

# Cargèse – mars 2009

## Ecole « techniques de base du détecteur »

Pascal Vincent

Université Pierre et Marie Curie

LPNHE, Paris

Introduction

Les systèmes expérimentaux

Les interactions des particules chargées

**Les interactions des particules neutres**

Les détecteur de particules

Visite d'une expérience



## Les neutres

### Photons

Effet photoélectrique

Effet Compton

Création de paires

### Neutrons

Diffusion élastique

Absorption

### Neutrinos

Interaction faible

## Les chargés

Excitation

Ionisation

Cherenkov

Bremsstrahlung ( $e^\pm$ )

Radiation de transition ( $e^\pm$ )

## Les instables

cerveau

# Détection des particules neutres

Les particules neutres ne sont pas directement détectables.

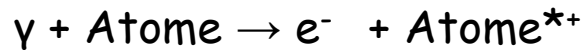
- . Elles ne laissent pas de trace sur leur trajectoire.
- . Elles ne sont pas déviées par les champs EM

Elles doivent transférer leur énergie à des particules chargées qui pourront être détectées par :

- . Excitation
- . Ionisation
- . Bremsstrahlung
- . Cherenkov

# Interaction des photons dans la matière

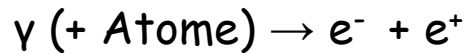
L'effet photoélectrique



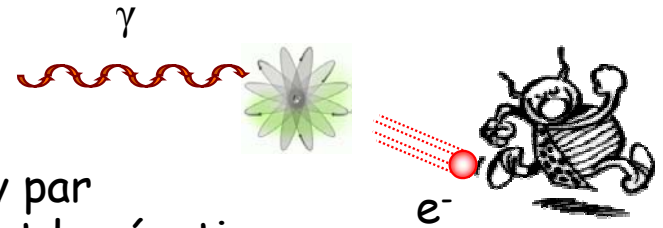
L'effet Compton



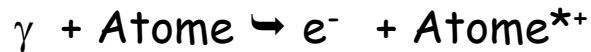
Création de paires



# Effet photo-electrique



Il s'agit de l'absorption d'un photon d'énergie  $h\nu$  par un atome et de l'éjection d'un électron lie suivant la réaction :

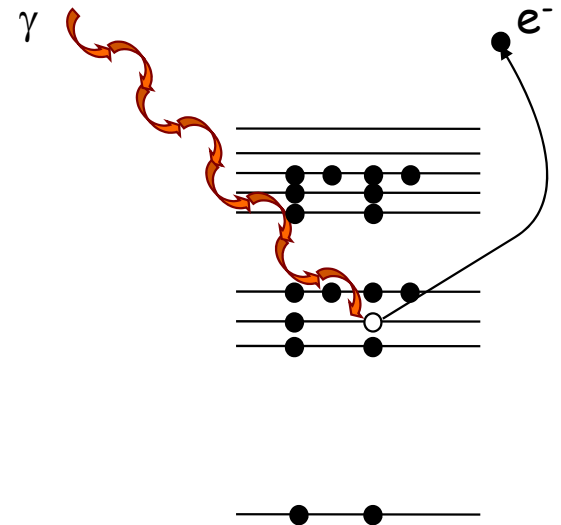


Le photon transfère la totalité de son énergie à l'atome qui en libère une large partie en émettant l'un de ses électrons.

Énergie cinétique de l'électron éjecté de l'atome :

$$E_e = E_\gamma - \text{énergie de liaison} = h\nu - E_{nlj}$$

ou  $E_{nlj}$  représente l'énergie de liaison de l'électron dans l'atome. Les électrons les plus proches du noyau sont les plus liés.



Il manque  $E_{nlj}$  dans la détection?

# Probabilité d'interagir

La **section efficace** définit la probabilité d'interagir avec une cible donnée.

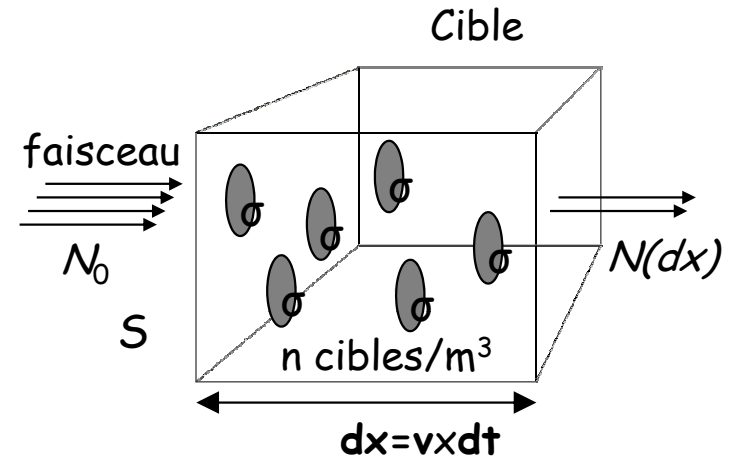
$$\mathcal{P} = \frac{\Sigma \sigma}{S} = n \sigma dx \quad \Rightarrow \quad N(x) = N_0 e^{-n \sigma x}$$

**Coefficient d'atténuation linéique** ( $\text{m}^{-1}$ ) :

$$\mu = n \sigma; \quad N(x) = N_0 e^{-\mu x}$$

**Longueur d'atténuation massique** ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) :

$$\lambda = \frac{\rho}{\mu}$$



# Effet photo-electrique

Section efficace de l'effet photoélectrique dépend de la densité de charges des atomes constituant le milieu et de l'énergie du photon incident :

$$\sigma_{\phi} \propto \frac{Z^5}{(h\nu)^n} = \frac{Z^5}{E_{\gamma}^n} ; \quad n > 1$$

$\sigma \propto Z^5$  : les milieux denses seront plus opaques aux photons.

L'effet photo-electrique est dominant aux basses énergies (qqs dizaines de keV)

# Effet Compton



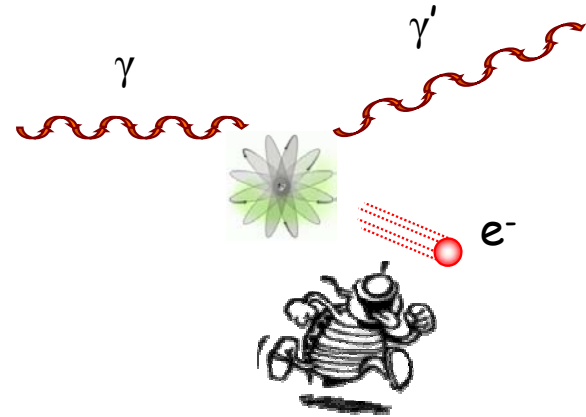
Énergie du photon diffusé :

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

si  $\theta=0 \rightarrow h\nu=h\nu'$  ;

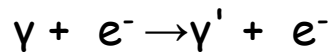
si  $\theta=\pi \rightarrow E_{\gamma'} = h\nu / (1 + 2h\nu / m_e c^2) = E_{\min}$

L'effet Compton est une diffusion sur des électrons quasi-libres (couches supérieures).





# Effet Compton



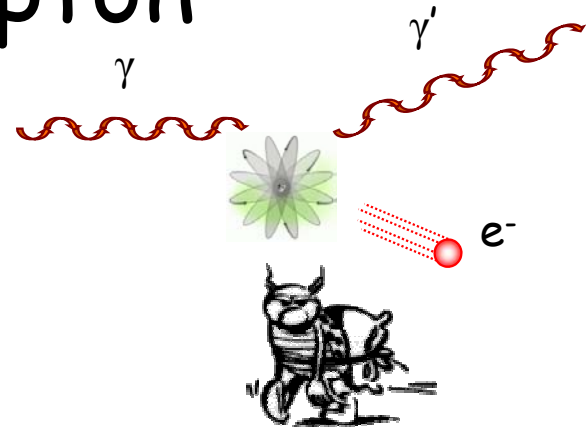
Énergie de l'électron diffusé :

$$E_e = E_\gamma - E_{\gamma'} = h\nu - h\nu'$$

si  $\theta=0 \rightarrow h\nu=h\nu' \rightarrow E_e=0$ ;

si  $\theta=\pi \rightarrow E_{\gamma'} = E_{\min} \rightarrow E_e = E_{\max}$ ;

Puisque l'énergie emportée par le photon dans l'état final possède un minimum, on ne pourra pas reconstruire l'énergie du photon incident en une seule fois.



# Effet Compton

Section efficace totale a basse énergie ( $\gamma = hv/m_e c^2 \ll 1$ ) :

$$\sigma_c = \sigma_{Th} \left(1 - 2\gamma + \frac{26}{5}\gamma^2 + \theta(\gamma^3)\right) \propto \gamma^2 \quad \sigma_{Th} = \left(\frac{8\pi}{3}\right) r_e^2$$

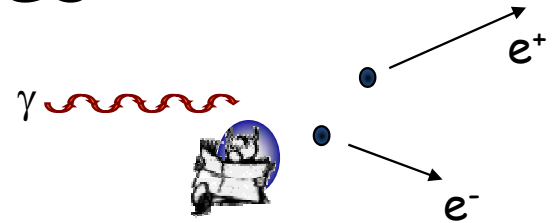
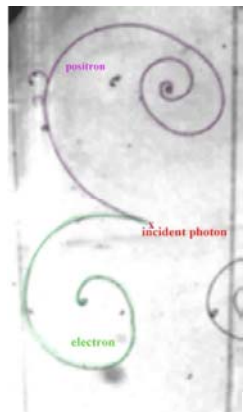
A haute énergie ( $\gamma = hv/m_e c^2 \gg 1$ ) :

$$\sigma_c = \frac{3}{8} \sigma_{Th} \frac{1}{\gamma} \left(\ln 2\gamma + \frac{1}{2}\right) \propto \frac{1}{\gamma}$$

Il est dominant aux énergies intermédiaires (MeV)

La section efficace différentielle comporte une forte asymétrie.

# Création de paires



Lorsque le photon possède une énergie suffisante il y a annihilation du photon et création d'une paire électron-positron :

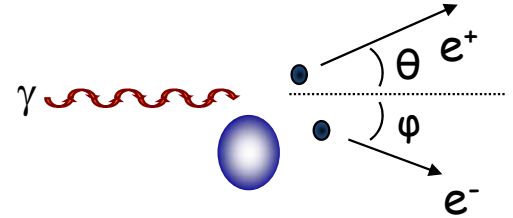


Cette réaction ne peut pas se produire en absence de matière spectatrice.

Il existe un seuil à la réaction (il faut produire de la matière) :

$$E_\gamma = 2 \frac{m_e^2}{M} + 2m_e \sim 2m_e = 1,022 \text{ MeV}$$

# Création de paires



La section efficace de création de paire varie en  $Z^2$  suivant que l'on considère l'effet d'écran des électrons du milieu négligeable ou au contraire total on aboutit respectivement à:

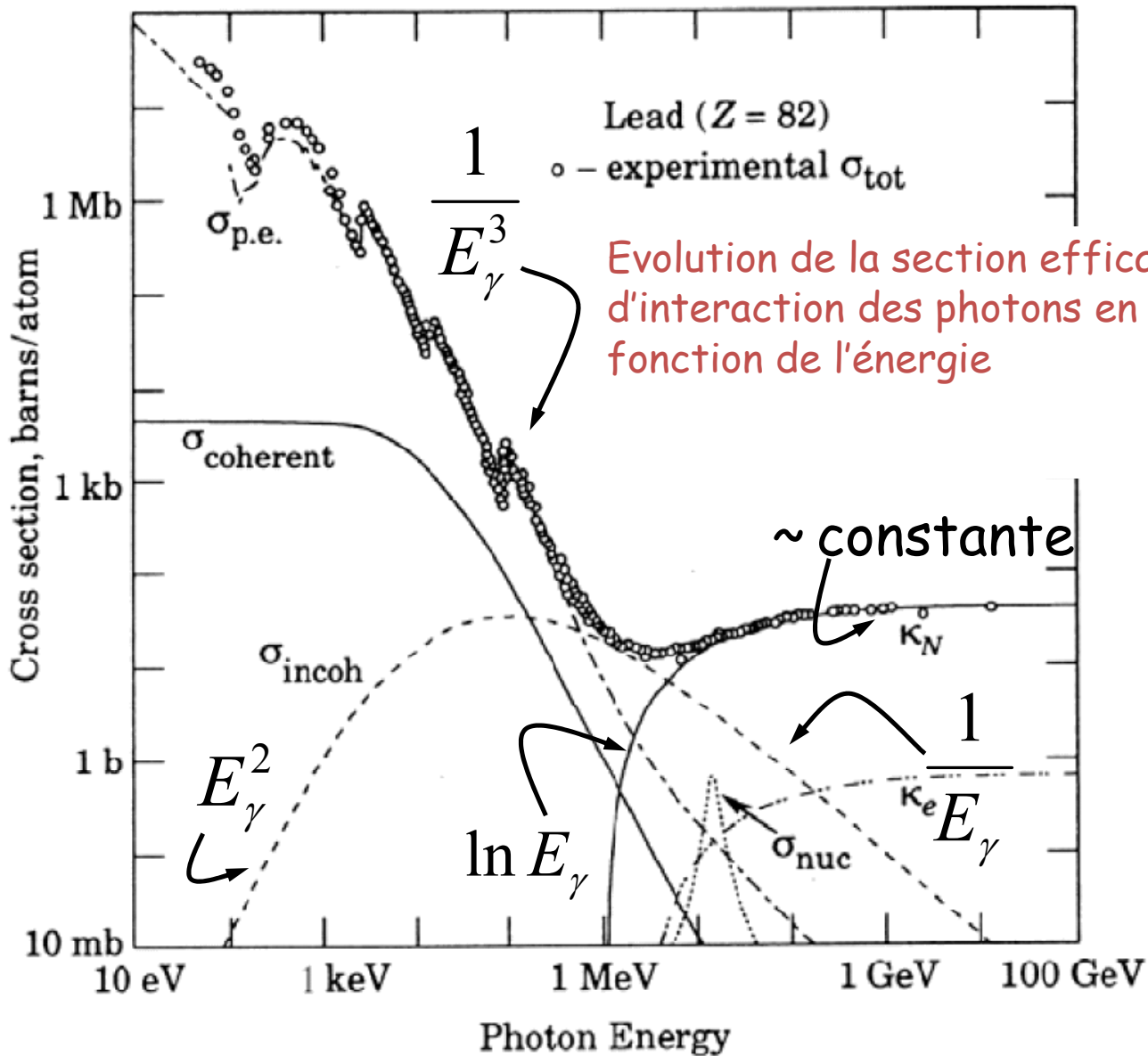
$$\sigma_{\pi} = \alpha r_e^2 Z^2 \left( \frac{28}{9} \ln \left( \frac{2h\nu}{m_e c^2} \right) - \frac{218}{27} \right) \propto Z^2 \ln(E_{\gamma})$$

A haute énergie :

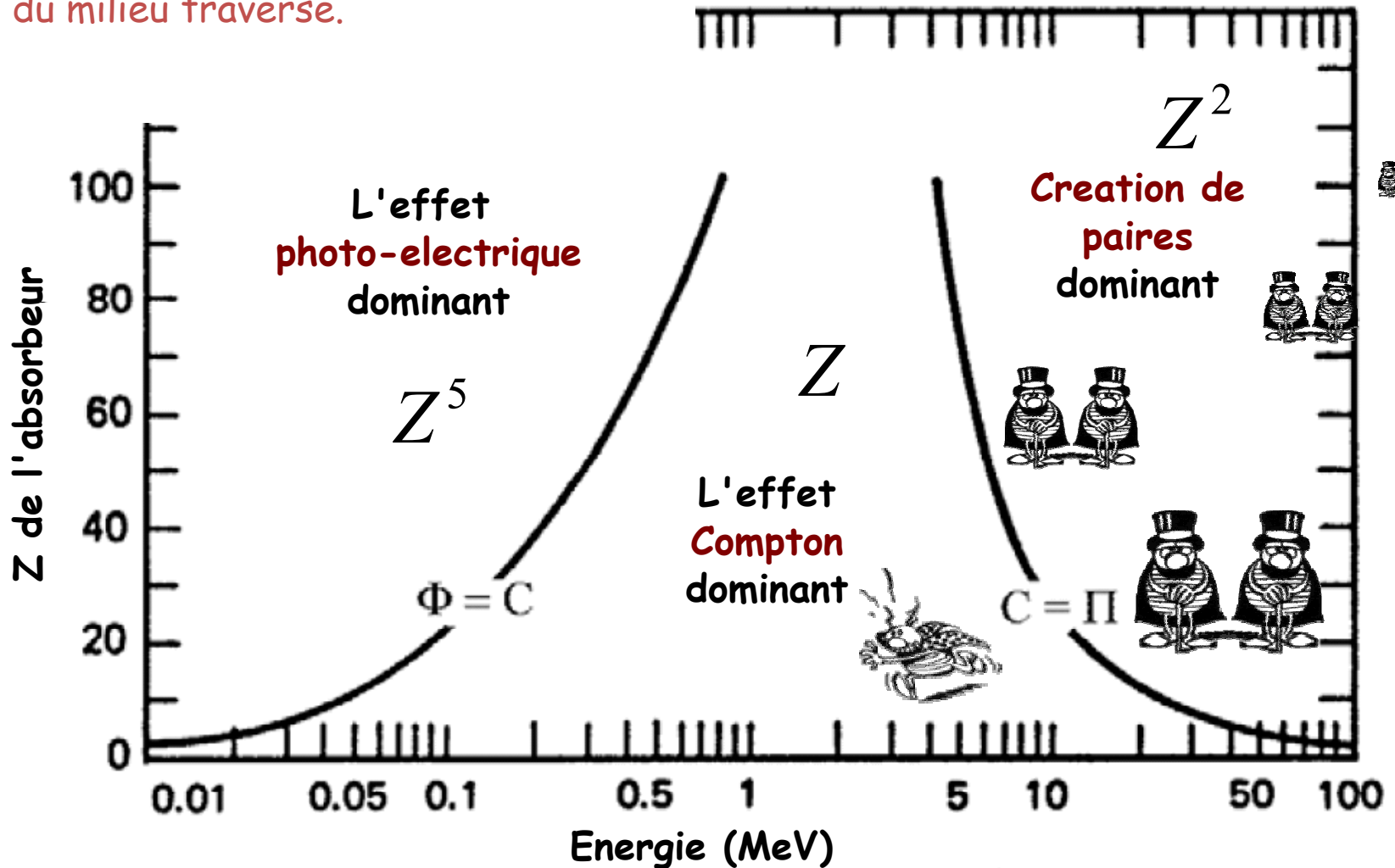
$$\sigma_{\pi} = \alpha r_e^2 Z^2 \left( \frac{28}{9} \ln \left( 183 Z^{1/3} \right) - \frac{2}{27} \right) \sim \text{constante}$$

Il manquera  $2 \times m_e$  dans la détection?

$$\begin{aligned} E_f &= E_{e^+} + E_{e^-} \\ &= E_{\gamma} - 2m_e = E_{\gamma} - 1,022 \text{ MeV} \end{aligned}$$



Evolution de la section efficace  
d'interaction des photons en fonction  
du milieu traversé.



Que devient d'énergie perdue

# QUE DEVIENT D'ÉNERGIE PERDUE

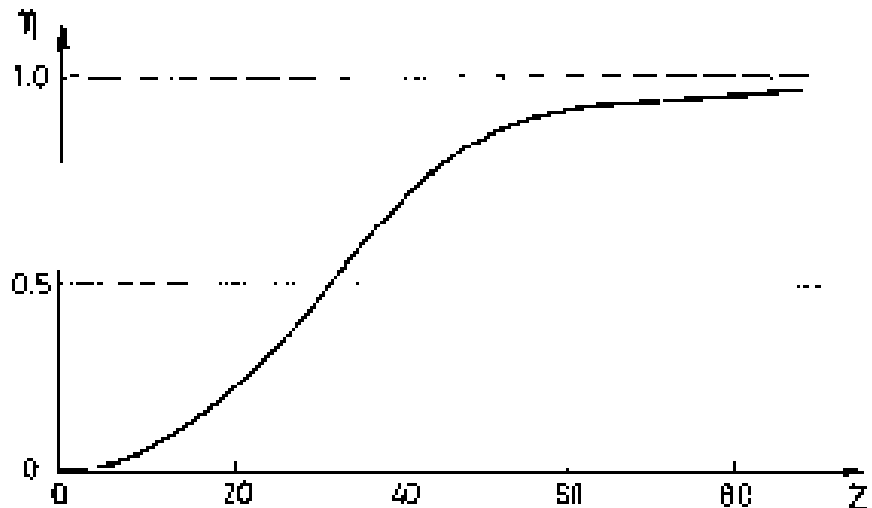


# Que devient d'énergie perdue

Elle est contenue dans l'état excité de l'atome ionisé. Celui-ci se désexcitera selon deux processus :

- **La fluorescence X** : réarrangement de l'atome avec émission d'un rayonnement X.
- **L'émission d'électrons Auger** : réarrangement de l'atome avec émission d'électrons.

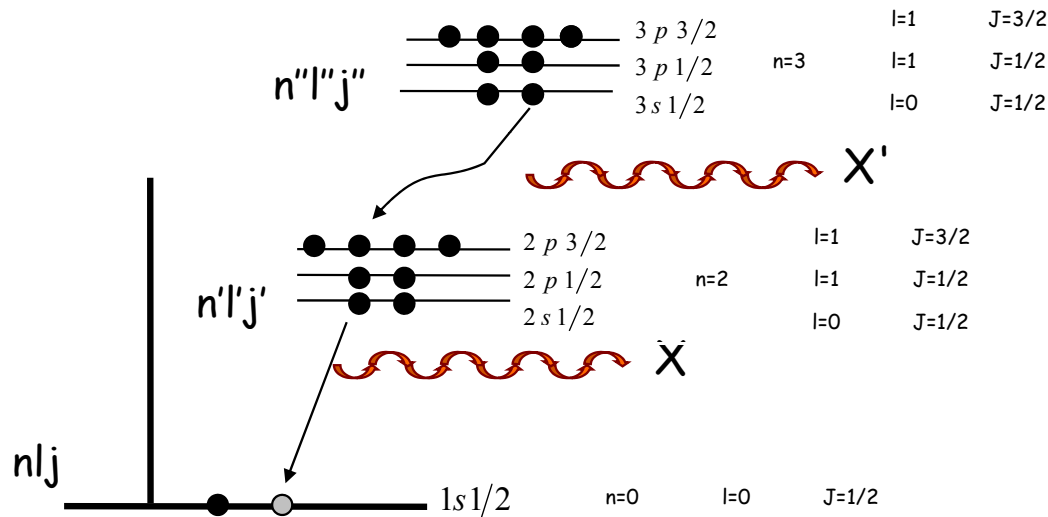
$$\eta = \frac{\textit{Auger}}{\textit{Auger} + \textit{Fluorescence}}$$





# La fluorescence X

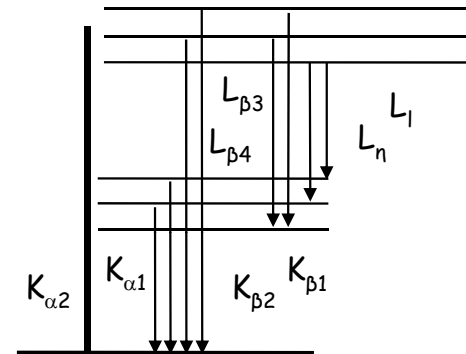
Un électron des couches supérieures prend la place qui a été libère. La variation de son énergie entraîne une émission X.



$$E_x = E_{n'l'j'} - E_{nlj}$$

$$E_{x'} = E_{n''l''j''} - E_{n'l'j'}$$

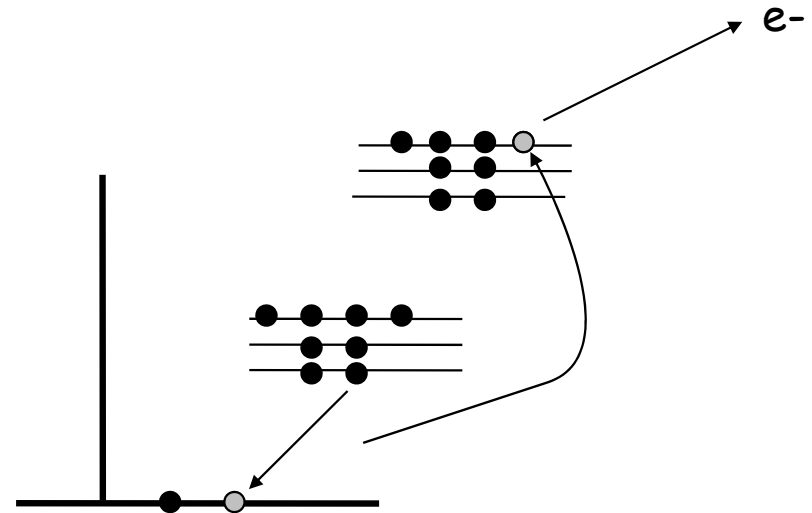
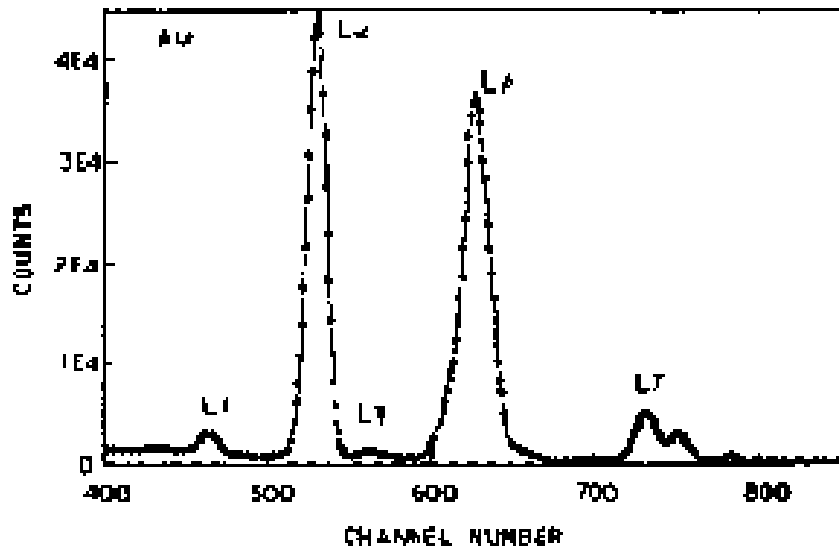
règles de sélection :  $\Delta l = \pm 1$ ;  $\Delta j = 0, \pm 1$ ;  $\Delta n \text{ qcq}$



# L'émission Auger

b : énergie de liaison de l'électron émis

$$E_e = (E_{n'l'j'} - E_{nlj}) - b$$



l'effet Auger correspond en général a l'émission de plusieurs électrons

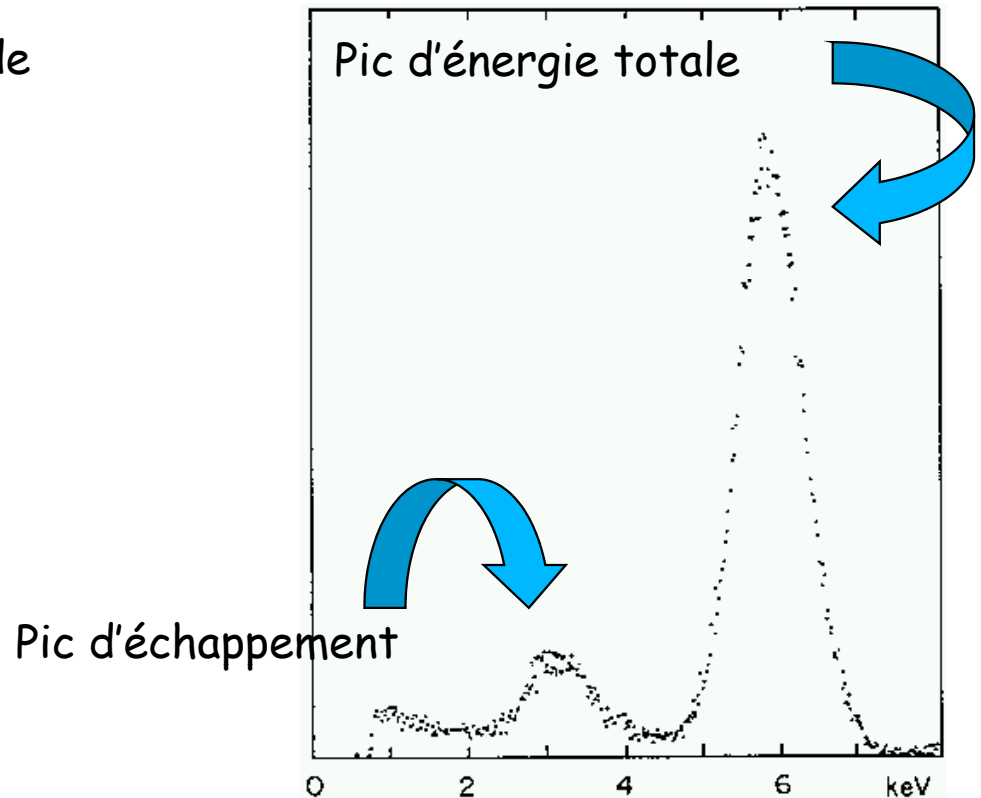
# Exemple 1

Réponse au rayonnement X du Fer (5.9keV) par une chambre à gaz en mode proportionnel à l'Argon.

L'énergie de liaison des électrons de la couche K est de 3 205.9 eV.

Le pic d'échappement correspond à la perte du photon de fluorescence :

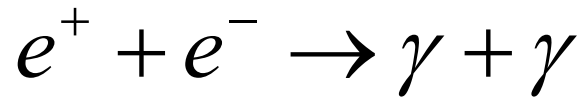
$$E = 5.9 - 3.2 \sim 2.7 \text{ keV.}$$



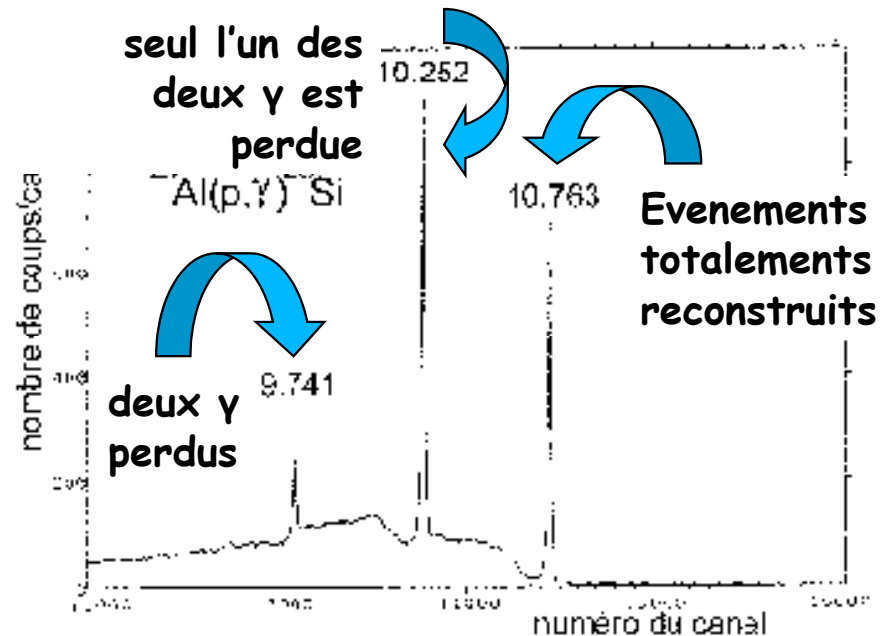
# Exemple 2

Réponse à un rayonnement  $\gamma$  de 10.763 MeV, issus du bombardement de noyaux d'Aluminium par des protons, par un détecteur au germanium  $\rightarrow$  production de paires dominant.

Le positon produit devra se thermaliser avant de se désintégrer.



On récupère ainsi l'énergie de masse de 2 électrons.



# Interaction des neutrons avec la matière

## Photons

- Effet photoélectrique
- Effet Compton
- Création de paires

## Les charges

- Excitation
- Ionisation
- Bremsstrahlung
- Synchrotron ( $e^\pm$ ,  $\mu^\pm$ )
- Cherenkov
- Radiation de transition

## Neutrons

- Diffusion élastique
- Absorption

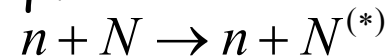
## Neutrinos

- Interaction faible

# Interaction des neutrons avec la matière

Les neutrons, dénués de charge électrique, ne sont pas sensibles à l'interaction électromagnétique. Ils peuvent donc traverser une quantité importante de matière sans interagir.

- ❖ La diffusion élastique (si la cible reste dans son état fondamental) ou inélastique :



- ❖ La capture radiative :



- ❖ La fission :



La capture et la fission sont prépondérantes à basse énergie. Au dessus du MeV la diffusion domine.

# Interaction des neutrons avec la matière

Perte d'énergie dans une diffusion :

perte moyenne :

$$\langle \Delta E \rangle = \frac{E_0}{2}(1-\alpha) \text{ avec } \alpha = \left( \frac{1-A}{1+A} \right)^2$$

transfert maximal et minimal d'énergie :

$$|\Delta E| = \frac{E_0}{2}(1-\alpha)|(\cos\theta_{CM} - 1)| \Rightarrow \begin{cases} \Delta E_{\max} = E_0|1-\alpha| \\ \Delta E_{\min} = 0 \end{cases}$$

Pour une cible légère ( $A=1$ ) :  $\alpha = 0$

$$\langle \Delta E \rangle = \frac{E_0}{2} \quad \Delta E_{\max} = E_0$$

Pour une cible lourde ( $A \gg 1$ ) :  $\alpha \sim 1$

$$\langle \Delta E \rangle = 0 \quad \Delta E_{\max} \rightarrow 0$$

# Interaction des neutrons avec la matière

**Thermalisation des neutrons** : Après  $n$  chocs successifs, l'énergie du neutron est donnée par la relation :

$$\langle E_n \rangle = \frac{E_0}{2^n} (1 + \alpha)^n \Rightarrow n = \frac{1}{\ln((1 + \alpha)/2)} \ln\left(\frac{\langle E_n \rangle}{E_0}\right)$$

Pour de l'hydrogène le ralentissement d'un neutron de 2 MeV jusqu'à 1/40 eV nécessite environ 26 chocs alors qu'il faudra 120 chocs dans le graphite ( $A=12$ ).

La diffusion des neutrons dans le laboratoire sera répartie dans les directions avant et arrière pour des valeurs de  $A$  grandes et essentiellement vers l'avant pour  $A$  petit.

$$\langle \cos\theta \rangle = \frac{2}{3A}$$



# Interaction des neutrons avec la matière

Après ralentissement par chocs élastiques **les neutrons thermiques sont capturés** par des noyaux. Les réactions de capture de neutrons thermiques les plus significatives sont :

capture	$\sigma$ (barns)	Q (MeV)
${}^1\text{H} + n \rightarrow {}^2\text{H} + \gamma$	0,33	2,22
${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{H} + p$	5 330	0,765
${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^3\text{H} + \alpha$	940	4,782
${}^{10}\text{B} + n \rightarrow {}^7\text{Li} + \alpha$ (6%)	3 840	2,792
$\rightarrow {}^7\text{Li}^* + \alpha$ (94%)		2,310
${}^{113}\text{Cd} + n \rightarrow {}^{114}\text{Cd} + \gamma$	21 000	9,043
${}^{157}\text{Gd} + n \rightarrow {}^{158}\text{Gd} + \gamma$	242 000	7,9
${}^{235}\text{U} + n \rightarrow$ fission	582	200
${}^{135}\text{Xe} + n \rightarrow {}^{136}\text{Xe}$	3 000 000	-
${}^{149}\text{Sm} + n \rightarrow {}^{150}\text{Sm}$	50 000	-

# Interaction des neutrons avec la matière

## Photons

- Effet photoélectrique
- Effet Compton
- Création de paires

## Les charges

- Excitation
- Ionisation
- Bremsstrahlung
- Synchrotron ( $e^\pm$ ,  $\mu^\pm$ )
- Cherenkov
- Radiation de transition

## Neutrons

- Diffusion élastique
- Absorption

## Neutrinos

- Interaction faible

# Les neutrinos

section efficace :

$$\sigma \approx 10^{-38} \text{ cm}^{-2} = 10^{-11} \text{ mbarns}$$

400 000 milliards de  $\nu$  solaires  
par seconde.

Fréjus : (1 000 tonnes)  
détection  $\sim 1$  neutrino  
atmosphérique par semaine.

nécessite de construire le  
détecteurs le plus massif  
possible, enterrés (pour limiter  
le bruit de fond).

