

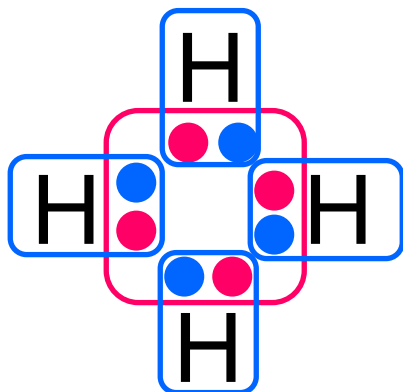
一般化学

- Chemistry -

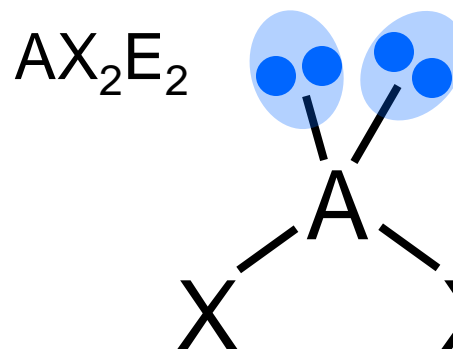
第6回 原子の安定性と放射線化学

東京工業大学 元素戦略研究センター
高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所
山浦淳一

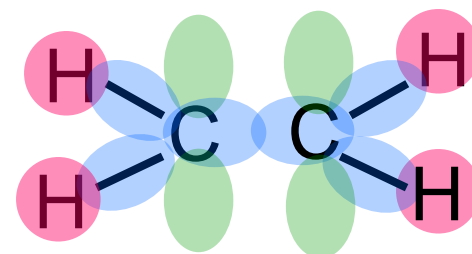
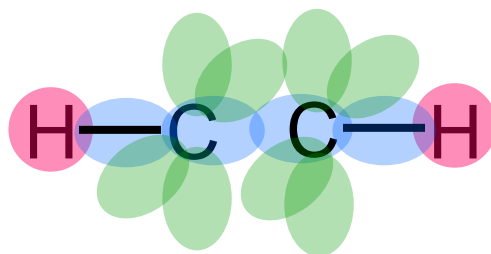
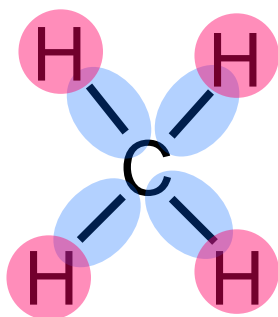
前回の重要ポイント



ルイス構造とオクテット則



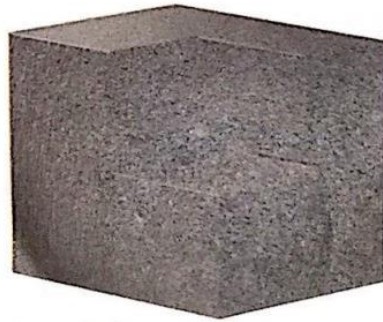
VSEPR則と分子の立体構造



混成軌道の基本的概念

本日の重要ポイントと目標

α , β , γ 線の違い



シールド箱中の線源から放射線が出て、
二つの電極の間を通過する。

β 線は正電極の方向に強く曲げられる。

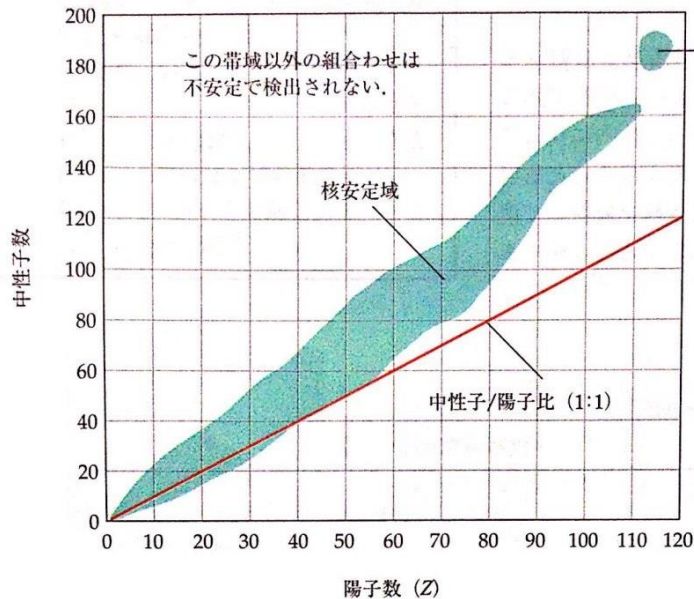
β 線

γ 線は曲げられない

γ 線

α 線

α 線は負電極の方向に曲げられる。



原子の安定性

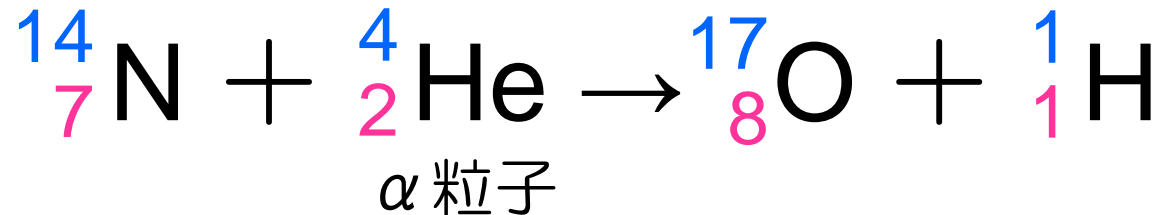
放射能の
連鎖反応、生物作用
半減期

近世の化学史 (放射線)

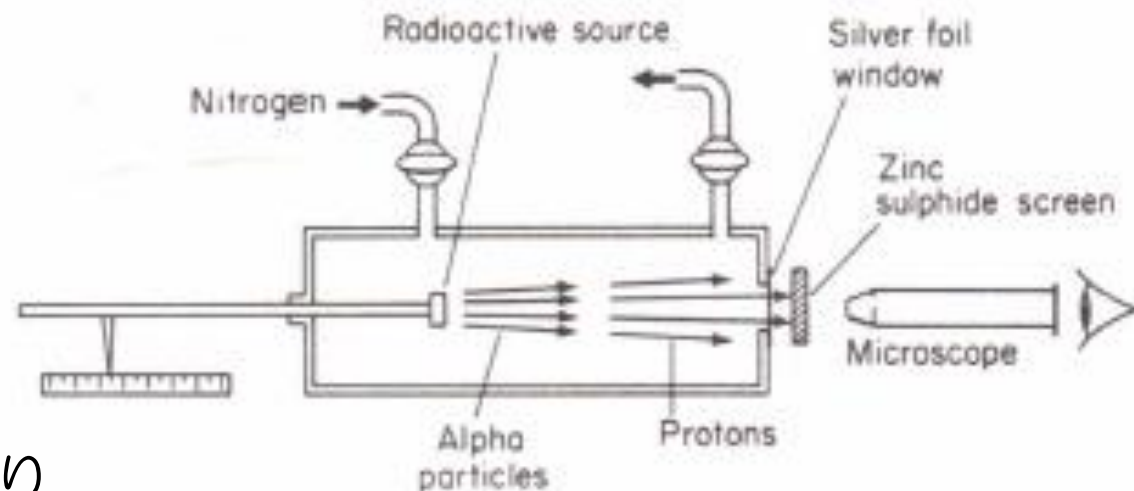


ラザフォードの実験

ラザフォードは1919年、 α 粒子を窒素に照射し人工の核反応を行なった



中性子	7	2	9	0
陽子	7	2	8	1



質量欠損と結合エネルギー

原子核の質量は、構成要素である陽子と中性子個々の合計よりも軽くなっている

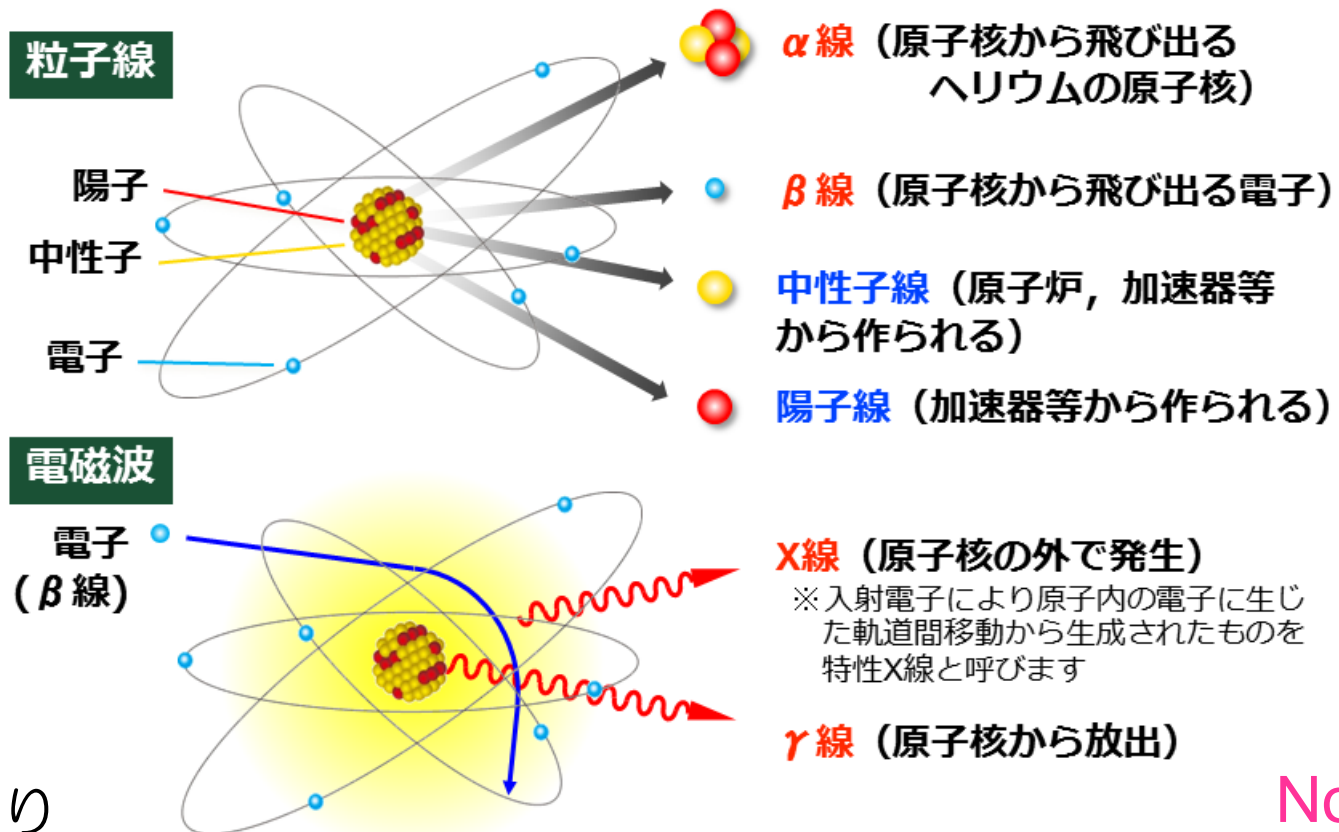
$$\Delta m = \{ \underset{\substack{\text{陽子} \\ \text{質量}}}{Z M_p} + (A - Z) \underset{\substack{\text{中性子} \\ \text{質量}}}{M_n} \} - \underset{\substack{\text{核種} \\ \text{質量}}}{M_{ZA}}$$

$\overset{A}{\underset{Z}{X}}$

欠損分が原子核をまとめる結合エネルギーをして働いている (7.5～8.8 MeV)

放射線の種類

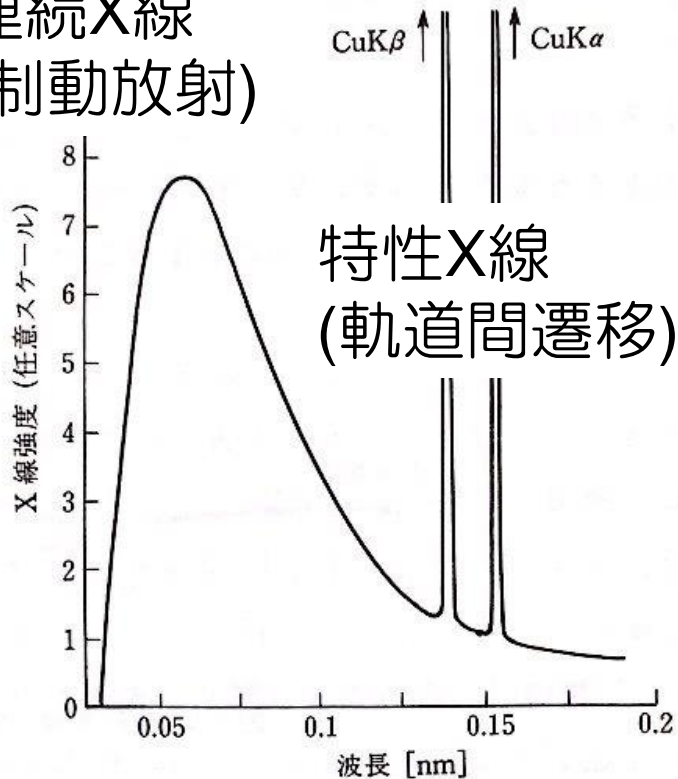
電磁放射線：電磁波のうち空気を電離できるX線、 γ 線
粒子放射線：粒子ビームによる放射線で、
荷電粒子線(α 線、 β 線、電子線、陽子線)
非荷電粒子線(中性子線)がある



X線

X線: $0.01 \text{ \AA}(1 \text{ pm}) \sim 100 \text{ \AA}(10 \text{ nm})$
の電磁波、3通りの発生法がある

連続X線
(制動放射)



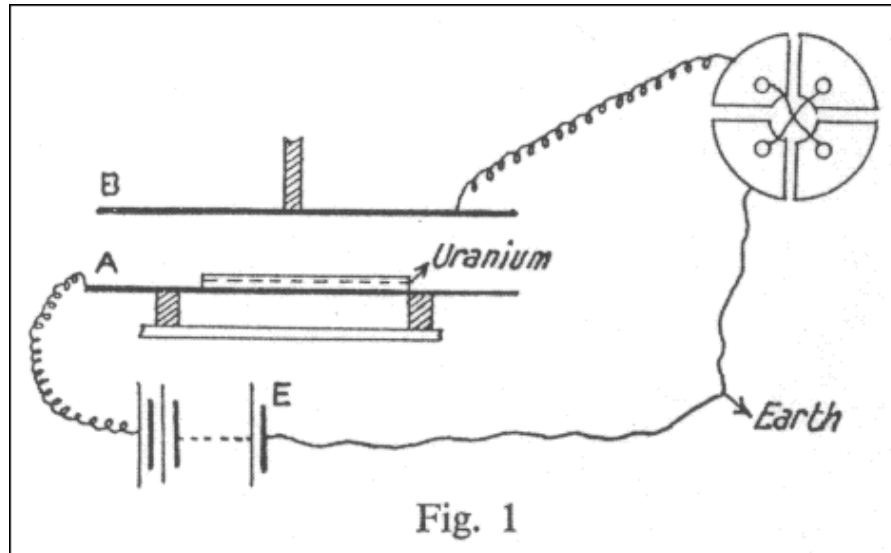
放射光X線
(シンクロトロン放射)



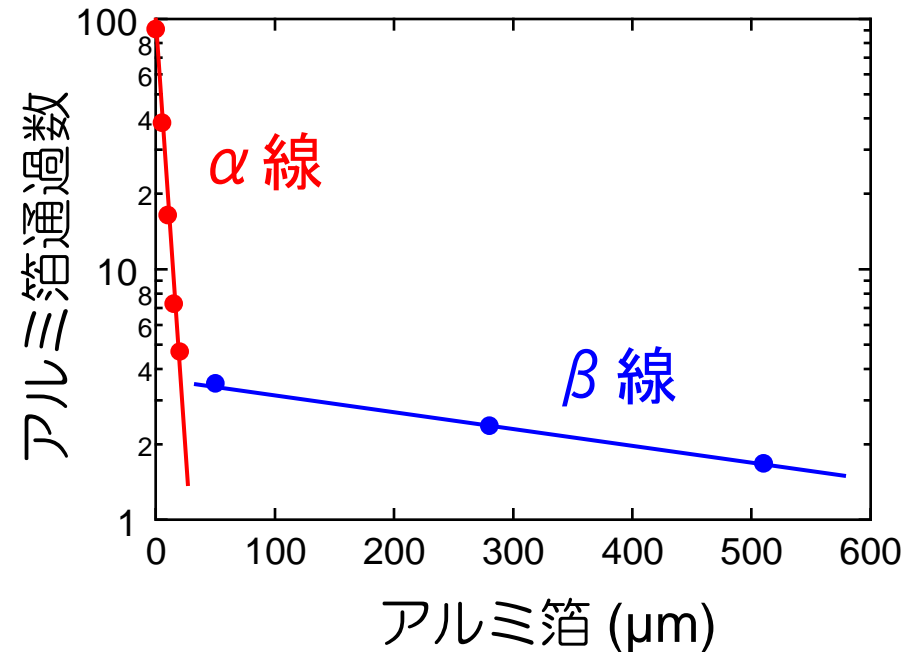
X線回折散乱技術より

ラザフォードの実験

1899年、ラザフォードは、 α 線と β 線を発見した



ウランからの放射線を
電位計で測定



アルミ箔通過数から
2種類の放射線を発見

chemteamより
右図はラザフォード論文の数字データから

アルファ線

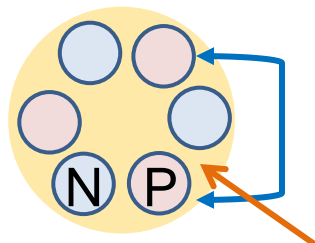
α 線： α 壊変の原子核変化で発生する放射線
原子番号大の原子では、反発力が勝る場合がある



中性子	138	136	4
陽子	88	86	2

親核種

娘核種



原子核

陽子同士はクーロン反発する(やや長距離)

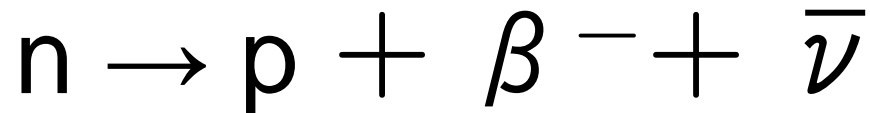
両者を結合する核力は近距離のみ

ベータ線

β線： β壊変の原子核変化で発生する放射線で主に3種類

キーワード

β⁻壊変：相対的に中性子過剰な原子核で起き、中性子(n)が陽子(p)に変化し、電子(e,β⁻)と反ニュートリノ($\bar{\nu}$)を放出



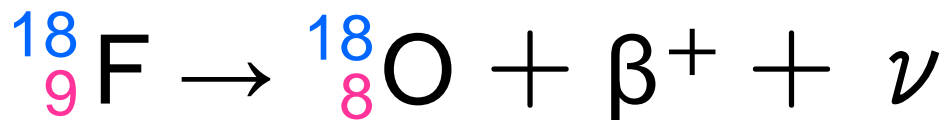
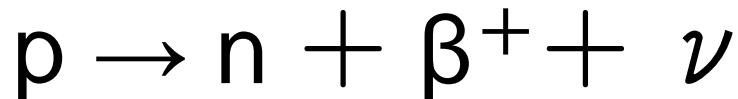
*電子は軌道ではなく原子核由来



*反ニュートリノは中性で、ほぼ質量ゼロ

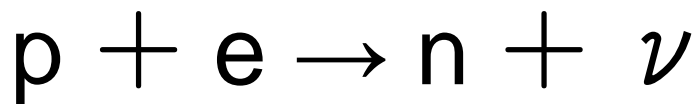
ベータ線

β^+ 壊変：相対的に中性子不足な原子核で起き、陽子(p)が中性子(n)に変化し、陽電子(e^+ , β^+)とニュートリノ(ν)を放出



ポジトロンCT
医療で利用

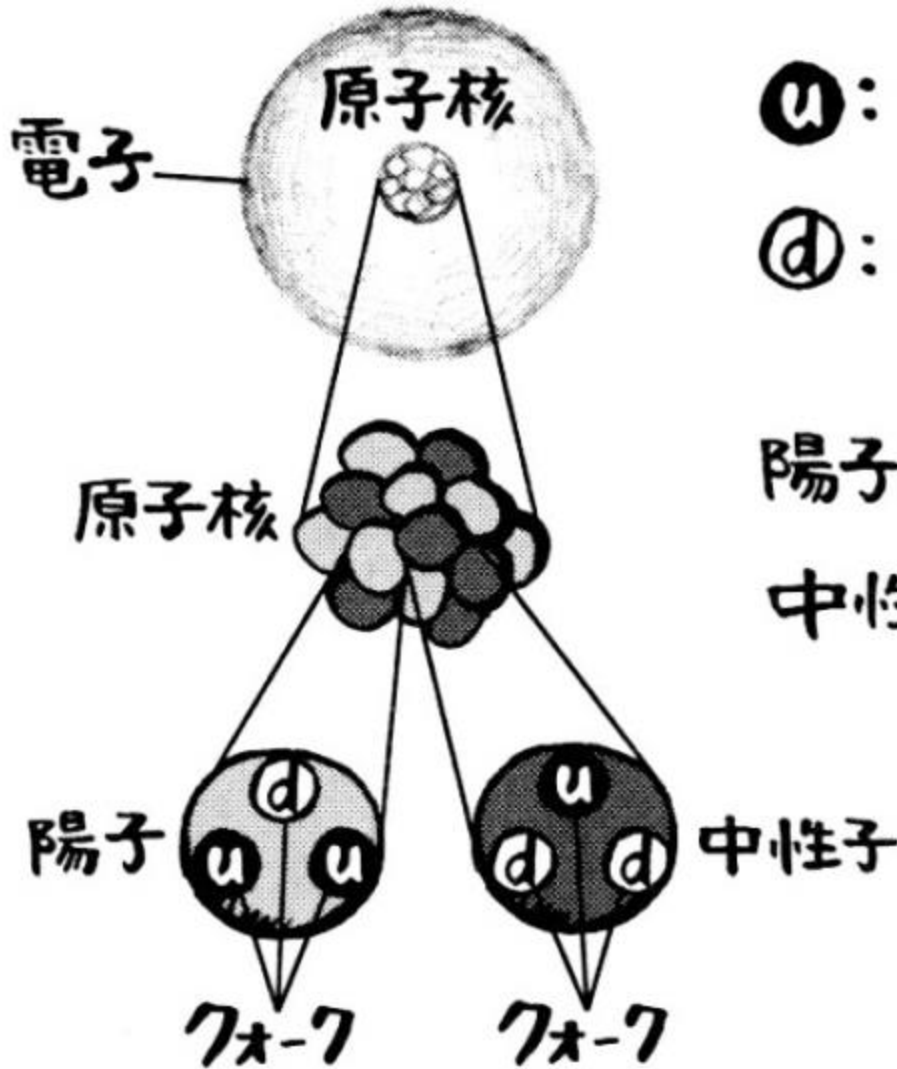
逆 β 壊変：相対的に中性子不足な原子核で、陽子(p)が軌道電子(e)を捕獲し中性子(n)に変化、ニュートリノ(ν)も放出



*特性X線も発生

教科書の陽電子放射と電子捕獲に対応
例題2.7、問題2.11を解きましょう

原子の中 (再掲)



u: アップクォークの電荷 $(+\frac{2}{3}e)$

d: ダウンクォークの電荷 $(-\frac{1}{3}e)$

陽子の電荷: $\frac{2}{3}e + \frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e = +1e$

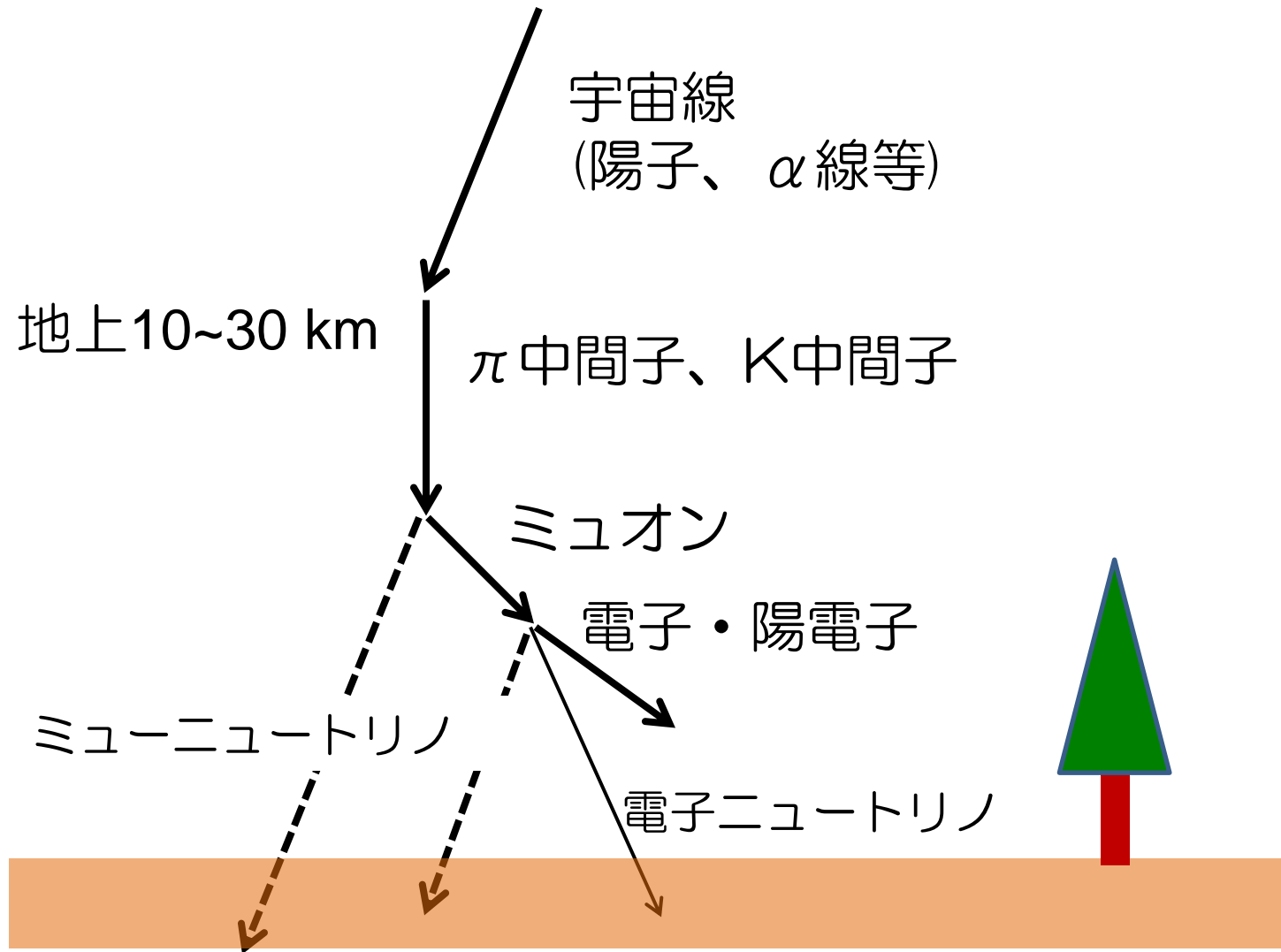
中性子の電荷: $\frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e - \frac{1}{3}e = 0$

β -壊変

$n(u, d, d) \rightarrow p(u, u, d)$

$W^- \text{ボゾン} \rightarrow e^- + \bar{\nu}$

宇宙線がニュートリノをつくるまで



ミュオンの発生と崩壊

ミュオンは素粒子の一つ
素粒子の物性実験への応用

p: 陽子

n: 中性子

π : パイ中間子

μ : ミュオン

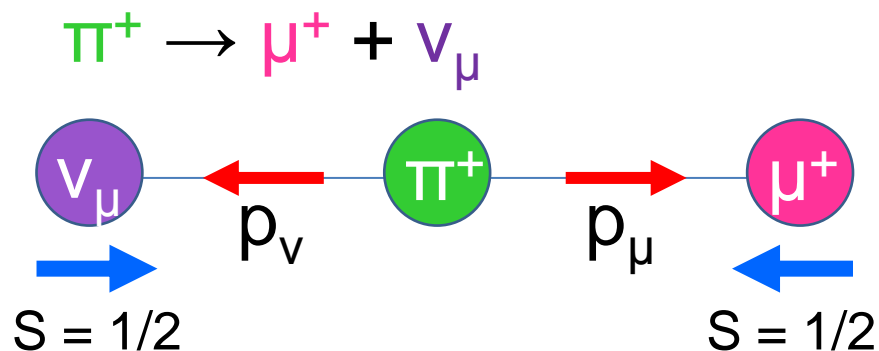
ν : ニュートリノ

e^+ : 陽電子

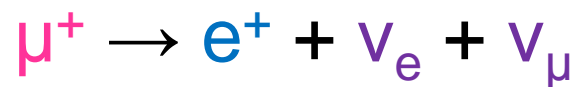
陽子同士を加速器で
衝突させる



パイ中間子がミュオンと
ニュートリノに崩壊する



ミュオンを物質に打ち込むと
不安定素粒子なので2.2 μs 後に
陽電子, 電子ニュートリノ,
反 ν ニュートリノに崩壊する



平均寿命2.2 μs

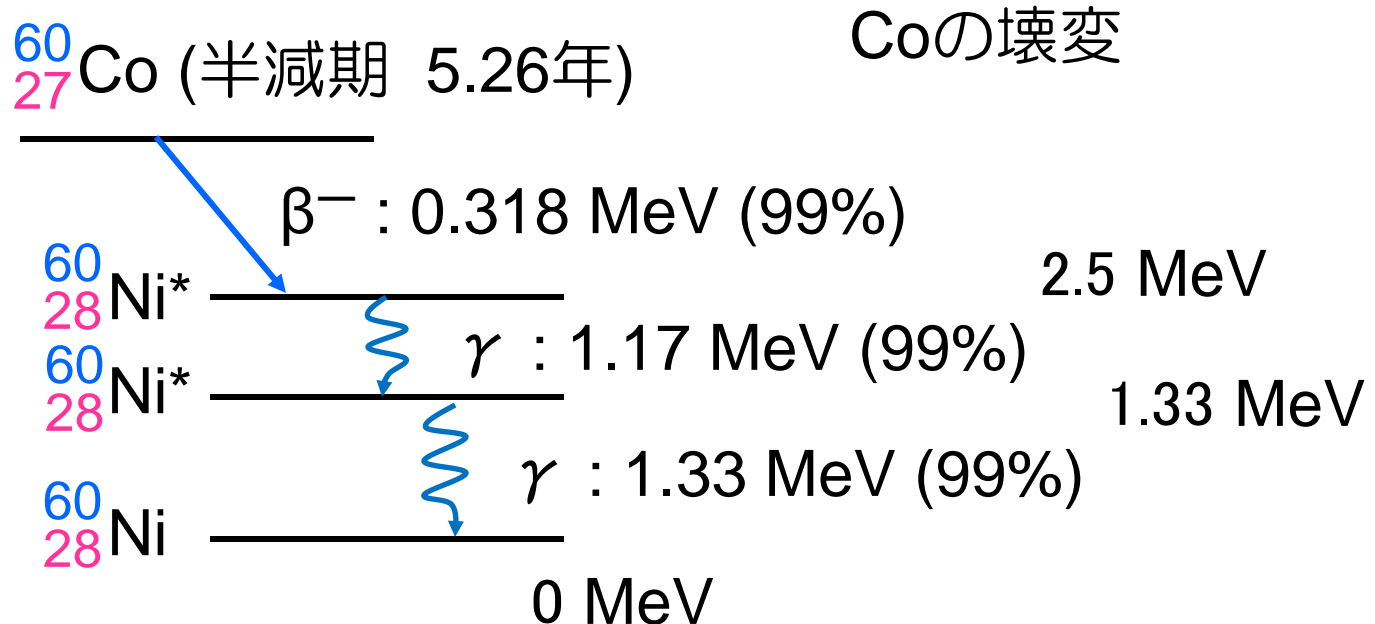
ミュオンが測定できる施設

擬似水素、磁気プローブ、動的性質、電子物性研究や
火山、ピラミッド、原子炉内部の観察に用いられる



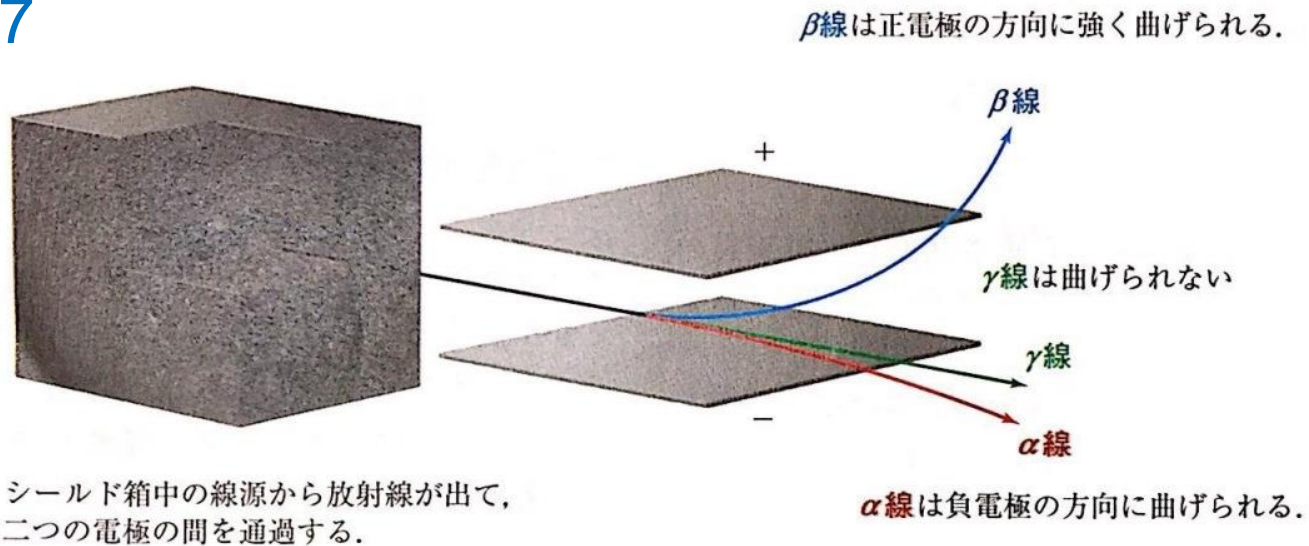
ガンマ線

α 壊変や β 壊変によって生じた娘核種に残存したエネルギーが存在する場合がある。基底状態へ移る時電磁波の一種(γ 線)が放出される。



α , β , γ 線の違い

教科書図2.7



光速の1/10

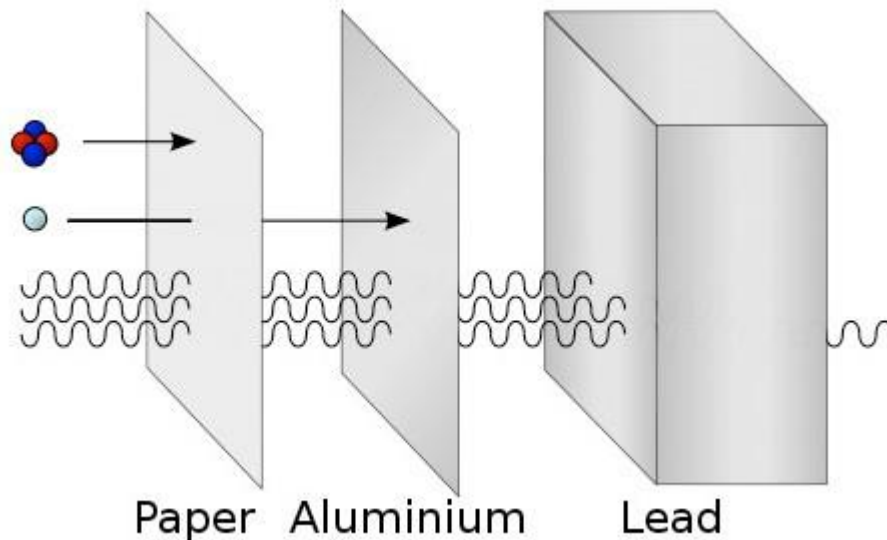
光速の1/2

光速

α

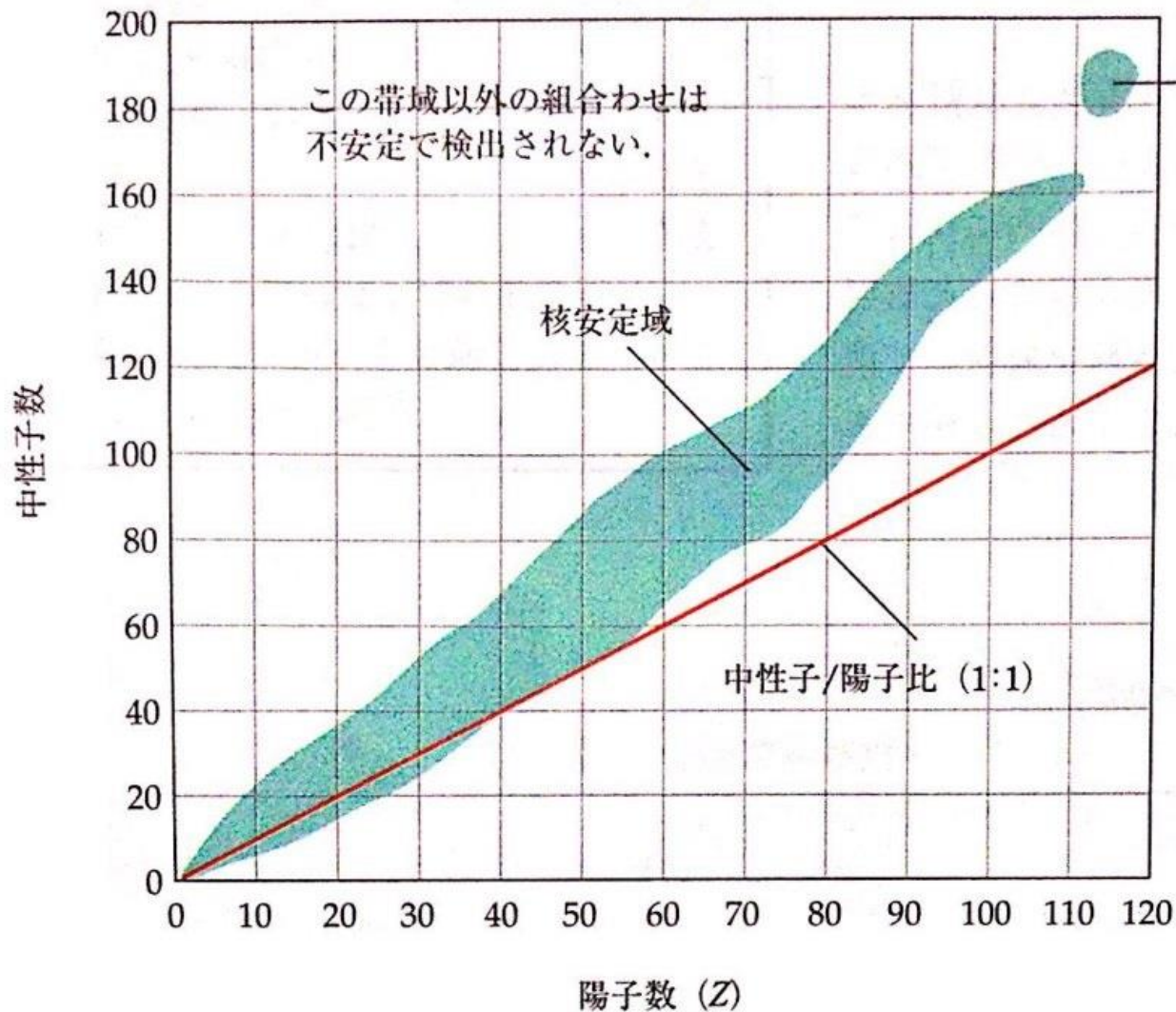
β

γ



原子の安定性

教科書2.9



陽子 114 個、中性子 184 個付近の“安定島”は放射性であるが検出できる程度に安定であると予測される超重核に相当する。ここに属する最初の元素は 1999 年に報告された。

教科書2.9
「自発的～もある」を
読みましょう

教科書図2.8

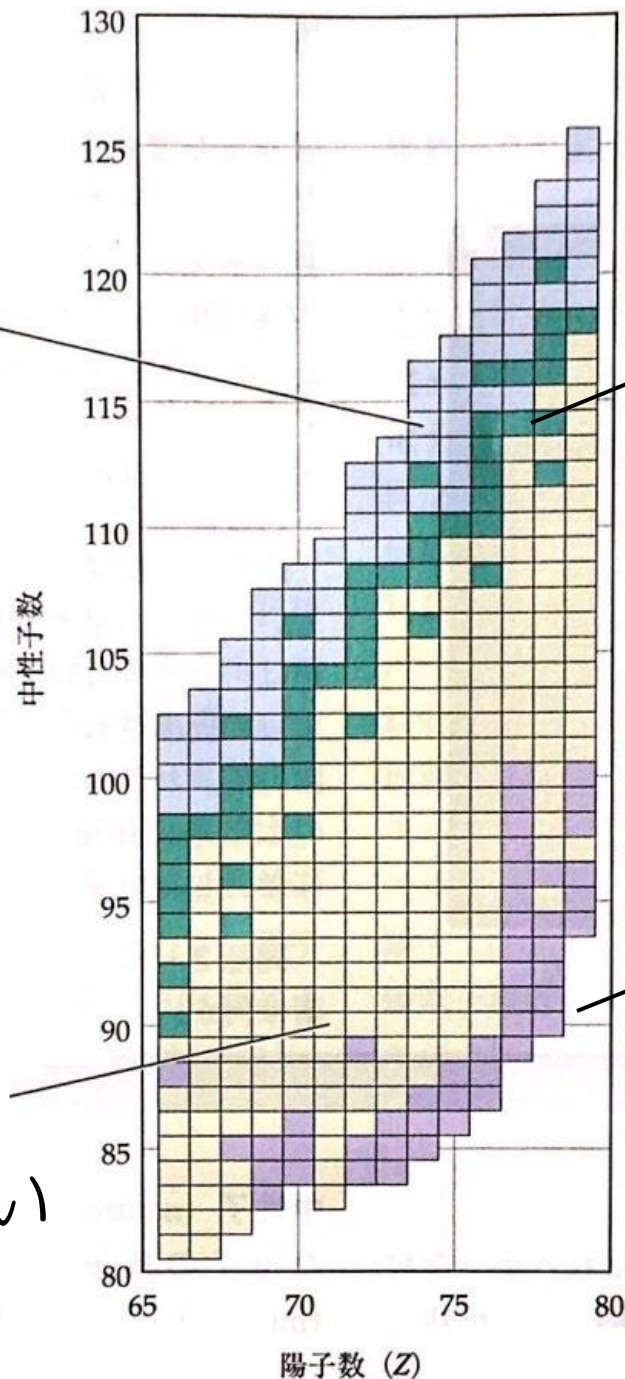
原子の安定性

中性子/陽子比が大
 β^+ 放射を起こしやすい

教科書2.9

「核安定域～
確認しておこう」を
読みましょう

中性子/陽子比が小
 β^- 放射、逆 β 放射、
 α 放射を起こしやすい



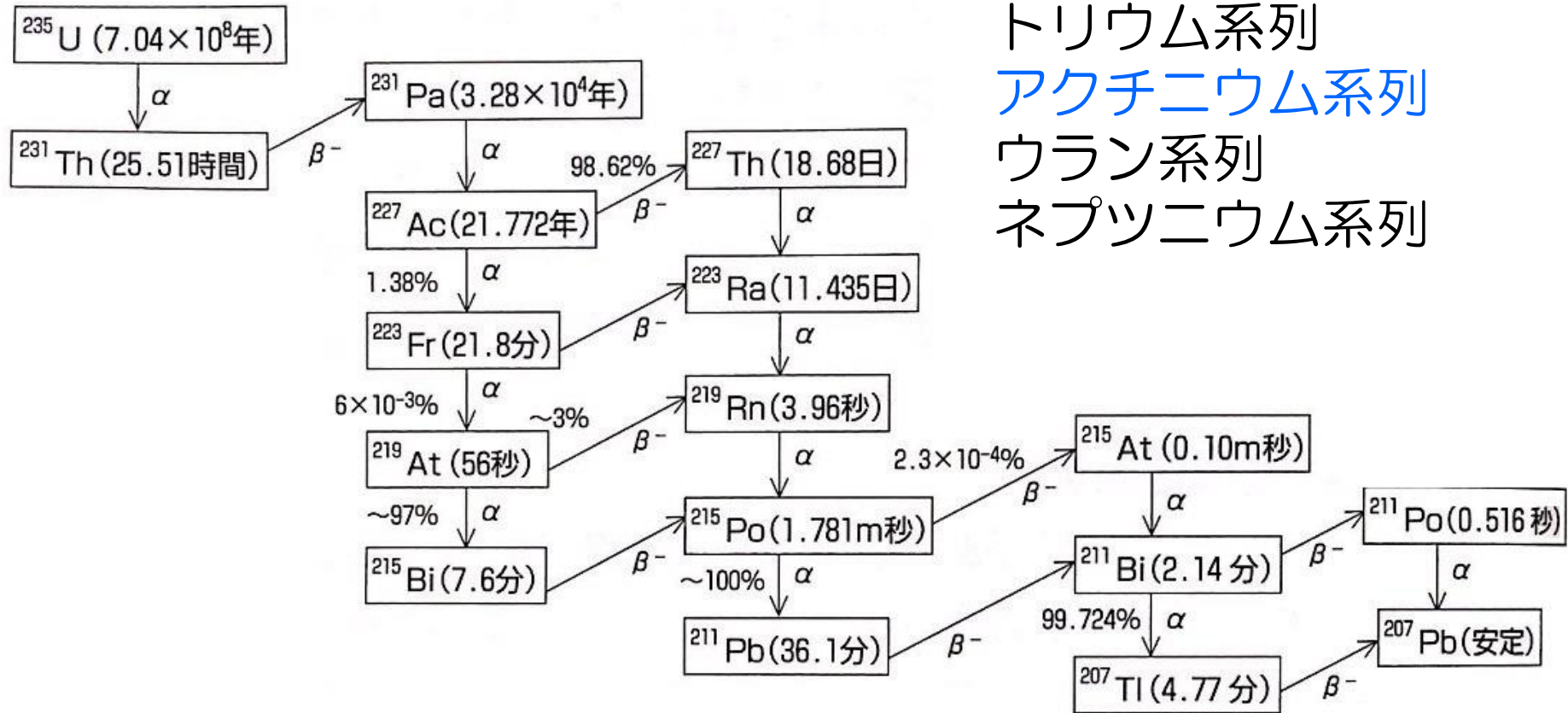
教科書2.9

非放射性

中性子/陽子比小
 α 放射を起こし
やすい

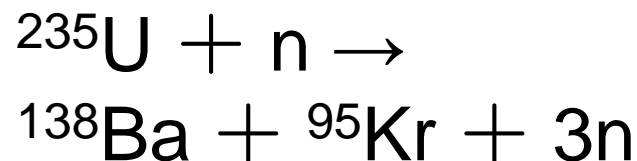
教科書図2.9

放射性壊変系列



^{235}U の核分裂連鎖反応

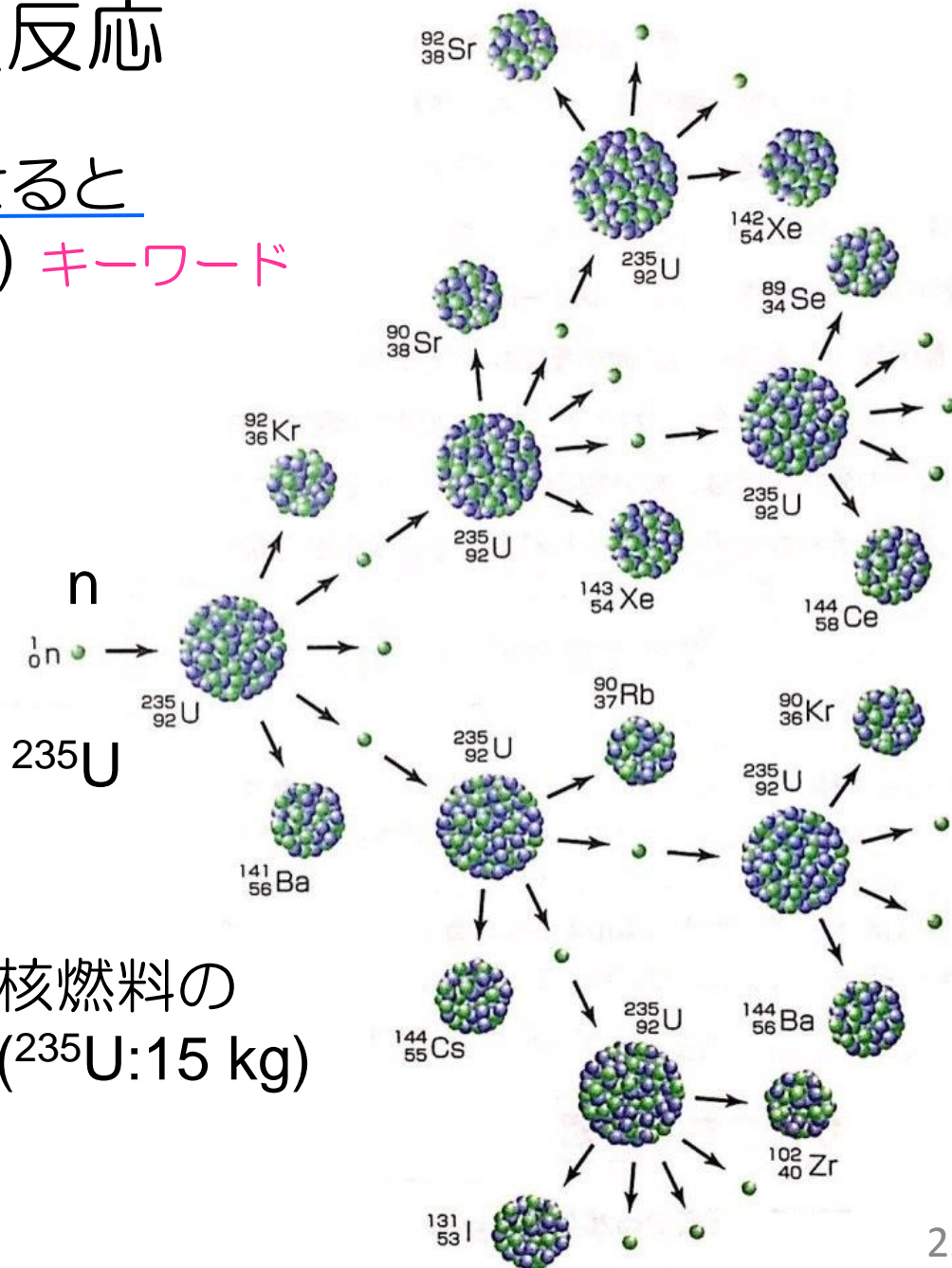
^{235}U に中性子を衝突させると
連鎖反応が起きる (右図) キーワード



Q. なぜ連鎖反応が
起きるのでしょうか

連鎖反応の持続に必要な核燃料の
最小量を臨界質量という(^{235}U :15 kg)

実感する化学より



質量とエネルギーの相互変換

1907年、アインシュタインは、物質の質量とエネルギーが次の式から相互変換可能であることを示した

$$E [\text{J}] = mc^2 \quad [\text{kg m}^2/\text{s}^2]$$

Q. 1 kgの ^{235}U の核分裂反応での生成物と原料の差は1/1000程度つまり1 g程度失われる。

欠損によるエネルギーを、 $m_e = 9.1095 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 、 $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ を用いて計算しなさい。[$\text{kgm}^2/\text{s}^2 = \text{J}$]

原発で用いられる様々な材料

中性子吸収材 (原子炉制御棒や中性子遮蔽材)の散乱断面積 δ

ボロン(^{10}B , ^{11}B) $\delta = 3835, 0.0055 \text{ barn}$

カドミウム(^{113}Cd , ^{114}Cd) $\delta = 20600, 0.34$

ハフニウム(^{174}Hf , ^{176}Hf) $\delta = 561, 23.5$

*1 barn = 10^{-24} cm^2

ジルコニウム(Zr全同位体平均) $\delta = 0.185$

*450°C以上で変形するため、蒸発温度が上げられず
原発の熱効率が30%にしかない→よい素材が必要

軽水 $\delta = 0.333$

*冷却水としてだけでなく減速材の役割もある

分析対象となる放射性核種

	I-131 ヨウ素131	Cs-134 セシウム134	Cs-137 セシウム137	Sr-90 ストロンチウム90	Pu-239 プルトニウム239
出す放射線の種類	β, γ	β, γ	β, γ	β	α, γ
物理学的半減期	8日	2.1年	30年	29年	24,000年
実効半減期	8日	64日	70日	15年	197年
蓄積する器官・組織	甲状腺	全身	全身	骨	骨、肝臓

Q. 半減期と放射線の種類をもとに、
人体への影響を推定してください

ベクレルとシーベルト

ベクレル：1秒間あたりの壊変の回数を表す単位(Bq)

等価線量：放射線の人体への影響は線種やエネルギーで変わるため組織や臓器に対して決められる値
シーベルト(Sv)を用いる

* β , γ 線の場合、組織に1 J/kgのエネルギーを与える放射線量が1 Sv (α 線, 中性子は5~20倍)

線量当量：等価線量の測定は難しいので、人体様球の深さでの吸収線量を各組織に対する等価線量とする

深さ70 μm 皮膚

深さ3 mm 眼

深さ1 cm 皮膚と目以外

線種による換算率

β , γ , X線 1

α 線 20

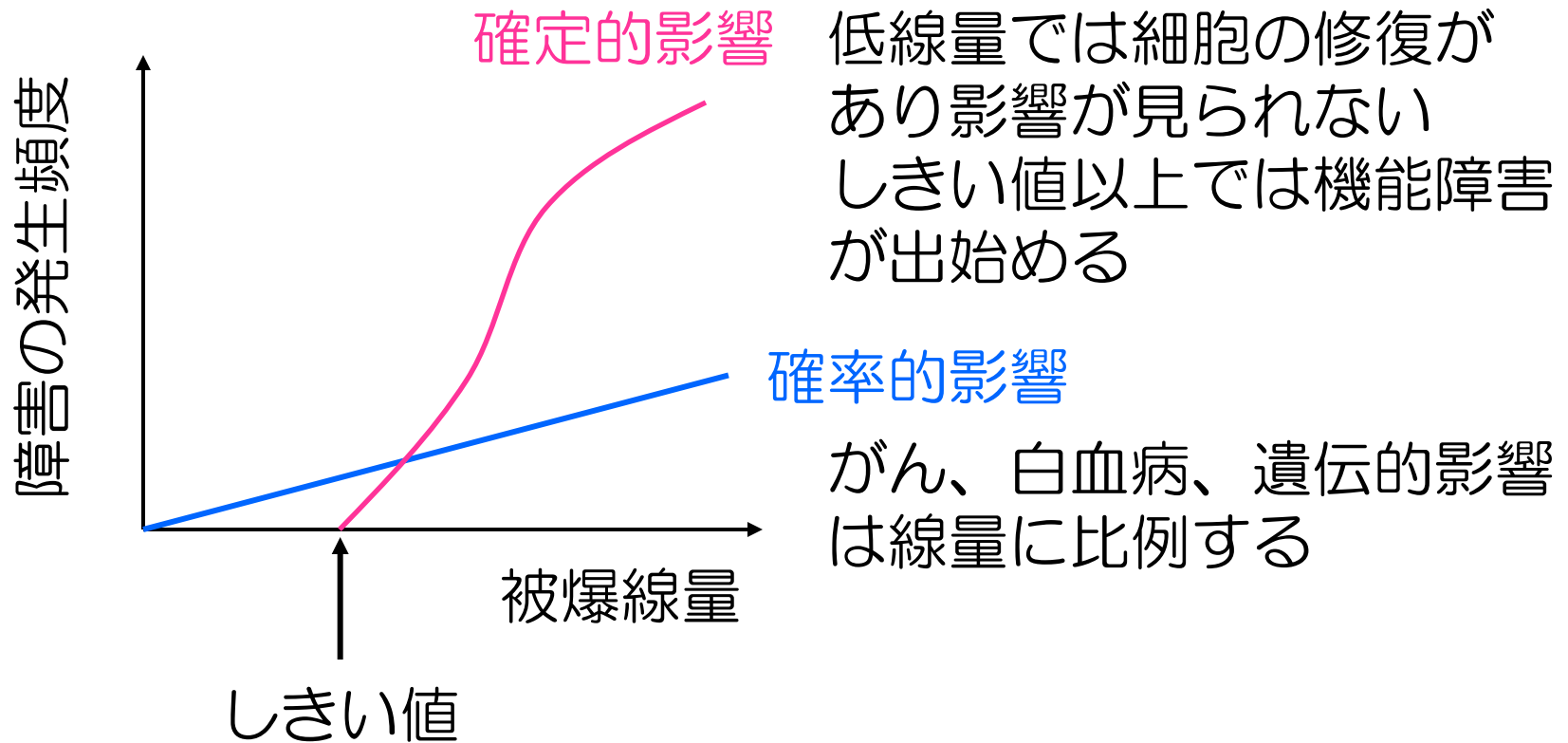
中性子線 5~20

放射線の生物作用

放射線被爆で起こること

- 原子レベル：電離や励起
- 分子レベル：DNA損傷 (直接作用)、水のフリーラジカル化によるDNA損傷 (間接作用)
- 細胞レベル：損傷DNAは短時間で修復されるが、エラーがまれに起こり細胞死や細胞分裂後に影響
- 臓器組織レベル：細胞死による機能障害、エラーによるがん化、遺伝的影響
- 個体レベル：臓器レベルが全身に及び個体死や障害が残る

放射線の生物作用



しきい値は細胞の修復と関連するので、時間当たりの総量を下げることが重要

放射線の検出

放射性物質の特徴

- 物質自体が放射線を放出する
- 放射線は核種に固有
- 高エネルギーなので極めて微量でも測定可

例: 飲料水中の放射性セシウムの基準値1 kgあたり10ベクレル
→ 3 ppq(10^{-15})でも検出可能

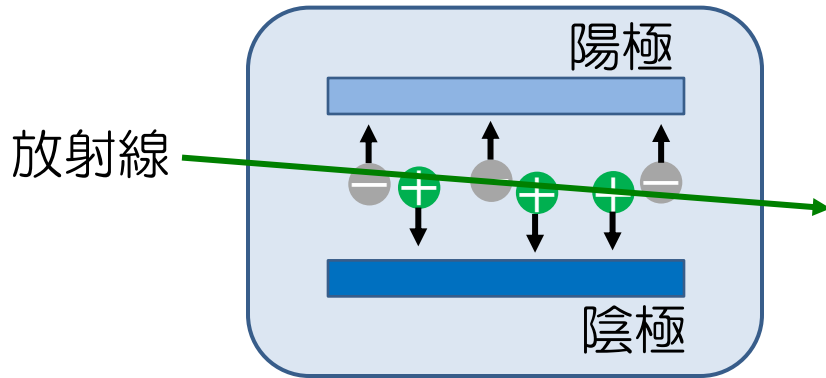
飲食物中の放射性物質の測定

- 電離箱、GM管
 - NaI シンチレーション検出器
 - 高純度Ge半導体検出器
- などが用いられる

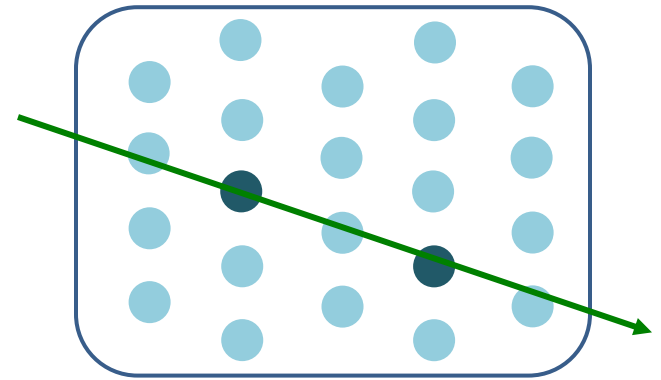


GM管式サーベイメーター(日立製)

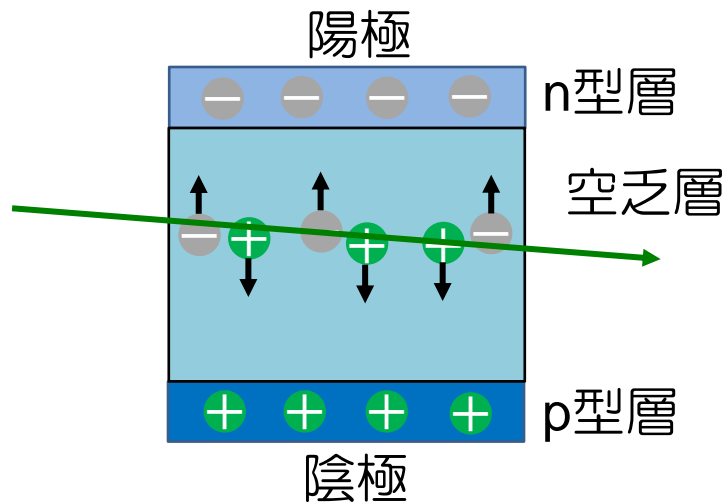
放射線の検出



電離箱・GM管 (気体の電離)



シンチレーション検出器
(NaI等の蛍光体利用)



高純度Ge
半導体検出器
(固体電離箱)

半減期

親核種の初期の原子数が N_0 、時間 t 経過後の原子数 N は

$$N = N_0 \exp(-\lambda t)$$

N が N_0 の1/2になるまでの時間を半減期といい、
 T や $T_{1/2}$ で表す、 λ は壊変定数(=放射能の定義そのもの)

- 半減期の2倍の時間で N_0 は1/4、3倍で1/8になる
- 半減期と壊変定数には $T = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$ の関係がある
従って、

$$N = N_0 \exp(-\ln 2 \ t / T) = N_0 (1/2)^{t/T}$$

半減期

代表的な放射線核種の半減期と1gの放射能(Bq/g)

^3H	12.33年	3.6×10^{14}	^{137}Cs	30.07年	3.2×10^{12}
^{14}C	5730年	1.7×10^{11}	^{226}Ra	1600年	3.7×10^{10}
^{60}Co	5.27年	4.2×10^{13}	^{235}U	7.0×10^8 年	8.0×10^4
^{90}Sr	28.78年	5.1×10^{12}	^{238}U	4.5×10^9 年	1.2×10^4
^{131}I	8.02日	4.6×10^{25}	^{239}Pu	2.4×10^4 年	2.3×10^9

Q. 最も生物に影響の出る核種はどれか

Q. ^{131}I は1年後に何分の1の放射線量になるか

Q. ^{137}Cs の放射線が1/100になるのは何年後か

^{14}C による年代測定

考古学の年代測定や自然人為起源物質の発生源探索や
動態解明のトレーサーとしても利用

1. 1次宇宙線によって ^{14}C が発生 ($n + ^{14}\text{N} \rightarrow ^{14}\text{C} + p$)
2. $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C} : ^{14}\text{C} = 0.99 : 0.01 : 1.2 \times 10^{-12}$ で一定
3. 動植物が生命活動で取り込む
4. 動植物の生命活動停止から半減期に従って減少

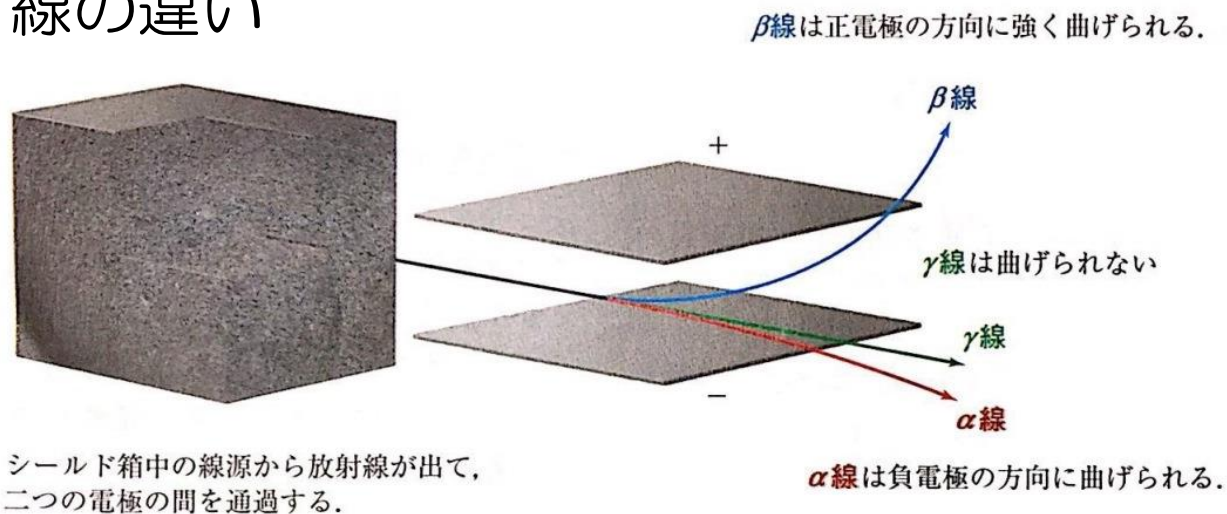
加速器質量分析法で1 mgの試料で約6万年前まで測定可

*過去の大気での2の条件を仮定している

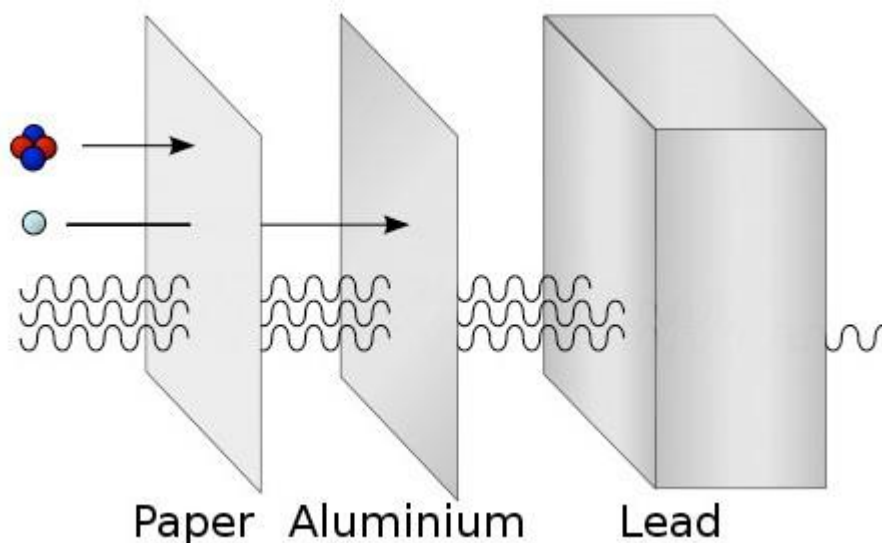
*地磁気の変動による宇宙線の変化は充分ありえる

本日の最重要ポイント

α , β , γ 線の違い



光速の1/10 α
光速の1/2 β
光速 γ



第6回まとめ

今回は、原子の構造について

- α 線, β 線, γ 線の違い
- 原子の安定性
- 核分裂とエネルギー
- 放射線の生物作用
- 放射能の半減期

を学んだ

次回は「中間テスト」です

中間テストの説明

次回は講義の理解度をみ見るための中間テストを行います

中間テストで点をとるためのコツ

1. 小テストの内容を復習
2. 講義中の質問、例題、問題(Q)を復習
3. キーワードを見返す
4. 講義で触れなかった自習要項を復習

一般化学 第6回小テスト

Q1. 第6回のキーワードを記しなさい

Q2. α 線, β 線, γ 線の違いを説明せよ

Q3. 重原子で中性子過多になる傾向があるのはなぜか?

Q4. 確定的影響と確率的影響の違いを説明せよ

Q5. 現在の放射能が1 TBqと1 GBqの核種があり、半減期がそれぞれ1年と10年であるとき、両者の放射能が等しくなるのは現在より何年後か

Q6. ^{206}Hg ($T_{1/2} = 8.2$ 分)が1gある時の放射能の値