

Cours 2

Interactions des rayonnements avec la matière



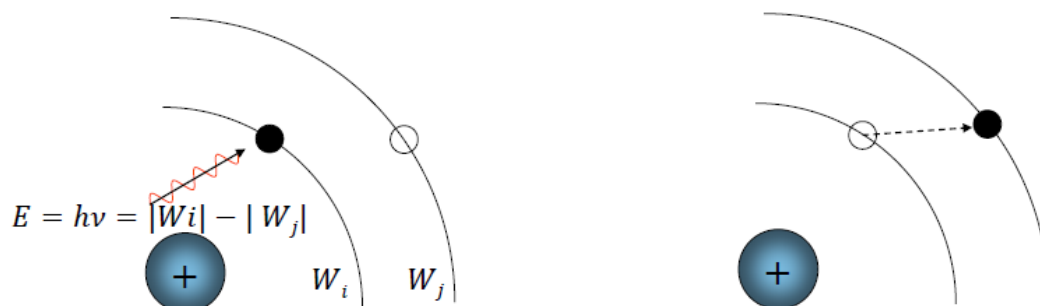
I. Interactions élémentaires

Les rayonnements traversant un milieu entrent en « collision » avec les éléments de ce milieu, qui sont principalement les **électrons**. Cette interaction se traduit par un échange d'énergie entre le rayonnement et la matière.

A. Interaction par excitation

Si l'énergie du photon incident ($E=hc$) est **inférieure** à l'énergie de liaison de l'électron ($|W_i|$) mais est exactement **égale** à l'écart entre deux énergies de liaison ($E = |W_i| - |W_j|$) :

- l'atome n'est plus dans son état fondamental, car l'électron change d'orbitale
- il y a **excitation**
- l'énergie absorbée est **quantifiée** : l'atome se retrouve avec un excès d'énergie $E = |W_i| - |W_j|$.

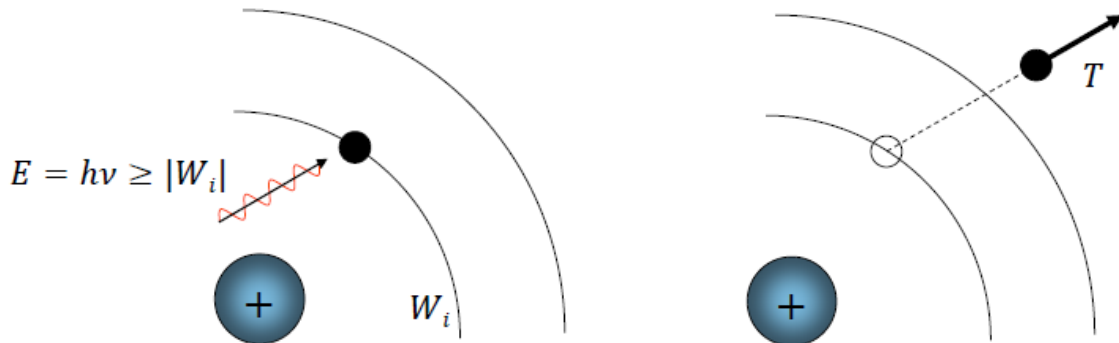


B. Interaction par ionisation

Si l'énergie du photon incident est supérieure ou égale à l'énergie de liaison de l'électron (soit $E = hc \geq |W_i|$) :

- l'électron est expulsé
- il y a **ionisation** de l'atome, qui passe alors de son état fondamental à un excès d'énergie $|W_i|$

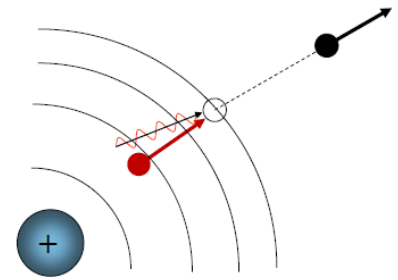
- l'énergie du photon incident se répartit entre l'énergie nécessaire pour expulser l'électron de l'atome et l'**énergie cinétique** de l'électron expulsé (T) tel que :
 $|W_i| + T = E = h\nu \quad \Leftrightarrow \quad T = h\nu - |W_i|.$
- l'énergie absorbée n'est **pas quantifiée**.



C. Caractère ionisant d'un rayonnement

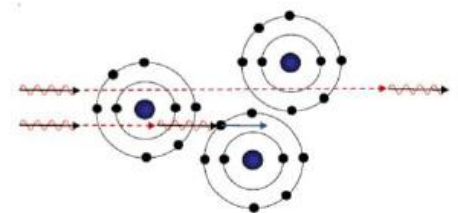
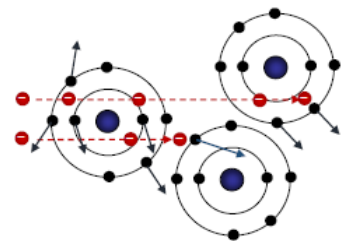
1. Définition

- Un **rayonnement ionisant** est un rayonnement électromagnétique ou corpusculaire capable de produire directement ou indirectement des **ions**.
- Les ions créés, à la base de la **détection des rayonnements** (systèmes d'imagerie, compteurs de particules, dosimètres, ...), induisent des **effets biologiques** (directs ou indirects sur l'ADN).



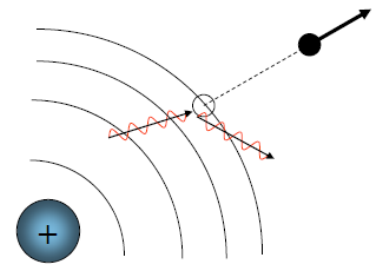
2. Rayonnements directement et indirectement ionisants

- Les particules **chargées** (α^{2+} , β^- , β^+ , e^- , p^+) sont **directement ionisantes** → **interaction obligatoire** avec la matière (elle-même chargée), sous la forme d'une interaction électrostatique.
- Certains rayonnements électromagnétiques et les particules **neutres** (photons γ et X, n_0^1) sont **indirectement ionisants** par les électrons mis en mouvement (γ , X) ou par les protons secondaires formés (n_0^1).
 → Interaction **non obligatoire** : balistique (ou statistique).



3. Caractère ionisant ou non des rayonnements électromagnétiques

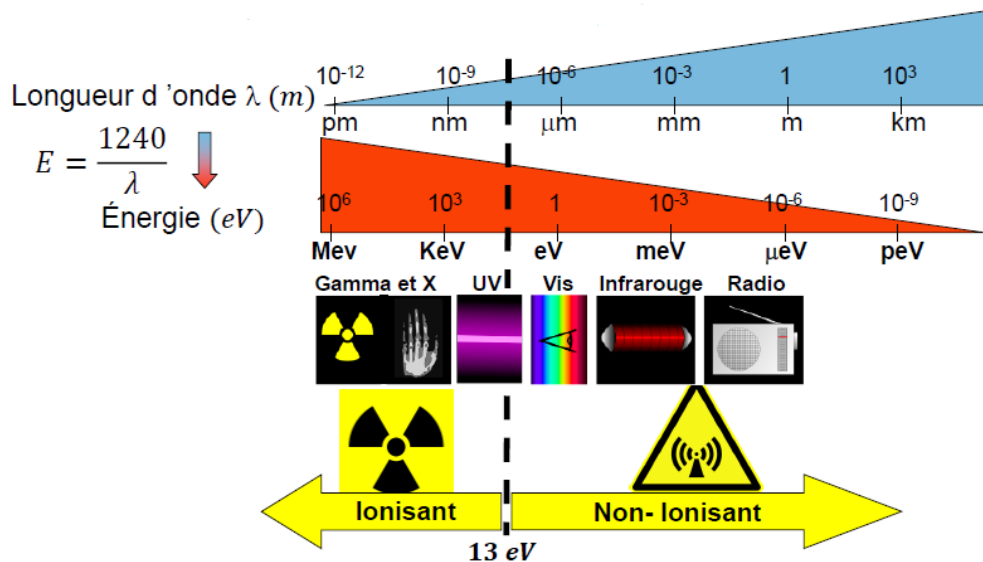
- Un rayonnement est dit **ionisant** si son énergie ($E=h\nu$) est supérieure à l'énergie de liaison de l'électron ($|W_n|$), permettant ainsi d'expulser cet électron de l'atome.



- Dans les milieux biologiques (essentiellement composés d'eau), on considère qu'un rayonnement électromagnétique est ionisant si $E > 13,6 \text{ eV}$ (cette valeur correspond à l'ionisation de H_2O).

Atome	$ W \text{ (eV)}$
C	11,24
H	13,54
O	13,57
N	14,24

- Spectre des rayonnements électromagnétiques :



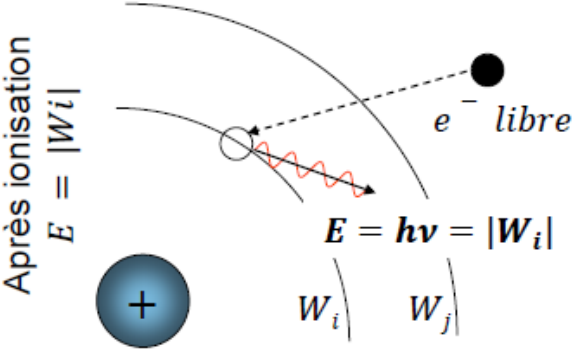
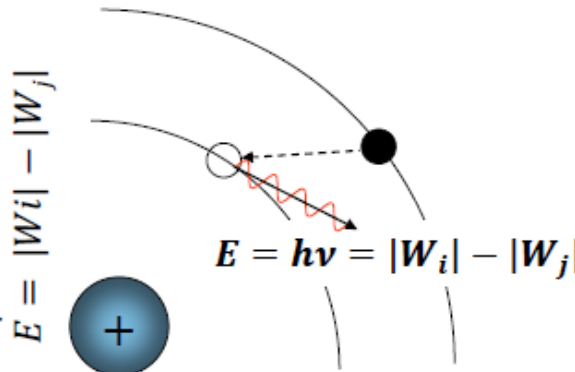
- ➔ Les rayons γ , X et une partie de l'UV ($E > 13 \text{ eV}$) sont **ionisants**.
- ➔ Le proche UV, le visible, les infrarouges et les ondes radio sont **non ionisants**.

II. Conséquences pour la matière

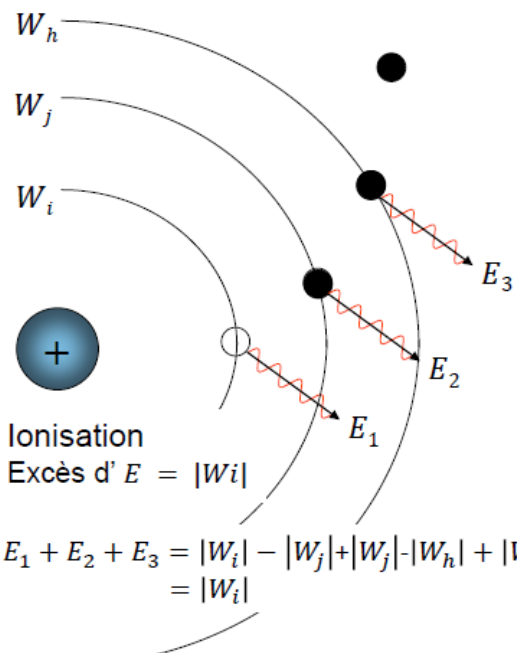
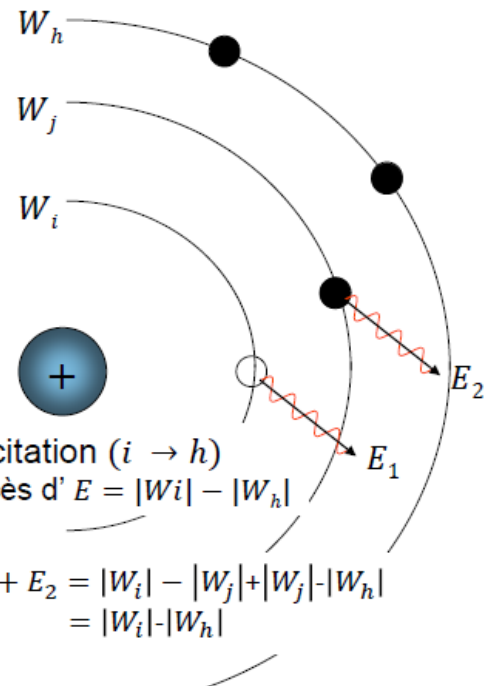
L'atome excité ou ionisé est **instable** car il n'est plus dans son état fondamental : il possède un **excès d'énergie**. Il a alors tendance à se désexciter pour retrouver son architecture initiale et restituer l'excès d'énergie.

A. Émission d'un photon de fluorescence

- Retour à l'état fondamental en 1 étape :

<ul style="list-style-type: none"> • Après une <u>ionisation</u> :  <p>Après ionisation $E = W_i$</p> <p>$E = h\nu = W_i$</p> <p>W_i W_j</p> <p>e^- libre</p>	<p>Un électron libre (qui n'appartient pas à l'atome) vient combler la case quantique vide sur la couche I</p> <p>→ Émission d'un photon de fluorescence d'énergie : $E = h\nu = W_i$</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Après une <u>excitation</u> :  <p>Après excitation $E = W_i - W_j$</p> <p>$E = h\nu = W_i - W_j$</p>	<p>Un électron d'une couche périphérique de l'atome prend la place (sur la couche I) de l'électron précédemment expulsé</p> <p>→ Restitution de l'énergie sous forme d'un photon de fluorescence d'énergie : $E = h\nu = W_i - W_j$</p>

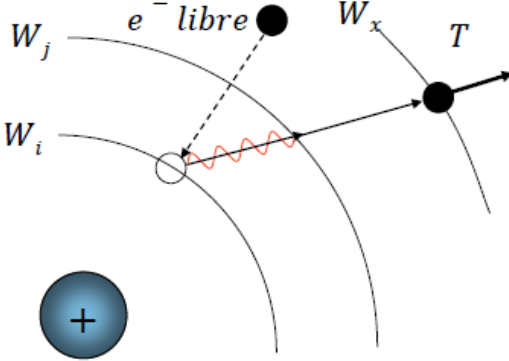
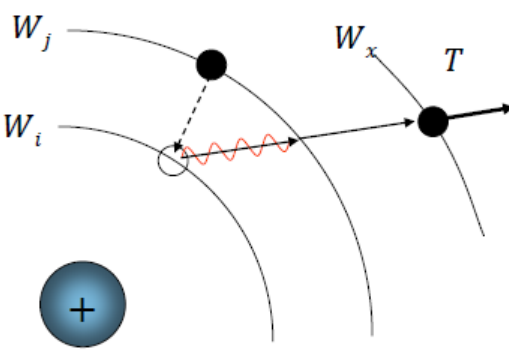
- Le retour à l'état fondamental peut également se faire en plusieurs étapes : on parle alors de **cascade de réarrangement** (le prof adore ça +++).

<p>• Après une <u>ionisation</u> :</p>  <p>Ionisation Excès d' $E = W_i$</p> $E_1 + E_2 + E_3 = W_i - W_j + W_j - W_h + W_h = W_i $	<p>Un électron de la couche I a été expulsé, donc l'atome a un excès d'énergie $E = W_i$</p> <ul style="list-style-type: none"> → Un électron de la couche J vient combler la case quantique vacante : cela engendre alors l'émission d'un photon de fluorescence d'énergie $E = W_i - W_j$ → Puis, un électron de la couche H passe à la couche J, induisant l'émission d'un photon de fluorescence d'énergie $E = W_j - W_h$ → Enfin, un électron libre passe sur la couche H : un photon de fluorescence d'énergie $E = W_h$ est émis.
<p>• Après une <u>excitation</u> :</p>  <p>Excitation ($i \rightarrow h$) Excès d' $E = W_i - W_h$</p> $E_1 + E_2 = W_i - W_j + W_j - W_h = W_i - W_h $	<p>Un électron est passé de la couche I à la couche H : l'atome possède donc un excès d'énergie $E = W_i - W_h$</p> <ul style="list-style-type: none"> → Passage d'un électron de la couche J à la couche I et émission d'un photon de fluorescence d'énergie $E = W_i - W_j$ → Un électron de la couche H vient ensuite combler la case quantique laissée vacante sur la couche J, induisant l'émission d'un photon de fluorescence d'énergie $E = W_j - W_h$

NB : que le retour à l'état fondamental se fasse en 1 seule ou plusieurs étapes, l'atome redevient **stable** en « rendant » l'excès d'énergie qu'il possédait avant les réarrangements.

B. Émission d'un électron Auger

Un photon de fluorescence peut lui-même expulser un électron de l'atome qui lui a donné naissance : c'est un **électron Auger** (le plus souvent périphérique dans l'atome).

<p>• Après une <u>ionisation</u> :</p>  <p>$T = hv - W_x = W_i - W_x$</p>	<p>(On reprend le 1^{er} exemple de la p.4) :</p> <p>Un électron libre (qui n'appartient pas à l'atome) vient combler la case quantique vide</p> <p>→ Émission d'un photon de fluorescence d'énergie : $E = hv = W_i$</p> <p>→ Ce photon expulse alors un électron périphérique de l'atome, qui se retrouve avec une énergie cinétique $T = hv - W_x = W_i - W_x$ (+++)</p>
<p>• Après une <u>excitation</u> :</p>  <p>$T = hv - W_x = (W_i - W_j) - W_x$</p>	<p>(On reprend le 2^e exemple de la p.4) :</p> <p>Un électron d'une couche périphérique de l'atome prend la place de l'électron précédemment expulsé</p> <p>→ Restitution de l'énergie sous forme d'un photon de fluorescence d'énergie : $E = hv = W_i - W_j$</p> <p>→ Le photon de fluorescence expulse alors un électron Auger d'énergie cinétique : $T = hv - W_x = (W_i - W_j) - W_x$ (+++)</p>

III. Interaction des photons avec la matière

En interagissant avec la matière, les photons peuvent être : absorbés, diffusés ou transmis.

A. Loi d'atténuation des photons dans la matière

- Quand un faisceau incident composé de $N(0)$ photons mono-énergétiques traverse une épaisseur x de matière, on observe une **diminution exponentielle** du nombre de photons transmis : c'est le phénomène d'**atténuation**.

- Le nombre de photons **transmis** est :

$$N(x) = N(0)e^{-\mu x}$$

❖ μ est le coefficient **linéique** d'atténuation

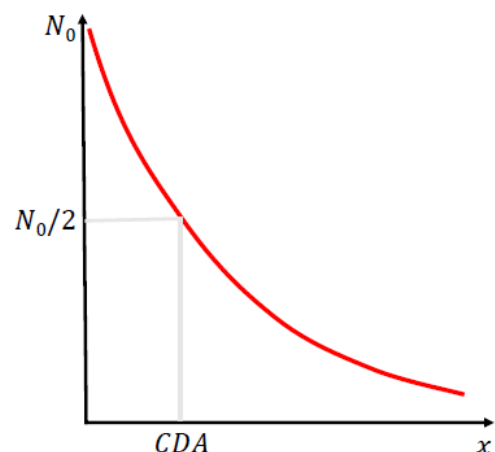
- Probabilité d'interaction par unité de longueur
- Dimension : en $[L^{-1}]$
- Dépend de l'énergie des photons et de l'état du milieu (compression, densité, ...)

❖ $\frac{\mu}{\rho}$ est le coefficient **massique** d'atténuation

- Dimension : en $[L^2M^{-1}]$
- Ne dépend pas de l'énergie des photons ni de l'état du milieu (compression, densité, ...)

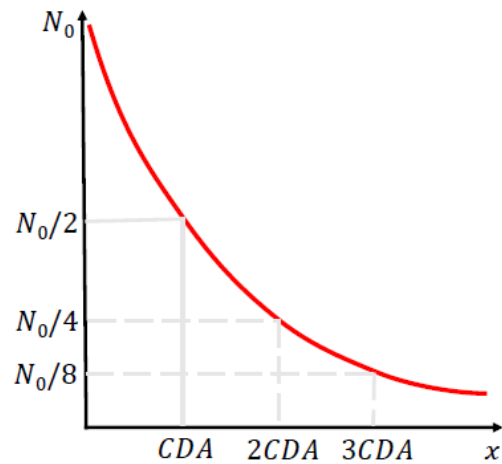
- La **Couche de Demi-Atténuation (CDA)** représente l'épaisseur diminuant le flux de photons d'un facteur 2 :

$$CDA = \frac{\ln 2}{\mu}$$



➔ Pour une distance de $k \times CDA$ (k étant un nombre entier), on a : $N(k \times CDA) = \frac{N(0)}{2^k}$ (+++)

x	$N(x)/N(0)$	%
CDA	$1/2$	50
$2 \times CDA$	$(1/2)^2$	25
$3 \times CDA$	$(1/2)^3$	12,5
$n \times CDA$	$(1/2)^n$	
$10 \times CDA$	$1/1024$	0,1

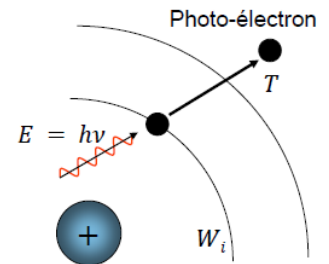


➔ L'absorption d'un faisceau de photon n'est **jamais totale**, mais on considère que le nombre de photons restants est **négligeable** quand on atteint **10 CDA**.

B. Mécanismes d'atténuation

1. Effet photo-électrique

- Transfert de la **totalité** de l'énergie du photon incident à un électron de l'atome ➔ **ionisation** de l'atome et l'électron est éjecté avec une énergie cinétique $T = hv - |W_i|$.

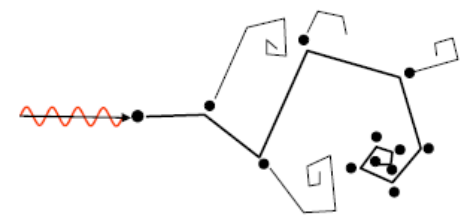


- Conséquences :

➤ Pour l'atome, **réarrangement** par émission de photons de fluorescence et électron Auger.

➤ Pour l'électron ionisé, perte de son énergie cinétique (T) par **ionisations successives** dans la matière.

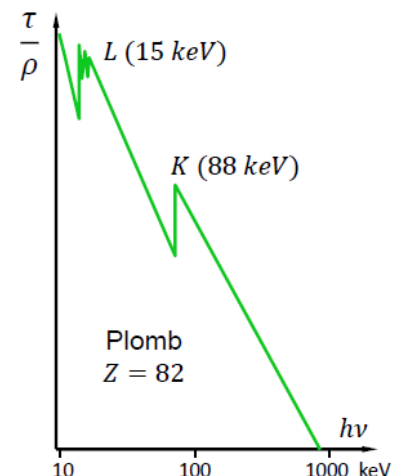
➤ **Disparition** du rayonnement car toute l'énergie est déposée dans la matière.



- La **probabilité d'interaction** par effet photo-électrique est notée τ ou τ/ρ , elle vaut :

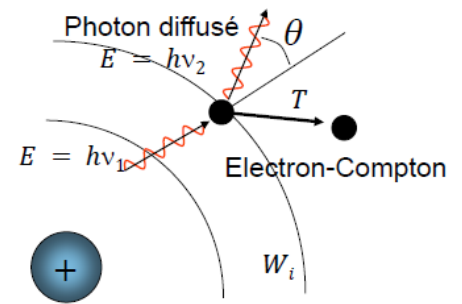
$$\frac{\tau}{\rho} = k \frac{Z^3}{(hv)^3}$$

➔ Probabilité élevée pour les **éléments lourds** (Z élevé) et les photons **d'énergie faible**.



2. Effet Compton

- Transfert **partiel** de l'énergie du photon incident à un électron périphérique de l'atome, faiblement lié, qui est arraché.
- Le reste de l'énergie est **diffusé** par le biais d'un photon, dans une direction faisant un angle θ avec la direction du photon incident.

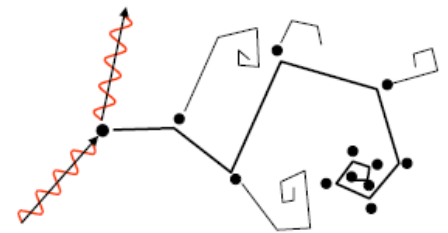


- Bilan énergétique : $h\nu_1 = T + h\nu_2 + |W_i|$.

- Conséquences :

➤ Pour l'atome, **réarrangement** par émission de photons de fluorescence et électron Auger.

➤ Pour l'électron ionisé, perte de son énergie cinétique (T) par **ionisations successives** dans la matière : c'est l'**énergie absorbée** (ou transférée) par la matière, notée E_a .



➤ Une partie du rayonnement est **diffusée** : $E_d = h\nu_2$.

- Formules de Compton :
$$\frac{E_{\text{absorbée}}}{E_{\text{diffusée}}} = \frac{T}{h\nu_2} = \frac{h\nu_1(1 - \cos\theta)}{mc^2}$$

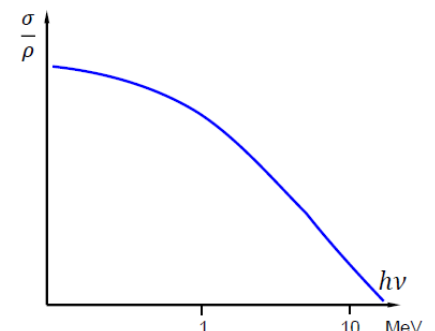
- Effet de l'angle θ :

<p>➤ Si $\theta = 0$: choc tangentiel, l'énergie diffusée est maximale</p>	<p>➤ Si $\theta = \pi$: choc frontal, l'énergie cinétique de l'électron est maximale</p>
--	--

- Plus l'énergie $h\nu_1$ est élevée, plus le rapport E_a/E_d est élevé.

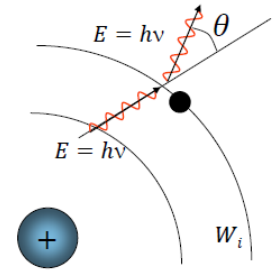
- La **probabilité d'interaction** par effet Compton est notée σ ou σ/ρ , elle vaut :
$$\frac{\sigma}{\rho} = k \frac{1}{h\nu}$$

➔ Probabilité élevée pour les photons de **faible énergie**, mais **indépendante** de la nature de la matière (Z).



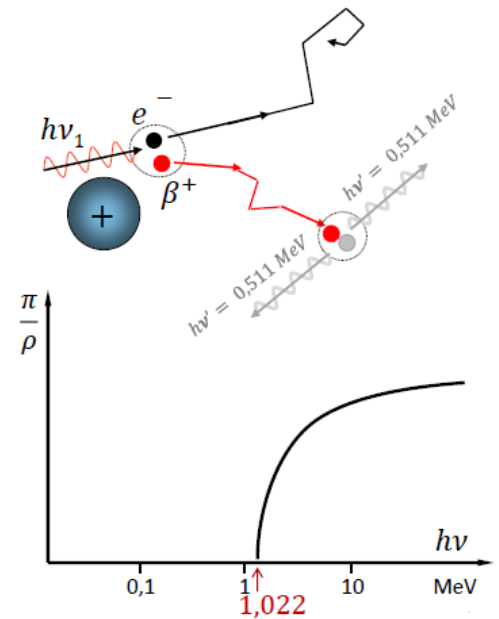
3. Diffusion de Thomson-Rayleigh

- **Dévi**ation du photon incident sans changement d'énergie.
- Phénomène important pour les photons **peu énergétiques** (IR, visible, UV).
- Négligeable pour les photons X et γ .



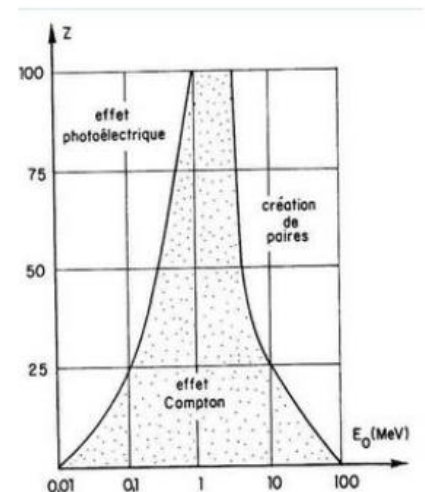
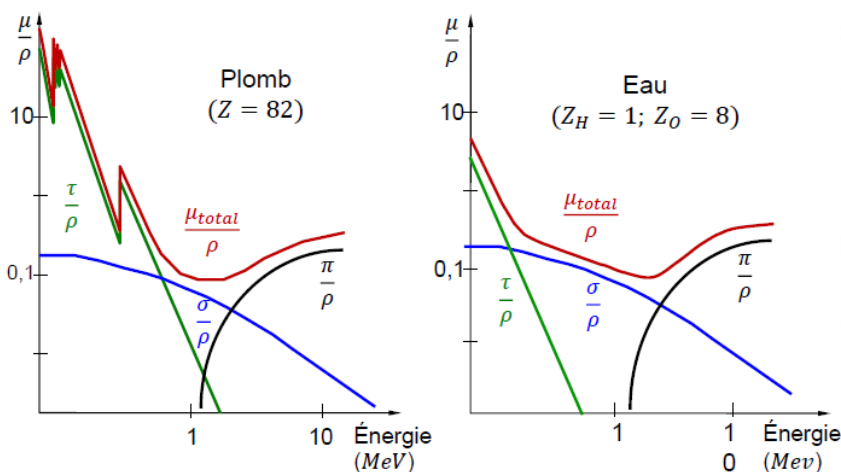
4. Création de paire (ou matérialisation)

- Un photon **très énergétique** passant à proximité d'un noyau voit son énergie transformée en 2 particules → création d'une **paire e^- / β^+** .
- La probabilité d'interaction est notée π ou π/ρ → **indépendante** de la nature de la matière.
- $\pi/\rho = 0$ en dessous du seuil de **1,022 MeV (++)** = énergie équivalente à la masse d'une paire e^- / β^+ .
- La réaction inverse est **l'annihilation** : un positon et un électron entrant en collision disparaissent pour donner **2 photons** de chacun **511 keV**.



C. Importance relative des mécanismes d'interaction

- **L'énergie** du rayonnement (E_0) et la **nature** du milieu (Z) influent sur l'atténuation.



- La principale différence entre le plomb et l'eau se situe au niveau des faibles énergies, car l'**effet photo-électrique** est plus important pour les atomes ayant un Z élevé.

IV. Interaction des particules

A. Interaction des neutrons avec la matière

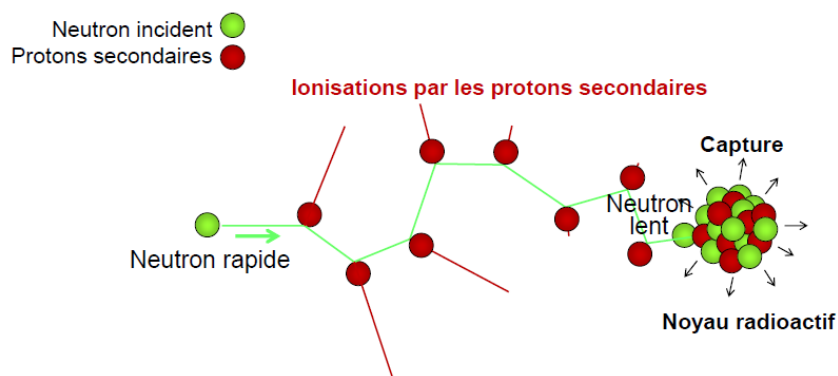
- Interaction par choc direct avec les **noyaux**.
- **Faible** probabilité d'interaction, donc les neutrons sont **très pénétrants**.

1. Neutrons rapides (énergie cinétique élevée)

- Dans les milieux riches en hydrogène (masse de H \approx celle du neutron) → **transfert d'énergie maximal**. Le noyau d'H percuté est expulsé avec une certaine énergie cinétique : ce **proton secondaire** va ensuite provoquer des ionisations secondaires. Les neutrons rapides sont donc **indirectement ionisants**.
- Dans les milieux composés de noyaux lourds, les neutrons perdent peu d'énergie et « rebondissent » sur les noyaux : c'est la **diffusion**.

2. Neutrons lents = thermiques (énergie cinétique faible)

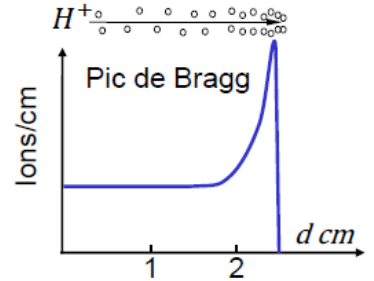
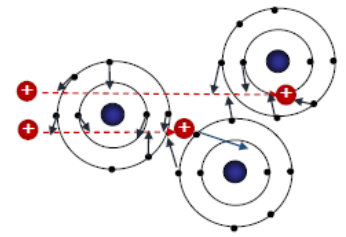
- Ils sont **absorbés** par les noyaux et donnent lieu à des transformations radioactives → c'est une capture nucléaire = **capture « radiative »**.



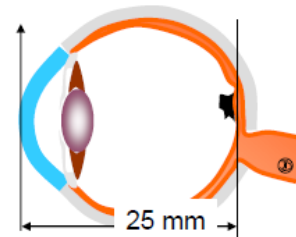
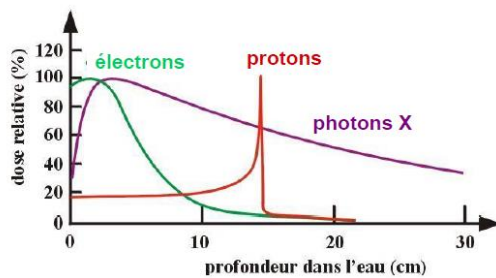
B. Interaction des particules chargées positivement avec la matière

- Interaction **électrostatique** avec les électrons de la matière → particules **directement ionisantes**.

- Masse supérieure à celle de l'électron donc :
 - Transfert d'énergie par **faibles quantités** beaucoup plus probable
 - Nombreuses **ionisations**, avec ionisations secondaires.
 - Peu de fluctuation de trajectoire.
- Pouvoir d'arrêt **très élevé** :
 - Parcours court
 - Effets biologiques importants
 - Maximum d'ionisation en fin de parcours = **pic de Bragg**.



- Dans la **radiothérapie externe** : utilisation des ionisations des rayonnements pour le traitement des cancers. Le choix du type de rayonnement se fait en fonction des effets souhaités.
- ➔ **Exemple** : **protonthérapie** des mélanomes de la choroïde (dans l'œil), avec des protons de 65 MeV (comme dans le Cyclotron) qui sont déposés à une distance bien précise (25 mm) pour ne pas léser le nerf optique situé plus en profondeur.



C. Interaction des électrons avec la matière

2 types d'interaction :

- Avec les **électrons** de la matière ➔ les électrons sont ici directement ionisants. Il y a des collisions « lointaines » (nombreuses) et « proximales » (rares).
- Avec les noyaux de la **matière**.

CONCLUSION

- Quand les Rayonnements Ionisants (RI) traversent la matière, ils perdent progressivement leur énergie en y provoquant des **ionisations**.
- L'importance de ce transfert d'énergie dépend du **type de RI**, de son **énergie** et des **milieux traversés**.

