



Biophysique

Particules, ondes, atomes et interactions des rayonnements ionisants avec la matière.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique

- Röntgen découvre les rayons X en 1895.
- Henri Becquerel, Marie et Pierre Curie découvre la radioactivité NATURELLE, prix nobel en 1903
- Marie Curie décroche le prix Nobel de chimie en 1911 pour avoir isolé le polonium et le radium
- Irène Joliot-Curie découvre la radioactivité ARTIFICIELLE en 1934

ATTENTION : pour la suite du cours il est important de différencier la provenance des rayons X et de la radioactivité. Les premiers viennent du cortège électronique de l'atome alors que la radioactivité provient du noyau.

2. Généralités et unités

$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X$

On représente un atome par son écriture dans la classification de Mendeleïev, A le nombre de masses (nombres de nucléons), Z le nombre de protons. Dans des atomes non ionisés le nombre Z est donc aussi égal au nombre d'électrons de l'atome.

La masse de l'atome peut être caractérisée de différentes façons :

- La masse molaire atomique (en g) : la référence fut prise sur le carbone 12 donc 1 mole (N atomes, N étant la constante d'Avogadro = $6,02 \cdot 10^{23}$) pèse 12g.

	Hydrogène	Carbone	Oxygène
Masse en g	$0,17 \cdot 10^{-23}$	$2 \cdot 10^{-23}$	$2,65 \cdot 10^{-23}$
Masse atomique en g	1,007	12	15,994
A	1	12	16

$N \times$ masse d'un atome en gramme = masse molaire atomique

- L'unité de masse atomique (u) : définie comme $1/12^{\text{ème}}$ de la masse d'un atome de carbone 12, c'est donc l'inverse de la constante d'Avogadro.

$$1u = 1/N$$

On peut alors remarquer que le nombre de masse A est l'entier le plus proche de la masse atomique exprimée en gramme mais aussi de l'unité de masse atomique de l'atome.

$$1 \text{ u} = 2 \cdot 10^{-23} / 12 = 0,166 \cdot 10^{-23} \text{ g}$$

Exemple : la masse molaire de l'oxygène est 15,994g, un atome d'oxygène pèse 15,994u, l'oxygène a donc 16 nucléons.

Masse	Hydrogène	Carbone	Oxygène
d'un atome en g	$0,17 \cdot 10^{-23}$	$2 \cdot 10^{-23}$	$2,65 \cdot 10^{-23}$
d'une mole d'atomes en g <i>masse atomique</i>	1,007	12	15,994
d'un atome en unité de masse atomique	1,007	12	15,994
A nombre de masse (nombre de nucléons)	1	12	16

3. Masse et énergie

Tout objet matériel voit sa masse variée selon sa vitesse. On parle alors de masse relativiste, elle se

calcule selon la formule :
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

On remarquera que si la vitesse de l'objet est faible devant la vitesse de la lumière, $m \approx m_0$.

m : la masse relativiste en kg
 m_0 : masse initiale en kg
 V : vitesse de la particule en m/s
 C : célérité de la lumière dans le vide = $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Au repos cette masse peut être considéré comme une énergie selon la formule d'Einstein :

$$E_0 = m_0 c^2$$

En mouvement, l'objet en plus de son énergie de masse (E), l'objet acquiert aussi de l'énergie cinétique (E_C), on a donc une énergie totale (E_T) :

$$E_T = E_0 + E_C \text{ ou } E_T = mc^2 \text{ avec } m \text{ la masse relativiste}$$

$$\text{On peut alors écrire : } E_C = E_T - E_0$$

$$= E_T - m_0 c^2$$

$$E_C = \Delta mc^2$$

4. Particules matérielles

a. L'électron

On distingue deux particules ayant les mêmes caractéristiques mais pas la même origine :

- L'électron ou électron négatif qui provient du cortège électronique de l'atome
- Le négaton ou particule β^- provenant du noyau atomique

Masse au repos	Masse relativiste	Charge
$m_e = 9,109 \cdot 10^{-28} \text{ g}$ $= \frac{1}{2000} \text{ u}$	Pour $v = 0,5 c$ $m_e = 1,15 m_0$	$- e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C (Coulombs)}$

Sous l'effet d'une différence de potentiel de 1 Volt, l'électron sans vitesse initiale acquiert une énergie cinétique de $1,602 \cdot 10^{-19}$ J (Joules). Prise comme référence, cette valeur donne une unité d'énergie : l'électronvolt (eV).

L'eV c'est donc l'énergie cinétique acquise par un électron sans vitesse initiale sous une différence de potentiel de 1 V ! les multiples sont aussi à connaître : $10^3 = 1$ keV

$$10^6 = 1 \text{ MeV}$$

$$10^9 = 1 \text{ GeV}$$

Donc d'après la relation d'Einstein citée précédemment on peut avoir une équivalence masse énergie : $1u = 931 \text{ MeV}/c^2$

Équivalence masse -énergie:

$$1u = \frac{0,166 \cdot 10^{-26} \times (2,9979 \cdot 10^8)^2}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 931 \text{ MeV}/c^2$$

m en kg

1 eV en J

b. Le proton (p⁺)

Masse au repos	Masse relativiste	Charge
$m_p = 1,007 \text{ u}$	Non relativiste	+ e = $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (Coulombs)

C'est une particule dite stable.

On distingue le proton et le positron ou particule β^+ de même masse que l'électron mais de charge opposé à celui-ci, il est produit lors de transformations radioactives.

c. Le neutron (n⁰)

Masse au repos	Masse relativiste	Charge
$m_n = 1,009 \text{ u}$	Non relativiste	Pas de charge

Il est stable dans le noyau, mais instable en dehors de celui-ci et se transforme selon l'équation suivante : $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$ (antineutrino) + 0,78 MeV

d. La particule alpha

Elle provient de transformations radioactives, attention c'est un NOYAU et non un atome ou un nucléon. La particule α est en fait le ${}^4_2\text{He}$ qui a perdu ses deux électrons, on l'écrit donc : He^{2+}

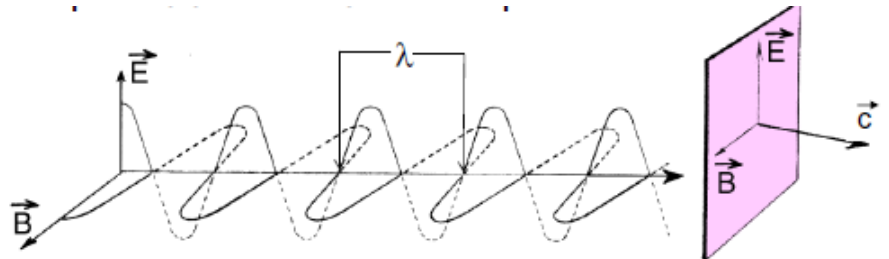
Masse au repos	Charge
$m_\alpha = 4,0015 \text{ u}$	$3,204 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (2 fois celle du proton !)

5. Rayonnement électromagnétique

Les REM sont également appelés photons. Ce sont en fait des perturbations du champ électromagnétique qui se propage dans le vide à la vitesse de la lumière.

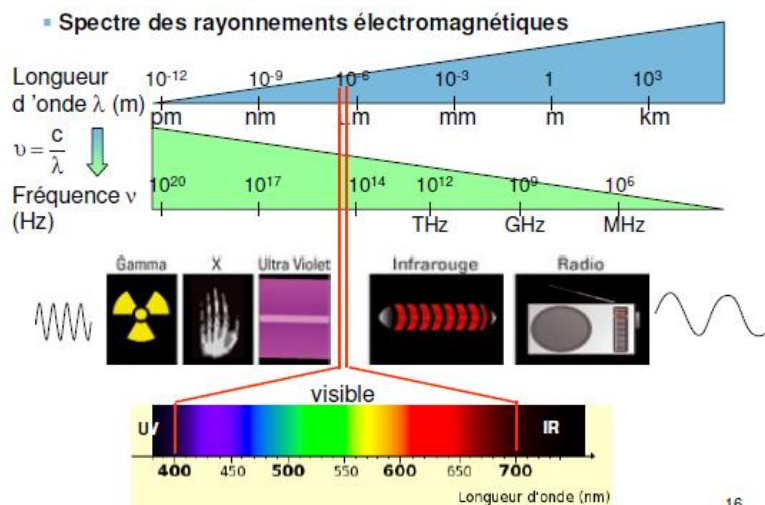
Ces perturbations découlent de la propagation d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui vibrent en phase et qui se propagent perpendiculairement l'un par rapport à l'autre et par rapport à la direction de propagation.

Entre deux points dans un même état vibratoire, on identifie la plus petite distance qui les séparent : la longueur d'onde (λ en m). Ainsi, à intervalle régulier chaque point retrouvera son état vibratoire initial, le nombre de fois que le motif se répète en une seconde est appelé la fréquence (ν en Hz ou s^{-1}).



Considérant que le milieu où se déplace les REM est le vide :

$$v = \frac{c}{\lambda}$$



ATTENTION : le seul moyen de distinguer un photon X d'un gamma ce n'est pas son énergie mais bien son origine : du cortège pour le X, du noyau pour le gamma !

Ces rayonnements particuliers transportent de l'énergie selon des quantités discontinues et multiples entiers d'un nombre élémentaire : la constante de Planck (modèle quantique).

$$E = h\nu$$

avec $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} (= 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s})$
E en Joules

On peut alors écrire : $E = hc/\lambda$

Enfin, il existe une relation calculatoirement plus facile mais **ATTENTION sortant du système MKSA** :

la relation de Duane et Hunt : $E \text{ (eV)} = \frac{1240}{\lambda \text{ (nm)}}$

On remarque alors que :

- La fréquence est inversement proportionnelle à la longueur d'onde
- L'énergie est proportionnelle à la fréquence !

6. Dualité onde-particule

Toute particule en mouvement peut être vue comme une onde (donc représentation quantique) mais aussi comme étant de nature corpusculaire (donc ayant une masse).

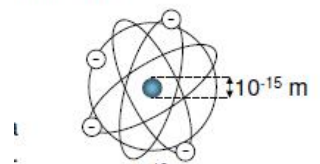
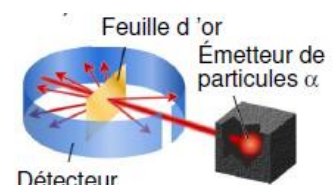
C'est ainsi que Louis De Broglie montre que : $m = \frac{h}{\lambda c}$

7. Structure électronique de l'atome

- Le modèle planétaire de Rutherford (1911) : un émetteur envoie des particules alpha sur une feuille d'or et la quasi-totalité des particules la traversent et finissent sur le détecteur. Donc la matière est pleine de vide.

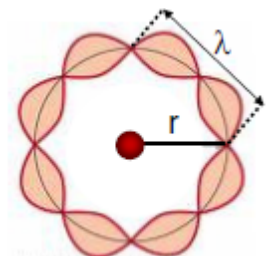
Selon ce modèle, le diamètre vaut :

- o Noyau : $10^{-15}m$ chargé positivement
- o Atome : $10^{-10}m$



- Modèle de Bohr : il associe l'électron à une particule qui circule sur une orbite (espace fermé circulaire). Étant ondulatoire, il faut donc qu'un nombre entier de longueur d'onde « rentre » sur une circonférence de l'orbite (périmètre du cercle). Donc :

- o $l = 2\pi r = n\lambda$
- o n permet de quantifier le rayon de l'électron. Les électrons sont donc sur des orbites discrètes et non continues. L'intensité de leur liaison dépend de cette orbite.



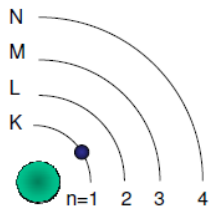
Exemple : pour l'atome d'hydrogène on considère : $W_n = -13,6 \frac{1}{n^2} eV$

On remarque que :

- Plus la couche est profonde, plus n est petit plus l'énergie de l'électron sera petite
- Plus la couche est profonde plus l'électron sera attaché à l'atome car :
 - o Il y a une force d'attraction (noyau + attire les électrons -)
 - o Une force répulsive entre les électrons chargés -, se repoussant évite la sortie de l'édifice atomique.

ATTENTION : l'énergie de l'électron est négative alors que l'énergie de liaison de l'électron (c'est l'énergie qu'il faut apporter pour l'arracher à son noyau) est positive et vaut :

$$E_L = |W_n|$$



Les numéros de couches peuvent être assimilés à des lettres : n=1 (couche K), n=2 (couche L), n=3 (couche M). à l'état fondamental les électrons occupent toujours les couches les plus basses avant les autres. Pour passer d'une couche à l'autre l'électron a besoin d'un quantum d'énergie : il augmentera son énergie mais diminuera son énergie de liaison.

Les électrons les plus externes de l'édifice atomique subiront des forces plus grandes que leurs confrères électrons se situant entre eux et le noyau, ils seront repoussés. On appelle cela l'effet écran. L'énergie de l'électron dans l'atome devient donc :

$$W_n = -13,6 \frac{(Z - \sigma)^2}{n^2} \text{ eV} \quad \text{avec } \sigma \text{ la constante d'écran}$$

Le remplissage des couches se fait par $2n^2$ électrons au maximum !

Au final :

- Les électrons K sont plus fortement liés, mais leur énergie varie beaucoup selon les atomes (selon Z^2 , à σ^2 près)
- Les électrons externes sont moins fortement liés mais leur énergie varie peu selon les atomes
- Lorsque les couches les plus basses sont complètes l'atome est dans son état fondamental

I) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

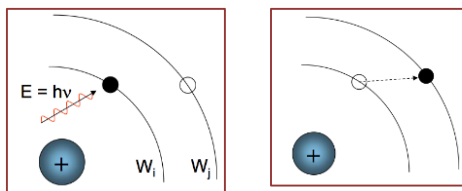
A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome

Un rayonnement interagit le plus souvent avec les électrons de l'atome de la matière. Le rayonnement transporte de l'énergie, une partie de celle-ci sera absorbée par l'atome entraînant un déplacement des électrons = une ionisation ou une excitation de l'atome. Cet excès d'énergie sera restitué par l'atome par émission. *L'exemple utilisé sera celui du photon principalement.*

a) Absorption par excitation

L'énergie du photon (ou rayonnement) incident est inférieure à l'énergie de liaison W_i de l'électron sur son orbitale mais est strictement égale à la différence des énergies de liaison des électrons de 2 orbitales différentes : $E = h\nu = |W_i| - |W_j|$. L'électron ne peut pas être expulsé de l'atome, il ne peut que passer sur une orbitale plus éloignée grâce à l'énergie du rayonnement incident.



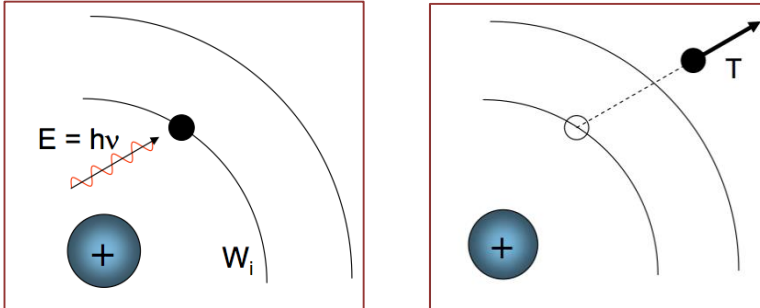
L'énergie absorbée est alors quantifiée car égale à :

$$E = h\nu < |W_i|$$

$$= |W_i| - |W_j|$$

b) Absorption par ionisation

L'énergie du photon incident est supérieure ou égale à l'énergie de liaison $|W_i|$ de l'électron sur son orbitale. Il est alors expulsé de la structure électronique de l'atome.



L'énergie absorbée n'est pas quantifiée

$$E = hv \geq |W_i|$$

L'atome qui a perdu un électron est alors ionisé
L'électron expulsé part avec une énergie cinétique

$$T = E - |W_i|$$

2. Emission d'énergie par l'atome

Pour retrouver leur état fondamental les atomes restituent leur énergie par émission de fluorescence ou par émission d'électrons Auger.

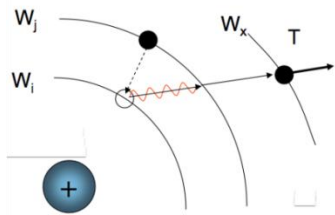
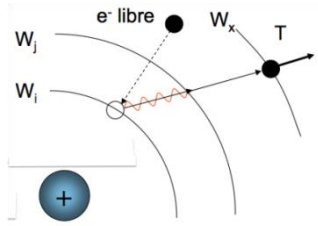
a) Fluorescence

Après une excitation	Après une ionisation
Un seul réarrangement	
<p>Un électron d'une orbitale plus lointaine va venir combler la case quantique laissée vacante par l'électron qui est passé sur une orbitale plus éloignée. Un photon de fluorescence est émis d'énergie égale à la différence d'énergie entre les deux orbitales.</p>	<p>Un électron libre va venir combler l'espace laissé par l'électron expulsé (espace appelé case quantique vacante). Un photon de fluorescence est alors émis. Son énergie est égale à l'énergie de l'orbitale où se trouvait la case vacante comblée par l'électron libre. On obtient alors une raie de fluorescence.</p>
Réarrangements successifs	
<p>Excitation ($i \rightarrow h$)</p> <p>✓ Un électron de l'orbitale j va venir combler la</p>	<p>Ionisation</p> <p>✓ Un électron de l'orbitale j va venir combler la case</p>

<p>case vacante de l'orbitale i en émettant un photon d'énergie : $E_1 = W_i - W_j$</p> <p>✓ Une case est alors vacante sur l'orbitale j et va alors être comblée par un électron de l'orbitale h en émettant un photon d'énergie : $E_2 = W_j - W_h$</p> <p>On remarque que l'énergie restituée par l'émission de photons de fluorescence ($E = E_1 + E_2$) est égale à l'excès d'énergie que possédait l'atome et qui avait permis l'excitation ($E = W_i - W_h$)</p> <p>En effet : $E_1 + E_2 = W_i - W_j + W_j - W_h$</p> <p>Les désexcitations peuvent ainsi se succéder. On obtient alors un spectre de raie de fluorescence.</p>	<p>quantique laissée vacante par l'expulsion d'un électron de l'orbitale i. Un photon de fluorescence d'énergie $E_1 = W_i - W_j$ est émis.</p> <p>✓ Un électron de l'orbitale h va venir combler la case quantique laissée vacante par le premier réarrangement en émettant un photon de fluorescence d'énergie $E_2 = W_j - W_h$</p> <p>✓ Enfin, un électron libre va venir combler la case quantique laissée vacante sur l'orbitale h par le 2^e réarrangement. Un photon de fluorescence d'énergie $E_3 = W_h$ est émis.</p> <p>L'énergie restituée ($E = E_1 + E_2 + E_3$) est égale à l'excès d'énergie après l'ionisation ($E = W_i$)</p> <p>En effet : $E_1 + E_2 + E_3 = W_i - W_j + W_j - W_h + W_h$</p> <p>On obtient un spectre de raie de fluorescence.</p>
--	--

b) Electron Auger

Classiquement après réarrangement de l'atome il y a émission de photon de fluorescence. A ce moment là 2 choix : soit le photon emporte son énergie hors de l'atome soit il peut a son tour interagir avec les électrons de l'atome, on l'appellera alors électron Auger.

Après une excitation	Après une ionisation
 <p>Un électron de la couche j vient combler la case laissée vacante par l'excitation de la couche i en émettant un photon de fluorescence d'énergie $E = hv = W_i - W_j$</p> <p>Ce photon d'énergie bien supérieure à l'énergie de liaison des orbitales périphériques va expulser un électron de la couche x. Cet électron (Auger) va partir avec une énergie cinétique :</p> $T = E - W_x = hv - W_x = W_i - W_j - W_x $	 <p>L'atome ionisé possède un excès d'énergie W_i. Un électron libre vient combler la case quantique laissée vacante par l'ionisation d'un électron de la couche i. Un photon de fluorescence d'énergie $E = hv = W_i$ est émis.</p> <p>Ce photon de fluorescence va expulser un électron d'une orbitale périphérique (dont l'énergie de liaison est bien inférieure). Cet électron possède alors une énergie cinétique :</p> $T = E - W_x = hv - W_x = W_i - W_x $

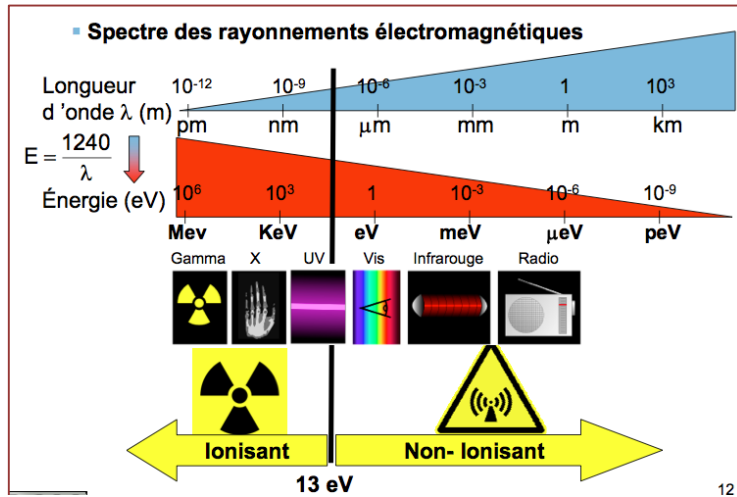
Remarque : la probabilité d'émission d'électron Auger est plus grande pour les électrons les plus périphériques, ou pour le réarrangement après ionisation.

3. Rayonnement ionisant

Définition : rayonnement électromagnétique ou corpusculaire capable de produire directement ou indirectement des ions, lors de leur passage à travers les atomes et les molécules.

Intérêt : savoir si un rayonnement est ionisant permet d'éviter leurs effets délétères sur les matières biologiques comme l'ADN.

Le reconnaître ? son énergie doit être supérieur à 13,6 eV environ (donc les Gamma, X et UV)



B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation

On considère $N(0)$ photons mono-énergétiques (ils ont tous la même énergie) qui traversent une épaisseur x de matériau. Le but de cette loi est de savoir de façon probabiliste le nombre de photons qui vont traverser la matière sans interagir avec les atomes qui la constituent et le nombre de photons qui seront absorbés par cette dernière.

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

$N(x)$ nombre de photons transmis
 $N(0)$ nombre de photons initial
 μ coefficient linéique d'atténuation (en m⁻¹). Il représente une probabilité d'interaction et dépend de l'état du milieu.

2. Couche de demi-atténuation (CDA)

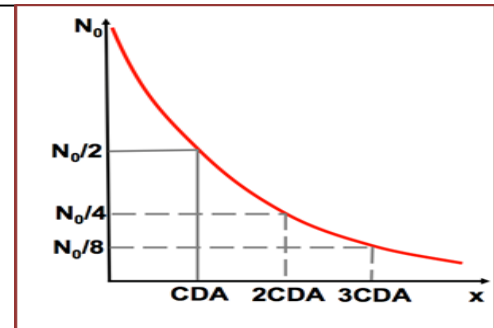
Définition : c'est l'épaisseur qui atténue la moitié des photons ! (elle dépend du matériau et de l'énergie du rayonnement)

Intérêt : essentiel en radioprotection

Comment ça marche ? a chaque fois que l'on rajoute une CDA de matière, on divise par 2 le nombre de photons du faisceau.

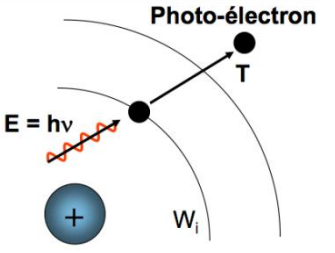
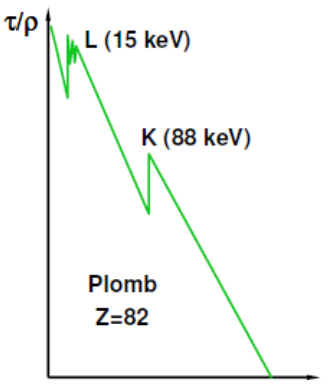
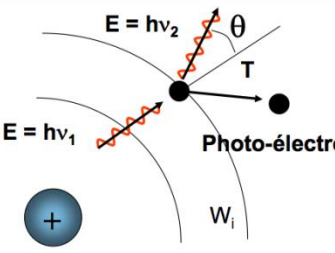
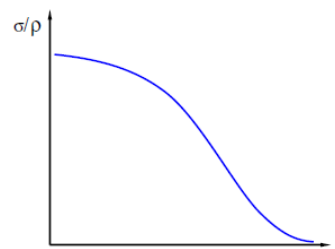
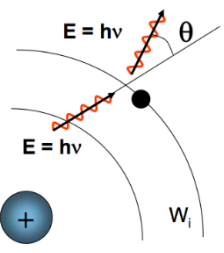
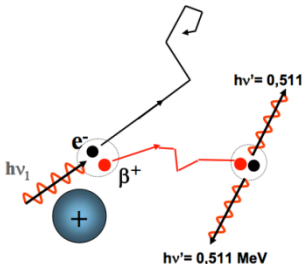
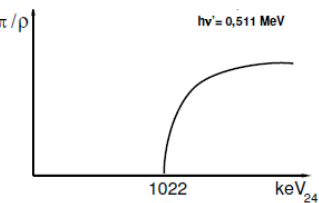
$$N(k \text{ CDA}) = \frac{N(0)}{2^k}$$

Au bout de 10 CDA on considère que la totalité du faisceau est atténué ! Donc :
 Après 1 CDA il reste 50% ; Après 2 CDA il reste 25% ; Après 3 CDA il reste 12,5%



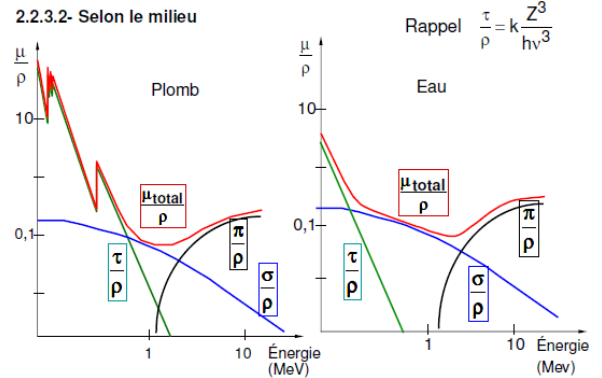
3. Mécanisme d'atténuation

En traversant une épaisseur x de matériau, les photons du faisceau ont la probabilité d'être atténués par différents mécanismes. Cette probabilité va dépendre de la nature du matériau traversé, et selon l'énergie du rayonnement.

EFFET PHOTO-ELECTRIQUE	EFFET COMPTON	DIFFUSION DE THOMPSON RAILEY	CREATION DE PAIRE
 <p>- Principe :</p> <p>La TOTALITE de l'énergie du rayon de photon incident est transmise à un électron (le plus souvent profond) qui est expulsé. C'est un photo-électron.</p> <p>L'atome de la matière est alors ionisé et va pouvoir subir divers réarrangements (photons de fluorescence et électron Auger). La matière absorbe toute l'énergie incidente.</p> <p>Le photo-électron part avec une énergie cinétique $T = hv - W_i$ qui va se dissiper au contact des autres atomes en les ionisant.</p> <p>- Probabilité :</p> $\frac{\tau}{\rho} \propto \frac{Z^3}{h\nu^3}$ <p>La probabilité d'effet photo-électrique ↗ quand $E = h\nu$ ↘ et quand Z ↗ (éléments lourds)</p> 	 <p>- Principe :</p> <p>Une PARTIE de l'énergie du faisceau incident est transmise à un électron faiblement lié qui est expulsé, c'est un photo-e⁻ avec une énergie cinétique $T = hv_1 - W_i - hv_2$. Une autre partie de cette énergie est diffusée via un photon de fluorescence ($E = hv_2$)</p> <p>L'atome alors ionisé subit des réarrangements successifs. Le photo-e⁻ perd peu à peu de son énergie cinétique par ionisations successives.</p> <p>- Lois de Compton :</p> <p>✓ T est maximum si le choc est frontal (c'est comme en voiture, si vous percutez quelqu'un de plein fouet, vous l'envoyez très loin)</p> <p>□ T est faible si le choc est tangentiel (toujours en voiture, si vous effleurez quelqu'un il ne va pas loin)</p> <p>- Probabilité :</p> $\frac{\sigma}{\rho} \propto \frac{1}{h\nu}$ <p>Probabilité ↗ quand $E = h\nu$ ↘</p> <p>Cette probabilité est indépendante de la nature de la matière.</p> 	 <p>- Principe</p> <p>AUCUN transfert d'énergie à la matière. Le faisceau incident ne fait que changer de direction (sans changer d'énergie et donc de longueur d'onde).</p> <p>Important pour les photons peu énergétiques : IR, UV, visible</p> <p>Négligeable pour les photons très énergétiques : γ et X.</p>	 <p>- Principe :</p> <p>Lorsqu'un faisceau de photon d'énergie supérieure à 1022keV passe à proximité d'un noyau, il voit son énergie transformée en 2 particules (particule e⁻ et antiparticule β^+=positon). Ces 2 particules se désintègrent rapidement en 2 photons chacun d'énergie égale à 511keV (=0,511MeV).</p> <p>- Probabilité :</p> <p>$\frac{\pi}{\rho}$ existante seulement à partir d'une énergie $E > 1022\text{keV}$</p> <p>Remarque : la réaction contraire s'appelle une annihilation.</p> 

- **Probabilité et matière traversée :**

La variation essentielle concerne l'effet photo électrique puisque celui-ci varie avec Z. pour l'eau il est donc moins prévalent que l'effet Compton.



C. Interactions des rayonnements particulaires

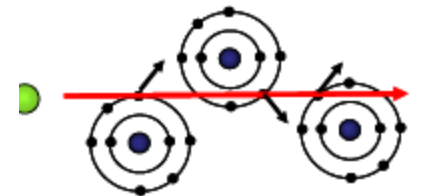
1. Interactions des neutrons

Ils interagissent essentiellement avec les noyaux, ils sont très pénétrants. On en distingue 2 types :

- **Rapides :** dans un milieu riche en H, par collision avec son noyau (un proton !) l'atome par expulsion du proton pourra a son tour être a l'origine d'ionisation. Un neutron rapide est donc indirectement a l'origine d'ionisations. Dans un milieu de noyau lourd, le neutron rebondira, il n'y aura pas d'ionisations.
- **Lents :** il s'incorpore ou est absorbé par un noyau, cela peut induire des réactions nucléaires.

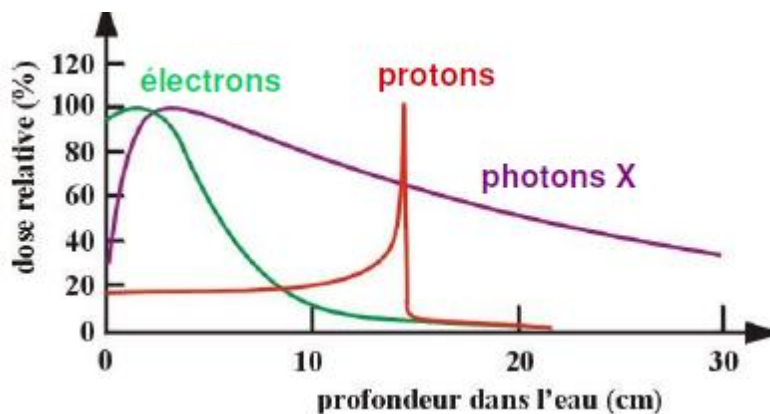
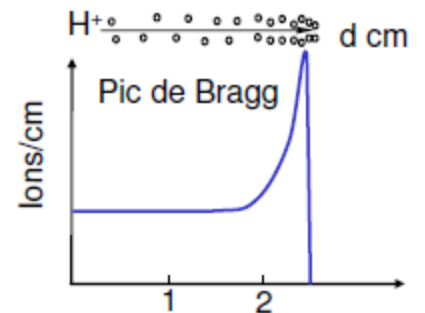
2. Interactions des particules chargées

Les particules chargées ont une trajectoire rectiligne, de part leur charge elles sont très ionisantes. Elles provoquent un maximum d'ionisation en fin de parcours appelé pic de Bragg (il n'y a plus d'ionisation après ce pic). Le transfert d'énergie par ionisation se fait donc a une distance particulière.



- Petite application médicale quand même : la radiothérapie.

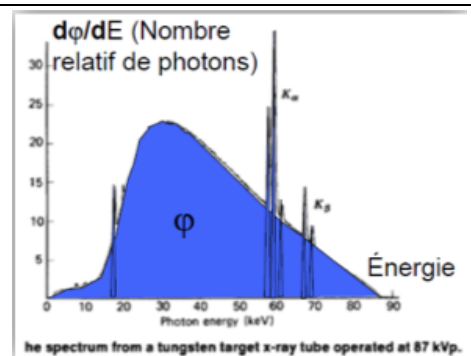
Le rayonnement envoyé sur le patient peut importe sa nature (électrons, protons...) aura un Pic de Bragg a une distance particulière. On peut donc obtenir un maximum d'ionisations au cœur d'une tumeur par exemple tout en préservant les tissus environnants.



- Les électrons : lors de leur interaction avec la matière nous allons avoir :

INTERACTION ELECTRON-ELECTRON	INTERACTION ELECTRON-NOYAU
<p>Aussi appelée « arrêt par collision ». C'est une interaction entre deux particules chargées de même charge. Elles vont alors se repousser « violemment » comme un « choc physique ». (essayez de rapprocher deux aimants de même charge et vous aurez une petite idée de ce phénomène)</p> <p>L'interaction électron-électron va dépendre de l'énergie cinétique de l'électron incident qui arrive sur l'électron tranquillement installé sur son orbitale atomique avec son énergie de liaison W_i.</p> <ul style="list-style-type: none"> - si $E_c < W_i - W_j$: l'électron de l'orbitale ne sent quasiment rien car l'énergie cinétique est insuffisante pour le déloger. Il reste alors sur son orbitale atomique. On observe tout de même une vibration et l'émission de chaleur. - si $E_c > W_i$: l'électron de l'orbitale atomique est expulsé : ionisation - si $E_c = W_i - W_j$: l'énergie est suffisante pour faire passer l'électron de l'orbitale sur une autre orbitale : excitation <p>Lors du retour à l'état fondamental après une ionisation ou une excitation, un photon de fluorescence est produit selon un spectre de raie. C'est ce que l'on appelle un rayon X dont l'énergie est quantifiée et dépend de la cible (des énergies de liaison des électrons du cortège électronique des atomes de la cible)</p>	<p>Aussi appelé « arrêt par freinage ». L'électron incident (d'énergie cinétique E_c) se retrouve face au noyau qui est chargé positivement (car composé de protons) et d'une masse bien supérieure à celle de l'électron. L'électron va alors être dévié par ce noyau super-costaud et va subir une accélération centripète.</p> <p>Un rayonnement $h\nu$ est produit (un photon) à partir de l'énergie cinétique de l'électron incident, avec une énergie comprise entre 0 et E_c mais qui n'est pas quantifiée. Le spectre d'émission est donc continu (plusieurs valeurs possibles qui créent une courbe continue)</p>

Et voilà comment on crée les rayons X : des électrons sont envoyés sur une cible dont on choisit le matériau au mieux (avec des éléments au Z élevé de préférence). Ces électrons vont ensuite rencontrer des noyaux et des électrons et subir des interactions : électron-électron (arrêt par collision) et électron-noyau (arrêt par freinage). Le spectre des rayons X possède donc 2 composantes : une composante continue et des raies (spécifiques des éléments de la cible).



ATTENTION : les rayons X sont des photons de fluorescence créés par l'interaction d'électrons avec la matière.

THE END ! 