



Interactions des rayonnements avec la matière

UE3a - biophysique

Introduction

- Un rayonnement (électromagnétique ou particulaire) qui traverse la matière lui transmet une partie de son énergie. Ce transfert d'énergie se fait par **échauffement**, **excitation** ou **ionisation**.
- Intérêt pour l'imagerie : on peut détecter des rayonnements grâce aux interactions
- Intérêt en radiothérapie et en radioprotection : les interactions sont la première étape de l'action biologique des rayonnements

Plan

I. Rayonnements ionisants

- 1 – Définition
- 2 – Rayonnements indirectement et directement ionisants
- 3 – Caractère ionisant ou non des rayonnements électromagnétiques

II. Interactions élémentaires

- 1 – Interaction par excitation
- 2 – Interaction par ionisation
- 3 – Emission d'un photon de fluorescence
- 4 – Emission d'un électron Auger

III. Interactions des photons

- 1 – Loi d'atténuation des photons dans la matière
- 2 – Mécanismes d'atténuation
- 3 – Importance relative des mécanismes d'interaction

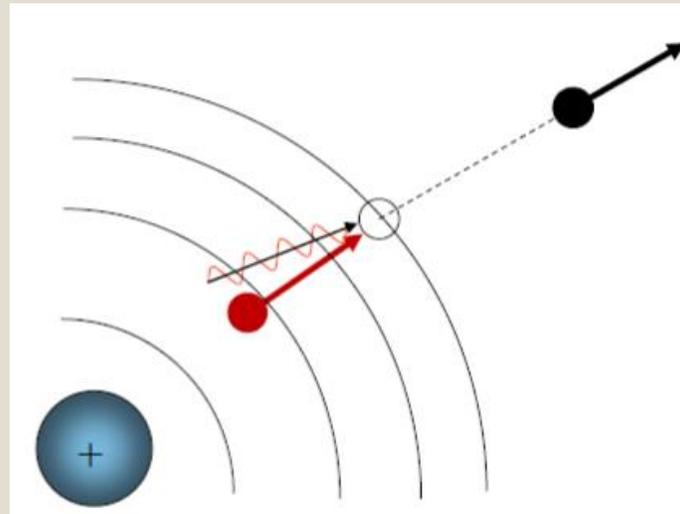
IV. Interactions des particules

- 1 – Interaction des neutrons avec la matière
- 2 – Interaction des particules chargées positivement avec la matière
- 3 – Interaction des électrons avec la matière

I. Rayonnements ionisants

1- Définition

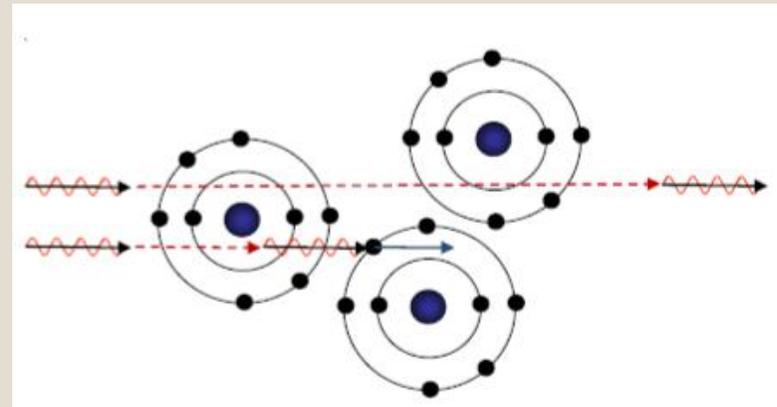
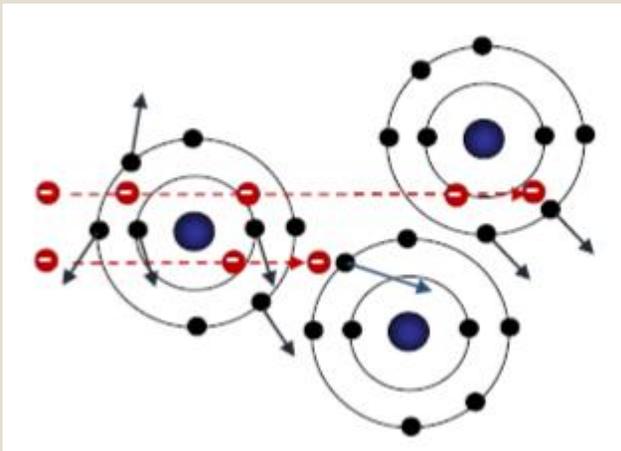
- Rayonnement électromagnétique ou corpusculaire capable de produire directement ou non des ions
- Les ions créés sont à la base
 - De la détection des rayonnements (systèmes d'imagerie...)
 - Des effets biologiques (directs et indirects sur l'ADN)



I. Rayonnements ionisants

2 – Rayonnements directement et indirectement ionisants

- Les particules chargées ($\alpha^{2+}, \beta^{-}, \beta^{+}, e^{-}, p^{+}$)
 - Interaction **obligatoire** avec la matière
 - Directement ionisantes
- Les rayonnements électromagnétiques et les particules neutres
 - Interaction **non obligatoire**
 - Indirectement ionisants



I. Rayonnements ionisants

3 – Caractère ionisant ou non des rayonnements électromagnétiques

Rappel : chaque électron est lié à son noyau par une énergie de liaison notée $|W_n|$

Un rayonnement est **ionisant** si $h\nu \geq |W_n|$

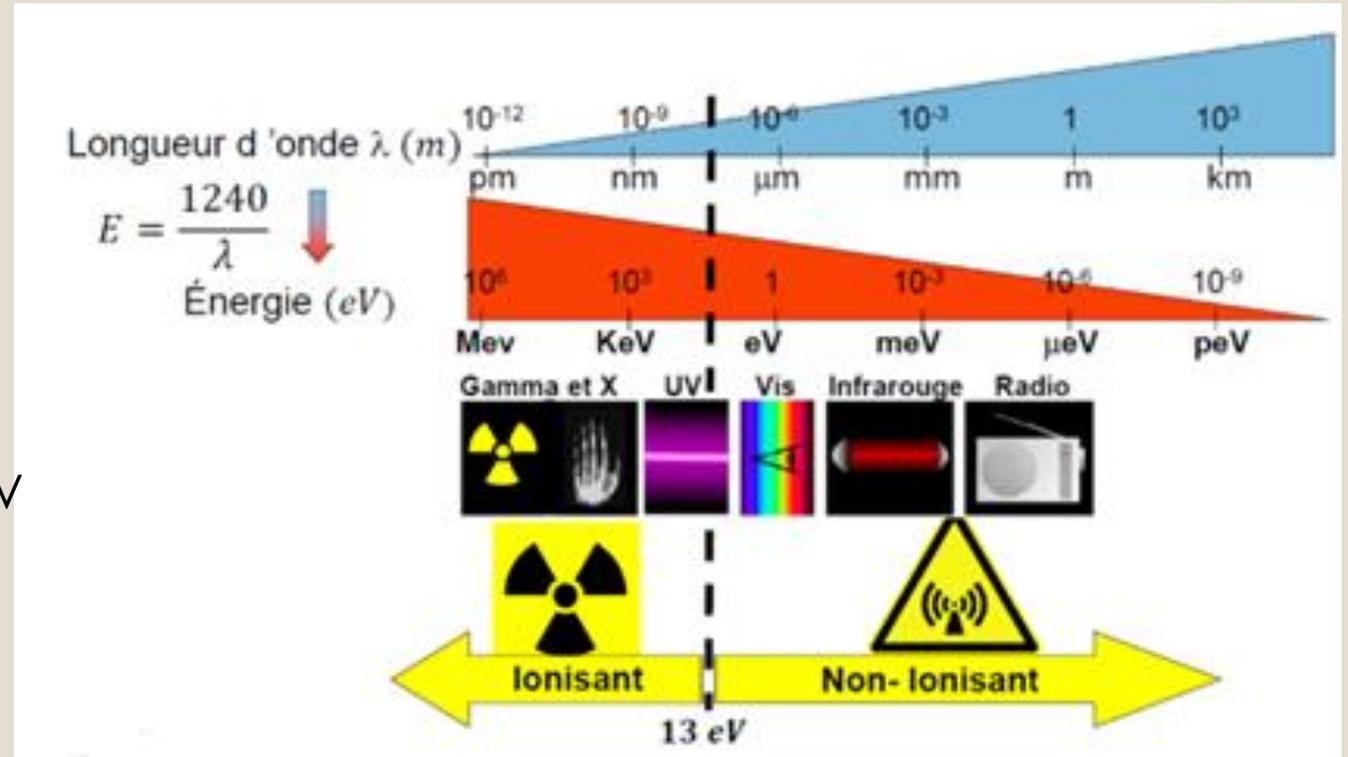
Atome	$ W $ (eV)
<i>C</i>	11,24
<i>H</i>	13,54
<i>O</i>	13,57
<i>N</i>	14,24

Seuil minimum : $W_{H_2O} \approx 13,6 \text{ eV}$

*Énergies de liaison des principaux
atomes biologiques*

I. Rayonnements ionisants

- Rayonnement **ionisant** si $h\nu \geq 13,6 \text{ eV}$
- Rayonnement **non ionisant** si $h\nu < 13,6 \text{ eV}$



Plan

I. Rayonnements ionisants

- 1 – Définition
- 2 – Rayonnements indirectement et directement ionisants
- 3 – Caractère ionisant ou non des rayonnements électromagnétiques

II. Interactions élémentaires

- 1 – Interaction par excitation
- 2 – Interaction par ionisation
- 3 – Emission d'un photon de fluorescence
- 4 – Emission d'un électron Auger

III. Interactions des photons

- 1 – Loi d'atténuation des photons dans la matière
- 2 – Mécanismes d'atténuation
- 3 – Importance relative des mécanismes d'interaction

IV. Interactions des particules

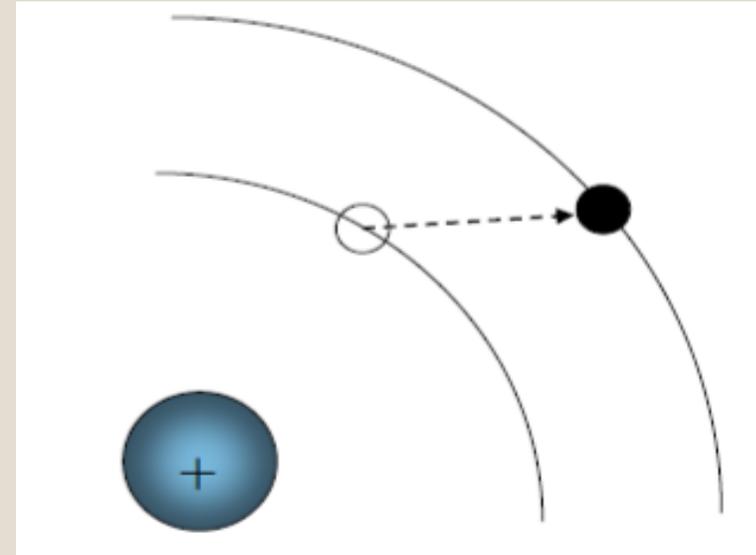
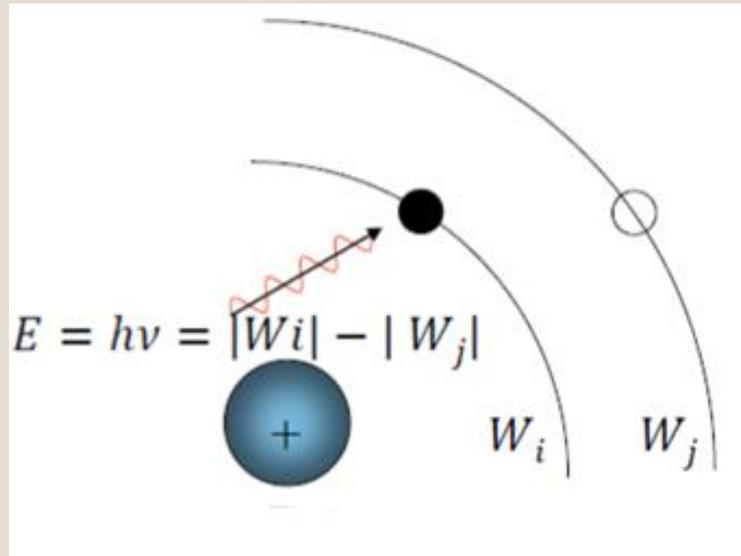
- 1 – Interaction des neutrons avec la matière
- 2 – Interaction des particules chargées positivement avec la matière
- 3 – Interaction des électrons avec la matière

II. Interactions élémentaires

- Les rayonnements qui traversent un milieu entrent en collision avec les éléments de ce milieu, notamment avec les **électrons** des atomes.
- Cette interaction consiste en un **transfert d'énergie** entre le rayonnement incident et la matière traversée.
- Conventions d'écriture
 - Photon d'énergie $E=h\nu$
 - Atomes de la matière selon le modèle de Bohr (K, L, M...)
 - Energie de l'électron : W_i
 - Energie de liaison de l'électron : $|W_i|$

II. Interactions élémentaires

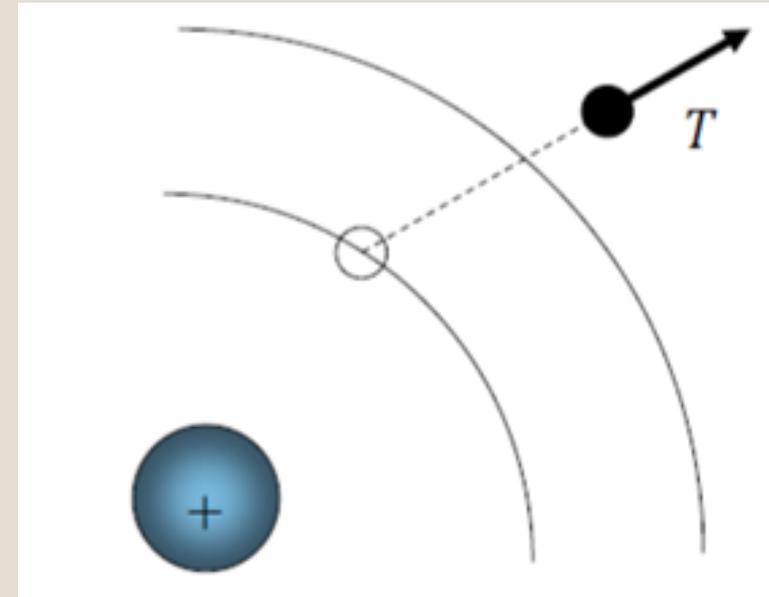
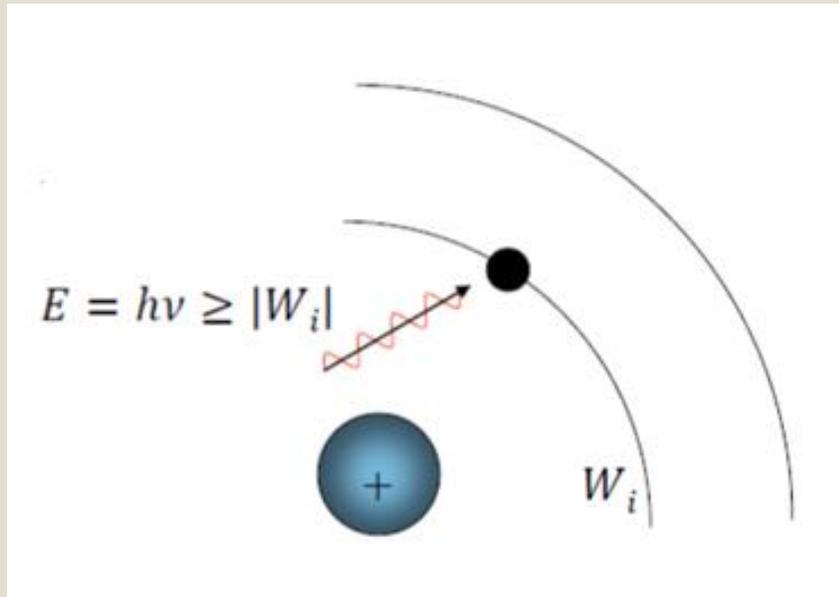
1 – Interaction par excitation



- $E = hv < |W_i|$ mais E correspond exactement à une différence d'énergie de liaison entre les couches de l'atome considéré : il y a **excitation**.
- Excès d'énergie : $E = |W_i| - |W_j|$
- Energie quantifiée

II. Interactions élémentaires

2 – Interaction par ionisation

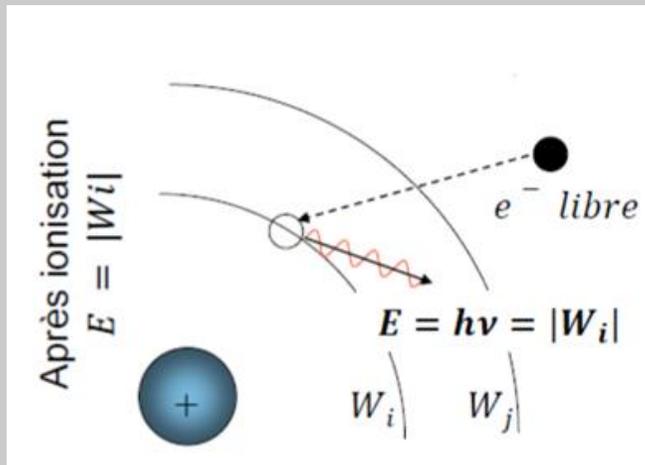


- $E = hv \geq |W_i|$: il y a **ionisation**
- Excès d'énergie : $E = |W_i|$
- Energie non quantifiée

II. Interactions élémentaires

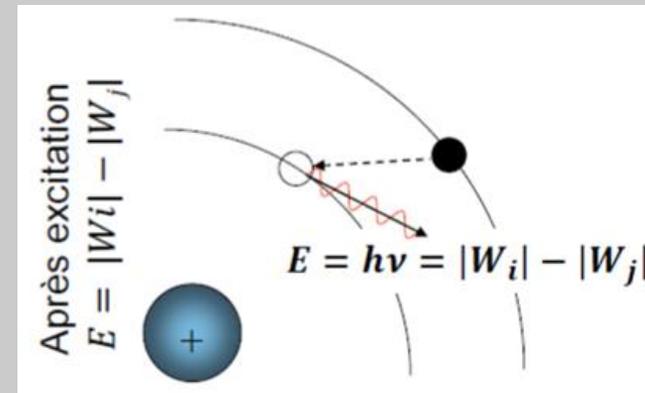
3 – Emission d'un photon de fluorescence

Après ionisation



Un électron libre de la matière vient combler la vacance électronique

Après excitation

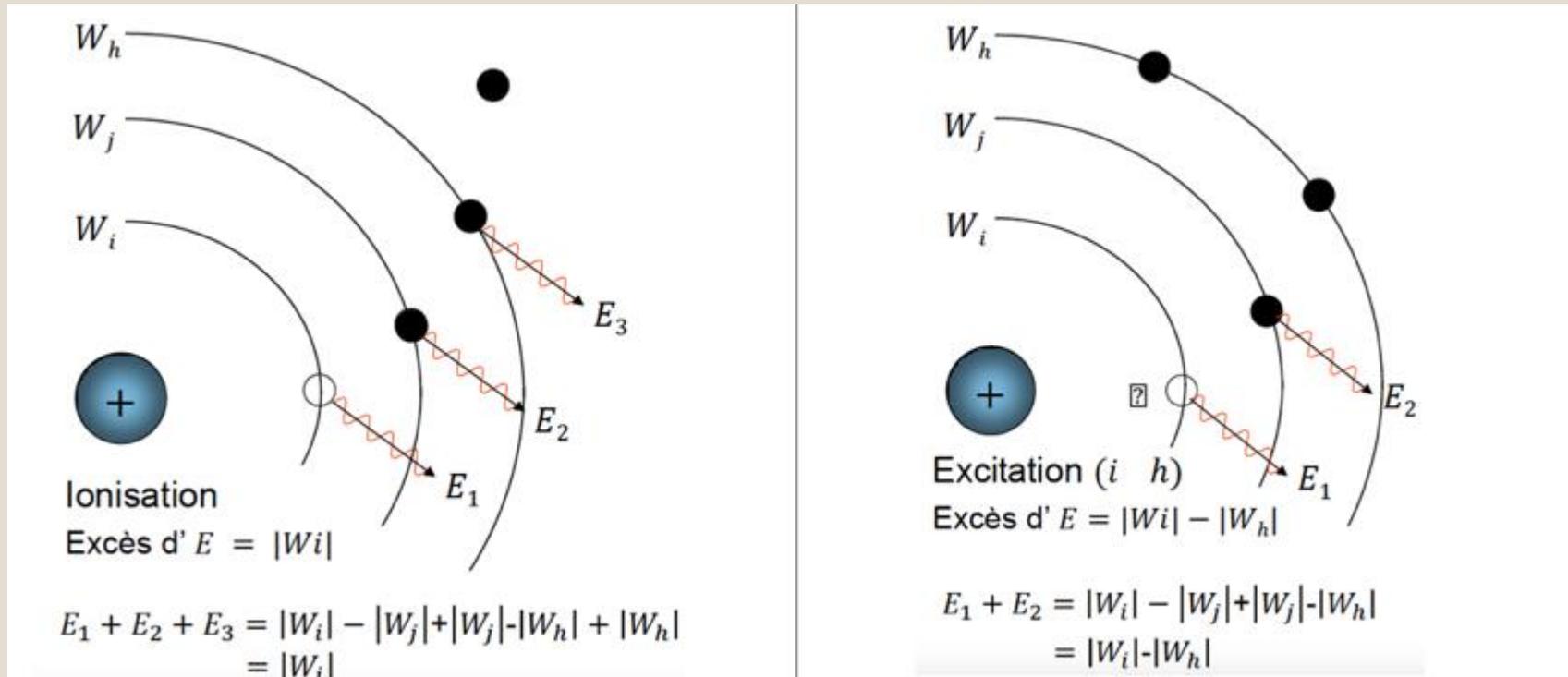


Un électron d'une couche plus périphérique vient combler la vacance électronique

II. Interactions élémentaires

Le retour à l'état fondamental peut aussi se faire en plusieurs étapes par cascade de réarrangements électroniques.

Exemple :

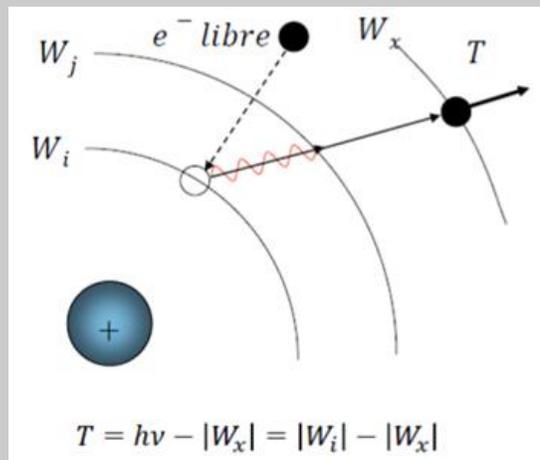


II. Interactions élémentaires

4 – Emission d'un électron Auger

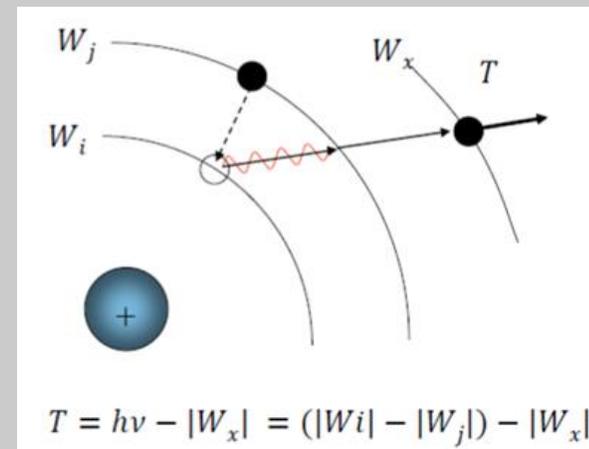
Le retour à l'état fondamental d'un atome qui a un excès d'énergie (ionisé ou excité) est accompagné d'une émission d'un photon de fluorescence qui peut alors lui-même expulser un électron de l'atome qui lui a donné naissance : c'est un **électron Auger**.

Après ionisation



Un électron libre vient combler la vacance sur la couche i générant un photon de fluorescence.

Après excitation



Un électron d'une couche plus périphérique vient combler la vacance électronique en générant un photon.

QCM TIME

QCM1

Soit l'atome de Carbone ($Z=6$). Les énergies de ses électrons (en eV) sont : $W_K = -284$ et $W_L = -18$. Il subit une excitation avec passage d'un électron de la couche K à la couche L. Il se désexcite par émission d'un électron Auger. Quelle est l'énergie cinétique T de cet électron ? (en eV)

a) 284

b) 266

c) 248

d) 302

e) Toutes les réponses sont fausses

QCM TIME

QCM1

Soit l'atome de Carbone ($Z=6$). Les énergies de ses électrons (en eV) sont : $W_K = -284$ et $W_L = -18$. Il subit une excitation avec passage d'un électron de la couche K à la couche L. Il se désexcite par émission d'un électron Auger. Quelle est l'énergie cinétique T de cet électron ? (en eV)

- a) 284 b) 266 c) 248 d) 302 e) Toutes les réponses sont fausses

Réponse C : 248 eV

QCM TIME

QCM2

Soit l'atome de Titane ($Z=22$). Les énergies de ses électrons (en eV) sont : $W_K = -134,9$ $W_L = -33,7$ et $W_M = -15,0$. Il subit une excitation par passage de la couche K à la couche M. Quels sont les phénomènes observables lors de son retour à l'état fondamental ?

- a) Un photon d'énergie $h\nu = 101,2$ eV
- b) Un photon d'énergie $h\nu = 119,9$ eV
- c) Un photon d'énergie $h\nu = 33,7$ eV
- d) Un photon d'énergie $h\nu = 18,7$ eV
- e) Toutes les réponses sont fausses

QCM TIME

QCM2

Soit l'atome de Titane ($Z=22$). Les énergies de ses électrons (en eV) sont : $W_K = -134,9$ $W_L = -33,7$ et $W_M = -15,0$. Il subit une excitation par passage de la couche K à la couche M. Quels sont les phénomènes observables lors de son retour à l'état fondamental ?

- a) Un photon d'énergie $h\nu = 101,2$ eV
- b) Un photon d'énergie $h\nu = 119,9$ eV
- c) Un photon d'énergie $h\nu = 33,7$ eV
- d) Un photon d'énergie $h\nu = 18,7$ eV
- e) Toutes les réponses sont fausses

Réponses A, B, D

Plan

I. Rayonnements ionisants

- 1 – Définition
- 2 – Rayonnements indirectement et directement ionisants
- 3 – Caractère ionisant ou non des rayonnements électromagnétiques

II. Interactions élémentaires

- 1 – Interaction par excitation
- 2 – Interaction par ionisation
- 3 – Emission d'un photon de fluorescence
- 4 – Emission d'un électron Auger

III. Interactions des photons

- 1 – Loi d'atténuation des photons dans la matière
- 2 – Mécanismes d'atténuation
- 3 – Importance relative des mécanismes d'interaction

IV. Interactions des particules

- 1 – Interaction des neutrons avec la matière
- 2 – Interaction des particules chargées positivement avec la matière
- 3 – Interaction des électrons avec la matière

III. Interactions des photons

1- Loi d'atténuation des photons dans la matière



On s'intéresse aux photons **transmis**, afin de déterminer combien de photons sont intacts après la traversée d'une certaine épaisseur de matière.

Expression de la loi :

Soit un faisceau étroit de N photons mono-énergétiques qui traversent une épaisseur dx de matière, le nombre de photons transmis soit le nombre de photons persistant après cette traversée est $N - dN$ avec $-dN = \mu N dx$

D'une manière générale, le nombre de photons présents après avoir traversé une épaisseur x de matière est

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

III. Interactions des photons

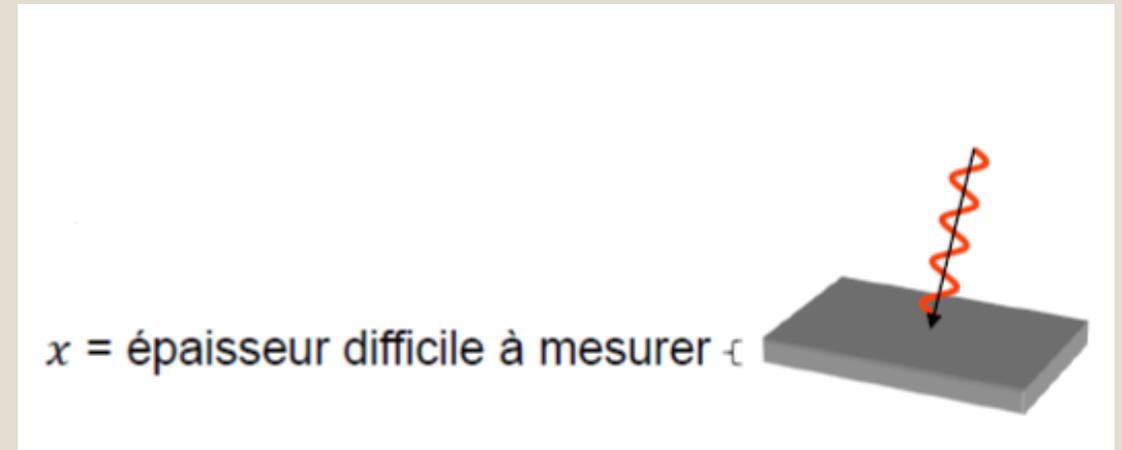
Différentes expressions de μ :

Le coefficient **linéique** d'atténuation μ

- spécifique du milieu,
- spécifique de l'énergie des photons,
- dimension $[L^{-1}]$

Le coefficient **massique** d'atténuation $\frac{\mu}{\rho}$

- ne dépend pas de l'état du milieu
- dimension $[L^{-2}.M^{-1}]$
- masse surfacique, plus facile à mesurer que l'épaisseur x



III. Interactions des photons

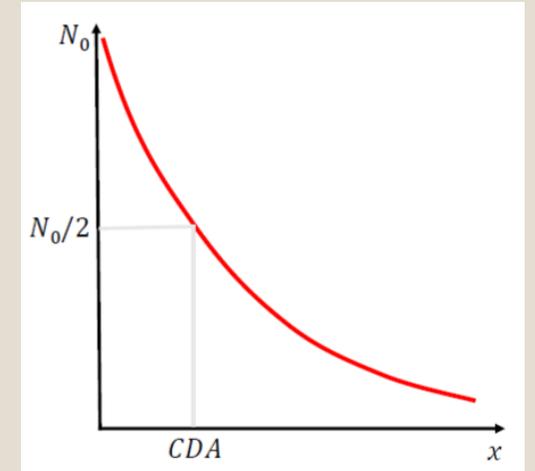
Couche de demi-atténuation (CDA) :

Définition : **épaisseur x qui diminue le flux de photon d'un facteur 2**

$$\frac{N(x)}{2} = N(0)e^{-\mu \cdot CDA}$$

soit

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

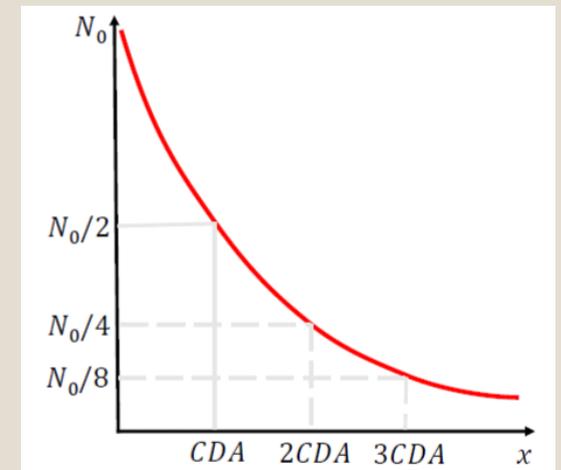


On peut réécrire la loi d'atténuation en fonction de la CDA :

$$N(k \cdot CDA) = N(0) \left(\frac{1}{2}\right)^k = \frac{N(0)}{2^k}$$

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 photons n'est jamais totale
- le nombre de photons transmis après 10 CDA est négligeable



Exemple de QCM sur la CDA

QCM

Pour se protéger d'un flux de photons de 511keV, on dispose de plomb dont la couche de demi-atténuation (CDA) est de 0,4cm et de fer dont la CDA est de 0,3mm.

- a) Le plomb possède un coefficient d'atténuation plus élevé que le fer
- b) 0,4cm de plomb laissent passer 25% des photons
- c) 0,6mm de fer laissent passer 25% des photons
- d) 0,4cm de plomb + 0,3mm de fer laissent passer 50% des photons
- e) Toutes les réponses sont fausses

Exemple de QCM sur la CDA

QCM

Pour se protéger d'un flux de photons de 511keV, on dispose de plomb dont la couche de demi-atténuation (CDA) est de 0,4cm et de fer dont la CDA est de 0,3mm.

- a) Le plomb possède un coefficient d'atténuation plus élevé que le fer
- b) 0,4cm de plomb laissent passer 25% des photons
- c) 0,6mm de fer laissent passer 25% des photons
- d) 0,4cm de plomb + 0,3mm de fer laissent passer 50% des photons
- e) Toutes les réponses sont fausses

III. Interactions des photons

2 – Mécanismes d'atténuation

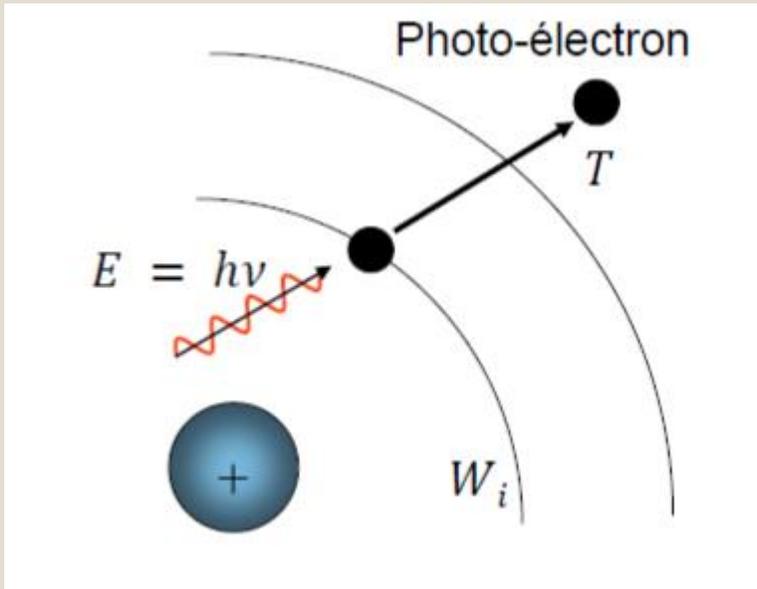
Mécanismes qui vont diminuer le nombre de photons transmis lorsqu'un faisceau de photons traverse une certaine épaisseur de matière.

- Effet photo-électrique
- Effet Compton
- Diffusion de Thomson-Rayleigh
- Création de paire (ou matérialisation)

III. Interactions des photons

◦ Effet photo-électrique

Transfert de la **totalité** de l'énergie du photon incident à un électron des atomes de la matière.



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

$$T = h\nu - |W_i|$$

Conséquences

- Pour l'atome : réarrangement par photons de fluorescence et électron Auger
- Pour l'électron expulsé : perte de son énergie T par ionisations successives

III. Interactions des photons

Probabilité d'interaction avec l'**effet photo-électrique** notée τ

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

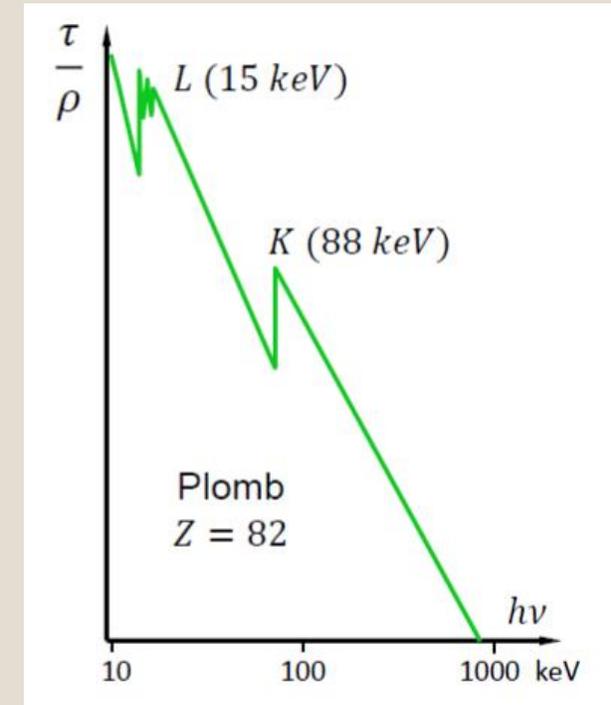
$$\tau = k\rho \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$$

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

Probabilité élevée pour :

- Les éléments lourds (Z élevé)
- Les photons d'énergie faible

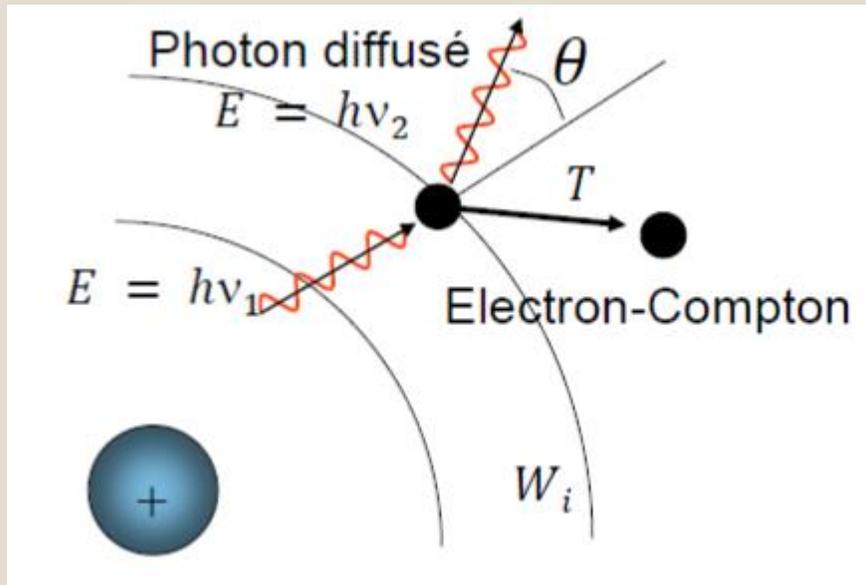
Les maxima (pics) correspondent à $h\nu = |W_k|, |W_l|$



III. Interactions des photons

◦ Effet Compton

Transfert **partiel** de l'énergie du photon incident à un électron des atomes de la matière.



$$h\nu_1 = T + h\nu_2 + \underbrace{W_i}_{\downarrow}$$

négligeable

Conséquences

- Pour l'atome : réarrangement par photons de fluorescence et électron Auger

- Pour l'électron expulsé : perte de son énergie T par ionisations successives : c'est de l'énergie **absorbée** (notée E_a) ou **transférée**

Nb : une partie de l'énergie est **diffusée** : $h\nu_2$

III. Interactions des photons

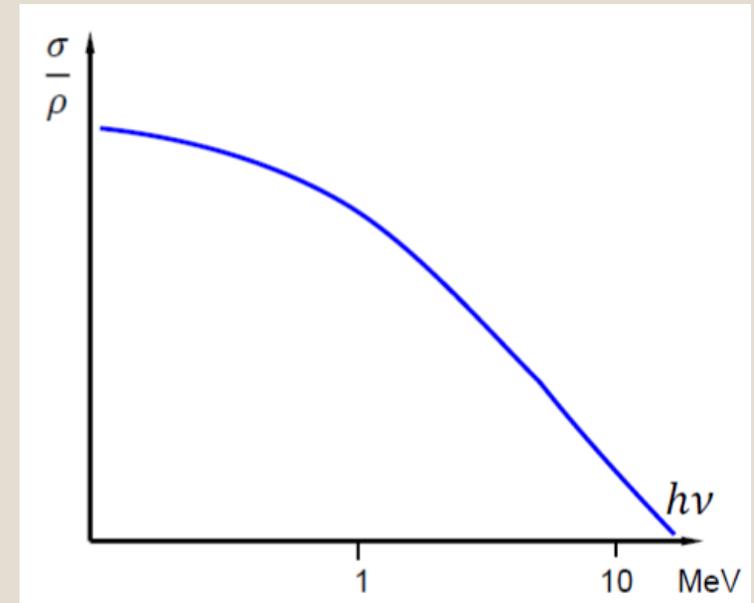
Probabilité d'interaction avec l'**effet Compton** notée σ

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

$$\sigma = k\rho \frac{1}{h\nu}$$

$$\frac{\sigma}{\rho} = k \frac{1}{h\nu}$$

- Probabilité **indépendante** de la nature de l'atome
- σ augmente lorsque E diminue



III. Interactions des photons

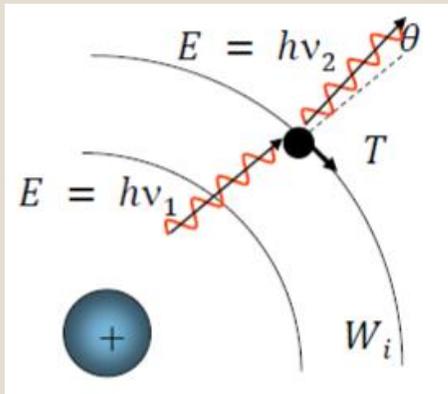
Formules de Compton et rapport E_a/E_d

❖ Effet de l'angle θ

$$\frac{E_{\text{absorbée}}}{E_{\text{diffusée}}} = \frac{T}{hv_2} = \frac{hv_1(1 - \cos\theta)}{mc^2}$$

θ faible

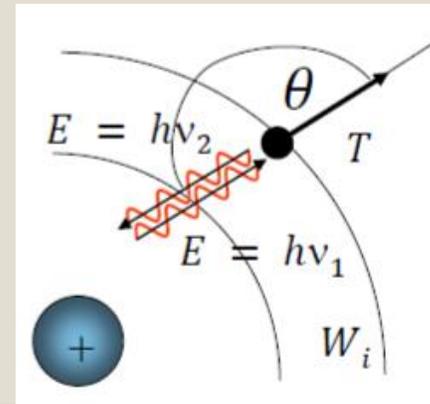
Le rapport E_a/E_d est faible
A l'extrême : choc tangentiel avec
 $\theta = 0 \leftrightarrow \cos \theta = 1$



$$E_a/E_d \approx 0$$

θ élevé

Le rapport E_a/E_d est élevé
A l'extrême : choc frontal avec
 $\theta = \pi \leftrightarrow \cos \theta = -1$



$$E_a/E_d = \frac{2hv_1}{mc^2}$$

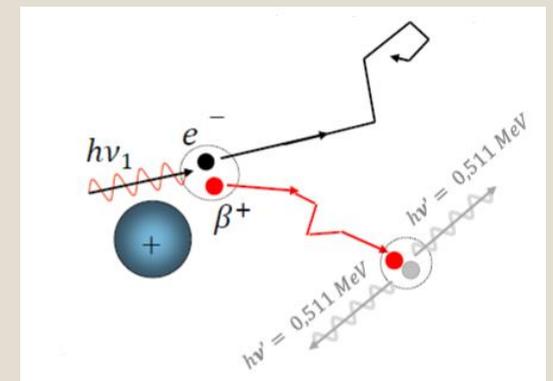
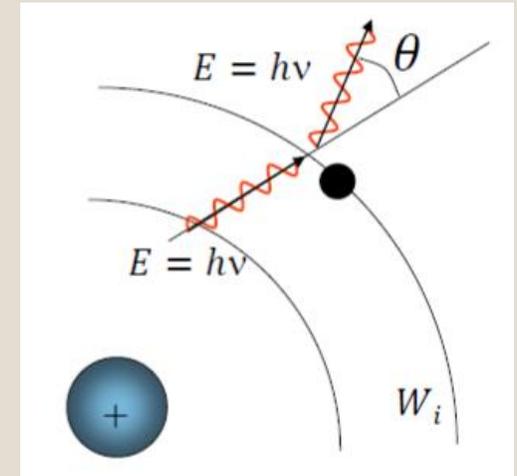
et T est maximum

❖ Effet de l'énergie hv_1

Plus hv_1 est élevé, plus E_a/E_d est élevé.

III. Interactions des photons

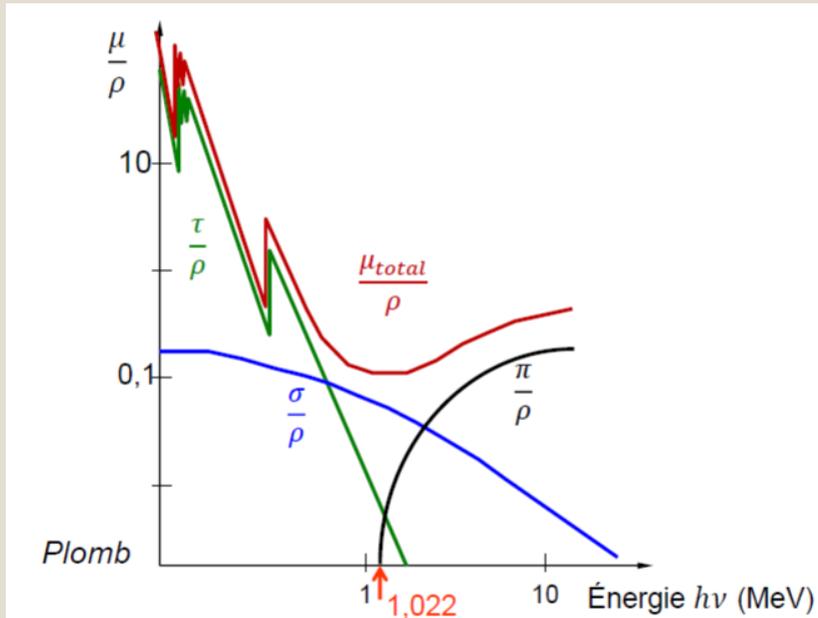
- Diffusion de Thomson-Rayleigh
 - Simple **changement de direction** sans changement d'énergie
 - Important pour les photons **peu énergétiques** (IR, visible, UV)
 - Négligeable pour les photons X et γ
- Création de paire ou matérialisation
 - Un photon très énergétique passant à proximité du noyau voit son **énergie transformée en 2 particules** (un électron et un positon)
 - Probabilité de création de paire : $N(x) = N(0)e^{-\pi x}$
 - **Seuil de 1,022MeV** correspondant à l'énergie équivalente à la masse des deux particules



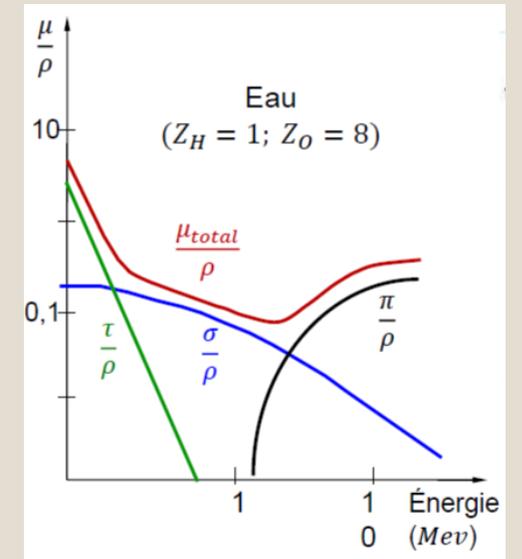
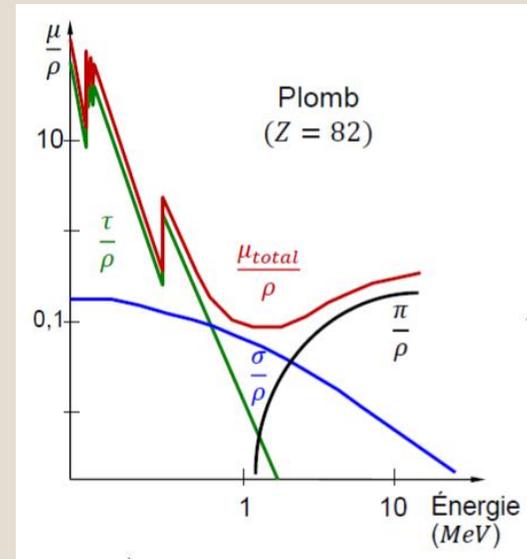
III. Interactions des photons

3 – Importance relative des mécanismes d'interaction

Selon l'énergie



Selon le milieu



Rappel : $\frac{\tau}{\rho} = k \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$

Plan

I. Rayonnements ionisants

- 1 – Définition
- 2 – Rayonnements indirectement et directement ionisants
- 3 – Caractère ionisant ou non des rayonnements électromagnétiques

II. Interactions élémentaires

- 1 – Interaction par excitation
- 2 – Interaction par ionisation
- 3 – Emission d'un photon de fluorescence
- 4 – Emission d'un électron Auger

III. Interactions des photons

- 1 – Loi d'atténuation des photons dans la matière
- 2 – Mécanismes d'atténuation
- 3 – Importance relative des mécanismes d'interaction

IV. Interactions des particules

- 1 – Interaction des neutrons avec la matière
- 2 – Interaction des particules chargées positivement avec la matière
- 3 – Interaction des électrons avec la matière

IV. Interaction des particules

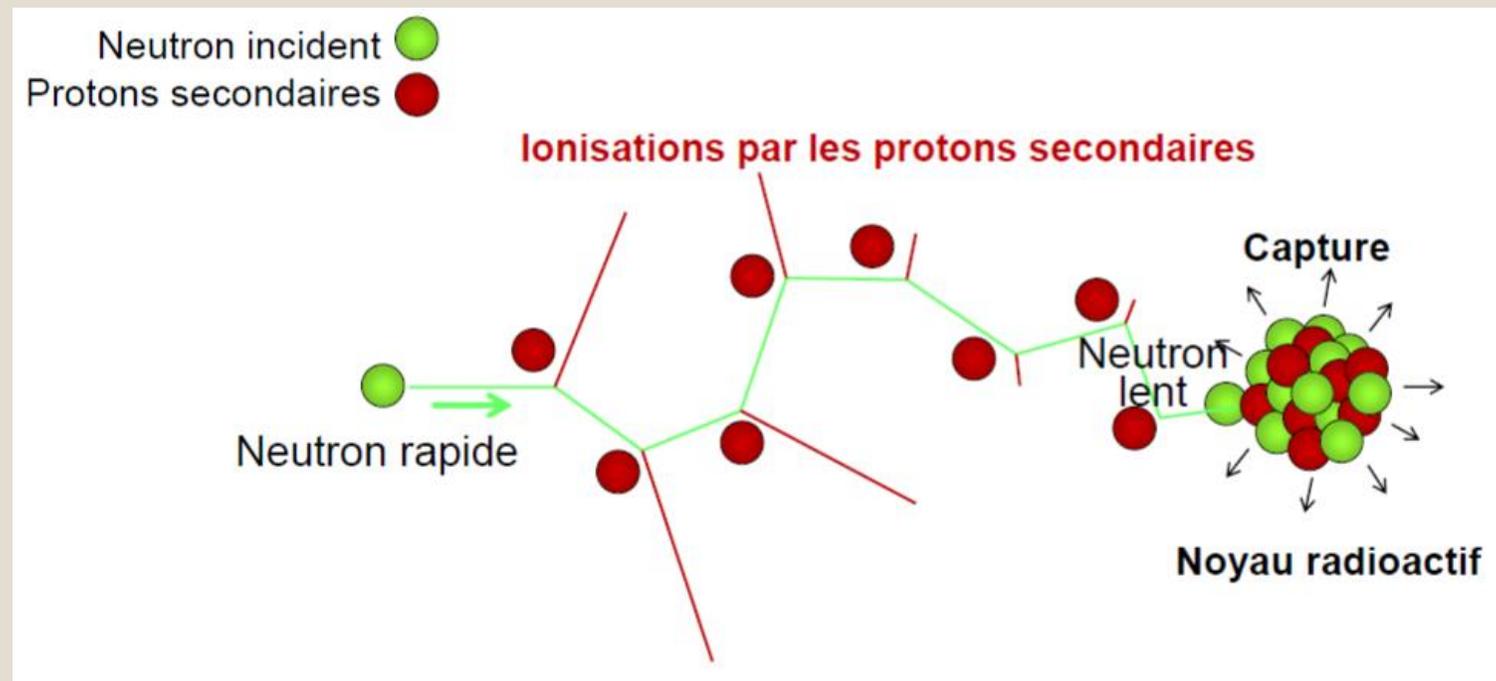
1 – Interaction des **neutrons** avec la matière

- Interaction par choc direct avec les noyaux
- Probabilité d'interaction **faible**, les neutrons sont donc **très pénétrants**
- Neutrons rapides (E cinétique élevée)
 - Dans un milieu riche en hydrogène la masse du neutron \approx masse du noyau \rightarrow transfert d'énergie **maximal**. Le noyau H⁺ percuté est expulsé avec une certaine énergie cinétique : c'est un proton secondaire mis en mouvement par le neutron. Chargé +, le noyau va provoquer des ionisations : on dit que les neutrons sont **indirectement ionisants**.
 - Dans un milieu composé de noyaux **lourds**, un neutron qui percute un noyau est simplement dévié sans perdre beaucoup d'énergie, il « rebondit ».

IV. Interaction des particules

- Neutrons lents = neutrons thermiques (E cinétique faible)

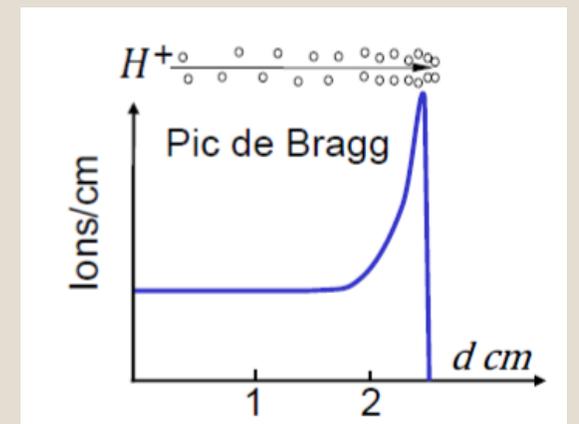
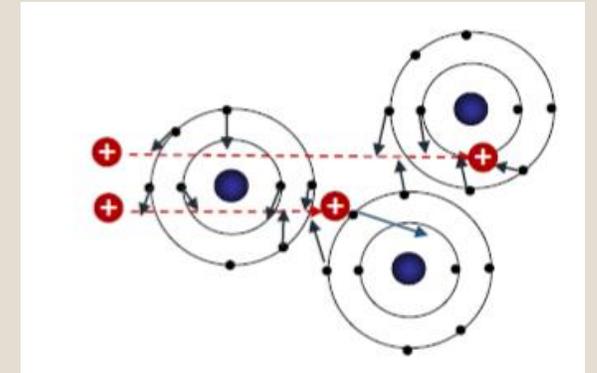
Lorsqu'ils percutent un noyau, du fait de leur faible énergie, ils vont être **capturés** et **absorbés** par ce noyau. Le nouveau noyau obtenu est en général **instable** et devient **radioactif**. Il provoque une émission radiative secondaire. On appelle ça la **capture radiative**.



IV. Interaction des particules

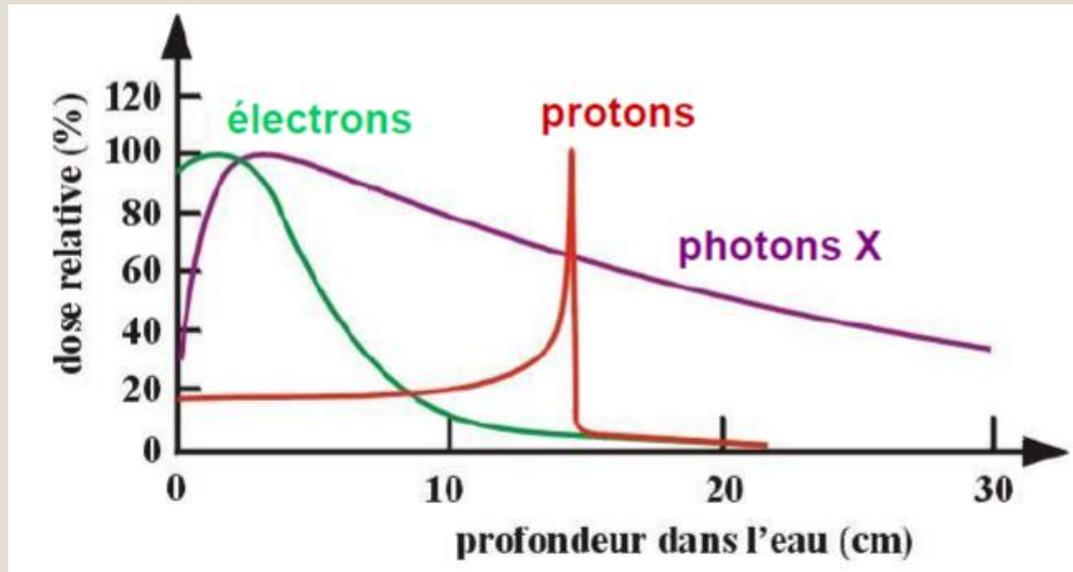
2 – Interaction des particules **chargées positivement** avec la matière

- Elles interagissent avec les électrons de la matière et sont **directement ionisantes**
- Leur masse est **supérieure** à celle de l'électron donc
 - Transfert d'énergie faible
 - Peu de déviation et peu de fluctuation des trajectoires
- Elles ont un pouvoir d'arrêt **très élevé**
 - Parcours court
 - Effets biologiques importants
 - Pic de Bragg (maximum d'ionisations en fin de parcours)

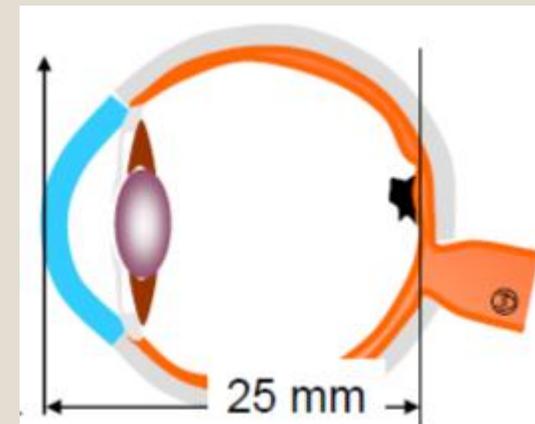


IV. Interaction des particules

Application à la radiothérapie externe



Exemple : protonthérapie des mélanomes de la choroïde



IV. Interaction des particules

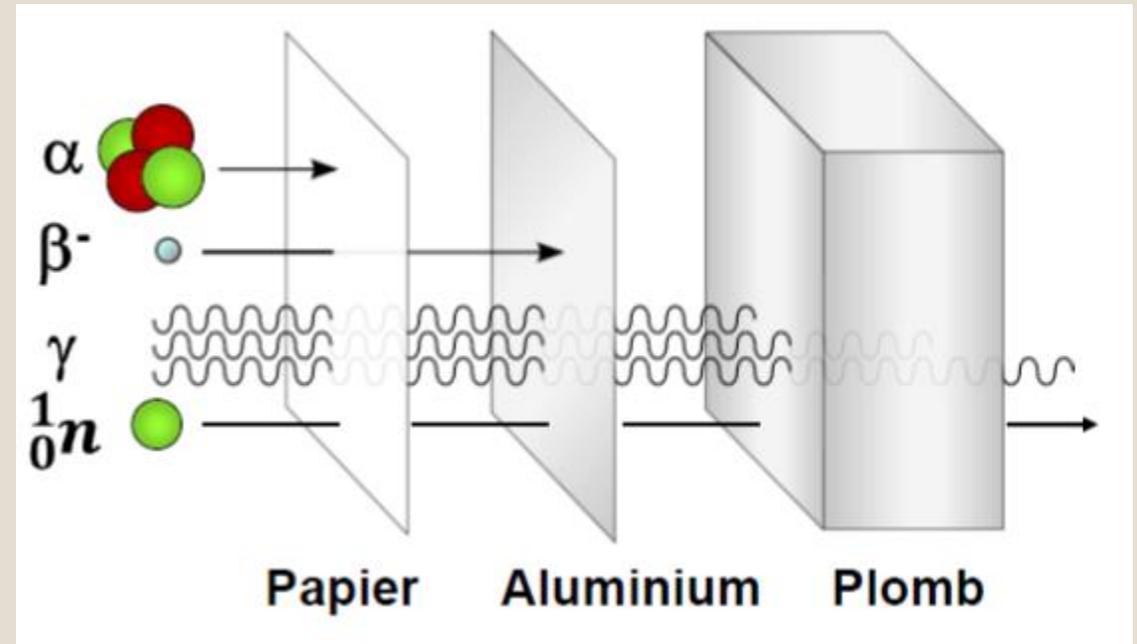
3 – Interactions des **électrons** avec la matière

- Les électrons interagissent avec les **autres électrons** de la matière par des **interactions coulombiennes** et dans ce cas ils sont **directement ionisants**.
- Ils peuvent aussi interagir avec les **noyaux** de la matière qui sont chargés positivement.

(Revu en détail dans le cours sur les rayons X)

Conclusion

- Lorsqu'ils traversent la matière, les RI 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**.



♥ FIN ♥

Bon courage à tous !!!!