

口腔生命福祉学科 歯科放射線学 担当:西山

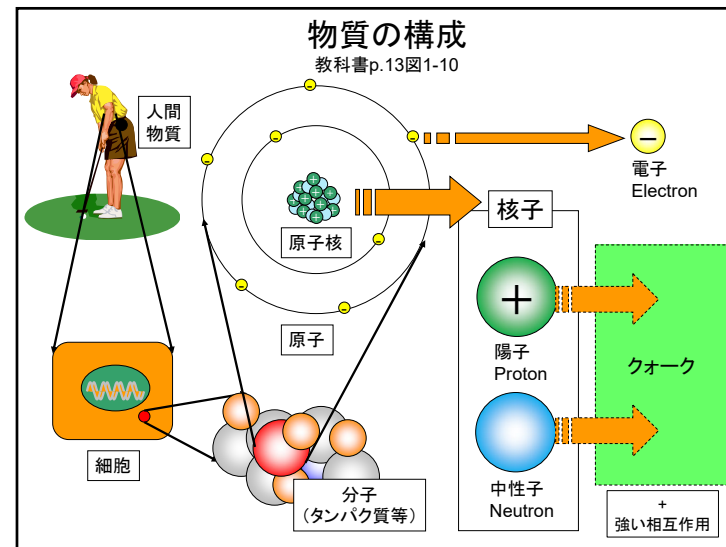
<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/ohw/physics.pdf>
<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/ohw/physics-handout.pdf>

- 講義
 - 放射線とは何か?
 - エックス線とは何か? (定義、種類、性質)
 - 撮影機器について(エックス線の発生)
 - 撮影法について
 - 検出器(IP・フィルム)と現像・デジタルについて
 - 放射線防護について
- 実習
 - 検出器(IP・フィルム)の扱い方について
 - 撮影補助・模型実習
 - 線量測定

2024年7月8日

担当日数が限られているため、教科書の全てを網羅することは不可能なので、各自、不足する部分は自習するようにしましょう。

1



2

原子での電子の位置エネルギー

電氣的にプラスとマイナスで引き合っている。
 原子核のプラスの数(陽子数=原子番号)が大きいと、強く引っ張られている。
 ただし、電子の軌道の位置(安定した準位)が決まっているので、引っ張られて原子核に落ち込むことはない。

3

原子での電子の位置エネルギー

引き離す(励起・電離)には、引っ張られている以上の力・エネルギーが必要。

4

原子での電子の位置エネルギー

引き離す(励起・電離)には、引っ張られている以上の力・エネルギーが必要。

電子を放出する(ないし弾き飛ばす)だけのエネルギーをもった電磁波・粒子線 = **電離放射線**

イオンやフリーラジカルになり、化学反応しやすい物質になる

5

原子での電子の位置エネルギー

引き離し(励起)後、元の位置に戻るとき、引っ張っただけのエネルギーを出す

6

原子での電子の位置エネルギー

引き離し(励起)後、元の位置に戻るとき、引っ張っただけのエネルギー(電磁波)を出す

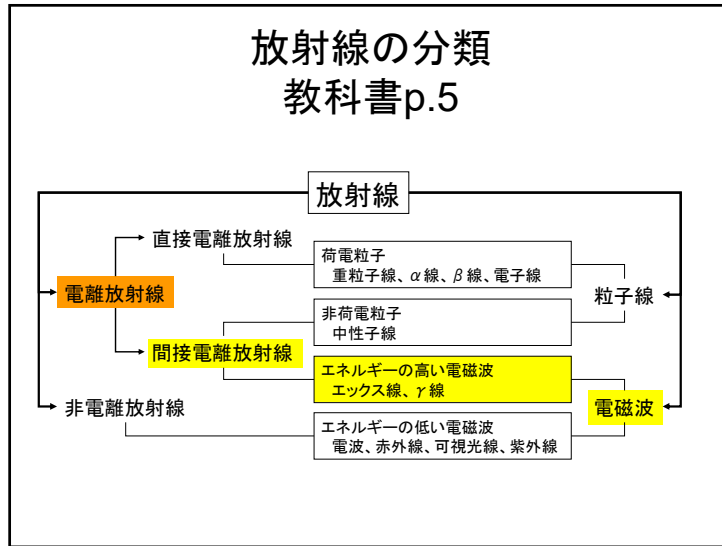
7

放射線とは(広義)

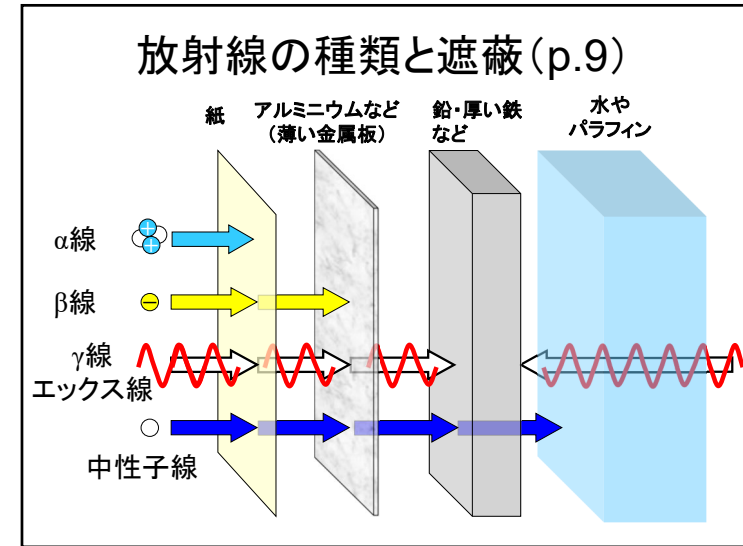
教科書p.4-5

- 伝播する電磁波、あるいは飛翔する粒子線
 - 電磁波 (electromagnetic wave) (=電磁放射線、electromagnetic radiation)
 - 電波、赤外線、可視光線、紫外線、エックス線、γ線
 - 粒子線 (particles) (=粒子放射線、corpuscular radiation)
 - 荷電粒子線
 - 電子線、α線、β線
 - 非荷電粒子線
 - 中性子線、ニュートリノ

8



9



10

電磁波とは? 教科書p.5

電場

磁場

- 電磁波は横波 (音波は主として縦波; 粗密波)
- 電場と磁場が電磁誘導しあいながら伝播していく。
- 真空中を光速で伝播する。(c≒3.0×10⁸m/sec)
- λ: 波長と、ν: 周波数(Hz)は反比例(c=λ×ν)
- 量子力学的にはボーズ粒子(光子)

λ: 波長 λ=4万キロメートルのとき

30万km=c×1秒

c×1秒≒3.0×10⁸mなので、例えば
 λ=4.0×10⁷m(地球一周:4万キロメートル)のとき
 ν=(3.0×10⁸)÷(4.0×10⁷)=7.5Hz(7.5回/s)
 光は1秒間に地球を「7周半」する速度を有している。

11

可視光線も電波も電磁波(放射線)

アンテナの棒の長さや間隔は
波長と同じか1/2ないし1/4の長さを利用

地上デジタルテレビ
極超短波(UHF)
周波数: 470MHz~770MHz
波長: 39cm~64cm

地上アナログテレビ
超短波(VHF)
周波数: 30M~300M
波長: 1.4m~3.3m

BS,CS
周波数: 12GHz
波長: 2.5cm

携帯電話
周波数: 800MHz~2GHz
波長: 15cm~37cm

12

<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/ElectroMagneticRadiation.pdf>

名称	周波数	波長(真一値)		光子エネルギー(真一値)		生物での大きさ ないし周波数	自然界での現象、利用目的など
		Hz	距離(m)	eV	J		
電磁波	極長波(ELF)	1 ~ 30	300km ~ 170km	$10^2 \sim 10^3$	$\sim 10^{-18}$	磁場	シユーマン共振
	ELF	30 ~ 300	170km ~ 1000km	$10^3 \sim 10^6$	$10^{-18} \sim 10^{-14}$	1μV	50~60Hz: 商用周波数 100kHz以下: アンテナの大きさとはほぼ同じ(4倍以内) 標準電圧、外周水素透過(水中での減衰が少ない)
	ELF	300 ~ 3k	100km ~ 100m	$10^6 \sim 10^9$	$10^{-14} \sim 10^{-11}$		電波時計、時計・海上の無線探知機
	短長波(VLF)	3k ~ 30k	100km ~ 10km	$10^9 \sim 10^{12}$	$10^{-11} \sim 10^{-8}$		同波時計、海上の無線探知機
	長波(LF)	30k ~ 300k	10km ~ 1km	$10^{12} \sim 10^{15}$	$10^{-8} \sim 10^{-5}$	1mV	同波時計、海上の無線探知機
	中波(MF)	300k ~ 3M	1km ~ 100m	$10^{15} \sim 10^{18}$	$10^{-5} \sim 10^{-2}$		短波ラジオ、アマチュア無線(大きなアンテナ)、トランシーバー
	短波(HF)	3M ~ 30M	100m ~ 10m	$10^{18} \sim 10^{21}$	$10^{-2} \sim 10^1$		
	超短波(VHF)	30M ~ 300M	10m ~ 1m	$10^{21} \sim 10^{24}$	$10^1 \sim 10^4$	1μeV(1~2m)	FMラジオ、地上アナログテレビ、MPEG2/BS(衛星)
	超短波(UHF)	300M ~ 3G	1m ~ 10cm	$10^{24} \sim 10^{27}$	$10^4 \sim 10^7$		携帯電話、PHS、UHFテレビ、地上デジタルテレビ放送、電子レンジ、無線LAN
	超短波(SHF)	3G ~ 30G	10cm ~ 1cm	$10^{27} \sim 10^{30}$	$10^7 \sim 10^{10}$		無線LAN、衛星通信
可視光線	近赤外線	300G ~ 3T	1mm ~ 100μm	$10^{30} \sim 10^{33}$	$10^{10} \sim 10^{12}$		電波天文台 光と電波の中間領域、日本の電波法では3THz以下が電波
	可視光線	3T ~ 3000T	100μm ~ 1μm	$10^{33} \sim 10^{35}$	$10^{12} \sim 10^{19}$		分子の回転、振動のエネルギー一般程度
	近紫外線	$3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$	$2.5 \mu\text{m} \sim 0.77 \mu\text{m}$	$10^{19} \sim 10^{21}$	$10^2 \sim 10^4$ eV		
可視光線	赤		0.77μm ~ 0.64μm				分子の化学結合のエネルギー程度。 シチリンを食むとシチリン等の量の吸収スペクトル 蛋白質の合成は、赤外線(赤外線)ほど小さい。 エネルギーとしては、赤外線(赤外線)より3V程度で 電子1個に運動エネルギーを与えることができる。
	黄		0.59μm ~ 0.59μm				
	青		0.49μm ~ 0.49μm				
紫外線	近紫外線		0.49μm ~ 0.38μm				DNAの吸収スペクトル(250nm付近)
	遠紫外線		0.38μm ~ 0.1μm				
	極遠紫外線		0.1μm ~ 10nm				
X線	軟X線		10nm ~ 10nm				連続X線と特徴X線とは移行して、厳密には区別困難。
	硬X線		10nm ~ 10nm				
	超硬X線		10nm ~ 10nm				
ガンマ線	低エネルギー		10nm ~ 10nm				放射線のエネルギー
	中エネルギー		10nm ~ 10nm				
	高エネルギー		10nm ~ 10nm				

13

電磁波の量子(光子)としての エネルギーと周波数・波長との関係

- 波長が長い → 周波数が小さい
→ エネルギーが小さい
- $E = h\nu = h \cdot c / \lambda$
 $= 1.99 \times 10^{-25} [\text{J} \cdot \text{m}] / \lambda$
 $= 1.24 [\text{eV} \cdot \mu\text{m}] / \lambda$
- プランク定数: h ($6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{sec}$)
- eV: エレクトロンボルト(電子ボルト)
 - 電子1個を1Vで加速したときに得られる運動エネルギー
 - $1[\text{eV}] = 1.602 \times 10^{-19} [\text{C}] \times 1 [\text{V}]$
 $= 1.602 \times 10^{-19} [\text{J}]$

※乾電池1本で電子1個を加速したときの運動エネルギーが、1μmの電磁波(赤い色程度)と同じぐらいのエネルギー

14

エネルギーの単位としての「eV」について

電荷量(クーロン) × 電位差・電圧(ボルト)
「質量 × 高さ」に相当

電位差
100V

50V

電子1個あたり、「1e(クーロン)の電荷をもっている。
1eクーロン = 1.602×10^{-19} クーロン
+の電極に引っ張られると、エネルギーが増える。

15

エネルギーの単位としての「eV」について

電荷量(クーロン) × 電位差・電圧(ボルト)
「質量 × 高さ」に相当

電位差
100V

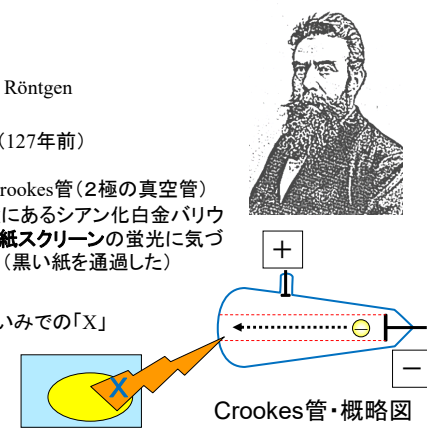
50V

増えたエネルギーは、電荷量(クーロン) × 電位差(ボルト)となる。
これは、「質量 × 高さ」といった位置エネルギーに似る。

16

エックス線(歴史的にはX線)

- 歴史**
 - 発見者
Wilhelm Conrad Röntgen
 - 発見日
1895年11月8日(127年前)
 - 発見した状態
陰極線研究中Crookes管(2極の真空管)から離れた位置にあるシアン化白金バリウム結晶を塗った紙スクリーンの蛍光に気づいたことによる。(黒い紙を通過した)
 - 命名理由
「未知の」というみでの「X」



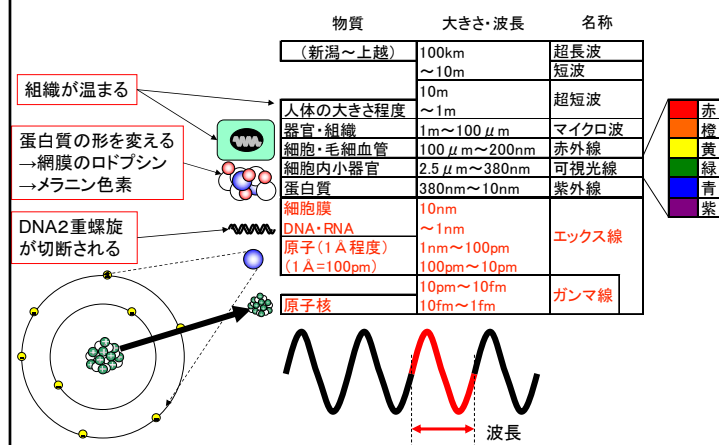
Crookes管・概略図

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)

17

物質の大きさと電磁波の波長(部分)

物質	大きさ・波長	名称
(新潟～上越)	100km	超長波
	～10m	短波
	10m	超短波
人体の大きさ程度	～1m	
器官・組織	1m～100μm	マイクロ波
細胞・毛細血管	100μm～200nm	赤外線
細胞内小器官	2.5μm～380nm	可視光線
蛋白質	380nm～10nm	紫外線
細胞膜	10nm	
DNA・RNA	～1nm	エックス線
原子(1Å程度)	1nm～100pm	
(1Å=100pm)	100pm～10pm	
原子核	10pm～10fm	ガンマ線
	10fm～1fm	



波長

18

エックス線の定義および性質

教科書p.8

- 電磁波の一種で電離作用を有する。
- 波長:λは紫外線よりも短い(約10nm以下)
 - 波長が短いので高いエネルギーを持つ。
 - 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。(3.0×10⁸m/sec)

19

エックス線の性質および作用(p.8)

(試験問題必須)

基本的性質

- 電離・励起する。
- 直進性について電場・磁場の影響を受けない。
- 真空中を光速で進む。

基本的性質(特に「電離」)から説明可能

- 化学作用、写真作用(フィルムの感光作用)がある。
- 蛍光作用がある
- 生物学的作用がある。
- 熱作用がある。
- 着色作用がある。

物質との相互作用

- 物質を透過する。
- 物質と相互作用し吸収・散乱が生じる。

20

物質との相互作用 (p.18)

重要

エックス線

透過

吸収

散乱

吸収および散乱にて「減弱」する

21

口内法エックス線撮影装置

教科書p.30-31

アーム

ヘッド

コーン

コリメータとフィルタ

22

エックス線の発生

教科書p.12, p.30-35

交流 100V

油(冷却・絶縁)

60-70kV

陽極(+)

6-7万ボルト

交流

エックス線管(ガラス容器)

照射筒(コーン)

濾過板(フィルタ)

ターゲット

真空

熱電子

フィラメント

陰極(-)

変圧器(トランス)

脈流

全波整流

絞リ(コリメータ)

円形

矩形

23

エックス線の発生

直流電源相当 60-70kV 6-7万ボルト

陽極(+)

ターゲット

真空

集束電極

エックス線管(ガラス容器)

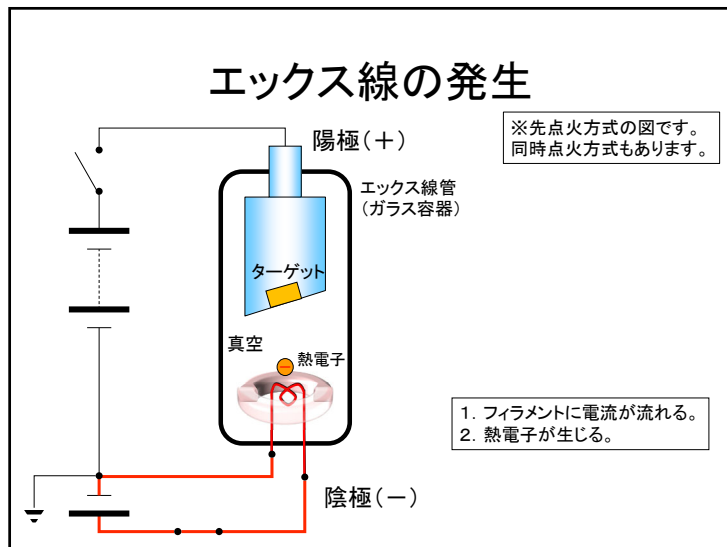
陰極(-)

濾過板

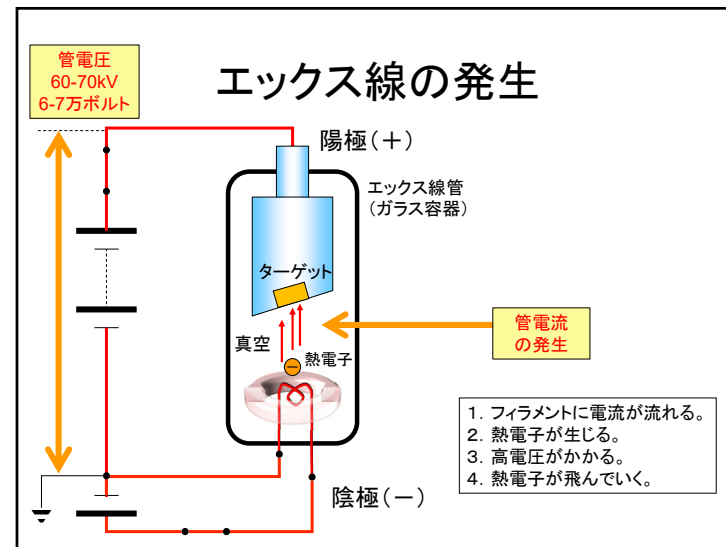
絞リ

写真: 明海大学所蔵のエックス線管

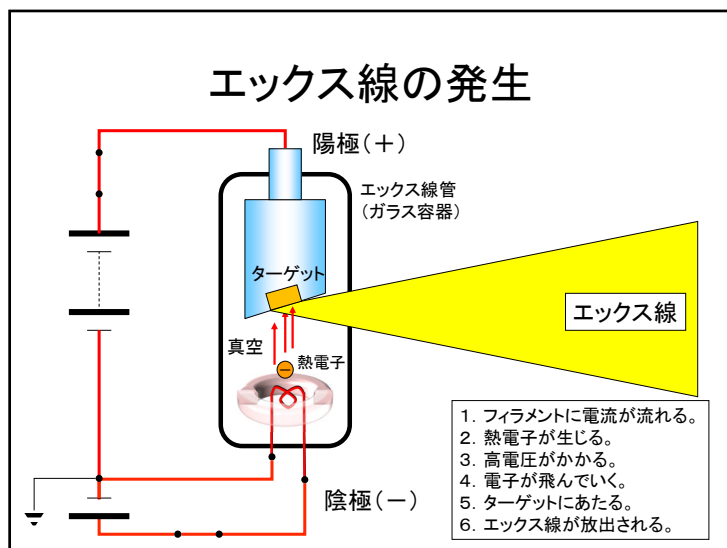
24



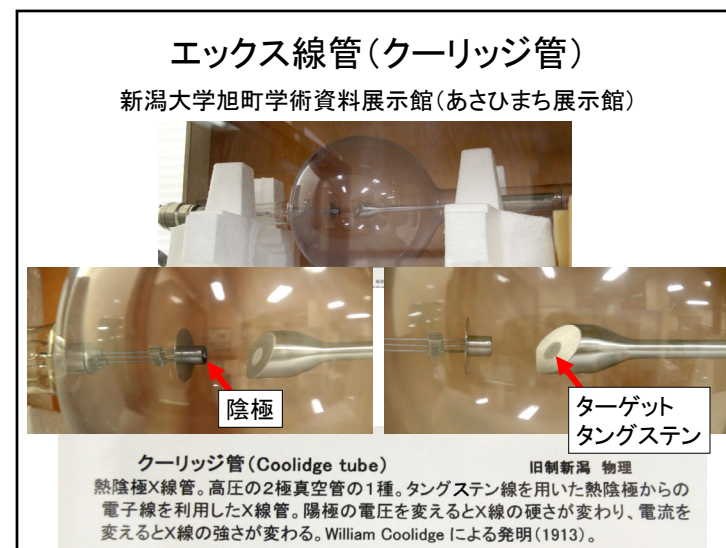
25



26



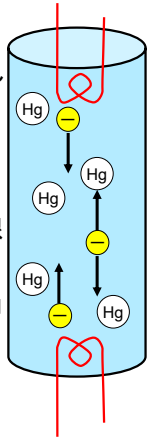
27



28

参考・蛍光灯 (p.17)

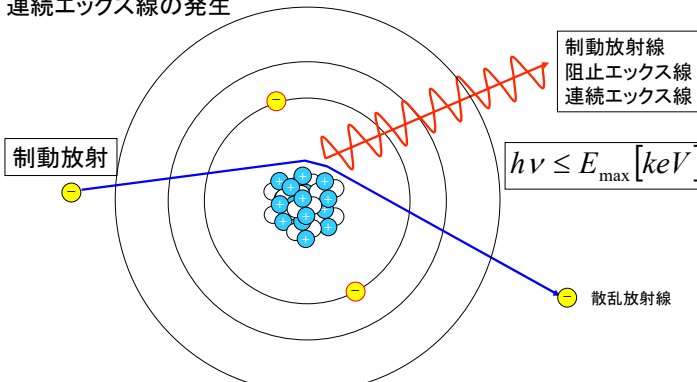
- 内部は真空に近く、ガス状態の水銀が含まれている。
- 両端にあるフィラメントに電流が流れる。
- 両端のフィラメント間に高電圧がかけられる。
- 電子が飛び、水銀原子にぶつかって、紫外線が発生する。
- 紫外線が、ガラス管に塗られた蛍光物質に当たって、発光する。



29

教科書 p.14-15

電子と原子の相互作用 連続エクソ線の発生



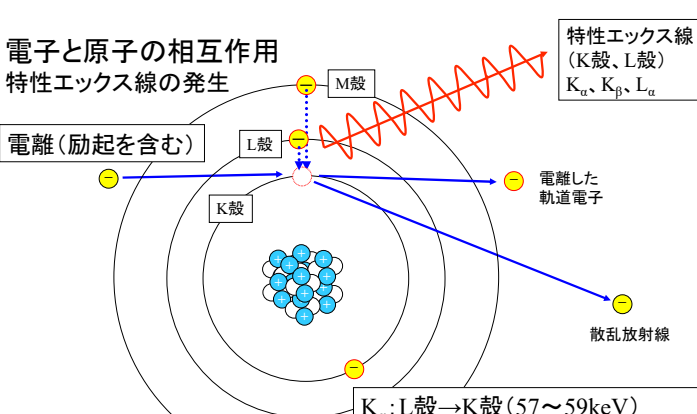
$h\nu \leq E_{\max} [keV]$

※タングステン($_{74}W$)など

電子の運動エネルギーが全て電磁波になったときが最大

30

電子と原子の相互作用 特性エクソ線の発生



電離(励起を含む)

電離した軌道電子

散乱放射線

特性エクソ線 (K殻, L殻)
 K_{α} , K_{β} , L_{α}

K_{α} : L殻 \rightarrow K殻 (57~59keV)
 K_{β} : M殻 \rightarrow K殻 (67~69.5keV)
 L_{α} : M殻 \rightarrow L殻 (8~10keV)
※ L_{α} はターゲットの自己吸収や固有濾過等で吸収される

※タングステン($_{74}W$)など

31

エクソ線の減弱

- 逆自乗の法則による減弱
 - 教科書p.20
 - 倍離れると、単位面積あたりのエクソ線の量は $1/4 (=2^2の1)$ になる。
 - 3倍離れると、 $1/9 (=3^2の1)$ になる。
- 物質との相互作用による減弱
 - 教科書p.20-21
 - 原子番号、物質の密度、物質の厚さが大きいほど減弱する。

32

逆自乗の法則(教科書 p.20)

最初のX線強度: I_0

焦点から放出されるX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

$I_0 \Rightarrow S_1$ 全体を照らす
 単位面積当たりの強度: $I_1 = I_0/S_1$

$I_0 \Rightarrow S_2$ 全体を照らす
 単位面積当たりの強度: $I_2 = I_0/S_2$
 $= I_0/(2^2 \times S_1) = I_1/4$

33

物質との相互作用による減弱

- 管電圧(光子エネルギー、波長)
- 実効原子番号(電子密度)
- 物質の密度
- 物質の厚さ

$$I = I_0 \exp(-\mu d)$$

$$\mu \propto Z^n \lambda^n \rho$$

$$n \approx 3$$

光電効果が主体の式

34

35

物質との相互作用によるX線の減弱(教科書 p.20-21)

- $I = I_0 e^{-\mu d}$, $\mu = kZ^3 \lambda^3 \rho$ (光電効果主体の場合の式)
 - I_0 : 入射X線強度, I : 透過X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が高いのは？
 - ゴールまでの距離が短い(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)

36

撮影用器材(撮影装置以外)

教科書p.36-45

- フィルム
 - 口内法用(ノン・スクリーン・タイプ)
 - 標準サイズ、小児サイズ、咬合サイズなど
 - 口外法用(スクリーン・タイプ)
 - 六つ切、四つ切、大角、半切など
- 口外法用
 - カセット(p.42)
 - 増感紙(p.42-43)
 - フィルムマーカ―(p.45)
 - グリッド(p.44)

37

フィルム感度について(p.38)

スピード	フィルム感度	撮影時間	被曝量	粒状性
C	低い	1	高い	細かい
D	↑↓	1/2	↑↓	↑↓
E	↑↓	1/4	↑↓	↑↓
F	高い	1/8	低い	荒い

38

口内法フィルムの構造について

p.36-39

※フィルム外装での表裏の判別方法
 エックス線を受ける側には附属物がほとんどない。あったとしても、フィルムマーク(口内法フィルム)ないしフィルムマーカ―(鉛で作られた文字・記号のシール等)がある程度。
 裏面には「Opposite side toward film」ないし「Pb」といった表記、フィルム/パケットの折り返し、カセットの付属物等がある。
なおデジタル化後、口内法では通常フィルムマークが無いため、画像のみからは表裏の判定はできないので注意すること。

39

フィルムの現像(教科書 p37、p.128)

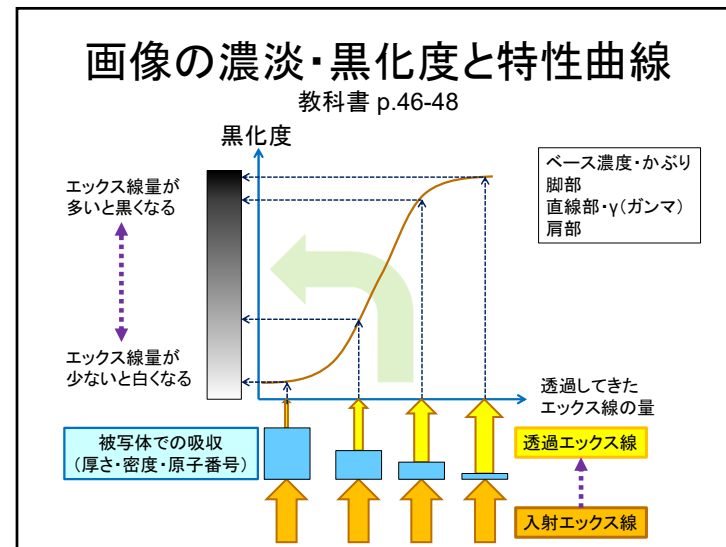
※ハロゲン化銀として臭化銀(AgBr)の場合の反応式。その他、塩化銀(AgCl)等がある。

40

現像と失敗の原因 p.128-137

処理	内容	タンク現像	自動現像機	インスタント現像	
				二浴法 (New ID処理)	一浴法 (QDE処理)
現像	成分				
	アルカリ性の液で、エックス線が当たった(感化した)露のハロゲン化銀を還元し、銀粒子を析出させる。 外一ル、ハイロキソル	時間 4分 温度 20℃	2分 24℃	1分以上 20℃	30秒以上 25℃
中間水洗	現像のアルカリで、定着の酸が中和されるのを防ぐ。	時間 数秒	約2分	第1液 QDE液	
定着	酸性の液で、未還元のエックス線化銀を溶かす。 チオ硫酸ナトリウム	時間 5分~10分 温度 20~30℃	約2分	第2液 45秒以上	
水洗	溶けたハロゲン化銀を洗い流す。	時間 30~30分 温度	約2分	後処理 水洗	
乾燥	ゼラチン膜の水分を蒸発させ、傷が付きにくくする。	自然乾燥、乾燥機	機械内の温風	乾燥 風通しのよい日陰で	

41

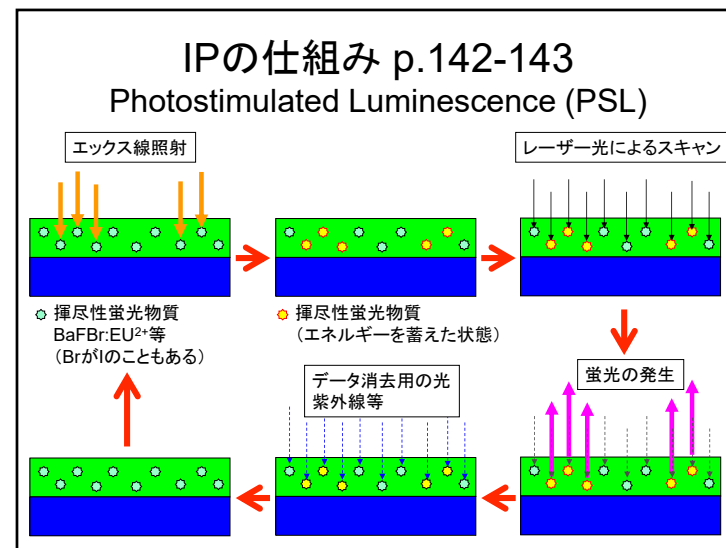


42

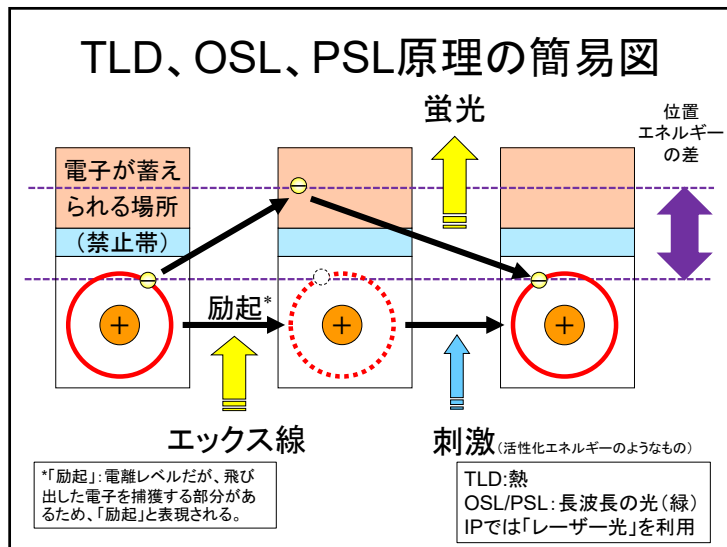
デジタル系 (p.138-143) (フィルムレス、現像不要)

- DR (digital radiography)
 - IP (Imaging plate)を用いるもの
 - フィルムとほぼ同じ大きさ、厚さ。
 - フィルムと比べて硬い。
 - 破損すると、毒物がでてる。
 - CCD (charged coupling device)を用いるもの
 - デジタルカメラやデジタルビデオでも使われている。
 - ケーブルがついている。
 - フィルムよりも厚い。
- デジタルなので、画像の保管・管理には注意が必要
 - ネットワーク接続されていると情報漏洩、データ破壊の危険性がある。

43



44



45

デジタル特有の画質の劣化がある

- ピクセルサイズ (画素数) によるもの
- ビット数 (階調) によるもの, p.143
- 画像処理によるもの
 - エッジ強調 (輪郭強調) 処理など, p.140
 - 非可逆圧縮 (jpeg画像変換など), p.139
- その他 (情報量の欠落)
 - 動画の場合の例: 1セグ画像はフルセグ画像に比べて画質が劣る。

46