

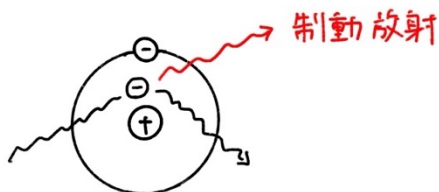
●3-3 X線の分類と性質

- ・ γ 線: 原子核の励起状態の変化によって生じる電磁波
- ・X線: 原子核外で発生する電磁波

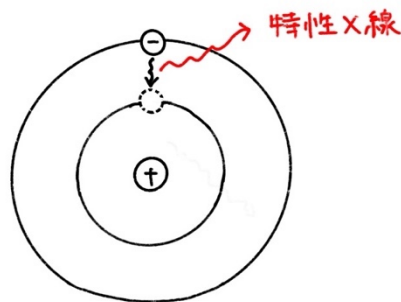
→さらにX線は・・・

- ①制動X線: 高速電子が原子核(or 物質中の電子)のクーロン場での相互作用により制動阻止(加速度運動)されるときに余分なエネルギーを放出する現象
- ②特性X線: 原子の安定化のために、空位の内殻軌道に外側の軌道電子が遷移する際に余分なエネルギーを放出する現象

● 制動X線



● 特性X線



①制動X線

- ・強度分布は入射電子の運動エネルギーと方向に依存
- ・最大エネルギー(E_{max})は高速電子の運動エネルギーに等しくターゲット物質には依存しない
- ・最短波長 λ_{min} はデュエン・ハントの式で与えられる

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{E_{max}} = \frac{1.24}{V_0} \text{ (nm)}$$

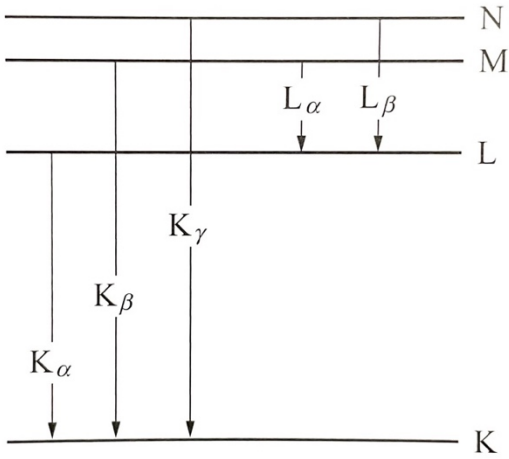
ここで、 $1.24(\text{nm})=1.24 \times 10^{-9}(\text{m})=12.4(\text{\AA}:\text{オングストローム})$ の変換はよく出るので覚えておくこと
デュエン・ハントの式から

- I. 最短波長は管電圧のみで決まり、管電流には依存しない
- II. 管電圧の増大で短波長側にシフト
- III. 原子番号に依存しない

- ・制動X線の全強度は管電圧の2乗、管電流及びターゲットの原子番号に比例
- ・診断領域での制動X線の発生効率率は1%程度

②特性X線(蛍光X線ともいう)

- ・遷移に関係する軌道の結合エネルギーの差が特性X線のエネルギーになる
- ・特性X線は物質に固有で原子番号が高いほどエネルギーは高くなる
- ・特性X線に関係する式としてモーゼレーの法則(特性X線のエネルギーは原子番号のみに依存する)



- K 殻特性 X 線のエネルギーは L 殻特性 X 線のエネルギーより大きい
- K 殻に電子が遷移する際に出る特性 X 線: 波長の長い(エネルギー低い)方から α 、 β 、 γ とつける
- 放出確率は $K_{\alpha} > K_{\beta} > K_{\gamma}$

IV. 物質との相互作用 (光子)

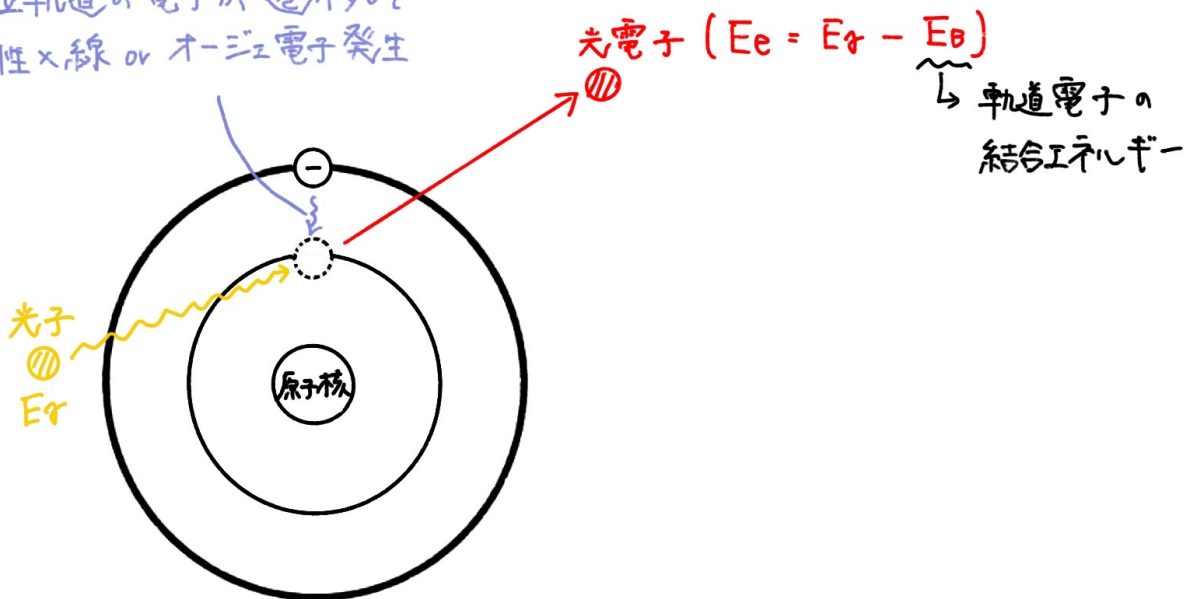
●4-1 干渉性散乱: 入射光子と電子の相互作用により散乱され、入射光子と散乱光子の波長に変化のない散乱

- ①トムソン散乱: 自由電子との散乱
- ②レイリー散乱: 束縛電子との散乱
- ③ブラッグ反射: X 線が結晶格子に入射するとき、特定の入射角で反射波の強度が強め合う現象

●4-2 光電効果(光電吸収): 軌道電子が光子のエネルギーを吸収し、原子から放出される現象

- 入射光子は完全に吸収され消滅する
- 入射光子のエネルギー $>$ 軌道電子の結合エネルギーでないと起こらない
- 光電効果の起こりやすさ(反応断面積)は原子番号の 4~5 乗に比例し、光子のエネルギーの 3.5 乗に反比例
- 吸収端(光電効果の断面積が急激に増加する)がある
- エネルギー保存則、運動量保存則の観点から、自由電子では起こらない
- 光電効果に伴い特性 X 線またはオージェ電子の放出が起こる

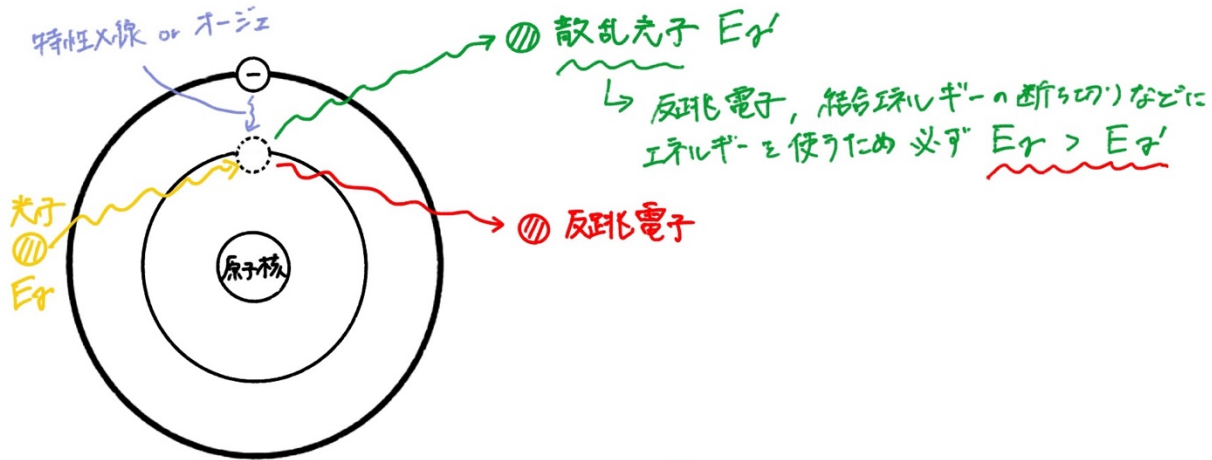
上位軌道の電子が遷移して
特性 X 線 or オージェ電子発生



●4-3 コンプトン散乱: 自由電子 or 結合エネルギーが無視できる軌道電子との弾性散乱(非干渉性散乱)

で、入射光子のエネルギーは散乱光子と反跳電子に分配される

- ・コンプトン散乱は電子との散乱であり、反応断面積は原子番号に比例しエネルギーに反比例する
- ・コンプトン散乱の微分断面積を示したものにクライン-仁科の式がある
- ・入射光子のエネルギーが十分に大きいとき、散乱光子のエネルギーは 0.256MeV に近づく



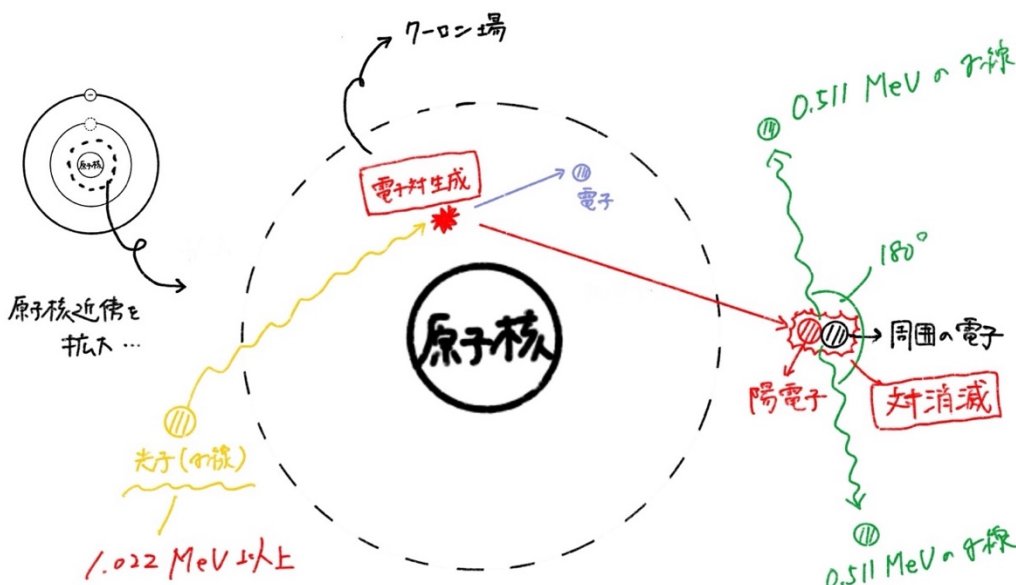
散乱光子のエネルギー $E_{\gamma'}$ =
$$\frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{0.511} (1 - \cos \theta)}$$
 [MeV]



散乱光子が入射方向に対して 180° 返ってきたとき (後方散乱)
 反跳電子に正面衝突したとき
 散乱光子のエネルギーは「このとき最小」
 反跳エネルギー「最大」 → "コンプトン端"

●4-4 電子対生成: 入射光子が原子核のクーロン場で電子対を生成し、自身は消滅する現象

- ・入射光子が電子-陽電子の静止エネルギーの和(1.022MeV)を超えていないと発生しない
- ・生成される電子および陽電子には均等にエネルギーが付与される(連続スペクトル)
- ・反応断面積は原子番号の2乗に比例するが、100MeV 以上では一定値に近づく
- ・入射光子が 2.044MeV 以上では 3 電子対生成(電子、陽電子が生成され軌道電子も飛ぶ)が起こる
 → 反応断面積は原子番号に比例、低原子番号の物質で寄与率が大きい



- 4-5 光核反応:原子核が入射光子を吸収し、励起された原子核から陽子、中性子、 π 中間子などが放出される
- ・光核反応にはしきい値が存在する
- ・ (γ, p) 反応、 (γ, n) 反応、 (γ, α) 反応、などがあり、放射線治療で問題になるのは (γ, n) 反応

●4-6 断面積と減弱

- ・光子の減弱には以下のような寄与がある
- ①散乱過程のみの寄与:干渉性散乱(トムソン散乱・レイリー散乱)
- ②吸収過程のみの寄与:光電効果、電子対生成、光核反応
- ③散乱と吸収の両方:コンプトン散乱

・半価層(HVL):入射X線の強度を半分にするのに必要な厚さ(cm)

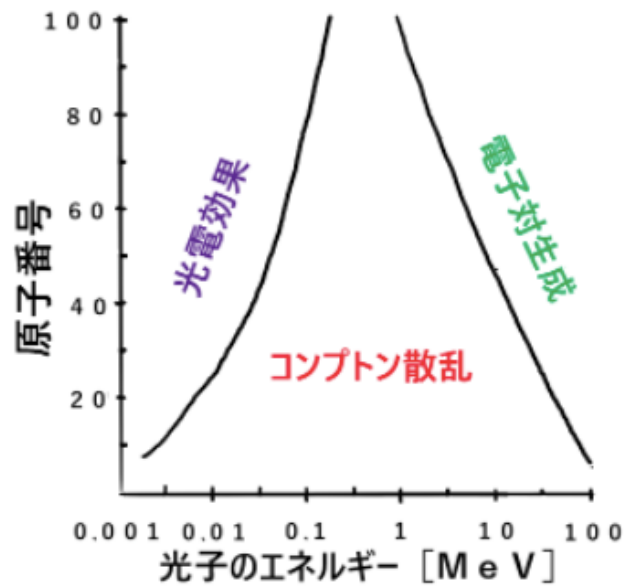
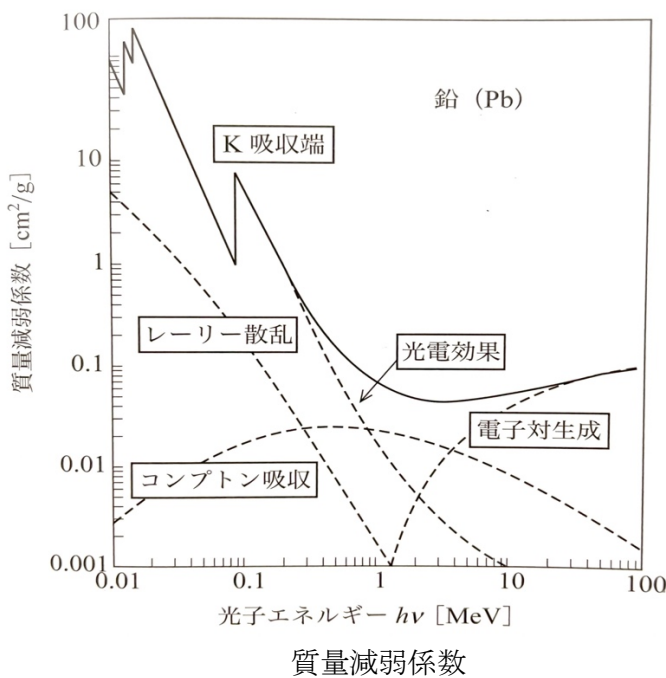
$$I = I_0 = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{d_{1/2}}}$$

x:吸収体の厚さ $d_{1/2}$:半価層

・平均自由行程 λ :1つの相互作用をする前に通過した平均の距離(cm)=入射光子数が1/eになる距離

$$\lambda = \frac{1}{\mu} = 1.44 \times d_{1/2}$$

μ :線源弱係数(m^{-1})



- ・人体(水)に対してはコンプトン効果が30keV~30MeVの範囲で主な相互作用
- ・1MeV付近では原子番号によらず、コンプトン散乱が主に起こる
- ・1MeV付近での質量減弱係数は物質によらずほぼ一定