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

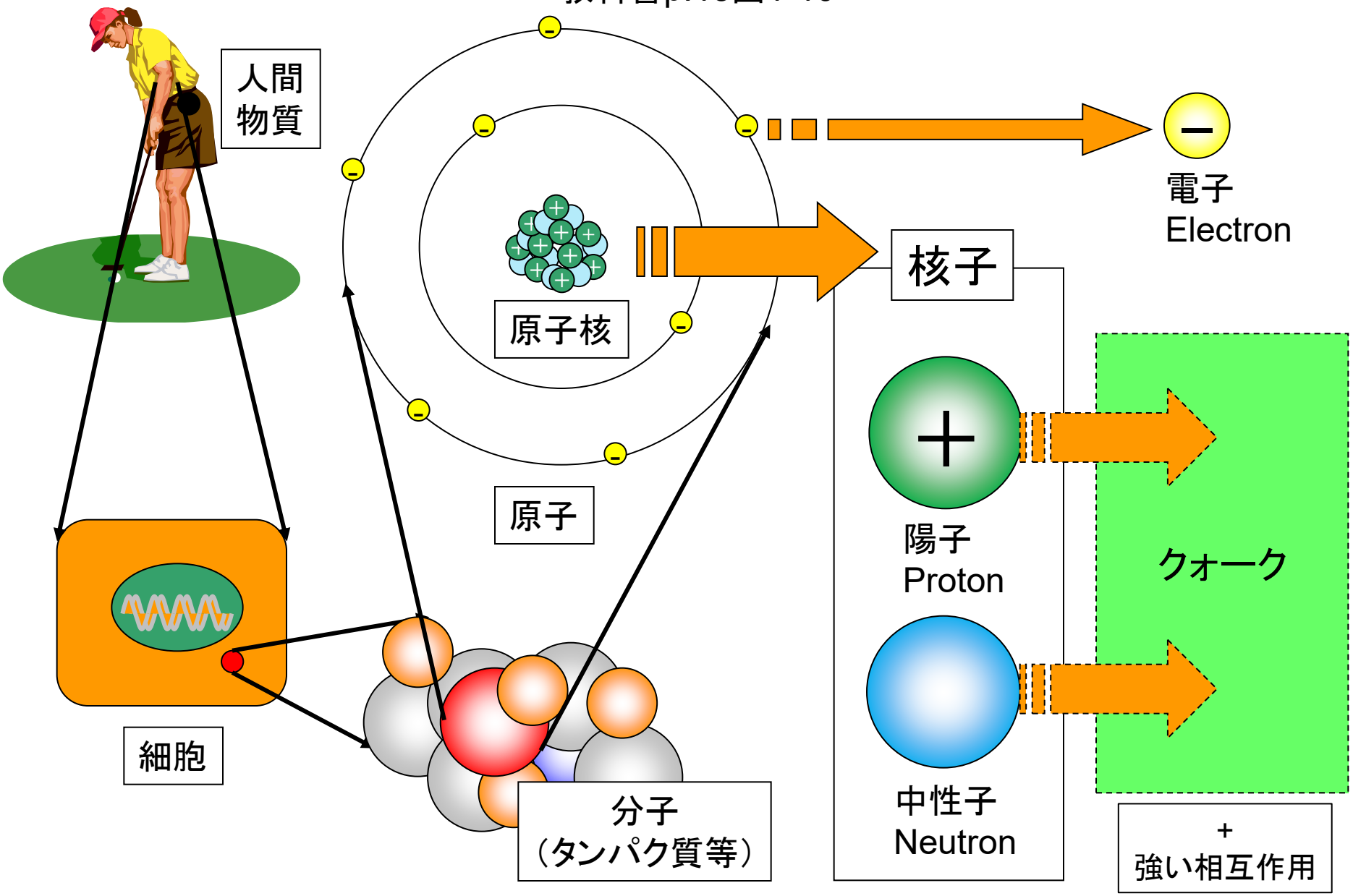
- 講義
  - 放射線とは何か？
  - エックス線とは何か？（定義、種類、性質）
  - 撮影機器について（エックス線の発生）
  - 撮影法について
  - 検出器（IP・フィルム）と現像・デジタルについて
  - 放射線防護について
- 実習
  - 検出器（IP・フィルム）の扱い方について
  - 撮影補助・模型実習
  - 線量測定

2025年6月23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。

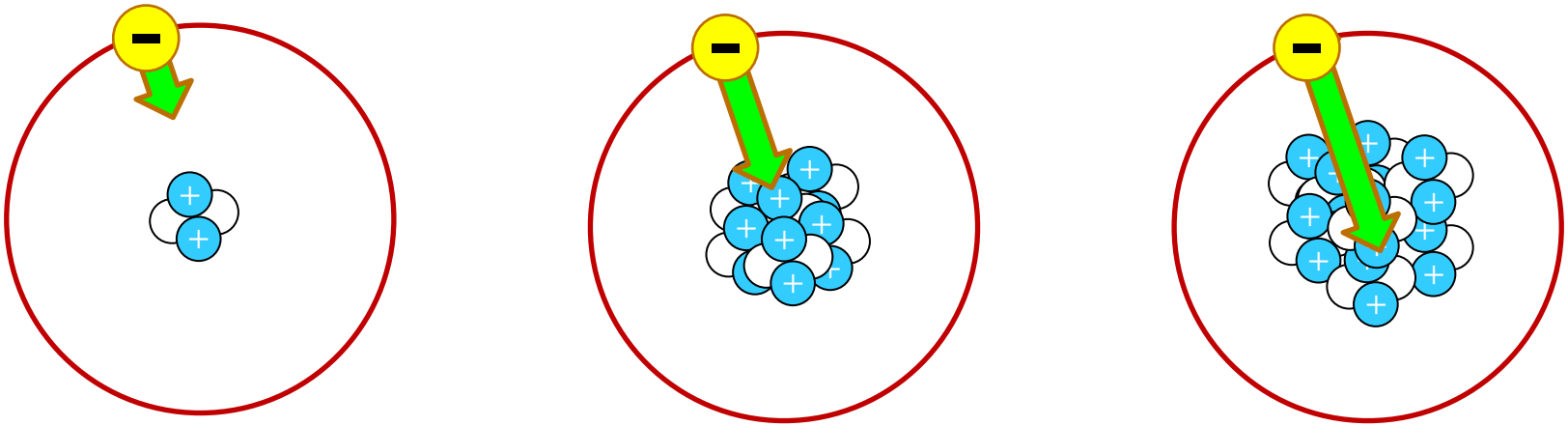
物質の構成

教科書p.13図1-10



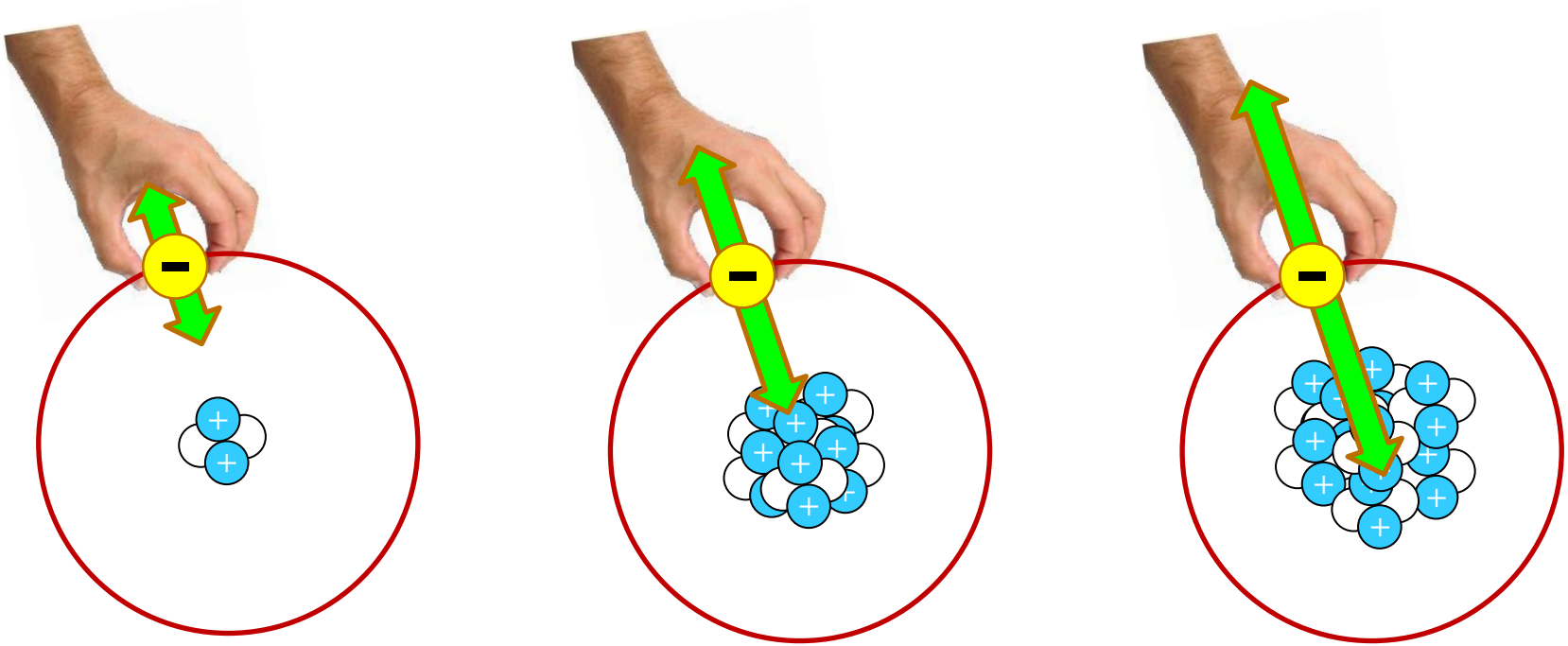
原子での電子の位置エネルギー

電気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。



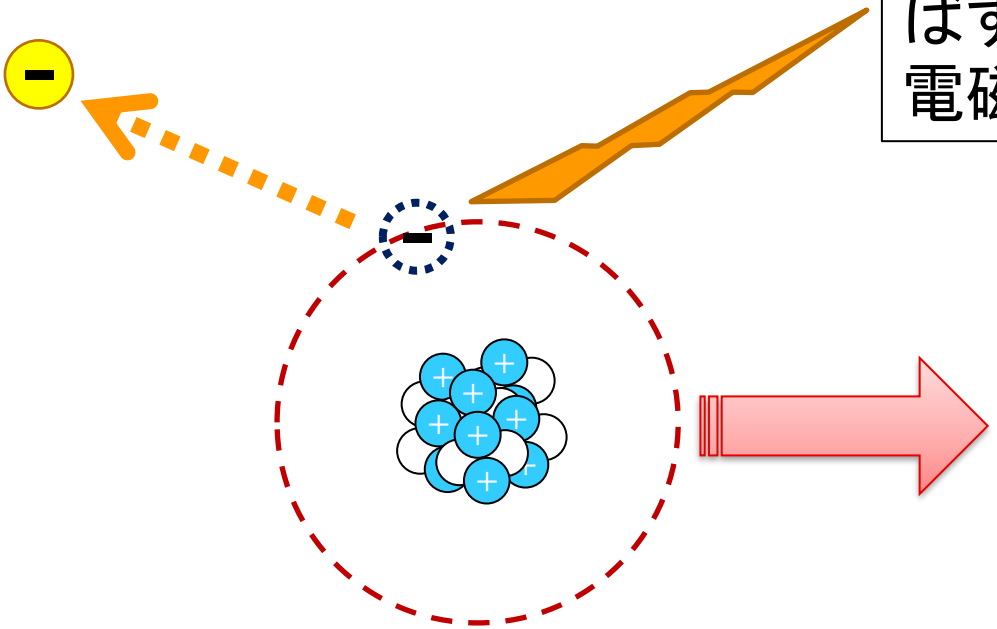
原子での電子の位置エネルギー

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。



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。

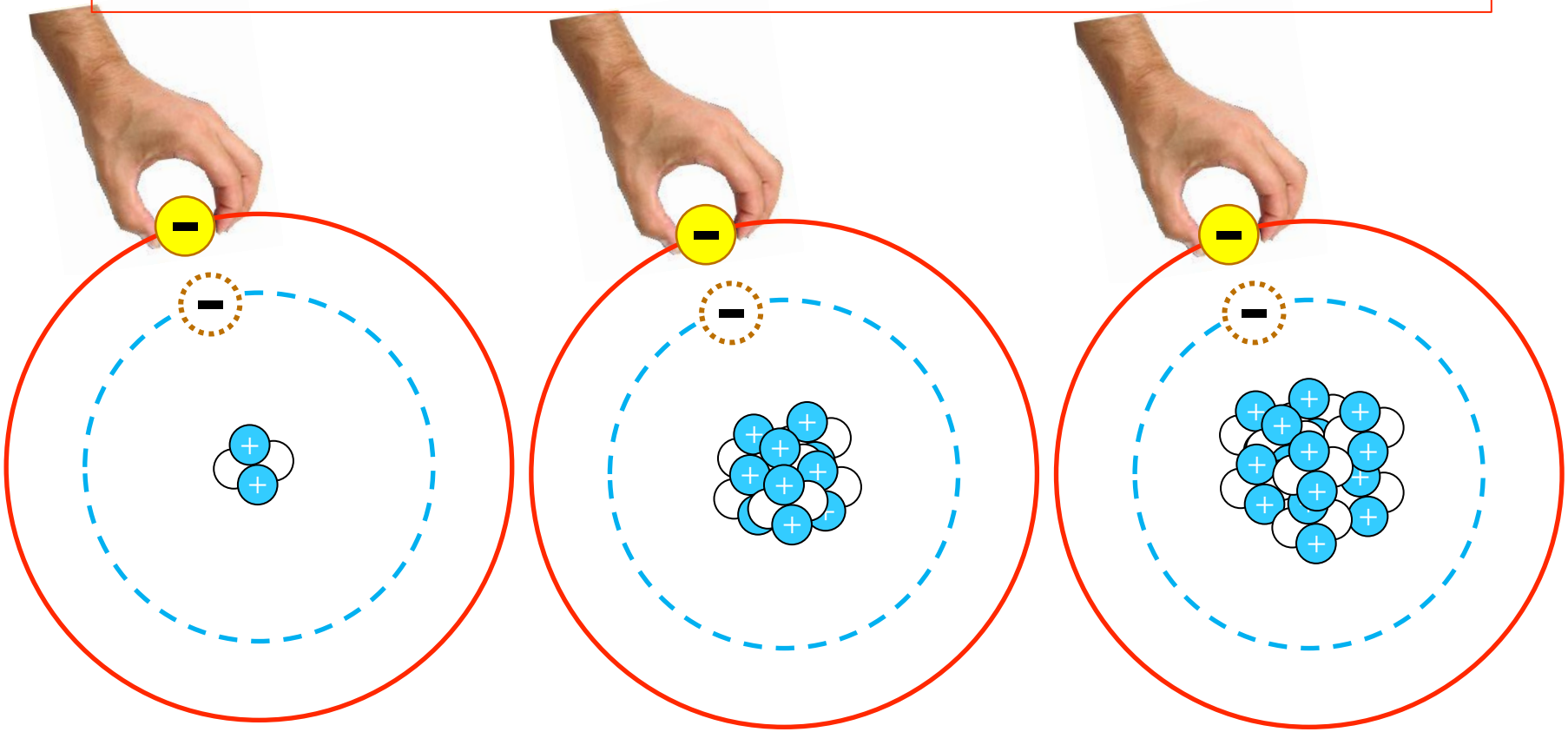


電子を放出する（ないし弾き飛ばす）だけのエネルギーをもった電磁波・粒子線＝**電離放射線**

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

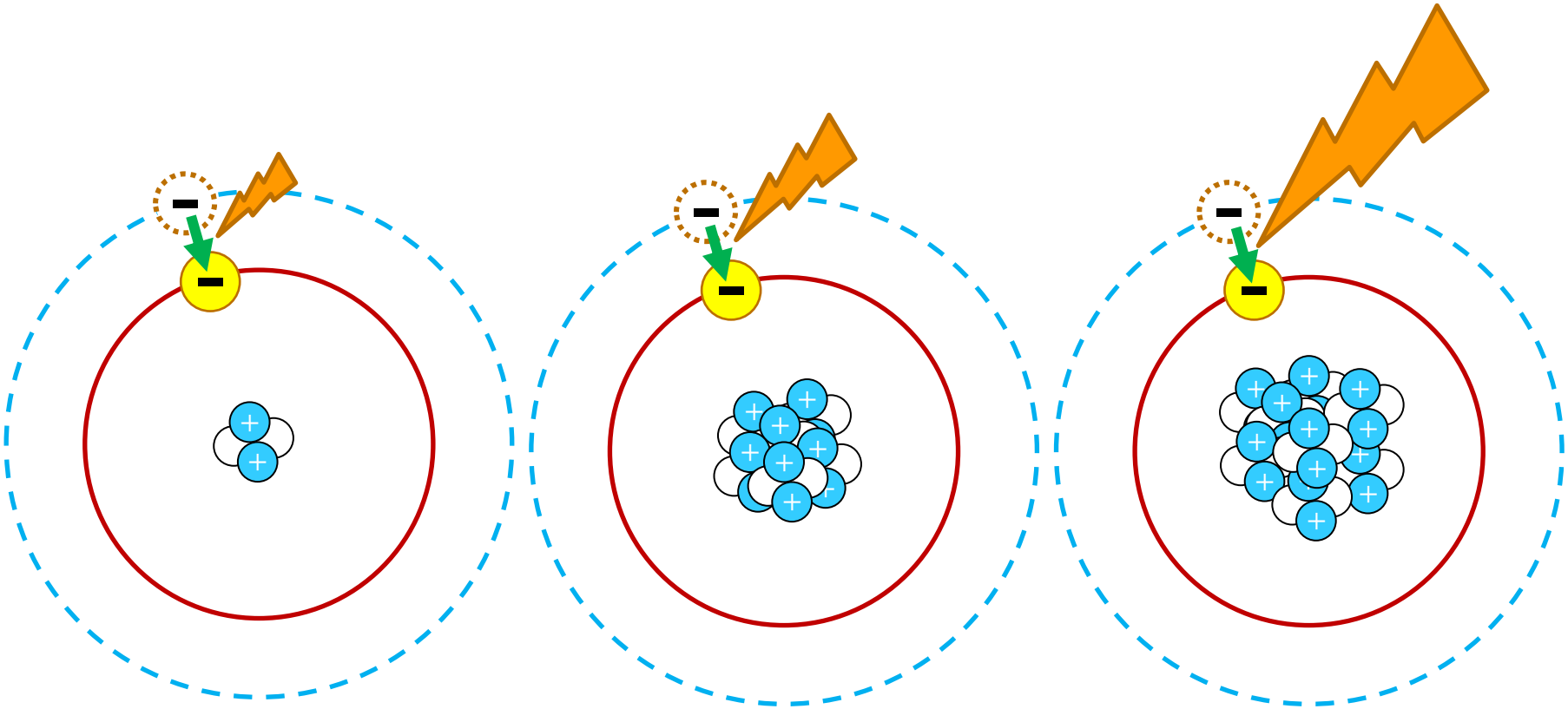
原子での電子の位置エネルギー

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



原子での電子の位置エネルギー

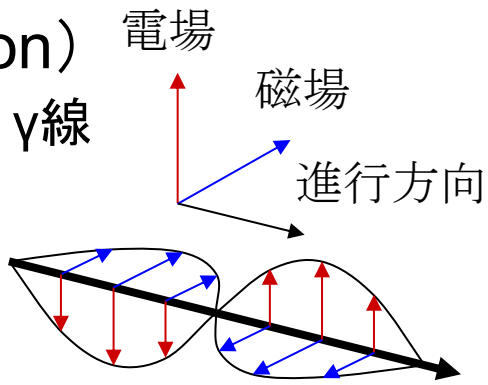
引き離し（励起）後、元の位置に戻るとき、引っ張っただけのエネルギー（電磁波）を出す



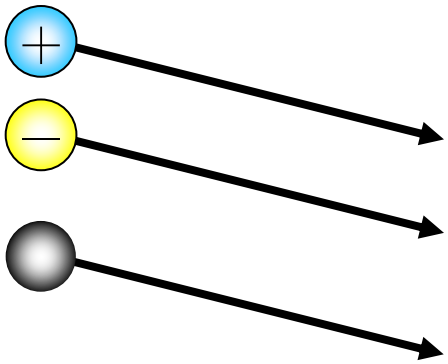
放射線とは（広義）

教科書p.4-5

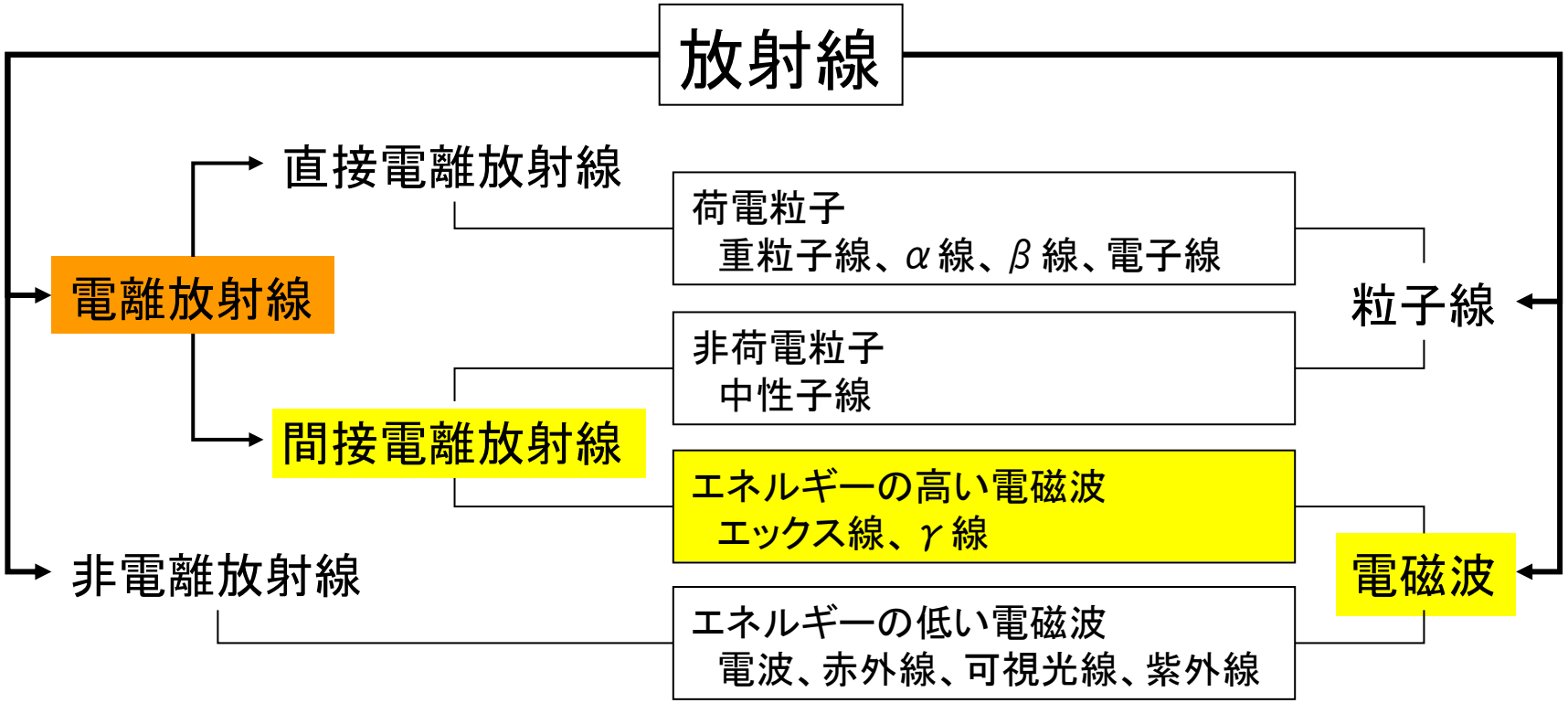
- **伝播する電磁波、あるいは飛翔する粒子線**
  - **電磁波** (electromagnetic wave)
    （＝電磁放射線、electromagnetic radiation）
    - 電波、赤外線、可視光線、紫外線、エックス線、γ線



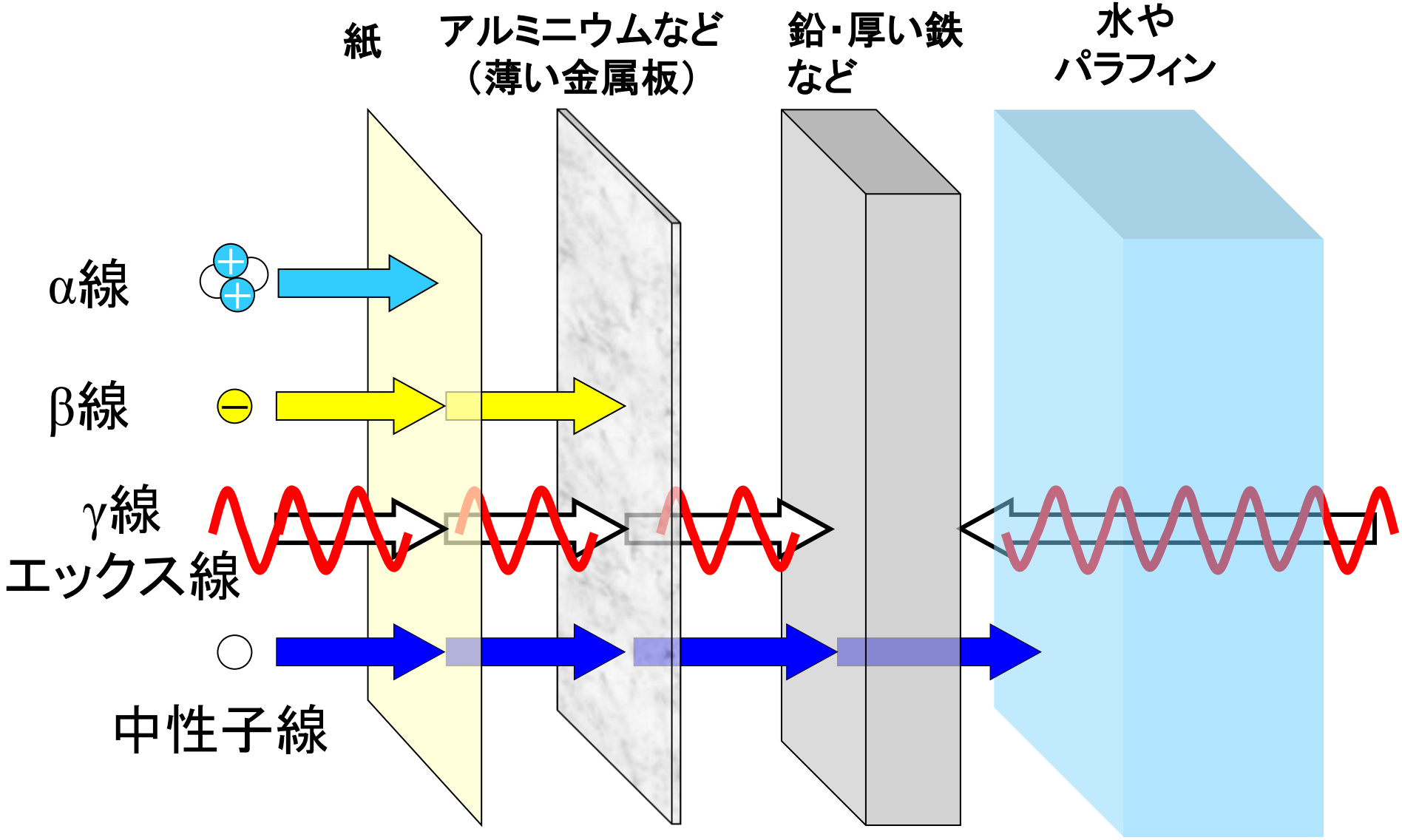
  - **粒子線**(particles)
    （＝粒子放射線、corpuscular radiation）
    - 荷電粒子線
      - 電子線、α線、β線
    - 非荷電粒子線
      - 中性子線、ニュートリノ



放射線の分類
教科書p.5

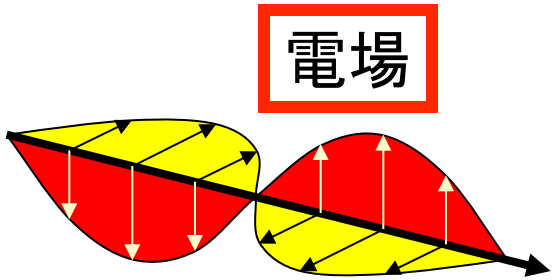


放射線の種類と遮蔽（p.9）

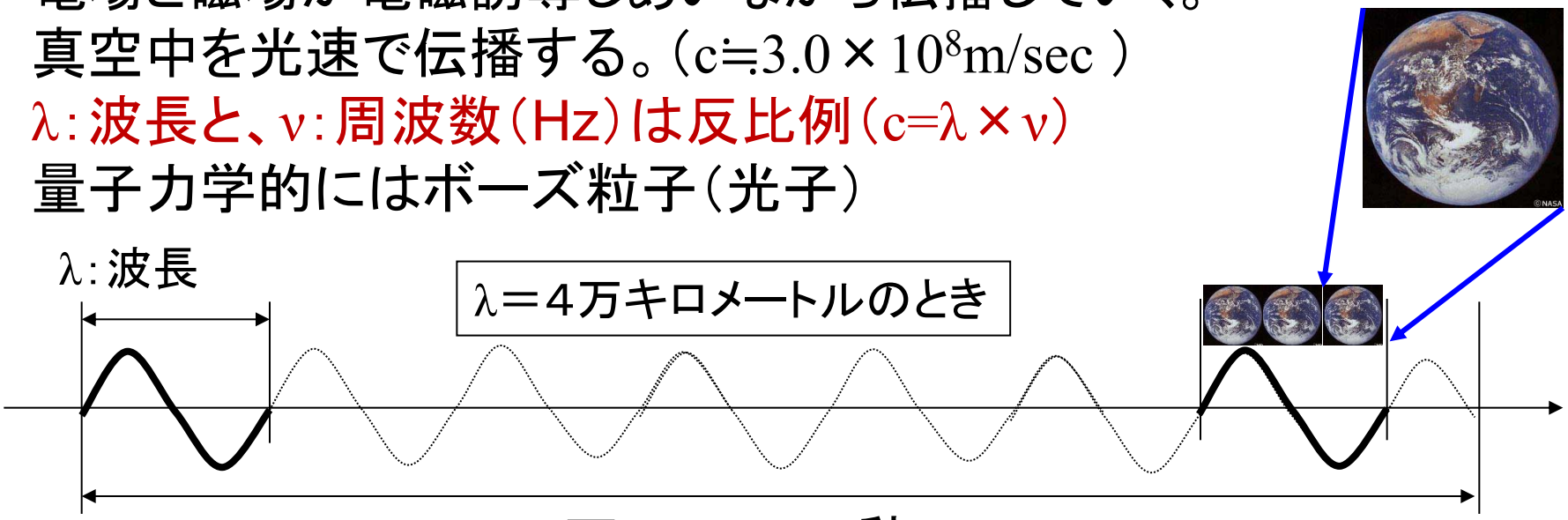


電磁波とは？

教科書p.5



- 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。（$c \fallingdotseq 3.0 \times 10^8$m/sec ）
- λ：波長と、ν：周波数（Hz）は反比例（$c=\lambda \times \nu$）
- 量子力学的にはボーズ粒子（光子）



30万km＝c×1秒

c×1秒≒3.0×10^8mなので、例えば

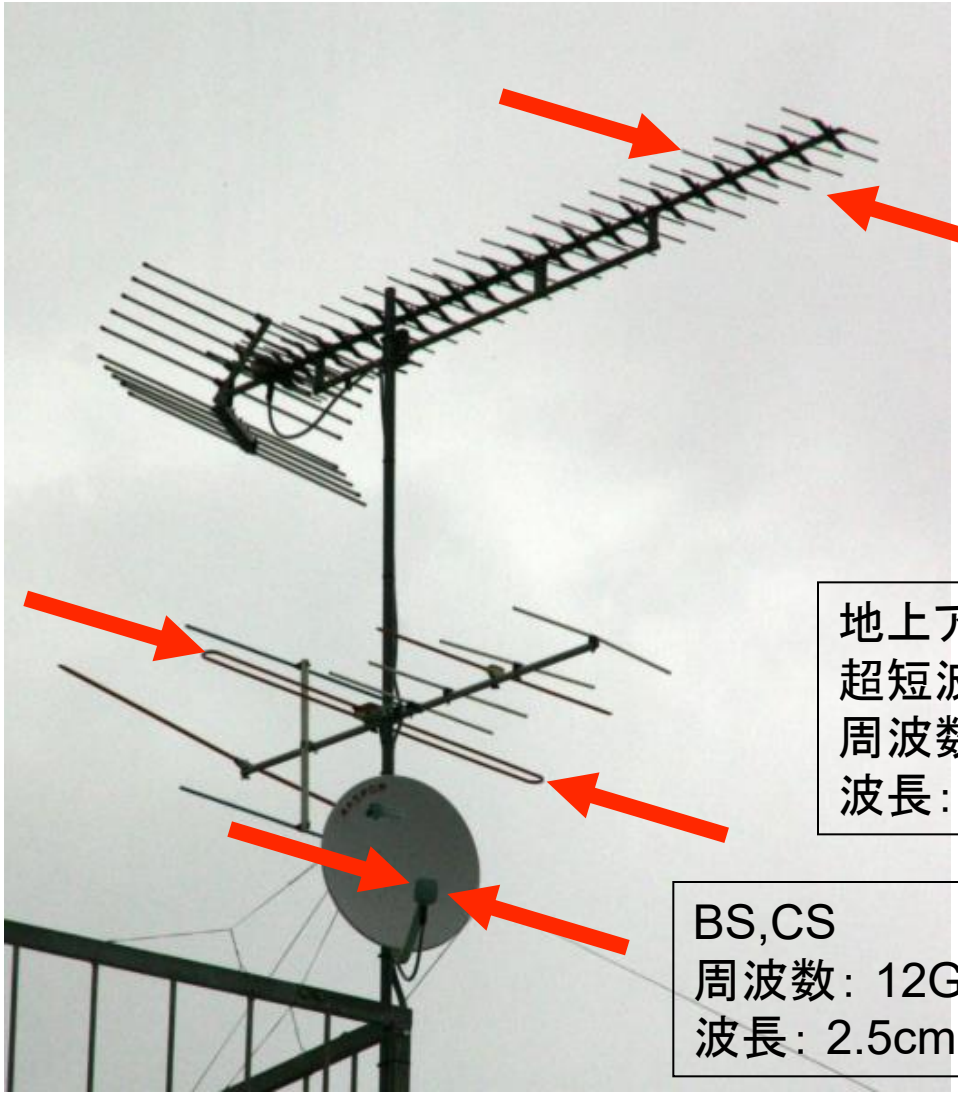
λ＝4.0×10^7m（地球一周：4万キロメートル）のとき

ν≒（3.0×10^8）／（4.0×10^7）＝7.5Hz（7.5回/s）

光は1秒間に地球を「7周り半」する速度を有している。

可視光線も電波も電磁波（放射線）

アンテナの棒の長さと間隔は
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

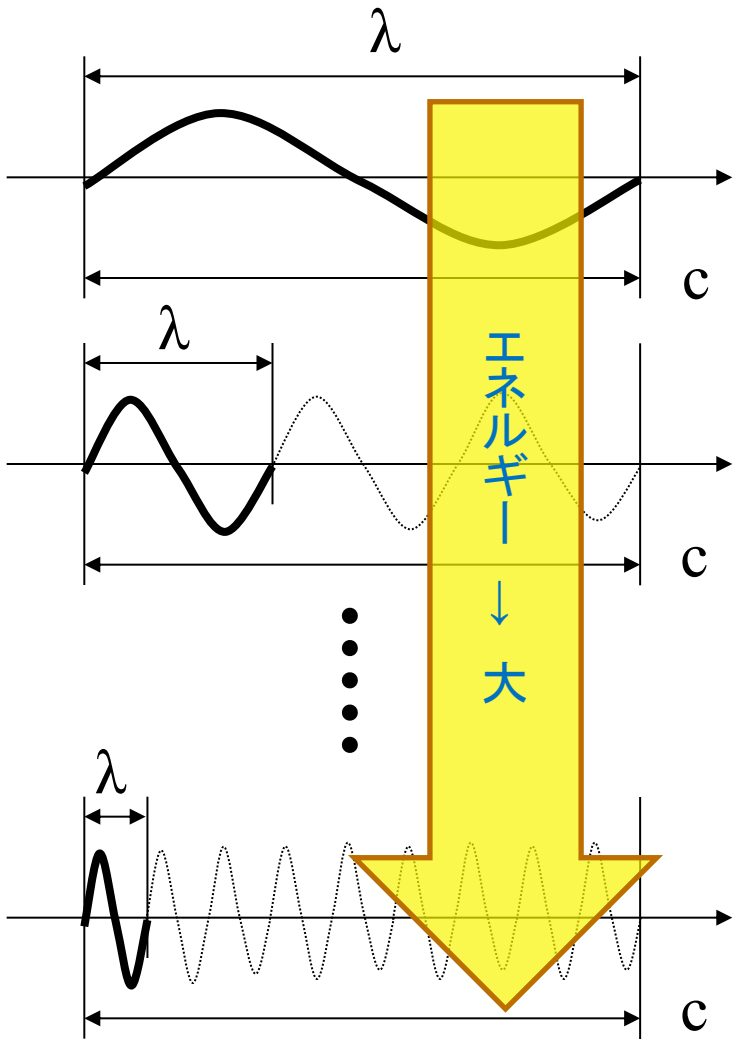
https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/ElectroMagneticRadiation.pdf

名称		周波数	波長（長～短）		光子エネルギー（弱～強）	生体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		指数表記（m）	eV		
電波	極超長波(ELF)	1 ～ 30	30万km ～ 1万km	10^{8} ～ 10^{7}	～ 10^{-13}	脳波	シューマン共振
電波	SLF	30 ～ 300	1万km ～ 1000km	10^{7} ～ 10^{6}	10^{-13} ～ 10^{-12} 1peV		50～60Hz：商用周波数
電波	ULF	300 ～ 3k	1000km ～ 100km	10^{6} ～ 10^{5}	10^{-12} ～ 10^{-11}		※以下の電波の波長はアンテナの大きさとほぼ同じ～4倍以内。
電波	超長波(VLF)	3k ～ 30k	100km ～ 10km	10^{5} ～ 10^{4}	10^{-11} ～ 10^{-10}		標準電波、対潜水艦通信（水中での減衰が少ない）
電波	長波(LF)	30k ～ 300k	10km ～ 1km	10^{4} ～ 10^{3}	10^{-10} ～ 10^{-9} 1neV		電波時計、航空・海上の無線標識局
電波	中波(MF)	300k ～ 3M	1km ～ 100m	10^{3} ～ 10^{2}	10^{-9} ～ 10^{-8}		中波ラジオ（アンテナはコイルを用いるので小さい）
電波	短波(HF)	3M ～ 30M	100m ～ 10m	10^{2} ～ 10	10^{-8} ～ 10^{-7}		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
電波	超短波(VHF)	30M ～ 300M	10m ～ 1m	10 ～ 1	10^{-7} ～ 10^{-6} 1μeV	体長（1～2m）	FMラジオ、地上アナログテレビ, MRIのRFパルス
電波 マイクロ波	極超短波(UHF)	300M ～ 3G	1m ～ 10cm	1 ～ 10^{-1}	10^{-6} ～ 10^{-5}	頭部、大きな臓器（数10cm）	携帯電話、PHS、UHFテレビ、地上デジタルテレビ GPS、電子レンジ、無線LAN
電波 マイクロ波	センチ波(SHF)	3G ～ 30G	10cm ～ 1cm	10^{-1} ～ 10^{-2}	10^{-5} ～ 10^{-4}	組織、小さな臓器	衛星テレビ（BS,CS）、無線LAN
電波 マイクロ波	ミリ波(EHF)	30G ～ 300G	1cm ～ 1mm	10^{-2} ～ 10^{-3}	10^{-4} ～ 10^{-3} 1meV	組織	レーダー、衛星通信
電波 マイクロ波	サブミリ波	300G ～ 3T	1mm ～ 100μm	10^{-3} ～ 10^{-4}	10^{-3} ～ 10^{-2}		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
赤外線	遠赤外線	3T～3000T 3×10^{12}～3×12^{15}	100μm ～ 15μm	10^{-4} ～ 10^{-5}	10^{-2}～1eV	細胞・毛細血管	分子の回転、振動のエネルギー差程度
赤外線	中赤外線		15μm ～ 2.5μm	10^{-5} ～ 10^{-6}		赤血球・細胞	
赤外線	近赤外線		2.5μm ～ 0.77μm	10^{-6} ～ 10^{-7}		細胞内小器官	
可視光線	赤	10^{15}程度	0.77μm ～ 0.64μm	10^{-7}m程度	1.6～3.2eV程度		分子の化学結合のエネルギー程度。 レチナールを含むロドプシン等の蛋白質の吸収スペクトル 蛋白質の大きさは一桁ほど小さい。 エネルギーとしては、乾電池1本から2本（1.5Vから3V）程度で 電子1個に運動エネルギーを与える程度に相当する。
可視光線	橙		0.64μm ～ 0.59μm				
可視光線	黄		0.59μm ～ 0.55μm				
可視光線	緑		0.55μm ～ 0.49μm				
可視光線	青		0.49μm ～ 0.43μm				
可視光線	紫		0.43μm ～ 0.38μm				
紫外線	近紫外線	10^{15}程度	380nm ～ 200nm	10^{-7}m程度	3.2～4.4eV程度		DNAの吸収スペクトル(250nm付近)
紫外線	遠紫外線 真空紫外線	3×10^{15} ～ 3×10^{16}	200nm ～ 10nm	10^{-7} ～ 10^{-8}	10 ～ 10^{2}	細胞膜,蛋白質	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。
エックス線	軟エックス線	3×10^{16} ～ 3×10^{17}	10nm ～ 1nm	10^{-8} ～ 10^{-9}	10^{2} ～ 10^{3} 1keV	DNA,RNA	
エックス線		3×10^{17} ～ 3×10^{18}	1nm ～ 1Å	10^{-9} ～ 10^{-10}	10^{3} ～ 10^{4}	原子	
エックス線		3×10^{18} ～ 3×10^{19}	1Å ～ 0.1Å	10^{-10} ～ 10^{-11}	10^{4} ～ 10^{5}		診断用のエックス線
エックス線 ガンマ線	0.1～0.01Å以下	3×10^{19} ～ 3×10^{20}	0.1Å ～ 1pm	10^{-11} ～ 10^{-12}	10^{5} ～ 10^{6} 1MeV		電子対生成（>1.022MeV）、光核反応
エックス線 ガンマ線		3×10^{20} ～ 3×10^{21}	1pm ～ 100fm	10^{-12} ～ 10^{-13}	10^{6} ～ 10^{7}		光核反応（速中性子）
エックス線 ガンマ線		3×10^{21} ～ 3×10^{22}	100fm ～ 10fm	10^{-13} ～ 10^{-14}	10^{7} ～ 10^{8}		光核反応（中間子発生）
エックス線 ガンマ線		3×10^{22} ～ 3×10^{23}	10fm ～ 1fm	10^{-14} ～ 10^{-15}	10^{8} ～ 10^{9} 1GeV	原子核	

k：キロ、10^{3}
M：メガ、10^{6}
G：ギガ、10^{9}
T：テラ、10^{12}
P：ペタ、10^{15}
E：エクサ、10^{18}
μ：マイクロ、10^{-6}
n：ナノ、10^{-9}
1Å=0.1nm=100pm
p：ピコ、10^{-12}
f：フェムト、10^{-15}
1eV=1.602×10^{-19}[J]
h=6.626×10^{-34}[J・s]
c=299792458[m/s]
Å：オングストローム、10^{-10}m

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

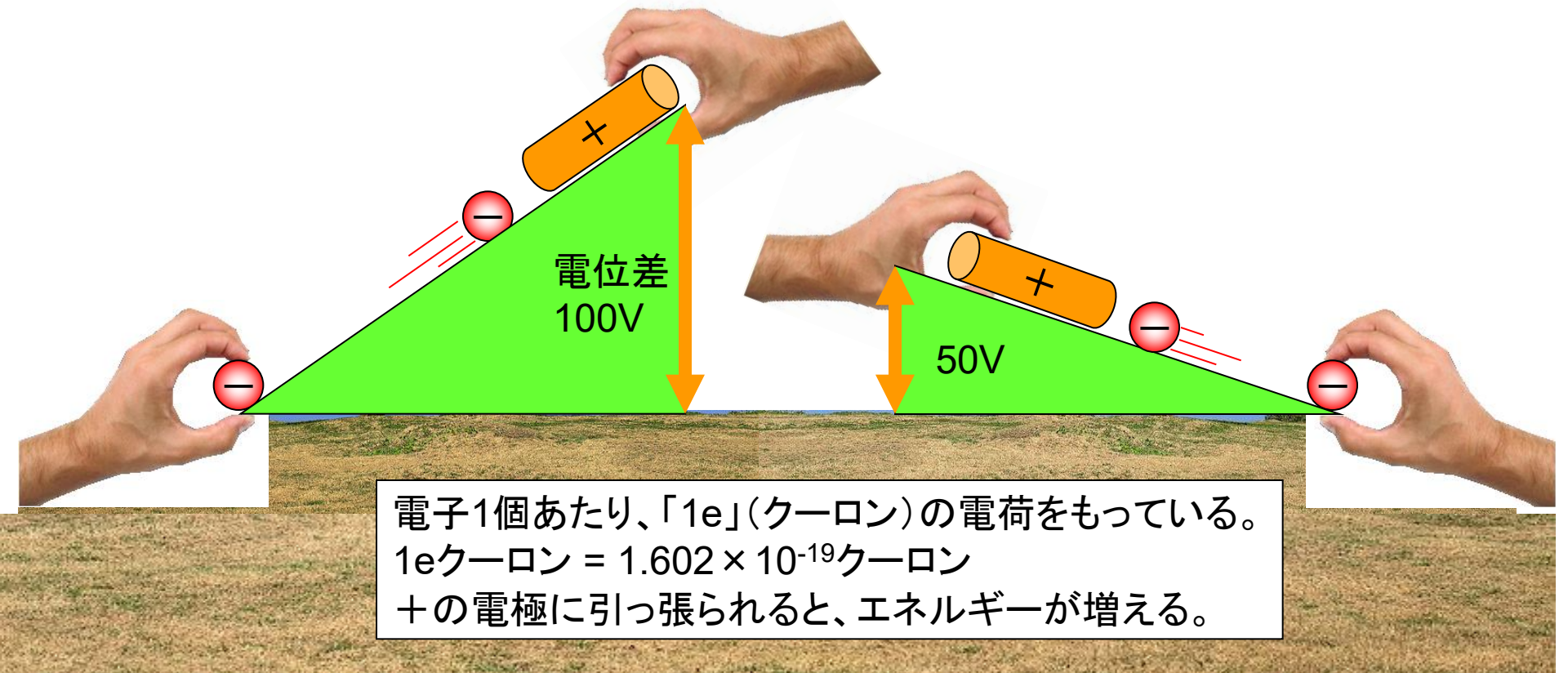
- **波長が長い　→　周波数が小さい**
  →　エネルギーが小さい
- $E = h\nu = h \cdot c / \lambda$
  $= 1.99 \times 10^{-25}$[J・m] / λ
  $= 1.24$[eV・μm] / λ
- プランク定数：h (6.63×10^{-34}J・sec)
- eV：エレクトロンボルト（電子ボルト）
  - 電子1個を1Vで加速したときに得られる運動エネルギー
  - 1[eV] ＝ 1.602×10^{-19}[C]×1[V]
    ＝1.602×10^{-19}[J]



※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

エネルギーの単位としての「eV」について

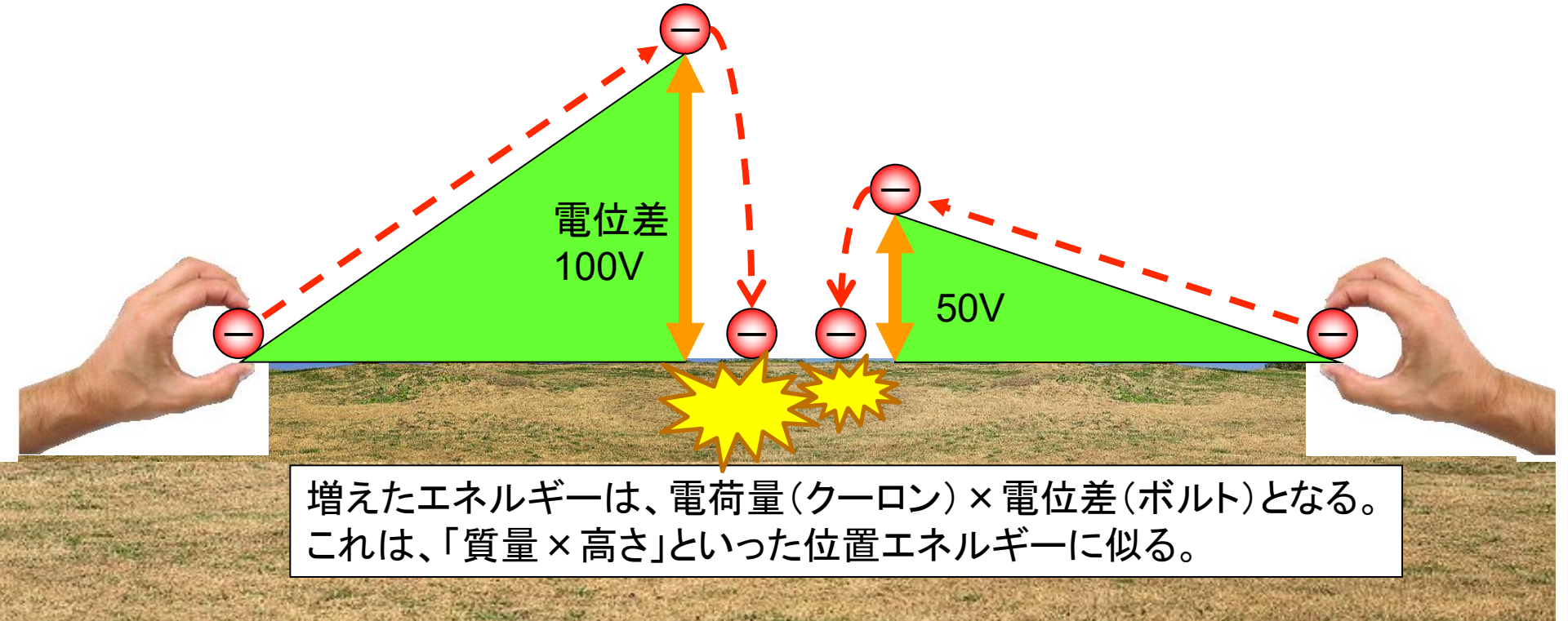
電荷量（クーロン）×電位差・電圧（ボルト）
「質量×高さ」に相当



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。

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



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。

エックス線（歴史学的にはX線）

- 歴史

  発見者

  Wilhelm Conrad Röntgen

  発見日

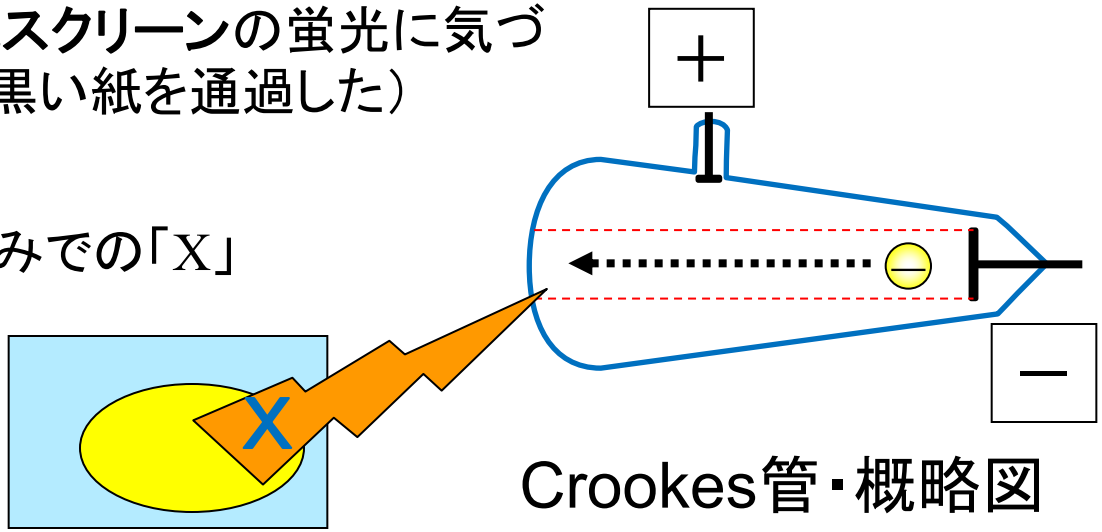
  1895年11月8日（約130年前）

  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」といういみでの「X」



Crookes管・概略図

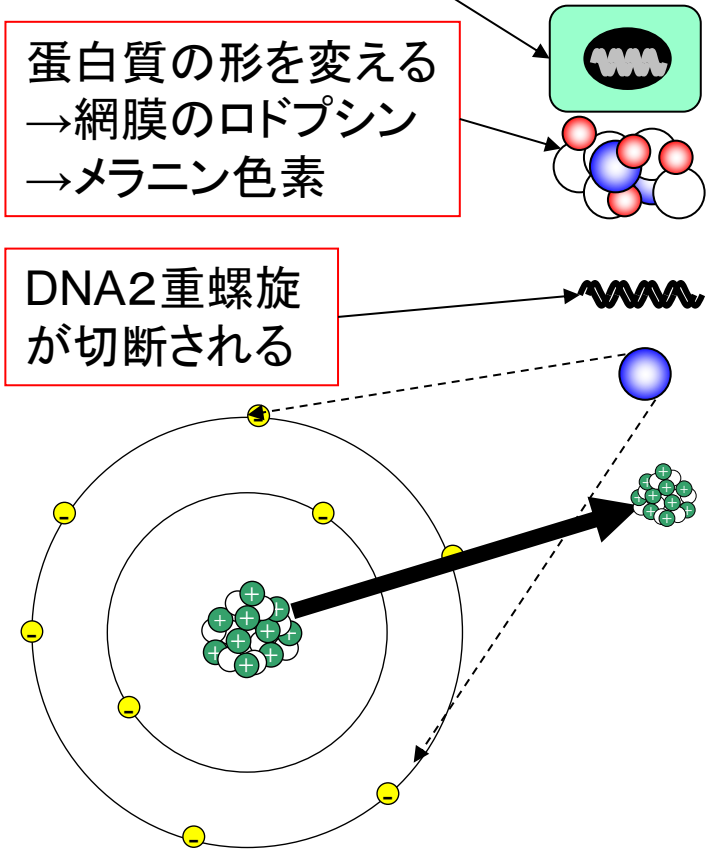
青柳泰司:「近代科学の扉を開いた人・レントゲンとX線の発見」、恒星社厚生閣、(2000/9/1)

物質の大きさと電磁波の波長(部分)

組織が温まる

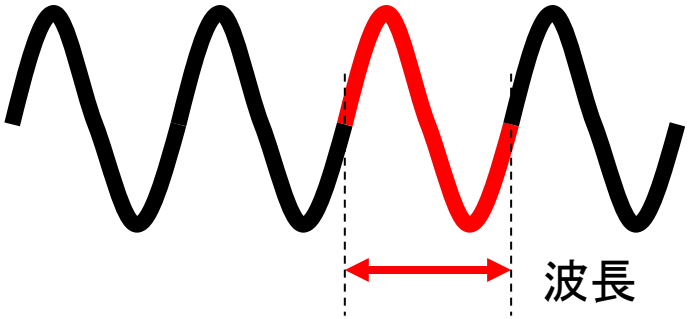
蛋白質の形を変える
→網膜のロドプシン
→メラニン色素

DNA2重螺旋
が切断される



物質	大きさ・波長	名称
（新潟～上越）	100km	超長波
	～10m	短波
人体の大きさ程度	10m ～1m	超短波
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 DNA・RNA	10nm ～1nm	エックス線
原子（1Å程度） （1Å=100pm）	1nm～100pm 100pm～10pm	
原子核	10pm～10fm 10fm～1fm	ガンマ線

	赤
	橙
	黄
	緑
	青
	紫



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。（3.0×10^8m/sec）

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。

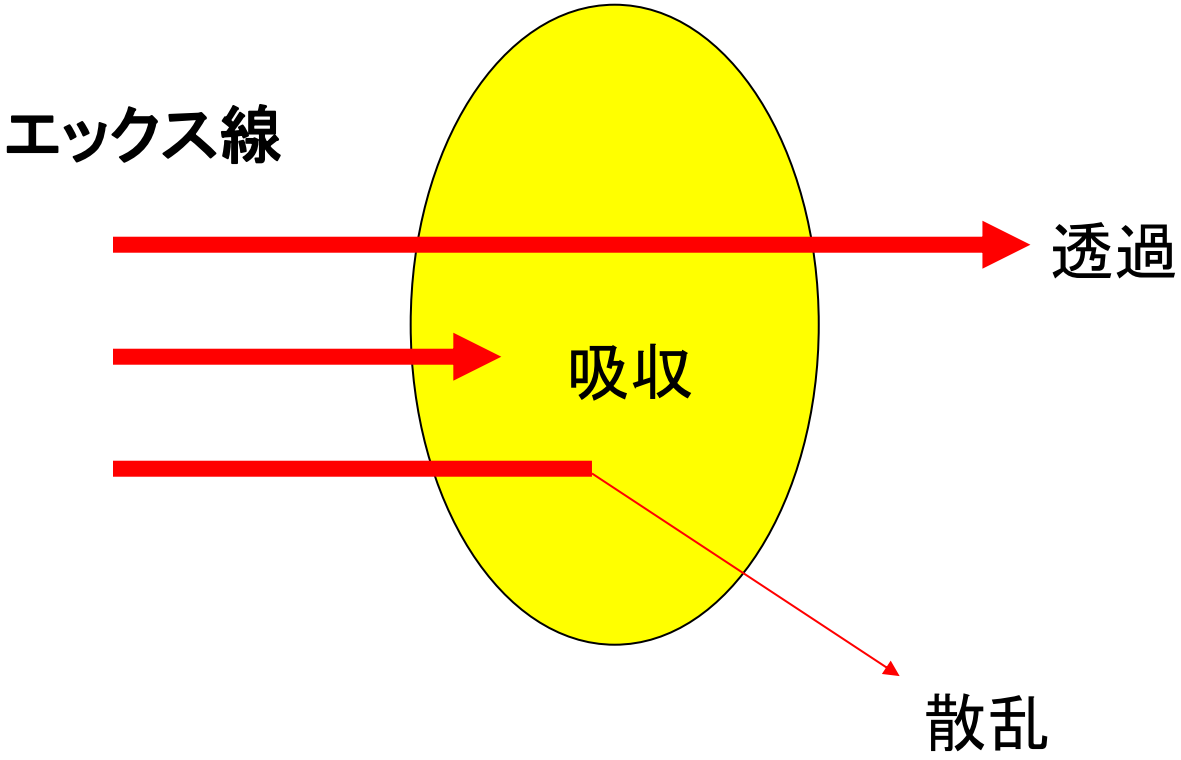
基本的性質（特に「電離」）から説明可能

- 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。

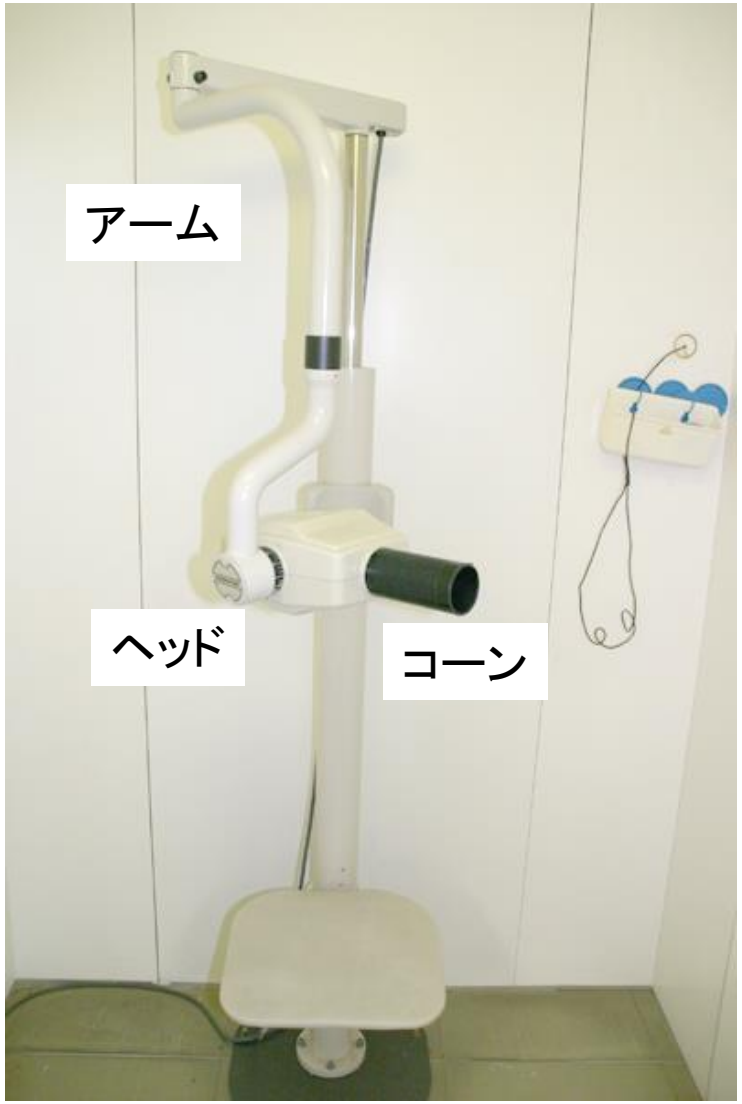
物質との相互作用(p.18)
重要

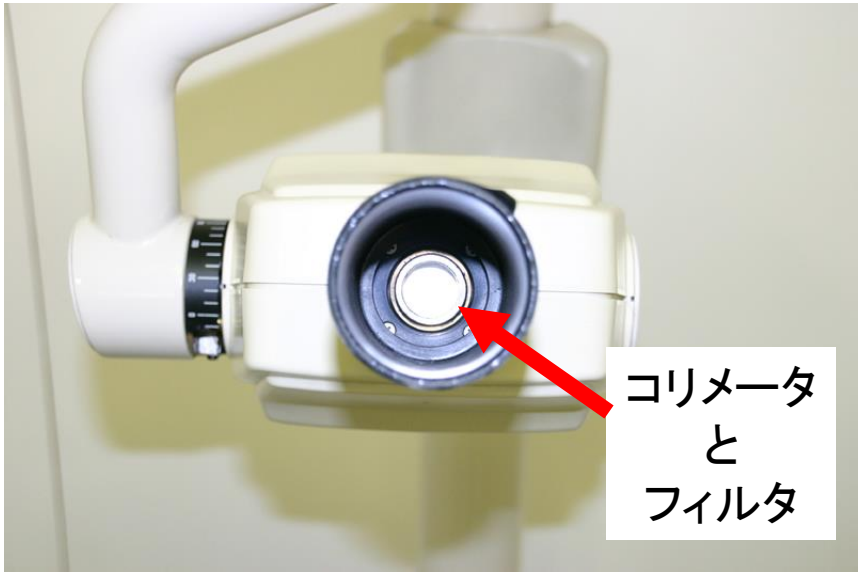


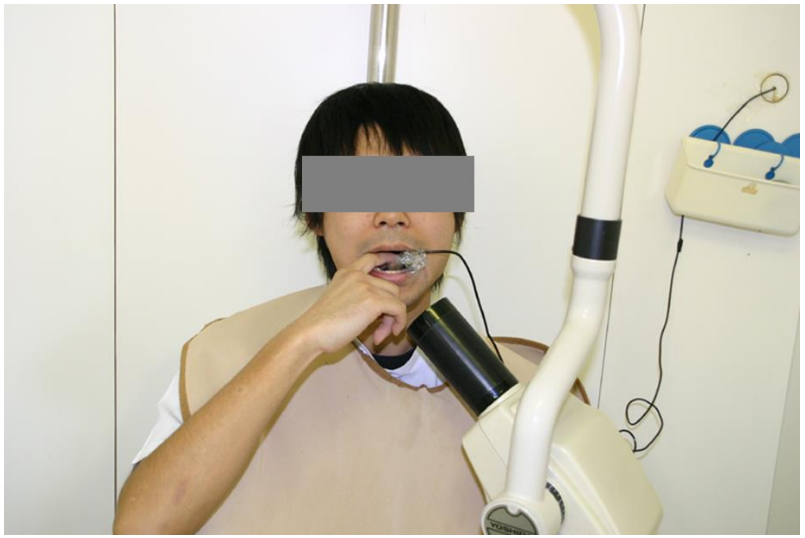
吸収および散乱にて「減弱」する

口内法エックス線撮影装置

教科書p.30-31

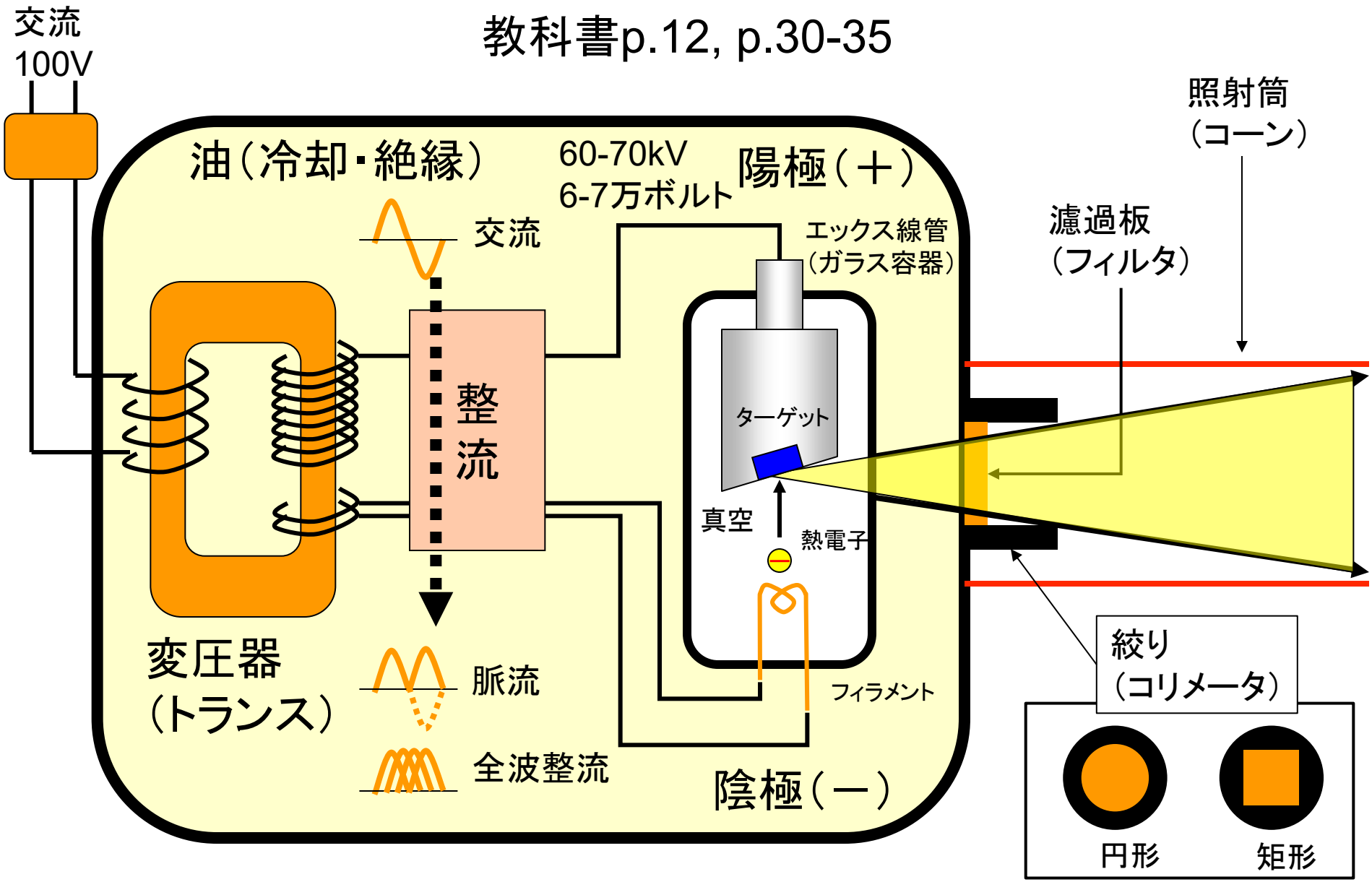




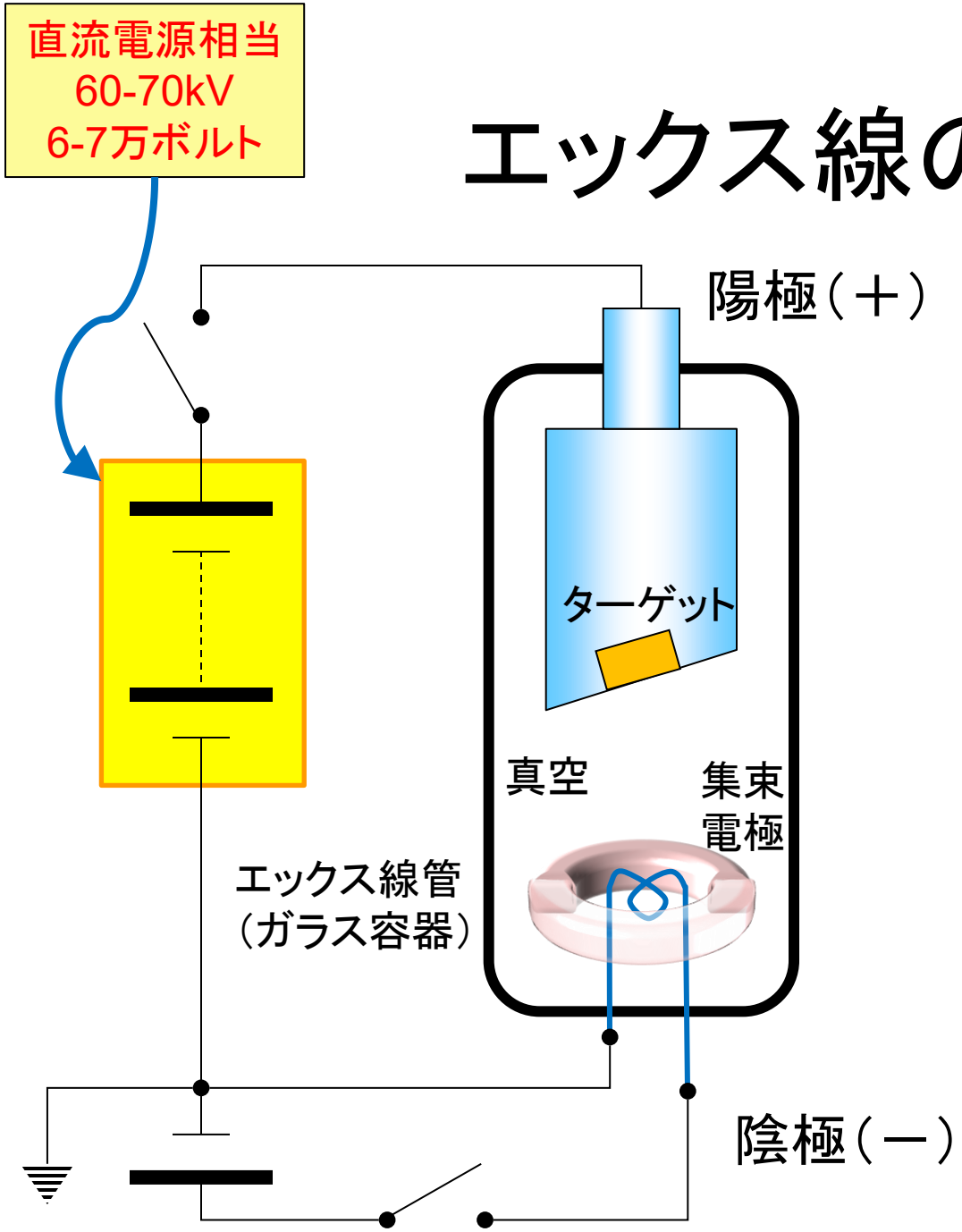


エックス線の発生

教科書p.12, p.30-35



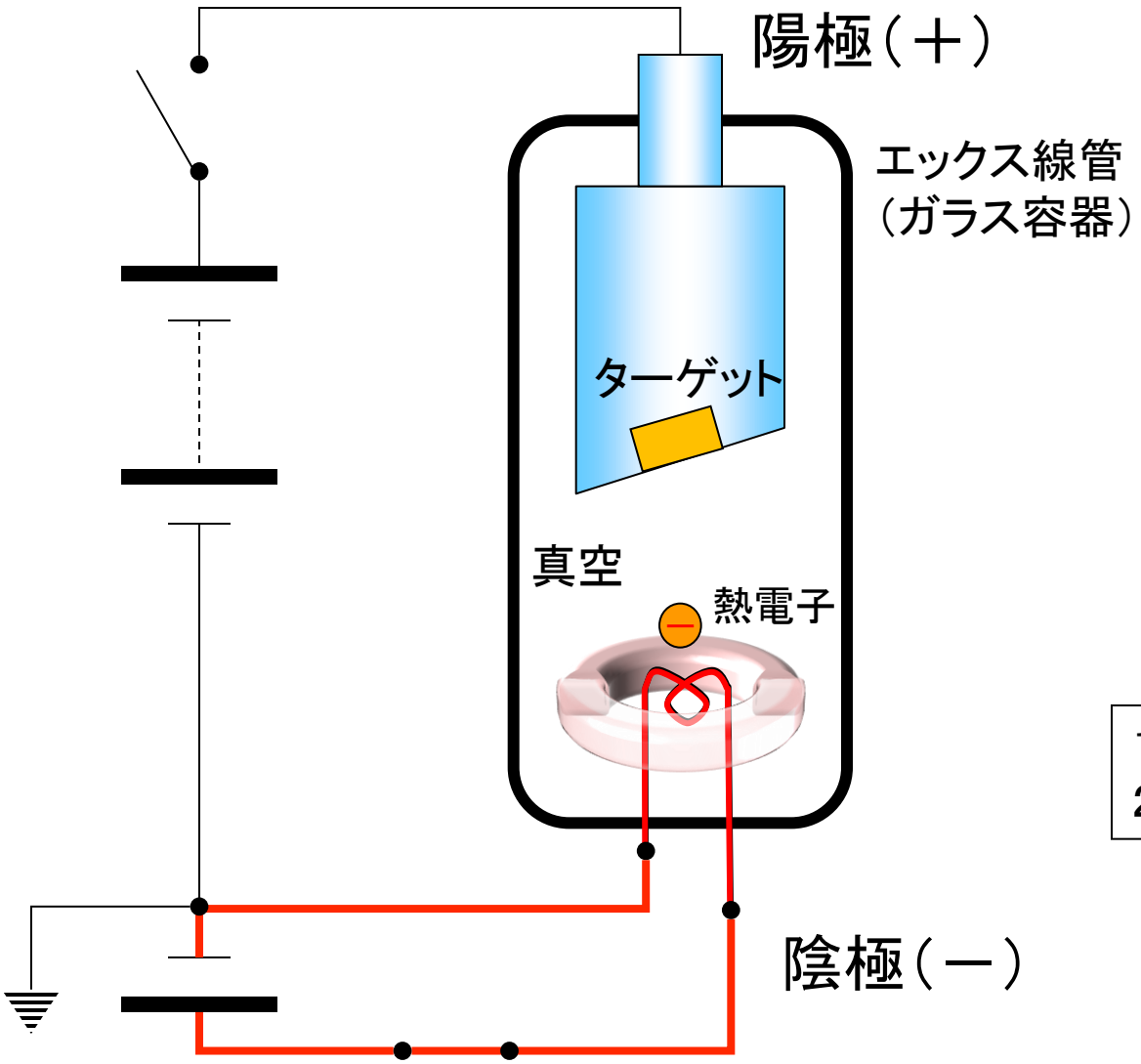
エックス線の発生



写真は明海大学所蔵のエックス線管

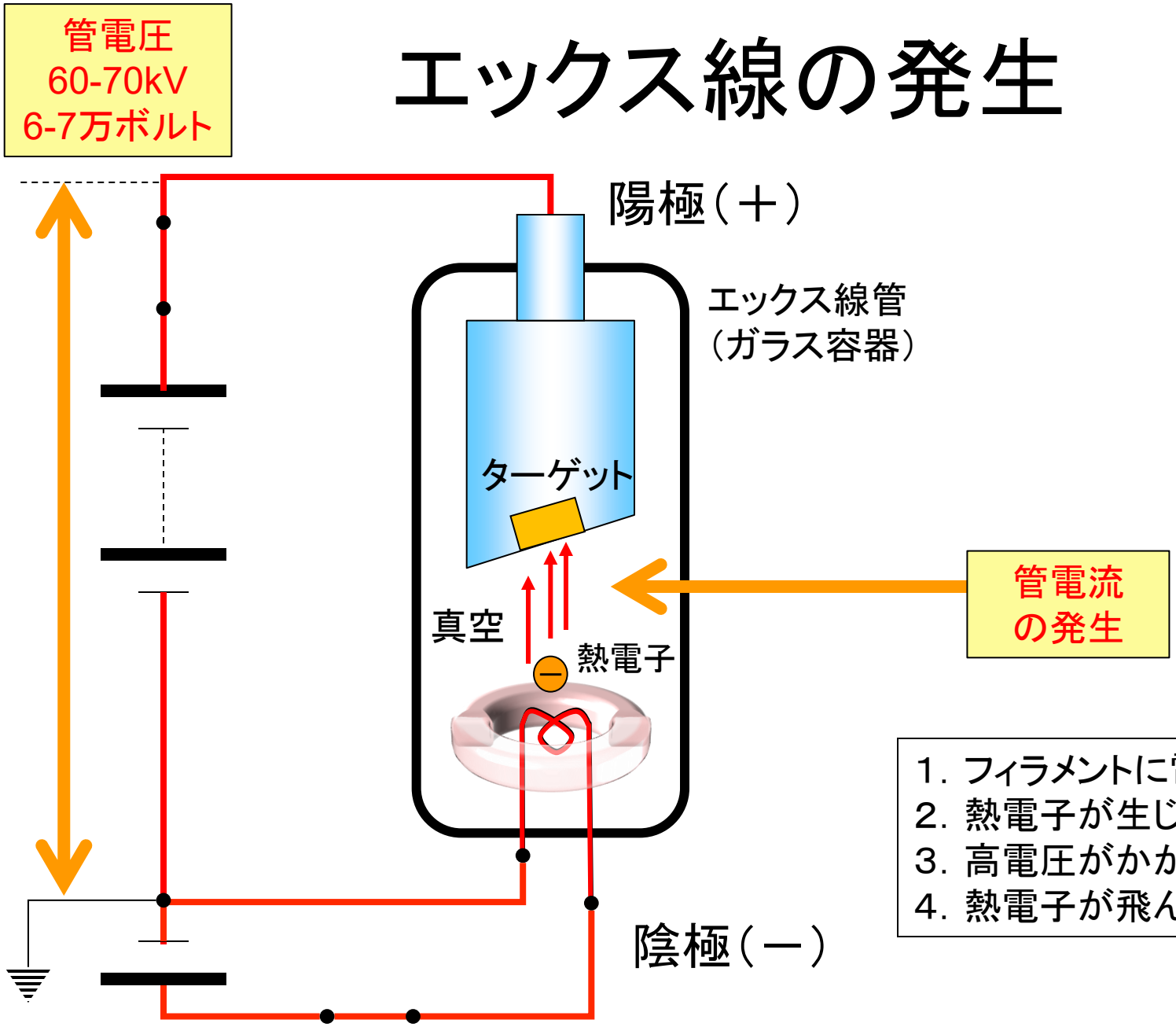
エックス線の発生

※先点火方式の図です。
同時点火方式もあります。



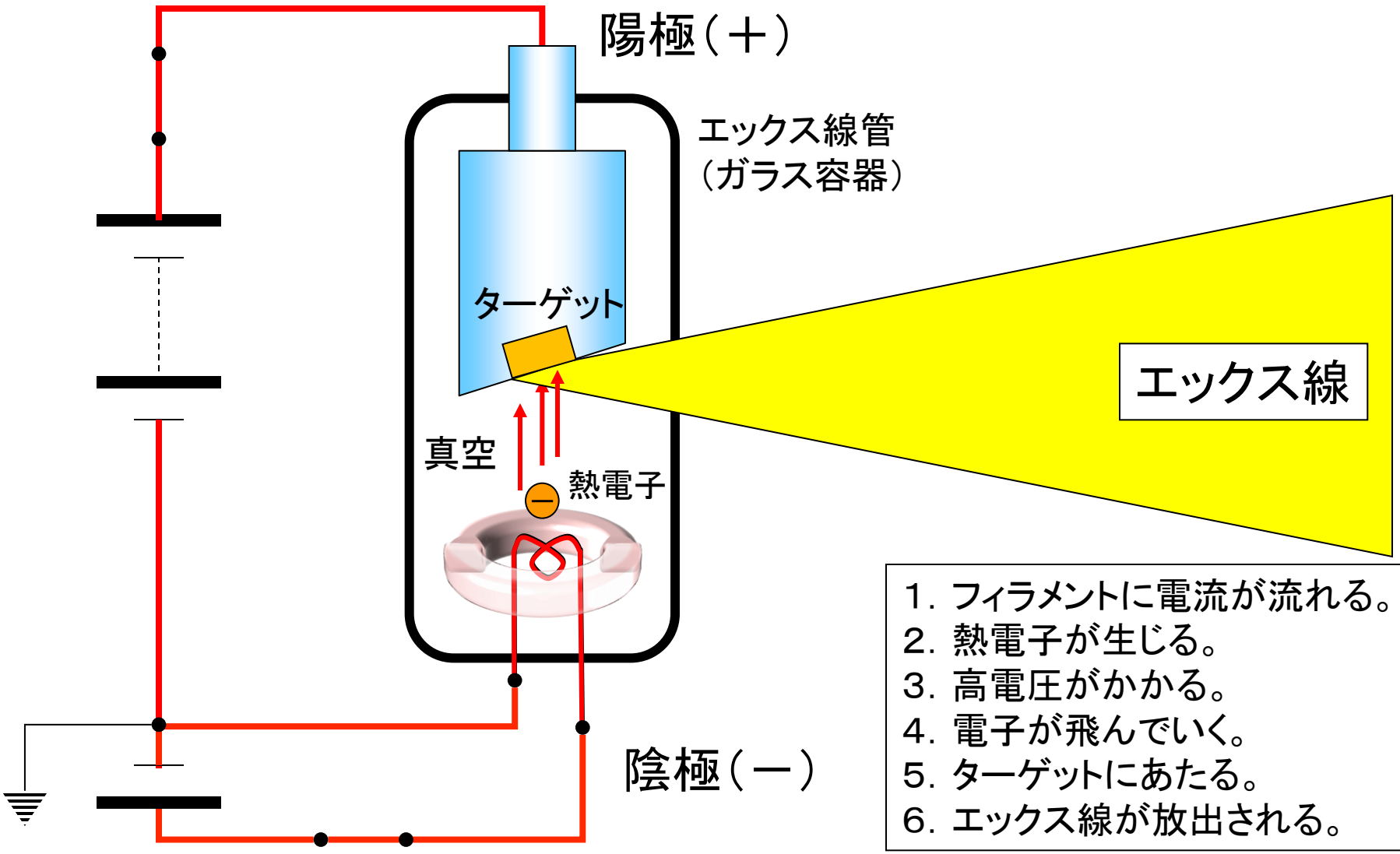
1. フィラメントに電流が流れる。
2. 熱電子が生じる。

エックス線の発生



1. フィラメントに電流が流れる。
2. 熱電子が生じる。
3. 高電圧がかかる。
4. 熱電子が飛んでいく。

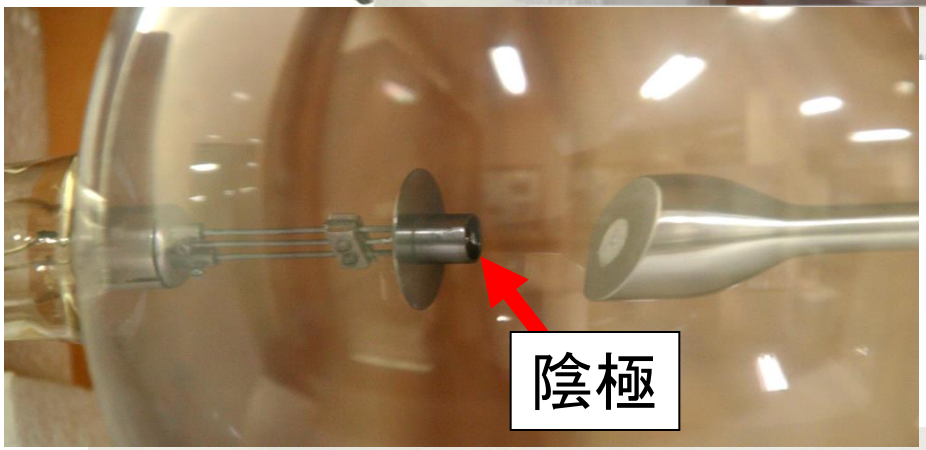
エックス線の発生

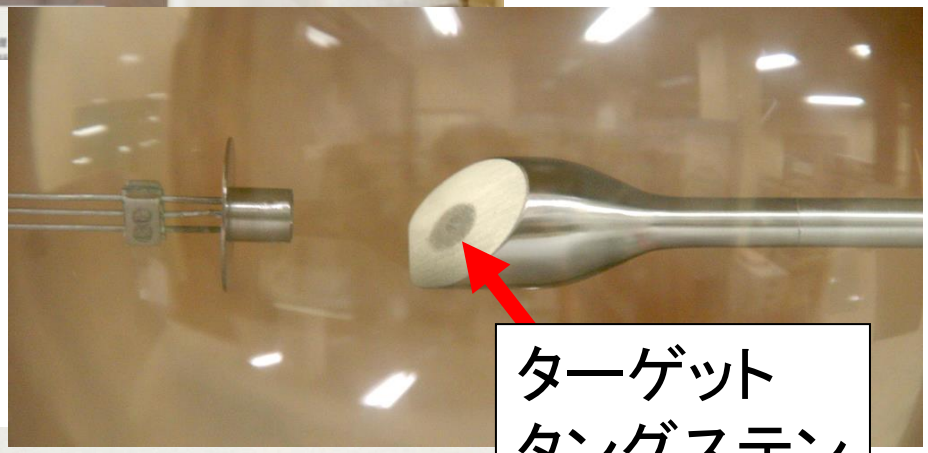


1. フィラメントに電流が流れる。
2. 熱電子が生じる。
3. 高電圧がかかる。
4. 電子が飛んでいく。
5. ターゲットにあたる。
6. エックス線が放出される。

エックス線管（クーリッジ管）

新潟大学旭町学術資料展示館（あさひまち展示館）



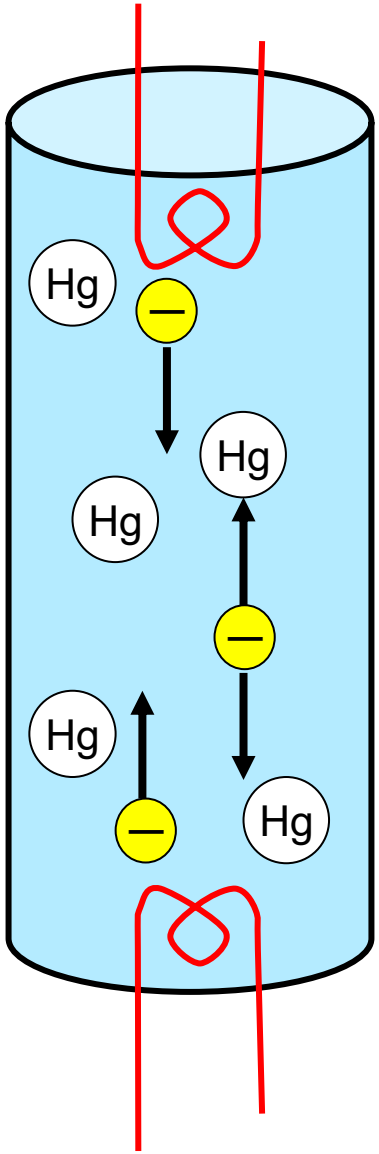


クーリッジ管（Coolidge tube） 旧制新潟　物理

熱陰極X線管。高圧の2極真空管の1種。タングステン線を用いた熱陰極からの電子線を利用したX線管。陽極の電圧を変えるとX線の硬さが変わり、電流を変えるとX線の強さが変わる。William Coolidge による発明（1913）。

参考・蛍光灯（p.17）

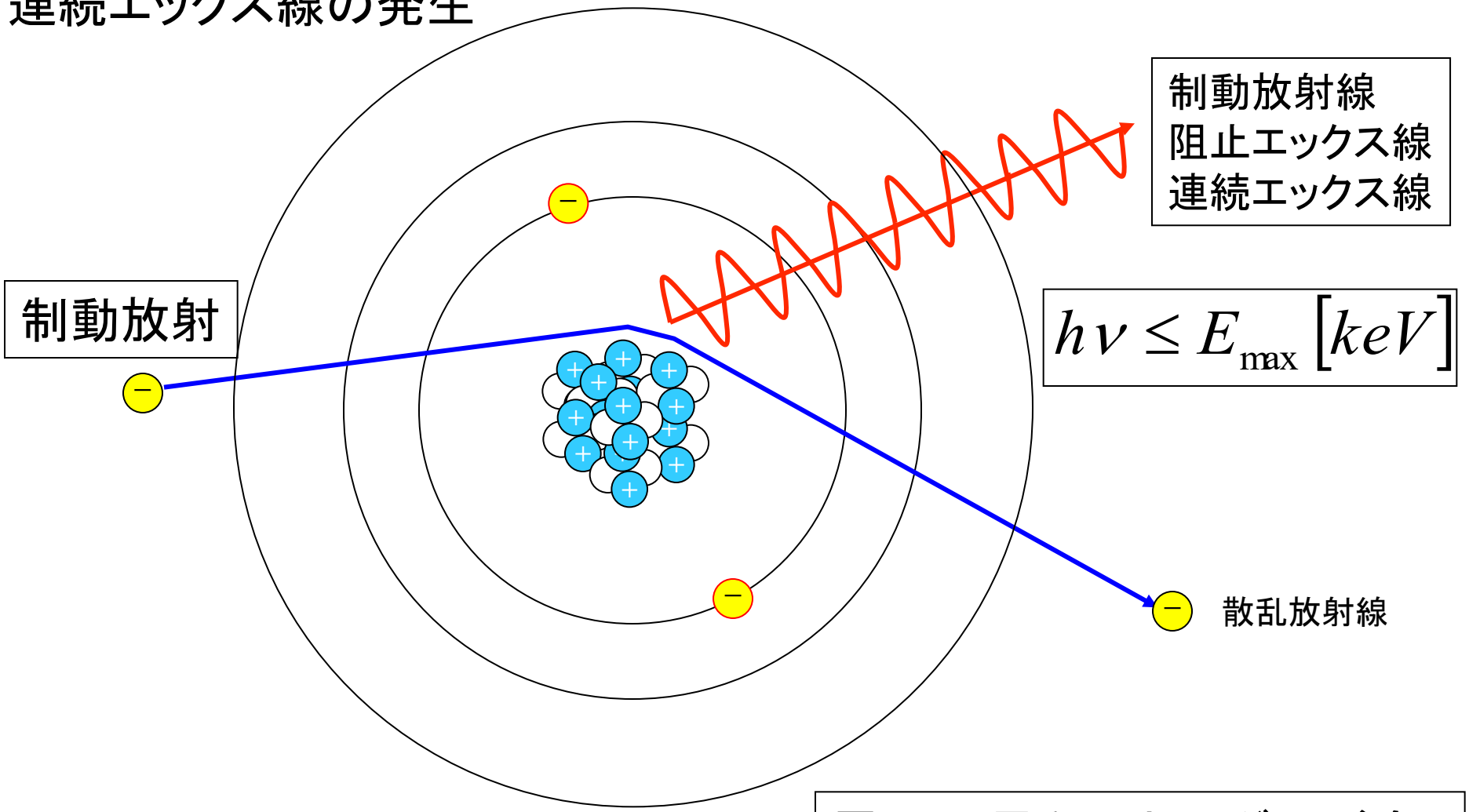
- 内部は真空に近く、ガス状態の水銀が含まれている。
- 両端にあるフィラメントに電流が流れる。
- 両端のフィラメント間に高電圧がかけられる。
- 電子が飛び、水銀原子にぶつかって、紫外線が発生する。
- 紫外線が、ガラス管に塗られた蛍光物質に当たって、発光する。



教科書 p.14-15

電子と原子の相互作用

連続エックス線の発生



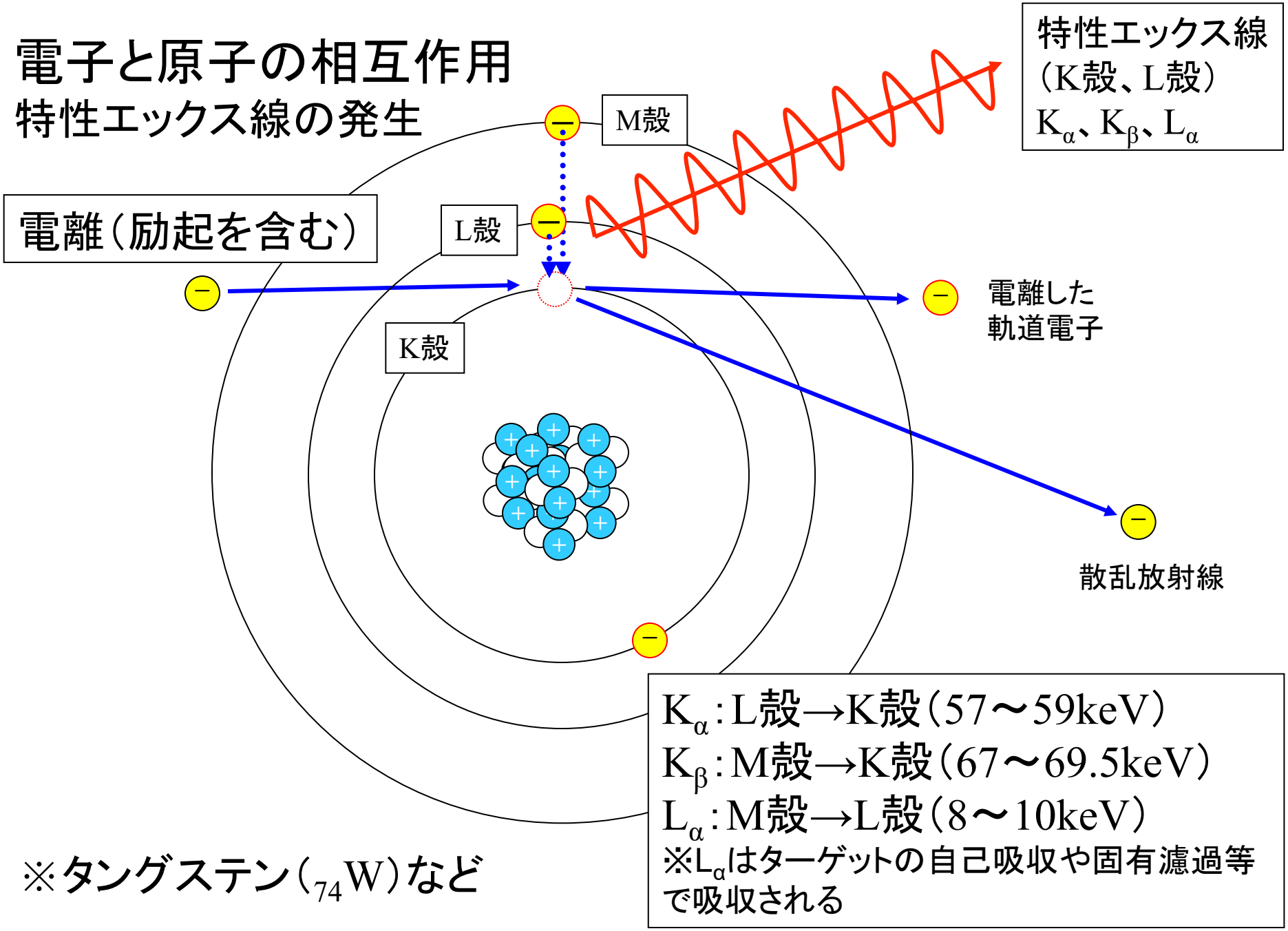
$$h\nu \leq E_{\max}\,[keV]$$

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

※タングステン（$_{74}W$）など

電子と原子の相互作用

特性エックス線の発生



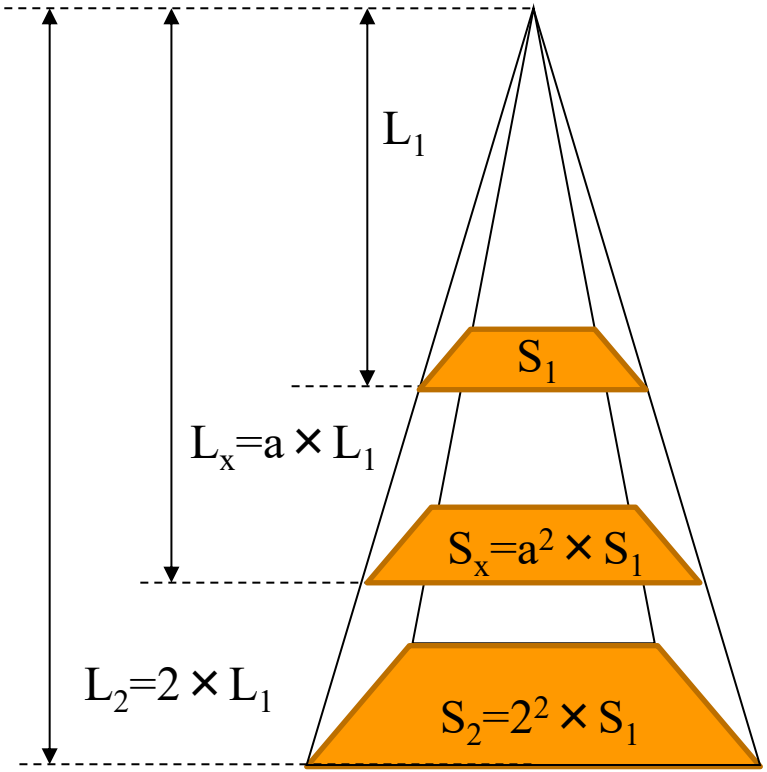
※タングステン（$_{74}W$）など

エックス線の減弱

- 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ックス線の量は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。

逆自乗の法則（教科書 p.20）

最初のエックス線強度：I_0



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

$I_0 \Rightarrow S_1$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: $I_2 = I_0/S_2$

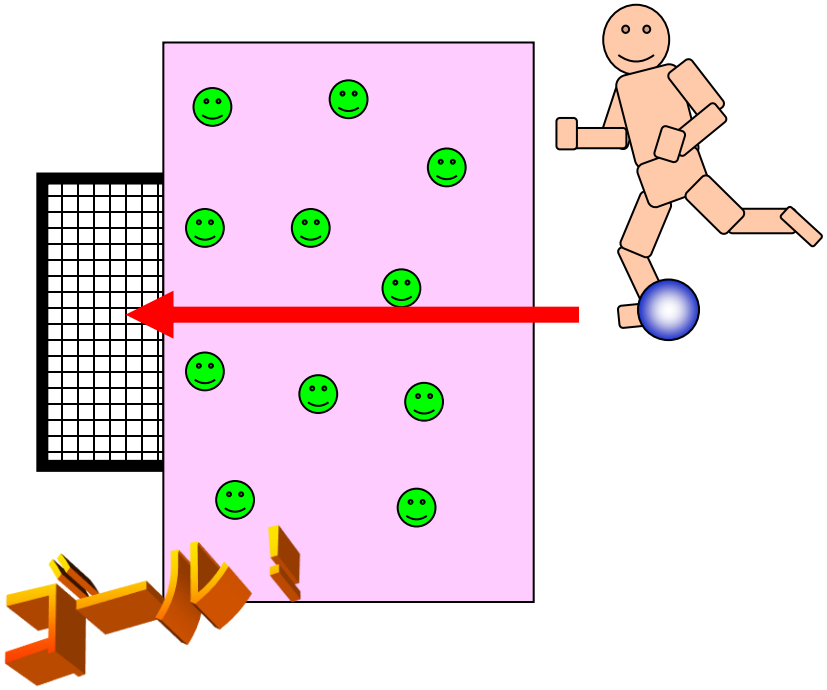
$= I_0/(2^2 \times S_1) = I_1/4$

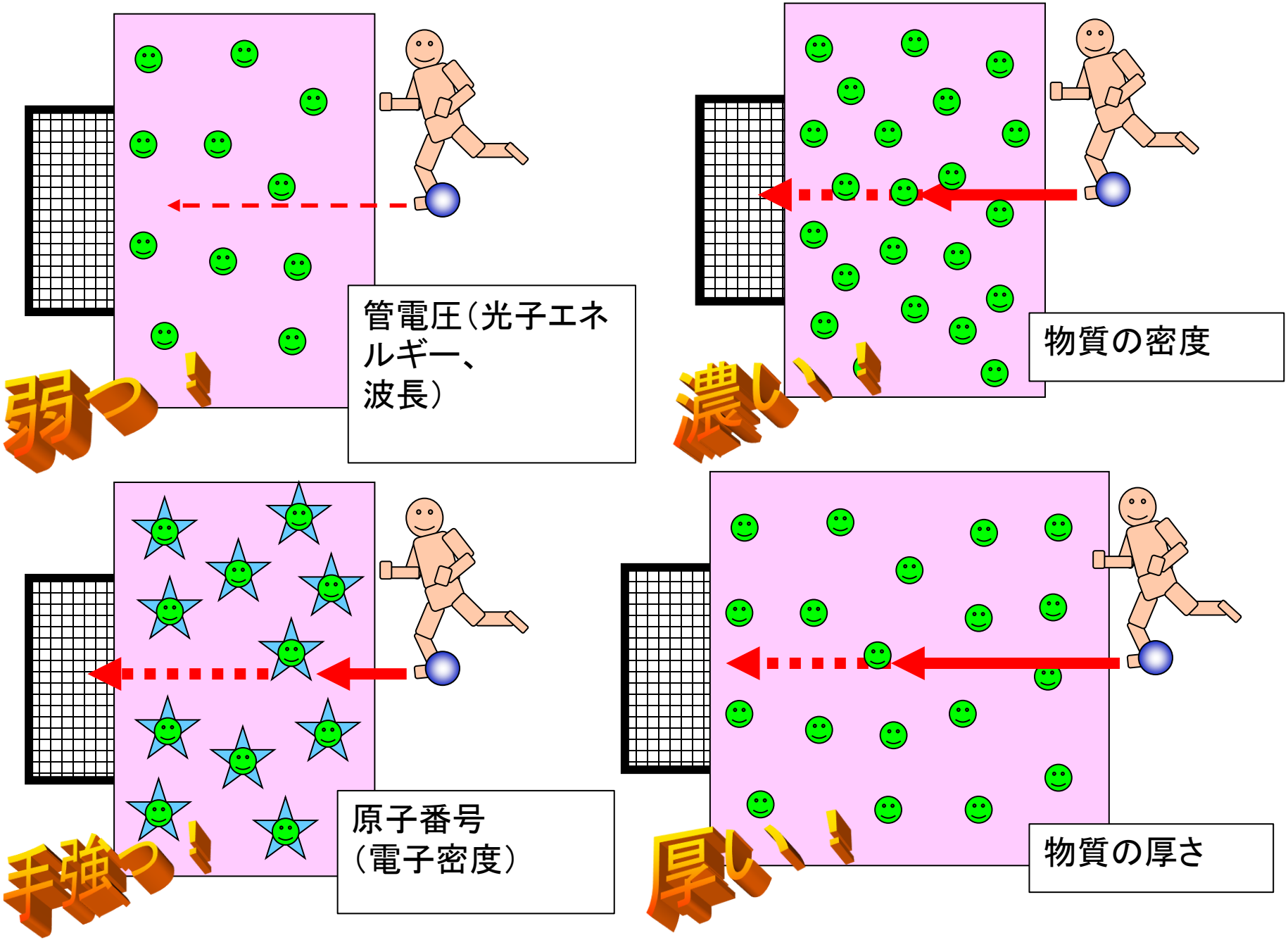
物質との相互作用による減弱

- 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




弱っ！
管電圧（光子エネルギー、波長）
濃い！
物質の密度
手強っ！
原子番号（電子密度）
厚い！
物質の厚さ

物質との相互作用による エックス線の減弱（教科書 p.20-21）

- $I=I_0e^{-\mu d}$、$\mu=kZ^3\lambda^3\rho$（光電効果主体の場合の式）
  - I_0：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）

撮影用器材（撮影装置以外）

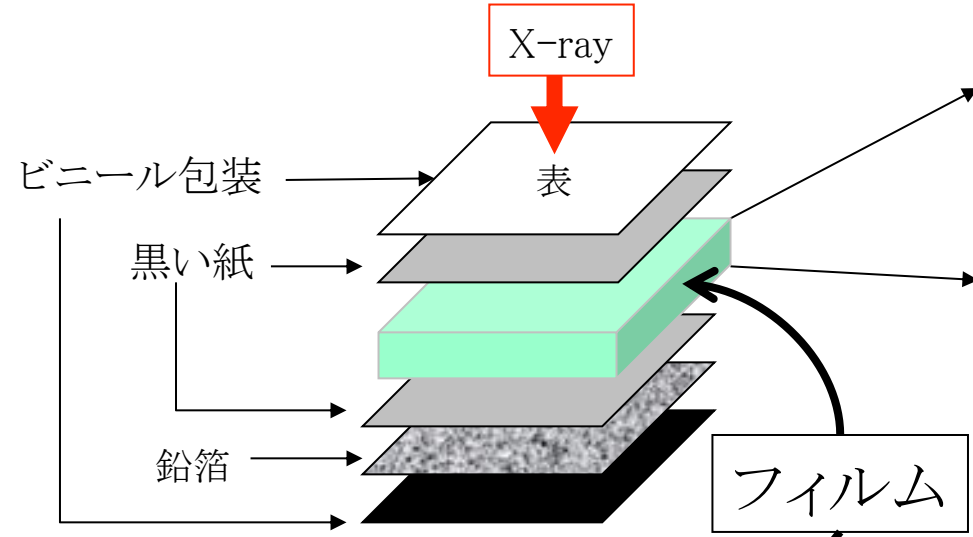
教科書p.36-45

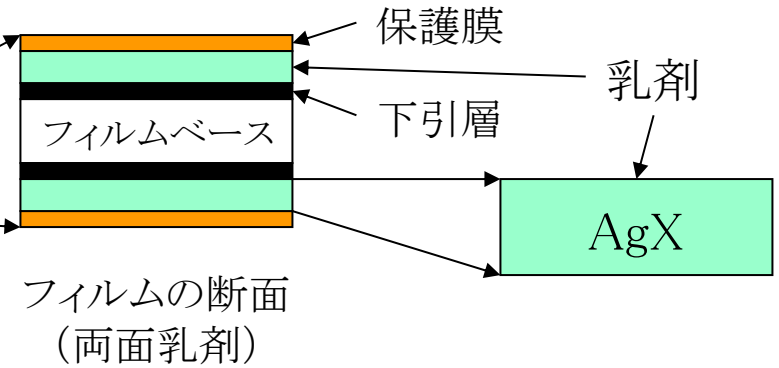
- フィルム
  - 口内法用（ノン・スクリーン・タイプ）
    - 標準サイズ、小児サイズ、咬合サイズなど
  - 口外法用（スクリーン・タイプ）
    - 六つ切、四つ切、大角、半切など
- 口外法用
  - カセッテ（p.42）
  - 増感紙（p.42-43）
  - フィルムマーカー（p.45）
  - グリッド（p.44）

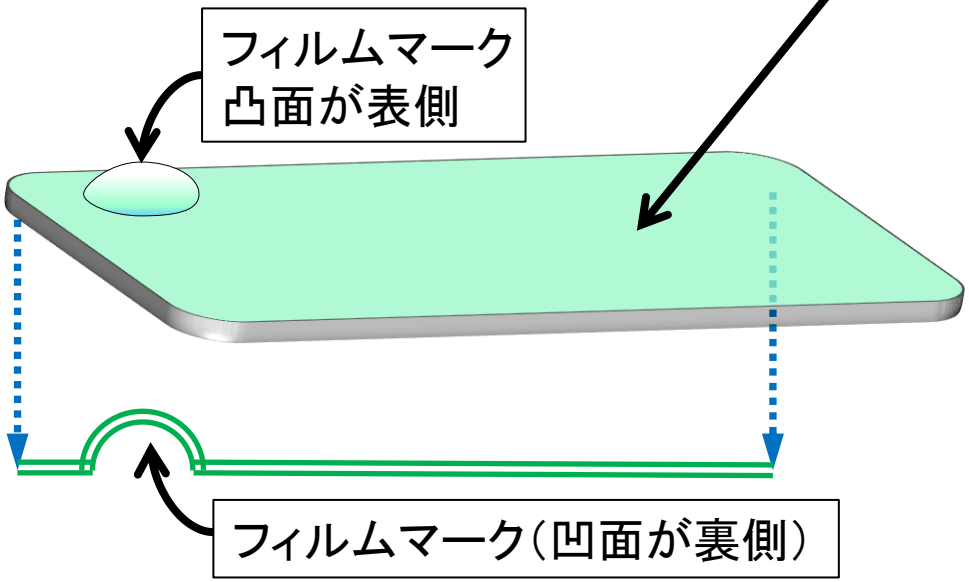
フィルム感度について（p.38）

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

口内法フィルムの構造について
p.36-39

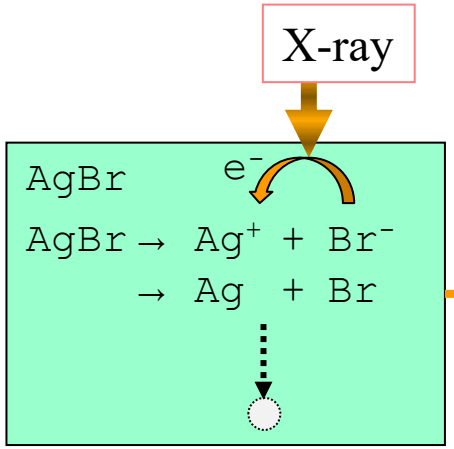






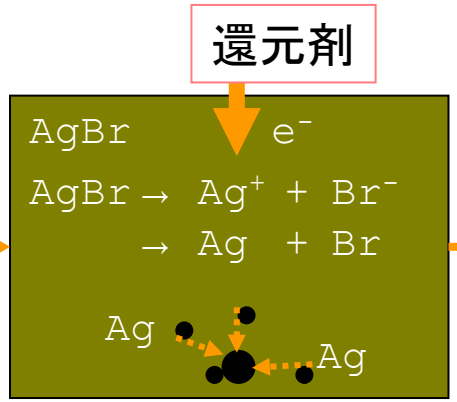
※フィルム外装での表裏の判別方法
エックス線を受ける側には附属物がほとんどない。あったとしても、フィルムマーク（口内法フィルム）ないしフィルムマーカー（鉛で作られた文字・記号のシール等）がある程度。
裏面には「Opposite side toward film」ないし「Pb」といった表記、フィルムパケットの折り返し、カセッテの付属物等がある。
なお**デジタル化後、口内法では通常フィルムマークが無いため、画像のみからは表裏の判定はできないので注意すること。**

フィルムの現像（教科書 p37、p.128）



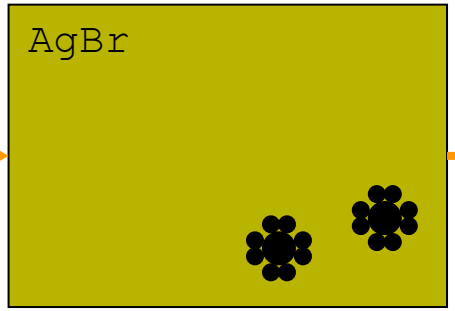
露光による潜像の形成

$2AgBr \rightarrow 2Ag + Br_2$



現像（アルカリ性）

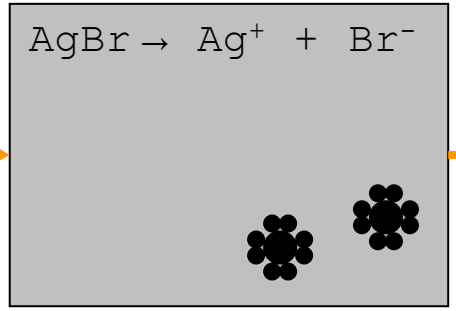
アルカリ性（メトール、ハイドロキノン）ハロゲン化銀を還元し、エックス線があたったところを中心に銀を析出させる。



（中間水洗・停止）

現像のアルカリで、定着の酸が中和されるのを防ぎ、定着の力が弱まるのを防ぐ。

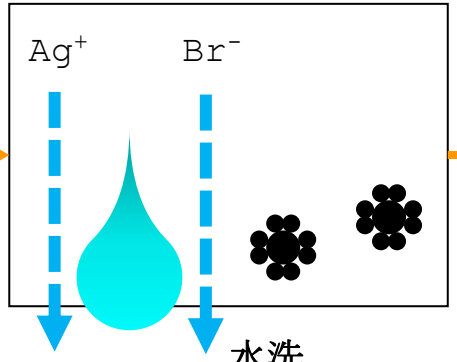
※ハロゲン化銀として臭化銀（AgBr）の場合の反応式。その他、塩化銀（AgCl）等がある。



定着（酸性）

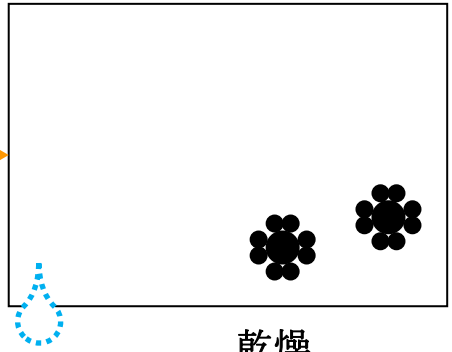
酸性（チオ硫酸ナトリウム）残ったハロゲン化銀を溶かす。

$AgBr + 2Na_2S_2O_3 \rightarrow 3Na^+ + [Ag(S_2O_3)]^{3-} + NaBr$



水洗

溶けたハロゲン化銀と、定着液を洗い流す。



乾燥

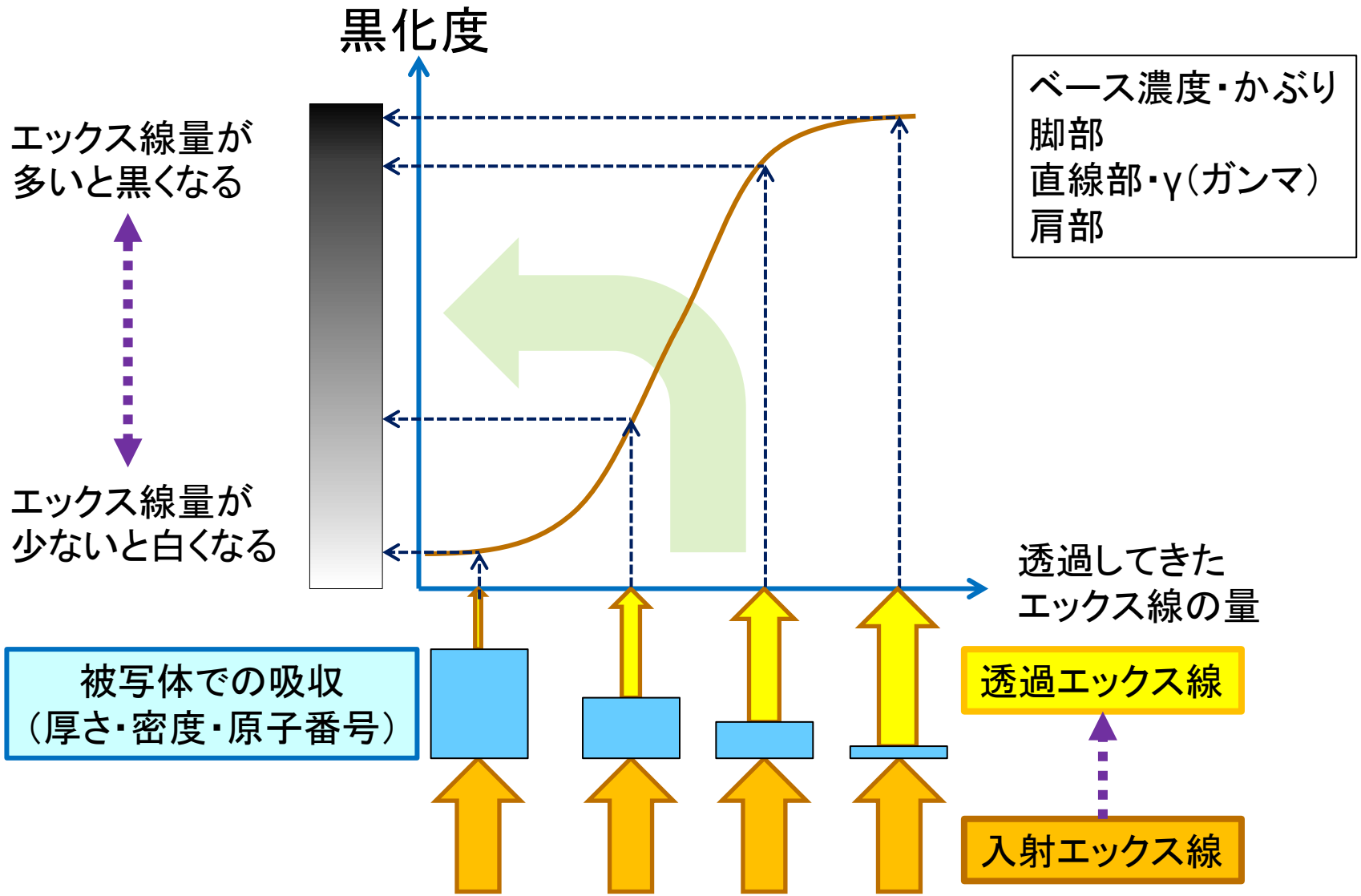
ゼラチン膜の水分を飛ばし、傷がつきにくくする。

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			
	成分				二浴法 (New ID処理)		一浴法 (QDE処理)	
現像	アルカリ性の液で、エックス線があたった(感光した)所のハロゲン化銀を還元し、銀粒子を析出させる。	時間	4分	2分	第1液	1分以上	QDE液	30秒以上
		温度	20℃	24℃		20℃		25℃
	メトール、ハイドロキノン		時間-温度特性(指定現像条件)					
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					
定着	酸性の液で、未還元のハロゲン化銀を溶かす。	時間	5から10分	約2分				
		温度	20-30℃		第2液	45秒以上		
	チオ硫酸ナトリウム							
水洗	溶けたハロゲン化銀を洗い流す。	時間	20-30分	約2分	後処理	30秒以上		
		温度			水洗	流水で30分		
乾燥	ゼラチン膜の水分を蒸発させ、傷がつきにくくする。		自然乾燥、乾燥機	機械内の温風	乾燥	風通しのよい日陰で		

画像の濃淡・黒化度と特性曲線

教科書 p.46-48

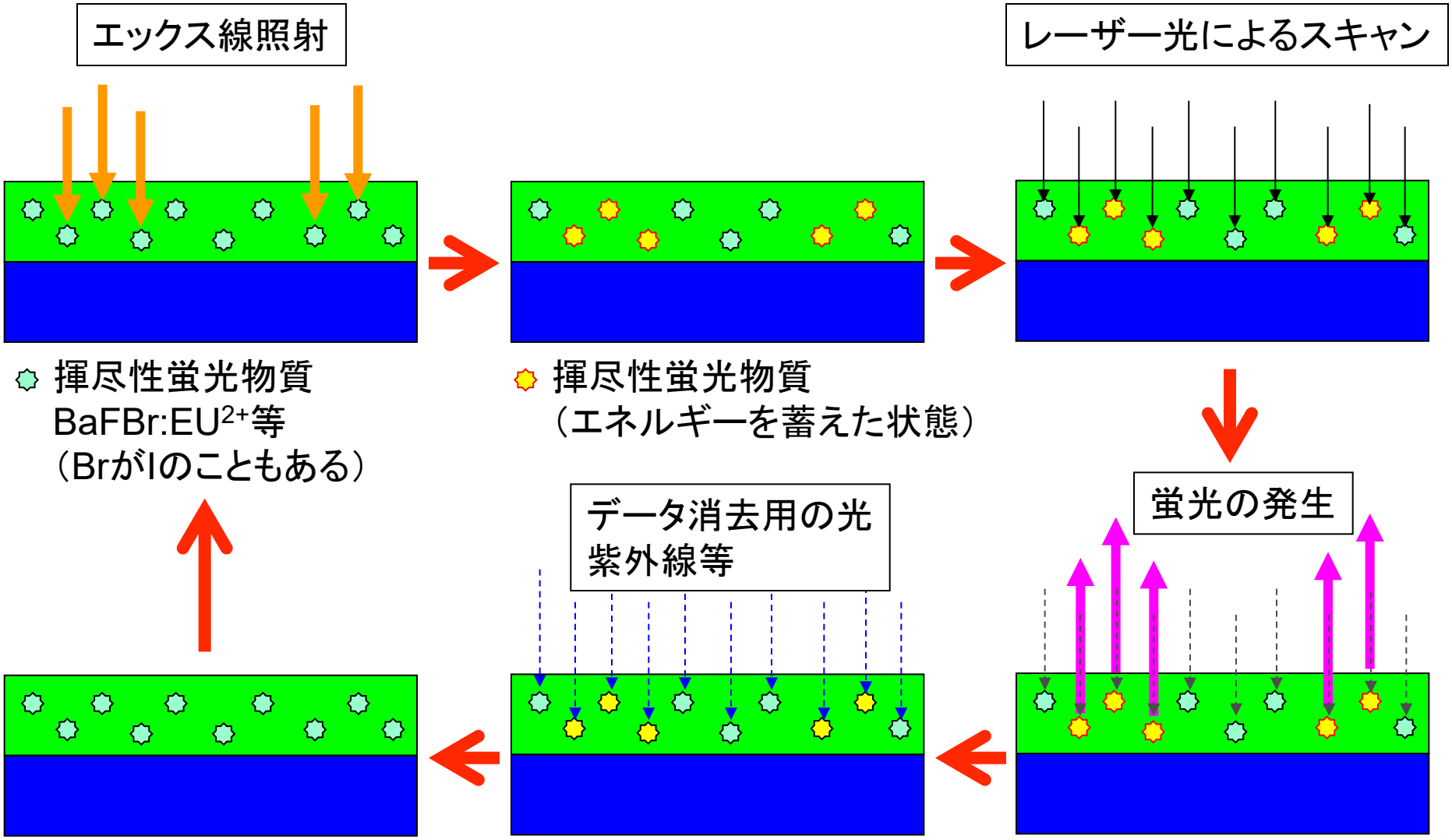


デジタル系（p.138-143）（フィルムレス、現像不要）

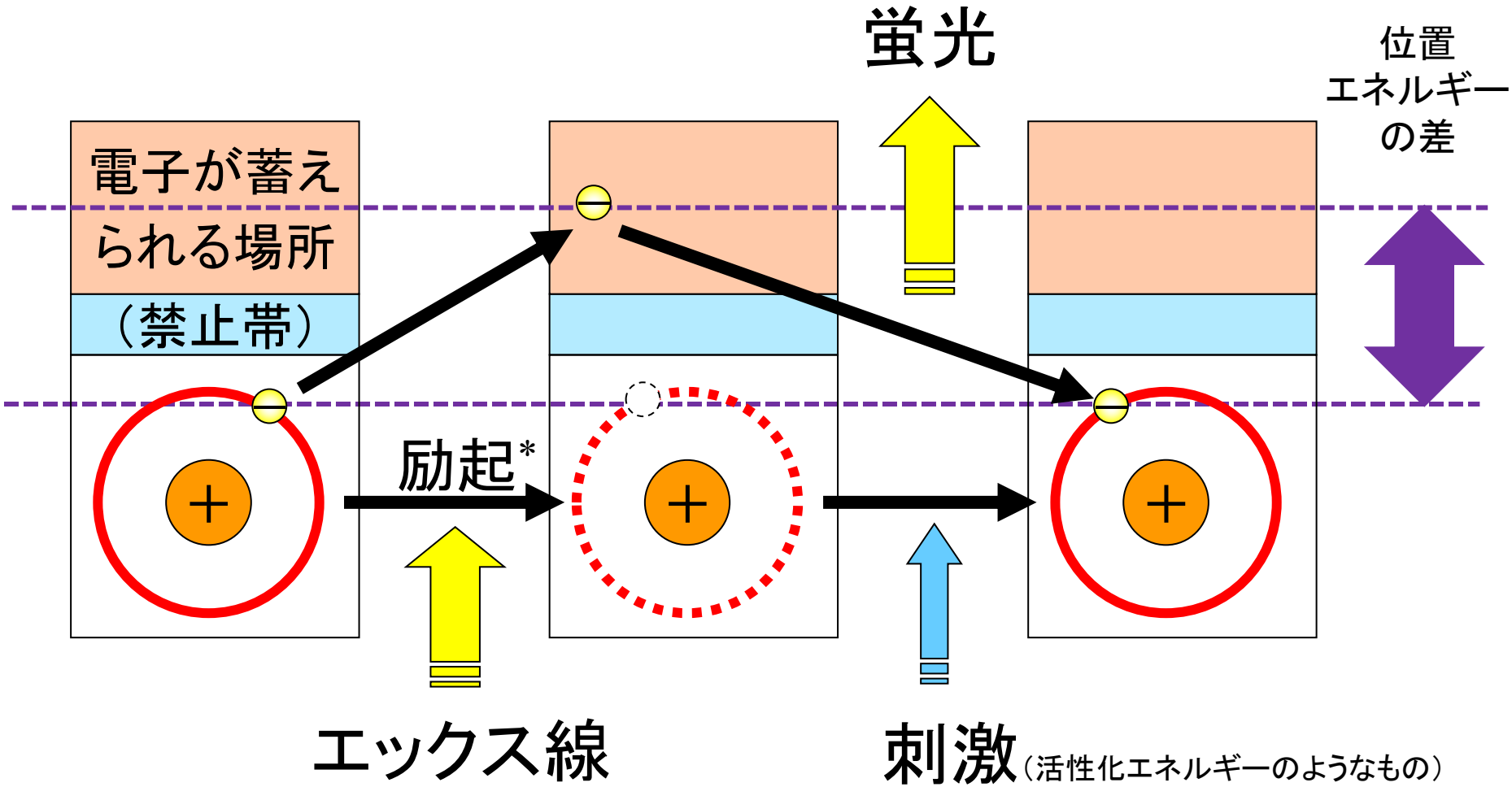
- DR (digital radiography)
  - IP (Imaging plate)を用いるもの
    - フィルムとほぼ同じ大きさ、厚さ。
    - フィルムと比べて硬い。
    - 破損すると、毒物がでてくる。
  - CCD (charged coupling device)を用いるもの
    - デジタルカメラやデジタルビデオでも使われている。
    - ケーブルがついている。
    - フィルムよりも厚い。
- デジタルなので、画像の保管・管理には注意が必要
  - ネットワーク接続されていると情報漏洩、データ破壊の危険性がある。

IPの仕組み p.142-143

Photostimulated Luminescence (PSL)



TLD、OSL、PSL原理の簡易図



*「励起」：電離レベルだが、飛び出した電子を捕獲する部分があるため、「励起」と表現される。

TLD:熱
OSL/PSL：長波長の光（緑）
IPでは「レーザー光」を利用

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。