

Profs au **GANIL**



Profs au GANIL



Interaction Rayonnement-Matière DéTECTEURS en Physique Nucléaire

Emmanuel Vient LPC Caen - IN2P3/CNRS - Université Caen Normandie

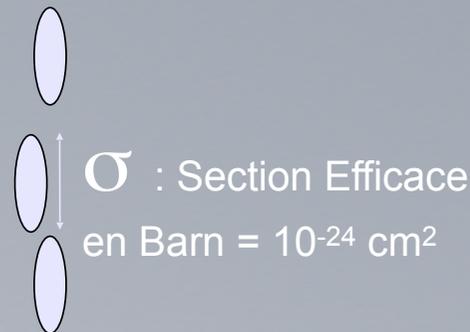
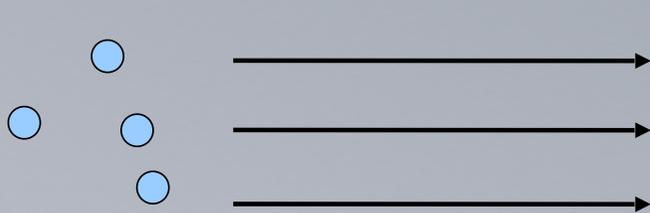


1^{ère} Partie

Interaction Rayonnement-Matière

1. Probabilité d'interaction & Sections efficaces

Dans le monde microscopique, nous allons avoir un faisceau monocinétique de particules ayant des trajectoires parallèles qui vont aller éventuellement se fracasser sur des cibles réparties dans l'espace sur leur chemin



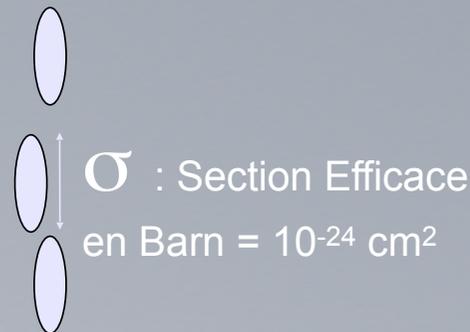
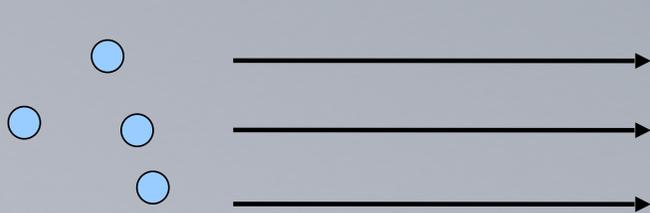
ϕ_{inc} : flux

Nombre de particules incidentes par seconde par cm^2

La section efficace est la surface fictive présentée par une cible élémentaire au faisceau de projectiles incidents

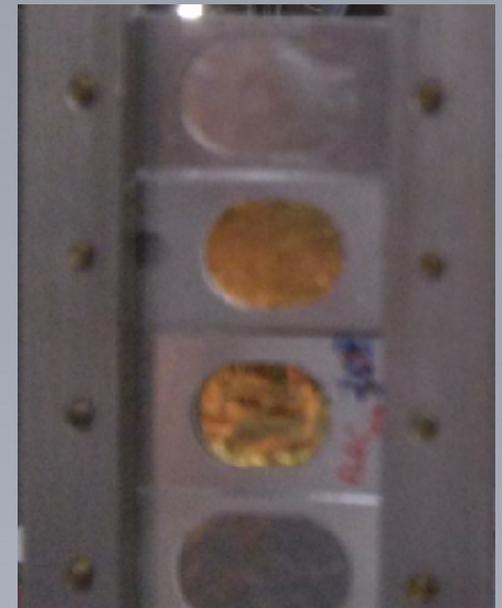
1. Probabilité d'interaction & Sections efficaces

Dans le monde microscopique, nous allons avoir un faisceau monocinétique de particules ayant des trajectoires parallèles qui vont aller éventuellement se fracasser sur des cibles réparties dans l'espace sur leur chemin



ϕ_{inc} : flux

Nombre de particules incidentes par seconde par cm^2



La section efficace est la surface fictive présentée par une cible élémentaire au faisceau de projectiles incidents

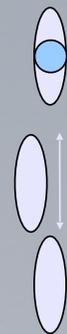
1. Probabilité d'interaction & Sections efficaces

Dans le monde microscopique, nous allons avoir un faisceau monocinétique de particules ayant des trajectoires parallèles qui vont aller éventuellement se fracasser sur des cibles réparties dans l'espace sur leur chemin

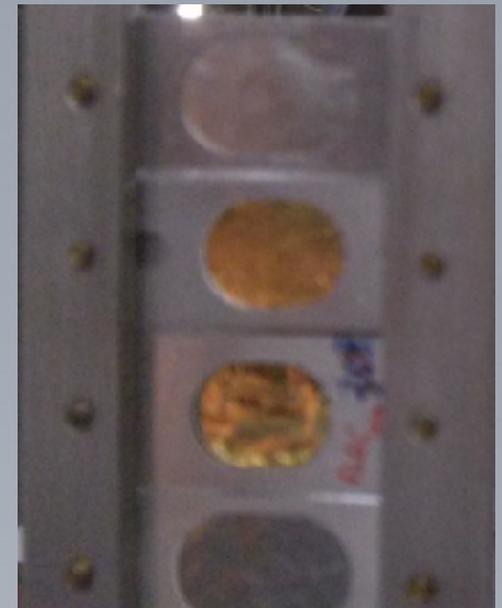


ϕ_{inc} : flux

Nombre de particules incidentes par seconde par cm^2



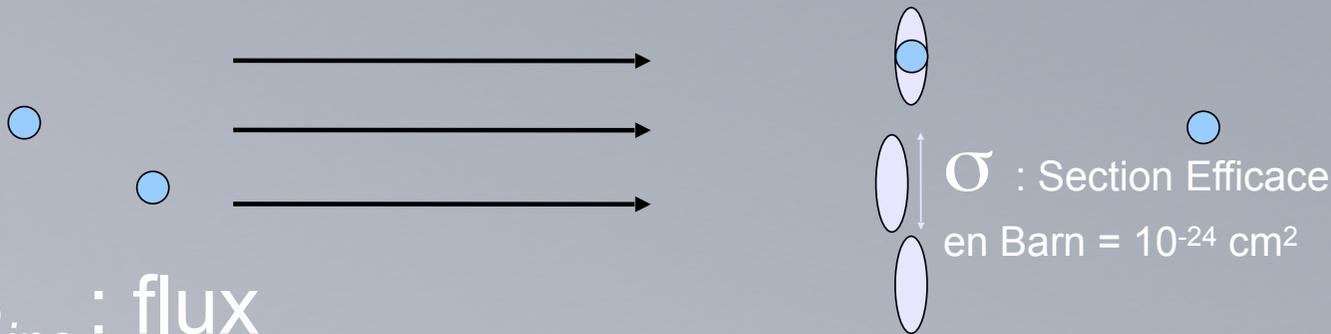
σ : Section Efficace
en Barn = $10^{-24} cm^2$



La section efficace est la surface fictive présentée par une cible élémentaire au faisceau de projectiles incidents

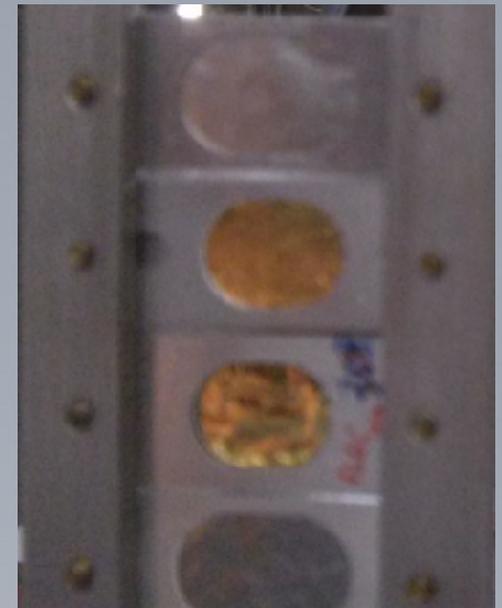
1. Probabilité d'interaction & Sections efficaces

Dans le monde microscopique, nous allons avoir un faisceau monocinétique de particules ayant des trajectoires parallèles qui vont aller éventuellement se fracasser sur des cibles réparties dans l'espace sur leur chemin



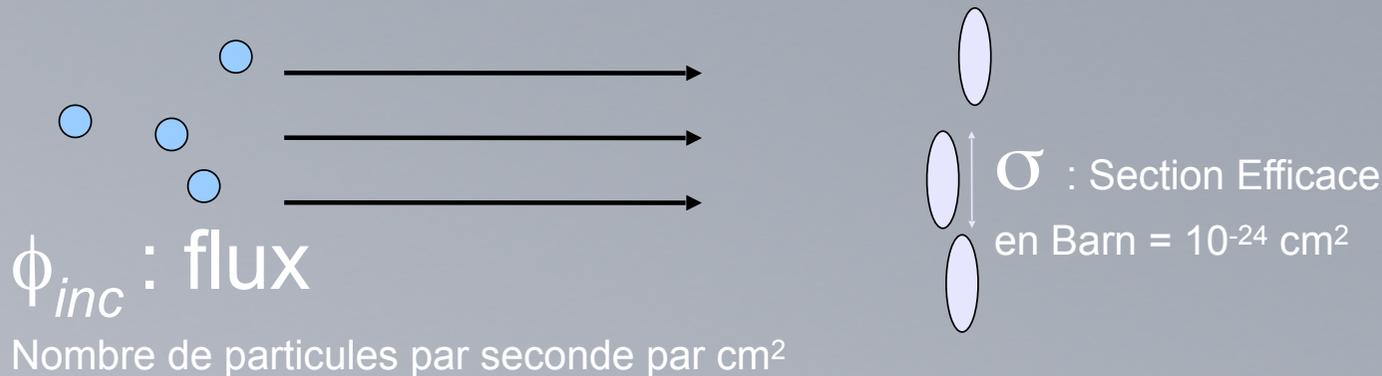
ϕ_{inc} : flux

Nombre de particules incidentes par seconde par cm^2



La section efficace est la surface fictive présentée par une cible élémentaire au faisceau de projectiles incidents

1. Probabilité d'interaction & Sections efficaces



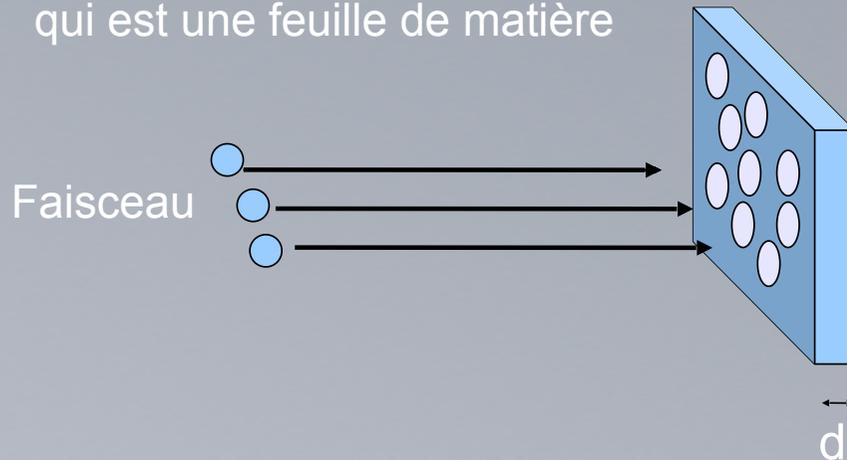
Le nombre N_{int} d'interactions par seconde du faisceau avec une cible élémentaire est donc :

$$N_{int} = \phi_{inc} \times \sigma_{int}$$

Section efficace équivalente à une probabilité d'interaction

1. Probabilité d'interaction & Sections efficaces

A l'échelle macroscopique, le faisceau est envoyé sur une cible qui est une feuille de matière



La cible : Container de surface S contenant des cibles élémentaires

La densité volumique de cibles élémentaires N^c dans le container est donc

$$N^c = \frac{N}{S \times d}$$

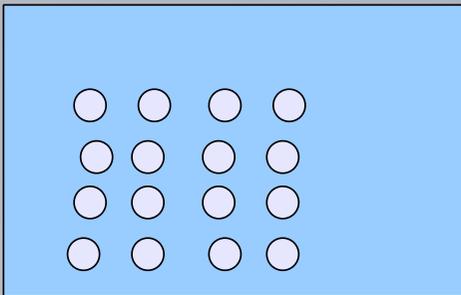
Avec N nombre de cibles élémentaires dans le container

1. Probabilité d'interaction & Sections efficaces

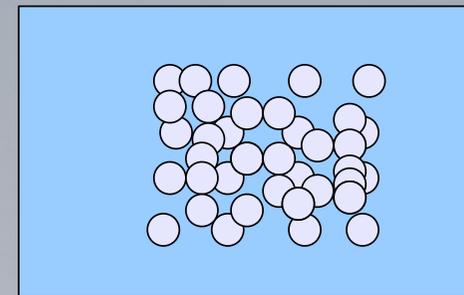
Profs au **GANIL**

On peut la calculer aussi à partir de la masse volumique ρ (en g/cm³)

$$N^c = \frac{\rho}{A \times luma} = \frac{\rho N_A}{A}$$



Cible Mince



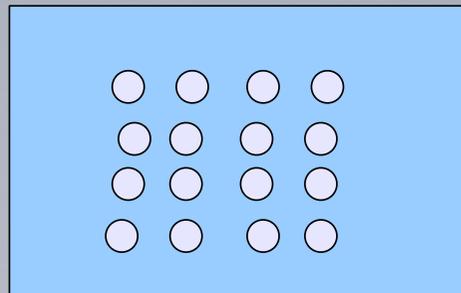
Cible Epaisse

1. Probabilité d'interaction & Sections efficaces

Cas d'une cible mince :

P_i : Probabilité d'interaction par atome incident dans la cible mince macroscopique

$$P_i = \frac{\text{Surface d'interaction}}{\text{Surface Totale}} = \frac{N \times \sigma}{S} = \frac{N \times \sigma \times d}{S \times d} = N^c \times \sigma \times d$$



1. Probabilité d'interaction & Sections efficaces

S'il y a N_0 projectiles qui arrive uniformément sur la cible par seconde alors N_I (Nombre d'interactions dans la cible mince macroscopique par seconde) est telle que :

$$N_I = N_0 \times P_I = N_0 \times N^C \times \sigma \times d$$

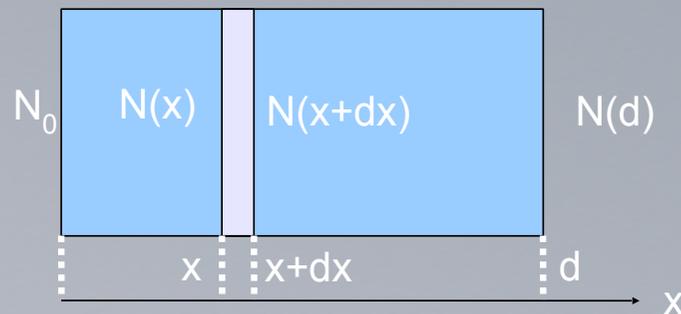
On en déduit que φ le nombre d'interactions /unité de surface/unité de temps est telle que

$$\varphi = \frac{N_I}{S} = \frac{N_0 \times P_I}{S} = \Phi_0 \times P_I = \Phi_0 \times N^C \times \sigma \times d$$

Avec Φ_0 flux de projectiles incidents

1. Probabilité d'interaction & Sections efficaces

Cas d'une cible épaisse : Empilement de cibles minces d'épaisseur dx



On a pour l'épaisseur comprise entre x et $x+dx$, un nombre d'interactions par seconde dN_I telle que :

$$\begin{aligned} dN_I &= N(x) \times dP_I = N(x) \times N^C \times \sigma \times dx \\ &= -(N(x+dx) - N(x)) = -dN(x) \end{aligned}$$

1. Probabilité d'interaction & Sections efficaces

On en déduit par intégration l'évolution du faisceau après avoir traversé l'épaisseur x :

$$N(x) = N_0 e^{-N^C \times \sigma \times x}$$

Donc pour l'épaisseur d :

$$N(d) = N_0 e^{-N^C \times \sigma \times d}$$

Il est alors aisé de calculer le nombre d'interactions par seconde dans cette cible d'épaisseur d :

$$N_I = N_0 - N(d) = N_0 (1 - e^{-N^C \times \sigma \times d})$$

1. Probabilité d'interaction & Sections efficaces

On retrouve le cas de la cible mince si $N\sigma d \ll 1$ donc si $d \ll 1/N\sigma = \lambda$
 Cette dernière grandeur est **la libre parcours moyen** : c'est à dire
la distance moyenne parcourue par un projectile sans interaction dans la cible

Si $d \ll \lambda$: Cible mince

Si $d > \lambda$: Cible épaisse

La probabilité que le projectile n'ai pas interagi après avoir traversé une épaisseur x de matière est

$$P_{NI}(x) = \frac{N(x)}{N_0} = e^{-N^c \sigma x}$$

1. Probabilité d'interaction & Sections efficaces

La probabilité que le projectile interagisse dans une épaisseur x de matière est

$$P_I(x) = \frac{N_I(x)}{N_0} = 1 - e^{-N^C \times \sigma \times x}$$

Expérimentalement, **pour mesurer la section efficace**, il suffit de prendre une cible mince d'épaisseur x et étudier l'atténuation du faisceau, en effet on sait que

$$N_I = N_0 - N(x) = N_0 \times N^C \times \sigma \times x \Rightarrow \sigma = \frac{N_0 - N(x)}{N_0} \times \frac{1}{N^C x}$$

D'où

$$\sigma = \frac{\Delta I}{I_0} \times \frac{1}{N^C x}$$

I_0 est l'intensité initiale de faisceau proportionnelle à N_0 et ΔI la variation d'intensité du faisceau après avoir traversé l'épaisseur x proportionnelle à $(N_0 - N(x))$

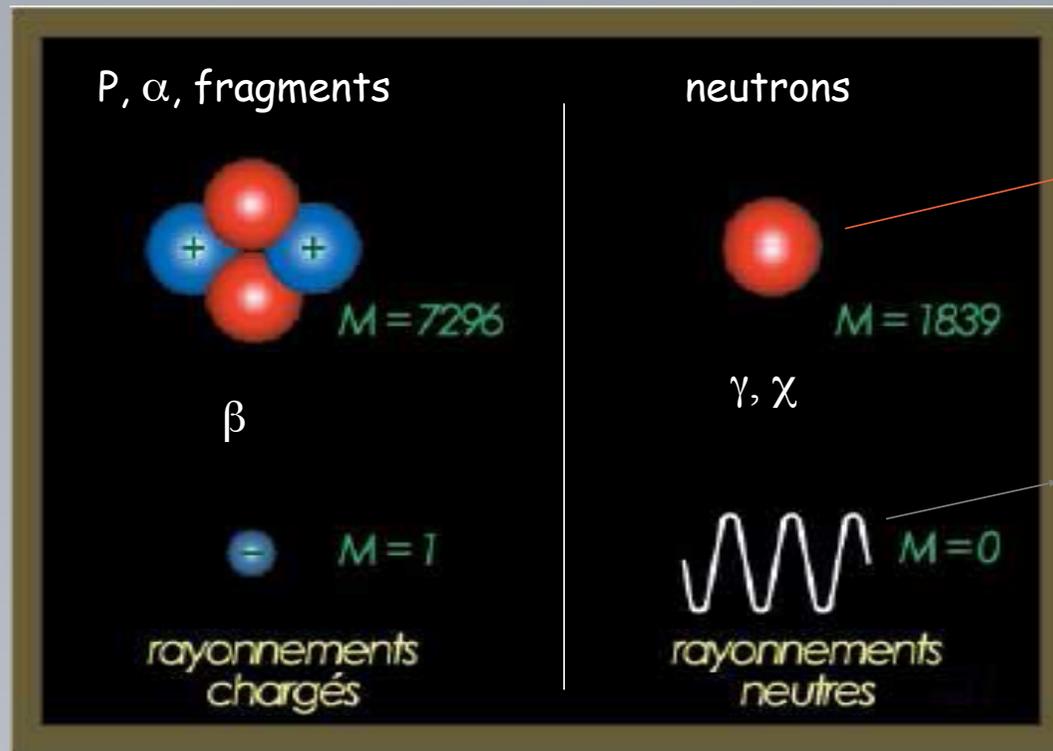
2. Rappels rapides sur l'interaction rayonnement-matière

Principaux rayonnements observables au GANIL

2. Rappels rapides sur l'interaction rayonnement-matière

Profs au GANIL

Principaux rayonnements observables au GANIL



2. Rappels rapides sur l'interaction rayonnement-matière

2. Rappels rapides sur l'interaction rayonnement-matière

Particules chargées

Interaction coulombienne
continue avec la matière
(mais pas seulement !)
Grande probabilité d'interaction

Ions (particules
«lourdes»)

Électrons

2. Rappels rapides sur l'interaction rayonnement-matière

Particules chargées

Interaction coulombienne continue avec la matière (mais pas seulement !)
Grande probabilité d'interaction

Ions (particules «lourdes»)

Électrons

Particules neutres

Interactions « catastrophiques »
Modification radicale ou disparition
Probabilité d'interaction plus faible

Neutrons

Photons

2. Rappels rapides sur l'interaction rayonnement-matière

Particules chargées

Interaction coulombienne continue avec la matière (mais pas seulement !)
Grande probabilité d'interaction

Mise en mouvement

Ions (particules « lourdes »)

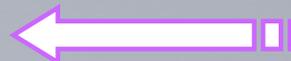
Électrons

Particules neutres

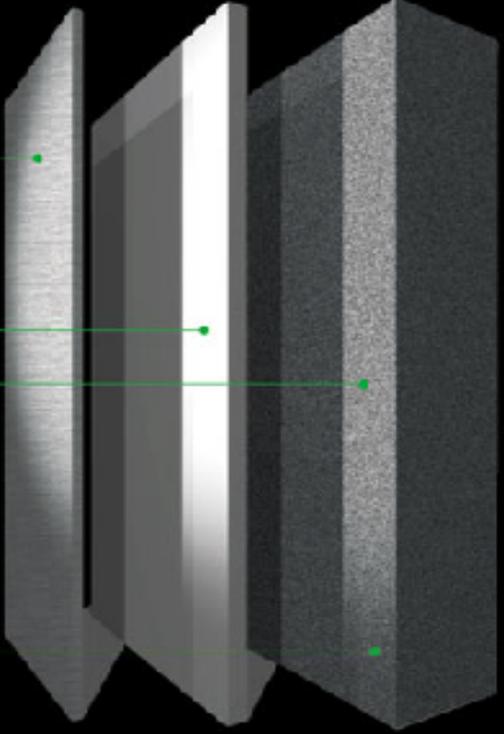
Interactions « catastrophiques »
Modification radicale ou disparition
Probabilité d'interaction plus faible

Neutrons

Photons



2. Rappels rapides sur l'interaction rayonnement-matière

<p>α</p> 	<p>Très faible pouvoir de pénétration dans l'air. Une simple feuille de papier est suffisante pour arrêter les noyaux d'hélium.</p>	
<p>β</p> 	<p>Faible pouvoir de pénétration. Parcourt quelques mètres dans l'air. Une feuille d'aluminium de quelques millimètres peut arrêter les électrons.</p>	
<p>γ</p> 	<p>Grand pouvoir de pénétration, fonction de l'énergie du rayonnement: plusieurs centaines de mètres dans l'air. Une forte épaisseur de béton ou de plomb permet de s'en protéger.</p>	
<p>Neutrons</p> 	<p>Pénétration dépendante de leur énergie. Une forte épaisseur de béton, d'eau ou de paraffine arrête les neutrons.</p>	

3. Interactions des rayonnements chargés

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

Interaction Coulombienne avec les électrons du milieu

Ions, particules lourdes

Interaction avec les
noyaux du milieu

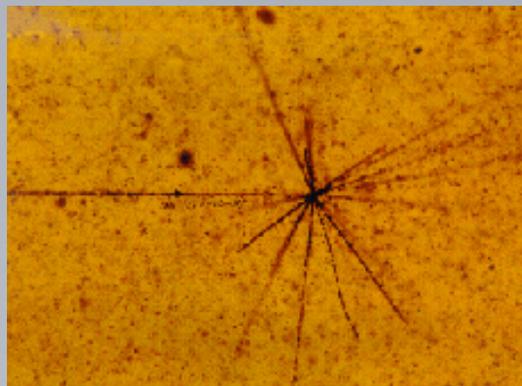
3. Interactions des rayonnements chargés

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

Interaction Coulombienne avec les électrons du milieu

Ions, particules lourdes

Interaction avec les
noyaux du milieu



3. Interactions des rayonnements chargés

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

3. Interactions des rayonnements chargées

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

On verra que **le passage d'une particule chargée dans la matière a deux effets principaux qui sont la perte d'énergie par la particule et une déflexion éventuelle de sa trajectoire.**

3. Interactions des rayonnements chargées

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

On verra que **le passage d'une particule chargée dans la matière a deux effets principaux qui sont la perte d'énergie par la particule et une déflexion éventuelle de sa trajectoire.**

Les processus qui gouvernent le freinage des particules dans la matière sont complexes.

3. Interactions des rayonnements chargés

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

On verra que **le passage d'une particule chargée dans la matière a deux effets principaux qui sont la perte d'énergie par la particule et une déflexion éventuelle de sa trajectoire.**

Les processus qui gouvernent le freinage des particules dans la matière sont complexes.

Ils peuvent être simplifiés en considérant quatre processus de base en jeu :

3. Interactions des rayonnements chargés

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

On verra que le passage d'une particule chargée dans la matière a deux effets principaux qui sont la perte d'énergie par la particule et une déflexion éventuelle de sa trajectoire.

Les processus qui gouvernent le freinage des particules dans la matière sont complexes.

Ils peuvent être simplifiés en considérant quatre processus de base en jeu :

- ◆ Collisions élastiques avec les électrons atomiques de la matière ($E_c < 100\text{eV}$).

3. Interactions des rayonnements chargés

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

On verra que **le passage d'une particule chargée dans la matière a deux effets principaux qui sont la perte d'énergie par la particule et une déflexion éventuelle de sa trajectoire.**

Les processus qui gouvernent le freinage des particules dans la matière sont complexes.

Ils peuvent être simplifiés en considérant quatre processus de base en jeu :

- ◆ Collisions élastiques avec les électrons atomiques de la matière ($E_c < 100\text{eV}$).
- ◆ Collisions inélastiques avec les électrons atomiques de la matière.

3. Interactions des rayonnements chargés

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

On verra que **le passage d'une particule chargée dans la matière a deux effets principaux qui sont la perte d'énergie par la particule et une déflexion éventuelle de sa trajectoire.**

Les processus qui gouvernent le freinage des particules dans la matière sont complexes.

Ils peuvent être simplifiés en considérant quatre processus de base en jeu :

- ◆ Collisions élastiques avec les électrons atomiques de la matière ($E_c < 100\text{eV}$).
- ◆ Collisions inélastiques avec les électrons atomiques de la matière.
- ◆ Collisions élastiques avec les noyaux de la matière.

3. Interactions des rayonnements chargées

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

On verra que **le passage d'une particule chargée dans la matière a deux effets principaux qui sont la perte d'énergie par la particule et une déflexion éventuelle de sa trajectoire.**

Les processus qui gouvernent le freinage des particules dans la matière sont complexes.

Ils peuvent être simplifiés en considérant quatre processus de base en jeu :

- ◆ Collisions élastiques avec les électrons atomiques de la matière ($E_c < 100\text{eV}$).
- ◆ Collisions inélastiques avec les électrons atomiques de la matière.
- ◆ Collisions élastiques avec les noyaux de la matière.
- ◆ Collisions inélastiques avec les noyaux de la matière.

3. Interactions des rayonnements chargées

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

On verra que **le passage d'une particule chargée dans la matière a deux effets principaux qui sont la perte d'énergie par la particule et une déflexion éventuelle de sa trajectoire.**

Les processus qui gouvernent le freinage des particules dans la matière sont complexes.

Ils peuvent être simplifiés en considérant quatre processus de base en jeu :

- ◆ Collisions élastiques avec les électrons atomiques de la matière ($E_c < 100\text{eV}$).
- ◆ Collisions inélastiques avec les électrons atomiques de la matière.
- ◆ Collisions élastiques avec les noyaux de la matière.
- ◆ Collisions inélastiques avec les noyaux de la matière.

Le **processus de collisions inélastiques avec les électrons atomiques est le processus dominant** comme une comparaison de sections efficaces géométriques approchées peut le montrer :

3. Interactions des rayonnements chargées

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

On verra que **le passage d'une particule chargée dans la matière a deux effets principaux qui sont la perte d'énergie par la particule et une déflexion éventuelle de sa trajectoire.**

Les processus qui gouvernent le freinage des particules dans la matière sont complexes.

Ils peuvent être simplifiés en considérant quatre processus de base en jeu :

- ◆ Collisions élastiques avec les électrons atomiques de la matière ($E_c < 100\text{eV}$).
- ◆ Collisions inélastiques avec les électrons atomiques de la matière.
- ◆ Collisions élastiques avec les noyaux de la matière.
- ◆ Collisions inélastiques avec les noyaux de la matière.

Le **processus de collisions inélastiques avec les électrons atomiques est le processus dominant** comme une comparaison de sections efficaces géométriques approchées peut le montrer :

$$\frac{\text{Surface}_{\text{Atome}}}{\text{Surface}_{\text{Noyau}}} = \frac{\pi R_{\text{Atome}}^2}{\pi R_{\text{Noyau}}^2} \approx \frac{\pi (10^{-10})^2}{\pi (10^{-14})^2} \approx 10^8$$

3. Interactions des rayonnements chargés

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

Interaction avec les électrons du milieu

Excitation et ionisation des atomes du milieu traversé

pour les ions, particules lourdes

Perte d'énergie par collision faible

mais il y a un nombre très élevé de collisions

Trajectoire :

majoritairement
quasi-rectiligne

3. Interactions des rayonnements chargées

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

Interaction avec les électrons du milieu

Excitation et ionisation des atomes du milieu traversé

pour les ions, particules lourdes

Perte d'énergie par collision faible

mais il y a un nombre très élevé de collisions

L'énergie totale est donc rapidement perdue

Trajectoire :

majoritairement
quasi-rectiligne

3. Interactions des rayonnements chargés

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

Interaction avec les électrons du milieu

Excitation et ionisation des atomes du milieu traversé

pour les ions, particules lourdes

Perte d'énergie par collision faible

mais il y a un nombre très élevé de collisions

L'énergie totale est donc rapidement perdue

Un proton de 10 MeV perd toute son énergie dans 250 μm de cuivre

Un alpha de 10 MeV perd toute son énergie dans 27 μm de cuivre

Trajectoire :



majoritairement
quasi-rectiligne

3. Interactions des rayonnements chargés

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

3. Interactions des rayonnements chargées

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

Le nombre d'interactions est régi par la statistique, mais il est très grand :

⇒ les fluctuations relatives sont très petites

◆ En pratique, on observe une diminution « continue » de l'énergie jusqu'à l'énergie thermique des atomes du milieu

3. Interactions des rayonnements chargées

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

Le nombre d'interactions est régi par la statistique, mais il est très grand :

⇒ les fluctuations relatives sont très petites

◆ En pratique, on observe une diminution « continue » de l'énergie jusqu'à l'énergie thermique des atomes du milieu

On définit la notion de **pouvoir d'arrêt linéaire**,
c'est à dire la **perte d'énergie moyenne**
par unité de longueur sur le parcours de la particule :

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$$

3. Interactions des rayonnements chargées

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

Formule de Bethe-Bloch, particules lourdes

Après un calcul relativiste ...

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e c^2 \beta^2} N Z \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 \right] \times \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2$$

Pouvoir d'arrêt linéique

Signe - : diminution de l'énergie

z et β : nombre de charge et vitesse du projectile

m_e : masse de l'électron

Z : numéro atomique du matériau

N : nombre d'atomes du matériau par unité de volume

I : potentiel moyen d'ionisation et d'excitation

$\beta = v/c$, $\gamma^2 = 1 / (1 - \beta^2)$ pour le projectile

3. Interactions des rayonnements chargées

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

Influence de l'énergie E du projectile

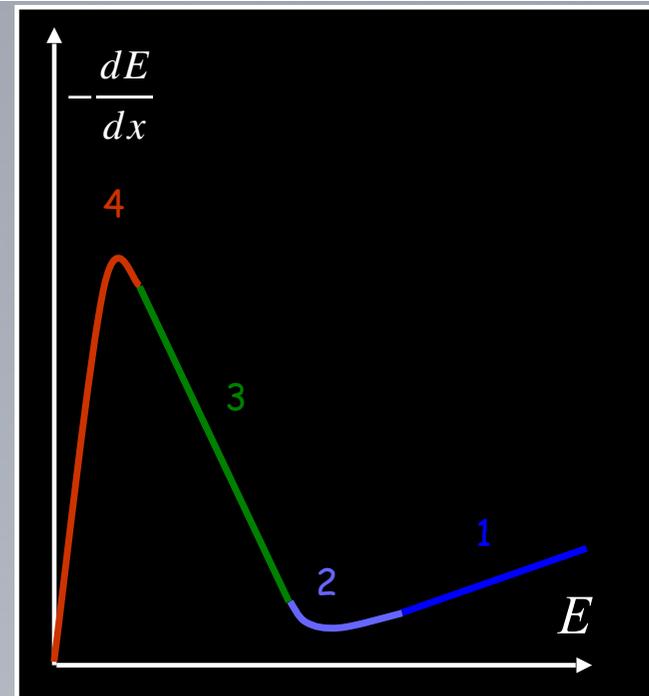
1) Aux énergies relativistes, le Bremsstrahlung.... est dominant : fonction ↗ de E

2) $\beta\gamma \sim 3$: Minimum d'ionisation (même dE/dx pour tout type de particule)

3) À basse vitesse, $-dE/dx \sim 1/v^2$

4) À très basse vitesse ($v \sim 0$) : « rhabillage de l'ion incident » la formule de Bethe n'est plus valable.

$$\frac{1}{\rho_m} \frac{dE}{dx} = K \frac{Z z^2}{A \beta^2} \left[\ln \left(\frac{2 m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right) - \beta^2 \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} - \frac{C_K}{Z} \right]$$



3. Interactions des rayonnements chargés

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

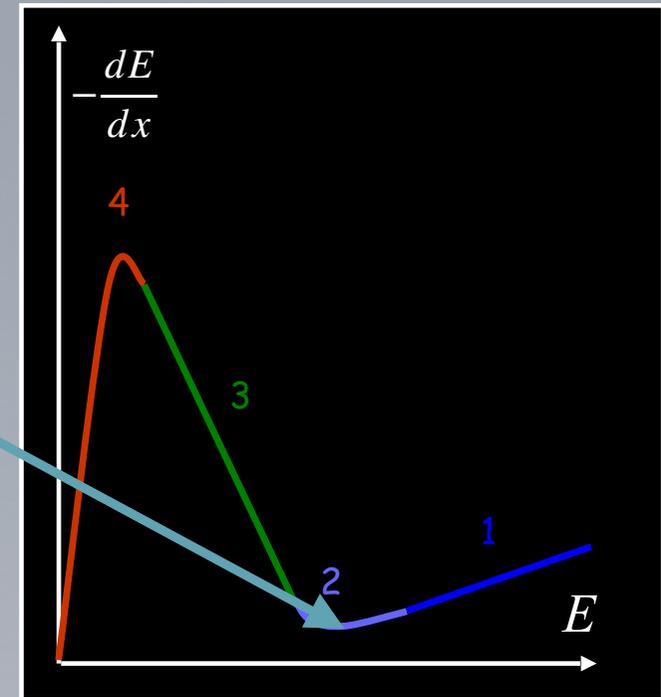
Minimum d'ionisation

$$\beta\gamma \sim 3$$

Électrons
Protons
Alphas



1 MeV
1900 MeV
7500 MeV



3. Interactions des rayonnements chargées

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

Influence du milieu ralentisseur

$$-\frac{dE}{dx} = K' \frac{\rho Z}{A} F(\text{projectile})$$

ERRATUM !

Avec :

$$N = \frac{\rho N_A}{A}$$

ρ : densité du milieu en g/cm³
 N_A : nombre d'Avogadro

Dépendance linéaire avec :

- la densité du matériau ρ
- le numéro atomique Z du matériau

Plus la densité électronique est grande plus la particule chargée perd rapidement son énergie cinétique

3. Interactions des rayonnements chargées

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

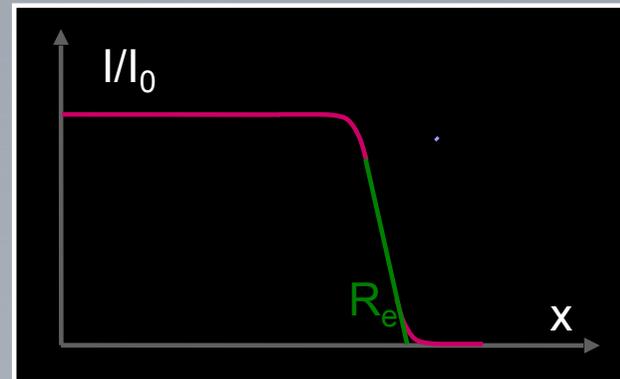
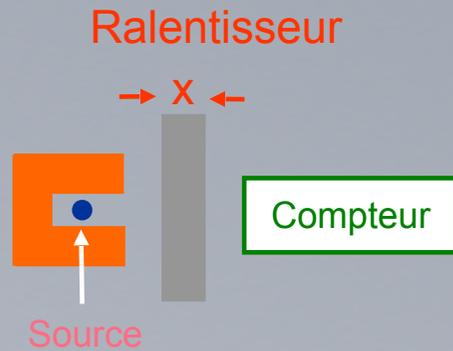
Influence de la nature du projectile

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e c^2 \beta^2} NZ F'(E)$$

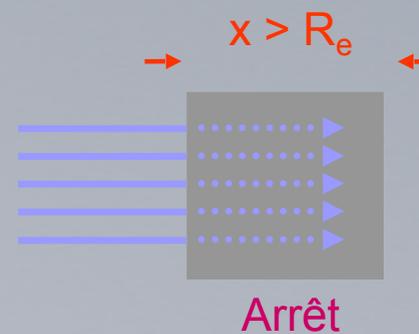
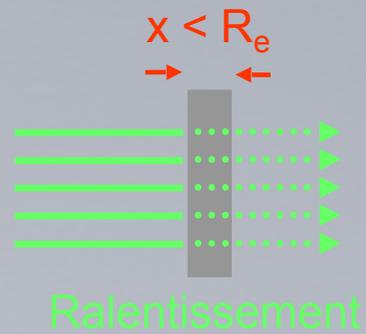
Pas de dépendance en masse de l'ion incident

Augmentation en z^2 : des alphas perdent leur énergie sur une plus courte distance que des protons de même énergie

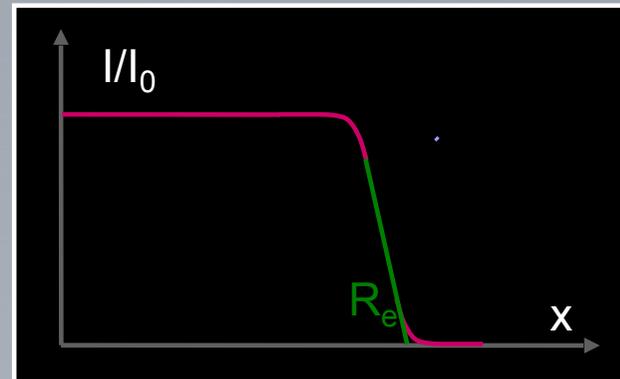
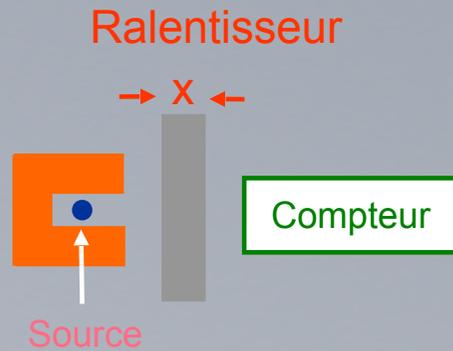
Notion de parcours



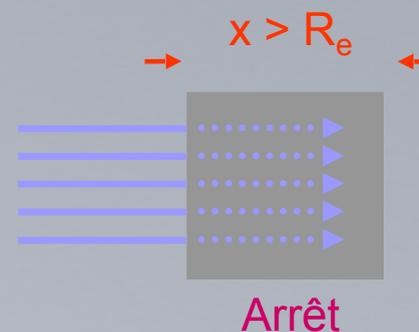
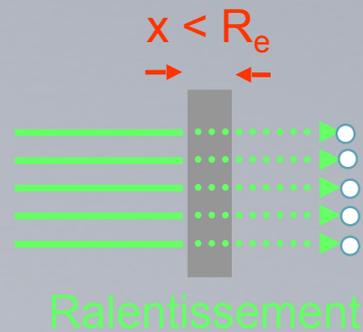
Valable pour un projectile donné, de vitesse donnée, dans un matériau donné



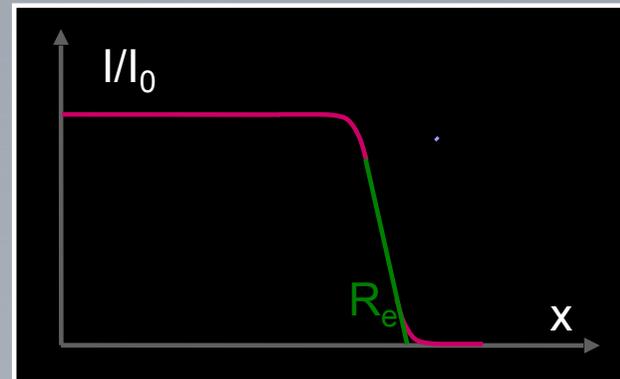
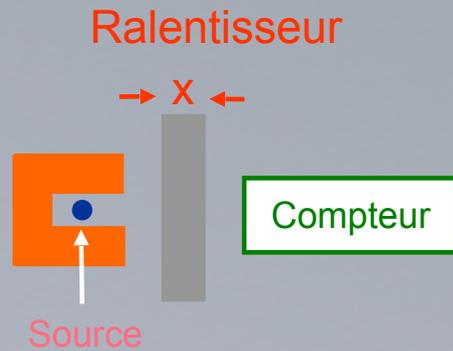
Notion de parcours



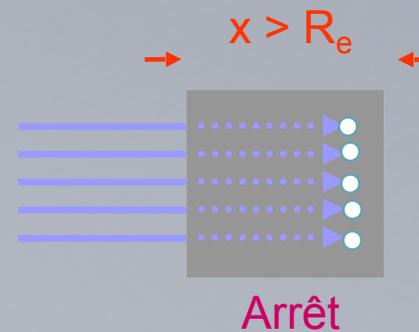
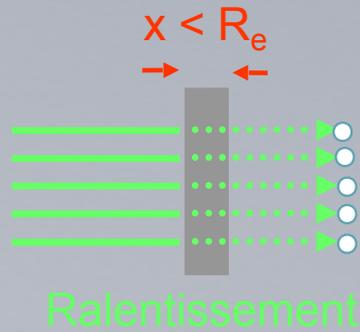
Valable pour un projectile donné, de vitesse donnée, dans un matériau donné



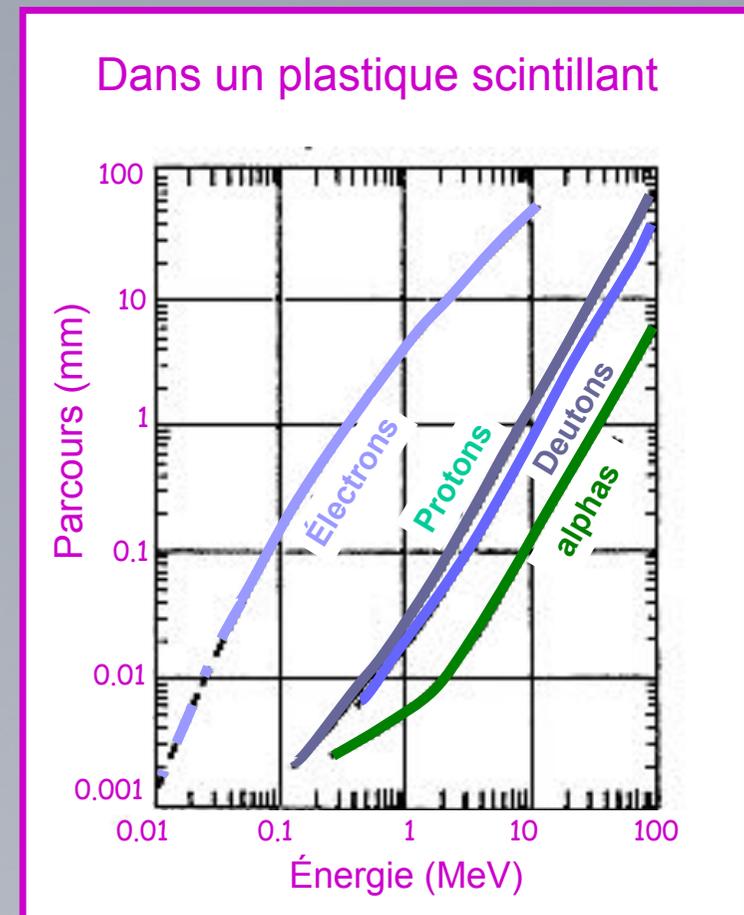
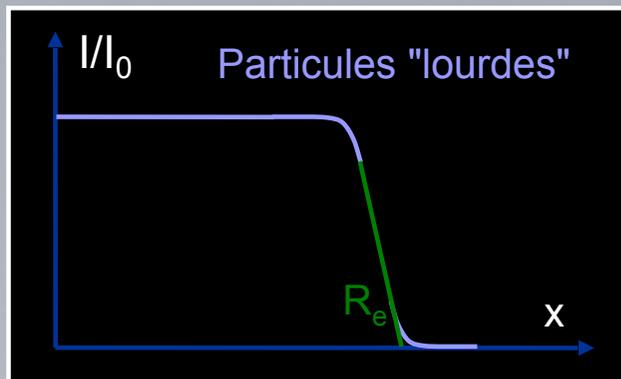
Notion de parcours



Valable pour un projectile donné, de vitesse donnée, dans un matériau donné



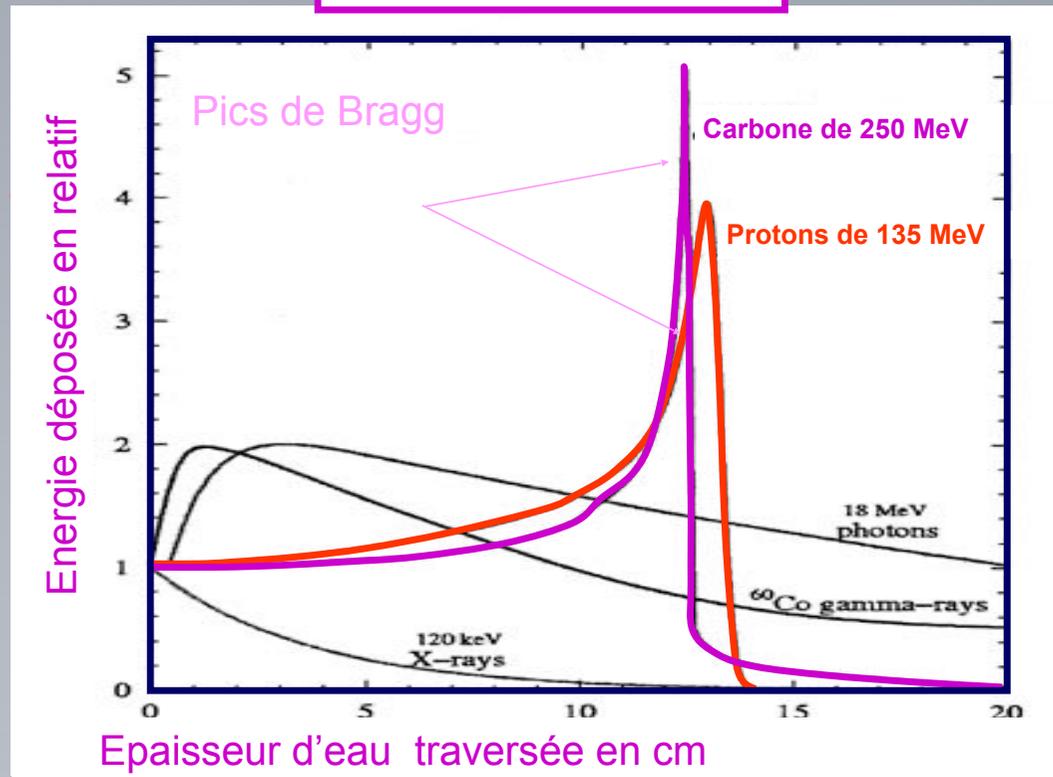
Particules chargées « lourdes »



3. Interactions des rayonnements chargées

a. Modes d'interaction des particules chargées « lourdes »

Courbe de Bragg



3. Interactions des rayonnements chargés

b. Modes d'interaction des électrons et des positrons

Collision

Interaction Coulombienne avec les électrons du milieu

Interaction avec les noyaux du milieu (Probabilité très faible et perte d'énergie négligeable)

Freinage

Bremsstrahlung
(rayonnement de freinage)

Particularité des positrons en fin de course

Annihilation des e^+

3. Interactions des rayonnements chargés

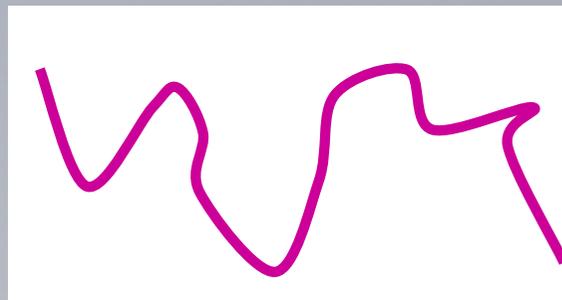
b. Modes d'interaction des électrons et des positrons

Interaction avec les électrons du milieu

Excitation et ionisation des atomes du milieu

Perte d'énergie par collision
pouvant être importante

Trajectoire :



Notion de longueur de trajectoire des Électrons

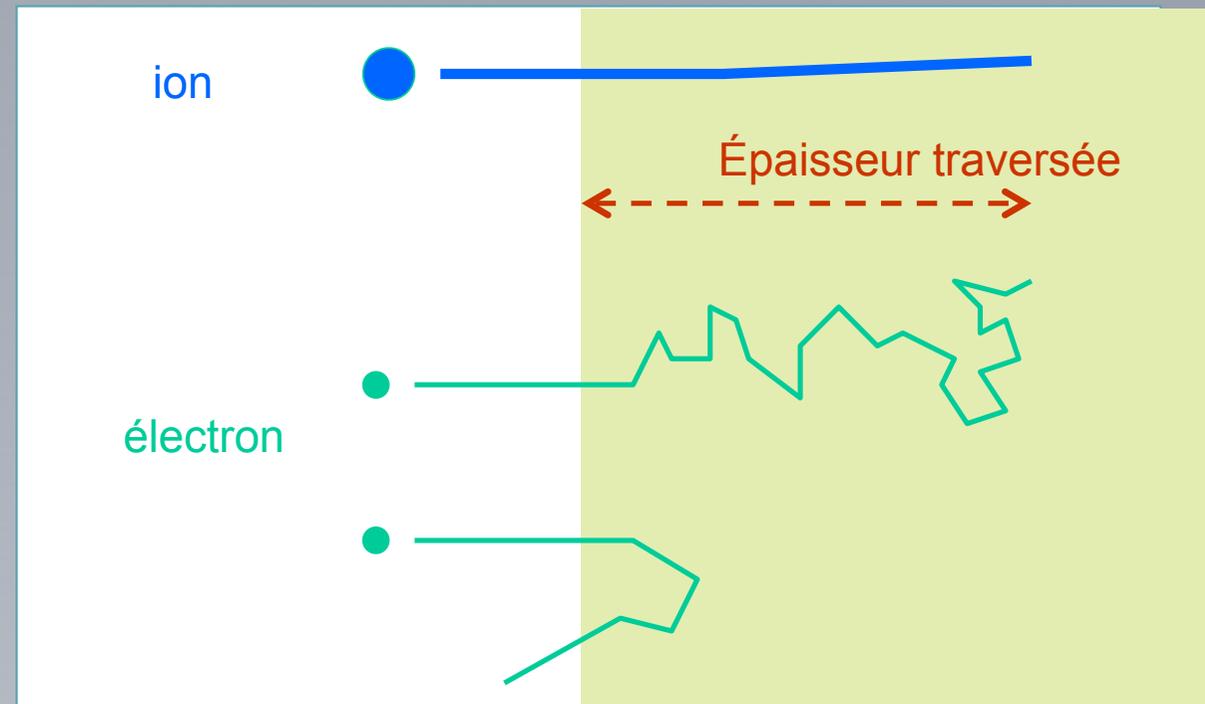
3. Interactions des rayonnements chargés

b. Modes d'interaction des électrons et des positrons

- Collisions sur les électrons du milieu (même masse)

→ grand transfert d'énergie possible

→ grand changement de direction (rétrodiffusion possible)



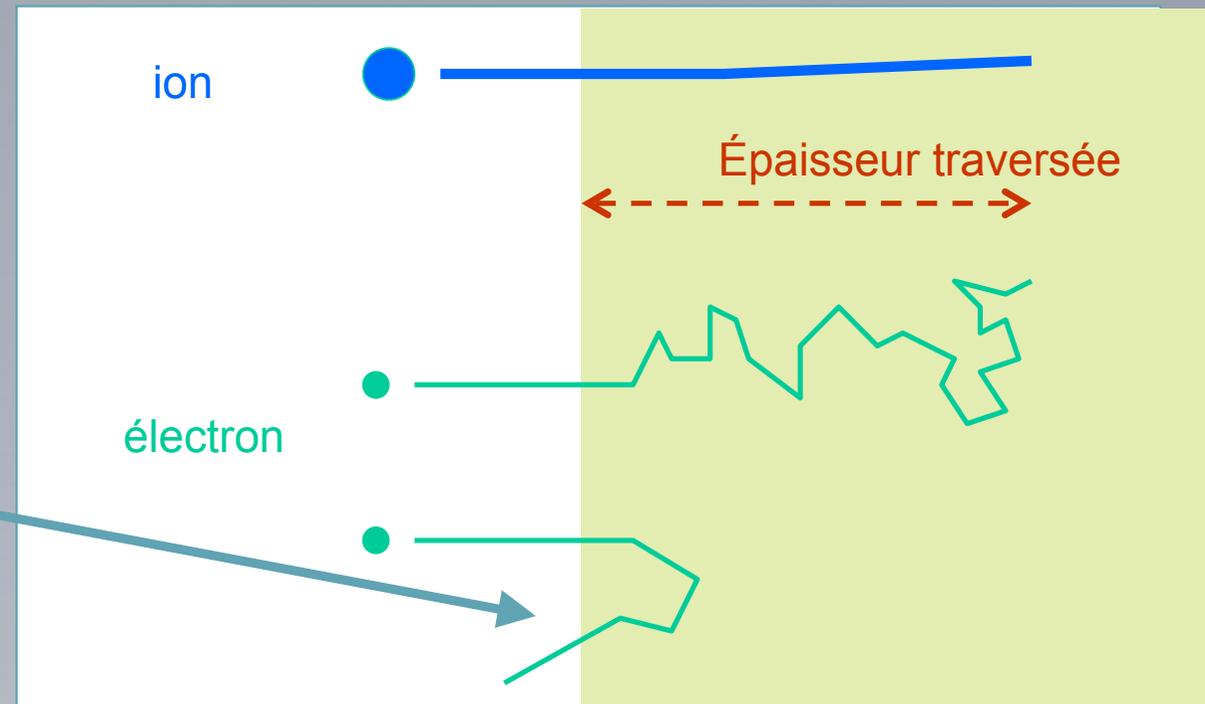
3. Interactions des rayonnements chargés

b. Modes d'interaction des électrons et des positrons

- Collisions sur les électrons du milieu (même masse)

→ grand transfert d'énergie possible

→ grand changement de direction (rétrodiffusion possible)



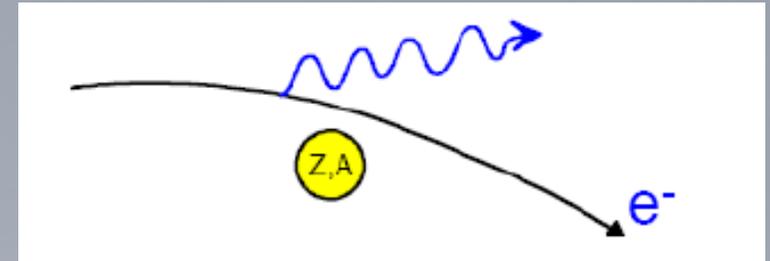
3. Interactions des rayonnements chargés

b. Modes d'interaction des électrons et des positrons

Un nouveau mécanisme dû à une grande décélération

Une particule chargée (légère) va rayonner un photon réel dans le champ coulombien d'un noyau qui le fait décélérer

→ Rayonnement de freinage: « **Bremsstrahlung** »

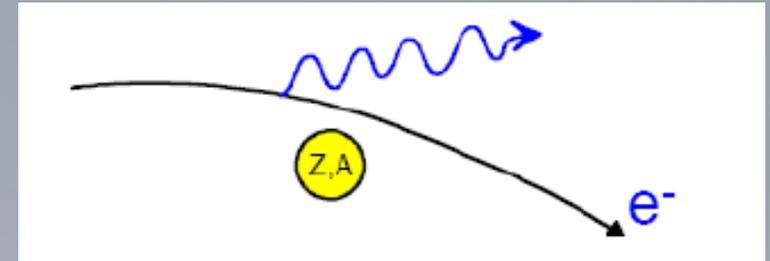


3. Interactions des rayonnements chargés

b. Modes d'interaction des électrons et des positrons

Un nouveau mécanisme dû à une grande décélération

Une particule chargée (légère) va rayonner un photon réel dans le champ coulombien d'un noyau qui le fait décélérer



→ Rayonnement de freinage: « Bremsstrahlung »

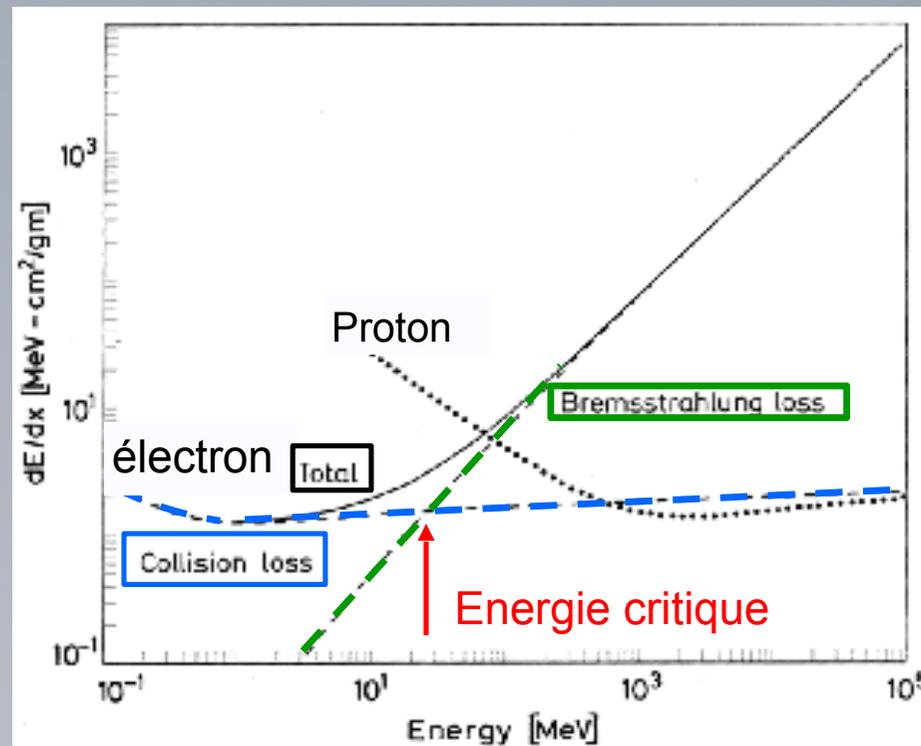
La perte d'énergie aura deux origines: ionisation et radiation

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{totale}} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ionisation}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{radiation}}$$

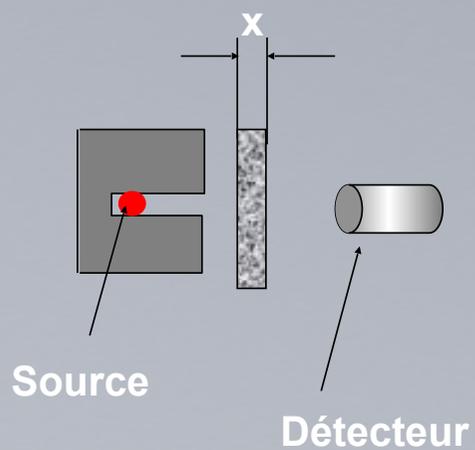
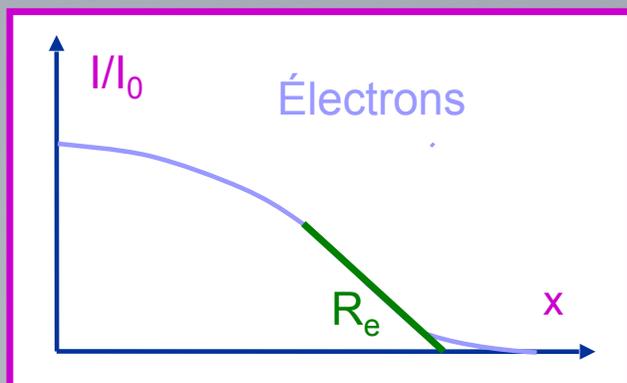
3. Interactions des rayonnements chargés

b. Modes d'interaction des électrons et des positrons

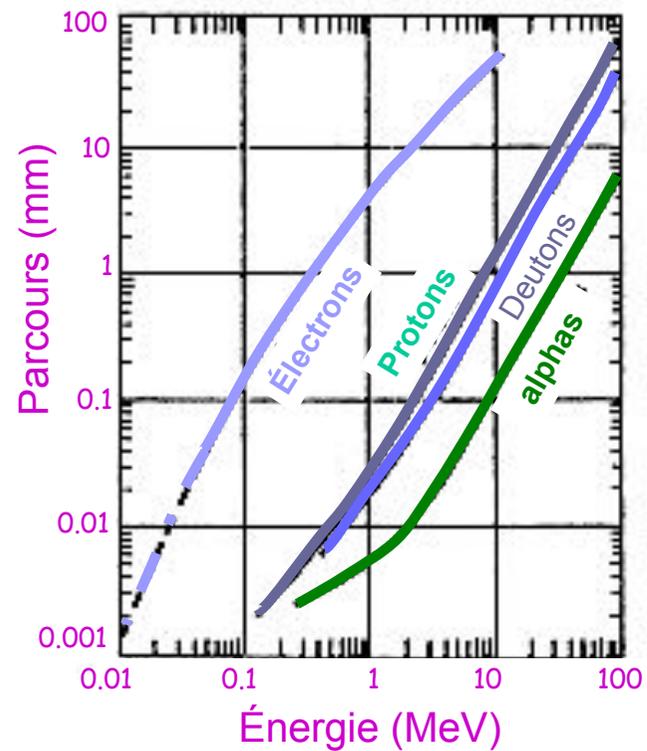
Perte d'énergie des électrons dans le cuivre ($Z_m = 29$)



Notion de parcours des Électrons



Dans un plastique scintillant



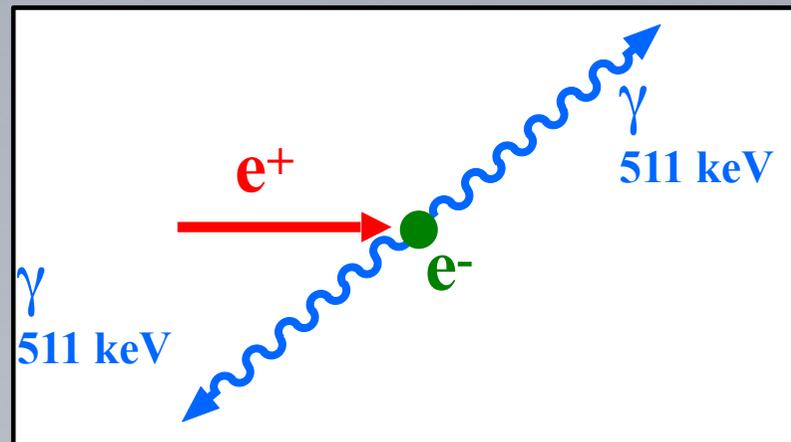
3. Interactions des rayonnements chargés

b. Modes d'interaction des électrons et des positrons

Annihilation des positrons

Ralentissement similaire à celui des électrons

En fin de parcours : annihilation avec les e^- du milieu



4. Interactions des rayonnements neutres

a. Interaction des photons avec la matière

Interaction des photons avec la matière

Interactions "catastrophiques" :

Modification radicale de la trajectoire
et de l'énergie

Ou Disparition complète

4. Interactions des rayonnements neutres

a. Interaction des photons avec la matière

Interaction des photons avec la matière

Interactions "catastrophiques" :



Modification radicale de la trajectoire
et de l'énergie

Ou Disparition complète

4. Interactions des rayonnements neutres

a. Interaction des photons avec la matière

Interaction des photons avec la matière

Interactions "catastrophiques" :

Modification radicale de la trajectoire
et de l'énergie

Ou Disparition complète

4. Interactions des rayonnements neutres

a. Interaction des photons avec la matière

Interaction des photons avec la matière

Interactions "catastrophiques" :

Modification radicale de la trajectoire
et de l'énergie

Ou Disparition complète

Probabilité non nulle de traverser toute épaisseur de
matière sans interagir ...

Pas de notion de parcours, de ralentissement ...

Libre parcours moyen, Atténuation, Efficacité de détection

4. Interactions des rayonnements neutres

a. Interaction des photons avec la matière

Interaction des photons avec la matière

3 modes importants pour la détection

Mise en mouvement de particules chargées : e^- et e^+

Effet photoélectrique

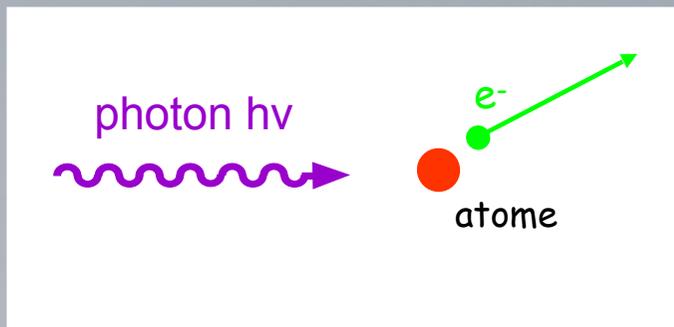
Effet Compton

Création de paire $e^+ - e^-$

4. Interactions des rayonnements neutres

a. Interaction des photons avec la matière

Effet photoélectrique



Absorption d'un photon par un atome
Émission d'un e^-
(le recul du noyau est négligé)

$$E_{e^-} = h\nu - E_\ell$$

Énergie du photon incident

Énergie de liaison de l' e^- dans l'atome
 \sim keV

Réarrangement de l'atome :

Émission d'un X ou d'un électron Auger

Effet photoélectrique

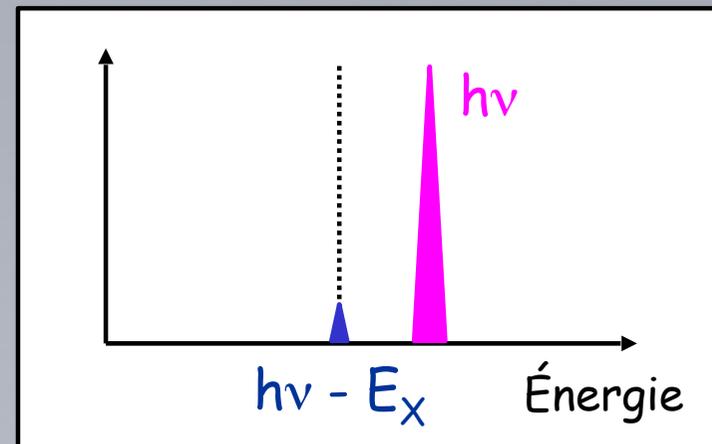
Probabilité d'interaction photoélectrique :

$$\sigma_{\text{ph}} \propto Z^5 (h\nu)^{-7/2}$$

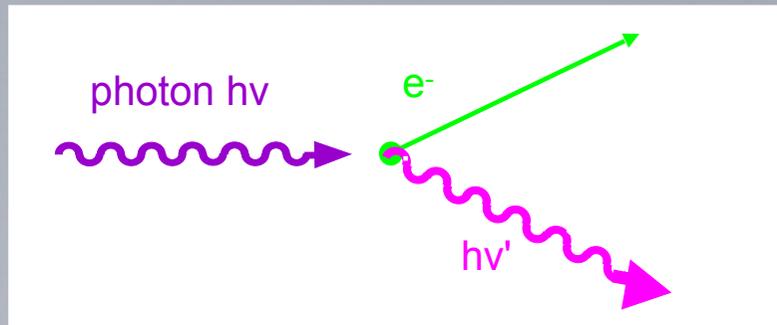
Détection / Protection :

Matériaux de Z élevé

Mesure de l'énergie des photons incidents



Effet Compton



Diffusion du photon sur un e^- quasi libre

Conservation de l'énergie et de l'impulsion :

$h\nu'$ et E_{e^-}

Probabilité d'interaction :

Augmente linéairement avec Z , focalisation vers l'avant pour $h\nu$ élevée (500 keV)

Effet Compton

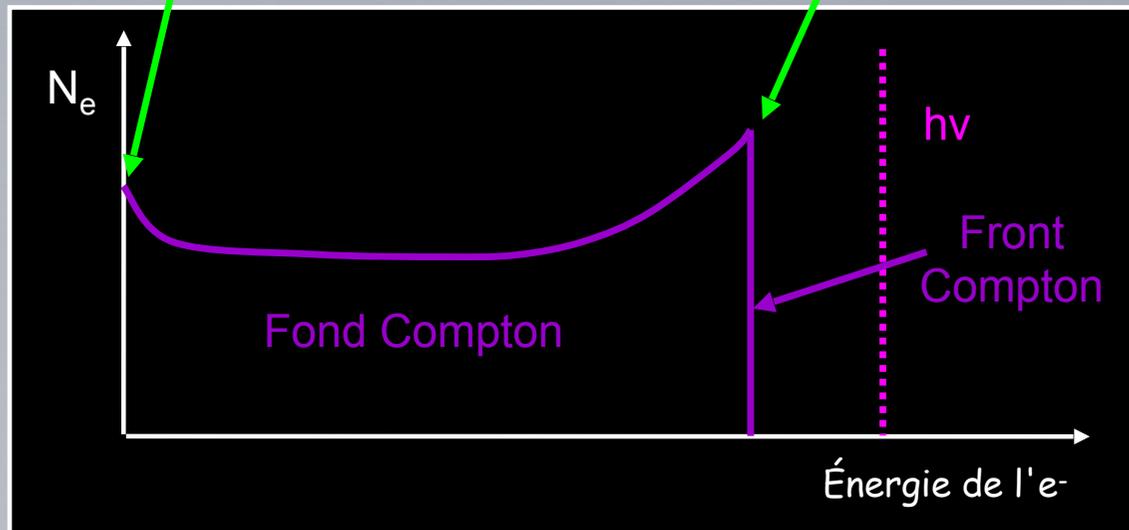
Deux cas extrêmes :

$$\theta = 0$$

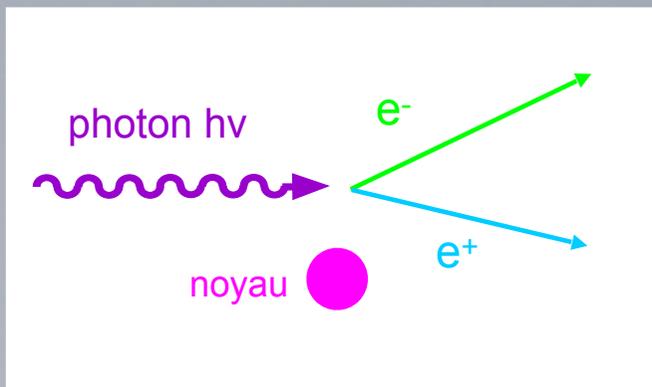
$$h\nu' \approx h\nu$$

$$\theta = \pi$$

$$E_{e^-} = h\nu \left(\frac{2 h\nu/m_e c^2}{1 + 2 h\nu/m_e c^2} \right)$$



Création de paire $e^+ - e^-$



Dans le champ coulombien d'un noyau

$$h\nu \geq 2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$$

$$E_{e^+} = E_{e^-} = \frac{1}{2} (h\nu - 1,022 \text{ MeV})$$

Probabilité de création de paire :

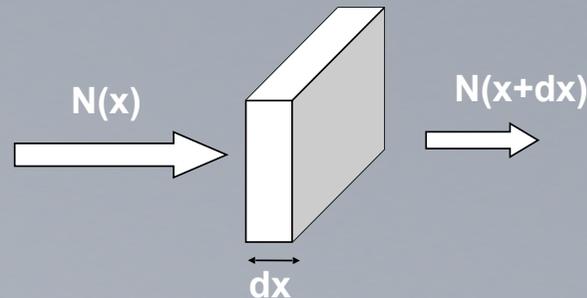
$$\propto Z^2$$

Augmente avec $h\nu$



Annihilation de l' e^+ en fin de parcours

Interaction des photons avec la matière



$$dN = N(x+dx) - N(x), \text{ on a } dN = -N_I = -N(x)N^C\sigma_{\text{totale}} dx = -\mu_L N(x) dx$$

μ_L dépend de l'énergie du photon et des caractéristiques du matériau.

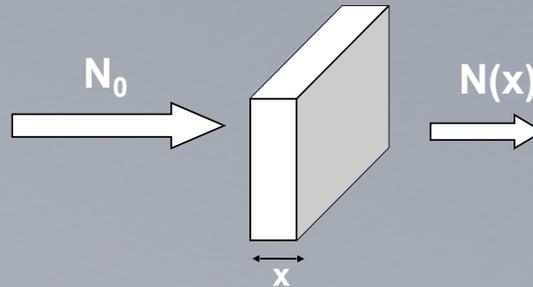
μ_L est le coefficient d'atténuation linéaire c.a.d la probabilité pour un photon d'interagir par unité de longueur de matériau traversé.

En fait

$$\mu_L = N^C \times \sigma_{\text{totale}} = N^C \times \sigma(h\nu) \times Z = \frac{\rho N_A Z}{A} \times \sigma(h\nu)$$

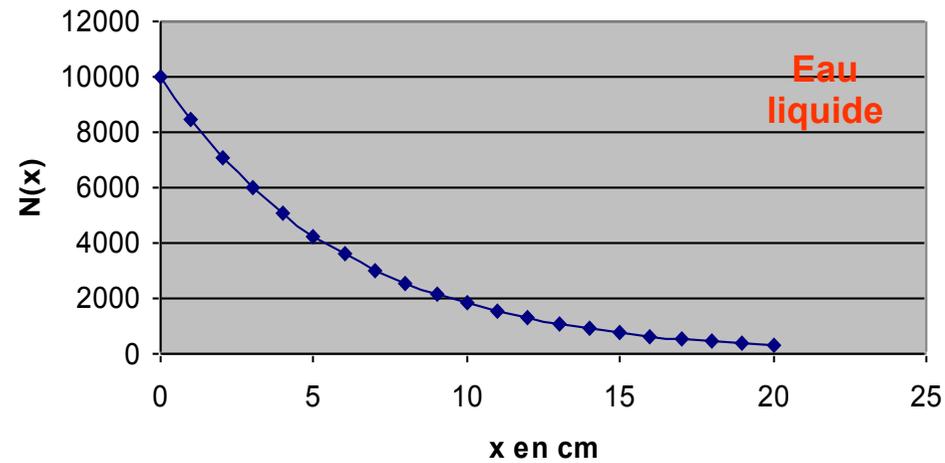
Interaction des photons avec la matière

Profs au GANIL



$$N(x) = N_0 \times e^{-\mu_L x}$$

Courbe $N(x)$ pour des gammas de 100 keV



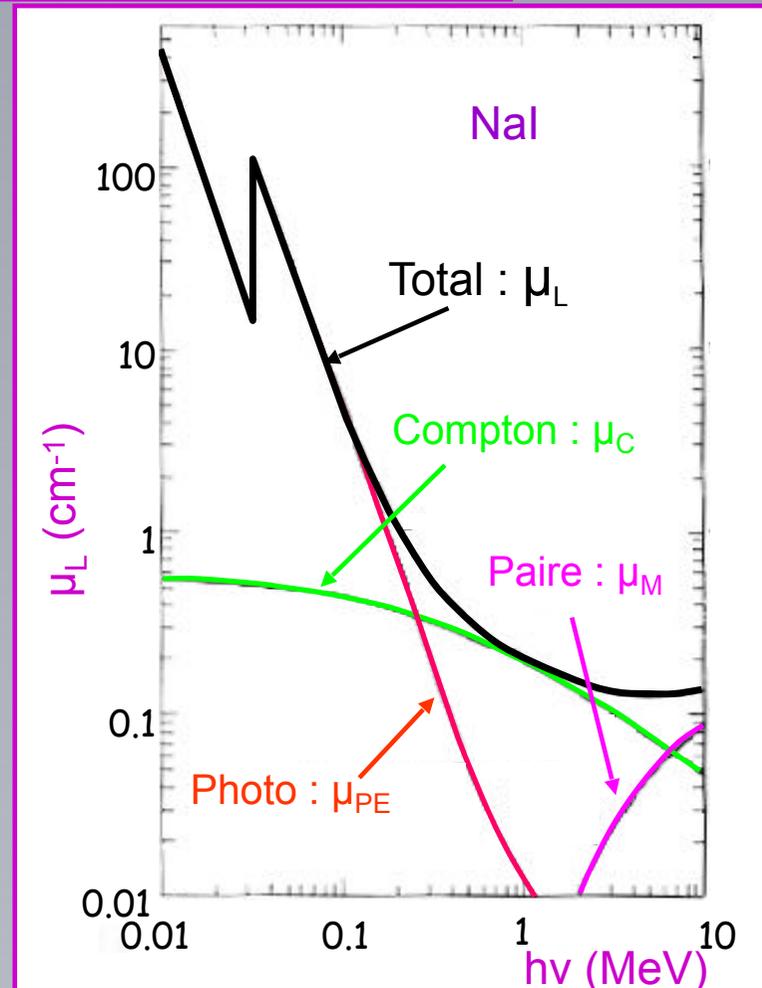
Interaction des photons avec la matière

Coefficient d'atténuation linéaire

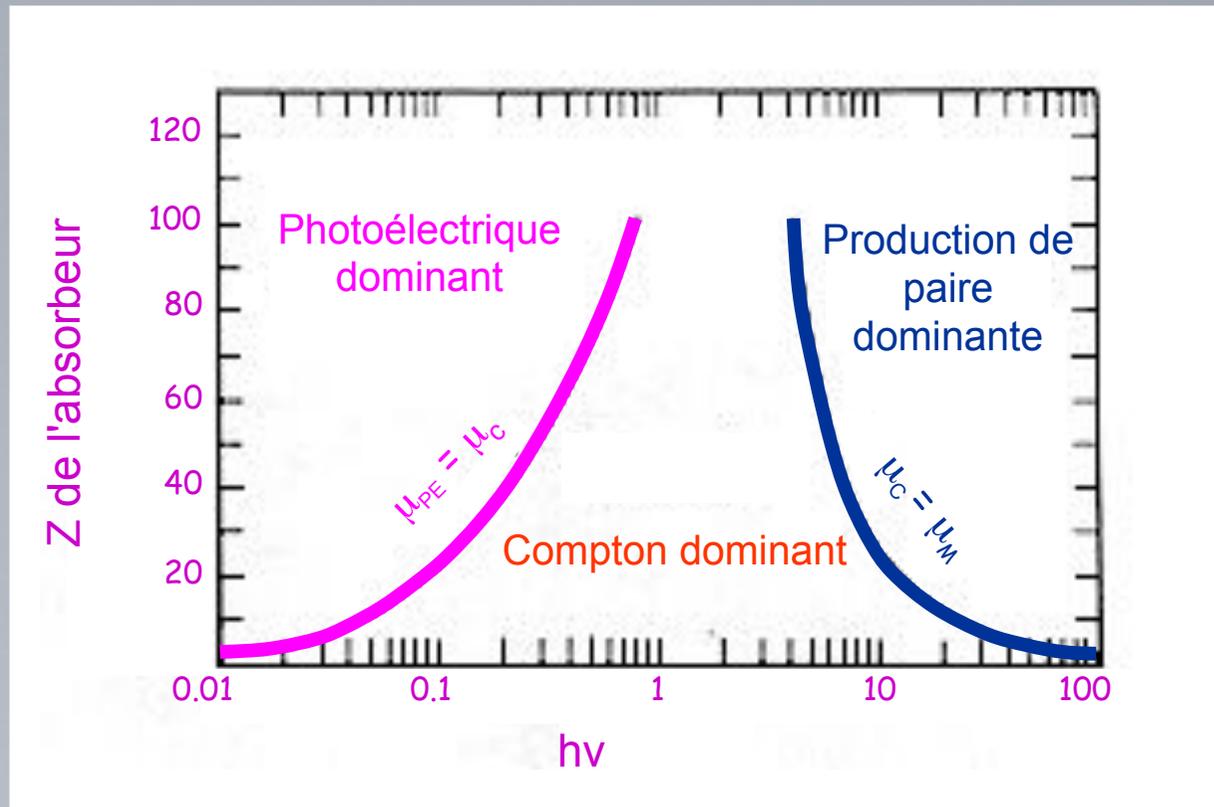
$$\mu_L \text{ (m}^{-1}\text{)} = \mu_{PE} + \mu_C + \mu_M$$

Coefficient d'atténuation massique

$$\mu_L / \rho \text{ (m}^2\text{/kg)} = \frac{\mu_L \text{ (m}^{-1}\text{)}}{\rho \text{ (kg / m}^3\text{)}}$$



Interaction des photons avec la matière



4. Interactions des rayonnements neutres

b. Interaction des neutrons avec la matière

Interaction des neutrons avec la matière

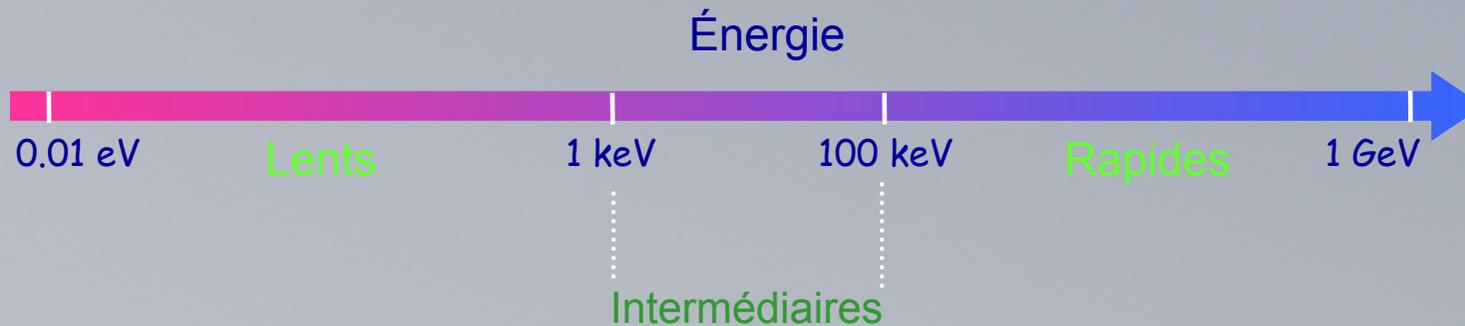
Pas d'interaction coulombienne
Réactions avec les noyaux du milieu

neutron + matériau convertisseur



particule chargée

photon



Interaction des neutrons lents avec la matière

- Diffusion élastique sur noyau
- Absorption du neutron avec une grande section efficace

Réactions	Bilan énergétique	Section efficace pour des neutrons thermiques
$^{10}\text{B} + n \xrightarrow{\text{jaune}} \begin{matrix} ^7\text{Li} + \alpha \\ ^7\text{Li}^* + \alpha \end{matrix}$	<p>2.792 MeV</p> <p>2.310 MeV</p>	<p>$\sigma = 3837$ barns</p>
$^3\text{He} + n \xrightarrow{\text{cyan}} ^3\text{H} + p$	0.764 MeV	<p>$\sigma = 5330$ barns</p>
$^{235}\text{U} + n \xrightarrow{\text{vert}} \text{F1} + \text{F2}$	200 MeV	<p>$\sigma = 585$ barns</p>

- Capture radiative par un noyau suivi d'émission de γ

4. Interactions des rayonnements neutres

b. Interaction des neutrons avec la matière

Interaction des neutrons rapides avec la matière

Réactions de diffusion élastique et inélastique sur des noyaux légers

Plus le noyau est léger, plus le transfert d'énergie est efficace



Scintillateurs organiques, riches en H : NE213

Absorption des neutrons dans la matière

Les flux de neutrons sont atténués par la matière suivant la loi:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{x}{L_t}\right)$$

I_0 flux de neutrons, x est l'épaisseur de l'absorbant

L_t est appelé libre parcours moyen dans la matière;

avec :

$$\sigma_t = \frac{A}{\rho \cdot N_A \cdot L_t} \quad \text{donc} \quad L_t = \frac{A}{\rho \cdot N_A \cdot \sigma_t}$$

σ_t est la section efficace totale de réaction, ρ la masse volumique (en g/cm³)

N_A nombre d'Avogadro, A est le nombre de masse de l'absorbant en uma (g).

2ème Partie

Détecteurs en Physique

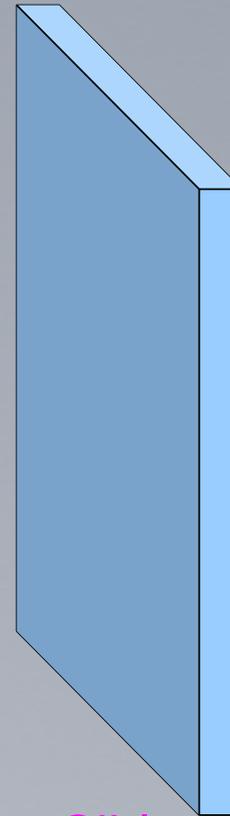
Nucléaire

Profs au **GANIL**





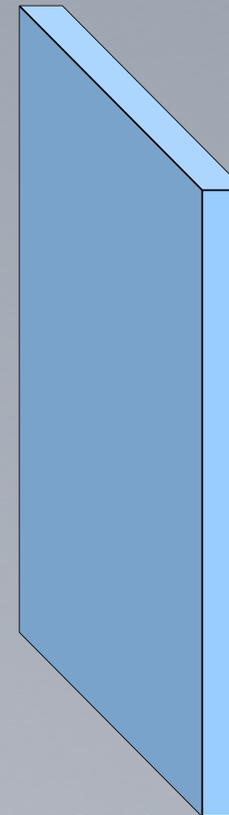
Projectile



Cible



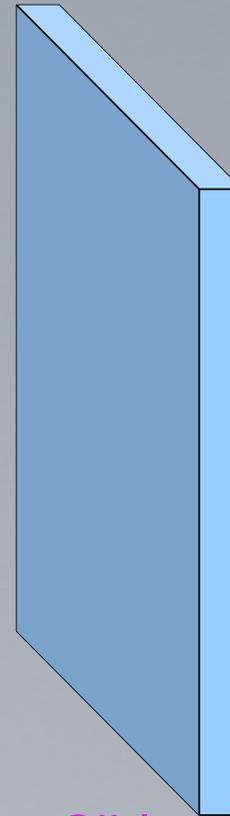
Projectile



Cible



Projectile

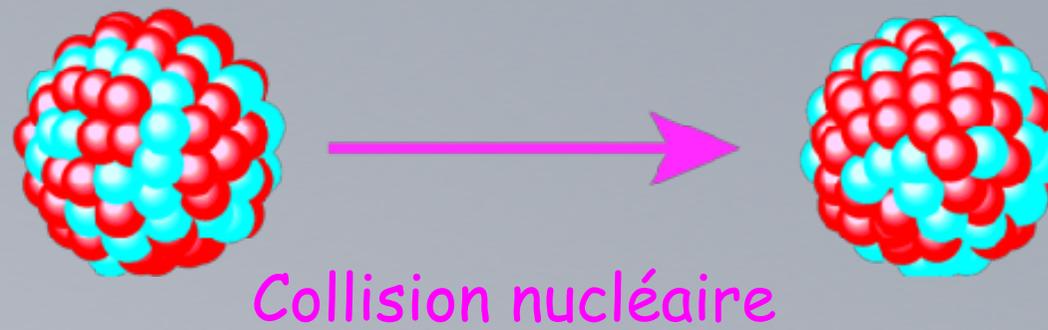


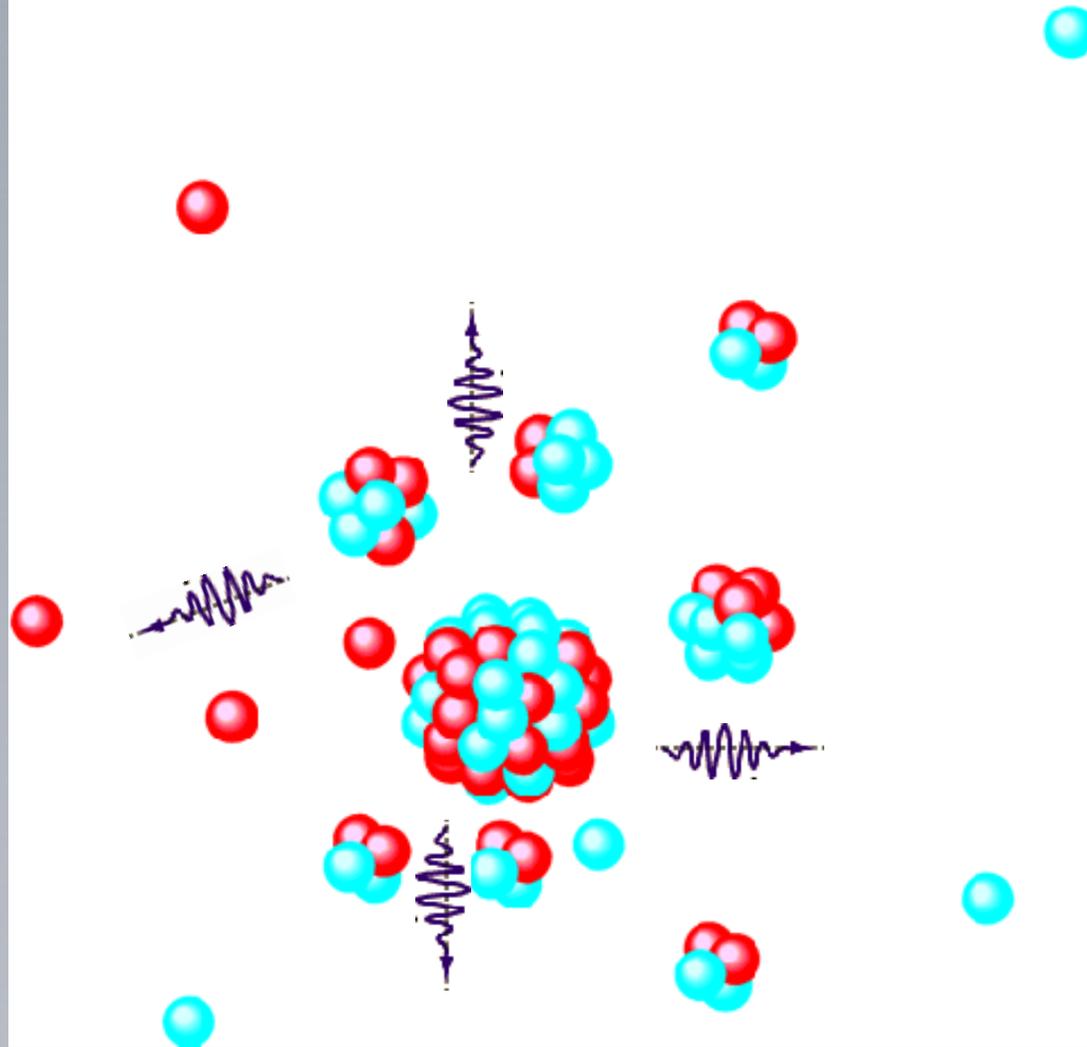
Cible

Projectile

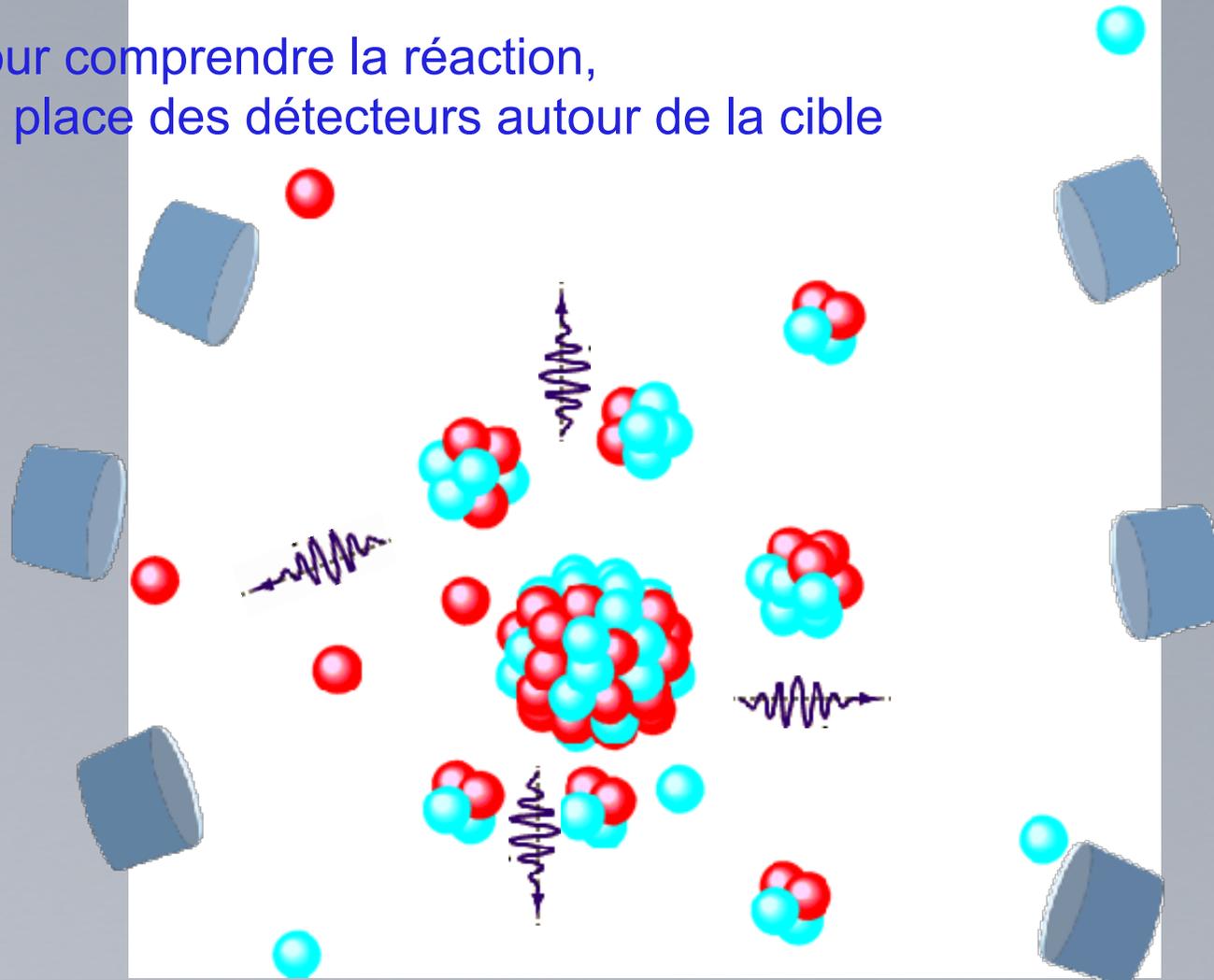


Cible



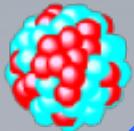


Pour comprendre la réaction,
on place des détecteurs autour de la cible



Quelle particule détecte-on au GANIL ?

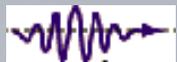
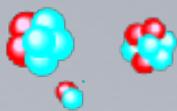
❖ des noyaux d'atomes



- ions lourds chargés ou fragments de fission

❖ des particules émises par le noyau

- - des électrons, des positrons
- des ions légers : protons, deutons, tritons, alphas..etc



- des photons : X ou gammas



- des neutrons

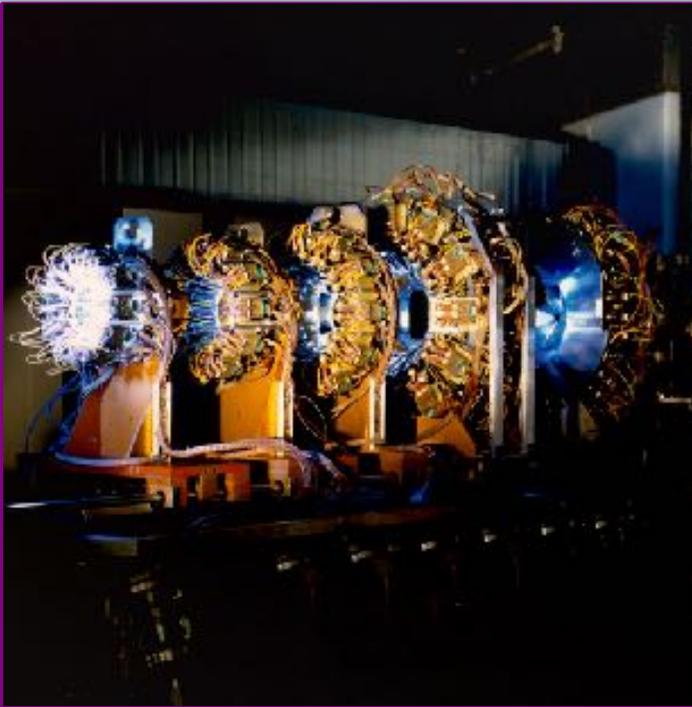


- des particules plus exotiques, neutres ou chargées: pions, kaons, neutrinos..etc

Pour les Particules chargées

Pour les neutrons

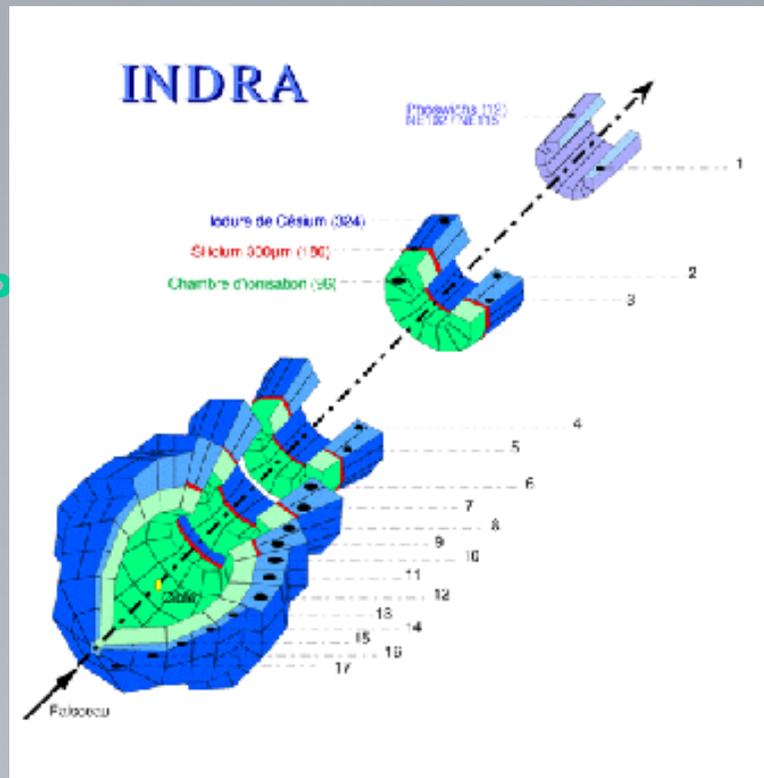
Po



INDRA

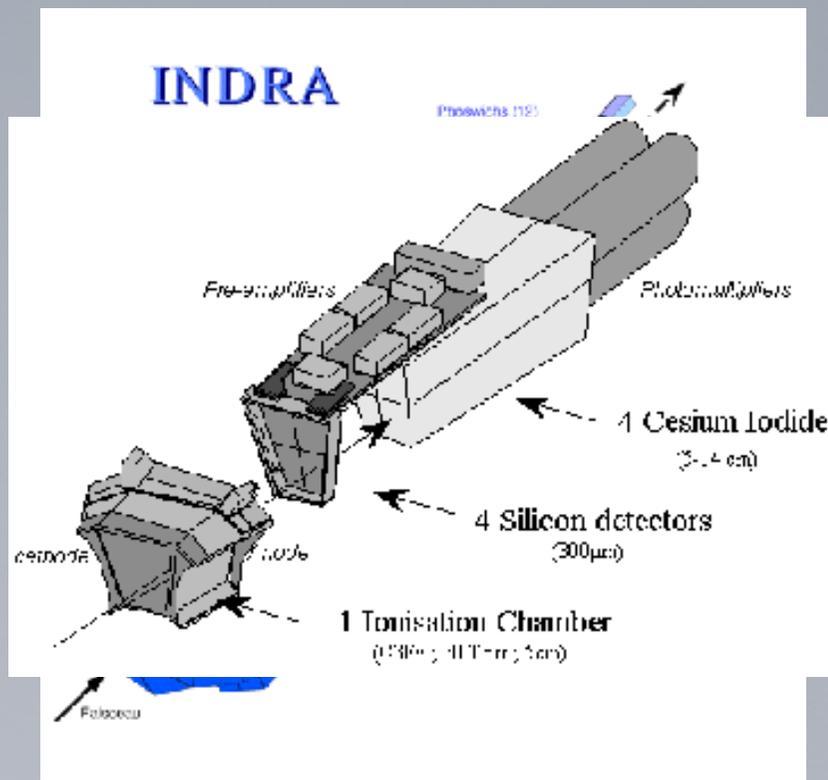
Pour les neutrons

P



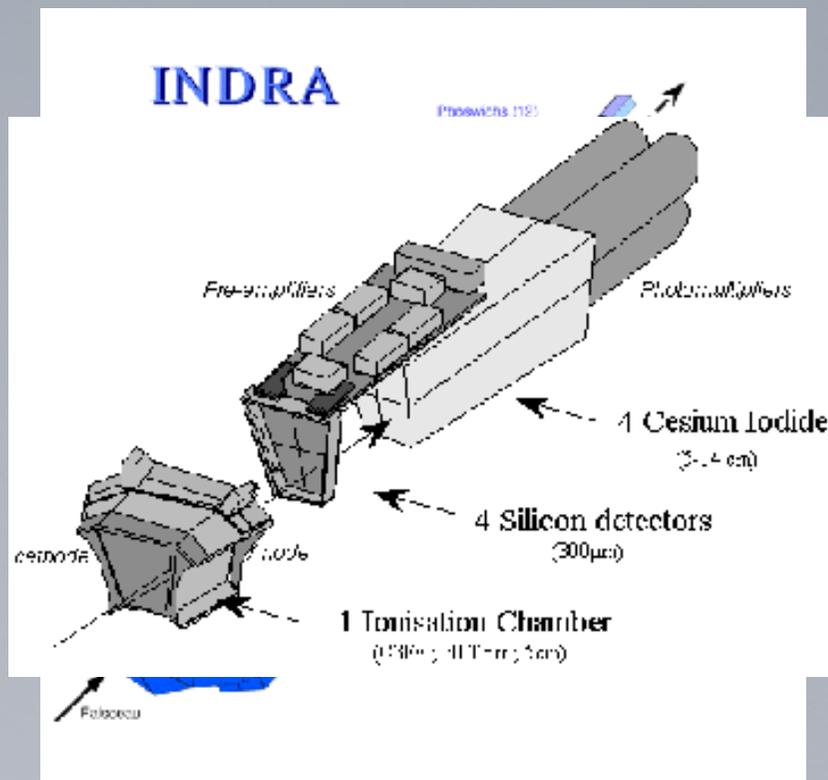
Pour les neutrons

INDRA



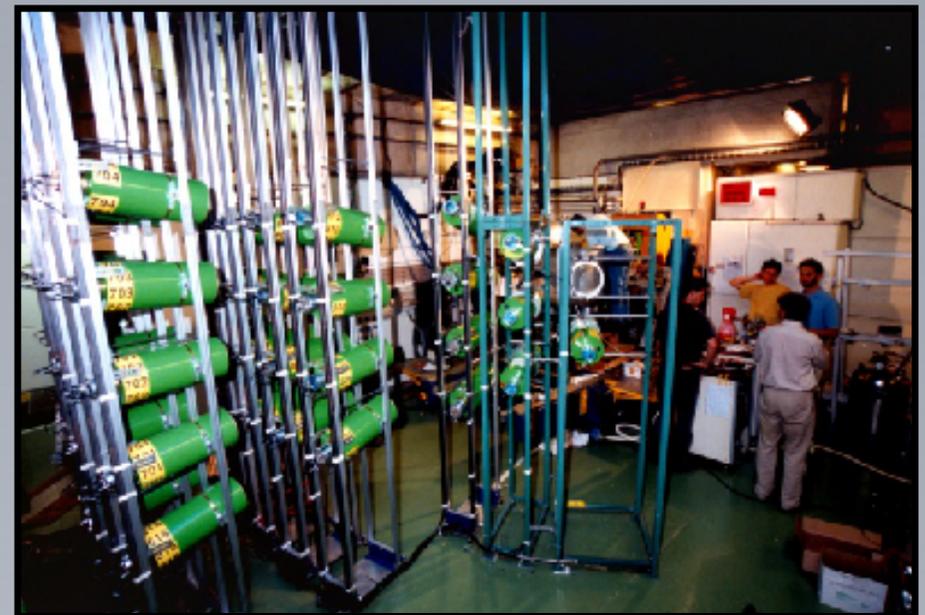
Pour les neutrons

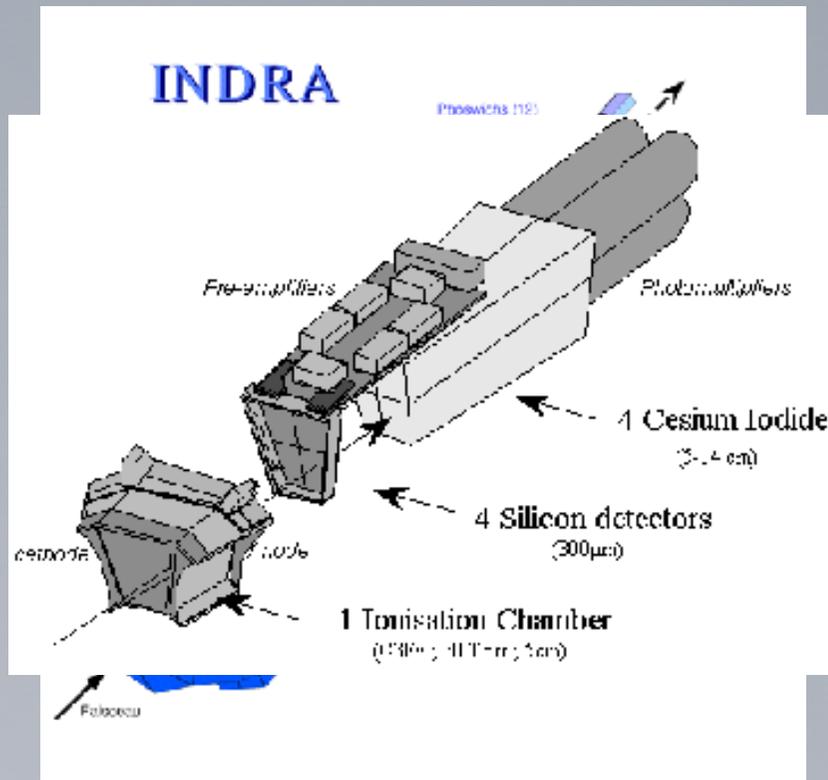
INDRA



INDRA

Démon

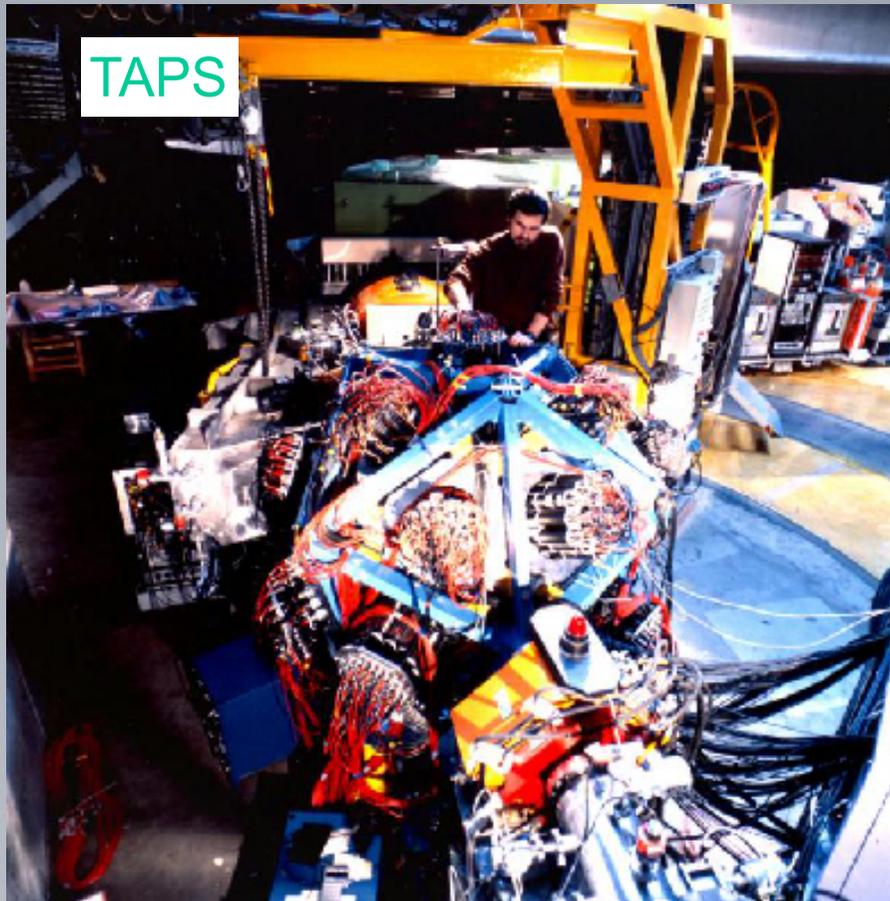




INDRA



Pour la lumière d'origine nucléaire : les gammas



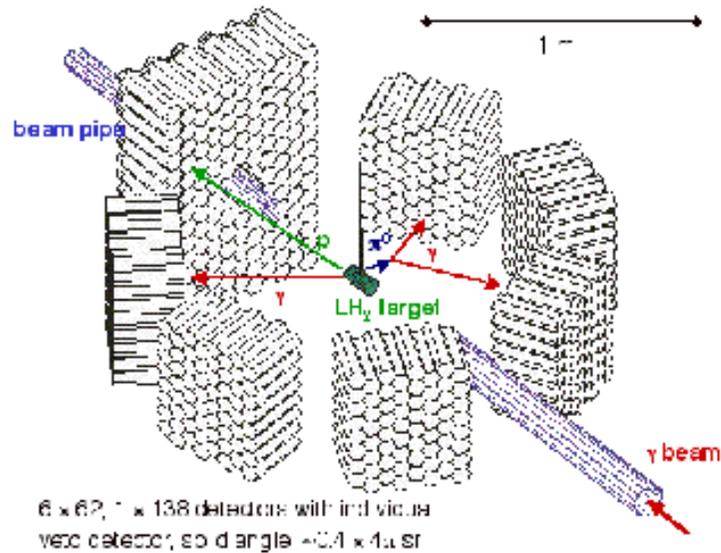
re : les gammas



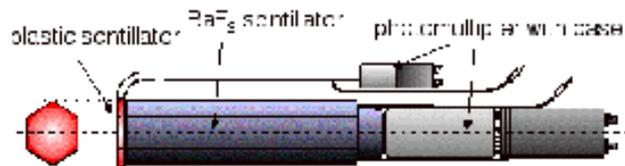
TA

TAPS setup at MAMI in Mainz

TAPS: BaF_2 PHOTON SPECTROMETER



SINGLE DETECTOR ELEMENT



re : les gammas

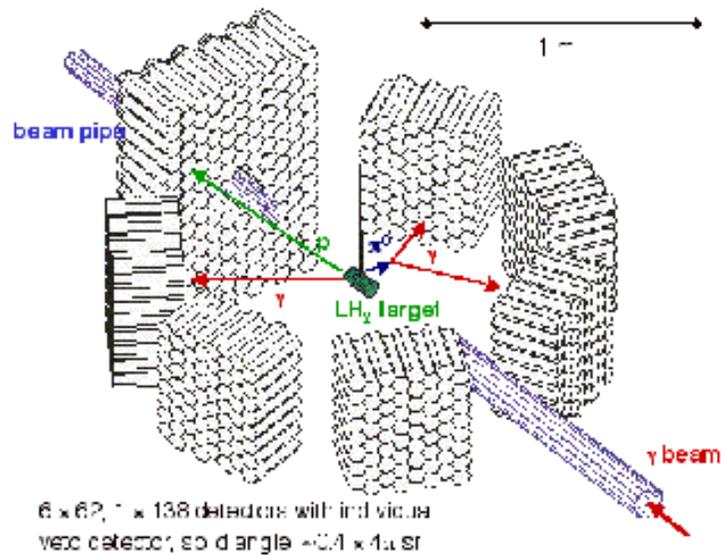




TA

TAPS setup at MAMI in Mainz

TAPS: BaF_2 PHOTON SPECTROMETER



Mainz 400 g

TAPS / A2

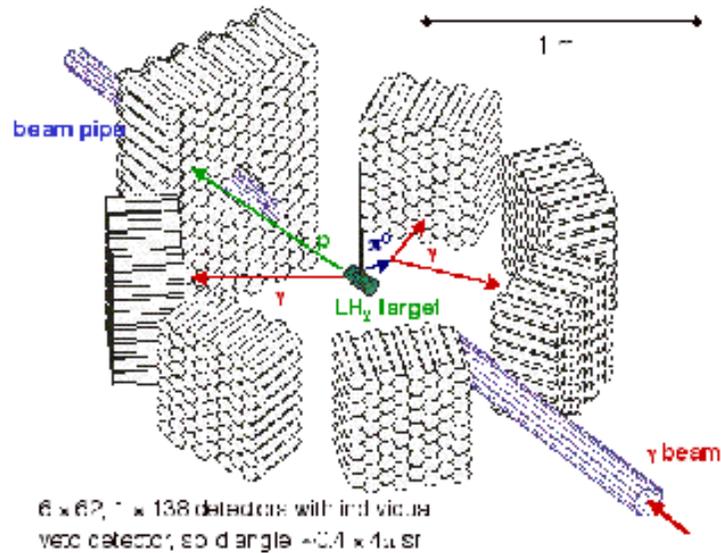
re : les gammas



TA

TAPS setup at MAMI in Mainz

TAPS: BaF_2 PHOTON SPECTROMETER

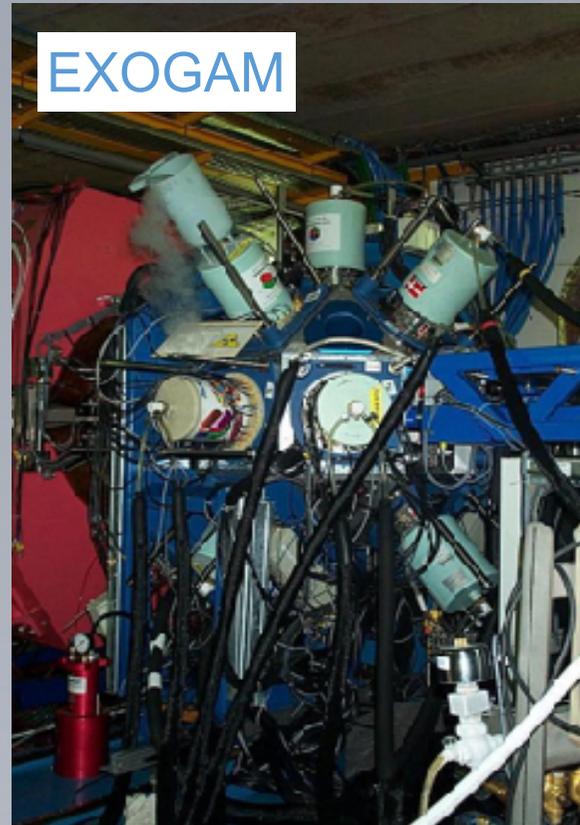


Mainz foto 2

TAPS / A2

re :

EXOGAM

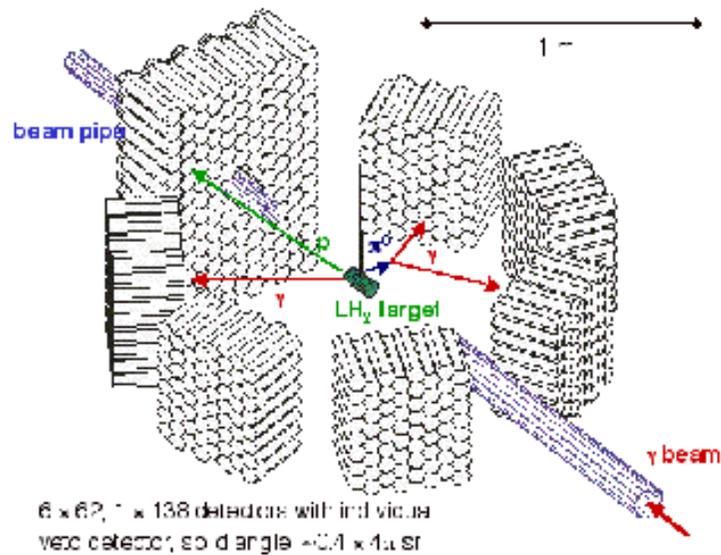




TA

TAPS setup at MAMI in Mainz

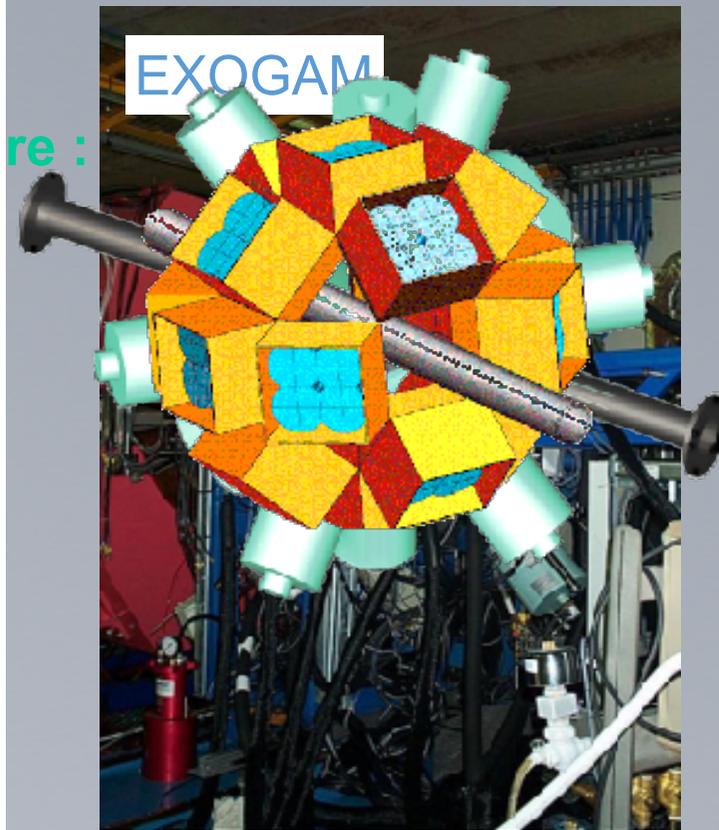
TAPS: BaF_2 PHOTON SPECTROMETER



Mainz foto 2

TAPS / A2

re :

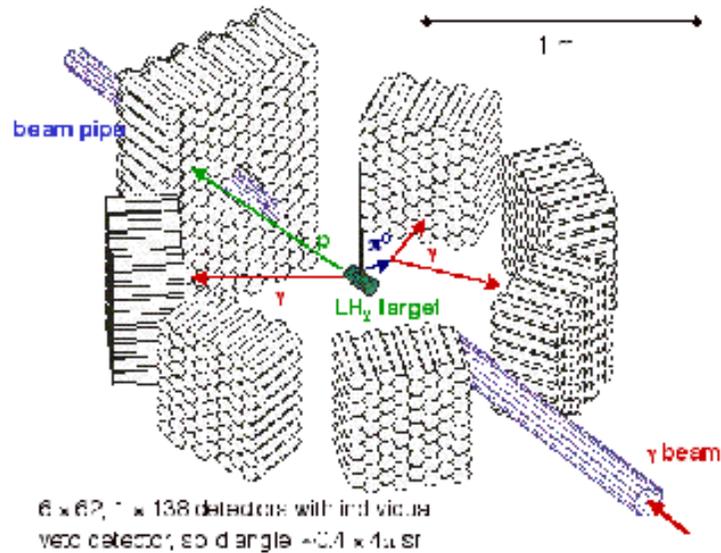




TA

TAPS setup at MAMI in Mainz

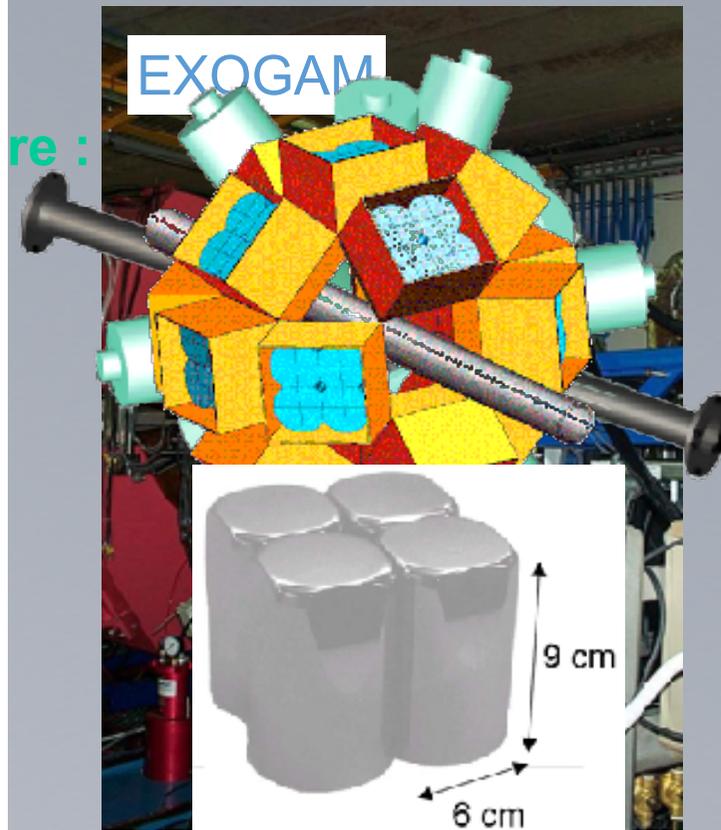
TAPS: BaF_2 PHOTON SPECTROMETER



Mainz foto 2

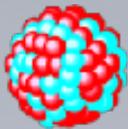
TAPS / A2

re :

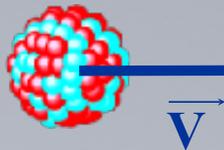




- Identifier une particule
 - connaître sa nature (photon, noyau ou autre)
 - connaître sa charge (nombre de protons)
 - connaître son nombre de masse (nombre de nucléons) ou sa masse

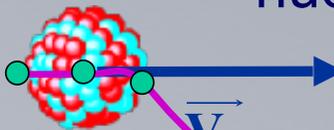


- Identifier une particule
 - connaître sa nature (photon, noyau ou autre)
 - connaître sa charge (nombre de protons)
 - connaître son nombre de masse (nombre de nucléons) ou sa masse



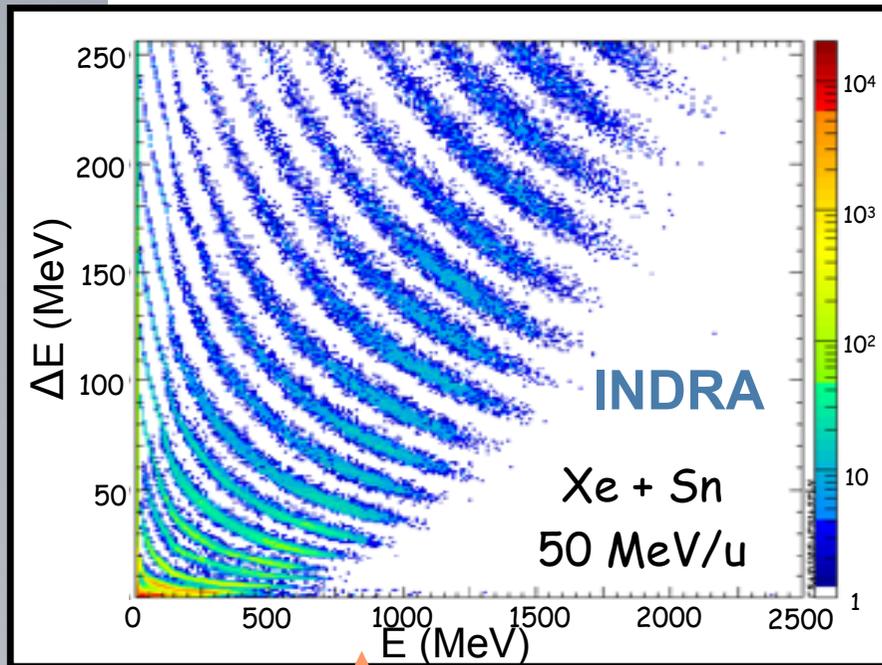
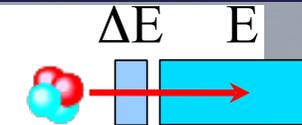
- Connaître sa dynamique
 - vecteur vitesse
 - vecteur quantité de mouvement
 - énergie cinétique

- Identifier une particule
 - connaître sa nature (photon, noyau ou autre)
 - connaître sa charge (nombre de protons)
 - connaître son nombre de masse (nombre de nucléons) ou sa masse

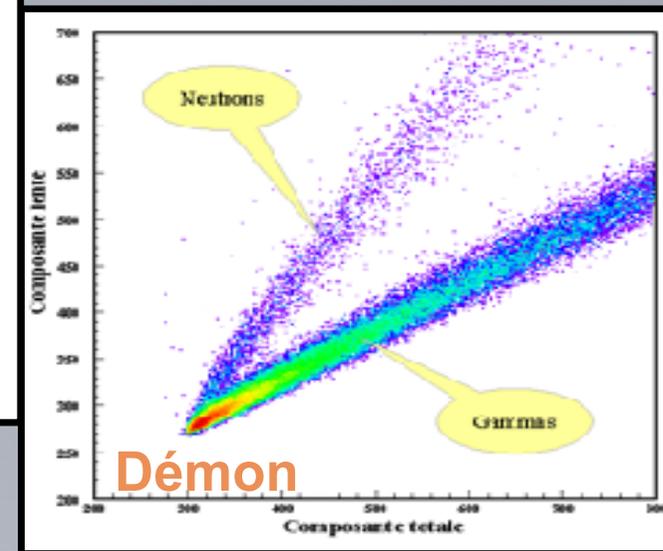


- Connaître sa dynamique
 - vecteur vitesse
 - vecteur quantité de mouvement
 - énergie cinétique
- Connaître ses positions successives dans l'espace au cours du temps

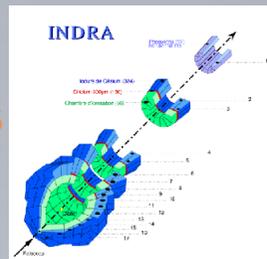
- Identification en charge avec un ΔE -E



Pour les neutrons



Pour les
particules
chargées



- Identification des neutrons

- Identification en charge et en masse de particules avec un champ magnétique et mesure de temps de vol

$$m \cdot \frac{v^2}{\rho} = QvB$$

Spectromètre
de masse

LISE

S3

VAMOS



- Identification en charge et en masse de particules avec un champ magnétique et mesure de temps de vol

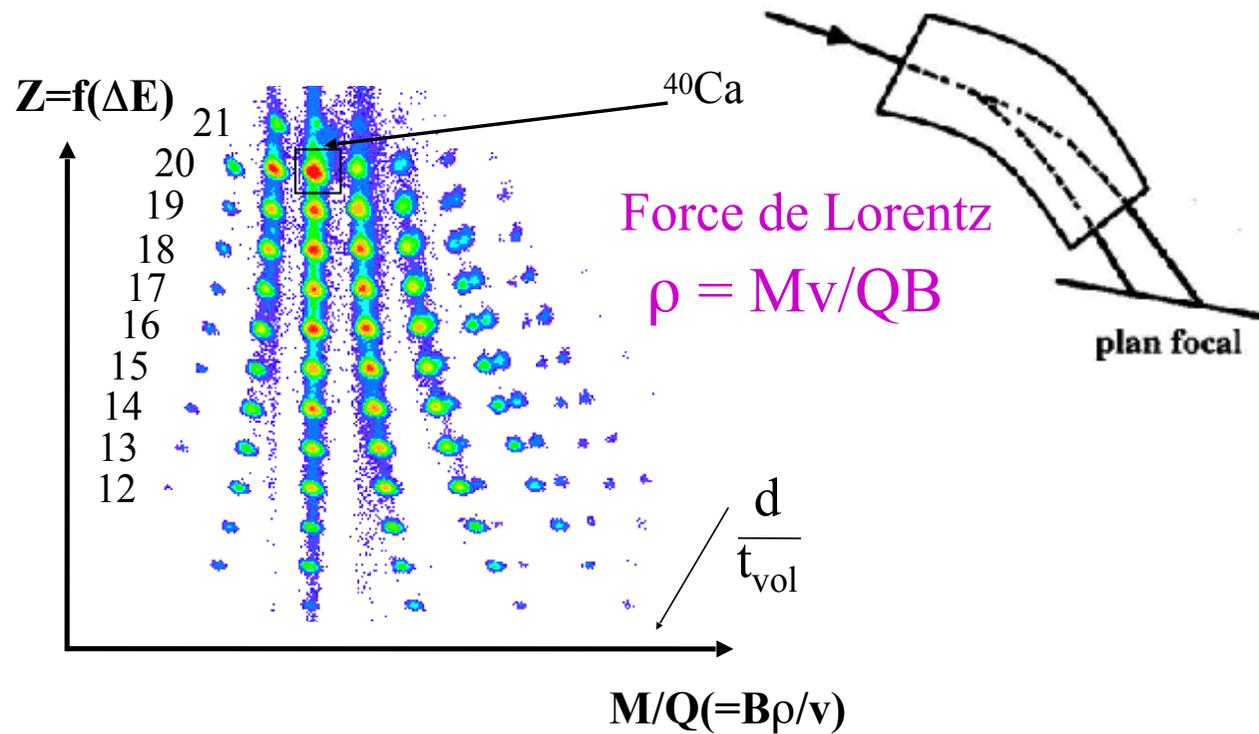
$$m \cdot \frac{v^2}{\rho} = QvB$$

Spectromètre de masse

LISE

S3

VAMOS



- Identification en charge et en masse de particules avec un champ magnétique et mesure de temps de vol

$$m \cdot \frac{v^2}{\rho} = QvB$$

Spectromètre de masse

LISE

S3

VAMOS

