

# Les rayonnements ionisants

- **Définition** : Ils sont capables d'ioniser un électron de la couche K de l'hydrogène donc énergie supérieure ou égale à 13,6 eV.
- **Exemples de rayonnements ionisants** = UV, rayons X, cosmiques.
- Ils brisent les liaisons covalentes et forment des radicaux libres = délétères pour la vie.
- **Utiles en médecine** : imagerie, radio-thérapie...

# Les rayonnements ionisants

- Application :
- Quelle est la fréquence qui correspond à une énergie de  $13.6\text{eV}$ ?
- Sachant que le visible est limité par l'Infrarouge ( $\nu = 4 \times 10^{14}\text{Hz}$ ) et l'Ultra-Violet ( $\nu' = 8 \times 10^{14}\text{Hz}$ ) , où se place la limite seuil d'un rayonnement ionisant?

# Les rayonnements ionisants

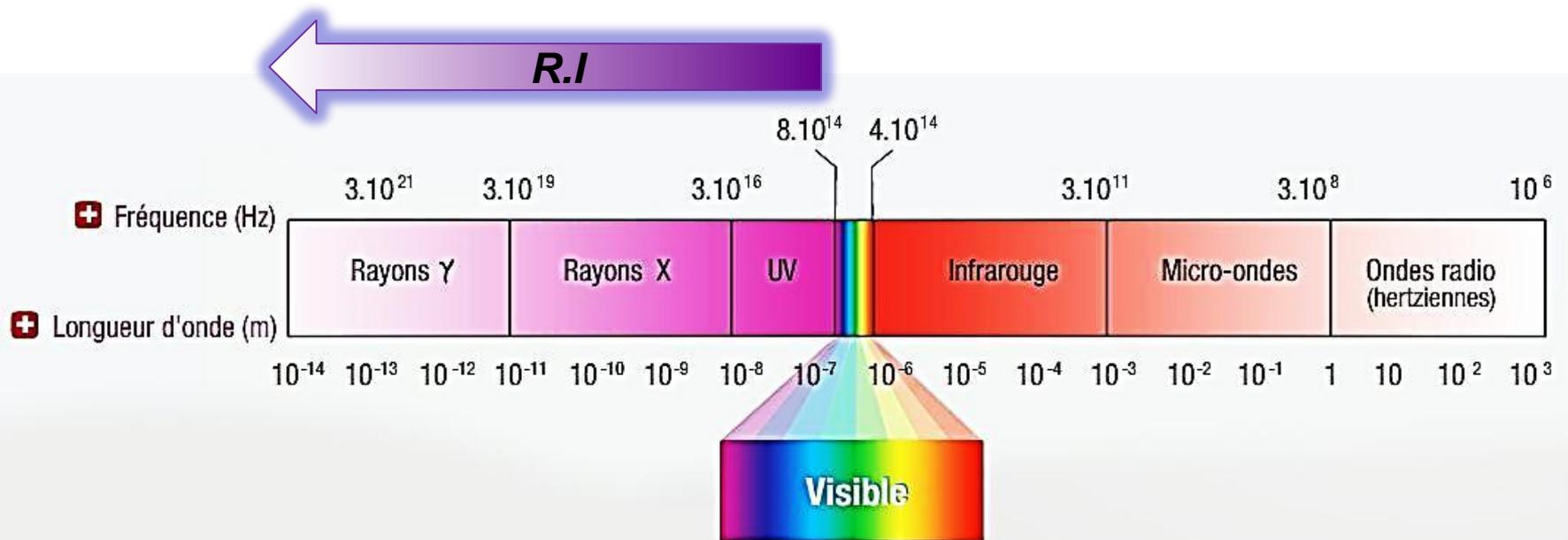
- Application :

- $h\nu = 13.6\text{eV} \rightarrow \nu_0 = \frac{13.6}{h} = \frac{13.6}{hc} c = \frac{13.6 \times 3 \times 10^8}{1.241 \times 10^{-6}}$

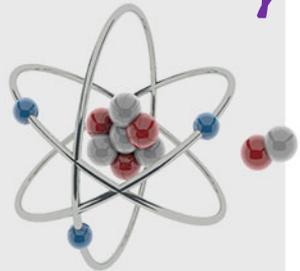
$$\nu_0 = 3.287 \times 10^{15} \text{Hz}$$

- La limite seuil d'un RI se place dans la région de l'Ultra-Violet (d'où le danger d'une exposition trop prolongée au Rayonnements UV sur la peau)

# Les rayonnements ionisants



# Les rayonnements ionisants



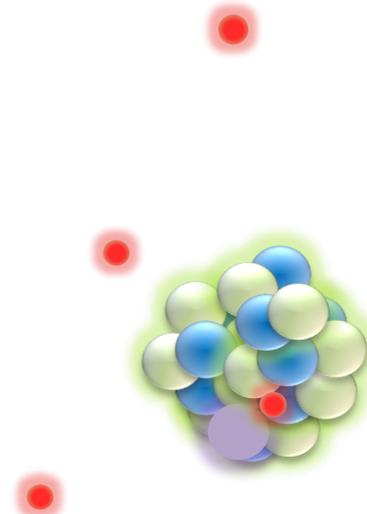
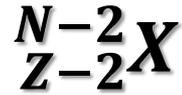
$\gamma$

Parcours Rectiligne : ~Qlqs 100 m dans l'air  
Energie: ~ MeV

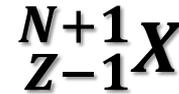


Parcours rectiligne: ~Qlqs Cm dans l'air  
Energie: Qlqs MeV

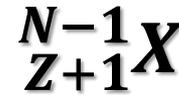
$\alpha$



$\beta^+$

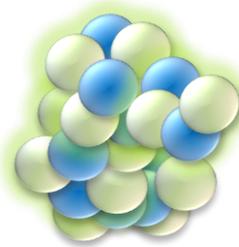
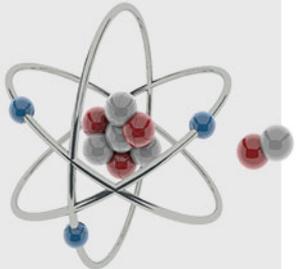


$\beta^-$



Parcours Sinueux: ~Qlqs m dans l'air  
Energie: ~ MeV

# Les rayonnements ionisants



$n$



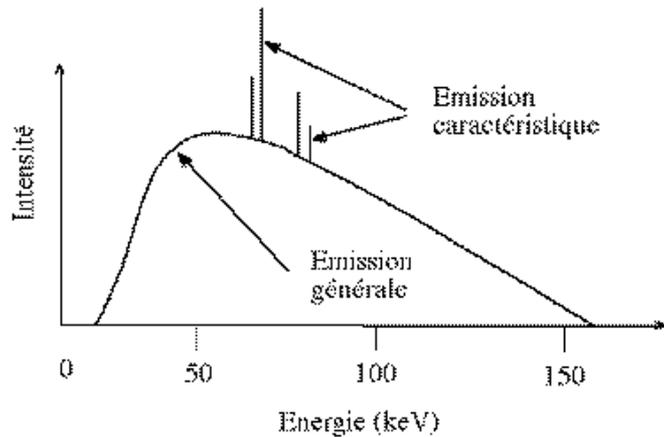
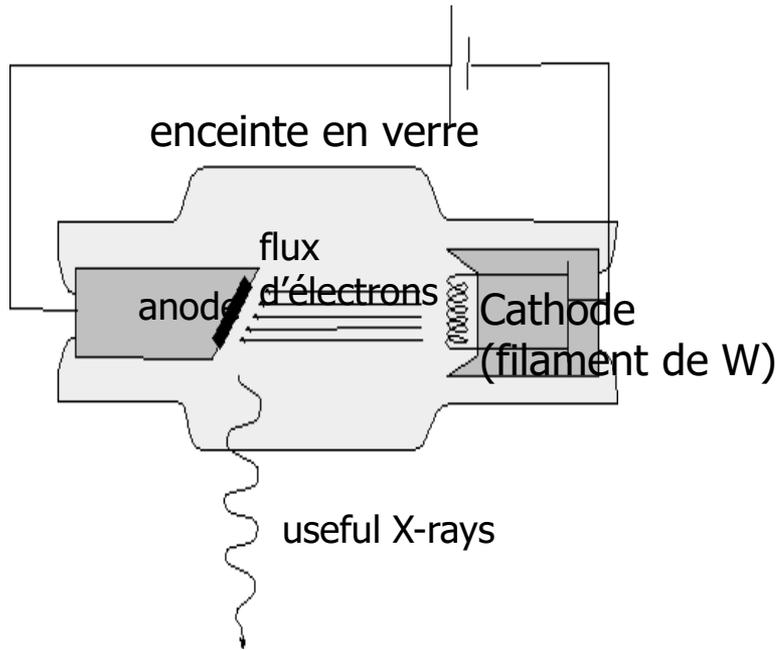
Parcours rectiligne: ~Qlqs 10 m dans l'air  
Energie: ~ eV

Parcours rectiligne: ~Qlqs 100 m dans l'air  
Energie: ~ MeV

$n$

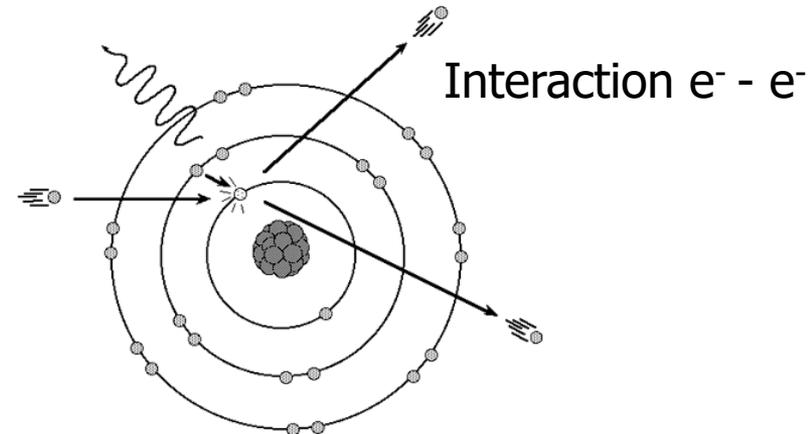


# Rayons X

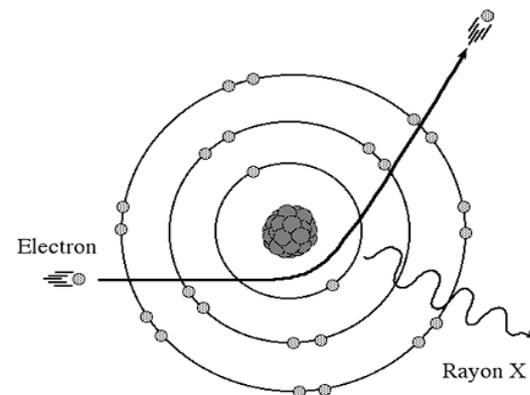


## Mécanisme à l'origine des RX:

- collisions (**électrons** des atomes de l'anode)



- freinage (**noyaux** des atomes de l'anode)



Interaction  $e^- - \text{noyau}$

# En résumé....

---

- Ces rayonnements sont des désintégrations nucléaires (E de la particule émise ou du rayonnement caractéristique de l'élément considéré)
- 3 caractéristiques d'un élément radioactif
  - nom de la particule ou rayonnement ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , X,  $n^\circ$ )
  - E de l'émission (eV: keV, MeV)
  - intensité (cadence de désintégrations: nbre de désintégrations par unité de temps)

# Les premières lésions

---

**Première expérience radiobiologique (involontaire)**

en 1900 par Becquerel : production d'un érythème cutané 15 jours après exposition au radium.

**Répétition (volontaire)** de la même expérience par Pierre Curie en 1901.

**Ces 2 expériences marquent le début de la radiobiologie**

# Interaction des rayonnements ionisants avec la matière

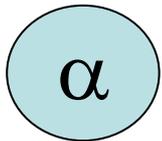
---

- Les rayonnements perdent leur énergie en traversant la matière
    - Action directe sur les électrons par les  $\alpha$  et  $\beta$
    - Excitation et ionisation des atomes par les  $\gamma$
    - Excitation des noyaux par les  $n^{\circ}$
  - 2 catégories de rayonnements
    - directement ionisant ( $\alpha$ ,  $\beta$ , protons)
    - indirectement ionisant ( $\gamma$ ,  $n^{\circ}$ : **production de particules secondaires chargées**)
- Ionisation de la matière

# Interaction des rayonnements ionisants avec la matière

---

- Rayonnement **directement** ionisant ( $\alpha$  et  $\beta$ )
  - Interaction avec les électrons périphériques
    - Expulsion de l'électron  $\Longrightarrow$  ionisation  $\longrightarrow$  nbre de paires d'ions
    - Déplacement d'un électron sur une autre couche  $\Longrightarrow$  excitation de l'atome et émission de photons X



7300 x plus lourd que  $e^-$   
Trajectoire rectiligne  
Très ionisantes (milliers d'atomes dans cellule)



Trajectoire sinueuse  
Faiblement ionisant  
(petit nombre d'atomes dans cellule)

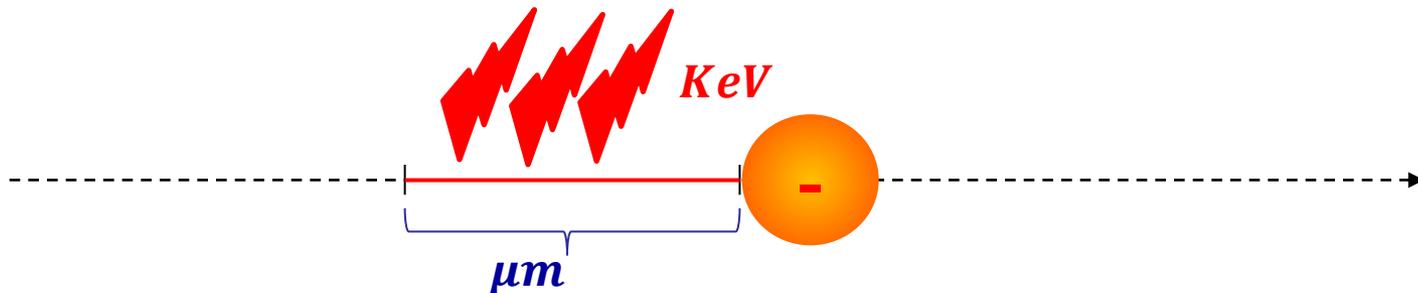
# Quantification de l'énergie transférée : notion de TEL et DLI

## Transfert d'énergie linéique ou TEL

Le TEL est la quantité d'énergie transférée au milieu cible par la particule incidente par unité de longueur de trajectoire.

Pour des particules de vitesse faible devant la lumière on a :

$$TEL = K q^2 n Z / v^2$$



avec:

- $k$  = constante
- $q$  = charge de la particule incidente
- $n$  = nb d'atomes de la cible par unité de volume
- $Z$  = numéro atomique de la cible
- $v$  = la vitesse de la particule incident

## Densité linéique d'ionisation (DLI) ou ionisation spécifique

On appelle DLI le nombre de paires d'ions créés par la particule incidente par unité de longueur.

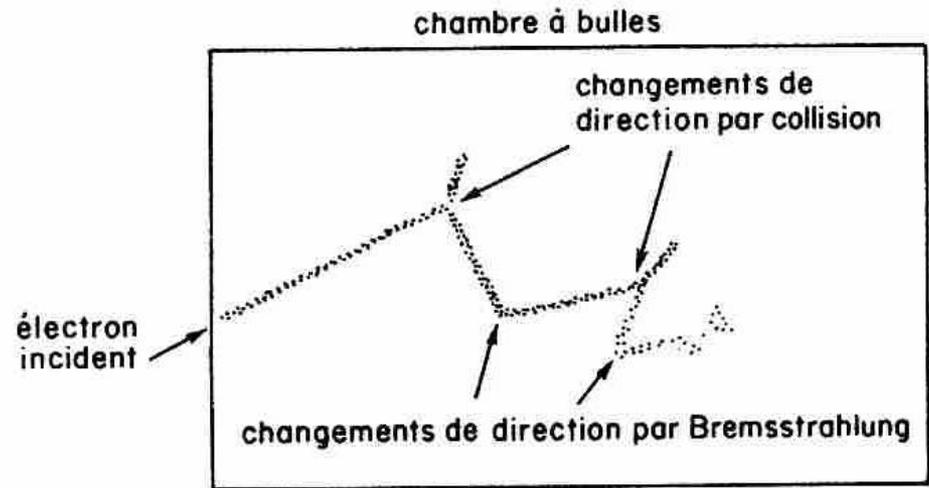
Unité= (paires d'ions)  $\mu\text{m}^{-1}$

On a : ***TEL = Wi.DLI***

où  $W_i$  = énergie moyenne transférée pour chaque ionisation

## Particules chargées légères ( $\beta^+$ , $\beta^-$ ).

- Les trajectoires des particules sont des lignes brisées (particules légères : changement important de direction à chaque interaction).



- Dans l'eau la longueur totale de la trajectoire est approchée par la formule :

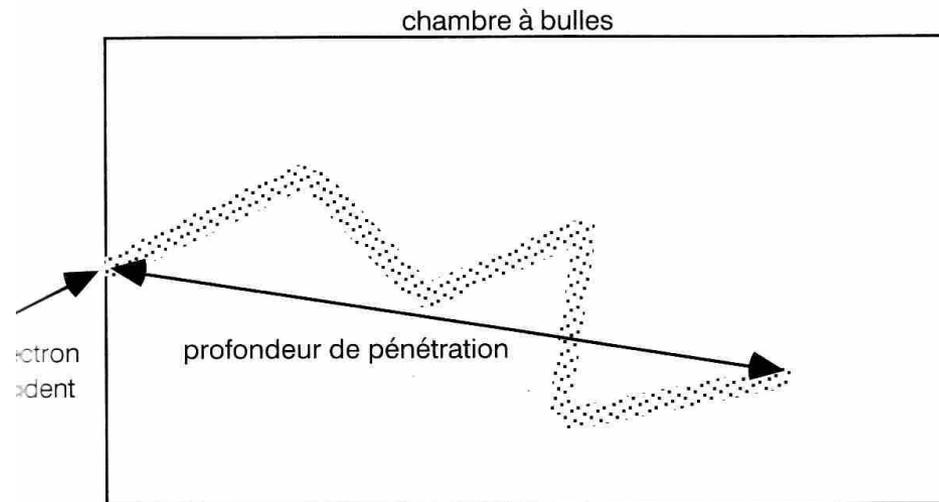
$$L(\text{cm}) = E_0(\text{MeV})/2$$

- dans un milieu de masse volumique  $\rho$  la trajectoire est approchée par la formule :

$$L(\text{cm}) = E_0(\text{MeV})/2\rho$$

( $\rho$  en  $\text{g cm}^{-3}$ )

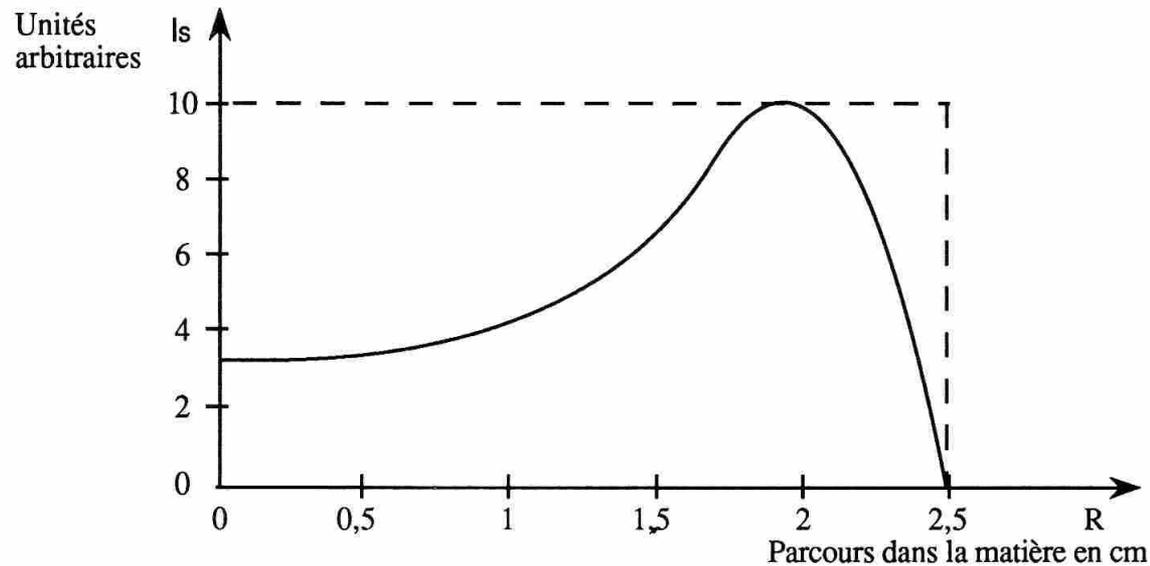
La distance séparant le point d'entrée de la particule et son point terminal (< trajectoire) s'appelle « profondeur de pénétration moyenne » ou parcours moyen  $R$ .



## Particules chargées lourdes ( $\alpha$ , Ion).

---

Le TEL et la DLI dans ce cas sont très importants par rapport aux  $\beta$ :  
Pour une énergie cinétique égale, leur vitesse est faible  
( $TEL = K q^2 n Z / v^2$ )



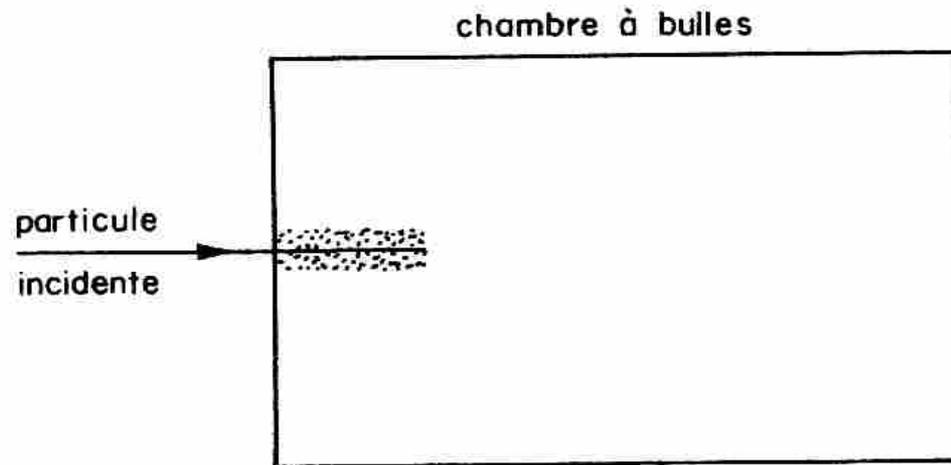
Courbe de Bragg dans l'air= évolution de l'ionisation spécifique en fonction du parcours

Les trajectoires sont quasi rectilignes (les particules sont peu déviées en raison de leur masse importante)

Dans l'air le parcours moyen  $R$  est approché par la formule :

$$R (cm) = 0.31 E^{3/2}$$

$E$  = énergie cinétique en MeV



En pratique, pour ce type de rayonnement on estime  $R$ :

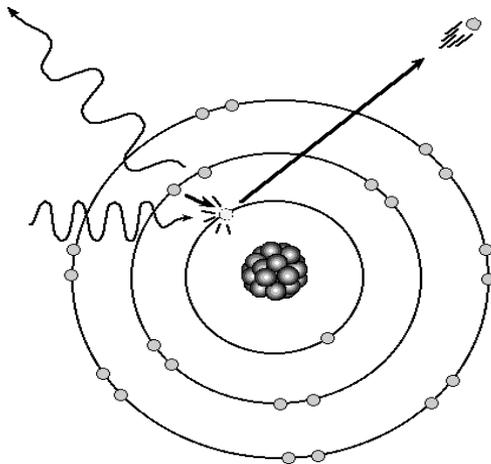
- Quelques cm dans l'air
- Quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  dans les tissus mous (peau)

# Interaction des RI avec la matière: les photons

- Rayonnement électromagnétique se différenciant par leur origine
  - Rayonnement  $\gamma$ : changement dans les niveaux d'E du noyau (quantifié)
  - Rayonnement de freinage: ralentissement des  $e^-$  dans la matière
  - Rayonnement X: changement dans les niveaux d'E des  $e^-$  de l'atome

## Effet photoélectrique

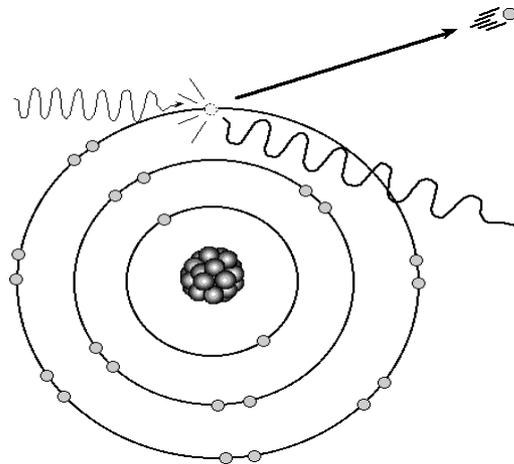
Toute l'E du photon cédée à l' $e^-$  sous forme d'E cinétique



Photons  $E < 50$  keV

## Effet Compton

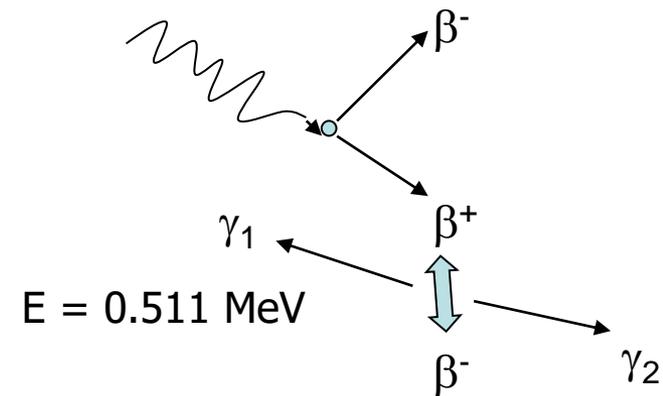
Partie de l'E du photon cédée à l' $e^-$   
Photon de moindre E



E entre 50 keV et 20 MeV

## Production de paires

Photon d'E  $> 1.02$  MeV  
Noyau avec Z élevé

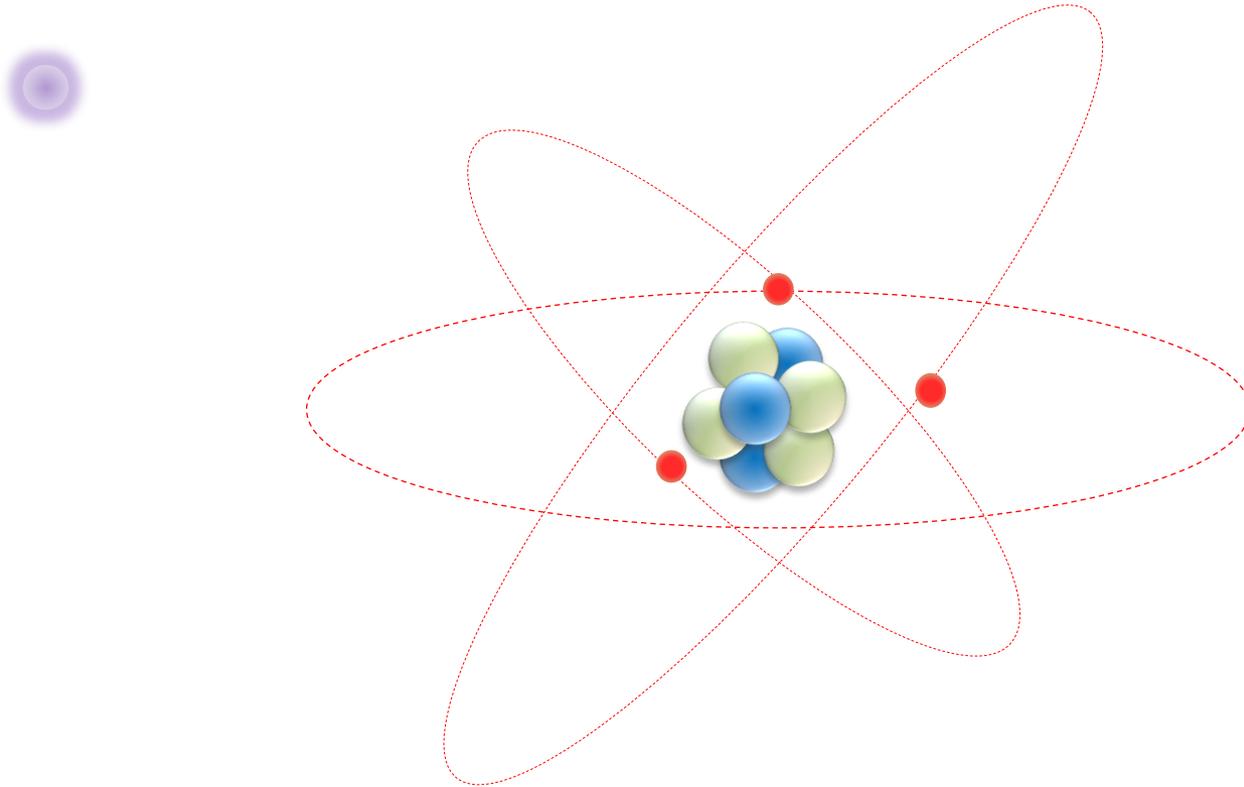


E  $> 20$  MeV

# Interaction des $\varphi$ avec la matière: Effet photoélectrique

---

## ➤ Effet photo-électrique:



# Interaction des $\varphi$ avec la matière: Effet photoélectrique

- Totalité de l' $E_\varphi$  transférée à un  $e^-$  de l'atome

→  $E_e = h\nu - E_K$

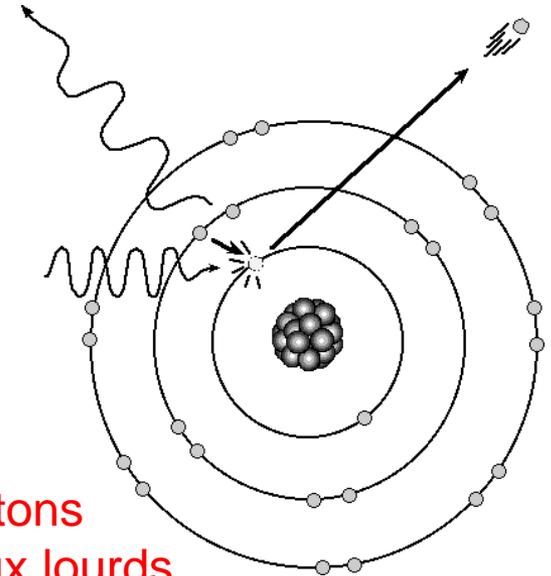
- Seulement si l' $E_\varphi > E_K$
- $E_{\text{liaison}} \nearrow$  avec  $Z$  et proximité du noyau

- Coefficient d'absorption photo-électrique

- $\mu_{\text{photo-électrique}} \propto Z^3/E^3$  Effet important pour les photons de faible  $E$  et dans les matériaux lourds

- En pratique...

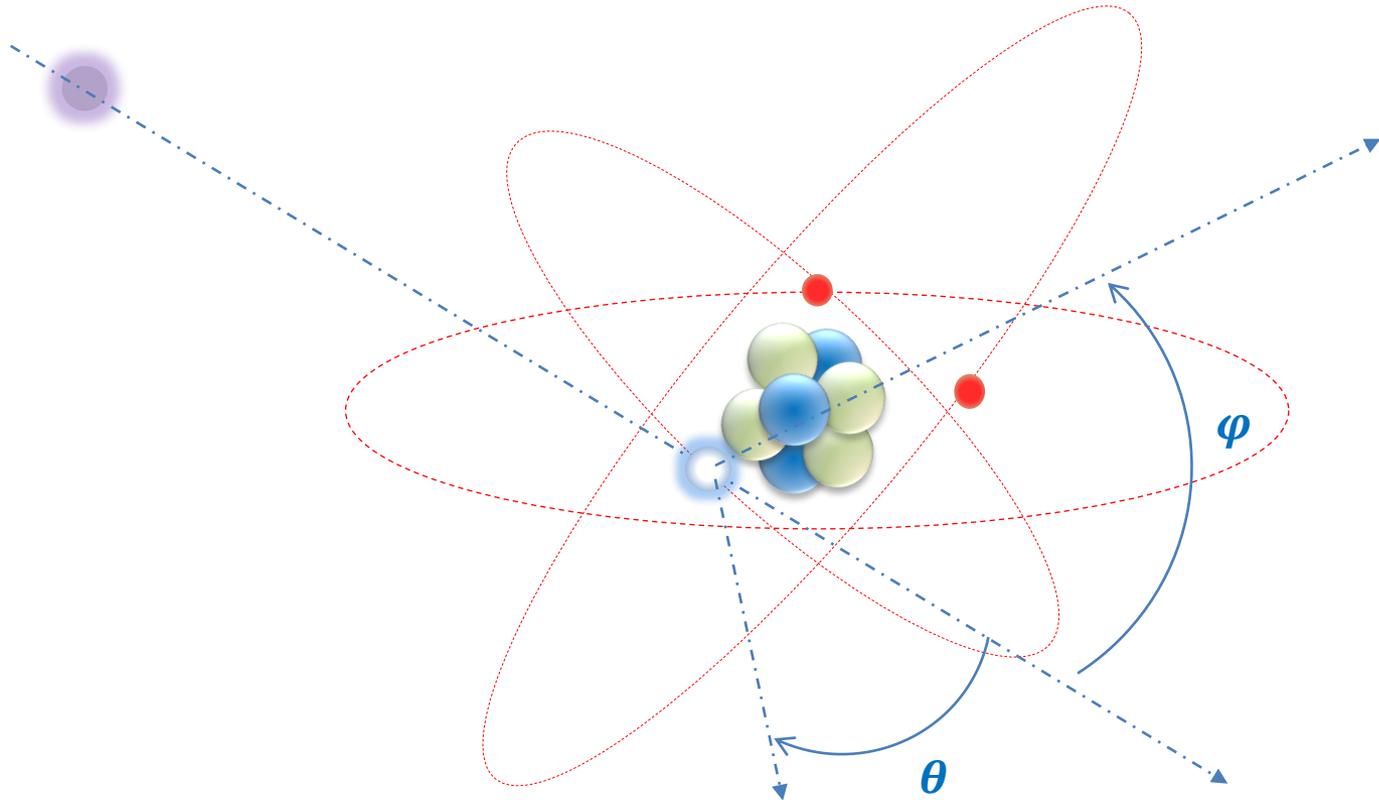
- Pb bon matériau pour les écrans de protection contre les RX (permet l'arrêt des RX de faible  $E$  et un bon % des autres)
- Bon contraste de l'image radio
- Effet principal dans la matière organique (Effet majeur pour  $V > 70\text{kV}$ ) car arrêt du RX de faible  $E$  et production d'un  $\varphi$ électron pouvant être biologiquement néfaste



# Interaction des $\varphi$ avec la matière: Effet photoélectrique

---

## ➤ Effet Compton:



# Interaction des $\varphi$ avec la matière: Effet compton

- Partie de l'E du  $\varphi$  transmise à l'e<sup>-</sup>

$$\longrightarrow E_c = h\nu_0 - h\nu$$

- Distribution angulaire en énergie
  - Pour  $\Theta$  élevé,  $E_{\varphi \text{ diffusé}}$  fort réduite

- Conséquence: **dégradation importante du spectre d'E des  $\varphi$**

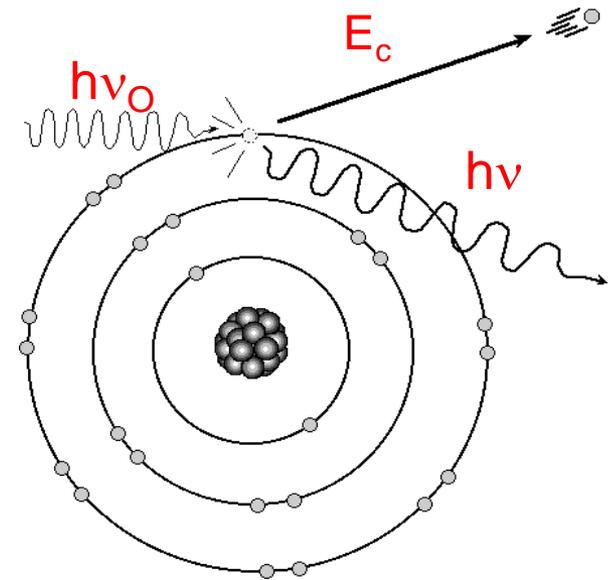
- Détecteur sensible sur un domaine étendu d'E de  $\varphi$  avec un certaine réponse angulaire
- Le diffusé est multidirectionnel

- Peu d'influence de Z  $\longrightarrow$  masse de matière présente!

- Efficacité de

- En pratique..

- Diffusé enco
- et constitue
- provient du



$$h\nu = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}; \alpha = \frac{h\nu}{m_e c^2}$$

$$E_e = \frac{2\alpha h\nu}{1 - 2\alpha + (1 + \alpha)^2 \tan^2 \varphi}$$

matériau choisi

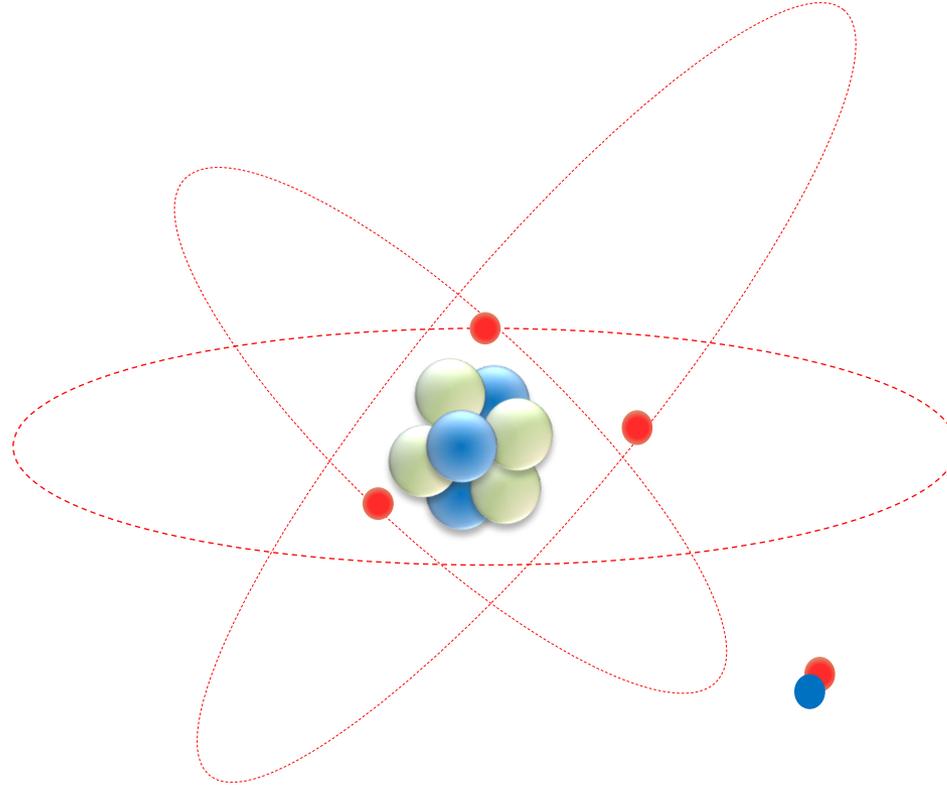
ur image radio (voile)  
téger

ne irradié

# Interaction des $\varphi$ avec la matière: Effet photoélectrique

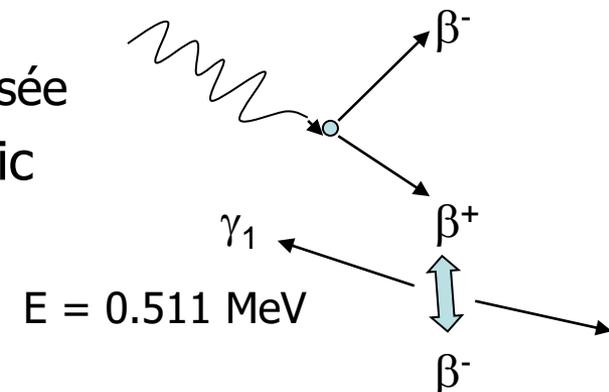
---

## ➤ Création de Paires ( $e^+$ , $e^-$ ):



# Interaction des $\varphi$ avec la matière: matérialisation

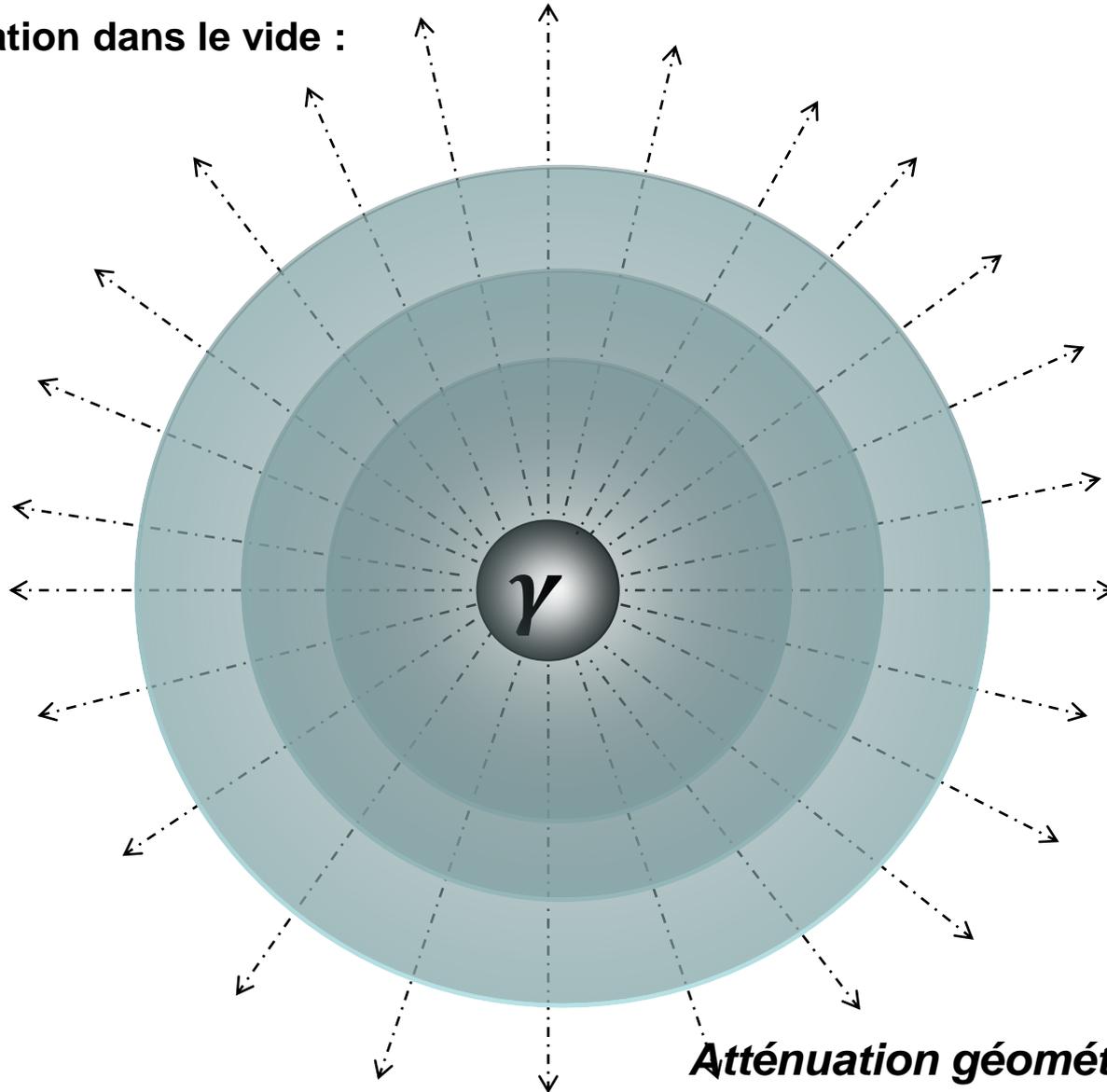
- $E_\varphi > 1\text{MeV} \Rightarrow \varphi$  matérialisé en 2  $e^-$  avec  $E_{\text{cinétique}}$   
     $\longrightarrow E_{\text{résiduelle}} = h\nu - 2m_0c^2$
- Distribution en énergie
  - Pour  $\varphi$  de haute E,  $E_{\text{cinétique}}$  également répartie entre les  $e^-$
  - Pour  $\varphi$  de faible E, E des positons  $>$  E des négatons
- Distribution angulaire
  - Pour  $\varphi$  de haute E, dirigé vers l'avant
- Annihilation
  - Lorsque  $E_{\text{cinétique}}(\beta^+) \ll$ ,  $\beta^+$  est attiré par un  $\beta^-$   
     $\Rightarrow$  apparition de 2 photons de  $E = 0.511\text{ MeV}$
  - Si  $e^-$  au repos, photon émis dans direction opposée
- En pratique...Ne concerne pas le radiodiagnostic



# Atténuation globale d'un faisceau de photons

---

1- Atténuation dans le vide :



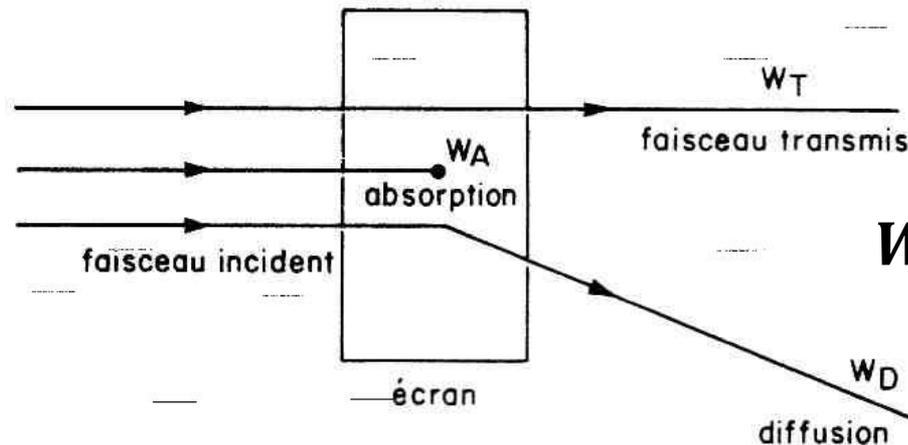
**Atténuation géométrique:  $I = I_0 / d^2$**

# Atténuation globale d'un faisceau de photons

## 2- Atténuation dans la matière :

Atténuation d'un faisceau étroit de photons par interactions=

- phénomène aléatoire
- disparition progressive du nombre de photons
- secondaire aux interactions élémentaires entre les photons et les électrons (et plus rarement entre les photons et les noyaux)



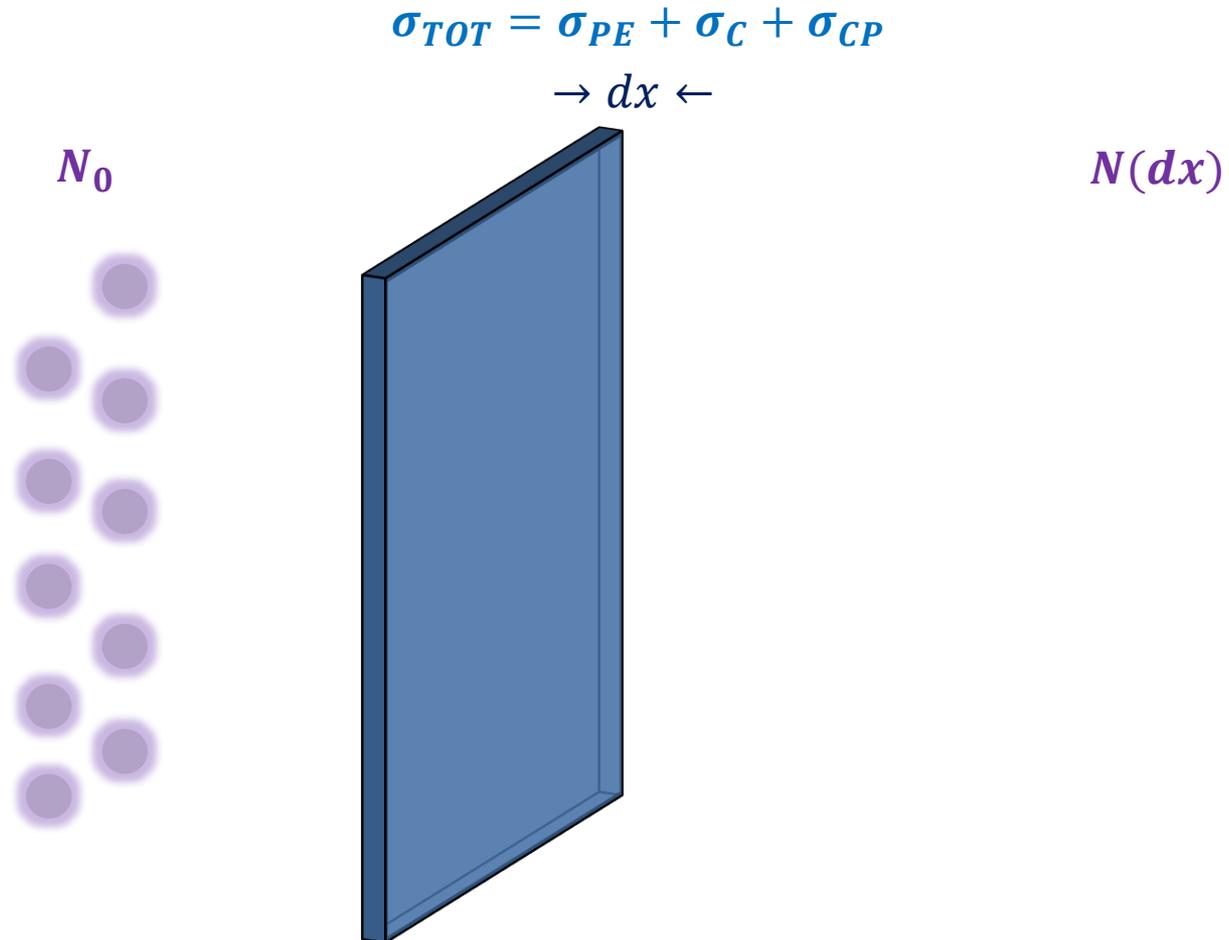
$$W_T = W_0 e^{-\mu x}$$

- Soit le photon traverse la matière sans interagir
- Soit il est totalement absorbé par la matière
- Soit il cède une partie de son énergie et ressort avec une direction différente et une énergie plus faible = diffusion

# Interaction des $\varphi$ avec la matière:

---

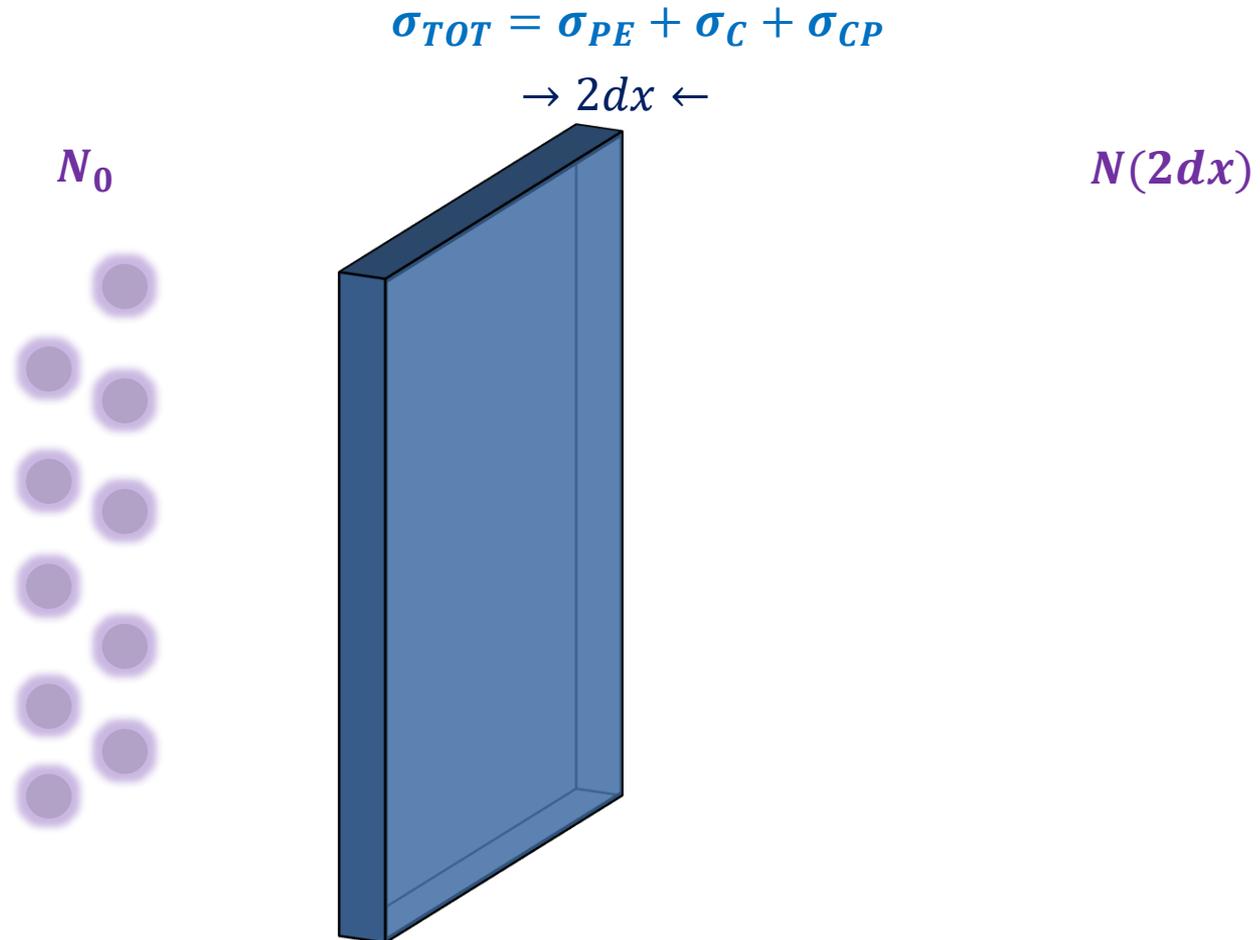
- Atténuation du rayonnement électromagnétique.



# Interaction des $\varphi$ avec la matière:

---

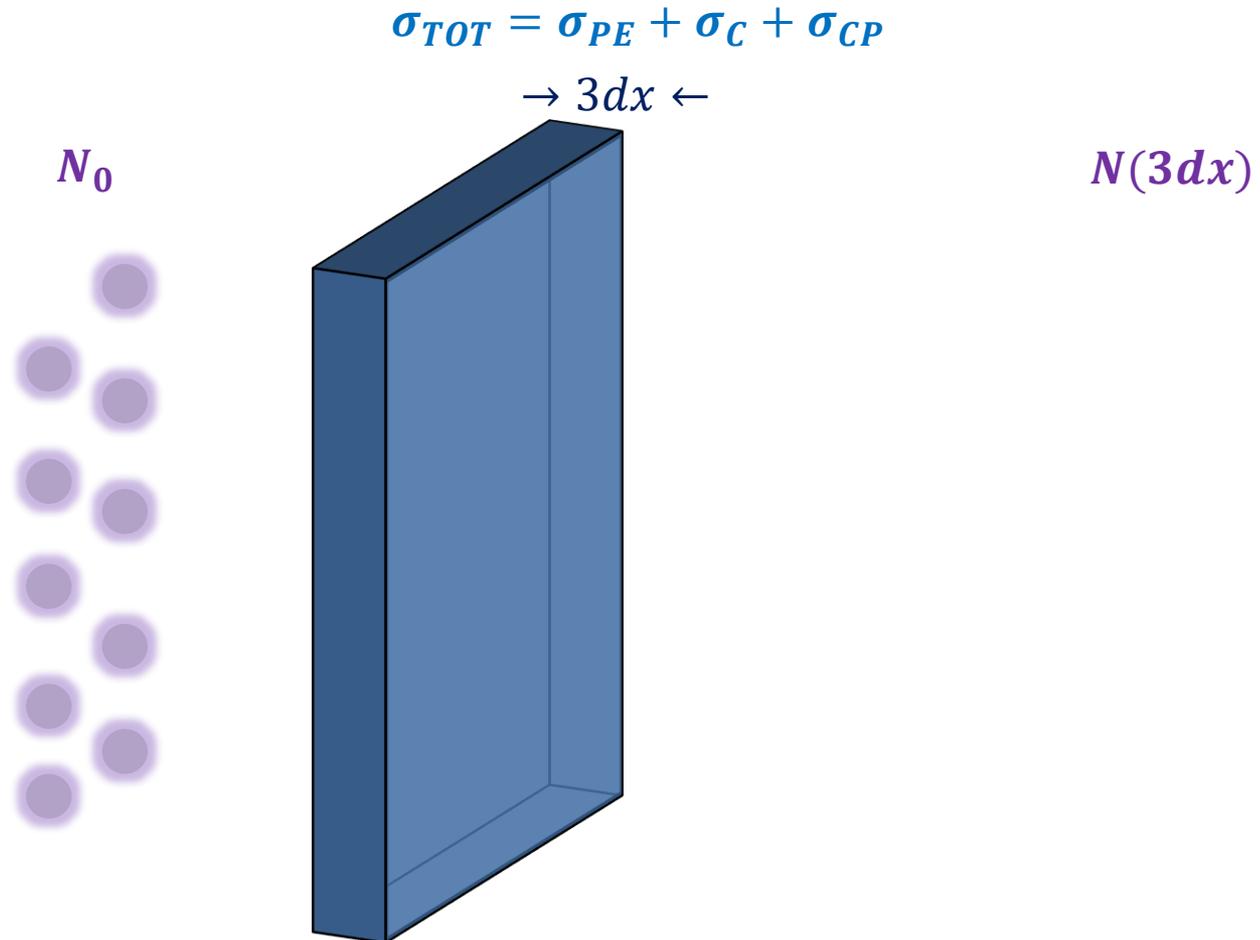
- Atténuation du rayonnement électromagnétique.



# Interaction des $\varphi$ avec la matière:

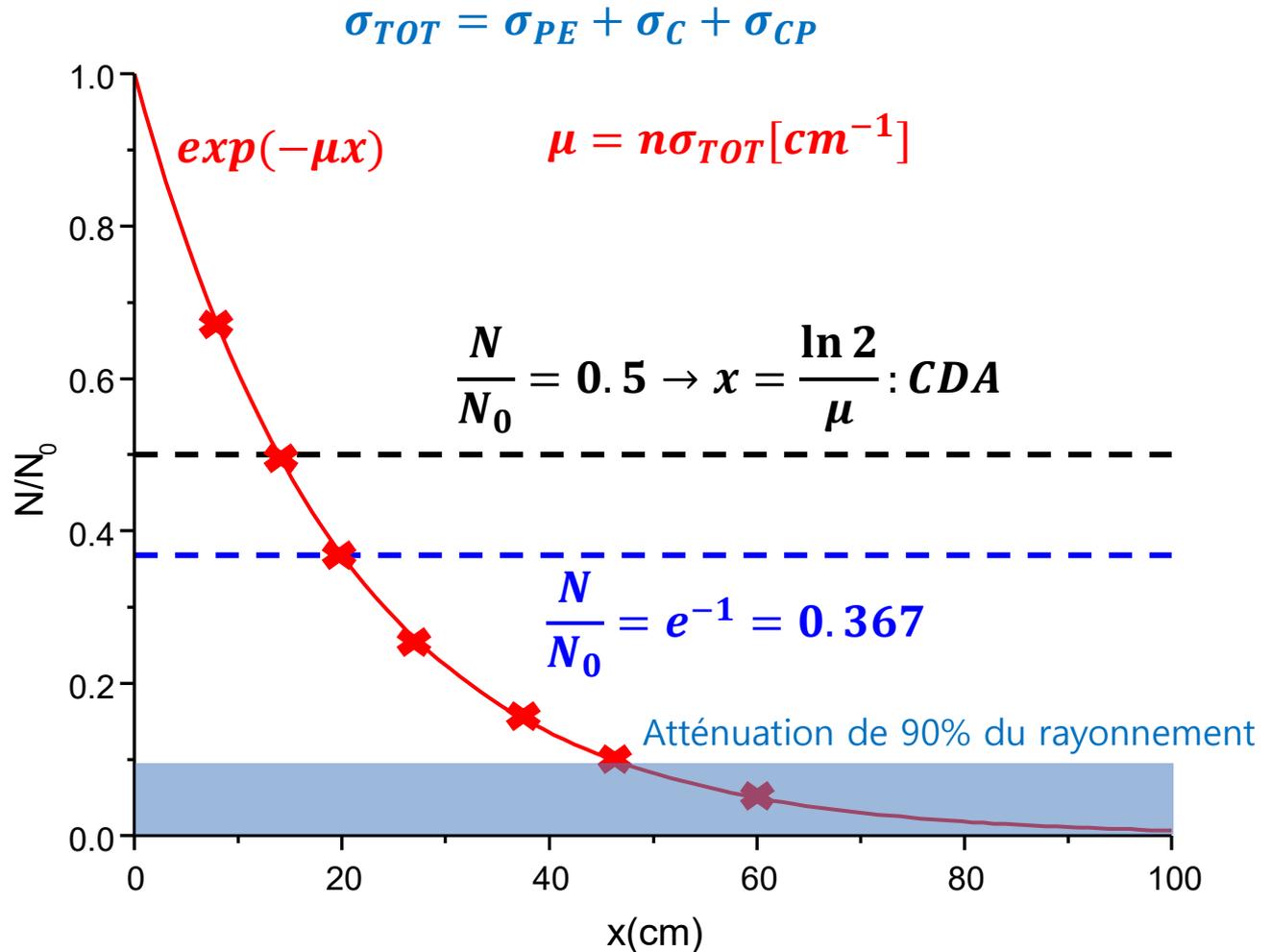
---

- Atténuation du rayonnement électromagnétique.



# Interaction des $\varphi$ avec la matière:

- Atténuation du rayonnement électromagnétique.



# Interaction des $\varphi$ avec la matière:

---

## - Interaction rayonnements-matière Globale.

$$\sigma_{TOT} = \sigma_{PE} + \sigma_C + \sigma_{CP}$$

$\sigma_{PE}$ : Section efficace d'interaction photo-électrique

$\sigma_C$ : Section efficace d'interaction Compton

$\sigma_{CP}$ : Section efficace de création de paires

Un faisceau incident avec une intensité de  $N_0$  ( $phot. s^{-1}. cm^{-2}$ ) subira une atténuation à cause de l'ensemble de ces interactions, qui suit une loi exponentielle, en fonction de l'épaisseur de la cible:

$$N(x) = N_0. exp\{-xn\sigma_{TOT}\}$$

Le paramètre qui dépend de l'interaction photon-matière et de la densité de la cible  $n$  :  $\mu = n\sigma_{TOT}[cm^{-1}]$

est appelé « coefficient d'atténuation total »

# Interaction des $\varphi$ avec la matière:

---

## - Interaction rayonnements-matière Globale.

$$\sigma_{TOT} = \sigma_{PE} + \sigma_C + \sigma_{CP}$$

$$N(x) = N_0 \cdot \exp\{-xn\sigma_{TOT}\} \rightarrow N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

On peut également utiliser le coefficient d'atténuation massique, pour

s'affranchir de la dépendance de l'état du matériau traversé:  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \left[\frac{cm^2}{g}\right]$

$$N(x) = N_0 \cdot \exp\left\{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \rho x\right\}$$

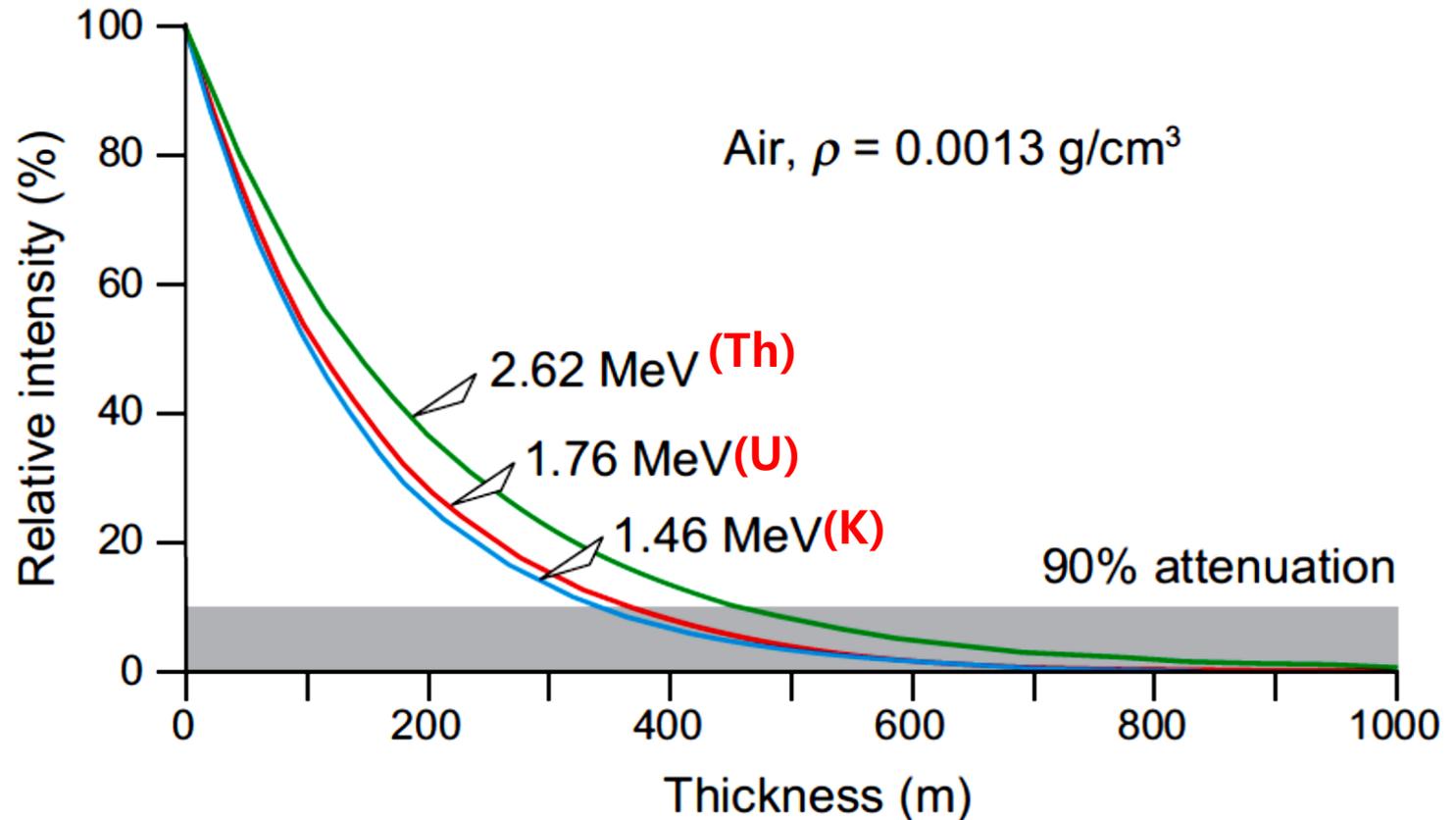
$\rho$ : masse volumique du matériau

On définit également la Coude de Demi-Atténuation:

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

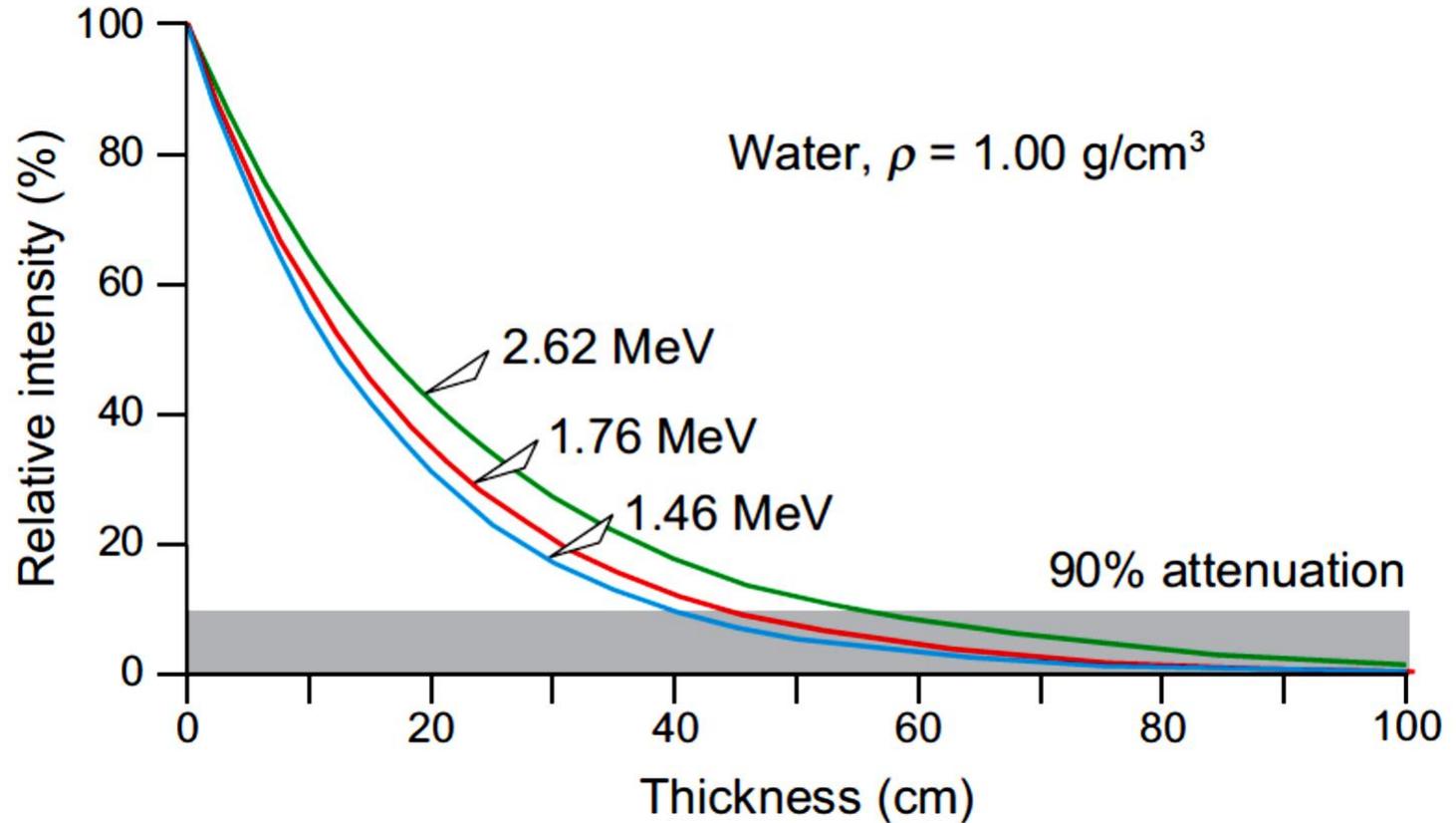
# Interaction des $\gamma$ avec la matière:

## - Atténuation physique des $\gamma$ dans l'air



# Interaction des $\gamma$ avec la matière:

- Atténuation des  $\gamma$  dans l'eau.



# Couche de demi atténuation ou CDA

Définition : la CDA est l'épaisseur que doit avoir un écran pour que le nombre de photons transmis soit divisé par 2

$$N(CDA) = N_0 \cdot e^{-\mu \cdot CDA} = \frac{1}{2} N_0$$

$$\rightarrow e^{-\mu \cdot CDA} = \frac{1}{2} \rightarrow \mu \cdot CDA = \ln 2 \rightarrow \mathbf{CDA} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

1MeV	Pb	Fe	eau	béton ordinaire
$\mu$ (cm <sup>-1</sup> )	0,79	0,47	0,07	0,15
CDA (cm)	0,88	1,47	9,90	4,62
R (cm)	1,26	2,12	14,28	6,66
$\rho$ (g.cm <sup>-3</sup> )	11,30	7,85	1,00	2,30

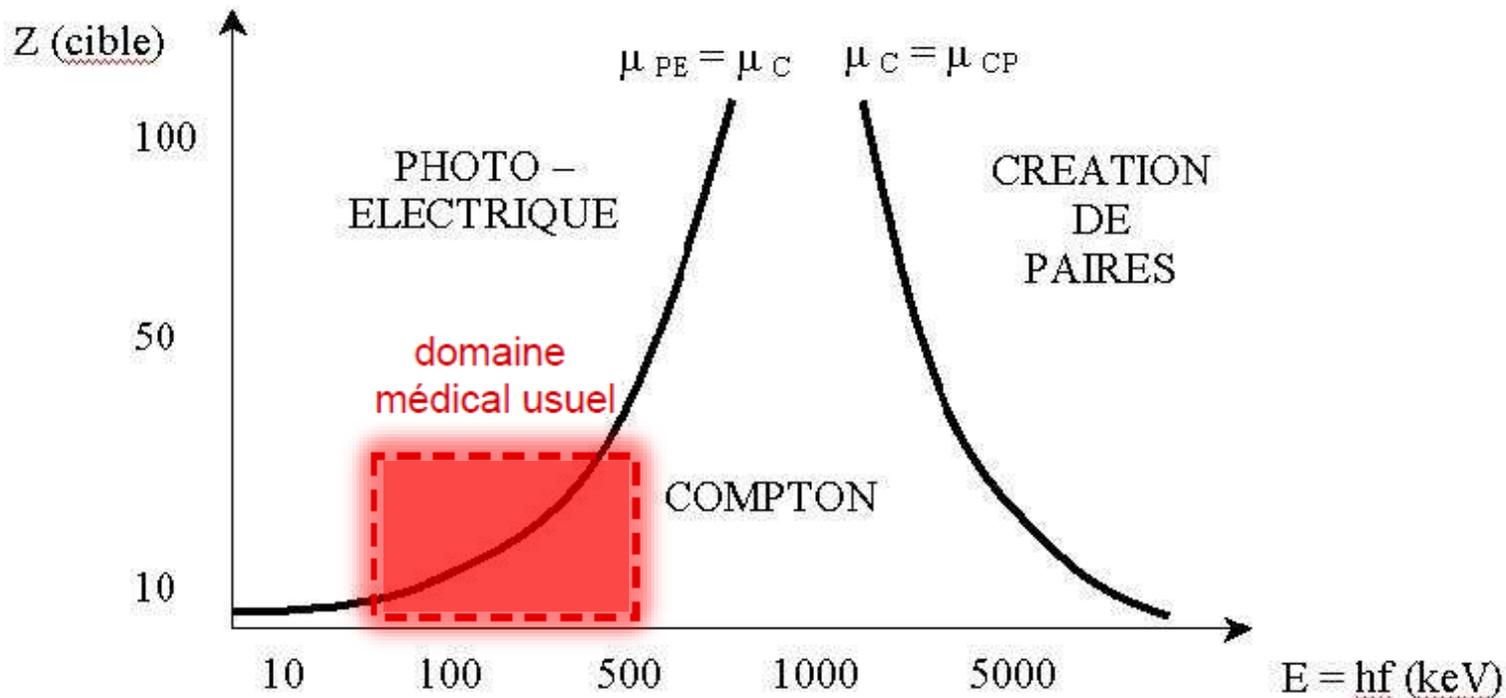
Valeurs de  $\mu$ , CDA, R et  $\rho$  pour certains matériaux

# Atténuation globale d'un faisceau de photons

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

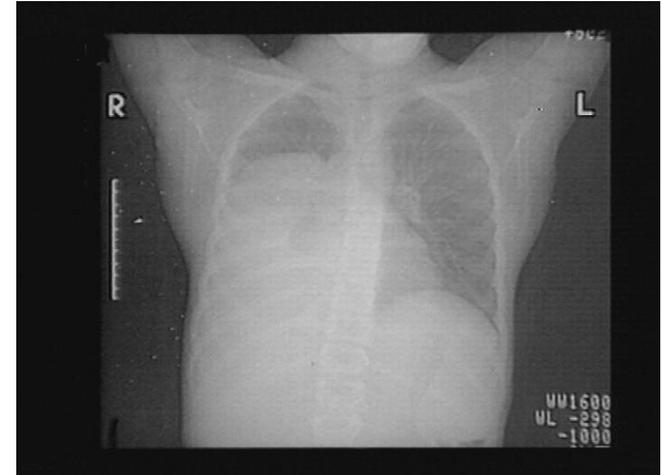
- $\mu$  dépend de l'E des  $\varphi$  incidents et de la nature du matériau absorbant (masse volumique, numéro atomique)

Domaine prépondérant d'interaction en fonction de l'E des rayonnements et du Z du matériau absorbant



# Applications directes de l'atténuation des rayons X dans la matière

Radiographies



Scanner X



=> Renseignements  
anatomiques

# Interaction des RI avec la matière: les neutrons

## *interactions avec les noyaux*

**choc élastique :**

( neutrons rapides-noyaux légers )

**choc inélastique:**

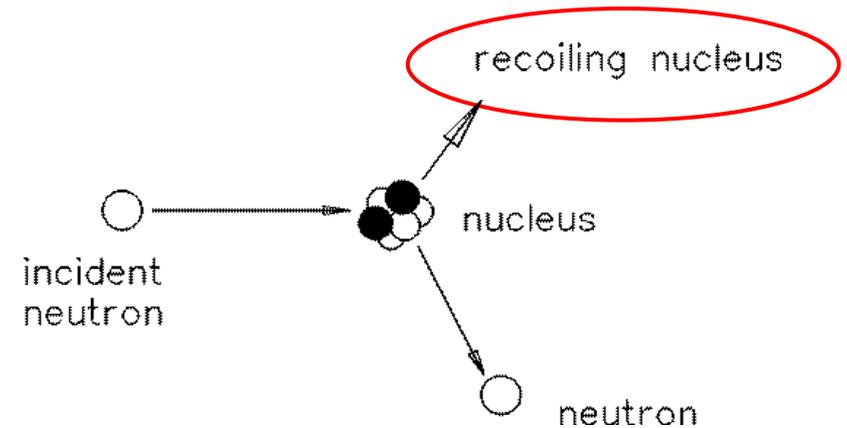
( neutrons rapides-noyaux lourds )

**capture radiative :**

( neutrons lents )

**capture non radiative :**

( neutrons lents ou rapides )



**DANGER: Rayonnements secondaires**

parcours : air > 100 m et ne sont pas arrêtés par Pb

⇒ **tissus vivants : dégâts importants ( protons de recul )**

# En résumé

## les écrans de protection

