プレゼン中、スライド右上隅に 👛 のマークが表示されるものは、配布資料には無いものです

新潟大·歯·顎顔面放射線学分野 西山秀昌 (学部2年生講義資料) 2024.11.27

#### 放射線物理学とは?

「放射線」+「物理学」=???

「分からない」+「分からない」=「理解不能」にはならないように・・・

「理解すること」が大切!!

https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/radiation physics slide.pdf



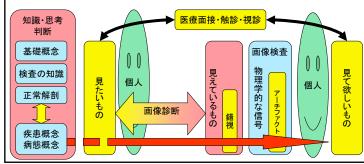
講義ノート(穴埋め式)

https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/radiation physics.pdf

1

# 「見たいもの」 「見えているもの」

画像診断は、「見たいもの」と「見えているもの」とのギャップを埋めていく作業に相当する。



#### 放射線物理学

- 画像診断や放射線治療にて必要な物理学
- ・ 診断や治療などで必要不可欠な知識
- 医療従事者側の「診断したい、治療したい」といった願望と、患者側の「診断して欲しい、治療して欲しい」といった願望との狭間にあって、如何ともしがたい現実を担うもの

2

## 臨床における物理学の 適応範囲

- ・ 科学、特に物理学は、客観的に捉えうる物としての対象の間の普遍的な関係を、論理的・無矛盾に記述することで共有可能な知識にしている。
- したがって、客観的に捉えることが困難な 状況や、普遍的にはならない関係が混在 する状況では、適応の程度を十分に吟味 する必要がある。

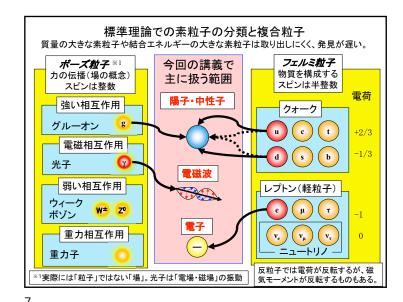
#### 物理学の範囲?数学?情報学?

- 2024年のノーベル物理学賞
  - https://www.jps.or.jp/information/2024/10/2024novelprize.php
  - 「人工ニューラルネットワークによる機械学習を可能にした基礎的発見と発明に対する業績」によりJohn J. Hopfield 氏(プリンストン大学、アメリカ)、Geoffrey E. Hinton 氏(トロント大学、カナダ)の2氏が受賞

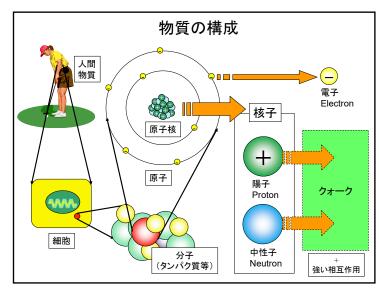
現行の人工ニューラルネットワーク(コネクショニズム系)のAIの原理には物理学的な側面が関与しているかもしれないが、システムとしては数学的・情報学的な側面があり、かつ、人間にとっての意味解釈の側面からは認知科学・言語学・哲学を含む広い領域に広がる。

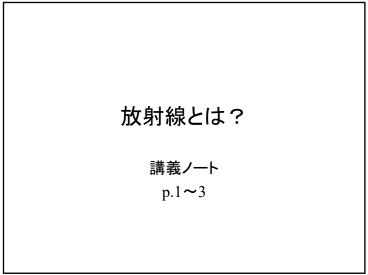


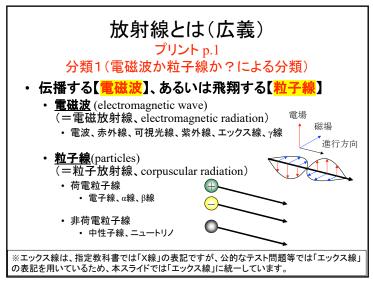
5

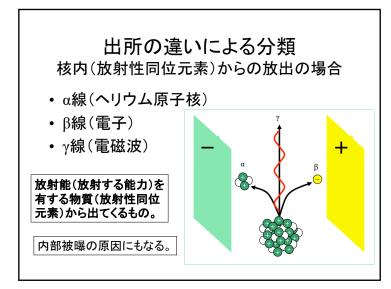


0









(狭義の)放射線

物質を直接あるいは間接に【電離】する(だけのエネルギー を有する)能力を有する電磁波、粒子線

プリント p.1 分類2(電離するかどうか?による分類)

• 電離放射線(ionizing radiation)

• 直接電離放射線(directly ionizing radiation)

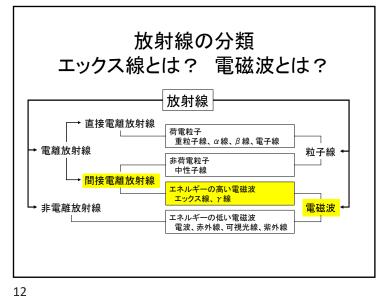
生物内部にて 化学反応を起 こしうる

• 重粒子線、α線、β線、電子線など

- 間接電離放射線(indirectly ionizing radiation)
  - - 中性子線など
  - ・ 電磁放射線(エネルギーの高いもの)
    - エックス線、γ線、消滅放射線など
- 非電離放射線(non-ionizing radiation)
  - 電波、赤外線、可視光線、紫外線など

※ほとんどの紫外線は励起作用があるが、電離作用はない。

10



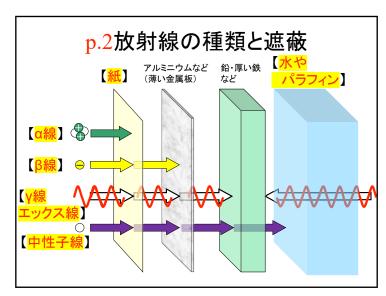
# プリント穴埋めチェック(p.1)

- 伝播する【<mark>電磁波</mark>】、あるいは飛翔する【<u>粒子線</u>】
- 透過する物質を直接あるいは間接に【<mark>電離</mark>】する 能力を有する
- 【電磁波】(electromagnetic wave)
- 【<mark>粒子線</mark>】(particle)
- 【<mark>電離放射</mark>】線(ionizing radiation)
- •【直接電離放射】線(directly ionizing radiation)
- 【間接電離放射】線 (indirectly ionizing radiation)
- 【<mark>非電離放射</mark>】線(non-ionizing radiation)

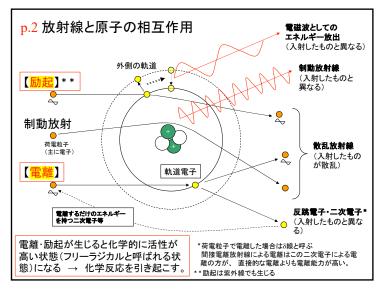
直接電離放射線:自分自身が持つ電気的な性質にて、物質を電離させる能力が高い。

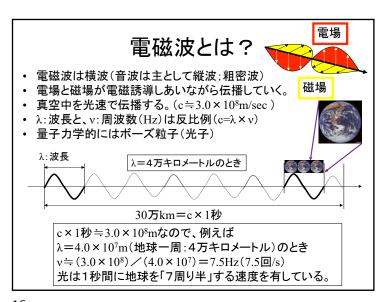
間接電離放射線:自分自身は電気的に中性なので、直接 的に電離させる能力よりも、二次的に発生する電子による 電離の方が、 電離能力が高い。

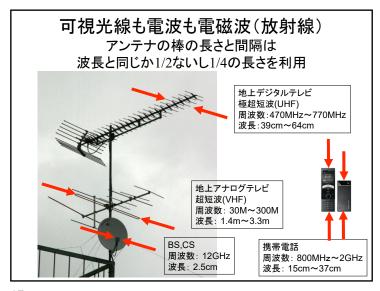
13

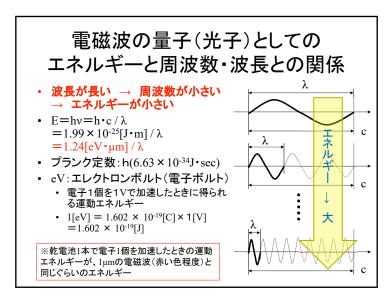


15



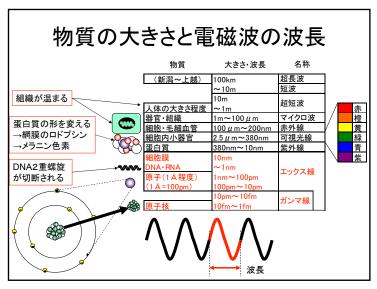




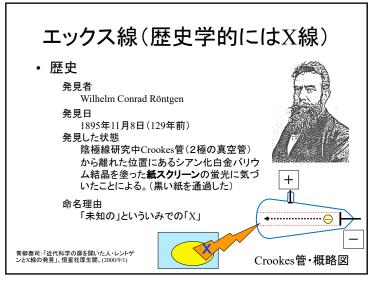


https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/ElectroMagneticRadiation.pdf 自然界での現象、利用目的など /ユーマン共振 0~60Hz:商用周波数 標準電波、対潜水艦通信(水中での減衰が少な 電波時計、航空・海上の無線標識局 短波ラジオ、アマチュア無線(大きなアンテナ センチ波(SH ノーダー、衛星通信 電波天文台 光と電波の中間領域、日本の電波法では3THz以下が電 サブミリ波 赤 遠赤外線 外 中赤外線 線 100 μm ~ 15 μm 10<sup>-4</sup> ~ 10<sup>-5</sup> 15 μm ~ 25 μm 10<sup>-5</sup> ~ 10<sup>-6</sup> 中赤外線 近赤外線 →子の回転 振動のエネルギー参程度 遠紫外線と軟エックス線とは移行的で、厳密には区別困難 電子対生成(>1.022MeV), 光核反応 光核反応(連中性子) 光箱反応(中間子衆生)

18



19



#### エックス線の定義および性質(p.3)

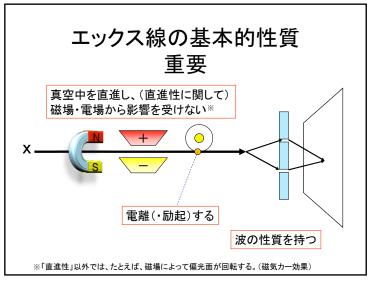
- ・【電磁波】の一種で【電離】作用を有する。
- ・ 波長:λは10<sup>-8</sup>から10<sup>-14</sup>mと短い。
  - 10nm以下
  - ・ 物理的性質は核内から放出されるγ線と同じ。
- 真空中を【光速】で伝播する。 (3.0×10<sup>8</sup>m/sec)

| 年       | 人物            | 事項                       |     |
|---------|---------------|--------------------------|-----|
| 1895    | レントゲン         | X線の発見                    |     |
| 1896    | ベクレル          | 自然放射性物質の発見(ウランの感光作用)     |     |
| 1897    | J.J. トムソン     | 電子の発見                    |     |
| 1898    | マリー&ピエー       | ル・キュリー ポロニウム、ラジウム発見      |     |
| 1899    | ラザフォード        | α線、β線の発見                 |     |
| 1900    | ヴィラード         | γ線の発見                    |     |
|         | プランク          | 黒体輻射の量子化仮説               |     |
| 1904    | ローレンツ         | ローレンツ変換                  |     |
| 1905    | アインシュタイ       |                          | 生理論 |
| 1908    | ガイガー          | ガイガー計数管の発明               |     |
| 1909 ~  | 1911 ラザフォード、2 | イガー ラザフォード散乱の実験→有核原子模型提示 |     |
| 1905 ~  | 1913 ソディー     | 同位体の研究                   |     |
| 1911    | ヘイケ・カメル       | ング・オネス 超伝導現象の発見          |     |
| 1913    | ボーア           | 水素原子のバルマー系列を説明           |     |
|         | クーリッジ         | クーリッジ管考案(現在のエックス線管球の原    | 型)  |
| 1916    | アインシュタイ       | 一般相対性理論                  |     |
| 1918    | ネーター          | ネーターの定理                  |     |
| 1917 ~  | 1919 ラザフォード   | 陽子の発見                    |     |
| 1918 ~  | 1923 コンプトン    | コンプトン効果の発見               |     |
| 1924    | パウリ           | 第4の量子数(スピン)の存在と提案        |     |
| 1927    | ハイゼンベルク       | 不確定性原理                   |     |
| 1927    | スコベルツィン       | 宇宙線の発見                   |     |
| 1932    | コッククロフト、      | ウォルトン 加速器での初の核反応         |     |
|         | チャドウィック       | 中性子の発見                   |     |
| 1935    | 湯川秀樹          | 中間子論の発表                  |     |
|         | オット・ハーン、      | ストラースマン ウラン核分裂の報告        |     |
|         | ベーテ、クリッ       | フィールド 核融合反応を報告           |     |
| 1937    | セグレ           | テクネチウム・最初の人工元素の製作        |     |
| 1970 年代 | 初頭            | CT,MRIの開発                |     |

22

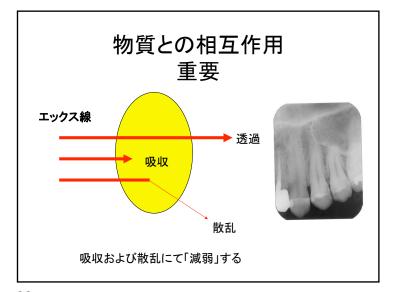
#### エックス線の性質および作用(p.3) 基本的 (試験問題必須) 性質 基本的性質(特に「電離」) から説明可能 電離・励起する。 真空中を直進し、(直進 性に関して)電場・磁場 ・ 化学作用、写真作用(フィ の影響を受けない。 ルムの感光作用)がある。 波動的性質(回折、偏向 蛍光作用がある 干渉など)をもつ。 生物学的作用がある。 熱作用がある。 物質との相互作用 着色作用がある。 物質を透過する。 ● 物質と相互作用し吸収・ ▶ 散乱が生じる。

23

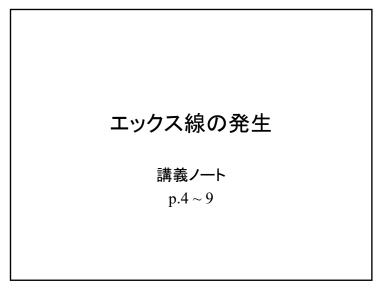


# プリント穴埋めチェック(p.3)

- 【電磁波】の一種で、【電離】作用を有する。
   真空中を【光速】で伝播する。(3.0×10<sup>8</sup>m/sec)
- 1. 原子と相互作用し【電離・励起】する。
- 2. 真空中を直進し、(直進性に関して)【電場・磁場】の影響を受けない。
- 電磁波であるが、【電場・磁場】を通るときに曲がらない。
- 4. 物質を【透過】する。
- 5. 物質と相互作用し【吸収】・【散乱】(合わせて減弱)が生じる。
- 【<mark>吸収</mark>】(減弱):診断用エックス線において、画像形成に関与する。
- 【散乱線】:診断用エックス線において、画質を低下させる。
- 6.【化学】作用、写真作用がある。
- 【化学】作用:酸化・還元など
- 7. 【蛍光】作用がある
- 【<u>蛍光</u>】物質(シアン化白金バリウム結晶など)などを発光させる。
- 増感紙(【<u>蛍光</u>】物質を塗った紙)を発光させる。
- 8. 【生物学】的作用がある。
- 9. 【熱】作用がある。
- 10. 【着色】作用がある。
- 【着色】する。



26



27



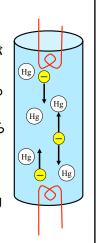


エックス線の発生 交流 100V 照射筒 (コーン) 管電圧:60-70kV 陽極(十) 6-7万ボルト 濾過板 変圧器 (フィルタ) (ガラス容器 (トランス) 整流 交流 脈流 直流 \_ 絞り (コリメータ) フィラメント 油(冷却・絶縁) <u>~</u> 陰極(

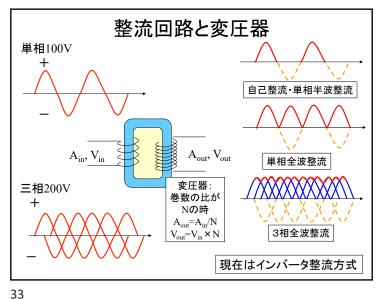
30

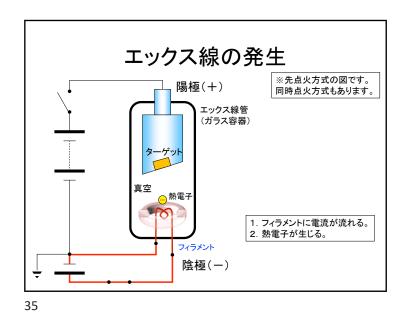
### 参考•蛍光灯

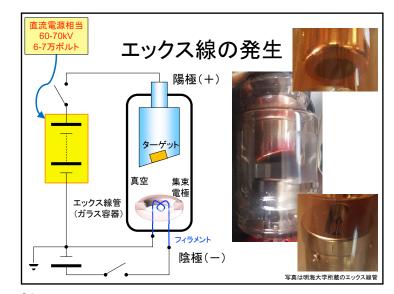
- 内部は真空に近く、ガス状態の水銀が 含まれている。
- 両端にあるフィラメントに電流が流れる。
- 両端のフィラメント間に高電圧がかけられる。
- 電子が飛び、水銀原子にぶつかって、 紫外線が発生する。
- 紫外線が、ガラス管に塗られた蛍光物質に当たって、発光する。

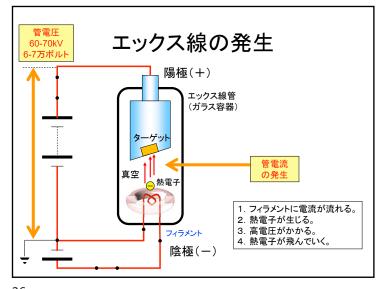


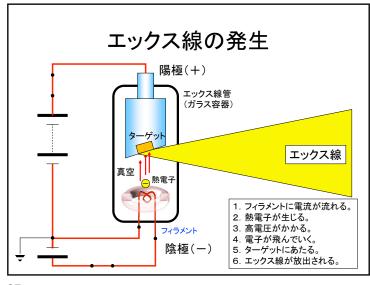
31

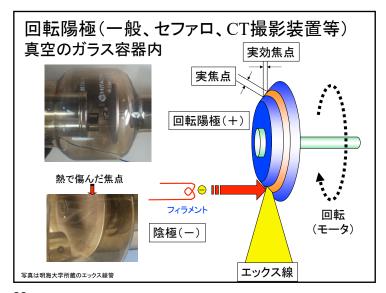


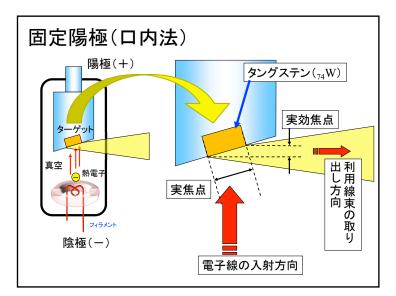


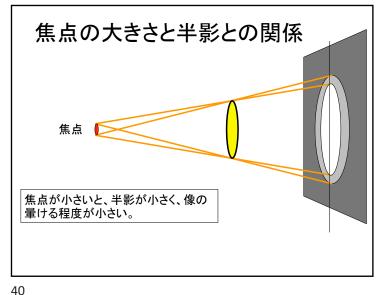


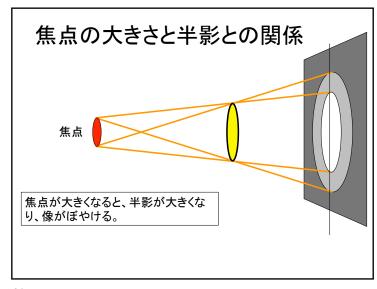










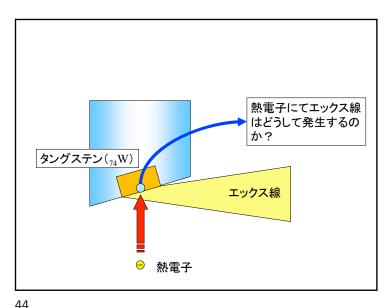


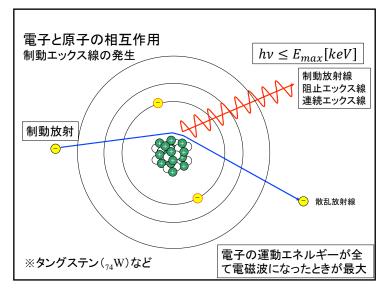
# プリント穴埋めチェック(p.4)

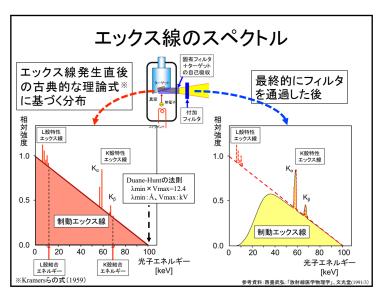
- 1. 【熱電子】、2. 【高電圧】、3. 【真空】、4. 【ターゲット】、
- I:【<mark>管電流</mark>】、V:【<mark>管電圧</mark>】
- 99%以上は【熱】となる。
- 【<mark>ヒール</mark>】効果
- ・【固定陽極】エックス線管
- 【回転陽極】エックス線管
- <mark>総濾過</mark>】:固有濾過(1mmAl程度)+付加濾過
- 管電圧70kV以下で【総濾過】1.5mmAl以上(医 療法施行規則)
- 【矩形】絞り
- 皮膚表面で直径【6cm】以内(医療法施行規則)
- タイマーは【デッドマン】タイプが用いられる。

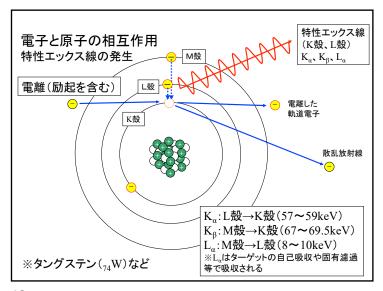
制動(連続)エックス線の分布 **⊘**⊝<u></u> = 絞り(コリメータ) 陰極側 陽極側 【ヒール】効果:ターゲット内でのエックス線の通過距離による減衰の差 陽極側:ターゲット内での通過距離が長いので減衰する。

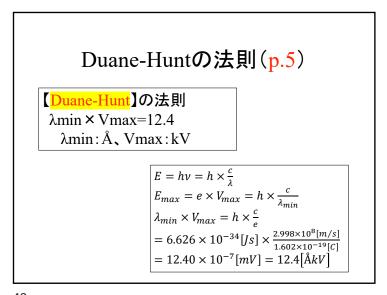
42

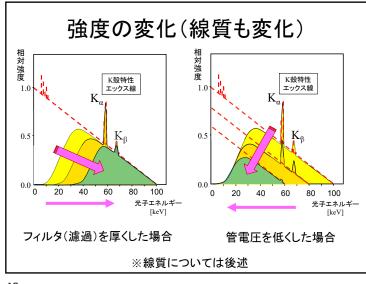












## プリント穴埋めチェック(p.5)

- 【特性(示性)】エックス線
  - ターゲットの軌道電子の位置エネルギーに依存するエックス線
- 【制動(阻止、連続)】エックス線
  - 原子核との相互作用で失う運動エネルギーに依存するエックス線
- 【Duane-Hunt】の法則
  - 最短波長と管電圧(最大の加速電圧)との関係

#### 臨床で利用するエックス線について

- 制動エックス線と特性エックス線の混合
  - 制動エックス線
    - 管電圧で規定される最短波長よりも長い波長のエックス線が含まれる。
    - ただし、濾過されているため、波長の長い側の(エネルギーの低い側の)エックス線は除去されている。
  - 特性エックス線
    - タングステンでのK殻の結合エネルギーは 69.5keV のため、管電圧が60kVでは、K<sub>α</sub>とK<sub>β</sub>の特性エック ス線は含まれない<sup>※</sup>
    - ・管電圧が70kV以上では、 $K_{\alpha}$  と $K_{\beta}$ の両方の特性 エックス線を含んでいる。

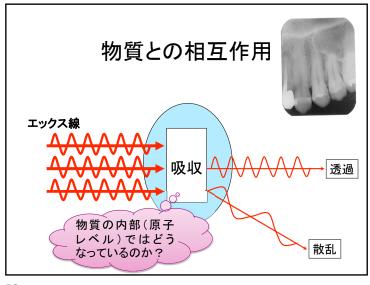
50

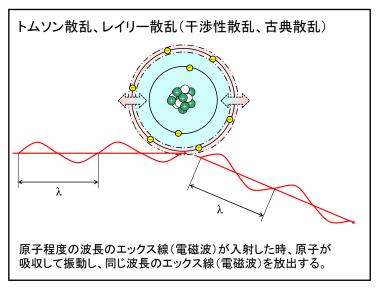
# エックス線と物質との相互作用 エックス線の減弱と線質

講義ノート

p.6 ~8

51



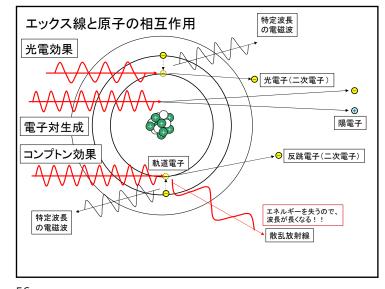


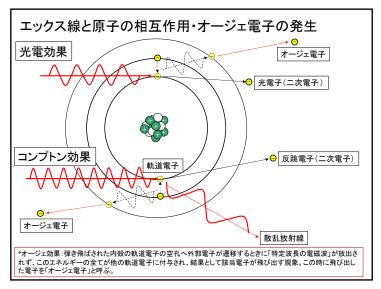
55

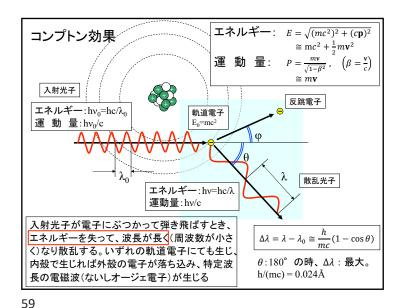
# プリント穴埋めチェック(p.6)

- 【<mark>光電</mark>】効果
- 【コンプトン】効果(非干渉性散乱)
- •【電子対】生成
- 【散乱(エックス・光子)】線

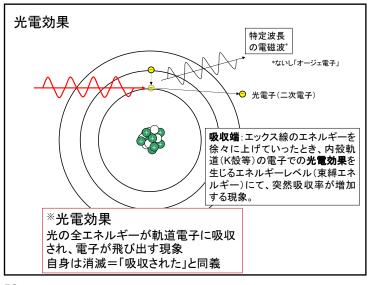
54







60



58

# 補遺:コンプトン効果での計算式 [運動量保存則(入射方向) ①、②から

 $h\nu_0 \cong h\nu + \frac{1}{2}m\mathbf{v}^2$ 

 $m\mathbf{v}^2 \cong 2h(\nu_0 - \nu) - 3$ 

 $\widehat{ \begin{tabular}{l} \begin{tabular}{l} \hline \begin{tabular}{l} \begi$ 

※光子が関与するため、多くのテキストにて相対論的な記述が多く、運動量にローレンツ変換が入っていたり、質量エネルギーが入っていたりする。だが結局のところ、弾き飛ばされた電子の速度:vが光速:cよりも非常に遅いとき、すなわち光子の失うエネルギーが小さいときの近似式を計算することになるので、古典的に解いた答えと同じになる。

新潟大・歯・顎顔面放射線学分野 西山 講義資料

#### 電子対生成

 $E=mc^2$ 

- 1.02MeV以上で発生
- 陽電子と(陰)電子の2つが生成される。
- 電子の質量エネルギー×2=1.02MeV
- 余ったエネルギーは電子の運動エネルギーになる。

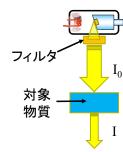
#### 参照) 電子対消滅

陽電子と(陰)電子(物質と反物質)が衝突することで発生する。このとき、511keVのエネルギーをもつ2本の消滅放射線が相互に正反対の方向へ放出される。

61

# エックス線の減弱(p.7)

- ・ 距離による減弱
  - ・【<mark>逆自乗</mark>】の法則
- ・ 物質との相互作用(吸収・散乱)による減弱



63

# エックス線の減弱と線質について

開始予定: 2限目

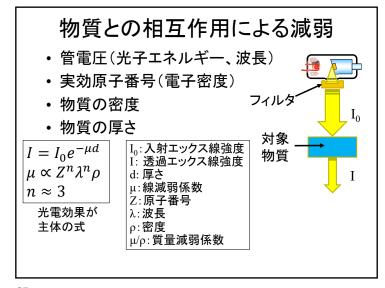
62

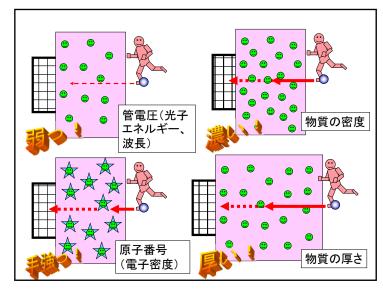
### 距離による減弱 【<mark>逆自乗</mark>】の法則(p.7)

- 焦点から放出されるエックス線の単位面積当たりの強度は距離の自乗に反比例して減弱する。
- 例えば、距離:L<sub>0</sub>のときの照射野がS<sub>0</sub>で、通過する単位面積当たりのエックス線強度をI<sub>0</sub>とすると、S<sub>0</sub>を通過する全エックス線強度はI<sub>0</sub>S<sub>0</sub>
- 距離:Lでの単位面積当たりのエックス線強度を Iとし、面積をSとすれば、
  - IS = I<sub>0</sub>S<sub>0</sub>であり、
  - $S = \pi R^2$ ,  $S_0 = \pi R_0^2$ ,  $R: R_0 = L: L_0$   $\tau$
  - S = S<sub>0</sub>×(L/L<sub>0</sub>)<sup>2</sup> --- 面積は距離の自乗に比例
  - I = I<sub>0</sub>/(L/L<sub>0</sub>)<sup>2</sup> --- 単位面積あたりの強度は距離 の自乗に反比例

推 L<sub>2</sub>=L<sub>0</sub>×2 R<sub>2</sub> S<sub>2</sub>= 「ックス」、講談社、(2011/2)

村田 次郎: 「余剰次元」と逆二乗則の破れ (ブルーバックス)、講談社、(2011/2/22) ··· 次元との関係についての参考図書としてお勧め。

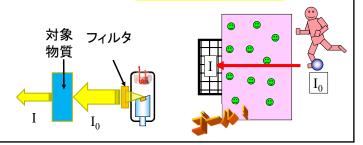




67

#### 物質との相互作用による減弱

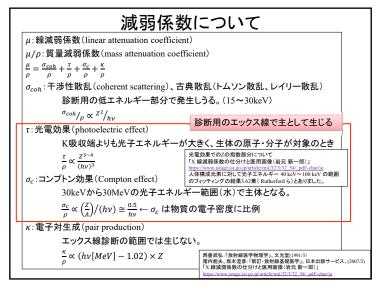
- シュートしたときゴールする可能性
  - ゴールまでの距離(厚さに相当)
  - 相手選手の守備範囲(原子番号に相当)
  - 相手選手の数(密度に相当)
  - ボールを蹴る強さ(光子エネルギー:波長の逆数に相当)

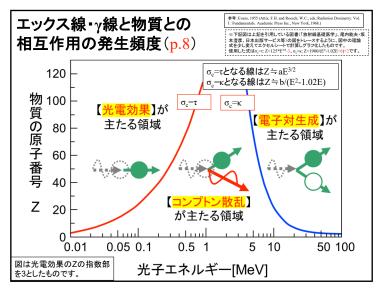


66

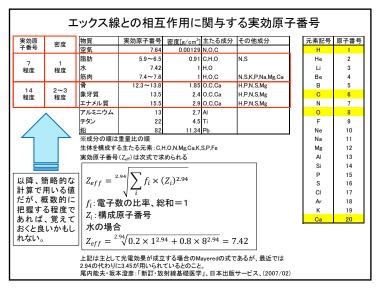
# 物質との相互作用(吸収・散乱) による減弱(p.7)

- I=I<sub>0</sub>e<sup>-µd</sup>、µ≒kZ<sup>3</sup>λ<sup>3</sup>ρ(光電効果主体の場合の式)
  - Io:入射エックス線強度、I:透過エックス線強度
  - d:厚さ、μ:線減弱係数、Z:原子番号、λ:波長、ρ:密度
  - μ/ρ:質量減弱係数
- 減弱が大きくなるのは、物質が【厚い】、原子番号が【大きい】、密度が【高い】、波長が【長い】場合。
- シュートしたときゴールする可能性
  - ・ ゴールまでの距離(厚さに相当)
  - ・ 相手選手の守備範囲(原子番号に相当)
  - ・ 相手選手の数(密度に相当)
  - ボールを蹴る強さ(光子エネルギー: 波長の逆数に相当)





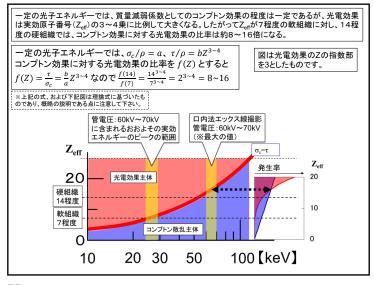
71



70

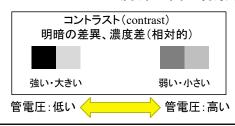
### 光電効果とコンプトン効果

- 実効原子番号が同じ場合
  - ・ 管電圧が高くなるほど
  - 光電効果よりもコンプトン効果の発生確率が 高くなる。
- 管電圧が同じ場合
  - ・ 実効原子番号が高くなるほど
  - コンプトン効果よりも光電効果の発生確率が 高くなる。



# 管電圧(光子エネルギー)と コントラスト

・管電圧が上昇するにつれ、光電効果よりもコンプトン散乱が主体へと変化する。このため、 硬組織と軟組織のコントラストが低減してくる (例:120~140kVでの胸部の高圧撮影)

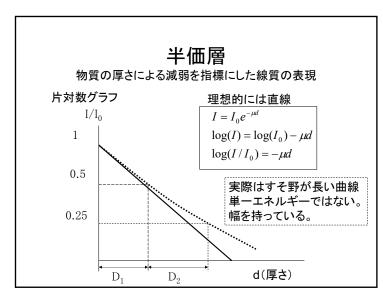


75

## プリント穴埋めチェック(p.7-8)

- 【<mark>逆自乗</mark>】の法則
- 減弱が大きくなるのは、物質が【厚い】、原子番号が【大きい】、密度が【高い】、波長が【長い】場合。
- 【光電効果】が主たる領域
- 【コンプトン散乱】が主たる領域
- ・【電子対生成】が主たる領域

74



# p.9【<mark>半価</mark>】層

- 第1【半価】層 $(D_1)$ : ナロービーム条件で、 厚さ $D_1$ の吸収版によって線量の値が半分に なるときの厚さ。
- 第2【半価】層(D<sub>2</sub>):吸収版にて線量が元の値の1/4となるとき、D<sub>1</sub>からの厚さの増分。
- 均等度: Hc=D<sub>1</sub>/D<sub>2</sub> (通常Hc<1)</li>※均等になればHcは1に近づく。
- 不均等度: D<sub>γ</sub>/D<sub>1</sub>

77

#### 強度(発生時):光子エネルギー×光子数

E=kZIV<sup>2</sup>t 管電圧の自乗に注意!

k: 定数、Z:ターゲットの原子番号 I: 管電流、V: 管電圧、t: 照射時間 定義です 質×量 → 量 参考) V × A = W

 管電圧
 低い
 高い

 影響を与えるのと
 管電流
 少ない
 多い

 照射時間
 短い
 長い

 エックス線強度
 弱い
 強い

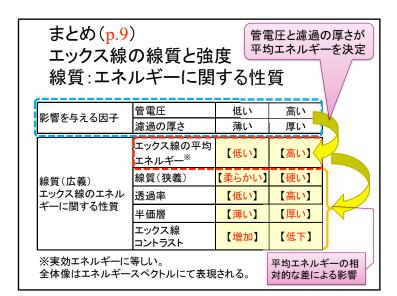
発生効率: η ≒E/(IVt)=kZV

※通常は1%以下(k=1.0×10<sup>-9</sup>)

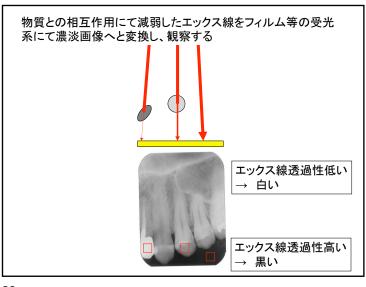
Ⅳ:管電流×管電圧

=(単位時間当たりの)エックス線管中の

電子線の全エネルギー

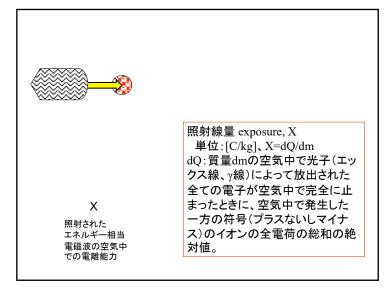


78



79

# エックス線、散乱(エックス)線 グリッドの関係 平行なエックス線での模式図 実際には焦点からの エックス線入射角度 の考慮がなされる。 焦点 グリッド 散乱線 81



線量の単位と意味

講義ノート p.10

82

# 補遺:「カーマ」

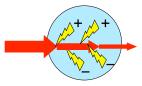
<u>k</u>inetic <u>e</u>nergy <u>r</u>elated in <u>ma</u>terial

- ・ 単位質量あたりの、非荷電粒子(エックス線、γ線、 中性子線)によって遊離した、すべての荷電電離 粒子の初期運動エネルギーの総和。
- 物質が空気の場合、「空気カーマ」と呼ばれる。
- 診断領域において、荷電粒子平衡成立時

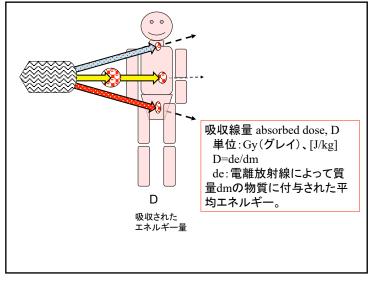
 $K_{air} = D_{air} = 33.97 X[J/Kg]$   $K_{air}$ : 空気カーマ

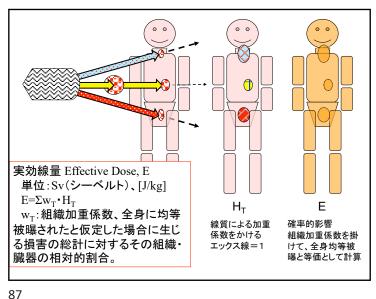
Dair: 空気吸収線量

X: 照射線量

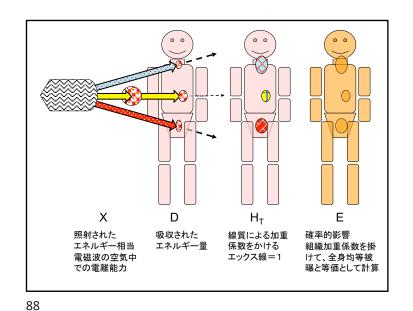


83





等価線量 equivalent dose, H<sub>T</sub> 単位:Sv(シーベルト)、[J/kg]  $H_T = \Sigma_{W_R} \cdot D_{T,R}$   $D_{T,R}$ :組織・臓器Tについて平均化さ れた、放射線Rに起因する吸収線量。  $H_T$ w<sub>R</sub>:放射線加重係数、放射線Rの 加重係数:w<sub>R</sub> 種類とエネルギーによって決められ D(吸収線量)に エックス線=1 線質による加重 る値。 電子=1 係数をかける α線=20 Hrは、組織に照射された全てのR エックス線=1 中性子=5~20 においてのw<sub>R</sub>・D<sub>T,R</sub>の総和。



| 光では      |                                      | 線量                                   |             | 単位     |                       | 適応                |     |        |
|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------|--------|-----------------------|-------------------|-----|--------|
| 明るさに相当   | Х                                    | 照射線量                                 | _           | [C/kg] | Х                     | , γ線              |     |        |
|          |                                      | exposure                             | 旧:          | R      |                       | 空気                |     |        |
|          |                                      | 1R=2.58x10 <sup>-4</sup>             | ¹C/kg       | 5      |                       |                   |     |        |
| 暖かさに相当   | D                                    | 吸収線量                                 | Gy          | [J/kg] | すべて                   | この放射              | 棉   |        |
|          |                                      | absorbed dose                        | 旧:          | rad    | すべ                    | ての物質              | 質   |        |
| 危険度      | Нт                                   | 等価線量                                 | Sv          | [J/kg] | すべて                   | この放射              | 線   |        |
| (日焼けに相当) |                                      | equivalent dose                      | 旧:          | rem    | 組織(す                  | べての               | 生物) |        |
|          | $H_T = \sum w_R \cdot D_{T \cdot R}$ |                                      |             |        | 組織反応(確定的<br>エックス線ではDi |                   |     |        |
|          |                                      | w <sub>R</sub> :放射線加重係数 <sup>※</sup> |             |        | 〈稼で                   | JD=H <sub>T</sub> |     |        |
|          | Е                                    | 実効線量                                 | Sv          | [J/kg] | すべて                   | この放射              | 線   |        |
|          |                                      | effective dose                       | 旧:          | rem    | 組織(す                  | べての               | 生物) |        |
|          |                                      | $E=\sum w_T \cdot H_T$               |             |        |                       |                   | 確率  | 的影響の指標 |
|          |                                      | w <sub>T</sub> :組織加重                 | <b>直係</b> 数 | 女 ガンなど | の発生する                 | 確率                |     |        |
|          | Α                                    | 放射能                                  | Bq          | [回/秒]  | 放射性                   | 生同位元              | 素   |        |
|          |                                      | activity                             | IB:         | Ci     |                       |                   |     |        |

# プリント穴埋めチェック p.10

- •【照射】線量 exposure, X
- •【吸収】線量 absorbed dose, D
- •【等価】線量 equivalent dose, H<sub>T</sub>
- 【実効】線量 Effective Dose, E

組織荷重係数(ICRP2007勧告) 放射線の 単位 様々な係数 等価線量(Sv) = 放射線加重係数  $w_R$  × 吸収線量(Gy) γ線、X線、**β**線 陽子線 α線、重イオン 20 2.5~21 中性子線 実効線量 (Sv) = Σ (組織加重係数  $w_T$  × 等価線量) 組織加重係数 w<sub>T</sub> 骨髄(赤色)、結腸、肺、胃、乳房 0.12 0.08 膀胱、食道、肝臓、甲状腺 0.04 骨表面、脳、唾液腺、皮膚 0.01 残りの組織の合計 0.12 Sv:シーベルト Gy:グレイ 出典:国際放射線防護委員会 (ICRP) 2007年勧告より作成

90

# 放射能について

講義ノート p.11

#### 身近な自然放射線と放射能

- 新潟県立自然科学館(女池南)にある霧箱
  - 宇宙線を見ることができます。
- 雷が原子核反応を起こし、反物質を作る。
  - ・ 雷が発生させたγ線にて光核反応が生じ、中性 子および反物質(陽電子)が生成。さらに陽電 子が周囲の(陰)電子と反応し、消滅放射線が 放出されているとのこと。(2017年2月6日、柏 崎市にて、京都大学、榎戸准教授ら)

Teruaki Enoto, Yuuki Wada, Yoshihiro Furuta, Kazuhiro Nakazawa, Takayuki Yuasa, Kazufumi Okuda, Kazuo Makishima, Mitsuteru Sato, Yousuke Sato, Toshio Nakano, Daigo Umemoto & Harufumi Tsuchiya (2017). Photonuclear reactions triggered by lightning discharge. Nature, 551(7681), 481-484.

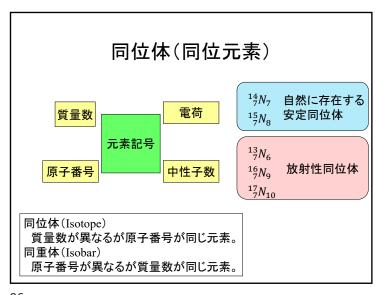
93



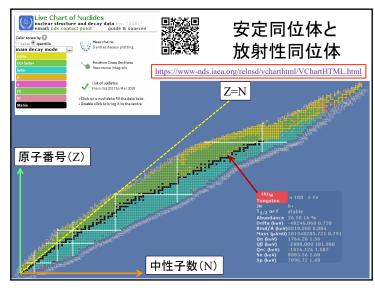
PHYWE—Diffusions-Nebelkammer
Typ: PJ 80-3
PHYWE SYSTEME-GMBH
D 3400 Göttingen

新潟県立自然科学館
霧箱
2011.02.06撮影

94

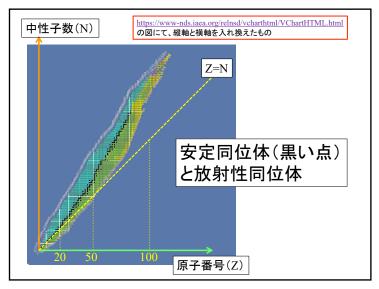


95

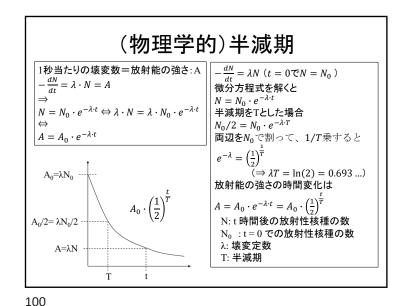


### 放射性同位体

- · 原子核壊変(α壊変、β壊変)にて放出される放射線
  - ・  $\alpha$ 線 $(\alpha$ 壊変)、β線(β壊変)、γ線など
- ・放射能とは
  - ・ 本来:放射性同位体が電離放射線をだす能力(性質)
  - ・現在では「放射能の強さ」を単に「放射能」と呼ぶ場合が多い
- 放射能の強さ(A) 単位:Bq(ベクレル)、[1/sec]
  - ・単位時間(dt)に壊変する原子核数(dN): -dN/dt
  - ・ 例:5000個の核種が2秒後に3000個になった場合
  - $\cdot$  A=-(3000-5000)/2=1000Bq



98



#### 原子核壊変の種類

- アルファ壊変(α)
- アルファ粒子を放出する • ベータ壊変(β)
  - ベータ・マイナス壊変(β<sup>-</sup>)

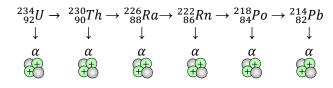
    - ・ 電子を放出する
  - ベータ・プラス壊変(β+)

    - ・ 陽電子を放出する
  - - 電子を取り込む
- 核異性体転移(IT: Isomeric Transition)
  - ガンマ線を放出する

101

#### α壊変

- ・ α粒子を放出する壊変
- ・ 比較的大きな原子核にて生じる
  - 原子番号:Z→Z-2
  - 質量数:A→A-4



103

#### 基本

- プラスの粒子が出てくる
  - 出た数だけ原子番号が小さくなる
- マイナスの粒子が出てくる
  - ・ 出た数だけ原子番号が大きくなる
- マイナスの粒子が入ってくる
  - 入った数だけ原子番号が小さくなる

102

# β壊変(1)

- 電子や陽電子が出入りする壊変
  - 質量数: Aは変化しない
  - 電子が放出される(β-壊変)



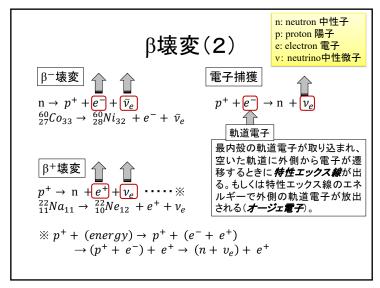
- 原子番号: Z→Z+1
- 陽電子が放出される(β+壊変)
   ⊕ ■



- 原子番号:Z→Z-1



原子番号:Z→Z-1



#### 放射性同位元素と物理学的半減期

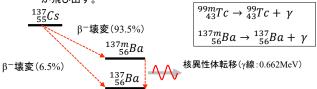
| J 1- |                   |                         | 1 1 1   | 1120121 |
|------|-------------------|-------------------------|---------|---------|
|      | 核種                | 崩壊                      | 半減期     |         |
|      | <sup>3</sup> H    | β-                      | 12.33 年 |         |
|      | <sup>14</sup> C   | β-                      | 5730 年  |         |
|      | <sup>22</sup> Na  | β <sup>+</sup>          | 2.603 年 |         |
|      | <sup>40</sup> K   | $\beta^+$ , $\beta^-$   | 12.7 億年 |         |
|      | <sup>60</sup> C₀  | $oldsymbol{eta}^-$      | 5.26 年  |         |
|      | <sup>67</sup> Ga  | $\gamma$ (電子捕獲壊変)       | 3.3 日   |         |
|      | <sup>99m</sup> Tc | $\gamma$ (異性体転移)        | 6.02 時間 |         |
|      | <sup>131</sup> I  | $oldsymbol{eta}^-$      | 8.02 日  |         |
|      | <sup>137</sup> Cs | $oldsymbol{eta}^-$      | 30.07 年 |         |
|      | <sup>201</sup> TI | $\gamma$ 、 $X$ (電子捕獲壊変) | 73 時間   |         |
|      | <sup>222</sup> Rn | α                       | 3.82 日  |         |
|      | <sup>226</sup> Ra | α                       | 1620 年  |         |
|      | <sup>235</sup> U  | α                       | 7.04 億年 |         |
|      | <sup>238</sup> U  | α                       | 44.7 億年 |         |

107

#### 核異性体転移

#### IT: isomeric transition

- αないしβ壊変後の励起状態が長時間つづき、その後に余分なエネルギーをγ線として放出し、安定化する転移。
  - 質量数:Aは変化しない。
  - 原子番号:Zも変化しない。
- 場合によっては内部転換(IC: Internal Conversion)が生じる。
  - 余分なエネルギーが軌道電子に与えられて飛び出す。
  - 空いた軌道に電子が遷移すれば、特性エックス線やオージェ電子 が飛び出す。



106

### 生物学的半減期と有効半減期

- 物理(学)的半減期:T<sub>p</sub>
- 生物学的半減期:T<sub>k</sub>
  - 代謝や排泄によって体内での放射能が半分になる時間。(同一の放射性核種であっても、 化学的な状態等によって異なる)
- 有効半減期※:T<sub>eff</sub>

 $\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b}$  $\frac{1}{T_{eff}} = \frac{T_p \cdot T_b}{T_n + T_b}$ 

※実効半減期と記述する書籍もある。

#### 線量測定器について

講義ノート

p.12

電離放射線による「電離」と「励起」の作用を利用している 「電離」→「電流への変化」、「化学反応」 「励起」→「蛍光等への変化」

109

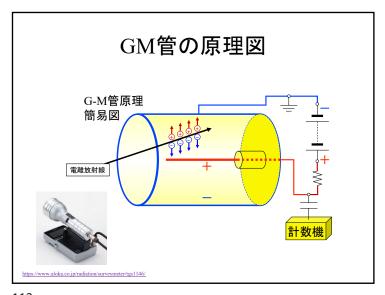
# 環境モニタリングに用いられる 線量測定器(教科書p.31-34)

| 用いる放射線<br>の特性         | 計測器の名称                                | 感度 | エネルギー<br>依存性 | 測定対象                                      |
|-----------------------|---------------------------------------|----|--------------|---|
| 電離作用                  | 電離箱式サーベイメータ<br>(空気:1気圧~数10気<br>圧程度)   | 低い | 小さい          | エックス線、 <i>ア</i> 線<br>エネルギー測定              |
| (気体)                  | GM管式サーベイメータ<br>(気体::Ar+エチルアル<br>コール等) | 高い | 高い           | エックス線、 $\gamma$ 線<br>(窓を開けることで $\beta$ 線) |
| 蛍光作用<br>(励起作用<br>の結果) | シンチレーション計数器                           | 高い | 高い           | エックス線、ア線                                  |

111



110

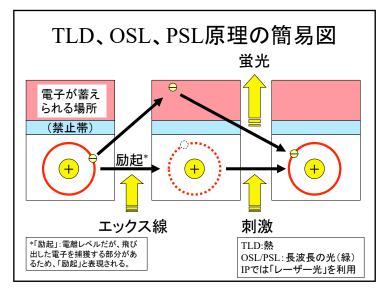


### シンチレーション計数器

- ガンマ線、エックス線を蛍光に変換
- ・ 蛍光をさらに光電面にて電子に変換
- 電子を増幅して計測
  - バックグラウンドレベルまで計測可能だが、 エネルギー依存性が高く、線量を正確に測 定できない。γ線の線量率変化に適する。



113



115

### 個人モニタリングに用いられる 線量測定器

| 用いる放射線<br>の特性         | 計測器の名称                      | 特徴  |  |  |  |
|-----------------------|-----------------------------|---|--|--|--|
| 電離作用 (固体)             | 半導体式ポケット線量計                 | $lpha$ 、 $eta$ 、 $\gamma$ 、エックス線<br>エネルギー測定、近年高性能化へ |  |  |  |
|                       | 蛍光ガラス線量計(ガラス<br>バッチ)(RPL)   | 個人モニタリング用として、広く用い                                   |  |  |  |
| 蛍光作用<br>(励起作用<br>の結果) | 光刺激ルミネッセンス線量<br>計(OSL, PSL) | れている。   |  |  |  |
|                       | 熱蛍光染料系(TLD)                 | 小規模事業所、独自の管理  |  |  |  |
| 写真作用<br>(電離作用の結果)     |                             | 近年ほとんど使用されない  |  |  |  |

RPI Radio Photo Luminescence

OSL Optically Stimulated Luminescence

Photo Stimulated Luminescence 輝尽性蛍光 → IP(イメージングプレート)でも利用

TLD Thermo Luminescence Dosimeter

114

半導体検出器(Si, Ge)

検出器の種類によってα線、β線、γ線、エックス線 の計数とエネルギー測定可能。

#### 電離を利用した場合の測定機器と電圧

(イオンが再結合して計測できない)

電圧低い 수 電離箱:エックス線の照射線量など

比例計数管

(連続放電して計測できない)

#### 参考図書

- 岡野友宏、小林 薫、有地榮一郎、勝又明敏、林 孝文編: 歯科放射線学(第7版)、医歯薬出版(2024/3/25)
- 西臺武弘:「放射線医学物理学」、文光堂(1991/3)
- 尾内能夫、坂本澄彦:「新訂・放射線基礎医学」、日本出版サービス、(2007/2)
- 稲邑清也、立入弘(監修),山下一也,速水昭宗(編集):診療放射線技術〈上巻〉、南江堂: 改訂第11版(2004/10)
- 代居 敬:「歯科放射線学サイドリーダー第2版」、学建書院
- 新津 守(監訳):「はじめての放射線物理」、メディカル・サイエンス・インターナショナル、(2008/9)
- 青柳泰司:「近代科学の扉を開いた人・レントゲンとX線の発見」、恒星社厚生閣、(2000/9/1)
- Jerrold T. Bushberg, J. Anthony Seibert, et.al.: "The Essential Physics of Medical Imaging (Second Ed.)", LIPPINCOTT WILLIAMS & WILKINS (2001/12/15)
- 鈴木陽典: 口内法X線撮影における最適X線エネルギーの研究. 歯科放射線. 26(3):199-217, 1986.

#### ネット上で参考になるサイト(一部)

ネット上には多くの情報があふれかえっています。少なくとも、出典の明らかな資料を参照し、食い違う見解については、背景事情を吟味しましょう。(2024.11.19リンク確認)

- https://www.jrias.or.jp/books/cat/sub1-01/101-14.html
- ICRP勧告 日本語版シリーズ PDF無償公開のお知らせ
- https://www.icrp.org/page.asp?id=506
- ICRPサイトでは、多くの日本語資料(PDF等)が入手可能となっています。
- https://www.rerf.or.jp/shared/basicg/basicg\_j.pdf

「分かりやすい放射線と健康の科学」(公益財団法人放射線影響研究所)

https://www2.kek.jp/kids/

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(KEK) キッズサイエンティスト

https://atomica.jaea.go.jp/

原子力百科事典(ATOMICA) (財)高度情報科学技術研究機構(RIST)

- https://www.mext.go.jp/b\_menu/shuppan/sonota/attach/1313004.htm
  - 文部科学省 放射線等に関する副読本掲載データ
- https://eman-physics.net/

EMANの物理学 ← 特殊相対性理論や、電磁気関係が分かりやすいです。

https://www.jira-net.or.jp/vm/top-page.html

社団法人 日本画像医療システム工業会(JIRA)医用画像電子博物館

- https://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/
- 東京大学教養学部:「放射線を科学的に理解する」
- https://radiation.shotada.com/

放射線について考えよう。(高エネルギー加速器研究機構・多田 将)

118