

BIOPHYSIQUE DES RADIATIONS

Tut' rentrée - Cours 1



I. Particules, ondes et atomes

A. Masse, énergie et unité de mesure

1. Les unités de masse

Le SI (g, Kg) peut être utilisé pour les grandes populations d'atomes (chimie), mais peu ou pas pour les atomes isolés et les particules élémentaires (physique) : les unités du SI ne sont pas adaptées à des particules infiniment petites.

Le gramme (g)

Il est utilisé pour mesurer la masse d'une mole d'atomes appelée **la masse molaire** ou **la masse atomique**. La masse atomique est la masse de N atomes avec :

N	Le nombre d'Avogadro = $6,02 \cdot 10^{23}$ C'est le nombre d'atomes dans 1 mole.
	On choisit N pour que, dans le système des masses atomiques, la masse d'une mole d'atome de Carbone 12 soit de 12g.

$$Masse\ atomique\ (g) = N \times masse\ d'un\ atome\ (g)$$

L'unité de masse atomique (u)

C'est une unité particulière (hors SI) adaptée à l'échelle des atomes, définie comme le $1/12^{\text{ème}}$ de la masse d'un atome de carbone 12, ce qui correspond à l'inverse de la constante d'Avogadro:

$$1\ u = \frac{1}{N} = \frac{2 \times 10^{-23}}{12} = 1,66 \cdot 10^{-24}\ g$$

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'atome en g (masse atomique)	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

♥ La masse d'un atome en unité de masse atomique (u, uma), s'exprime par le même nombre que la masse d'une mole d'atome en gramme. ♥

☞ Un atome de ^{12}C pèse 12u et 1mole (N atomes) de ^{12}C pèse 12g.

Les unités doivent être cohérentes entre elles et la nomenclature des nuclides

$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X$	A	Nombre de masse ou nombre de nucléons Il est égal : <ul style="list-style-type: none"> à l'entier le plus proche de la masse molaire atomique exprimée en g. à l'entier le plus proche de la masse d'un atome exprimée en u.
	Z	Le numéro atomique ou nombre de protons (Il correspond au nombre d'électrons lorsque l'élément est neutre (=non ionisé))

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

☛ Ne pas confondre **le nombre de masse A** qui est environ la masse d'un atome en u et **la masse atomique** qui est la masse d'une mole d'atome en grammes.

2. Énergie de masse

D'après, la relation d'Einstein, la masse est une forme d'énergie : $E = mc^2$

L'énergie d'une particule au repos

Soit m_0 la masse d'une particule au repos. On déduit : $E_0 = m_0 c^2$

L'énergie d'une particule en mouvement

Tout objet matériel voit sa masse varier selon sa vitesse.

On parle alors de **masse relativiste**, elle se calcule selon la formule :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

m : la masse relativiste (Kg)

m_0 : la masse initiale (Kg)

v : la vitesse de la particule ($m \cdot s^{-1}$)

c : la célérité de la lumière dans le vide $3 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$

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

B. Particules matérielles

1. L'électron (e^-)

L'électron ou électron négatif ou négaton (= rayonnements cathodiques des tubes rayons X, = particule β^-).

Masse au repos	Masse relativiste	Charge
$m_e = 9,109 \cdot 10^{-28} \text{ g}$ $= 0,00055 \text{ u}$ $\approx \frac{1}{2000} \text{ u}$	Pour $v = 0,5 c$ $m_e = 1,15 m_0$	$-e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C (Coulombs)}$

L'électronvolt : unité d'énergie

L'électronvolt (eV) : unité particulière pour exprimer l'énergie qui est adaptée aux énergies mises en jeu dans l'atome.

Définition: Énergie cinétique acquise par un électron sans vitesse initiale, sous l'effet d'une différence de potentiel de 1 volt.

$$1 \text{ eV} = E_c = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Sous l'effet d'une différence de potentiel de 1 Volt, l'électron sans vitesse initiale acquiert une énergie cinétique de $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ (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 !

$$\heartsuit 1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \heartsuit$$

$$\ast 10^3 \text{ eV} = \text{keV}$$

$$\ast 10^6 \text{ eV} = \text{MeV}$$

$$\ast 10^9 \text{ eV} = \text{GeV}$$

Donc d'après la relation d'Einstein citée précédemment on peut avoir une équivalence masse énergie :

$$\heartsuit 1 \text{ u} = 931 \text{ MeV}/c^2 \heartsuit$$

Équivalence masse -énergie:

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

m en kg

1 eV en J

2. Le proton (p⁺)

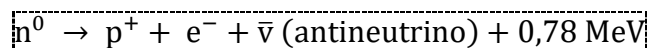
Masse au repos	Masse relativiste	Charge
$m_p = 1,007 \text{ u}$	Non relativiste	+ e = $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (Coulombs)

C'est une particule dite stable.

3. Le neutron

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 :



4. Autres particules

Le positon

Le positon ou particule β^+ : c'est l'antiparticule de l'e⁻, même masse mais de charge opposée à celui-ci, il est produit lors de transformations radioactives.

Masse au repos	Charge
$m_{\beta^+} = 9,109 \cdot 10^{-28} \text{ g}$ $= 0,00055 \text{ u}$ $\approx \frac{1}{2000} \text{ u}$	$+ e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C (Coulombs)}$

Le neutrino

Il explique la radioactivité β

Masse au repos	Charge
Quasi nulle	Nulle

La particule alpha (α)

La particule α est formée de 4 nucléons (2p, 2n), c'est le noyau de l'atome d'Hélium ou He^{++} ou α ou α^{++} .

Masse au repos	Charge
4,0015 u ($< 2m_p + 2m_n$)	$= 3,204 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ $(= 2 \times e^+)$

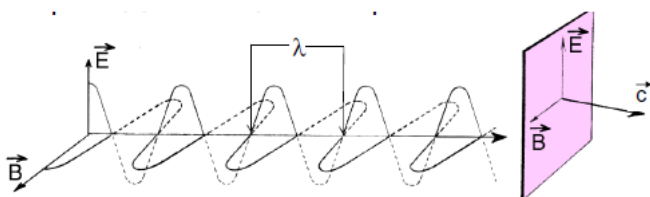
C. Les rayonnements électromagnétiques ou photons

1. Représentation ondulatoire classique

Les REM sont également appelés **photons**. Ce sont en fait des perturbations du champ électromagnétique qui se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$).

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. **Un rayonnement EM est un mode de transport de l'énergie.**

Entre deux points dans un même état vibratoire, on identifie la plus petite distance qui les sépare : **la longueur d'onde** (λ en m).

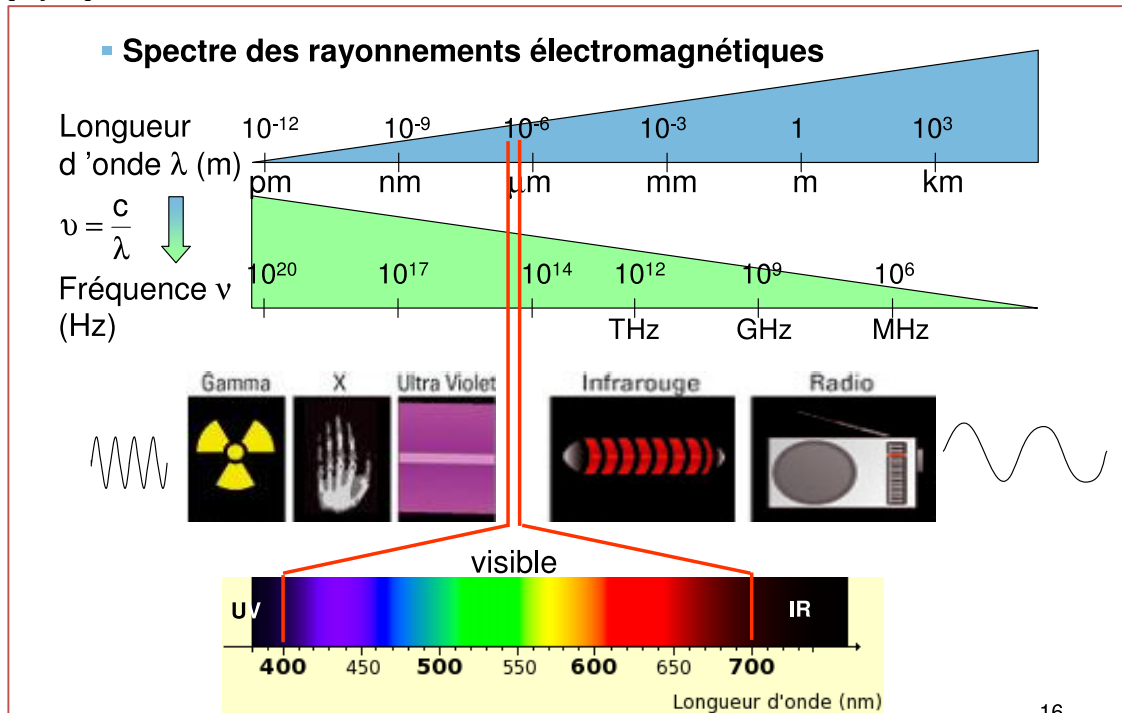


Ainsi, à intervalle régulier, chaque point retrouvera son état vibratoire initial, le nombre de fois que le motif se répète en une seconde est appelé **la fréquence** (ν en Hz ou s^{-1}).

En considérant que le milieu où se déplacent les

REM est le vide :

$$\nu [\text{Hz}] = \frac{c [\text{m.s}^{-1}]}{\lambda [\text{m}]}$$



2. Représentation quantique

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

$$E = h\nu$$

On peut alors écrire : $E [J] = \frac{hc}{\lambda [m]}$

Avec **h = la constante de Planck**
 $= 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

Enfin, il existe une relation calculatoirement plus facile mais ATTENTION sortant du système MKSA : la relation de **Duane et Hunt** : $E [eV] = \frac{1240}{\lambda [nm]}$

On remarque alors que :

- * La fréquence ν est inversement proportionnelle à la longueur d'onde λ
- * L'énergie E est proportionnelle à la fréquence ν !

D. La dualité ondes-particules

1. Les ondes EM sont considérées comme des corpuscules

« Les ondes électromagnétiques peuvent être considérées comme de nature corpusculaire: les photons » (Einstein 1905)

Einstein rapproche :

- * **$E = mc^2$** pour une particule de masse m
- * **$E = h\nu = hc / \lambda$** du quantum de Planck

Les photons ont une masse exclusivement dynamique :

m : la masse en Kg

h : la constante de Planck $6,62 \cdot 10^{-34}$

λ : la longueur d'onde en nm

$$m = \frac{h}{\lambda c}$$

2. À chaque particule peut être associée une représentation ondulatoire.

C'est ainsi que **Louis De Broglie** montre que la relation d'Einstein pour les ondes EM vaut aussi pour toutes les particules : "l'électron est aussi une onde". A toute particule de **masse m** et de **vitesse v** on associe une onde de :

$$\lambda = \frac{h}{m v}$$

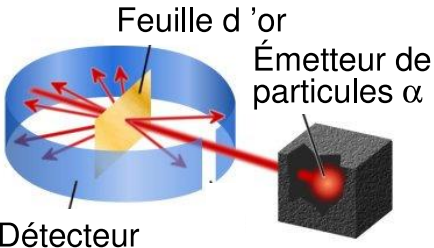
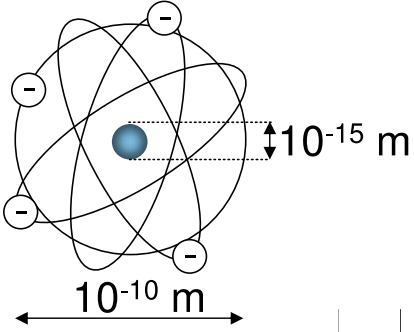
→ L'énergie peut être soit portée par un photon ($E = hc/\lambda$) soit par une particule ($E=mc^2$).

D'après Einstein : ce photon a une masse dynamique ($m = h/\lambda c$).

D'après De Broglie : à cette particule on peut lui trouver une longueur d'onde ($\lambda = h/mv$).

E. Structure électronique de l'atome

1. Le modèle planétaire de Rutherford (1911)

	<p>Un émetteur envoie des <u>particules alpha</u> sur une feuille d'or et la quasi-totalité des particules la traversent et finissent sur le détecteur.</p>
	<p>Donc <u>la matière est pleine de vide</u>. Selon ce modèle, le diamètre vaut :</p> <ul style="list-style-type: none"> * Noyau : 10^{-15} m → masse concentrée chargée positivement * Atome : 10^{-10} m → électrons chargés négativement refoulés à la périphérie du vide péri-nucléaire

2. Le modèle de Bohr

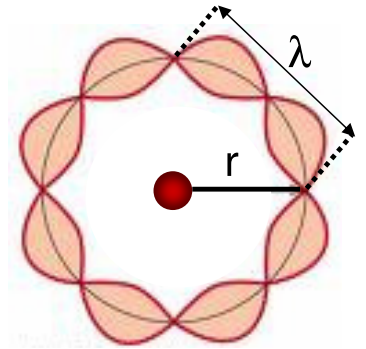
Il associe **l'électron** à une particule qui tourne sur une orbite de rayon r autour du noyau. Une orbite est un espace fermé circulaire. Le caractère ondulatoire de l'électron lui associe une onde stationnaire : l'orbite doit être compatible avec la nature ondulatoire de l'électron.

La circonférence de l'orbite (l) doit être un multiple entier (n) de la longueur d'onde (λ).

Donc :

- * $l = 2\pi r$ selon la formule du périmètre d'un cercle (=l'orbite)
- * $l = n\lambda$ avec n = entier naturel
- * on déduit $2\pi r = n\lambda \rightarrow$ **r est donc quantifié** (+++)

☞ Les électrons sont situés sur des orbites discrètes (r le rayon de l'orbite ne peut pas prendre n'importe quelle valeur). **L'orbite de l'électron définit son énergie et son intensité de liaison au noyau.**



Conséquence sur l'énergie de l'électron

Plus la couche est profonde, plus n est petit plus l'énergie de l'électron sera négative.

Exemple de l'atome d'hydrogène ,H et l'orbite n :

$$W_n [\text{eV}] = -13,6 \frac{1}{n^2}$$

L'énergie de liaison de l'électron

C'est l'énergie qu'il faut apporter pour arracher cet électron à l'édifice atomique et l'emporter hors de l'influence du noyau.

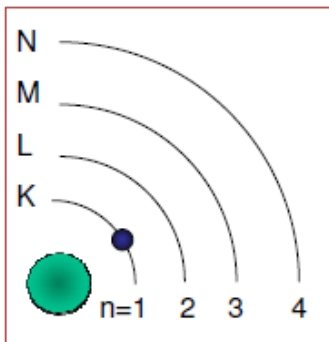
$$E_L = |W_n|$$

☞ Plus la couche est profonde, plus l'électron sera attaché à l'atome car il y'a:

- ☞ Une force d'attraction (le noyau + attire les électrons -)
- ☞ Une force répulsive entre les électrons chargés – qui se repoussent et ne peuvent sortir de l'édifice atomique.

E_L et W_n sont quantifiées et varient de façon discontinue en fonction de n .

Les numéros de couches peuvent être assimilés à des lettres : $n=1$ (couche K), $n=2$ (L), $n=3$ (M).



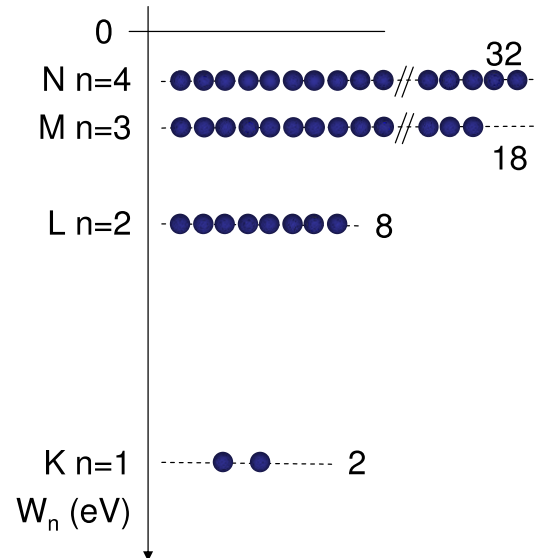
À l'état fondamental, les électrons occupent toujours les couches les plus basses avant les autres. Pour passer d'une couche à l'autre l'électron a besoin d'un **quantum d'énergie** : il augmentera son énergie mais diminuera son énergie de liaison E_L .

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 :

$$W_n = -13,6 \frac{(Z - \sigma)^2}{n^2} \text{ eV}$$

Avec σ « la constante d'écran ».

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



Conclusion

- * Les électrons K sont plus fortement liés, mais leur énergie varie beaucoup selon les atomes (selon Z^2 , à σ^2 près) : W_K varie beaucoup d'un atome à l'autre.
- * Les électrons externes sont moins fortement liés mais leur énergie varie peu selon les atomes : W_{ext} peu selon les atomes car elle dépend peu de Z .
- * Lorsque les couches les plus basses sont complètes : l'atome est dans son état fondamental.

// Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interaction élémentaire

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. Si le rayonnement est trop faible pour déplacer les électrons, on aura un dégagement de chaleur. *L'exemple utilisé sera celui du photon principalement.*

Absorption par excitation

L'énergie E 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** :

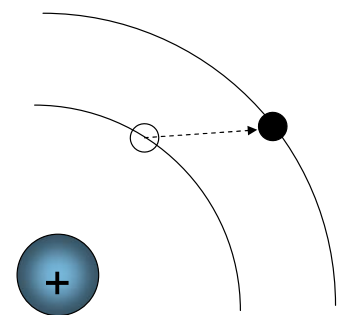
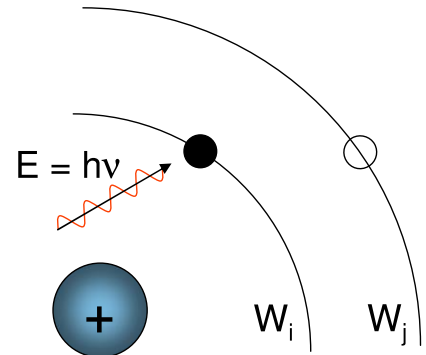
$$E = h\nu = |W_i| - |W_j|$$

L'électron ne peut pas être expulsé de l'atome, il ne peut que passer sur une orbitale plus éloignée (ici celle de la couche J) sur une case quantique libre grâce à l'énergie du rayonnement incident.

L'atome passe de son état fondamental à un excès d'énergie :

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

L'énergie absorbée est dite quantifiée.



Absorption par ionisation

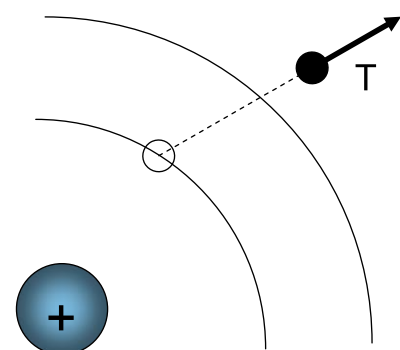
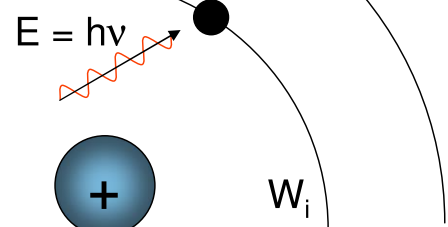
L'énergie du photon incident E est supérieure à l'**énergie de liaison $|W_i|$** de l'électron sur son orbitale. Il est alors expulsé de la structure électronique de l'atome.

L'énergie absorbée n'est pas quantifiée

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

L'atome qui a perdu un électron est alors ionisé. L'électron expulsé part avec une énergie cinétique T :

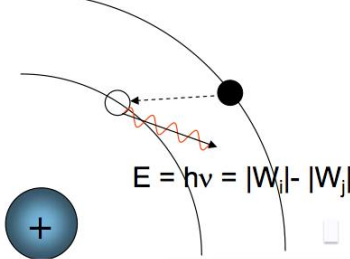
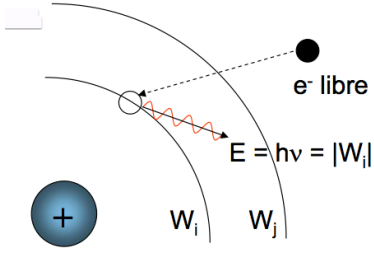
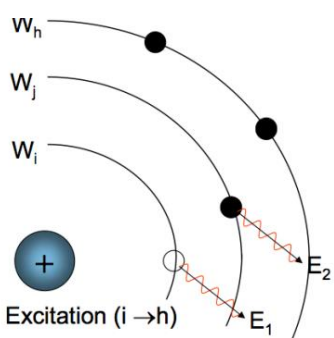
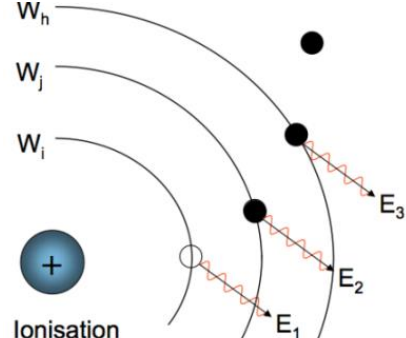
$$T = E - |W_i|$$



2. Émission d'énergie

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

Émission de fluorescence

Après une excitation	Après une ionisation
Un seul réarrangement	
 <p style="text-align: center;">$E = h\nu = W_i - W_j$</p>	 <p style="text-align: center;">$E = h\nu = W_i$</p>
<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 <u>raie de fluorescence</u>.</p>
Réarrangements successifs	
 <p style="text-align: center;">Excitation ($i \rightarrow h$)</p>	 <p style="text-align: center;">Ionisation</p>
<ul style="list-style-type: none"> * Un électron de l'orbitale j va venir combler la case vacante de l'orbitale i en émettant un photon d'énergie : $E_1 = W_i - W_j$ * 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>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 <u>désexcitations</u> peuvent ainsi se succéder. On obtient alors <u>un spectre de raie de fluorescence</u>.</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Un électron de l'orbitale j va venir combler la case 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. * 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 $E_2 = W_j - W_h$ * 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>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 <u>un spectre de raie de fluorescence</u>.</p>

Émission d'un électron Auger

Après réarrangement de l'atome il y a émission de photon de fluorescence. À ce moment là 2 choix :

1. Le photon emporte son énergie hors de l'atome. (cf au dessus)
2. Le photon peut à son tour interagir avec les électrons de l'atome, on l'appellera alors électron Auger.

Après une excitation	Après une ionisation
<ul style="list-style-type: none"> * 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 $E = h\nu = W_i - W_j$ * Ce photon d'énergie bien supérieure à l'énergie de liaison des orbitales périphériques expulse un électron de la couche x. Cet électron (Auger) va partir avec <u>une énergie cinétique T</u> : $T = E - W_x = h\nu - W_x = W_i - W_j - W_x $	<ul style="list-style-type: none"> * 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 $E = h\nu = W_i$ est émis. * Ce photon de fluorescence expulse un électron d'une orbitale périphérique (dont l'énergie de liaison est bien inférieure). Cet électron possède alors une <u>énergie cinétique T</u> : $T = E - W_x = h\nu - W_x = W_i - W_x $

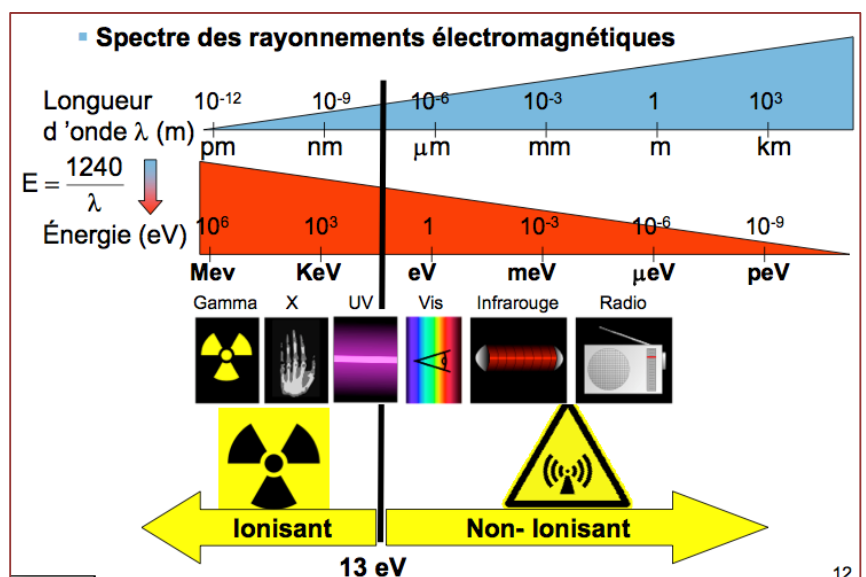
Cette émission d'un électron Auger concerne plutôt les **e- périphériques** et les **atomes légers**. La nouvelle ionisation induit une nouvelle désexcitation.

3. Rayonnement ionisant (RI)

Définition : « Rayonnements électromagnétiques ou corpusculaires 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 supérieure à **13,6 eV** environ (donc les Gamma, X et UV)



B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation des photons dans la matière

Expression de la loi

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
- * 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 [m^{-1}], il représente la probabilité d'interaction et dépend de l'état du milieu

Couche de demie-atténuation (CDA)

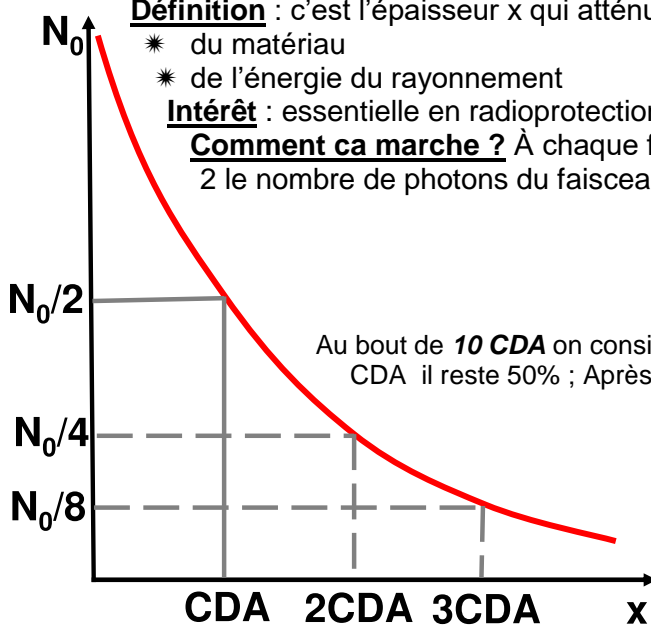
Définition : c'est l'épaisseur x qui atténue la moitié des photons ! Elle dépend :

- * du matériau
- * de l'énergie du rayonnement

Intérêt : essentielle en radioprotection

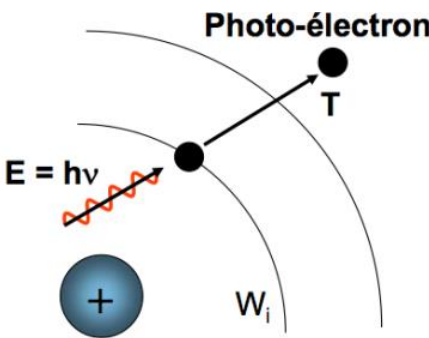
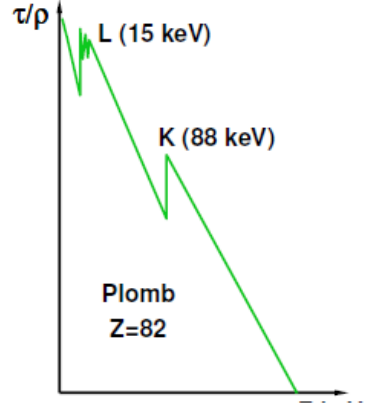
Comment ça marche ? À chaque fois que l'on rajoute une CDA de matière, on divise par 2 le nombre de photons du faisceau.

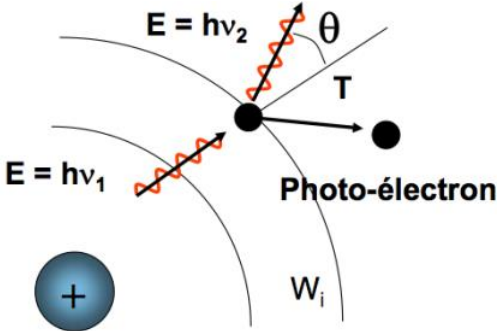
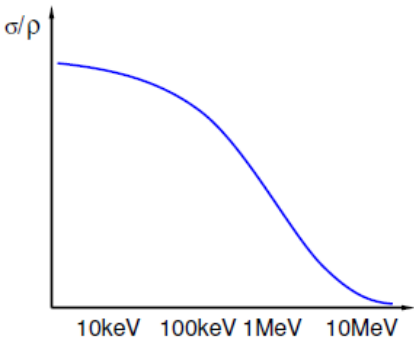
$$N(k. CDA) = \frac{N(0)}{2^k}$$



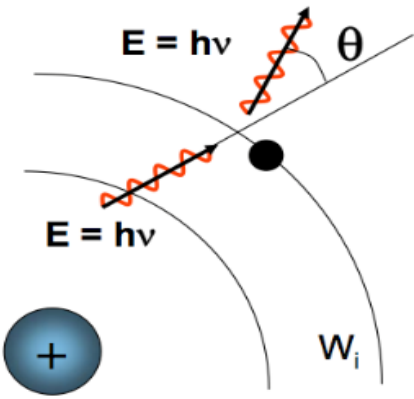
Au bout de **10 CDA** on considère que **la totalité** du faisceau est atténué ! Donc : Après 1 CDA il reste 50% ; Après 2 CDA il reste 25% ; Après 3 CDA il reste 12,5%

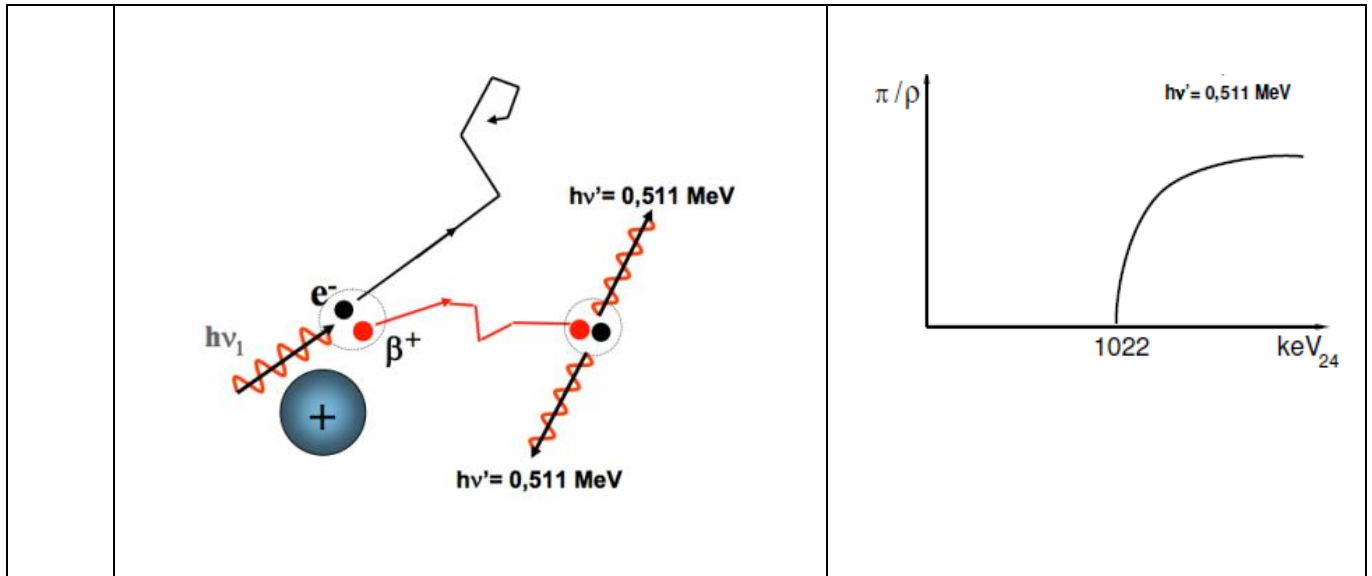
2. Les mécanismes d'atténuation

	PRINCIPE	PROBABILITÉ
Effet photoélectrique	<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 photoélectron. L'atome de la matière est alors ionisé et va pouvoir subir divers réarrangements (photons de fluorescence et électron Auger). La matière absorbe <u>toute</u> l'énergie incidente.</p> <p>Le photoélectron part avec une <u>énergie cinétique</u> : $T = h\nu - W_i$ qui va se dissiper au contact des autres atomes en les ionisant.</p> 	$\frac{\tau}{\rho} = k \times \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$ <p>La probabilité d'effet photo-électrique est maximum pour les photons d'<u>E faible</u> et les <u>éléments lourds</u> (Z élevé).</p> 
Effet Compton	<p>Une PARTIE de l'énergie du faisceau incident est transmise à un électron faiblement lié qui est expulsé, c'est un photoélectron avec une <u>énergie cinétique</u> $T = h\nu_1 - W_i - h\nu_2$. Une autre partie de cette énergie est diffusée via un photon de fluorescence ($E = h\nu_2$)</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> <ul style="list-style-type: none"> * T est maximum si le <u>choc est frontal</u> (c'est comme en voiture, si vous percutez quelqu'un de plein fouet, vous l'envoyez très loin) * T est faible si le <u>choc est tangentiel</u> (toujours en voiture, si vous effleurez quelqu'un il ne va pas loin) 	$\frac{\sigma}{\rho} = k \times \frac{1}{h\nu}$ <p>la probabilité □ quand $E = h\nu$ □</p>

		<p>Cette probabilité est indépendante de la nature de la matière.</p> 
--	---	--

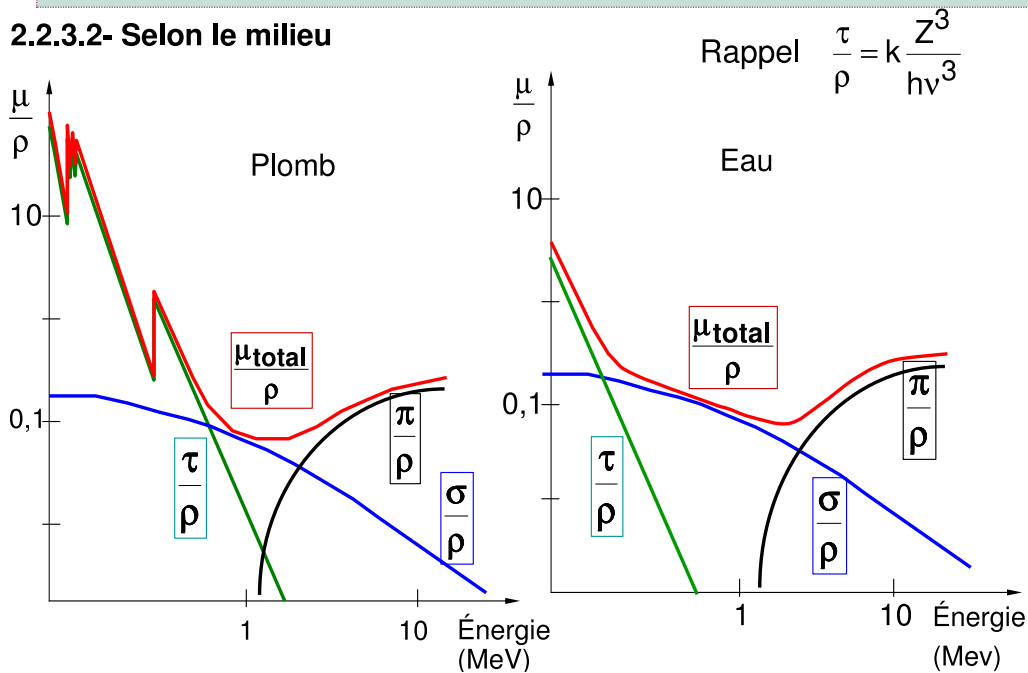
3. Autre type d'interaction

Diffusion de Thomson-Rayleigh	<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>	
		<ul style="list-style-type: none"> * Important pour les <u>photons peu énergétiques</u> : IR, UV, visible * Négligeable pour les <u>photons très énergétiques</u> : γ et X.
Création de paire	<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 ($=0,511\text{MeV}$).</p> <p><i>Remarque : la réaction contraire s'appelle une annihilation.</i></p>	$\frac{\pi}{\rho}$ <p>Existante seulement à partir d'une énergie $E > 1022\text{keV}$ Ce seuil correspond à <u>la masse des 2 particules formées</u>.</p>



4. Probabilité et matière traversée

2.2.3.2- Selon le milieu



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. Interaction des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons

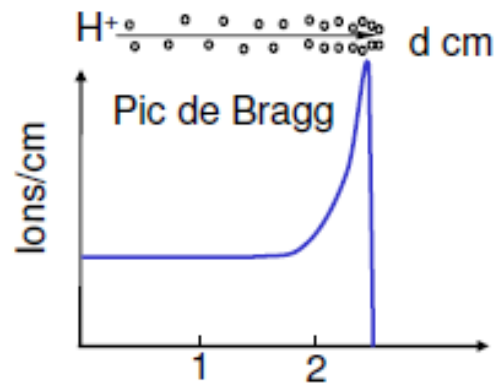
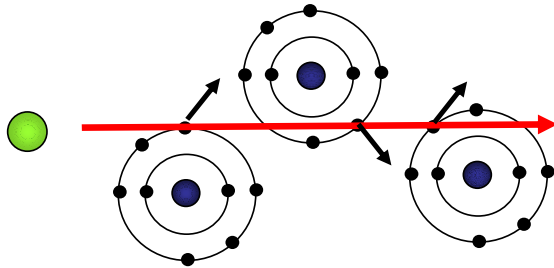
Les **neutrons** interagissent avec les **noyaux**. Du fait du diamètre très faible par rapport à l'atome, cette interaction a une probabilité faible. Les neutrons sont donc très **pénétrants** (ils interagissent peu). On en distingue 2 types :

- * Les neutrons rapides : d'énergie cinétique élevée

- ↪ Dans les milieux riches en hydrogène (la masse du noyau est proche de celle du neutron): le transfert d'E est maximal. Ce noyau H^+ percuté est expulsé = proton secondaire qui donnera des **ionisations** (les neutrons sont indirectement ionisants).
- ↪ Dans les milieux composés de noyaux lourds, les neutrons « rebondissent » sans perdre beaucoup d'énergie.
- * **Les neutrons lents** : d'énergie cinétique faible ou neutrons « thermiques » sont absorbés par les noyaux: capture nucléaire à l'origine de transformations radioactives (« capture radiative »).

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 à une distance particulière.



Application médicale : la radiothérapie

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

