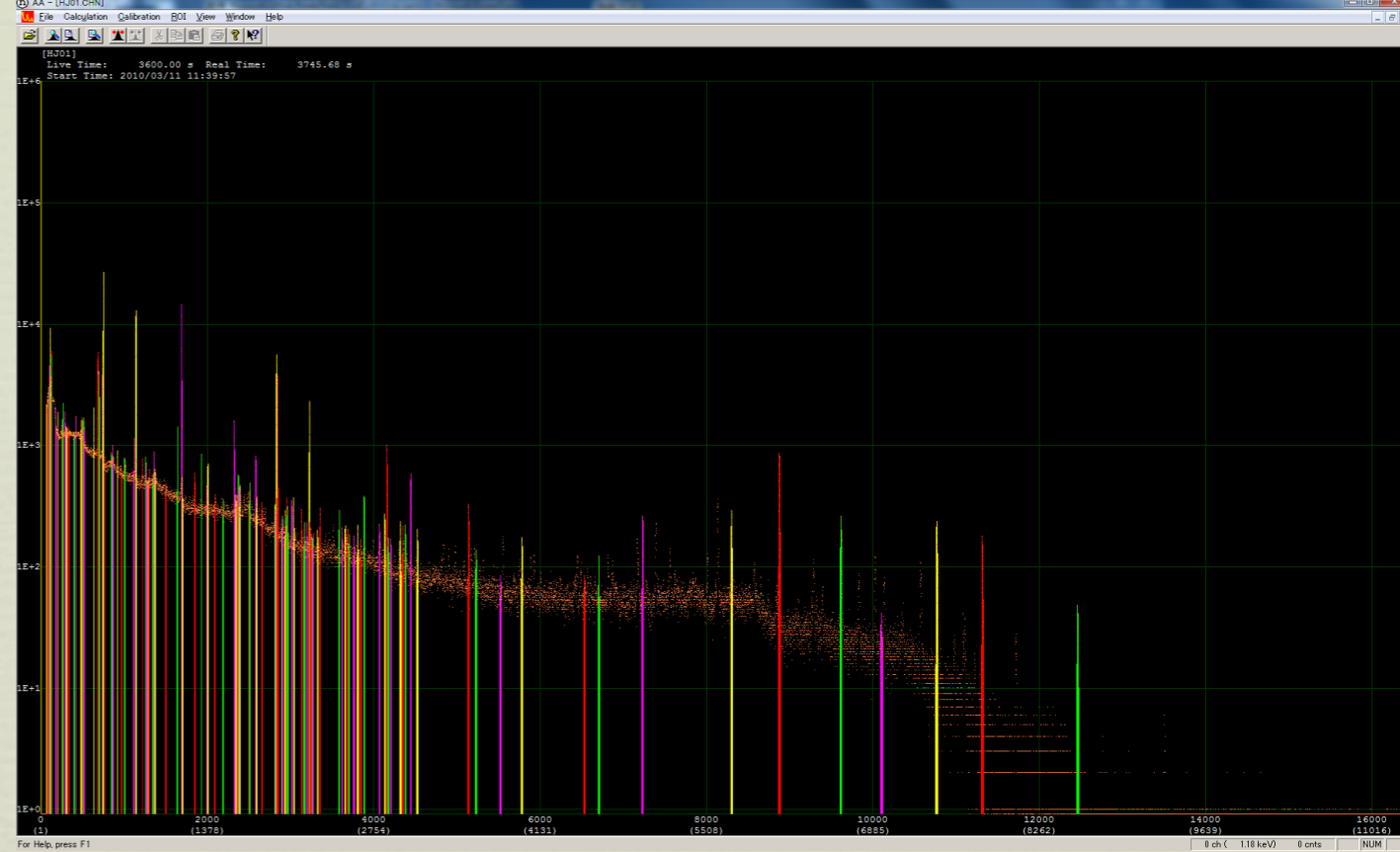
ご購入は生協書籍部の  
教科書販売所で

# 次回予告

## 第3回 (10/2)

### 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

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

東大教養 放射線 講義



検索

## 連絡先

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

担当教員：鳥居 寛之

**Fine.** Per oggi è tutto.

Fini pour aujourd'hui

That's all for today.

Всё за сегодня.

오늘은 이만 마치겠습니다.

Ci vediamo la prossima settimana.

On se voit la semaine prochaine.

See you next week.

Увидимся на следующей неделе.

다음 주에 또 만납시다.