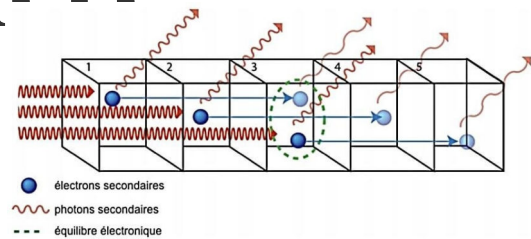


Chapitre II : Interaction rayonnements ionisants électromagnétiques (photons X, gamma)- matière

Cours Radiobiologie Radioprotection



Dr. Lezzar

Table des matières



Introduction	3
I - Atténuation	4
II - L'Effet photoélectrique	7
III - L'effet compton	10
IV - L'Effet matérialisation	13
V - Importance relative de chacun des 3 effets	15

Introduction



Lorsqu'un rayonnement X ou γ traverse la matière, il en ressort atténué (mais pas stoppé) à la suite de différentes interactions (excitation, ionisation) avec les atomes de la matière traversée. Cependant, à l'inverse des particules chargées qui cèdent leur énergie sur une faible distance par des interactions coulombiennes, les photons X ou γ peuvent traverser de grandes quantités de matières sans interagir. Après une interaction, tout ou partie de l'énergie du photon est communiquée à un électron du milieu qui est alors mis en mouvement et va à son tour céder son énergie en provoquant des ionisations sur sa trajectoire.

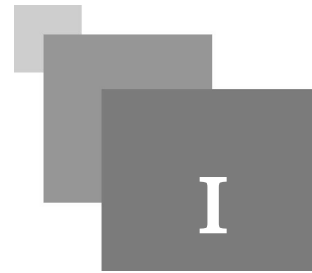
C'est pourquoi les photons sont classés parmi les rayonnements indirectement ionisants car ce sont les électrons secondaires qui provoquent leurs effets.

Par ailleurs, l'atténuation de ces rayonnements est une diminution progressive du nombre de photons et par une diminution de l'énergie individuelle de chacun d'eux : le phénomène est donc différent de celui des particules pour lequel on assiste à une diminution de leur énergie sans variation de leur nombre.

Une partie de l'énergie des photons qui entre en interaction avec la matière se trouve sous forme de photons dont l'énergie et la direction diffèrent de celle des photons incidents : ce sont les photons diffusés. Le photon peut subir essentiellement trois types d'interaction



Atténuation

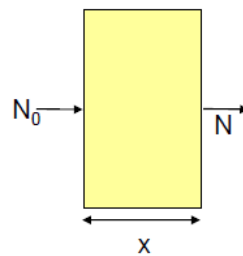


Nombre de photons

Soit un faisceau incident de photons X ou γ étroit, monochromatique, contenant N_0 photons, traversant un matériau homogène d'épaisseur dx . Il se produit dN interactions des divers types (photoélectrique, Compton, création de paire). dN (nombre de photon qui sort après avoir traversé la matière) est proportionnel à N et à dx . $dN = -\mu \cdot N_0 \cdot dx$

La solution de cette équation différentielle simple est : $N(x) = N_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x)$

Le nombre de photons ayant interagi avec la matière est donc :
 $N_{inter}(x) = N_0 - N_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x) = N_0 \cdot (1 - \exp(-\mu \cdot x))$



Remarque

Le coefficient de proportionnalité μ est appelé coefficient linéaire d'atténuation. Il a pour dimension l'inverse d'une dimension et s'exprime en cm^{-1} . En effet :

$\mu = dN/N \cdot 1/dx$ (dN/N sans dimension).

μ dépend du rayonnement incident et de la nature du matériau traversé.

μ est l'inverse du libre parcours moyen ($\chi = 1/\mu$)

Remarque : Intensité de rayonnement

Puisque les photons considérés sont monochromatiques, une relation analogue relie l'énergie

incidente I_0 du faisceau et son énergie après avoir traversé une épaisseur x . On peut aussi exprimer l'intensité de faisceau qui traverse la matière en fonction de l'atténuation $I = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x)$

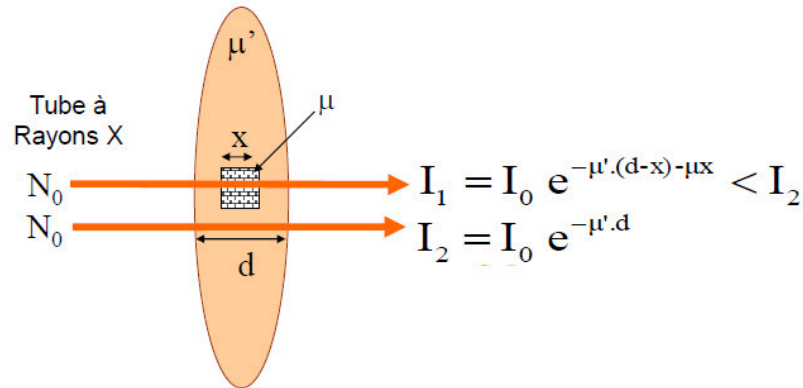
Dans le vide un faisceau de rayonnement électromagnétique émis à partir d'une source perd de son intensité à cause de la divergence dans l'espace de son faisceau, à la distance d de la source, l'intensité est : $I = I_0 / d^2$

Complément : Atténuation par plusieurs milieux

Si le faisceau traverse plusieurs milieux de coefficients d'atténuation différents : $\mu_1, \mu_2,$

$\mu_3 \dots \mu_i$, sur des épaisseurs $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i$ le nombre de rayons émergent sera :

$$N(x) = N_0 \cdot \exp^{-(\mu_1 \cdot x_1 + \mu_2 \cdot x_2 + \mu_3 \cdot x_3 + \dots + \mu_i \cdot x_i)} = N_0 \cdot \exp^{-\sum(\mu_i \cdot x_i)}$$



Coefficient d'atténuation massique

Afin de tenir compte de la densité d'un matériau, il est pratique d'utiliser la notion de coefficient d'atténuation massique: $\mu_m = \mu / \rho$

où ρ est la masse volumique du matériau (cm^3/g). Le coefficient d'atténuation massique a l'avantage d'être indépendant de l'état solide, liquide ou gazeux du matériau.

Dans ce cas, la loi d'atténuation s'écrit : $N(x) = N_0 \cdot \exp^{(-\mu_m \cdot X)}$ avec $X (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}) = \rho \cdot x$.

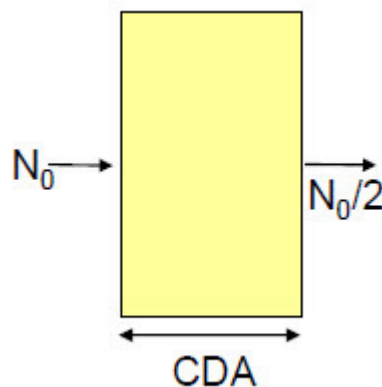
Complément : Couche de demi-atténuation

On appelle couche de demi-atténuation (CDA) ou l'épaisseur de matériau nécessaire pour atténuer d'un facteur

2 (diminuer de moitié) le nombre initial de photons : $N(\text{CDA}) = N_0/2 = N_0 \cdot \exp^{(-\mu \cdot \text{CDA})} \rightarrow \text{CDA} = \ln(2) / \mu$.

On peut donc également écrire la loi de d'atténuation en fonction du nombre n de CDA traversé : $N(n\text{CDA}) = N_0 / 2^n$.

Autre loi pour l'atténuation : $N(x) = N_0 / 2^{x/\text{CDA}}$.



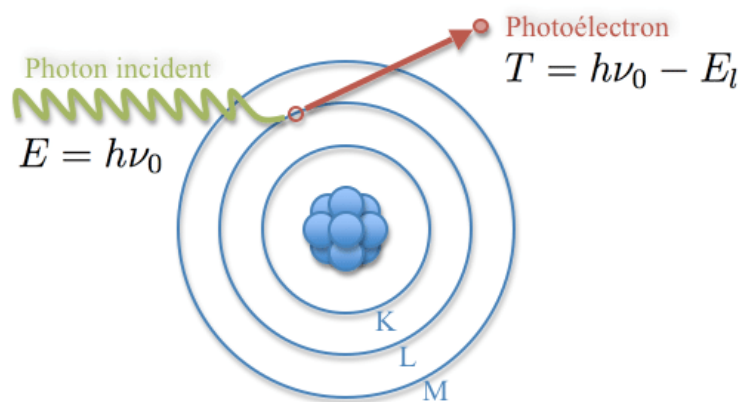
 *Complément : Libre parcours moyen*

Le libre parcours moyen R des photons est égal à l'inverse du coefficient d'atténuation et correspond à une épaisseur atténuant 37% des photons incident : $R=1/\mu$

L'Effet photoélectrique

II

Lorsqu'un photon incident entre en collision avec les électrons des couche interne (K,L...) d'un atome, la totalité de son énergie est absorbée par l'atome, le photon disparaît. Cette énergie est alors transférée à un électron qui est éjecté de sa couche électronique et emporte l'excédent d'énergie sous forme d'énergie cinétique. En appliquant le principe de conservation de l'énergie, ceci se traduit par : $E = h\nu_0 = E_l + E_c$ ou $h\nu$ est l'énergie du photon incident, E_l et E_c (T) énergie de liaison et énergie cinétique de l'électron éjecté, respectivement.



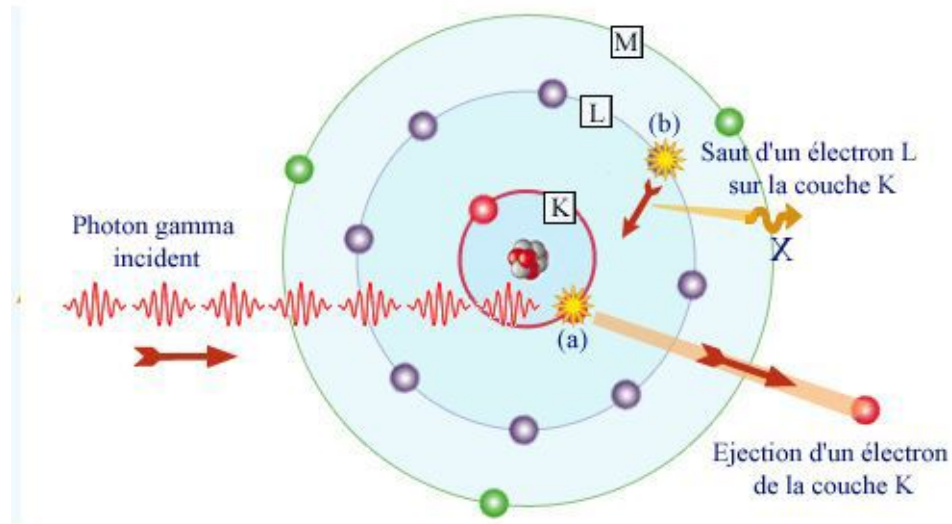
⚠ Attention

L'Effet photoélectrique ne peut avoir lieu que si l'énergie du photon incident est plus grande que l'énergie de liaison de l'électron.

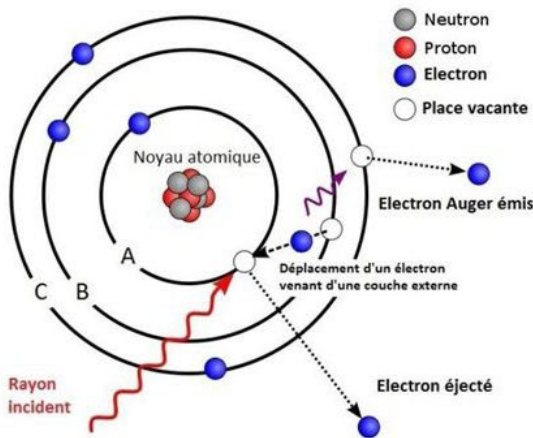
Le photo-électron va céder à son tour son énergie cinétique par des multiples ionisation dans le corps et excitation des atomes du corps

📦 Complément : Fluorescence et électron Auger

Quand l'atome est ionisée par le photon il va se trouver à l'état instable (ionisé) il retourne à son état stable par la transition d'un électron d'une couche périphérique vers l'endroit vacant, cette transition se fait par émission d'un rayon électromagnétique (fluorescence)



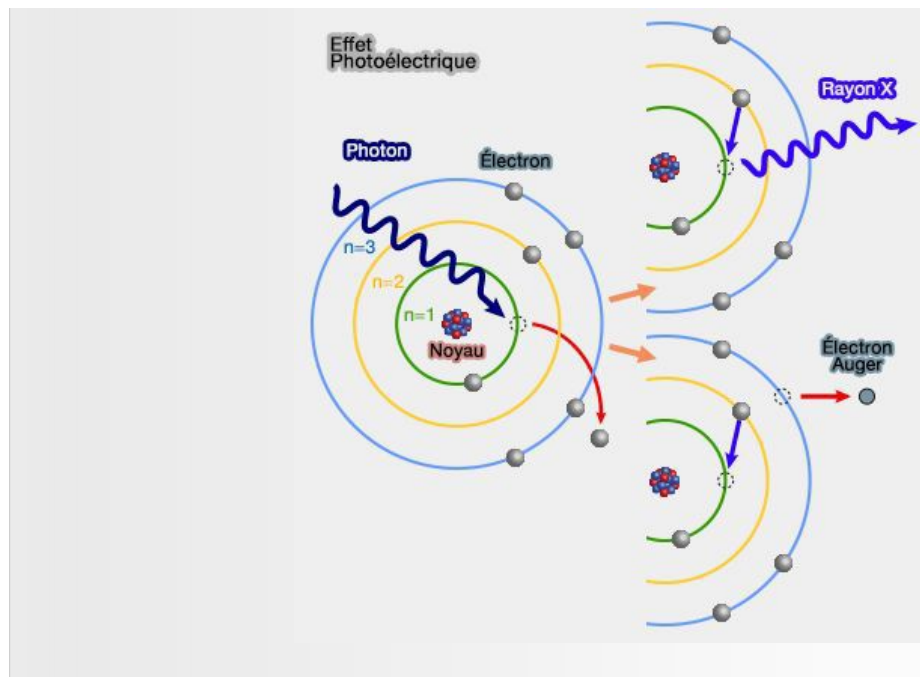
Le rayonnement produit peut également agir sur l'électron d'une couche externe et éjecter → un nouvel effet photoélectrique, mais l'électron aura une énergie cinétique plus faible (*électron Auger*).



$$E = E(A) - E(B) - E(C)$$

Fondamental

Il y a compétition entre fluorescence et effet Auger, L'effet Auger est d'autant plus important que le numéro atomique Z du matériau cible est faible



 *Attention*

La probabilité d'interaction par effet photoélectrique est d'autant plus grand que l'énergie du photon incident est voisin de l'énergie de liaison des électrons K et L.

 *Remarque : Coefficient d'atténuation de l'effet photo électrique*

τ est le coefficient linéaire lié à l'effet photoélectrique

τ/ρ est le coefficient d'atténuation massique

Relation approchée de Bragg et Pierre : $\tau/\rho \approx k \cdot (Z/E)^3$.

k est une constante qui ne dépend pas du matériau

ρ est la masse volumique et Z est le numéro atomique de de la matière cible

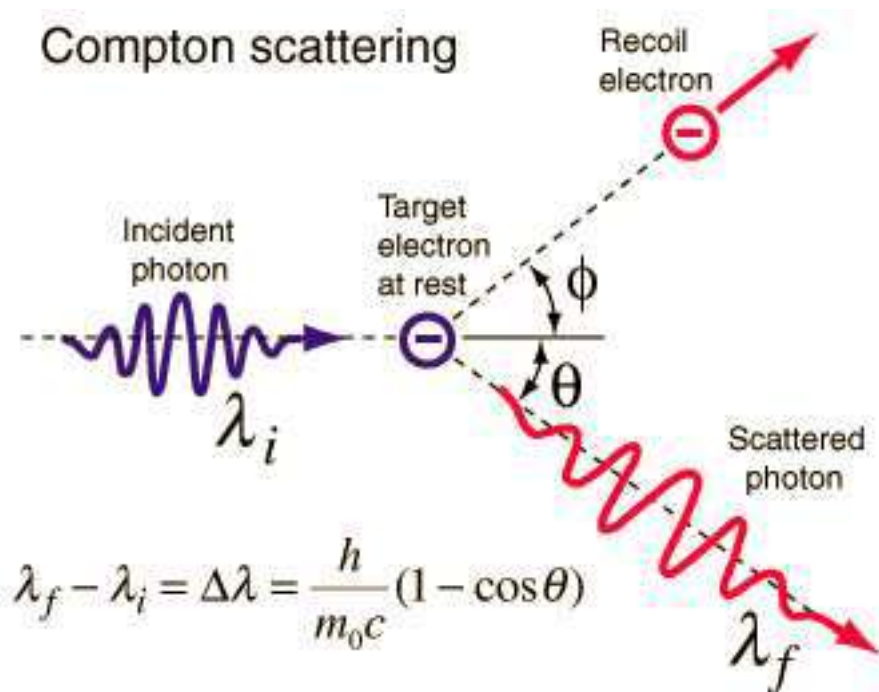
L'effet compton

III

Le photon incident va entrer en collision avec un électron libre ou peu lié du milieu. Cette collision élastique va entraîner la mise en mouvement de l'électron percuté (un électron compton ayant acquis de l'énergie cinétique) et l'émission d'un photon diffusé, suivant la loi $E = E' + E_c$

avec E' l'énergie du photon diffusé E l'énergie du photon incident et E_c est l'énergie cinétique de l'électron compton.

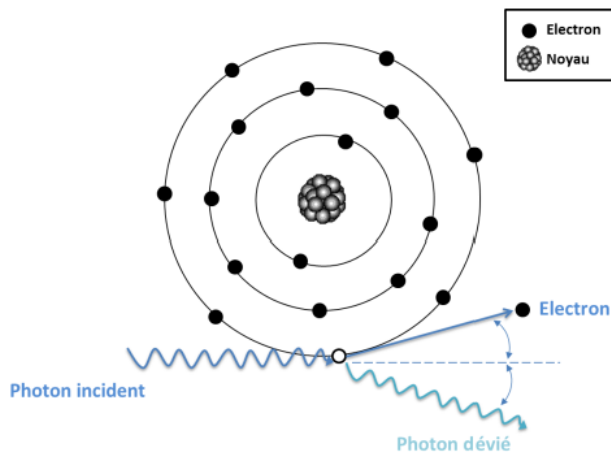
déplacement compton : $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{(m_0 \cdot c)} \cdot (1 - \cos(\theta)) = \lambda_c (1 - \cos(\theta))$



Complément

Énergie de l'électron compton : $E_c = E - E' = \frac{E^2 (1 - \cos \theta)}{m_0 \cdot c^2 + E (1 - \cos \theta)}$

Énergie du photon diffusé : $E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_0 \cdot c^2} (1 - \cos \theta)}$



⚠ Attention

La probabilité d'interaction par diffusion compton augmente avec l'inverse de l'énergie du photon et la densité du milieu

L'atténuation par diffusion compton n'est pas un phénomène d'absorption pure mais est la combinaison d'absorption et de diffusion.

L'effet Compton n'est possible que si l'énergie du photon incident est supérieure à l'énergie de liaison de l'électron

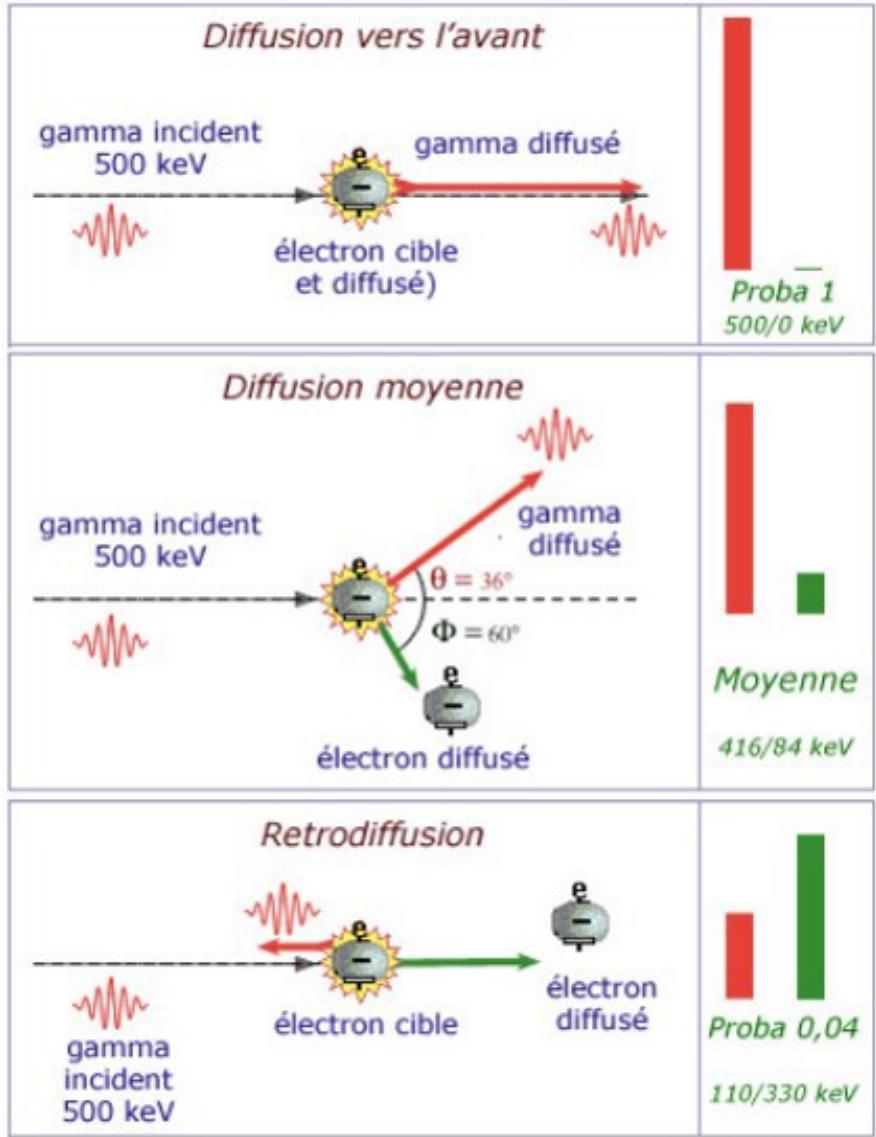
Lorsque l'énergie du photon incident croît, l'énergie emportée par l'électron Compton devient de plus en plus importante par rapport à celle du photon diffusé.

🔍 Remarque

Pour un angle $\theta=0^\circ$, le déplacement compton $\Delta\lambda$ vaut 0. Le photon est traversant et l'énergie cinétique de l'électron est presque nulle.

Pour un angle de $\theta=180^\circ$, la collision est frontale, et le déplacement compton $\Delta\lambda$ est alors maximale et égale à $2\lambda_c$. le photon est alors rétrodiffusion et l'énergie cinétique de l'électron est maximale.

Pour un angle $\theta=90^\circ$, la collision est tangentielle et le déplacement compton $\Delta\lambda$ vaut λ_c .



Remarque : Coefficient d'atténuation Compton

Il est indépendant de la matière irradiée, donc indépendant de Z, et décroît donc uniquement en fonction de l'énergie incidente : $\sigma/\rho \approx k/E$.

σ est le coefficient linéaire lié à l'effet photoélectrique.

σ/ρ est le coefficient d'atténuation massique.

k est une constante qui ne dépend pas du matériau

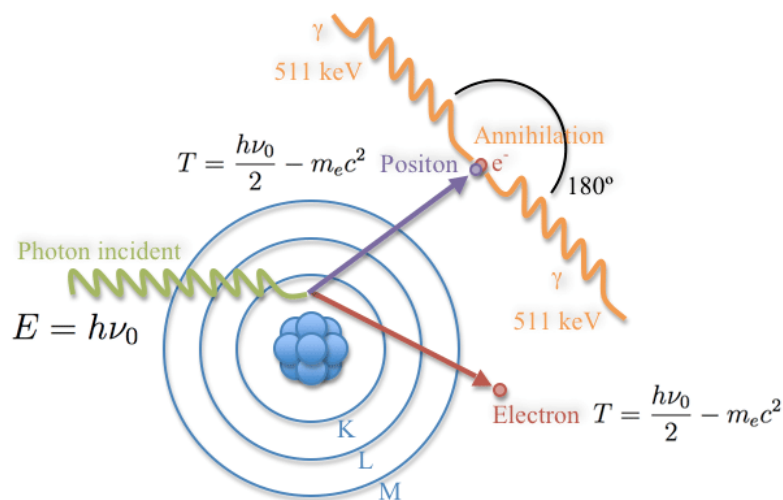
ρ est la masse volumique.

L'Effet matérialisation

IV

Lors de l'interaction d'un photon énergétique avec le champ électrostatique d'un noyau lourd, une paire de particule peut se matérialiser, on parle de création de paire ou matérialisation. d'après le principe de conservation de l'énergie : $E = h\nu_0 = 2m_e c^2 + E_c(\beta^+) + E_c(\beta^-)$ avec

$E_c(\beta^+)$, $E_c(\beta^-)$ représente l'énergie cinétique (T) de l'électron et le positron respectivement.



Remarque

On comprend que cette production de paire impose un minimum d'énergie de 1.022 MeV ($2m_e c^2$) pour pouvoir se réaliser.

Complément

Les deux particule créés partes ensuite dans la matière.

L'électron va céder son énergie cinétique on provoquant des excitation et des ionisation et se retrouve à l'état libre en fin de parcours.

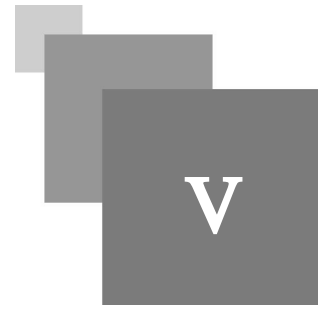
Le positon va lui se ralentir puis rencontrer un électron libre du milieu et s'annihiler en donnant naissance à deux photo γ d'énergie 511KeV émis à 180° l'une de l'autre

Attention

La production de paire est un phénomène d'absorption pure

La probabilité de production de paire augmente avec l'énergie du photon incident et est proportionnelle au numéro atomique Z du matériau.

Importance relative de chacun des 3 effets



Pour les photons traversant un milieu donné, les trois phénomènes précédemment décrits peuvent se produire simultanément mais avec une probabilité différente selon l'énergie du photon et la nature du milieu. on peut écrire la loi d'atténuation sous forme suivante :

$$N(x) = N_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x) = N_0 \cdot \exp(-\tau \cdot x) \cdot \exp(-\sigma \cdot x) \cdot \exp(-\pi \cdot x)$$

⚠ Attention : Coefficient d'atténuation des différents effets

Pour analyser la variation du coefficient d'atténuation linéaire μ , il est nécessaire de distinguer les coefficients d'atténuation linéaires relatifs à chacun des trois processus élémentaires fondamentaux décrits précédemment et qui peuvent se produire individuellement ou simultanément. Il faut donc étudier la probabilité d'interaction (ou d'absorption) relative à chacun des 3 effets.

τ : coefficient d'atténuation linéaire pour l'effet photoélectrique,

σ : coefficient d'atténuation linéaire pour l'effet Comptons,

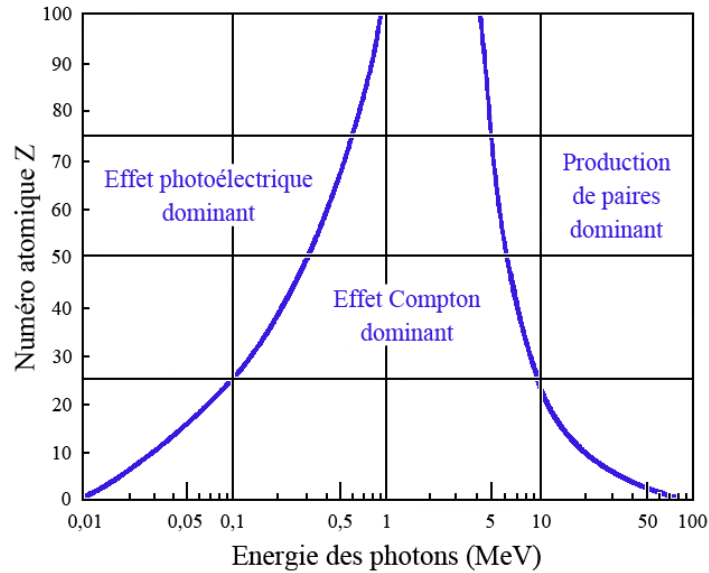
π : coefficient d'atténuation linéaire pour l'effet matérialisation.

On peut écrire alors $\mu = \tau + \sigma + \pi$

et aussi : $\mu/\rho = \tau/\rho + \sigma/\rho + \pi/\rho$ si on considère les coefficients d'atténuation massiques.

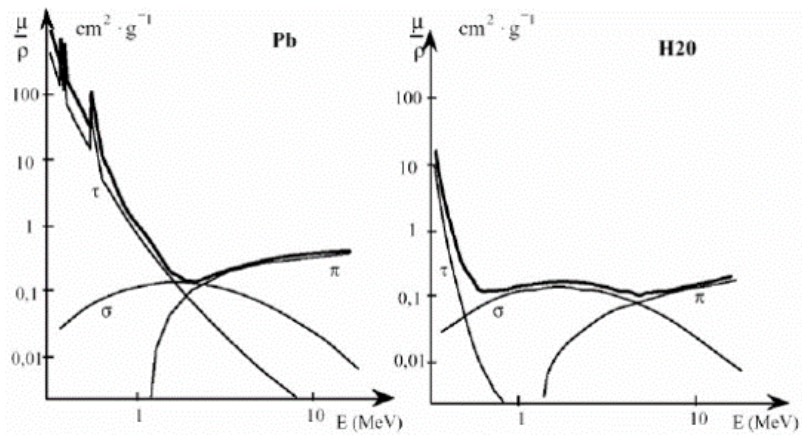
📦 Complément

De façon générale, l'effet photoélectrique est majoritaire pour des photons d'énergie faible (<500 keV) ; la création de paires est d'autant plus importante pour les photons de haute énergie (>5MeV) entrant en interaction avec les atome de grand Z ; l'effet compton se produit principalement pour les éléments à faible Z et pour des énergie intermédiaires.



Remarque

Les limite entre ces domaines énergétiques ne sont pas fixes et dépendent de la matière traversée. la figure suivante donne une représentation de la prédominance des trois effet en fonction du coefficient d'atténuation massique μ_m dans les tissu l'eau et le plomb.



On s'aperçoit alors que l'effet photoélectrique domine pour des énergie de photon faible, puis c'est l'effet compton qui domine largement à des énergie intermédiaire

Attention

Par rapport au faisceau incident

- Effet photoélectrique → Absorption totale du photon (on ne voit rien à l'image)
- Effet Compton → Absorption partiel du photon (utilisé en imagerie)
- Effet matérialisation → absorption totale (utilisé en thérapie)

Par rapport a la cible

- Effet photoélectrique → Électron K ou L (profond)
- Effet Compton → Électron périphérique

- Effet matérialisation → Noyau

☞ *Exemple : Application des Rayon X en médecine*

En médecine, on utilise pas de photons incidents de plus de 1.3 MeV.

- En radio diagnostique, les photons sont compris entre 60 et 140 keV pour qu'on ait a la fois un effet photoélectrique et un effet compton en fonction de Z.
- Pour la radiothérapie , les photons sont compris entre 200 et 250 keV