

**INTERACTION ENTRE
RAYONNEMENTS IONISANTS ET
MATIERE**

I-INTERACTIONS DES RAYONNEMENTS IONISANTS AVEC LA MATIERE

Lorsqu'un rayonnement ionisant traverse la matière, il se produit un certain nombre de phénomènes physiques. Ces phénomènes sont à la base de l'utilisation des rayonnements ionisants en médecine. Ils varient d'un rayonnement à un autre et dépendent de la nature du milieu traversé. Les rayonnements particulaires et les rayonnements électromagnétiques interagissent de manières différentes. Ils seront étudiés séparément.

I-1)-INTERACTION DES REM AVEC LA MATIERE :

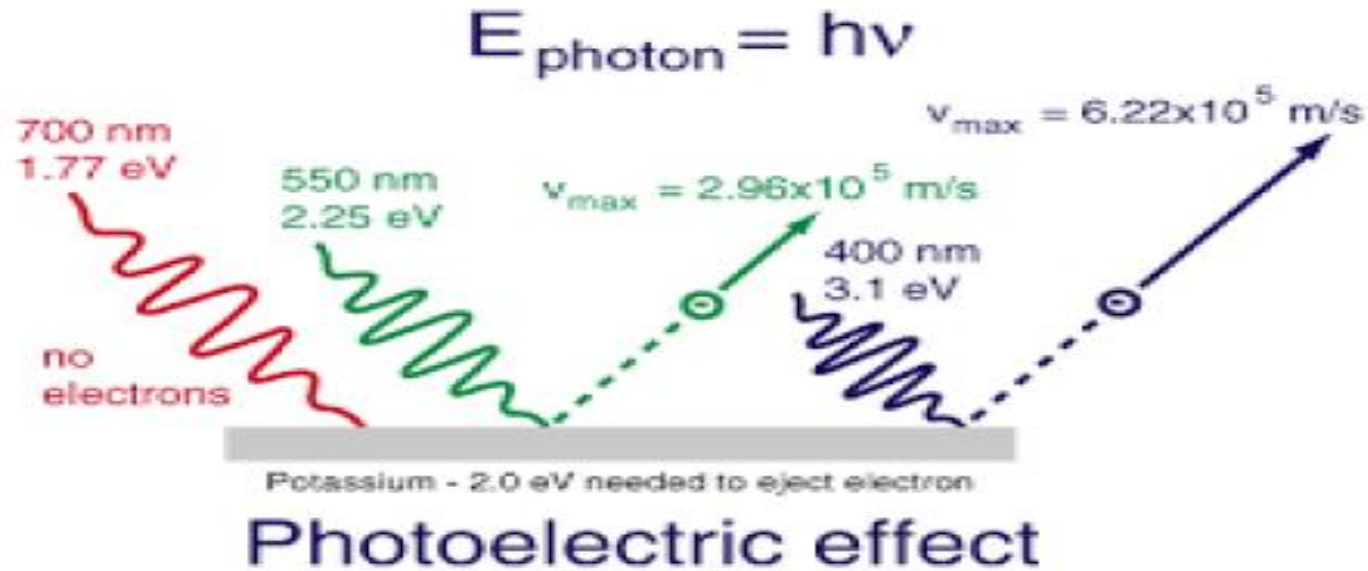
Lorsque les photons traversent un milieu matériel, ils peuvent interagir avec la matière en provoquant les différents effets suivants :

- Effet photoélectrique.
- Effet Compton.
- Production de paires.
- Aucune interaction.

1- L'EFFET PHOTOELECTRIQUE :

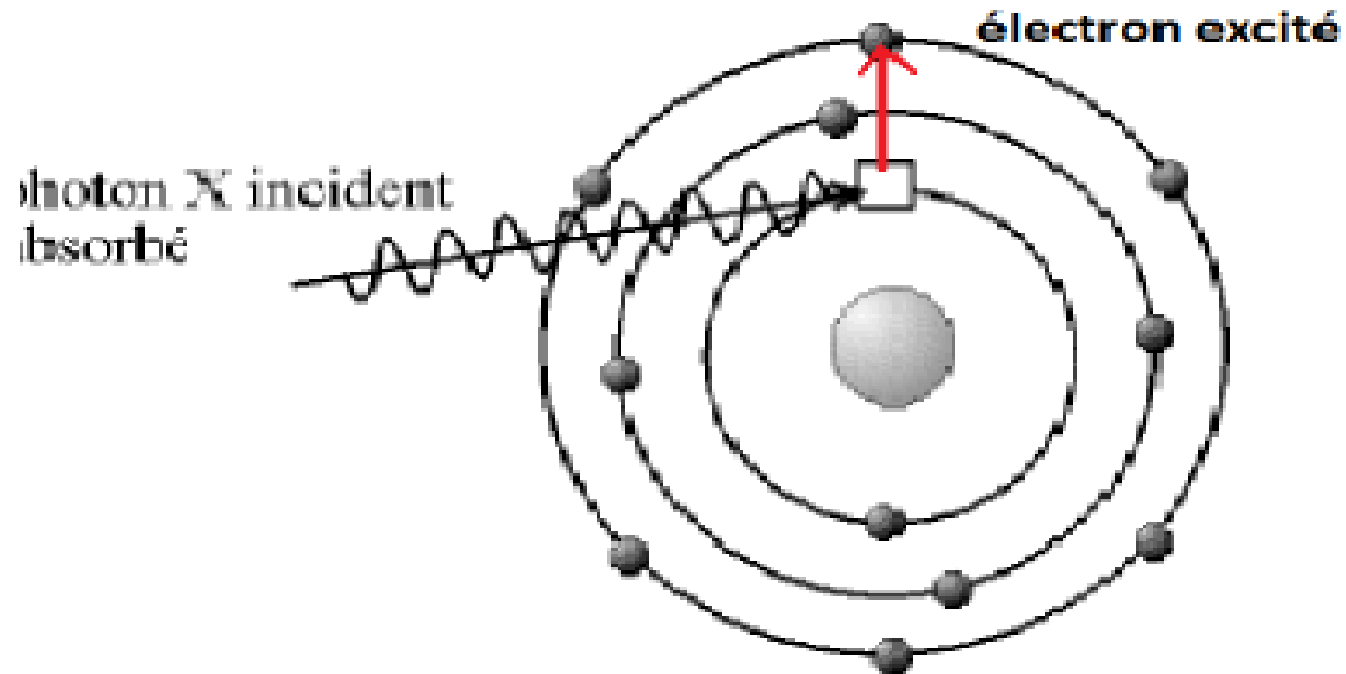
L'effet photoélectrique est **l'émission d'électrons** par un **matériau**, généralement métallique lorsque celui-ci est exposé à la **lumière** ou à **un rayonnement électromagnétique** de fréquence suffisamment **élevée** et ou **une énergie supérieure** à un certain seuil.

Ce phénomène a été expliqué en 1905 par **A. Einstein** en introduisant le concept de photons qui constituent le faisceau du REM, chacun de ces photons ayant une énergie $E = h\nu$. D'après cette explication, pour que **l'effet photoélectrique** se produise, il faut que: $E > W$: W étant **l'énergie de liaison** de l'électron émis.



- Les électrons ne sont émis que si la fréquence de la lumière est suffisamment élevée et dépasse une fréquence limite appelée **fréquence seuil**.
- Si l'énergie des photons est inférieure à cette valeur seuil, l'effet photoélectrique ne se produit pas même si l'on augmente l'intensité du faisceau (nombre de photons par unité de temps).
- Lorsque l'énergie est suffisante pour provoquer l'effet photoélectrique, et en augmentant l'intensité du faisceau, on augmente le nombre d'électrons émis.
- Si l'intensité des photons est constante, et que l'on augmente leur énergie, le nombre d'électrons émis n'augmente pas, mais c'est leur énergie cinétique qui va augmenter.
- Le phénomène d'émission photoélectrique se produit dans un délai très petit **<10⁻⁹ sec**.

- L'électron est éjecté de son orbite avec une énergie cinétique $E_c = E - W$ il est appelé **photoélectron**
- L'effet photoélectrique se produit avec les électrons des **couches internes**.
- **Excitation électronique:** Si $E < W$ mais $E = W_i - W_f$,
- Si l'énergie du photon n'est pas suffisante pour libérer l'électron mais qu'elle est égale à la différence d'énergie entre le niveau occupé par l'électron et un niveau supérieur, alors le photon est absorbé par l'électron qui va passer vers le niveau supérieur. Ce phénomène est appelé **excitation électronique**



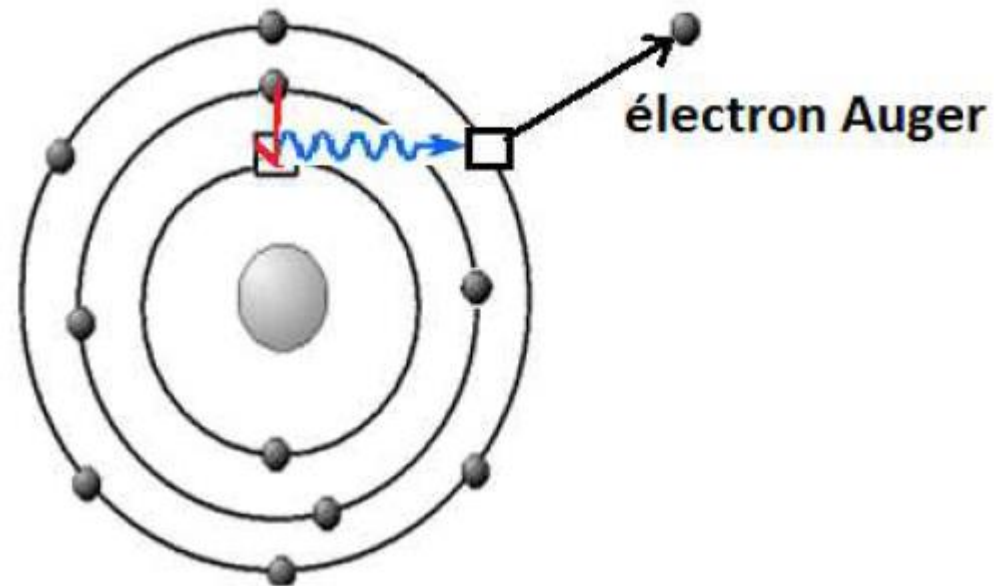
- Effet Auger

- Lorsque **le photoélectron est émis**, ou lorsqu'un électron passe vers un niveau supérieur par **excitation**, il va laisser un vide dans le niveau qu'il occupait, et donc l'atome devient **instable**. Car dans un atome stable les électrons occupent les niveaux énergétiques les plus bas. Pour **stabiliser** l'atome de nouveau, les électrons qui occupent les niveaux supérieurs vont descendre vers les niveaux les plus bas laissés vides. Ce mécanisme est appelé **le réarrangement électronique**. Lorsqu'un électron descend d'un niveau énergétique supérieur vers un niveau inférieur, il perd de l'énergie. Cette énergie perdue par l'électron est émise sous forme de photon appelé **photon de fluorescence**. Il a une énergie $E = W_f - W_i$

E : énergie du photon de fluorescence.

W(f): énergie de liaison du niveau final.

W (i) : énergie de liaison du niveau initial.



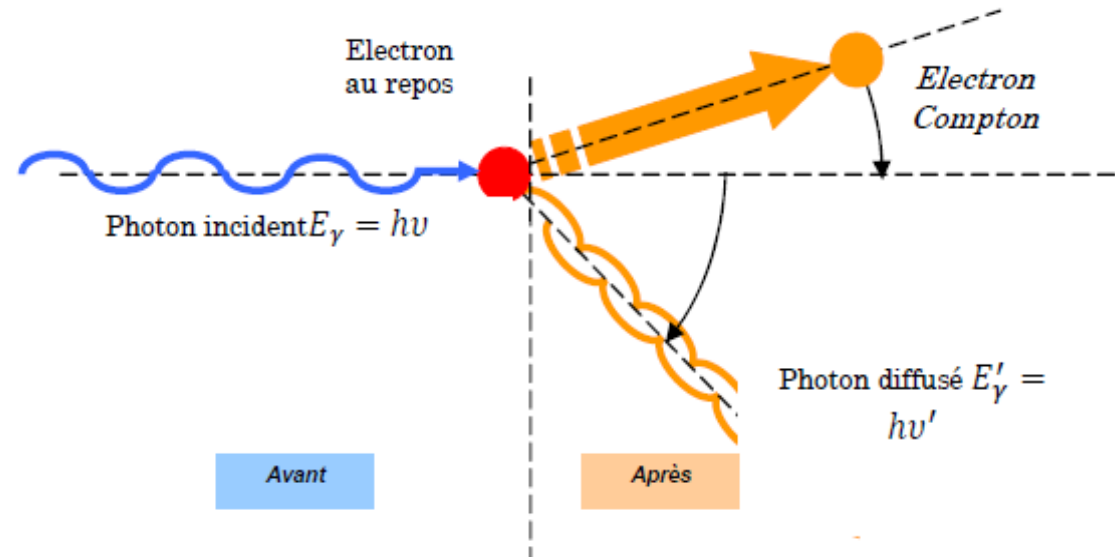
- Lorsqu'un photon de fluorescence est émis, et si son énergie est suffisante, il peut être absorbé par un électron qui va utiliser son énergie pour se libérer. Cet électron est appelé **électron Auger** et son énergie cinétique est $E_c = E - W_e$

E : énergie du photon de fluorescence.

W_e : énergie de liaison de l'électron.

2-L'EFFET (LA DIFFUSION) COMPTON:

L'effet Compton est une collision entre un photon et un électron faiblement lié au milieu matériel traversé. supposé au repos
Il lui transfère une énergie cinétique



Dans l'effet Compton, le photon incident n'est pas absorbé par l'électron mais est diffusé (changement de direction et de longueur d'onde)

En appliquant le principe de conservation de l'énergie on obtient :

$$h\nu + E_0 = h\nu' + E_T$$

- L'énergie au repos de l'électron est donnée par

$$E_0 = m_{e0}c^2$$

Son énergie totale est donnée par

$$E_T = m_e c^2 = m_{e0}c^2 + E_c$$

Sachant que E_c est l'énergie cinétique acquise par l'électron de Compton; alors

$$\begin{aligned} hv + m_{e0}c^2 &= hv' + m_e c^2 \Rightarrow hv - hv' = E_c \Rightarrow \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'} = E_c \\ \Rightarrow \left(\frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'}\right)^2 &= \left(\frac{hc}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{hc}{\lambda'}\right)^2 - 2\frac{h^2c^2}{\lambda\lambda'} = E_c^2 \end{aligned}$$

En appliquant le principe de conservation du vecteur quantité de mouvement on obtient :

$$\begin{aligned} \vec{p} &= \vec{p}' + \vec{p}_e \\ \Rightarrow \vec{p} - \vec{p}' &= \vec{p}_e \Rightarrow (\vec{p} - \vec{p}')^2 = \vec{p}_e^2 \Rightarrow \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'}\right)^2 - 2\frac{h}{\lambda}\frac{h}{\lambda'}\cos(\varphi) = m_e^2v^2 \end{aligned}$$

$$\vec{p} \cdot \vec{p}' = \|\vec{p}\| \cdot \|\vec{p}'\| \cos(\varphi) = \frac{h}{\lambda} \frac{h}{\lambda'} \cos(\varphi)$$

- On obtient

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{hc}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{hc}{\lambda'}\right)^2 - 2\frac{h^2c^2}{\lambda\lambda'} = E_c^2 \\ \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'}\right)^2 - 2\frac{h}{\lambda}\frac{h}{\lambda'}\cos(\varphi) = m_e^2v^2 \end{array} \right\}$$

$$2(1 - \cos(\varphi))\frac{h^2c^2}{\lambda\lambda'} = p_e^2c^2 - E_c^2$$

Par ailleurs,

$$E_T = m_e c^2 = \sqrt{(m_{e0}c^2)^2 + p_e^2c^2}$$

En effet,

$$(m_{e0}c^2)^2 + p_e^2c^2 = m_{e0}^2c^4 + \frac{m_{e0}^2v^2c^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = m_{e0}^2c^4 \left(1 + \frac{v^2}{c^2 - v^2}\right) = m_{e0}^2c^4 \frac{c^2}{c^2 - v^2} = \frac{m_{e0}^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}c^4 = m_e^2c^4$$

De ce fait,

$$E_T^2 = E_o^2 + p_e^2c^2 \Rightarrow E_T^2 - E_o^2 = (E_T - E_o)(E_T + E_o) = E_c \cdot (E_c + 2E_o) = E_c^2 + 2E_cE_o = p_e^2c^2$$

D'où,

$$p_e^2c^2 - E_c^2 = E_cE_o = \left(\frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'}\right)m_{e0}c^2$$

$$(1 - \cos(\varphi))\frac{h^2c^2}{\lambda\lambda'} = \left(\frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'}\right)m_{e0}c^2 \Rightarrow (1 - \cos(\varphi))h = (\lambda' - \lambda)cm_{e0}$$

$$\Rightarrow \lambda' = \lambda + \frac{h}{m_{e0}c}(1 - \cos(\varphi))$$

La variation de la longueur d'onde du photon est donnée par cette relation:

$$\lambda' = \lambda + \lambda_e (1 - \cos(\varphi))$$
$$\lambda_e = \frac{h}{m_{e0}c}$$

est appelée longueur d'onde de Compton, sa valeur est

$$\lambda_e = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8} = 0,242 \cdot 10^{-11} m$$
$$\frac{h}{m_0 c} = 0,024 \text{ \AA}$$

$$\Delta\lambda(\text{\AA}) =$$

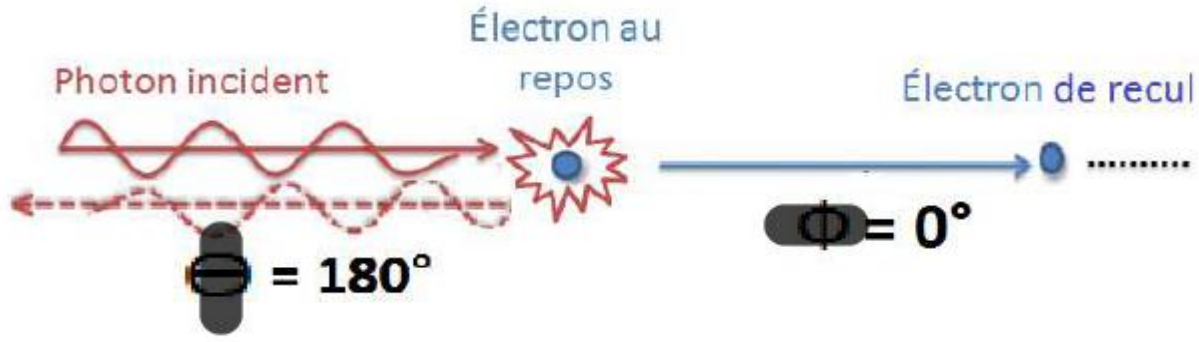
La relation précédente n'est valable que si les longueurs d'onde sont exprimées en \AA .

CAS PARTICULIERS

1- CHOC FRONTAL

Dans ce cas, l'électron de recul est projeté en avant dans la même direction que celle du photon incident ($\theta = 0$)

Le photon lui, après le choc, est retro diffuse, est diffuse dans la même direction initiale, mais dans le sens opposé ($\theta = 180^\circ$).



L'énergie cinétique de l'électron de recul est dans ce cas est maximale $E_c = E_{cmax}$

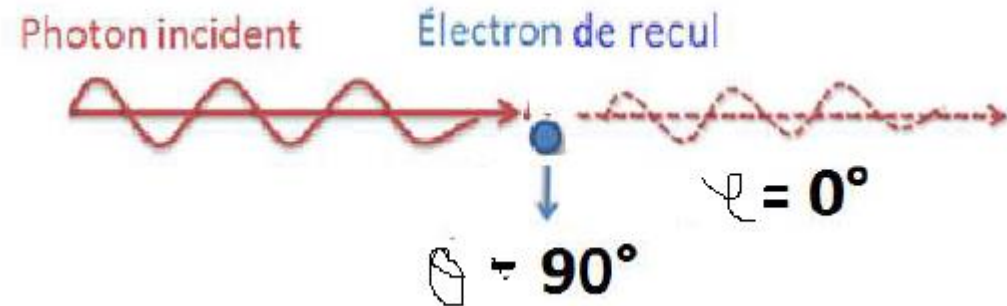
2- CHOC TANGENTIEL :

Dans ce cas le photon continue sur la même direction ($\theta = 0$ et l'électron est projeté avec un angle $\theta = 90^\circ$)

Donc on obtien

$$\lambda' = \lambda \leftrightarrow \Delta\lambda = 0$$

$$E_c = 0$$



• 4-Création de paires (matérialisation)

- Photons **très énergétiques** passant à proximité du noyau: le photon incident se **matérialise** sous forme d'un électron et d'un positon de même masse et de même énergie cinétique . Ces deux particules se partagent l'énergie du photon.
- L'électron et le positon épuisent leur énergie cinétique en ionisations et excitations.
- En appliquant le principe de conservation de l'énergie

$$E = (T^- + m_0c^2) + (T^+ + m_0c^2) = T^- + T^+ + 2m_0c^2$$

$$E = T + 1,022 \text{ MeV} \quad : \quad T = T^- + T^+$$

- E : énergie du photon.
- T- : énergie cinétique de l'électron.
- T+ : énergie cinétique du positon.
- Donc pour qu'un photon puisse créer une paire électron-positon

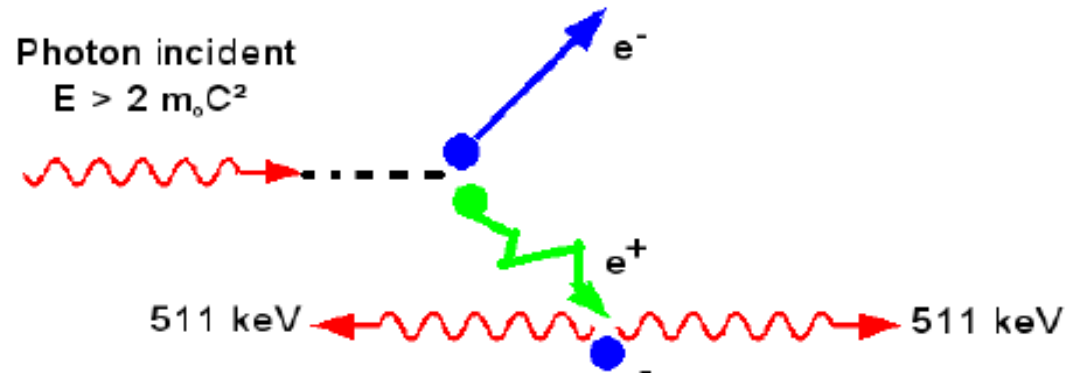
$$E \geq 2m_0c^2$$

$$E \geq 2,0,511 \text{ MeV}$$

$$E \geq 1,022 \text{ MeV}$$

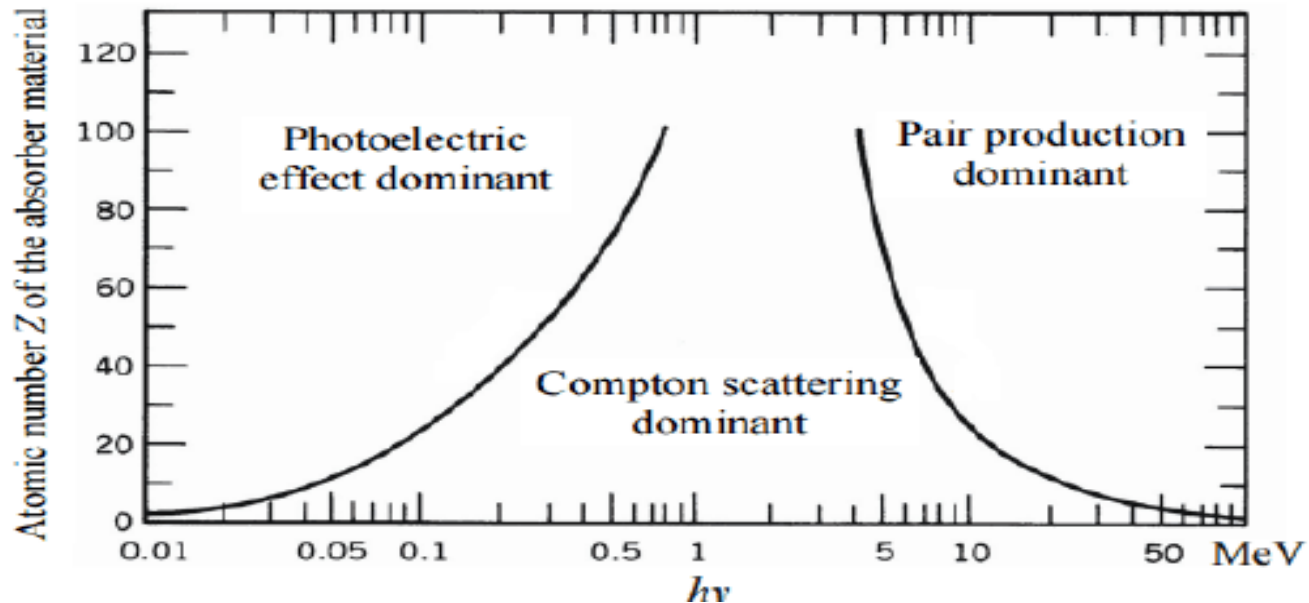
Annihilation positron, électron

À la fin de son parcours, le positon se combine à un électron en une réaction **d'annihilation** → donne naissance à **2 photons de 511 KeV** de directions opposées.



- lorsque le positon est pratiquement au repos, il va rencontrer un autre électron avec lequel il va s'annihiler. Cette annihilation va provoquer l'émission de deux photons ayant chacun une énergie $E = m_0 c^2 = 511 \text{ KeV}$.
- Ces deux photons sont émis dans la même direction mais dans des sens opposés.-

DOMAINES DE PREDOMINANCE DE CHAQUE PHENOMENE :



- L'effet photoélectrique prédomine à basse énergie et pour les matériaux lourds (Z élevé).
- L'effet Compton est prépondérant pour les énergies intermédiaires (imagerie) et pour les matériaux légers (faible Z).
- La matérialisation est le processus dominant pour les rayonnements d'énergie supérieure à quelques MeV et pour les matériaux lourds.

-Atténuation des REM

-Lorsqu'un faisceau de photons traverse un certain milieu, un certain nombre de ces photons est **absorbé**, alors que le reste des photons ne subira aucune interaction et sortira du milieu avec les mêmes caractéristiques initiales. Le phénomène d'absorption des photons est appelé **atténuation**. Les photons qui n'ont pas été atténués sont des photons **transmis**.

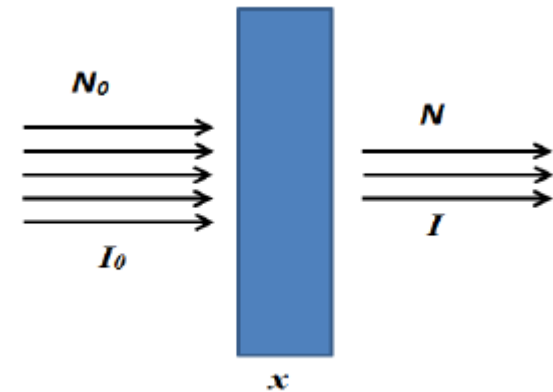
-le nombre de photons transmis est :

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

N représente le nombre de photons qui ont été transmis, qui n'ont pas été absorbés (qui n'ont subi aucune interaction).

l'intensité transmise du faisceau

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$



- μ : est le coefficient d'atténuation linéaire. Il représente **la probabilité d'absorption** d'un photon par unité d'épaisseur.
- Il dépend de: -la nature du milieu.
- l'énergie des photons.

$$\mu = \mu_{ph} + \mu_c + \mu_p$$

Il est constitué de trois composantes

- μ : coefficient d'atténuation par effet **photo électrique**.
- μ : coefficient d'atténuation par **effet Compton**.
- μ : coefficient d'atténuation par **production de paires**.
- La couche de **demi-atténuation (CDA)** est l'épaisseur du milieu nécessaire pour atténuer le nombre de photons incidents de moitié.
- sa dimension est L-1 et son unité usuelle est le cm-1.

Le nombre de photons qui ont été atténués (absorbés) est : $N_0 - N$.

Le pourcentage de photons transmis est donné par : $\frac{N}{N_0}$

Le pourcentage de photons atténués (absorbés) est donné par : $\frac{N_0 - N}{N_0}$

APPLICATIONS DE L'ATTENUATION DES REM:

- Radiographies X.
- Scanner X.
- Calcul de l'épaisseur du blindage de protection

- **II-INTERACTIONS DES PARTICULES CHARGÉES AVEC LA MATIÈRE**

- L'interaction que peut avoir une particule qui traverse un milieu matériel dépend de sa masse et de sa charge électrique. En effet, elle est soumise à deux types d'interactions : l'interaction newtonienne et l'interaction coulombienne qui sont respectivement proportionnelles à la masse et à la charge électrique de la particule considérée. Il est donc nécessaire de faire la différence entre les particules lourdes et les particules légères et entre les particules chargées et les particules neutres électriquement.

- **Intéraction avec les électrons du cortège électronique:**

L'interaction des particules avec les électrons se traduit par des collisions qui vont soit vers des ionisations soit vers des excitations électroniques.

- Les ionisations et les excitations vont conduire par la suite à l'émission de photons de fluorescence et peut-être des électrons Auger.

- **Intéraction avec le noyau de l'atome cible:**

Les interactions des particules chargées incidentes avec les noyaux du milieu traversé se traduisent par un infléchissement de la trajectoire de celles-ci. L'énergie cinétique perdue est émise sous forme **de rayonnement de freinage**.

- **Intéraction avec les atomes:**

Les interactions des particules chargées avec le milieu traversé sont complexes et nombreuses : ionisations, excitations, rayonnement de freinage, rupture des liaisons chimiques, etc.

L'énergie transmise à l'atome est transformée en énergie thermique (vibrations de l'atome).

- **TEL: transfert linéique d'énergie:**

- C'est la quantité d'énergie transférée au milieu cible par la particule incidente, par unité de longueur de trajectoire.
- Sont unité: **KeV/μm.**
- Plus le TLE est **grand** → plus une **grande quantité d'énergie** est cédée sur une **petite distance** ou épaisseur de tissu.
Plus le TLE est grand plus la particule est dangereuse pour les cellules.

$$TLE = \frac{E}{L}$$

E : énergie cédée par la particule.

L : parcours.

- **DLI: densité linéique d'ionisation**

- C'est le nombre de paires d'ions créées par la particule incidente, par unité de longueur de trajectoire.
Sont unité : **paires d'ions /μm.**

$$TEL = DLI \cdot W_i$$

W_i : l'énergie moyenne transférée pour chaque ionisation

III. LES RAYONS X

- Les rayons X (RX) sont des ondes électromagnétiques qui prennent naissance à chaque fois que des particules chargées (électrons en général), animées d'une vitesse suffisante, viennent heurter de la matière. Leur production est la conséquence directe des perturbations profondes subies par la structure de l'atome bombardé. L'émission de RX peut se produire spontanément dans la nature. Les rayons X sont, par, **définition: tous les photons produits à l'extérieur du noyau atomique.** Ils ont été découverts en **1895** par **Wilhem Röntgen**. Il prit la même année la première radiographie.
- Les rayons X sont un rayonnement électromagnétique (photons) comme les ondes radio, la lumière visible, ou les infra-rouge. Leurs longueurs d'ondes sont comprises approximativement entre **0,001 nanomètre et 10 nanomètres (10⁻¹² m et 10⁻⁸ m)**, correspondant à des fréquences de **3.1016 Hz à 3.1020 Hz**. L'énergie de ces photons va d'une centaine d' **ev** (électron-volt), à environ **1MeV**.
- Comme tous les rayonnements, les RX peuvent être absorbés par la matière qu'ils traversent, on dit qu'ils sont atténués. Cette propriété est très importante car elle est à la base de l'imagerie médicale utilisant les RX.

- **III-1 Applications des RX en médecine**

- **La radiographie**



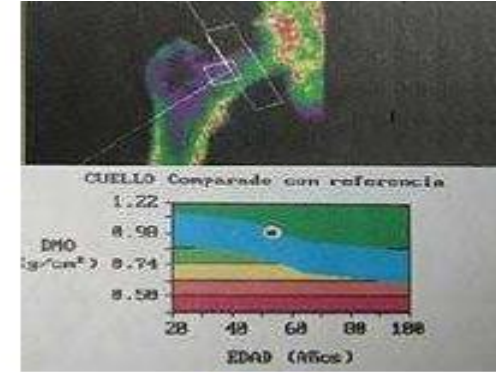
- **Le scanner (tomodensitoètre)**

Voir vidéo.



- **L'ostéodensitométrie :**

- C' est une modalité d'imagerie médicale qui permet de mesurer la densité de l'os, c'est-à-dire son contenu minéral. Ceci en utilisant la loi d'atténuation des RX.



- **La radiothérapie**

La radiographie est une technique d'imagerie qui utilise les RX pour visualiser un organe ou une partie du corps sur une pellicule photosensible. Par extension, le terme «radiographie » désigne également le cliché radiographique.

