



INTERACTION DES RAYONNEMENTS AVEC LA MATIERE

Dr. Mamoudou Salif DJIGO



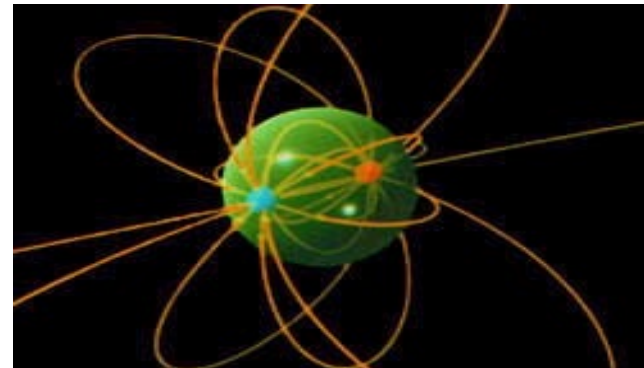
INTRODUCTION

- **Interaction rayonnement – matière** = échanges d'énergie entre le rayonnement et les atomes du milieu
- **Interaction coulombienne obligatoire des particules chargées** : α^{++} , β^+ , β^- , ions lourds (directement ionisantes)
- **Interaction stochastique, aléatoire des particules neutres et REM** : neutrons et photons X et γ . (indirectement ionisants)
- **Section efficace** : probabilité d'interaction est fonction des caractéristiques du projectile (nature, charge, énergie, dimensions) et des matériaux constituant la cible.

CLASSIFICATION DES RAYONNEMENTS

Selon la nature du rayonnement:

rayonnements électromagnétiques/rayonnements particulaires



Selon les effets du rayonnement sur la matière:

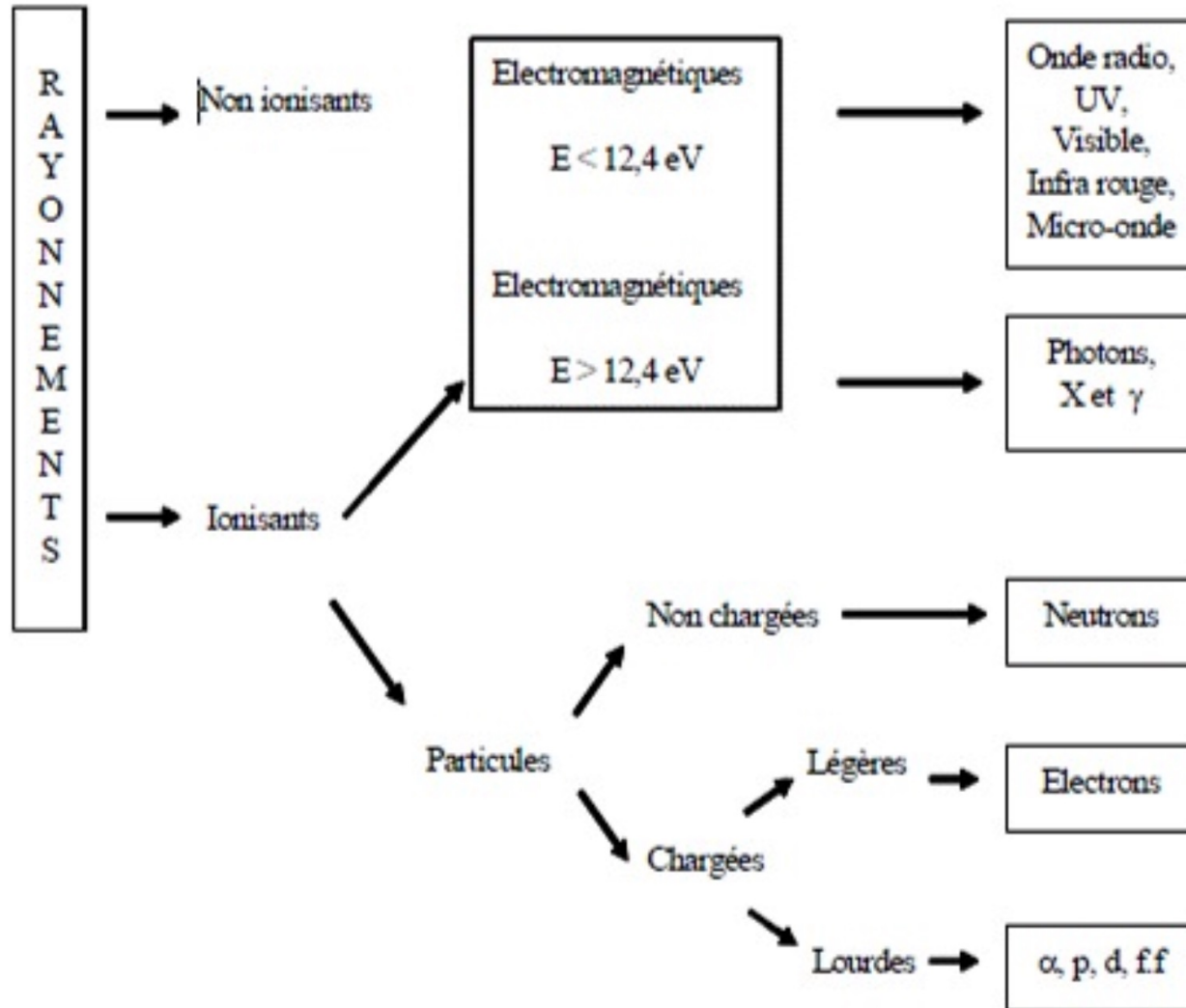
rayonnements ionisants/rayonnements non ionisants

Rayonnement Ionisant:

- RDI: p, e
- RII: n, photon

Rayonnement Non Ionisant:

CLASSIFICATION DES RAYONNEMENTS



CLASSIFICATION DES RAYONNEMENTS

Rayonnements électromagnétiques/Rayonnements particulaires
Rayonnements ionisants/Rayonnements non-ionisants

Interaction avec la matière:

Cas des particules lourdes
Cas des électrons
Cas des neutrons
Cas des Rayons X

Interaction avec la matière:

Cas des UV
Cas du visible
Cas des IR
Cas des ultrasons



Effets biologiques



INTERACTION DES RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

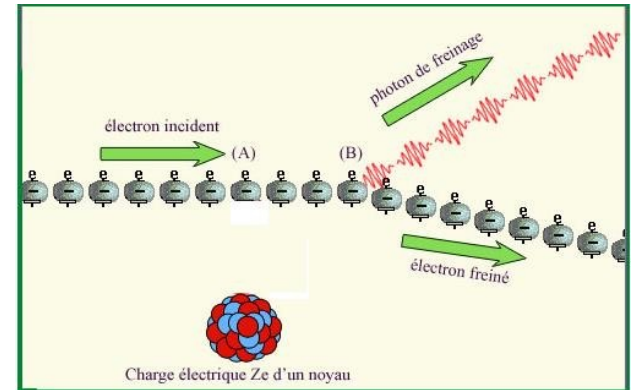
I. Interaction des particules chargées légères (e-) :

○ *1-1-Différents types d'interaction*

- **1-1- Les collisions (interactions électron-électron) :**
- plus l'énergie cinétique du projectile sera grande, plus le transfert énergétique sera faible.
- **pouvoir d'arrêt ou coefficient de ralentissement (R)** dans un matériau : perte d'énergie subie par la particule par unité de longueur :
 - pouvoir d'arrêt linéique par collision $S_c = dE/dx$ (MeV/cm)
 - pouvoir d'arrêt massique par collision $S_{cm} = 1/\rho \cdot dE/dx$ (MeV/ g . cm²)

INTERACTION DES RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

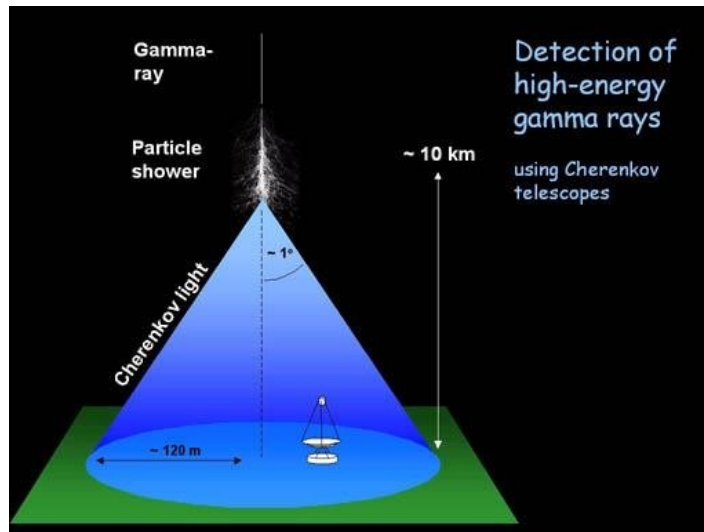
1-2- Les freinages (interactions électron – noyau)



- particules chargées passant au voisinage des noyaux subissent une accélération centripète.
- changement de trajectoire → transformation en REM de freinage (rayonnement de Bremsstrahlung) d'une partie de l'énergie cinétique des particules qui sont ainsi freinées (théorie de Maxwell).
- pouvoir d'arrêt linéique par freinage S_{rad} .

INTERACTION DES RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

- **1-3- Effet Cerenkov** : émission de lumière visible bleue lorsqu'une particule chargée de très haute E se déplace dans un milieu donné à une vitesse supérieure à celle de la lumière



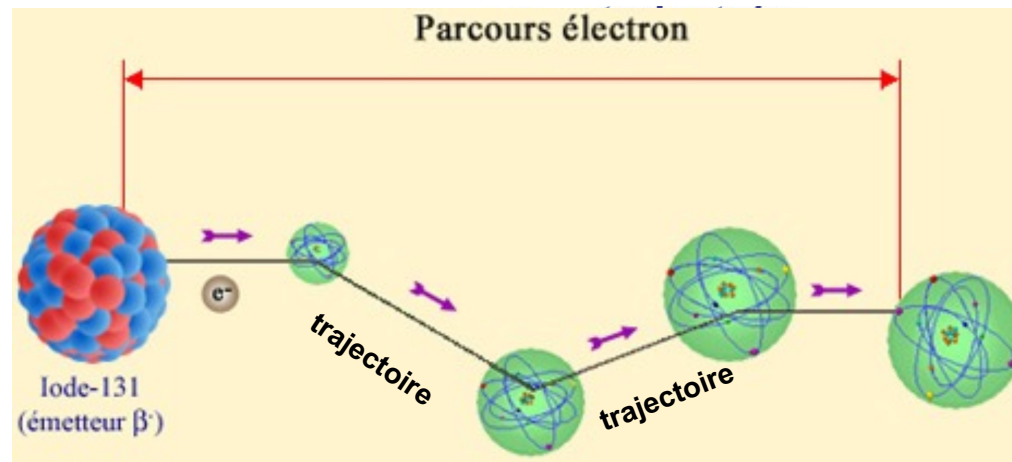
Entrée des rayons cosmiques dans l'atmosphère



Effet Cerenkov produit par un réacteur nucléaire

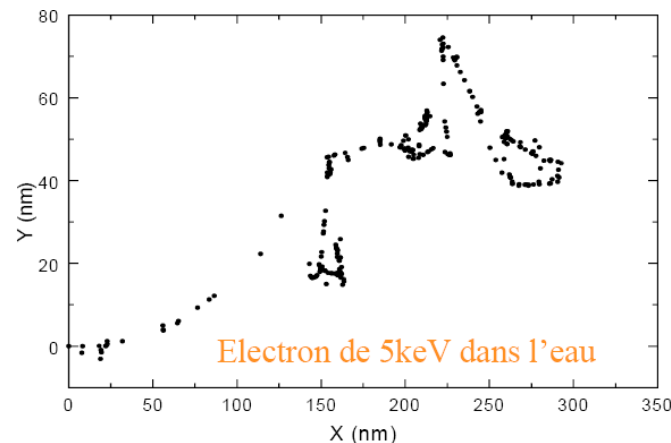
INTERACTION DES RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

- I-2- Conséquence pour le faisceau :
- Trajectoire : parcours des électrons
 - **Trajectoire** : Les particules rebondissent de choc en choc (faibles transferts d'E et faible masse des électrons) : trajectoire longue et sinueuse.
 - **Parcours** \neq trajectoire



INTERACTION DES RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

- I-2- Conséquence pour le faisceau :
- trajectoire / parcours des électrons
 - Parcours (profondeur de pénétration ou portée)
 - Parcours R dans l'eau = $E_0/2$ avec R en cm et E en MeV
 - Parcours dans un milieu de masse volumique ρ en g.cm^{-3} sera égal à $R(\text{eau})/\rho$



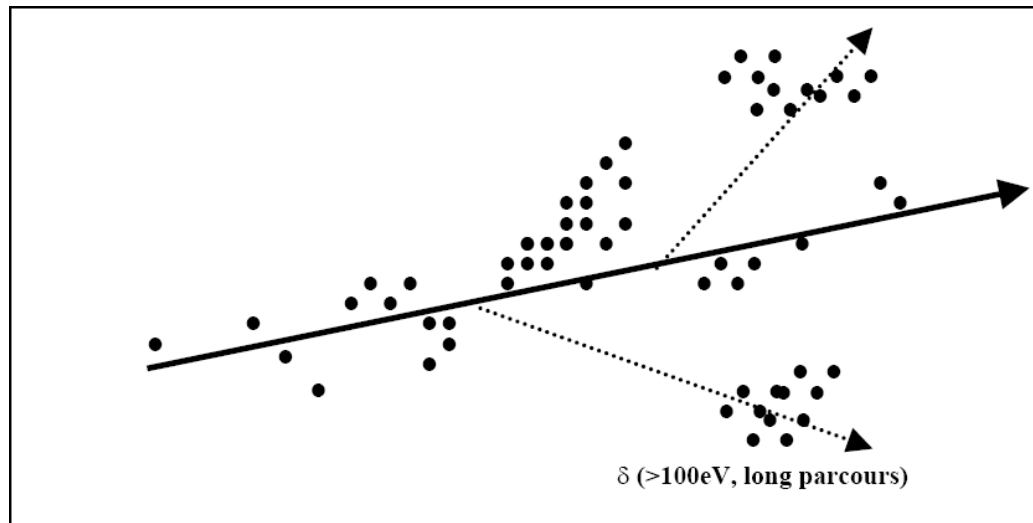
INTERACTION DES RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

I-3- Conséquences pour le milieu

I-3-1 transfert linéique d'énergie

$$\text{T.L.E.} = dE / dx$$

$E = E \text{ cédée} - E \text{ perdue sous forme de rayons } \delta \text{ (à distance)}$



INTERACTION DES RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

I-3- Conséquences pour le milieu

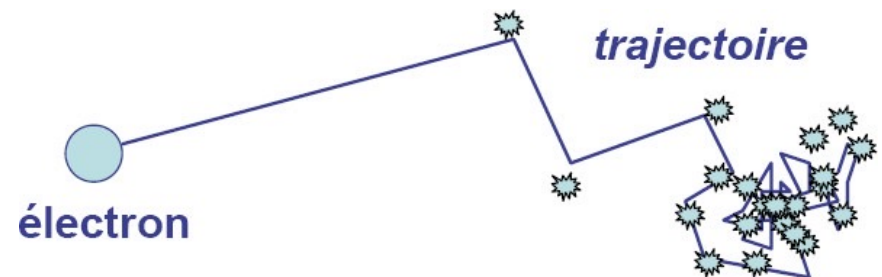
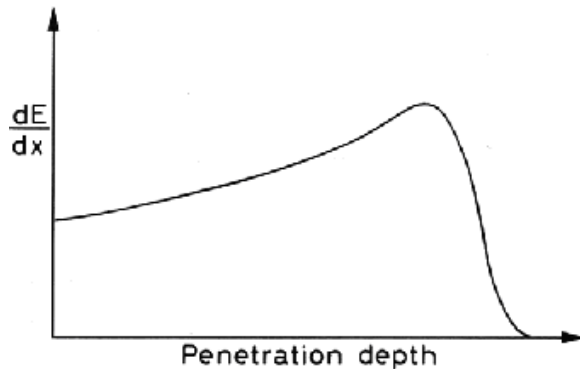
1 transfert linéique d'énergie : T.L.E. = dE / dx

- augmente avec la densité électronique du milieu, avec l'énergie de la particule et lorsque la vitesse diminue
- Les interactions sont plus nombreuses en fin de parcours

- $TLE = k \frac{z^2 n Z}{v^2}$ *z : numéro atomique et v : vitesse de la particule*

n : nombre et Z numéro atomique des atomes du milieu traversé

Courbe de Bragg



INTERACTION DES RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

o I-3-2 Conséquences pour le milieu :

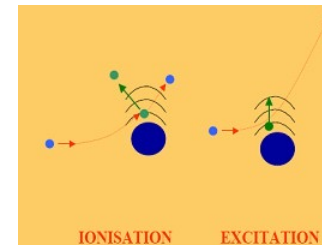
● IONISATION :

● e- cibles voisins de la trajectoire de l'e- projectile

- Si $E < 100$ eV : trajectoire des électrons secondaires courte, voisine de celle des électrons primaires : grappe d'ionisations.
- Si $E > 100$ eV, trajectoire longue, distincte de celle des électrons primaires : rayons delta

● **Pouvoir ionisant** : ionisation spécifique I_s ou densité d'ionisation linéique : $I_s = DIL = dN/dx = TEL / \varpi$:

- Nombre de paires d'ions produites par unité de longueur de trajectoire.
- ϖ : énergie moyenne d'ionisation 32 eV (eau) et 34 eV (air)

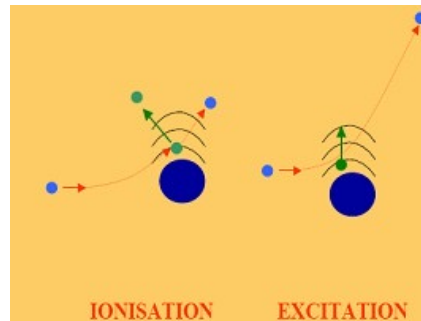


INTERACTION DES RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

o I-3-2 Conséquences pour le milieu :

● EXCITATION – TRANSFERT THERMIQUE

- e- cibles à distance de l'e- projectile
- $E < E_i$



- 40 % de transferts $Q > 100$ eV (électrons δ),
- 30 % de transferts $10 < Q < 100$ eV (ionisations)
- 30 % de transferts $Q < 10$ eV (excitations et transferts thermiques).



INTERACTION DES RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

II. Interaction des particules lourdes chargées (α^{++} , d^+)

○ II-1 Les différents types d'interactions

● Les collisions (particule lourde – électron)

- Interactions prédominantes
- Pouvoir d'arrêt par collision important

● Les freinages (particule lourde – noyau)

- Négligeables aux faibles énergies mais la probabilité de survenue augmente avec l'énergie.

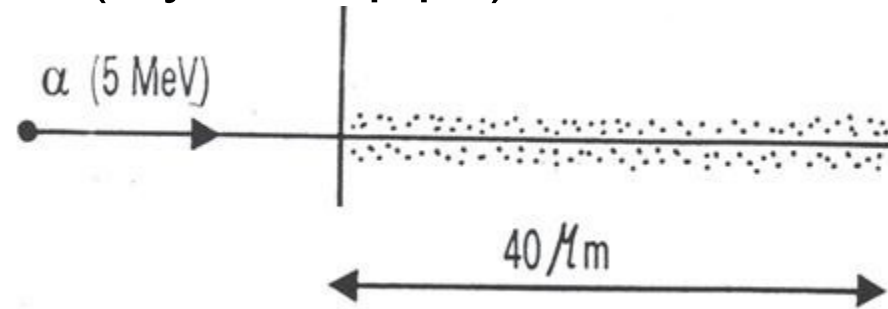
INTERACTION DES RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

II. Interaction des particules lourdes chargées (α^{++} , d^+)

o II-2 Conséquences pour le faisceau

- Trajectoire courte et rectiligne (tuyau de pipe)

- $R = L$
- Quelques cm (air)
- arrêtés par une feuille de papier - peau (cornée)



- Parcours :

- Rayons alpha peu pénétrants
- $R_{\text{air}} = 0,31 E^{3/2}$ $R_{\text{matériau}} = R_{\text{air}} \cdot \rho_{\text{air}} / \rho_{\text{m}}$

o III- 3 Conséquences pour le milieu

- Fort pouvoir ionisant des particules α

INTERACTION DES RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

II. Interaction des neutrons

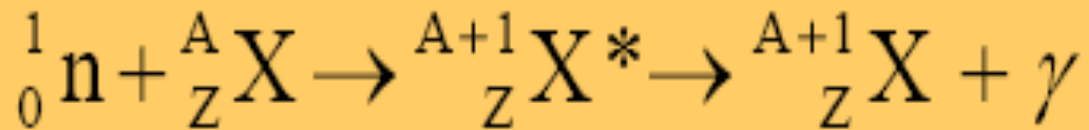
○ II-1 Les différents types d'interactions

- **Les collisions (neutron – électron)**

- Interactions négligeables
- Pouvoir d'arrêt par collision important

- **Les collisions nucléaires (neutron – noyau)**

- Mise en mouvement des protons de recul très ionisants (neutrons indirectement ionisants)
- Capture nucléaire en fin de parcours

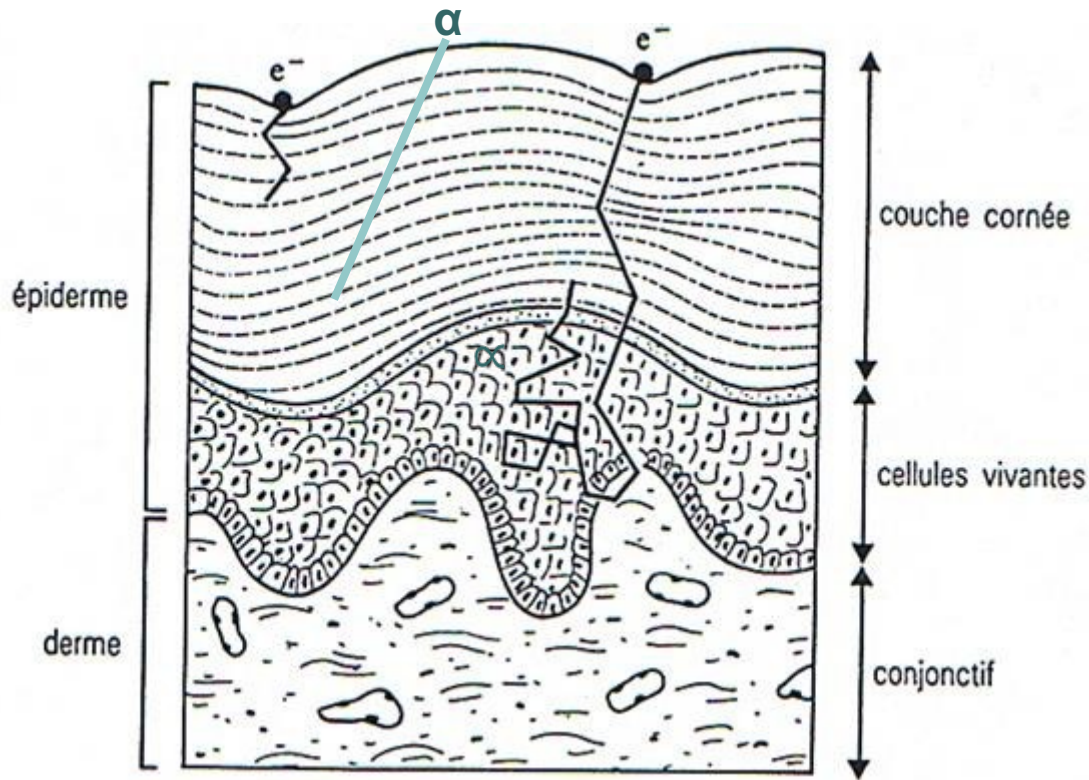
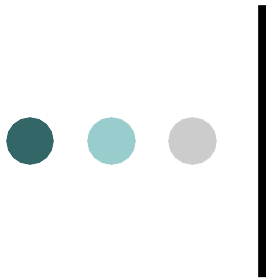




INTERACTION DES RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

II. Interaction des neutrons

- **II-2 *Conséquences pour le faisceau***
 - Trajectoire longue (interactions aléatoires)
 - Parcours : variable
- **II- 3 *Conséquences pour le milieu***
 - Fort pouvoir ionisant des neutrons par l'intermédiaire des protons de recul



Épaisseur de la couche cornée : $25\mu - 3\text{ mm}$

Trajectoire des électrons : quelques mètres dans l'air ;

quelques mm - quelques cm dans l'eau et tissus mous

Trajectoire des particules alpha : quelques cm dans l'air

quelques dizaines de μm dans l'eau et les tissus mous.

INTERACTION DES RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

o I- Interaction avec les électrons

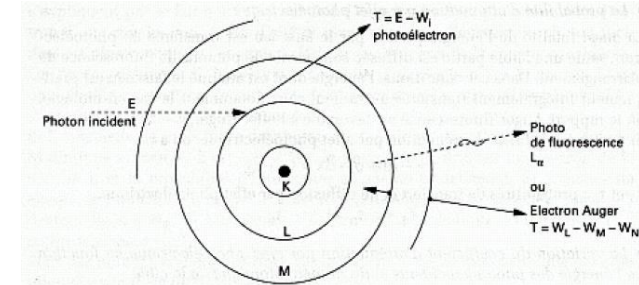
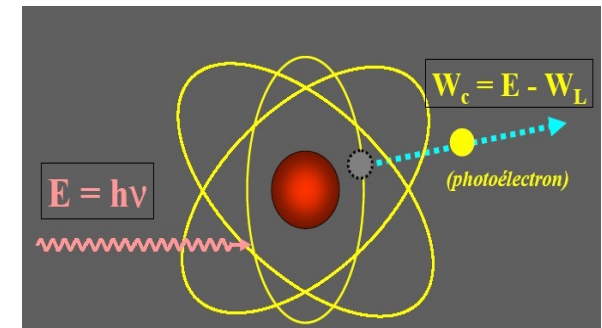
• 1- Effet photoélectrique

- Collision avec un électron lié
- Phénomène d'absorption totale
- Rayonnements secondaires :
 - Photoélectron (ionisant)
 - Photons X, UV
 - Électrons Auger
- Probabilité d'interaction : Coeff atténuation massique

$$\tau = K \frac{Z^3}{E^3} = K' Z^3 \lambda^3$$

Loi de Bragg et Pierce

Effet photoélectrique est prédominant pour les éléments lourds pour les rayonnements faiblement énergétiques



INTERACTION DES RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

○ I- Interaction avec les électrons

● 2- Effet Compton

- Collision avec un électron libre
- Transfert partiel d'énergie
- Rayonnements secondaires :
 - Électron compton projeté en avant

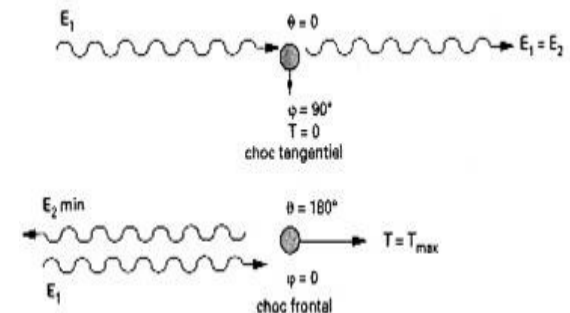
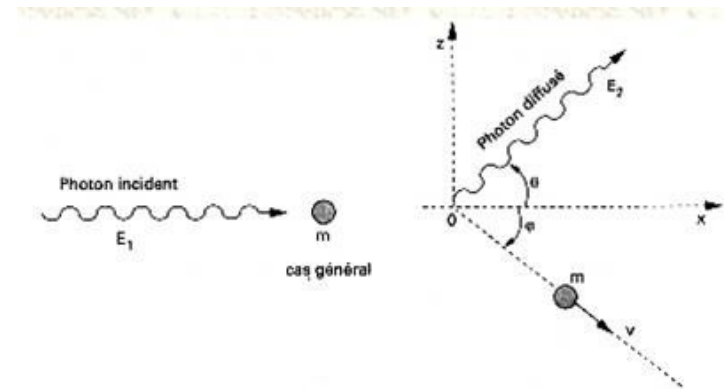
$$0 < \varphi < 90^\circ$$

- Photons diffusé

Choc tangentiel : $\varphi = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$

Choc frontal : photon rétrodiffusé

$$\varphi = 0^\circ, \theta = 180^\circ$$



INTERACTION DES RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

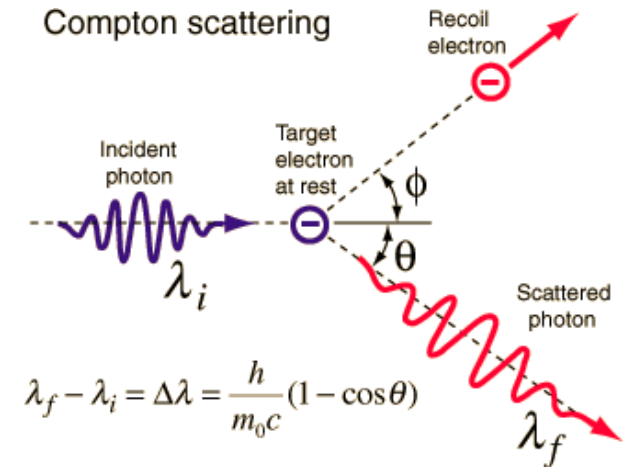
○ I- Interaction avec les électrons

● 2- Effet Compton

- Déplacement compton
- $\Delta\lambda = \lambda_f - \lambda_i = 0,024 (1 - \cos \theta)$
- **Choc tangentiel** $\Delta\lambda = 0 \text{ \AA}$
- **Choc frontal** $\Delta\lambda = 0,048 \text{ \AA}$
- Probabilité d'interaction par effet compton
- $\underline{\sigma} = K \underline{Z}$
- $\rho \quad \underline{E}$

coefficient d'atténuation massique

Effet Compton est prédominant pour les énergie moyenne, dépend de la densité du matériel traversé





INTERACTION DES RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

- **I- Interaction avec les électrons**
 - **3- Diffusion Rayleigh Thomson**
 - Diffusion à faible angle
 - Photons incidents faiblement énergétiques
 - Pas d'échange avec le milieu

INTERACTION DES RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

○ II- Interaction avec les noyaux

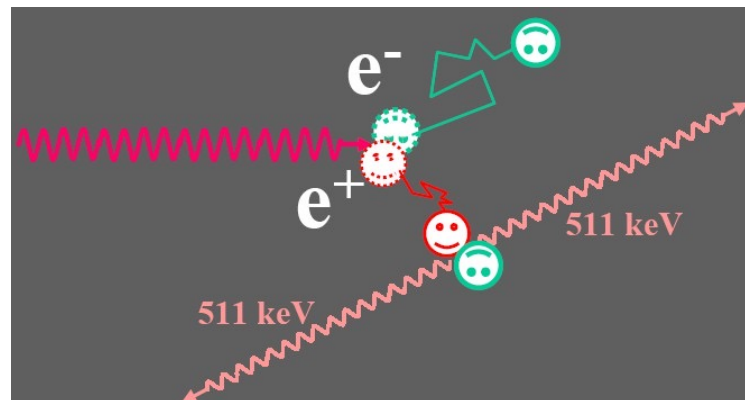
● 1- Création de paires (matérialisation)

- Photons d' $E > 1,02 \text{ MeV}$
- Probabilité d'interaction par création de paires

$$\underline{\pi} = K Z^2 \cdot E$$

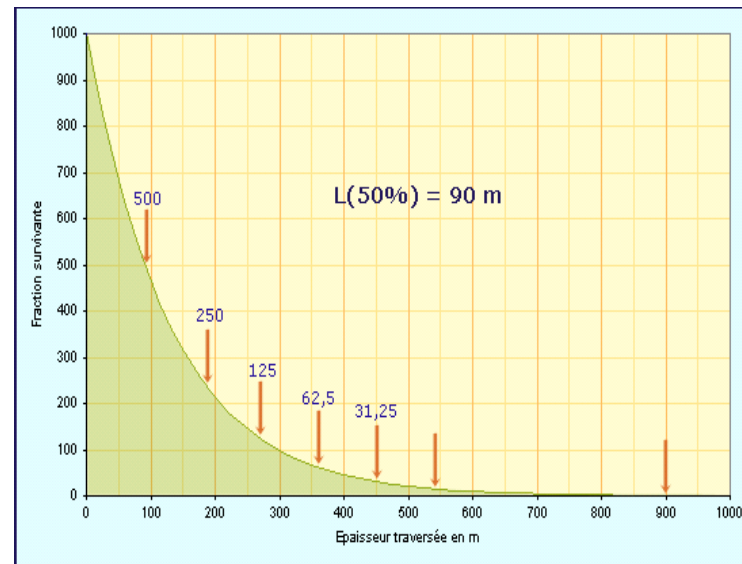
ρ

Effet prédominant pour les grandes E



ATTENUATION DES RAYONNEMENTS

- **Atténuation exponentielle** lors de leur traversée de la matière : tous les rayts sauf rayts particulaires
- **Loi d'atténuation** : $N = N_0 e^{-\mu x}$
- μ : **coefficient d'atténuation linéique**
 - (Probabilité pour un photon de subir une interaction)



ATTENUATION DES RAYONNEMENTS

- **CDA ($x_{1/2}$) : couche de demi-atténuation**

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

- Épaisseur de matière qui réduit à 50% le nombre de photons incidents

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2^n} \quad n = x / x_{1/2}$$

- **Libre parcours moyen x**
épaisseur qui réduit à 37% le nombre de photons incidents

$$x = \frac{1}{\mu}$$



ATTENUATION DES RAYONNEMENTS

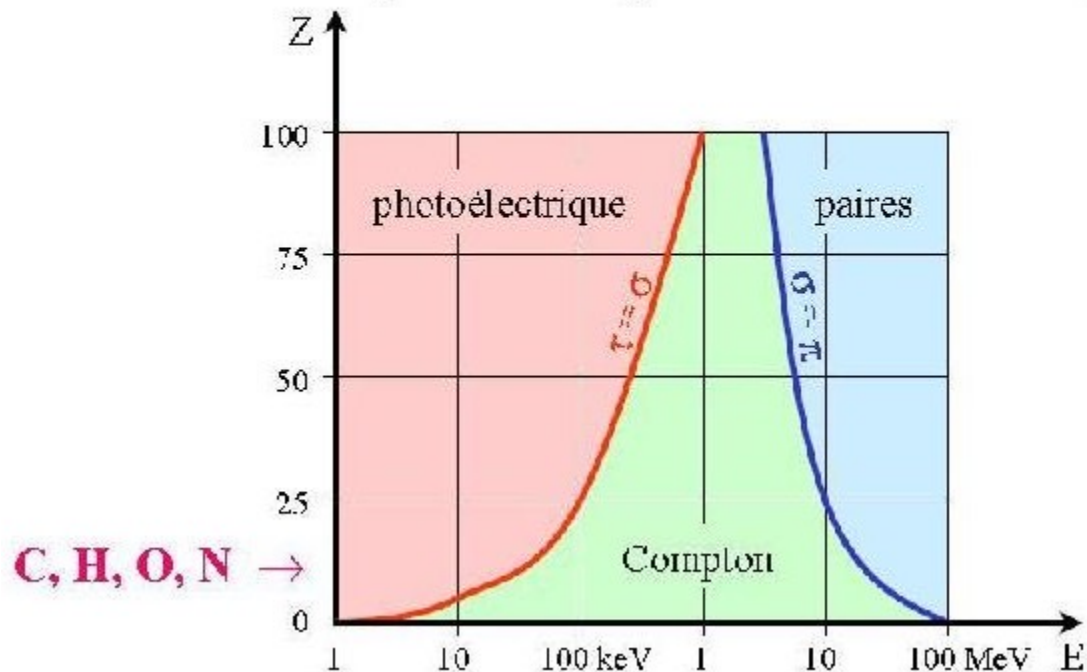
Mécanisme d'atténuation

- Une partie de l'énergie incidente se trouve sous forme
 - d'énergie cinétique des électrons secondaires (électrons Compton, photoélectron, électrons de matérialisation, électrons Auger)
 - et le reste sous forme de photons secondaires (photons diffusés Compton, photons de fluorescence, photons d'annihilation).
- L'atténuation est due au transfert de l'énergie des photons aux électrons dont l'énergie est secondairement absorbée à courte distance et à la disparition de l'énergie des photons secondaires diffusés qui transfèrent leur énergie à grande distance ou quittent le milieu

$$\underline{\mu} = \underline{\tau} + \underline{\sigma} + \underline{\pi}$$
$$\rho \quad \rho \quad \rho \quad \rho$$

IMPORTANCE RELATIVE DES 3 EFFETS

Dans l'eau : photons d'énergie < 50 keV \rightarrow effet photoélectrique
photons d'énergie 50 keV- 20 MeV \rightarrow effet Compton
photons d'énergie > 20 MeV \rightarrow création de paires



Variation de $\frac{\tau}{\rho}$ en fonction de E

