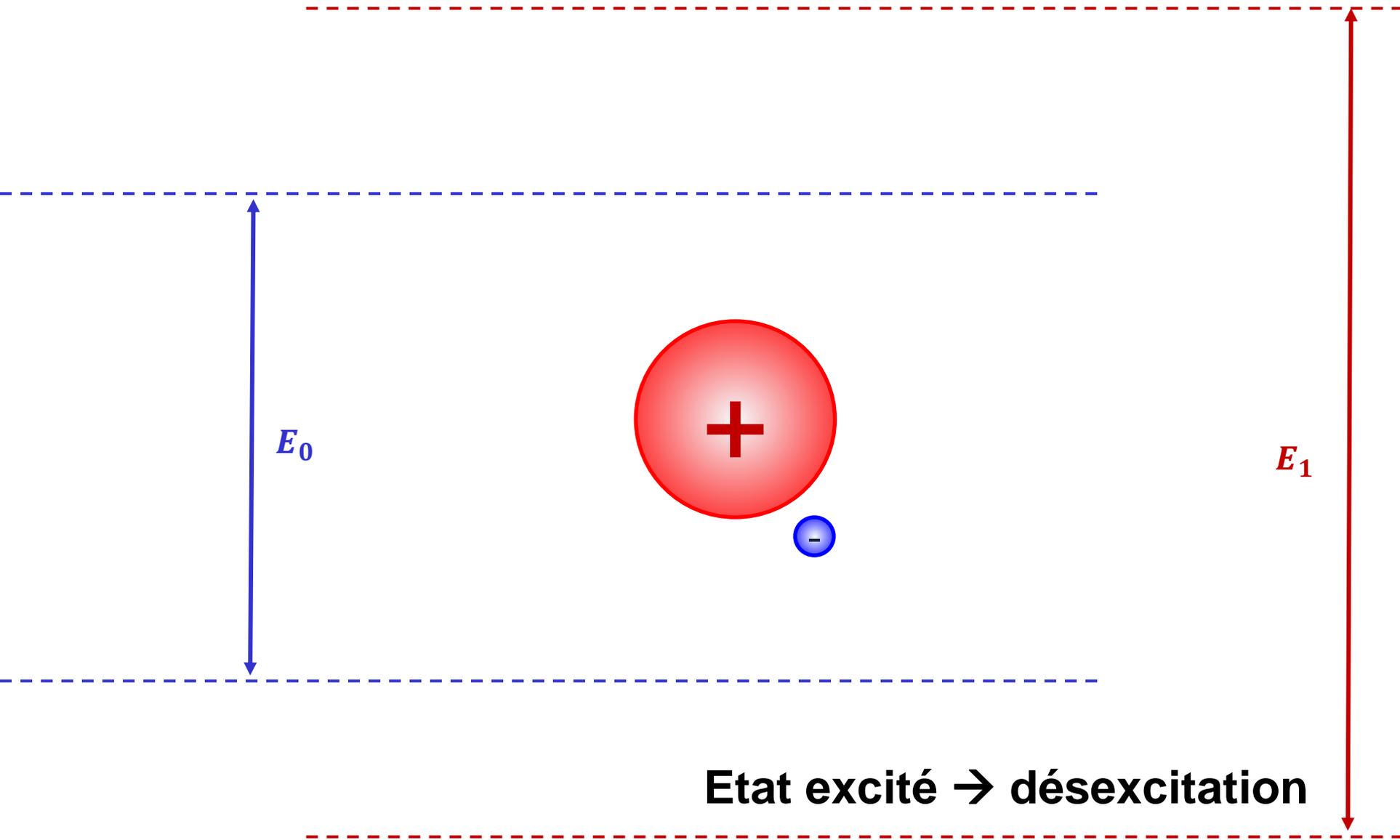
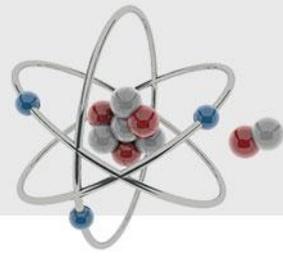


Khemis Miliana University
Faculty of Matter Sciences and Computer Science
Department of Physics
Master Applied Physics

Interaction Radiation-Matter

By Dr. S.E. Bentriddi

Interaction Rayonnements-matière

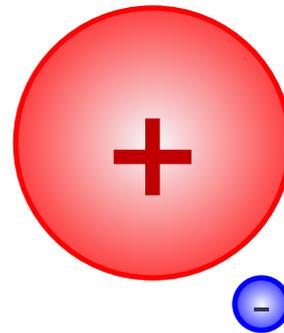
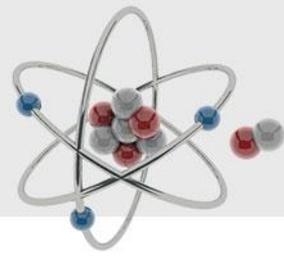


E_0

E_1

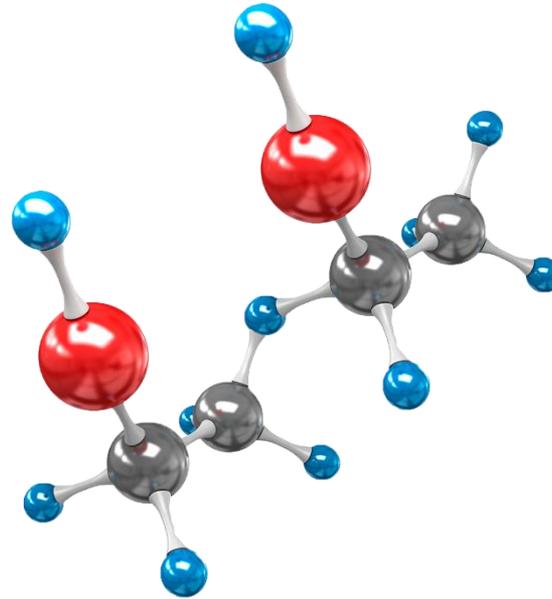
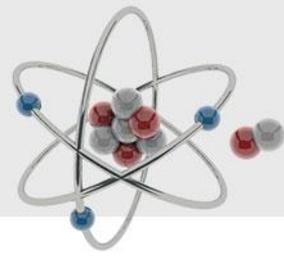
Etat excité → désexcitation

Interaction Rayonnements-matière

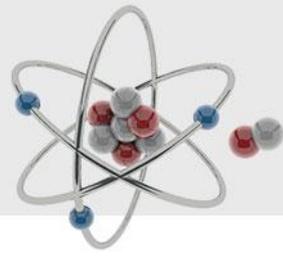


Atome ionisé

Interaction Rayonnements-matière



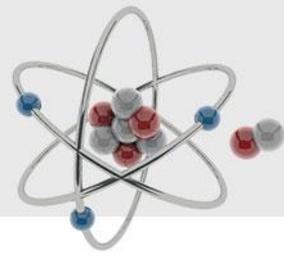
Liaison rompue



Rayonnement Ionisant:

Un rayonnement ionisant (RI) est tout rayonnement capable d'ioniser un électron de la couche K de l'hydrogène donc une énergie supérieure ou égale à **13,6 eV**.

Interaction Rayonnements-matière



Application:

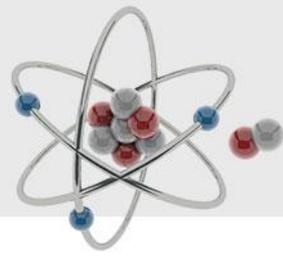
- Quelle est la fréquence qui correspond à une énergie de 13,6eV?
- Sachant que la lumière visible est limitée entre les deux fréquences (IR) et (UV):

$$4 \times 10^{14} \text{ Hz} \leq \nu \leq 8 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Comparer la fréquence du RI par rapport au visible?

On donne: $c \cong 3 \times 10^8 [m \cdot s^{-1}]$; $h = 6,626 \times 10^{-34} [m^2 \cdot kg \cdot s^{-1}]$

Interaction Rayonnements-matière

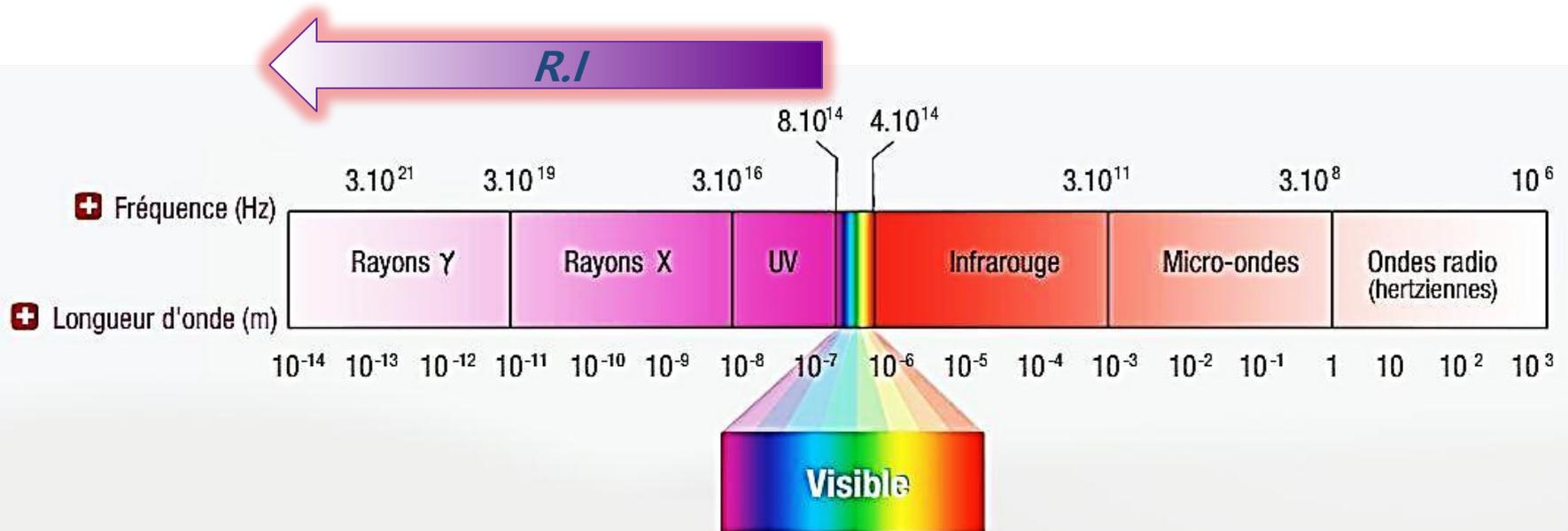


Solution:

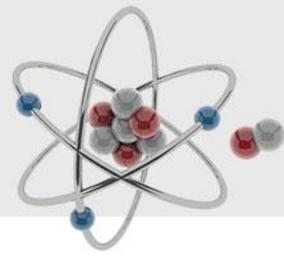
$$\bullet \quad h\nu = 13.6\text{eV} \rightarrow \nu_0 = \frac{13.6}{h} = \frac{13.6}{hc} c = \frac{13.6 \times 3 \times 10^8}{1.241 \times 10^{-6}}$$

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

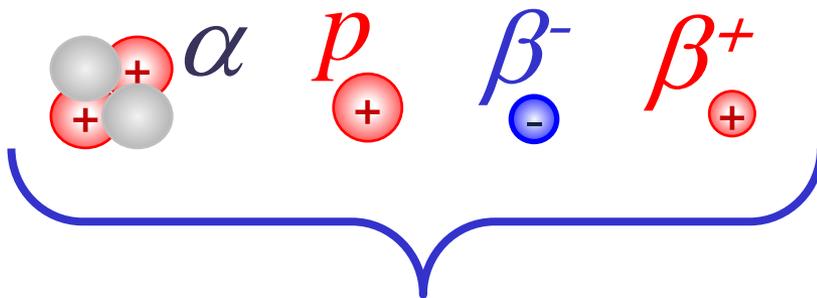
- La limite seuil d'un RI se place dans la région de l'UV



Interaction Rayonnements-matière

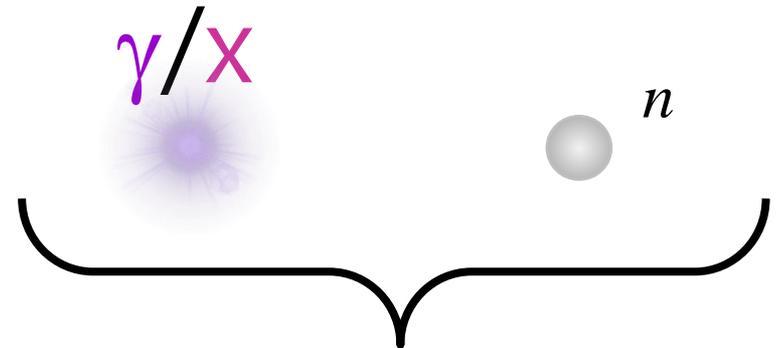


Types de rayonnements :



Rayonnements chargés

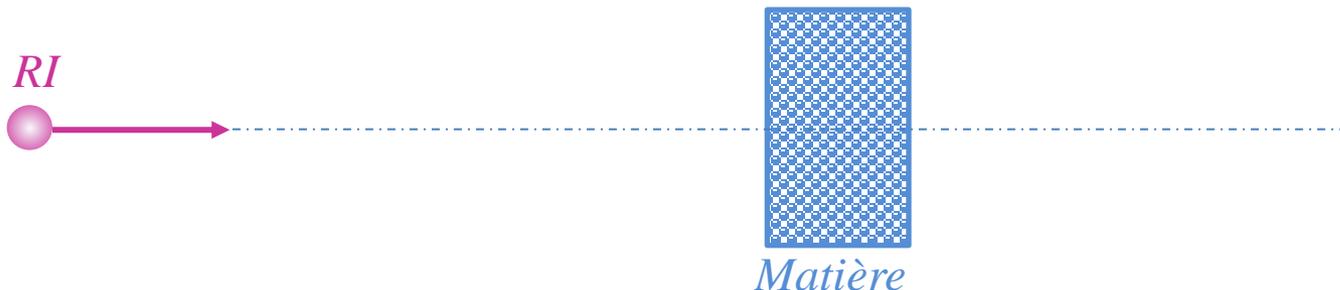
Rayonnement directement ionisant



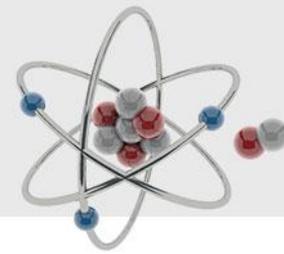
Rayonnements neutres

Rayonnement indirectement ionisant

$$RI + Matière = f(E_{RI}, Matière, Mécanisme)$$



Interaction Rayonnements-matière



Rayonnements Chargés (α , β , p , ions):

La perte de l'énergie (cinétique) du rayonnement chargé incident est donnée par la formule relativiste de Bethe. Appelée également Transfert d'Énergie Linéique (TEL), cette expression décrit la diminution de l'énergie de la particule incidente par unité de distance parcourue dans la matière. Ce rayonnement interagit essentiellement avec le nuage électronique des atomes constituant la matière traversée:

$$-\frac{dE_c}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nz^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 \right]$$

e : charge de l'électron,

m_e : masse au repos de l'électron,

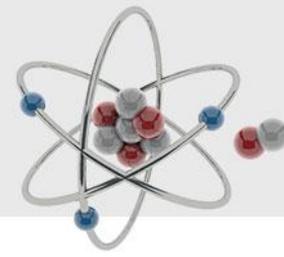
z : nombre atomique de la particule incidente,

$\beta = \frac{v}{c}$: rapport entre la Vitesse de la particule incidente et la Vitesse de la lumière

I : potential d'excitation moyen du matériau traversé

$n = \frac{N_A \cdot Z \cdot \rho [g/cm^3]}{A [g/mol]}$: densité électronique du matériau traversé

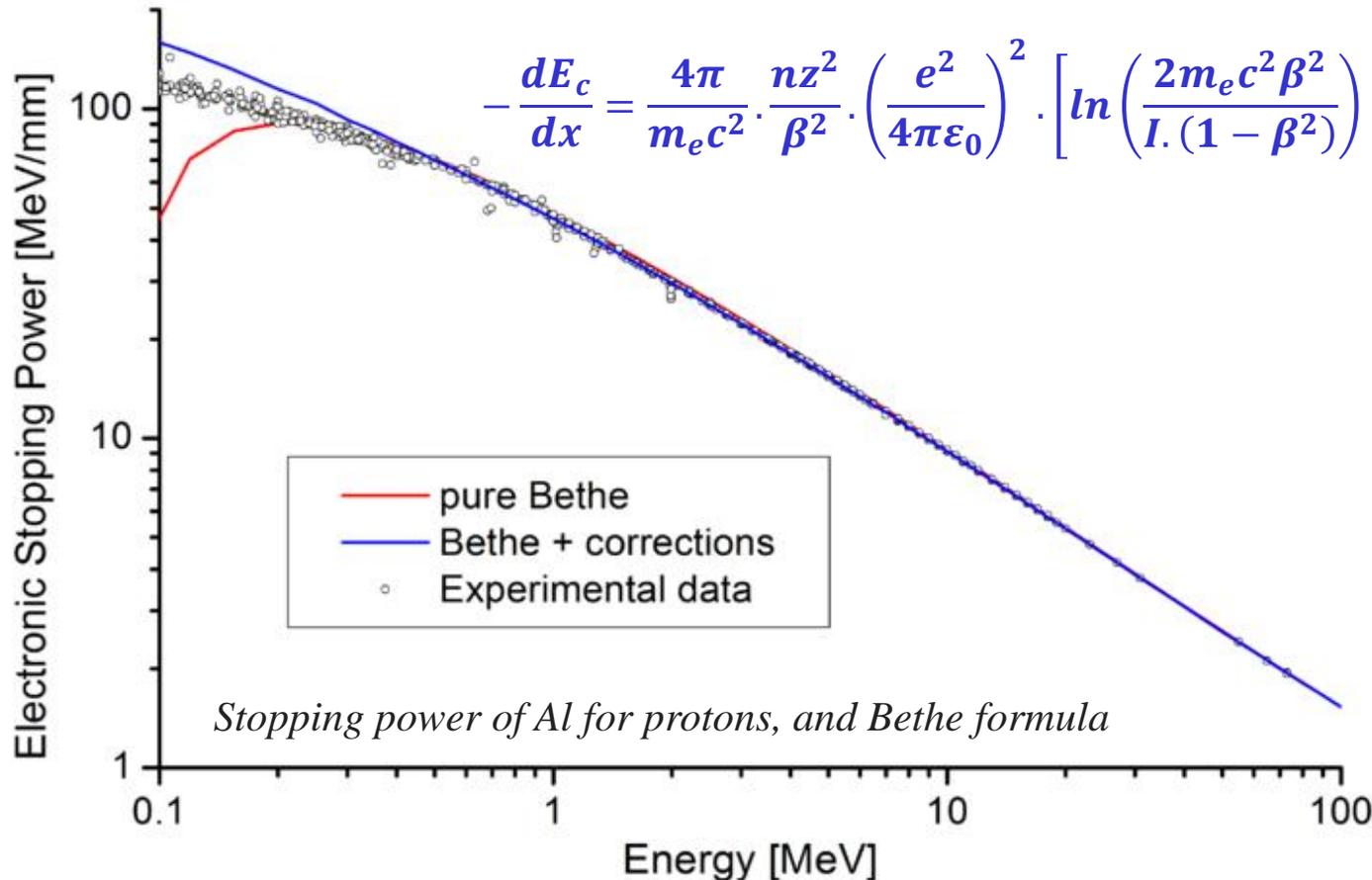
Interaction Rayonnements-matière



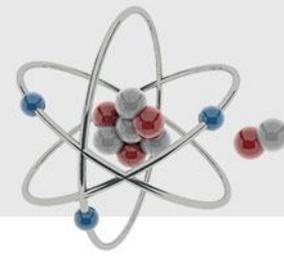
Rayonnements Chargés (α , β , p , ions):

$$-\frac{dE_c}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nz^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 \right]$$

$$-\frac{dE_c}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nz^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 - \frac{C}{Z} - \frac{\delta}{2} \right]$$



Interaction Rayonnements-matière

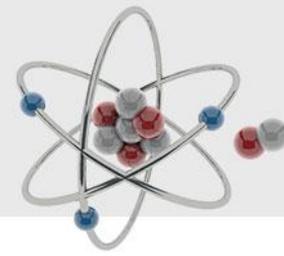


Rayonnements Chargés (α , β , p , ions):

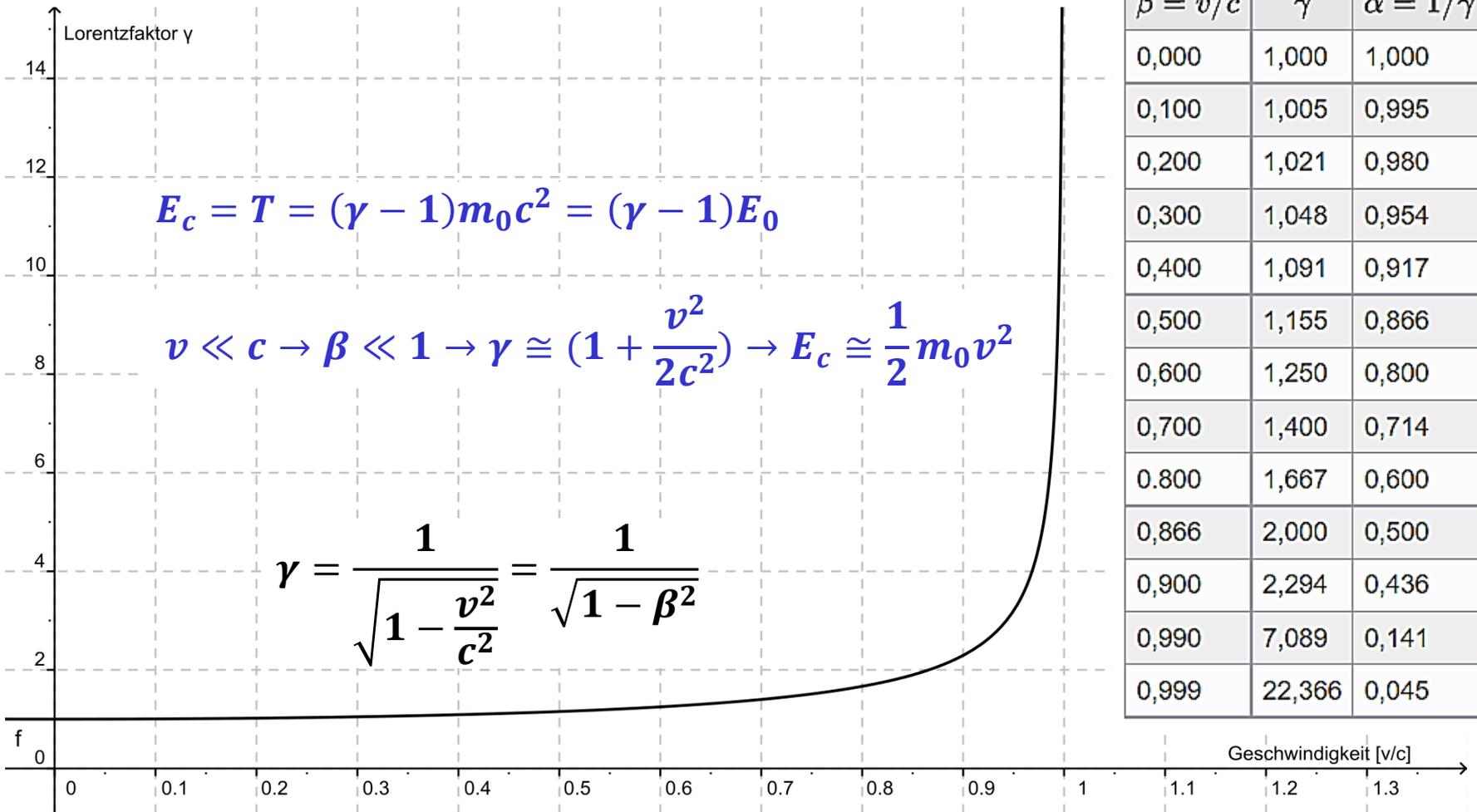
$$-\frac{dE_c}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nz^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 \right]$$

Chemical species	Molecular mean excitation energy, eV, for -		
	Present theory	Experimental empirical	Bragg's rule
CH ₄	44.7	42.8	35.1
(CH ₂) _x	55.0	53.4	43.5
C ₆ H ₆	60.6	61.4 ± 1.9	50.6
H ₂	18.9	18.5 ± 0.5	15.0
Graphite	76.1	78.5 ± 1.5	62.0

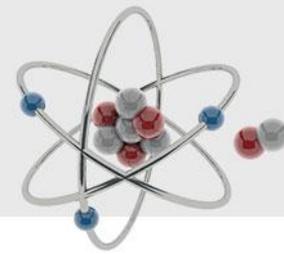
Interaction Rayonnements-matière



Rayonnements Chargés (α , β , p , ions):



Interaction Rayonnements-matière



Exercice :

Sachant que l'expression générale (relativiste) de l'énergie cinétique s'écrit:

$$E_c = (\gamma - 1)m_0c^2$$

1. Trouver l'expression du facteur $\beta = \frac{v}{c}$ en fonction de E_c et m_0c^2 .
2. Si pour un électron quelconque, on écrit $E_c = \alpha \times 1\text{KeV}$, avec $\alpha \in R$; déduire β pour $\alpha = 1, 10, 100, 1000$

Solution:

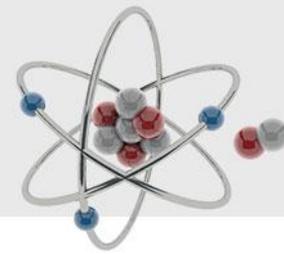
$$1. E_c = (\gamma - 1)m_0c^2 \rightarrow \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = 1 + \frac{E_c}{m_0c^2} \rightarrow 1 - \beta^2 = \frac{1}{\left(1 + \frac{E_c}{m_0c^2}\right)^2}$$

$$\beta^2 = 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{E_c}{m_0c^2}\right)^2} = 1 - \left(\frac{m_0c^2}{m_0c^2 + E_c}\right)^2 \rightarrow \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{m_0c^2}{m_0c^2 + E_c}\right)^2}$$

$$2. \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{511}{511+\alpha}\right)^2}$$

α	1	10	100	1000
β	0.062	0.194	0.548	0.941

Interaction Rayonnements-matière



Rayonnements Chargés (α , β , p , ions):

Application:

Montrer que pour les énergies faibles (non-relativistes) des particules incidentes, la formule de Bethe relativise :

$$-\frac{dE_c}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nz^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 \right]$$

peut se réduire à l'expression suivante :

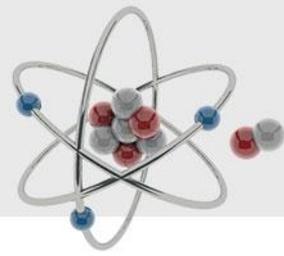
$$-\frac{dE_c}{dx} \cong \frac{4\pi n z^2}{m_e v^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right) \right]$$

Solution:

Pour des rayonnements non-relativistes: $\beta = \frac{v}{c} = \epsilon \ll 1 \rightarrow \beta^2 = \epsilon^2 \ll \ll 1$:

$$\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \approx \frac{\frac{2m_e c^2 v^2}{c^2}}{I \cdot (1 - \epsilon)} \cong \frac{2m_e v^2}{I}$$
$$\frac{2m_e v^2}{I} \gg 1 \rightarrow \ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right) \gg \beta^2 \rightarrow \ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right) - \beta^2 \cong \ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right)$$

Interaction Rayonnements-matière



Rayonnements Chargés (α , β , p , ions):

Dans une bonne approche et pour des faibles énergies, le TEL peut être donné par:

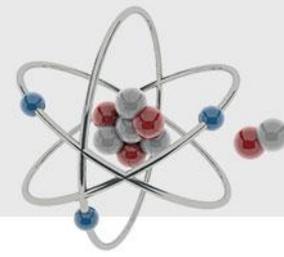
$$-\frac{dE_c}{dx} = TEL \propto \frac{nz^2}{m_e v^2}$$

On définit également la Densité Linéique d'ionisation (DLI) comme le nombre de paires d'ions créés par unité de volume lors du passage de la particule chargée incidente dans le matériau traversé:

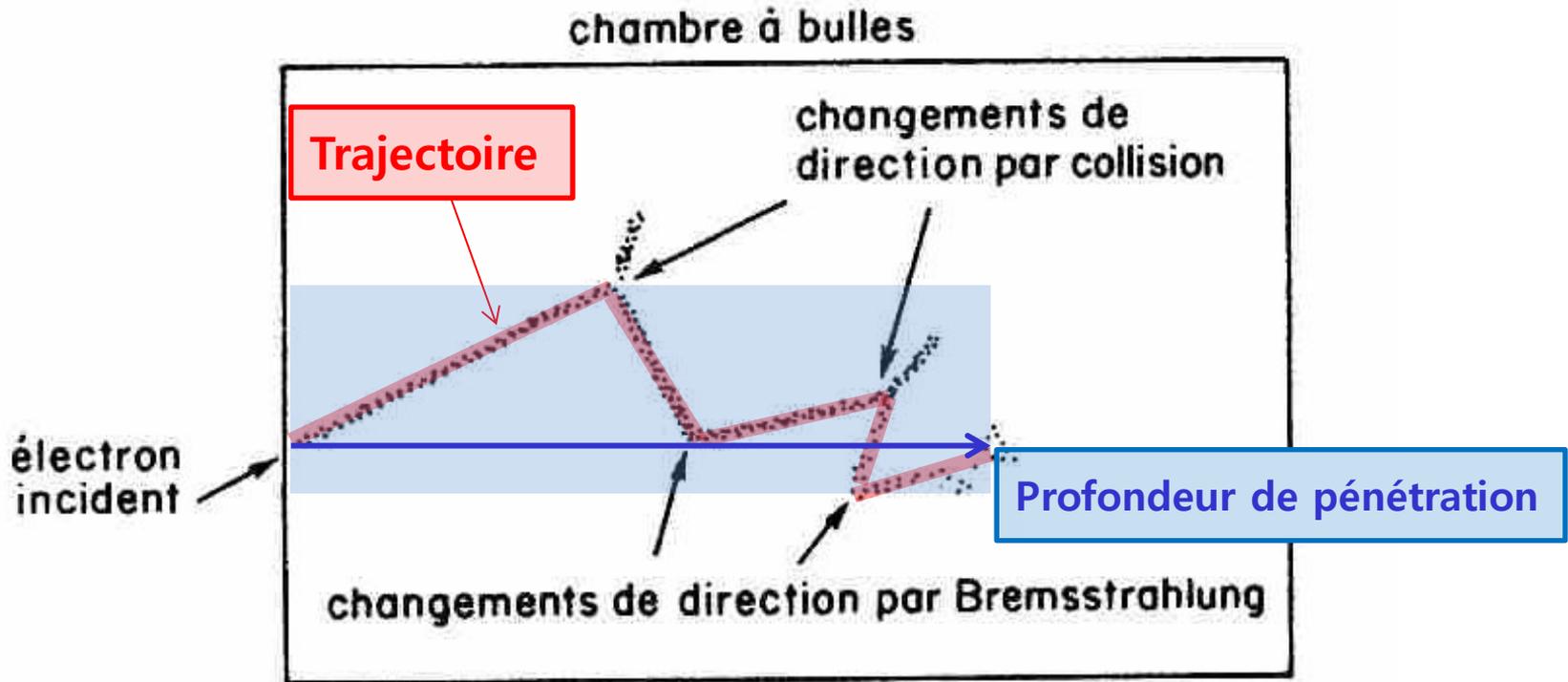
$$DLI = \frac{TEL}{W_i}$$

W_i : énergie moyenne transférée pour chaque ionisation

Interaction Rayonnements-matière



Rayonnements Chargés (α , β , p , ions):



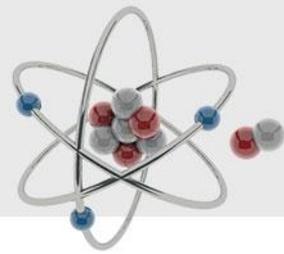
- Dans l'eau la longueur totale de la trajectoire est approchée par la formule :

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

- Dans un milieu de masse volumique ρ :

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

Interaction Rayonnements-matière



Rayonnements Chargés (α , β , p , ions):

Pour les particules chargées plus lourdes que les électrons (p , α) 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 :

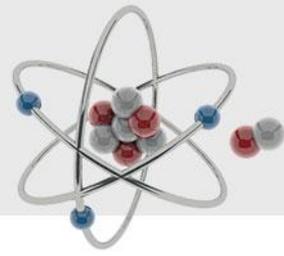
$$R(cm) \cong 0,31E^{\frac{3}{2}}$$

Pour les électrons :

$R \sim$ quelques cm dans l'air

$R \sim$ quelques 10 μm dans les tissus mous

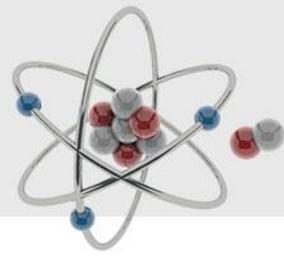
Interaction Rayonnements-matière



Rayonnements électromagnétique(γ , X – rays):

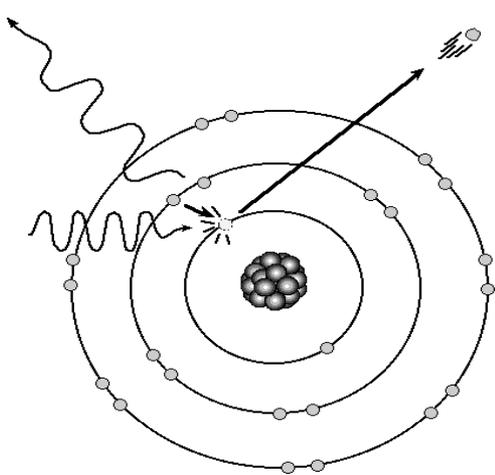
- Les Rayonnements électromagnétiques se différencient par leur origine :
 - *Rayonnement γ : changement dans les niveaux d'énergie du noyau (quantifié)*
 - *Rayonnement de freinage (Bremsstrahlung): ralentissement des électrons dans la matière*
 - *Rayonnement X : changement dans les niveaux d'énergie des électrons de l'atome*

Interaction Rayonnements-matière

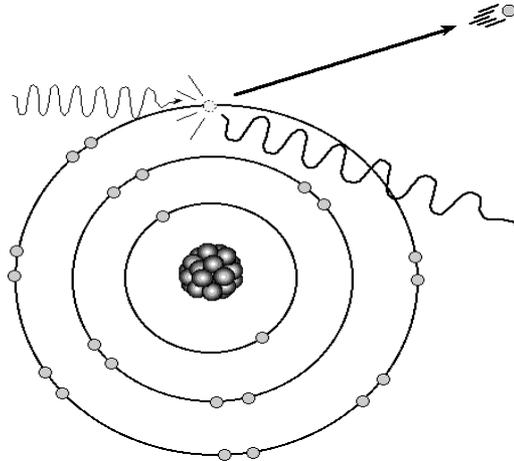


Rayonnements électromagnétique (γ , X – rays):

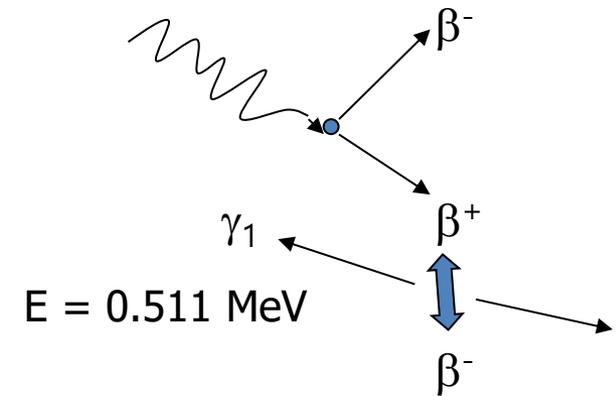
- Les Rayonnements électromagnétiques interagissent avec la matière selon trois mécanismes principaux:



Effet photoélectrique



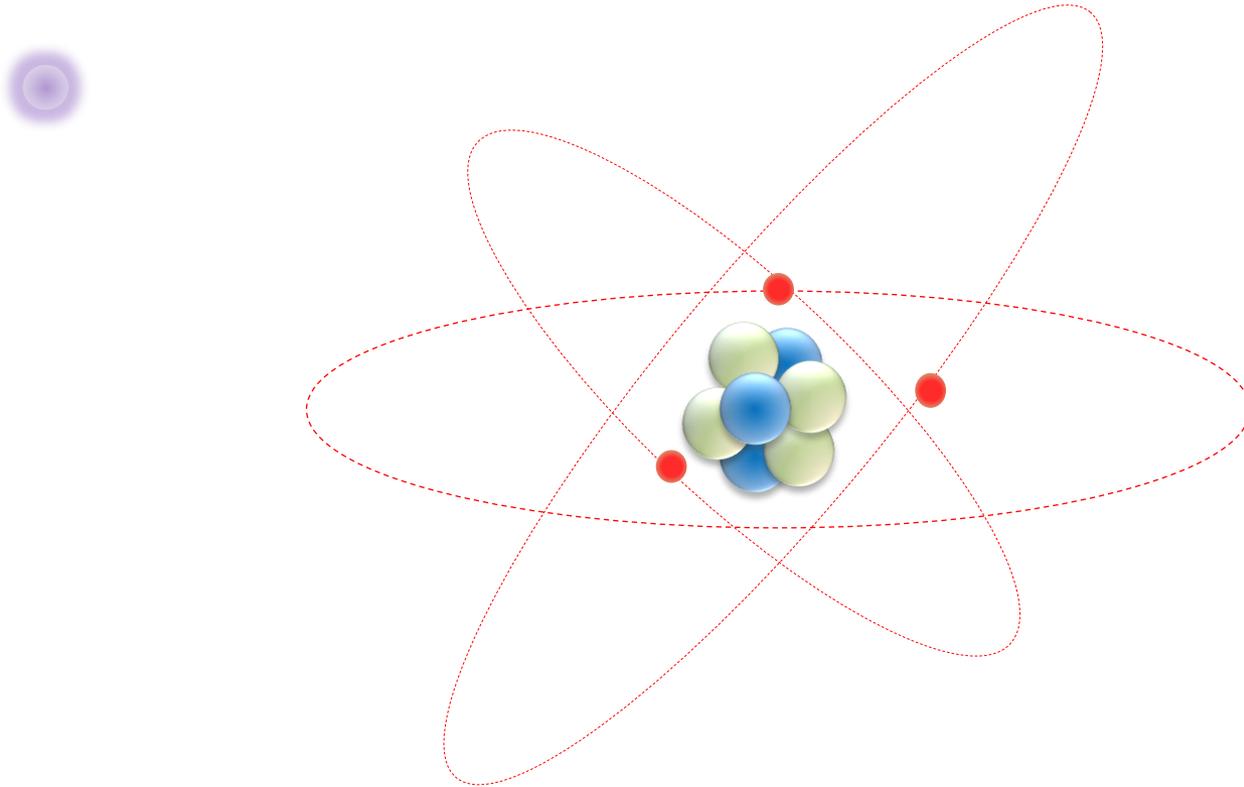
Effet Compton



Production de paires

Interaction des φ avec la matière: Effet photoélectrique

➤ Effet photo-électrique:



Interaction des φ avec la matière: Effet photoélectrique

- Totalité de l' E_φ transférée à un e^- de l'atome

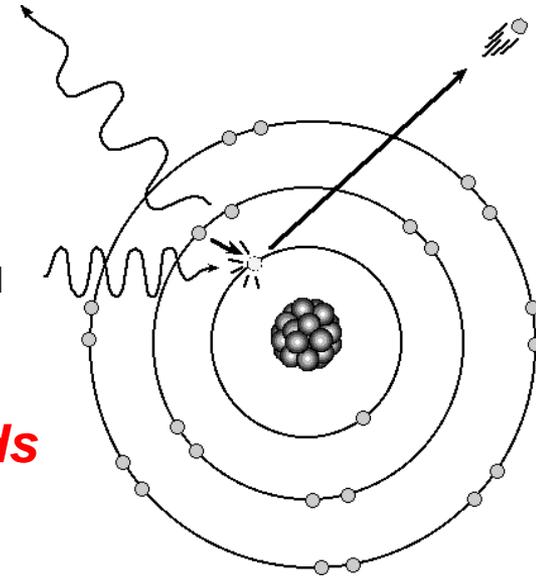
$$E_e = h\nu - w_K$$

- Condition : $h\nu = E_\varphi \geq w_K$
- Energie de liaison $w_k \uparrow$ avec Z et proximité du noyau

Effet important pour les photons de faible w_K et dans les matériaux lourds

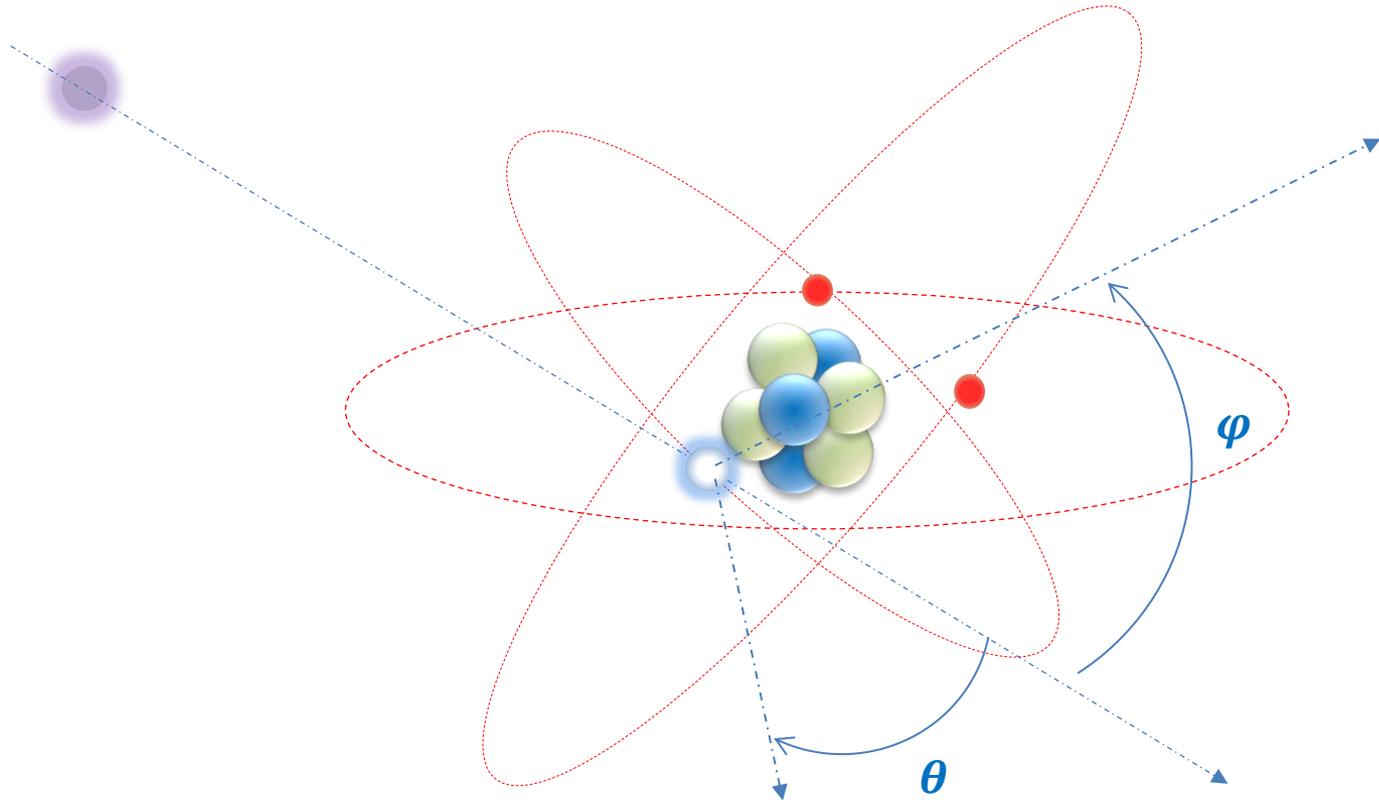
- En pratique:

- Pb bon matériau pour les écrans de protection contre les RX
- 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 Photo-électron pouvant être biologiquement néfaste

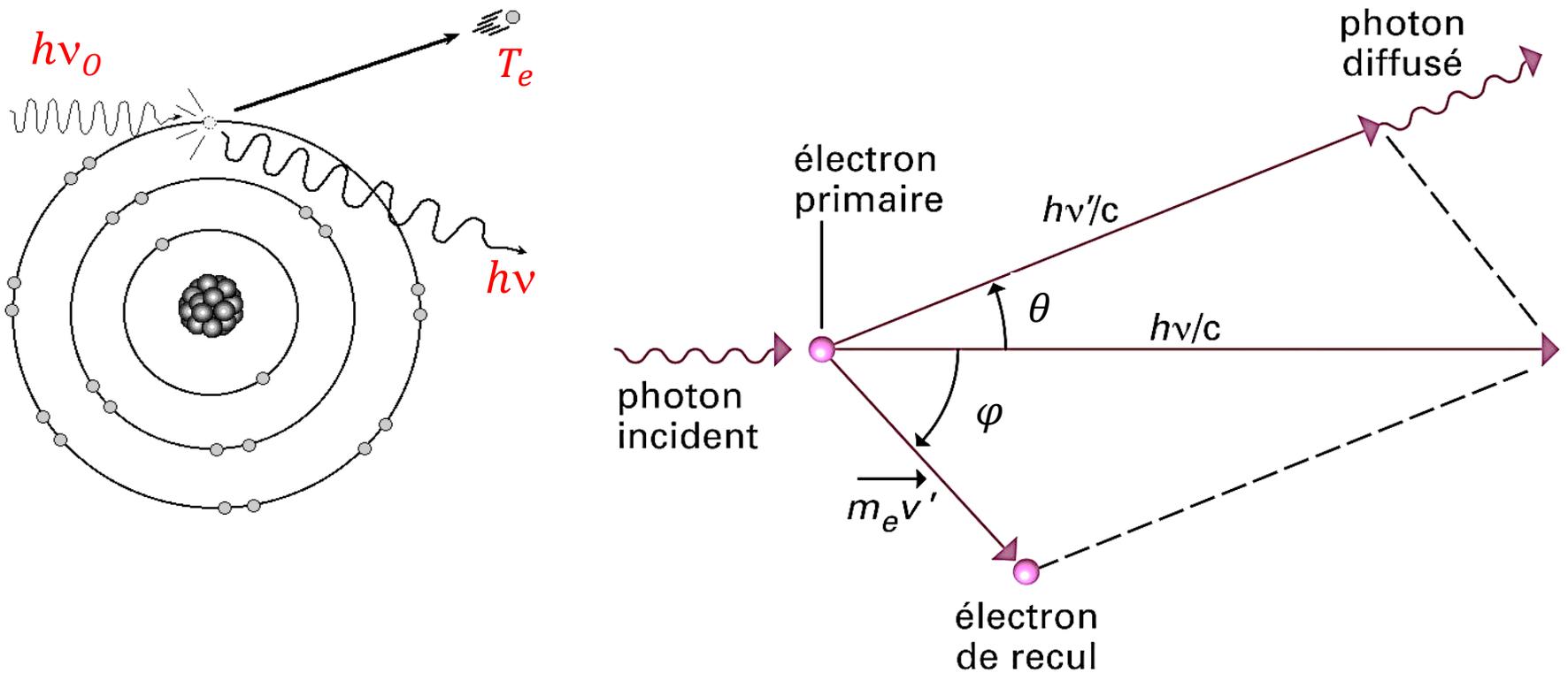


Interaction des φ avec la matière: Effet photoélectrique

➤ Effet Compton:



Interaction des φ avec la matière: Effet compton



- Conservation du moment et l'énergie (relativistes):

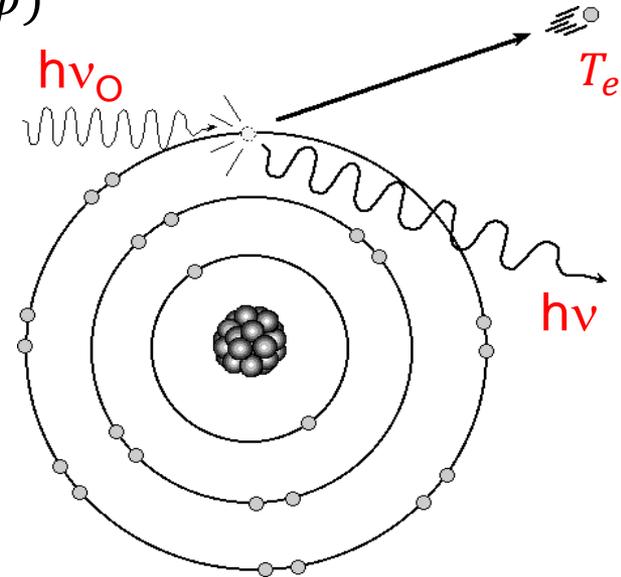
$$\begin{cases} \vec{P}_{h\nu_0} = \vec{P}_{h\nu} + \vec{P}_e \rightarrow P_e^2 = P_{h\nu_0}^2 + P_{h\nu}^2 - 2P_{h\nu_0}P_{h\nu} \cdot \cos\theta \\ E_{h\nu_0} + m_e c^2 = E_{h\nu} + \sqrt{P_e^2 c^2 + m_e^2 c^4} \rightarrow P_e^2 = (P_{h\nu_0} - P_{h\nu})^2 + 2m_e c^2 (P_{h\nu_0} - P_{h\nu}) \end{cases}$$

$$h\nu = P_{h\nu} \cdot c; E_e = T_e + m_e c^2$$

Interaction des φ avec la matière: Effet compton

- Partie de l'E du φ transmise à l'e⁻: $T_e = hv_0 - hv$
- Distribution angulaire en énergie: $E_e(\theta)$ et $E_{hv'}(\varphi)$

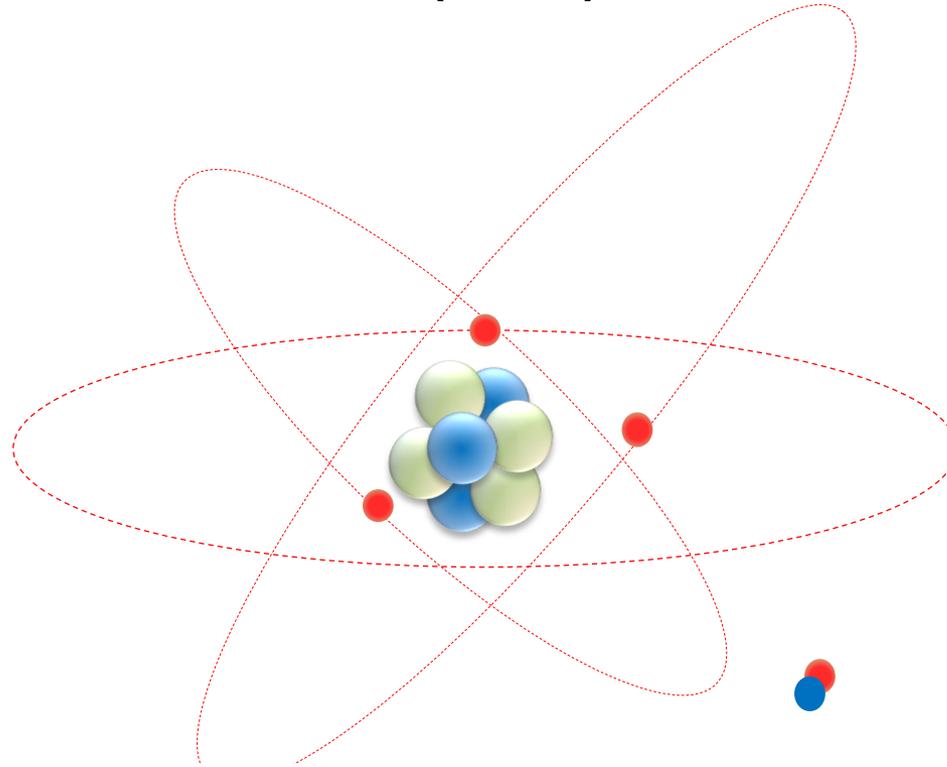
$$hv = \frac{hv_0}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}; \quad \alpha = \frac{hv_0}{m_e c^2}$$
$$T_e = hv_0 - hv = \frac{\alpha hv_0(1 - \cos \theta)}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}$$



- Peu d'influence de $Z \rightarrow$ densité des électrons
- En pratique:
 - Photon diffusé encore assez énergétique pour avoir des effets sur image radio (voile) et constituer un danger pour le personnel qui doit se protéger
 - provient du patient. Diffusé \uparrow avec l'Energie des RX et du volume irradié

Interaction des φ avec la matière: Effet photoélectrique

➤ Création de Paires (e^+ , e^-):



Condition physique:

$$h\nu > 2m_e c^2 \rightarrow T_{e^-} + T_{e^+} = h\nu - 2m_e c^2$$

$$2m_e c^2 = 2 \times 0.511 \text{ MeV} = 1.022 \text{ MeV}$$

Interaction des φ avec la matière:

➤ Exercice sur l'Effet Compton:

Connaissant l'expression de l'énergie du photon Compton diffusé:

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

1- Calculer le rapport d'énergie minimal et maximal de ce photon diffusé par rapport au photon incident.

2- Estimer ces rapports pour des photons incidents de :

$$0.5 - 1.0 - 1.25 - 1.50 - 1.75 - 2 - 2.25 - 2.5 \text{ [MeV]}$$

3- Déduire la perte d'énergie maximale dans ce cas pour le photon incident.

Interaction des φ avec la matière:

➤ Exercice sur l'Effet Compton:

Connaissant l'expression de l'énergie du photon Compton diffusé:

$$hv = \frac{hv_0}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}; \quad \alpha = \frac{hv_0}{m_e c^2}$$

1- Calculer le rapport d'énergie minimal et maximal de ce photon diffusé par rapport au photon incident de $1MeV$.

Réponse:

$$\left(\frac{hv}{hv_0}\right)_{min} = \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}\right)_{min} = \frac{1}{(1 + \alpha(1 - \cos \theta))_{max}} = \frac{1}{1 + 2\alpha}; \quad \theta = \pi$$

$$\left(\frac{hv}{hv_0}\right)_{max} = \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}\right)_{max} = \frac{1}{(1 + \alpha(1 - \cos \theta))_{min}} = 1; \quad \theta = 0$$

Interaction des φ avec la matière:

➤ Exercice sur l'Effet Compton:

2- Estimer ces rapports pour des photons incidents de :

0.5 – 1.0 – 1.25 – 1.50 – 1.75 – 2 – 2.25 – 2.5 [MeV]

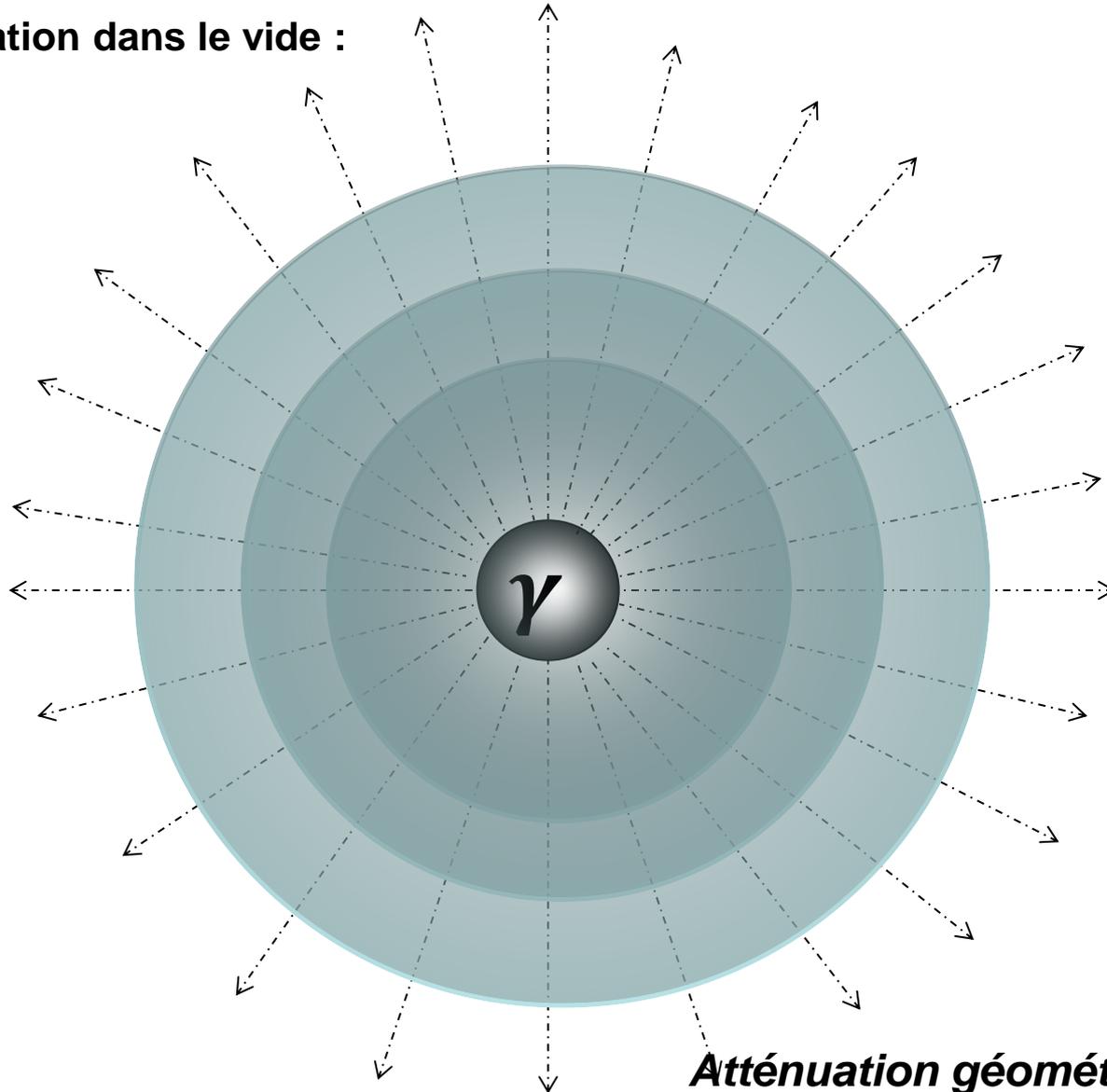
3- Déduire la perte d'énergie maximale dans ce cas pour le photon incident.

Réponse: il s'agit de photon de rétrodiffusion (diffusion vers l'arrière)

$h\nu$ [MeV]	0.5	1.0	1.25	1.50	1.75	2.0	2.25	2.5
α	0.98	1.95	2.45	2.94	3.42	3.91	4.40	4.90
$\left(\frac{h\nu}{h\nu'}\right)_{min}$	0.338	0.204	0.169	0.145	0.128	0.113	0.102	0.093
$T_e = h\nu - h\nu'$	0.33	0.80	1.04	1.28	1.53	1.77	2.02	2.27

Atténuation globale d'un faisceau de photons

1- Atténuation dans le vide :



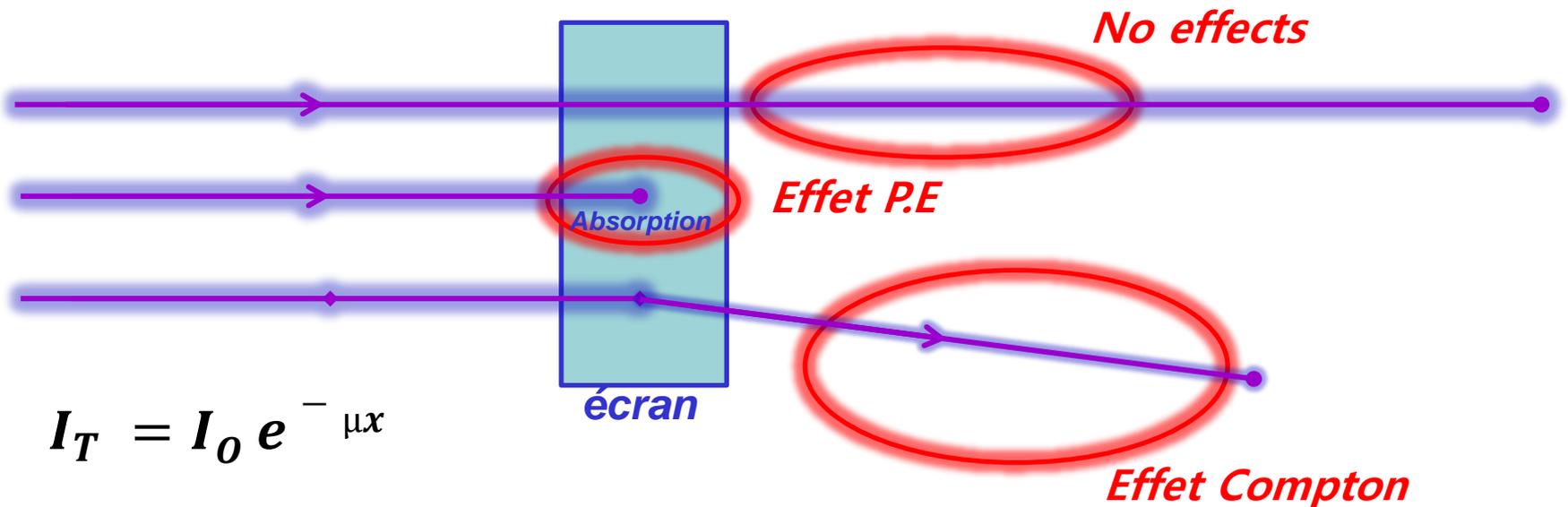
Atténuation géométrique: $I = I_0 \times \frac{1}{R^2}$

Atténuation globale d'un faisceau de photons

2- Atténuation dans la matière :

Atténuation d'un faisceau étroit de photons par interactions est un phénomène aléatoire:

- 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



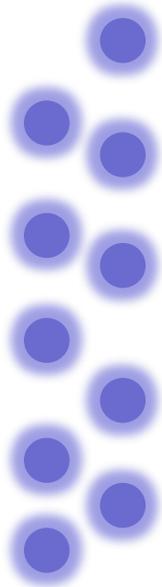
Interaction des φ avec la matière:

- Atténuation du rayonnement électromagnétique.

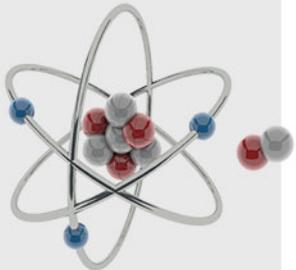
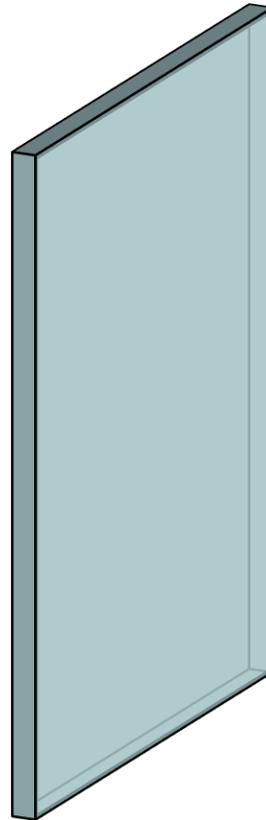
$$\sigma_{TOT} = \sigma_{PE} + \sigma_C + \sigma_{CP}$$

$\rightarrow dx \leftarrow$

N_0



$N(dx)$



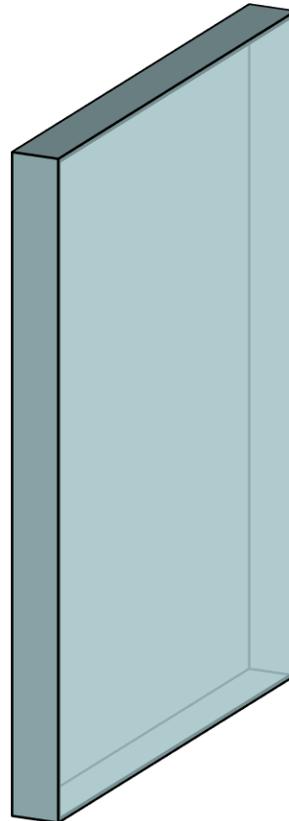
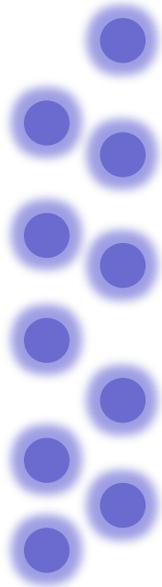
Interaction des φ avec la matière:

- Atténuation du rayonnement électromagnétique.

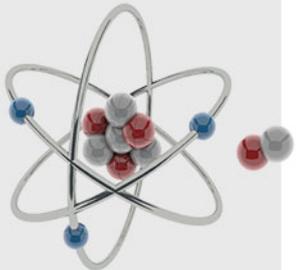
$$\sigma_{TOT} = \sigma_{PE} + \sigma_C + \sigma_{CP}$$

$$\rightarrow 2dx \leftarrow$$

N_0



$N(2dx)$



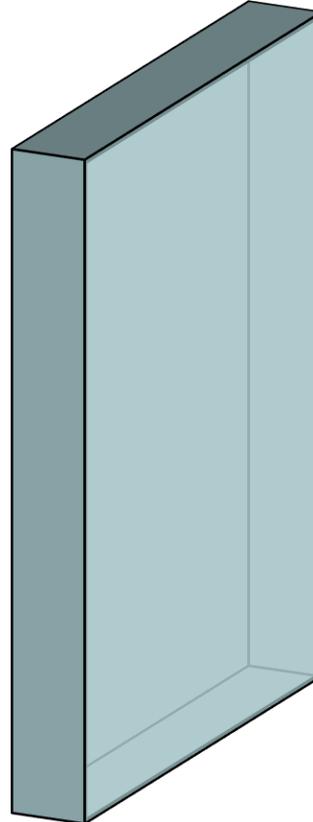
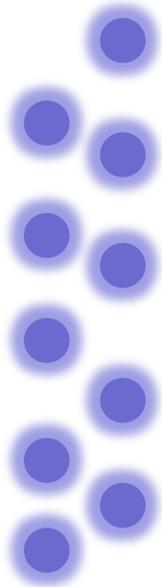
Interaction des φ avec la matière:

- Atténuation du rayonnement électromagnétique.

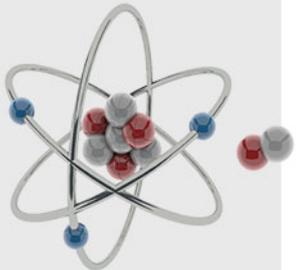
$$\sigma_{TOT} = \sigma_{PE} + \sigma_C + \sigma_{CP}$$

$\rightarrow 3dx \leftarrow$

N_0



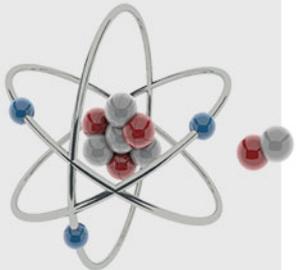
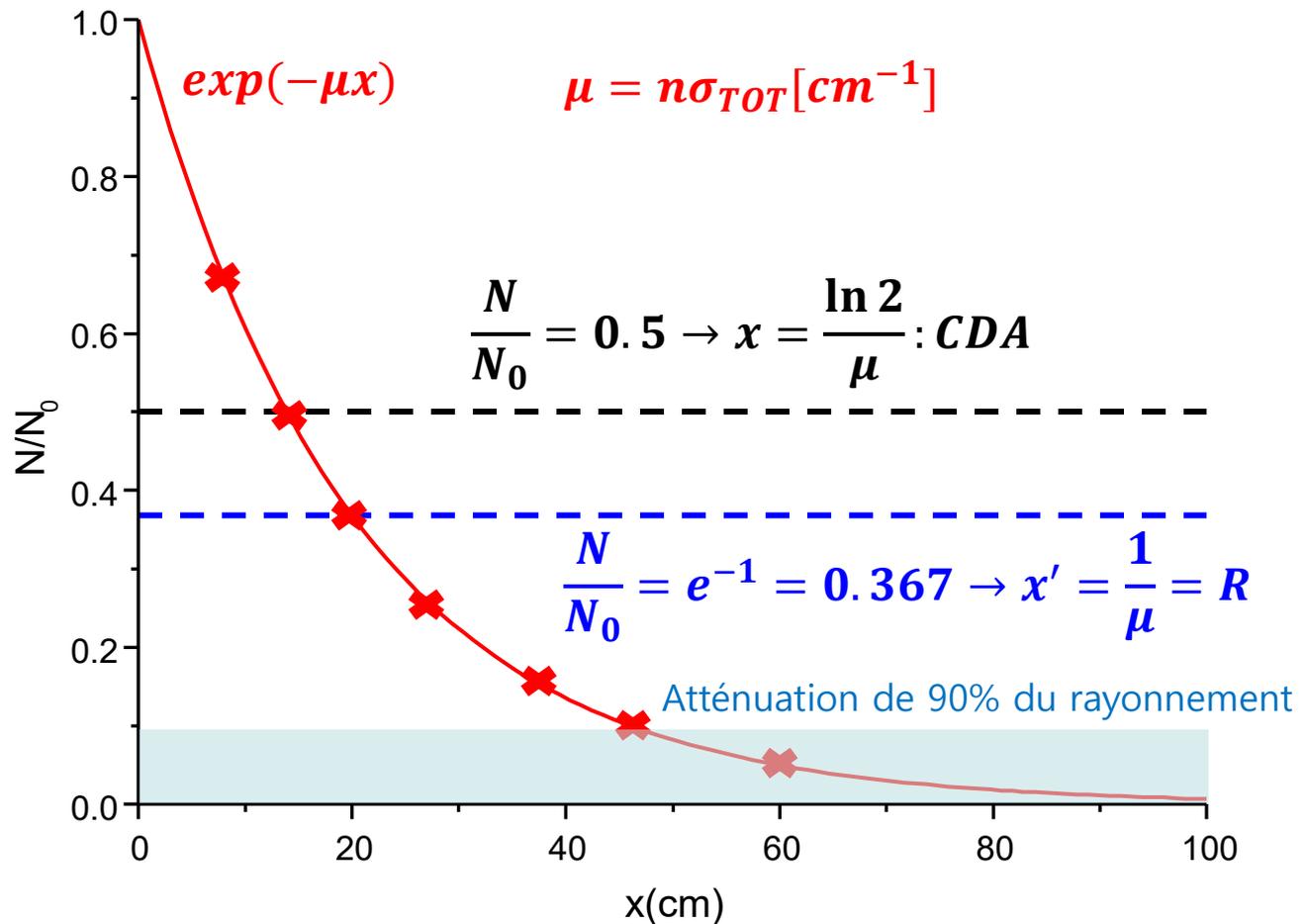
$N(3dx)$



Interaction des φ avec la matière:

- Atténuation du rayonnement électromagnétique.

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



Interaction des φ avec la matière:

- Interaction rayonnements-matière Globale.

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

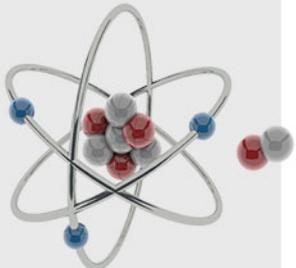
$$N(x) = N_0 \cdot \exp\{-xn\sigma_{TOT}\} \rightarrow N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

On peut également utiliser le coefficient d'atténuation massique, pour s'affranchir de la dépendance de l'état du matériau traversé: $\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \left[\frac{cm^2}{g}\right]$

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

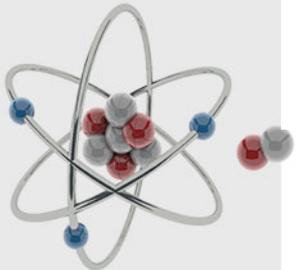
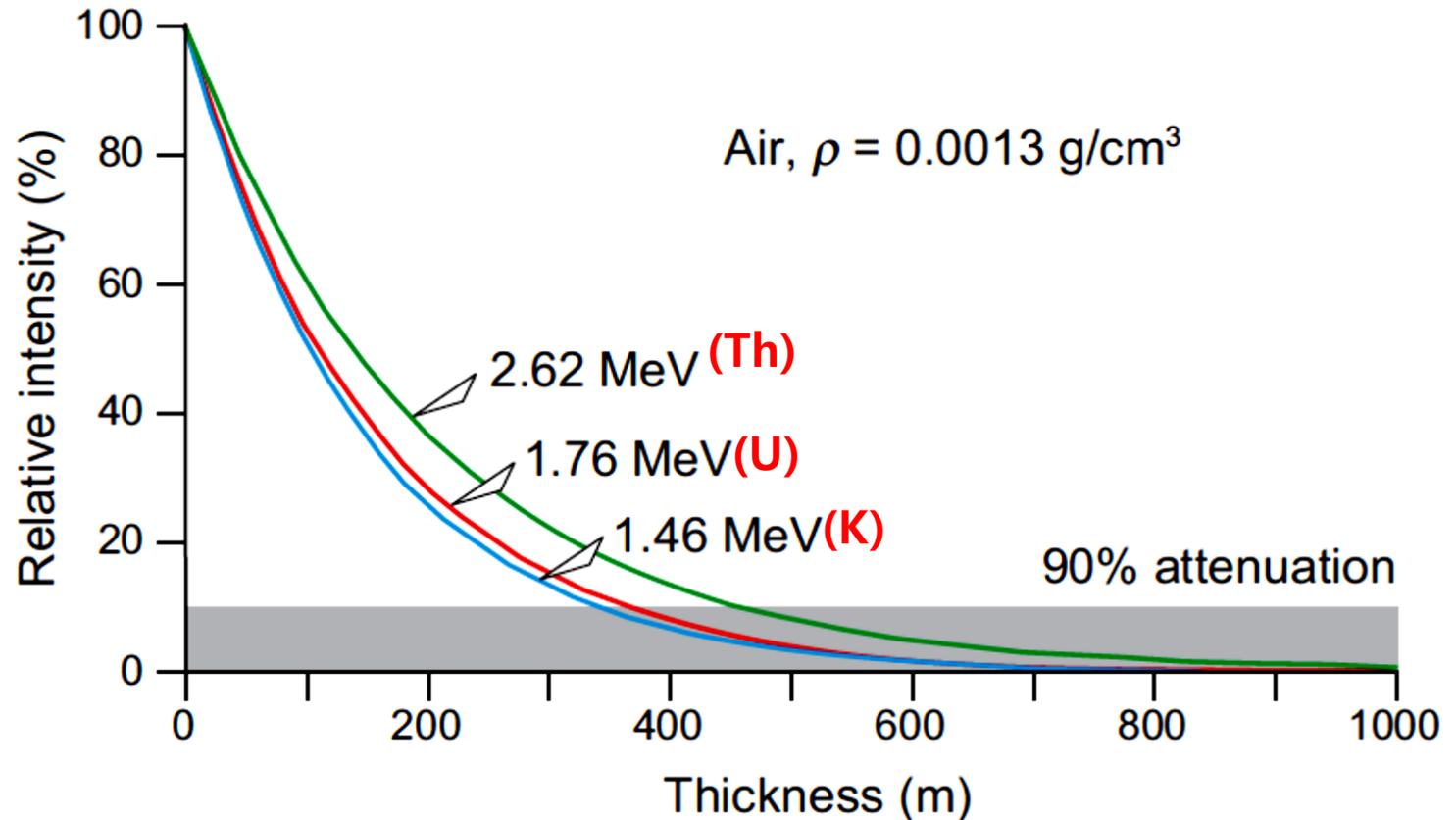
ρ : masse volumique du matériau

1MeV	Pb	Fe	eau	béton ordinaire
μ (cm ⁻¹)	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
ρ (g.cm ⁻³)	11,30	7,85	1,00	2,30



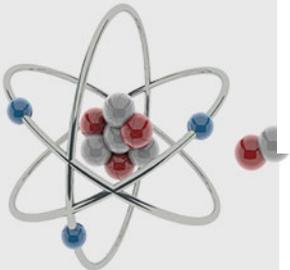
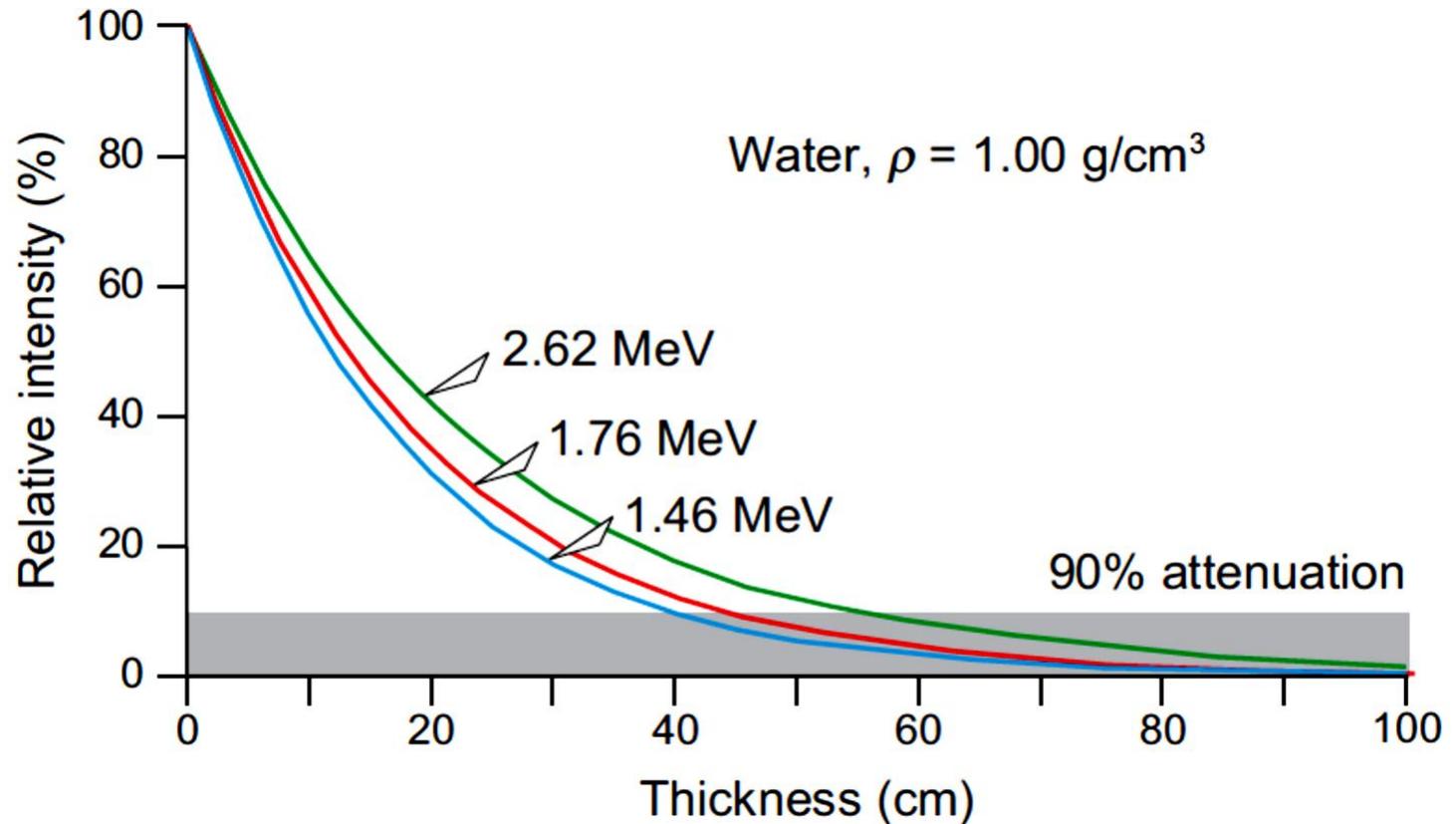
Interaction des γ avec la matière:

- Atténuation physique des γ dans l'air



Interaction des γ avec la matière:

- Atténuation des γ dans l'eau.

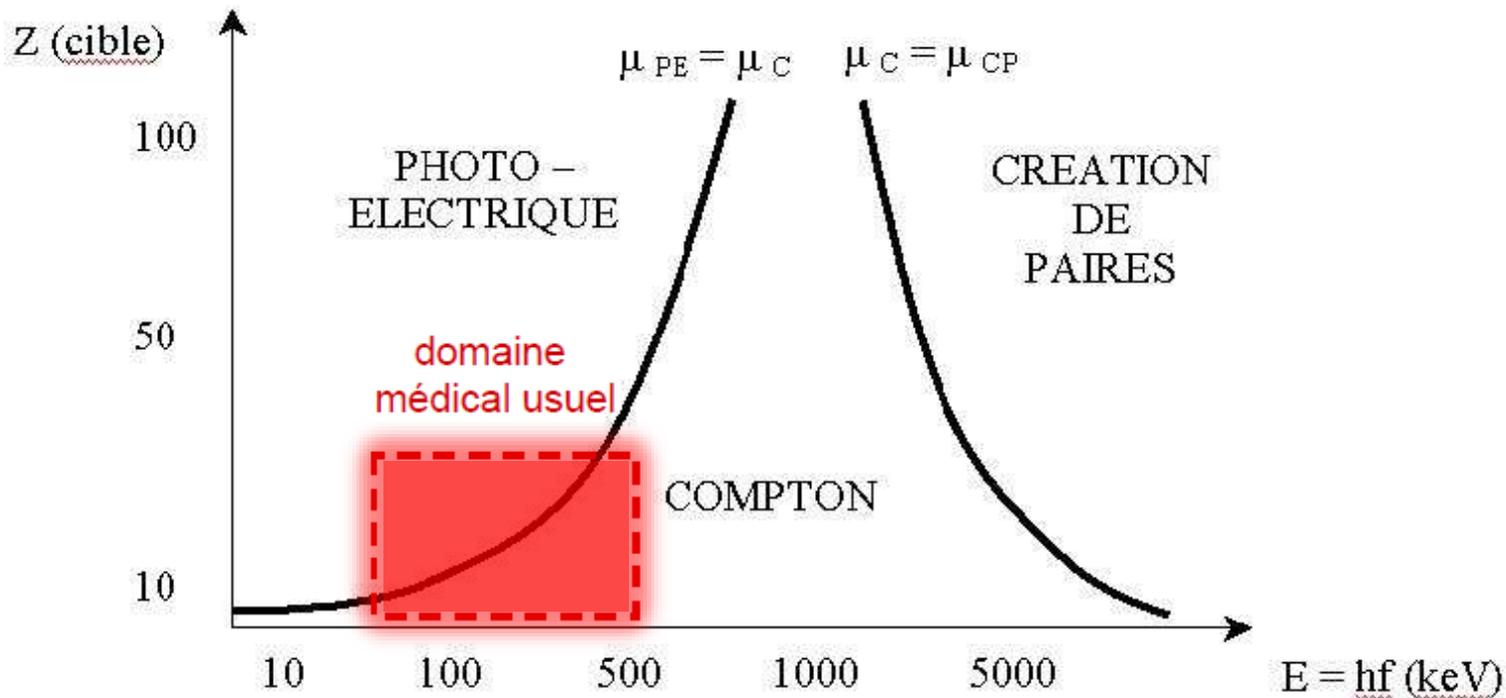


Atténuation globale d'un faisceau de photons

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

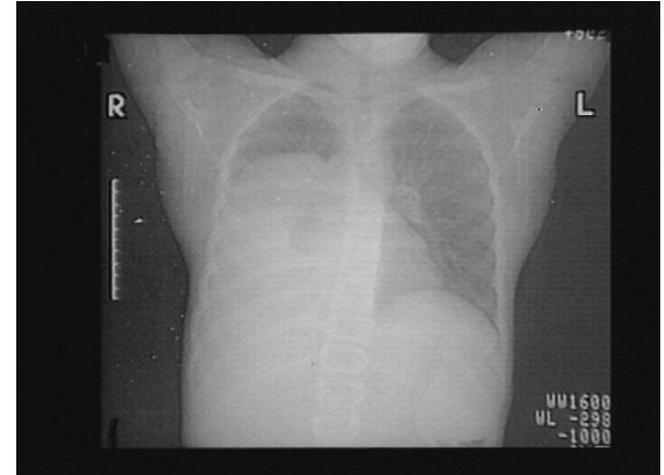
- μ dépend de l'E des φ incidents et de la nature du matériau absorbant (masse volumique, numéro atomique)

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

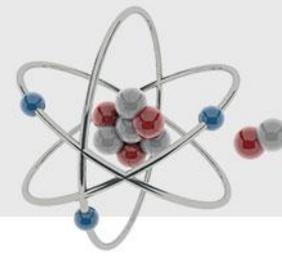
Radiographies



Scanner X



=> Renseignements anatomiques



Interaction des neutrons avec la matière

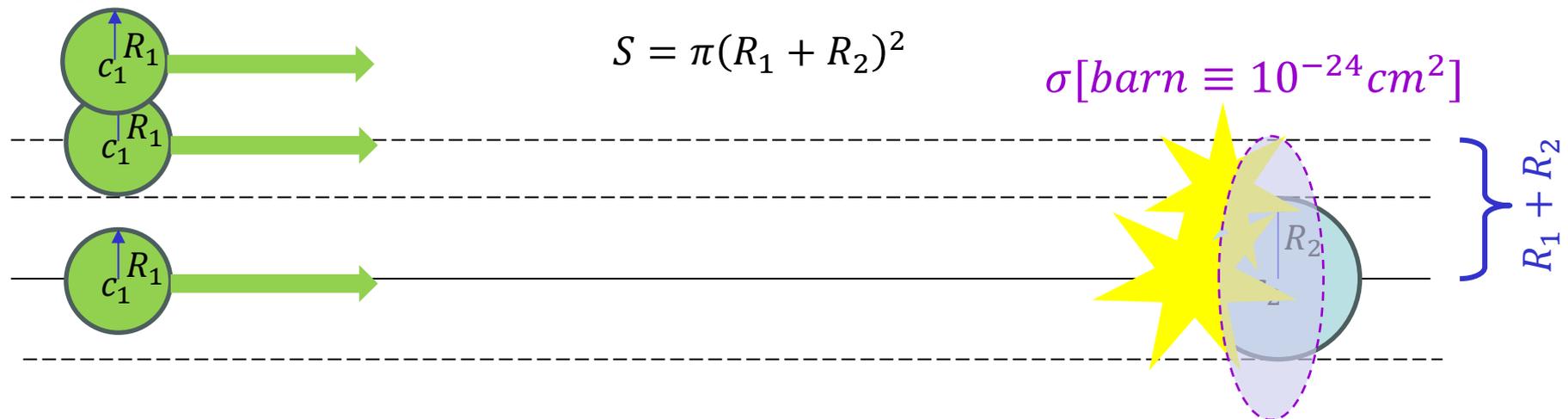
La Section efficace d'interaction

La section efficace d'interaction est une notion analogue à la section géométrique d'une sphère quand on étudie la collision de deux balles, chacune de rayon géométrique R_1 et R_2 .

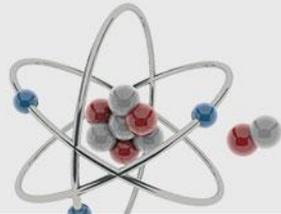
La condition qu'une collision de contact ait lieu:

$$c_1 \in [0, R_1 + R_2]$$

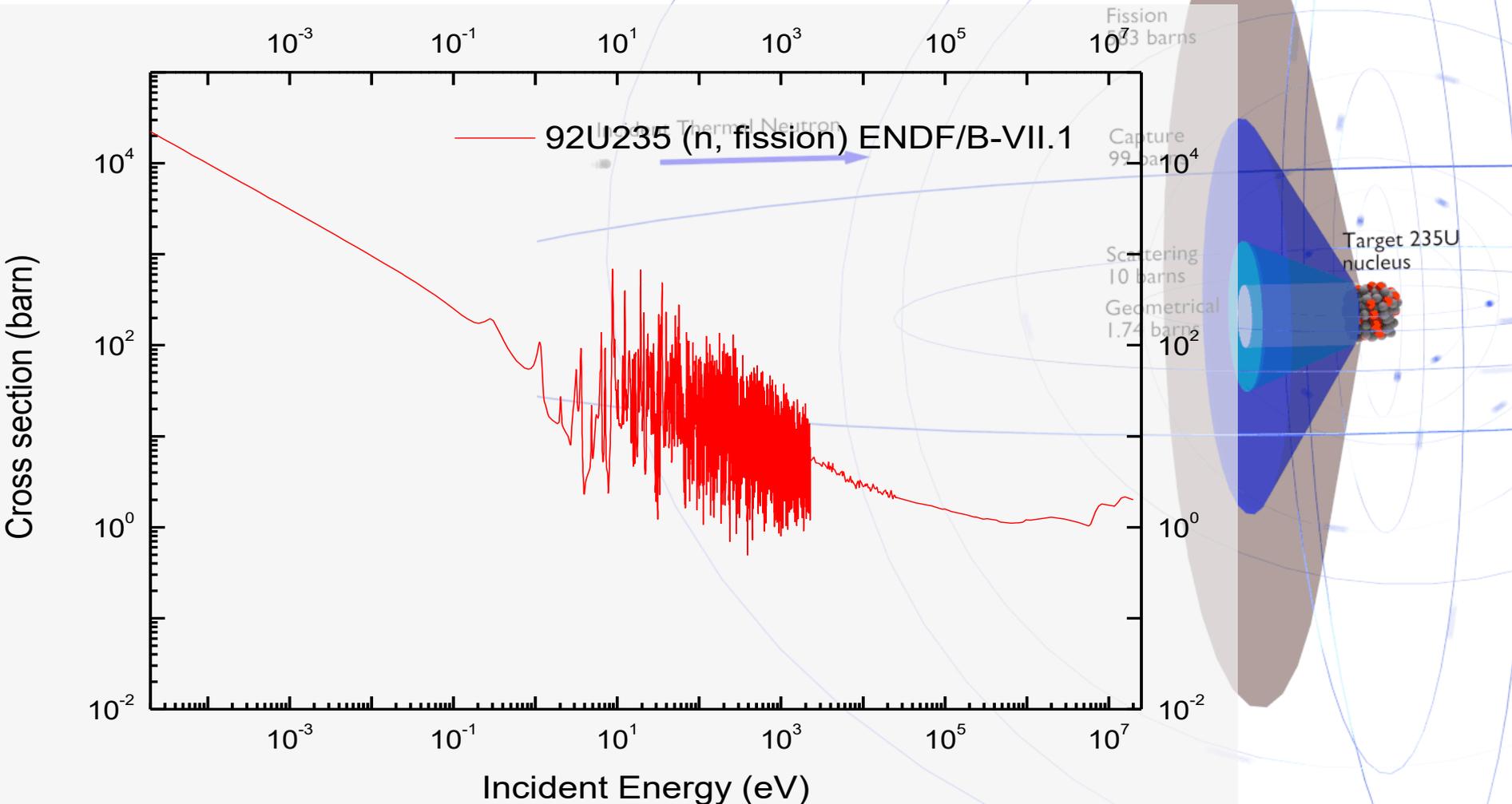
On peut définir ainsi une section efficace de collision:

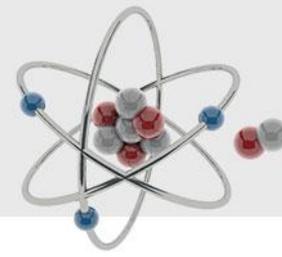


Interaction des neutrons avec la matière



La Section efficace d'interaction neutronique





Section efficace :

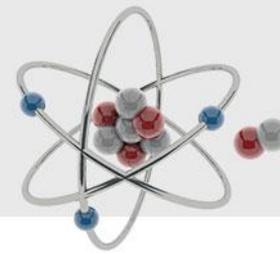
- Section efficace microscopique: $\sigma = f(\text{ptle incidente} + \text{Cible})$
- Section efficace macroscopique: $\Sigma = n \cdot \sigma$

•neutronique:

- **Interaction élastique (n, n) (ralentissement des neutrons)**
- Interaction inélastique (n, n') + γ
- *Fission nucléaire (production des neutrons) ($n, PF + 3n$) ...*
- Capture (absorption des neutrons) (n, γ) ...

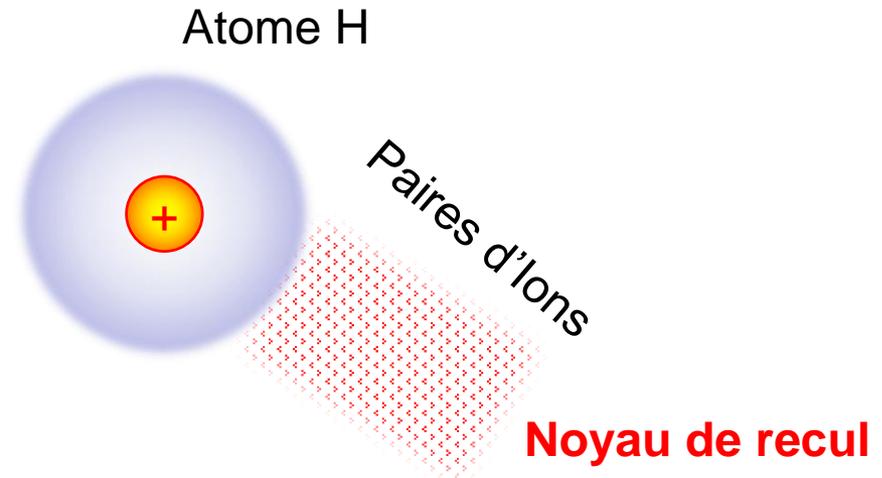
$$\sigma_{TOT} = \sigma_f + \sigma_d + \sigma_c + \dots$$

Interaction des neutrons avec la matière



Effet sur le tissu vivant:

Neutron incident



DANGER: Ionisations créés par le noyau de recul (Recoil Nucleus)

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

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

Les écrans de protection

