

Ecole « techniques de base du détecteur » Cargèse

Pascal Vincent
Université Pierre et Marie Curie

Introduction
Les systèmes expérimentaux
Les interactions des particules chargées
Les interactions des particules neutres
Les détecteurs de particules
Visite d'une expérience

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

Les processus de base

Les particules neutres

Photons

Effet photoélectrique

Effet Compton

Création de paires

Neutrons

Diffusion élastique

Absorption

La fission

Neutrinos

Les interactions faibles

Les particules chargés

L'excitation

Ionisation

Cherenkov

Les chargés légers (e^\pm)

Bremsstrahlung

Radiation de transition

Les particules instables

Le cerveau

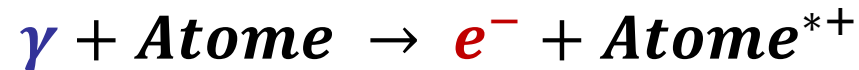
Interaction des photons dans la matière

L'absorption : effet photoélectrique

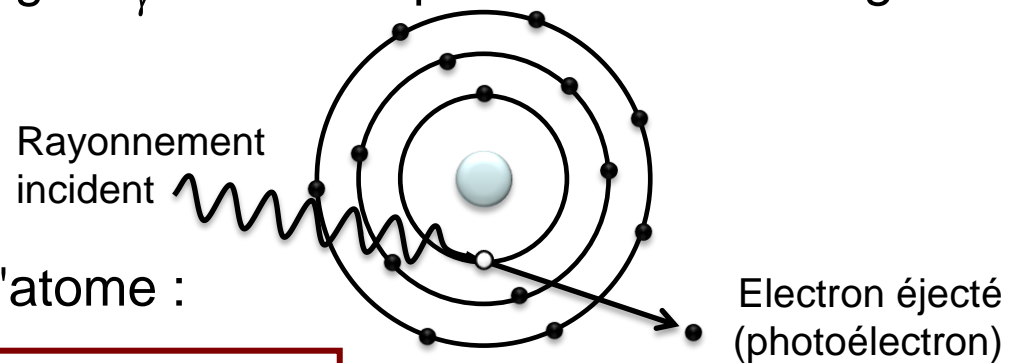
La diffusion inélastique : Compton

La conversion : création de paire

Effet photo-électrique



Le photon transfère la totalité de son énergie E_{γ} 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 :

$$E_e = E_{\gamma} - \text{énergie de liaison de l'électron}$$

Les électrons les plus proches du noyau sont les plus liés.

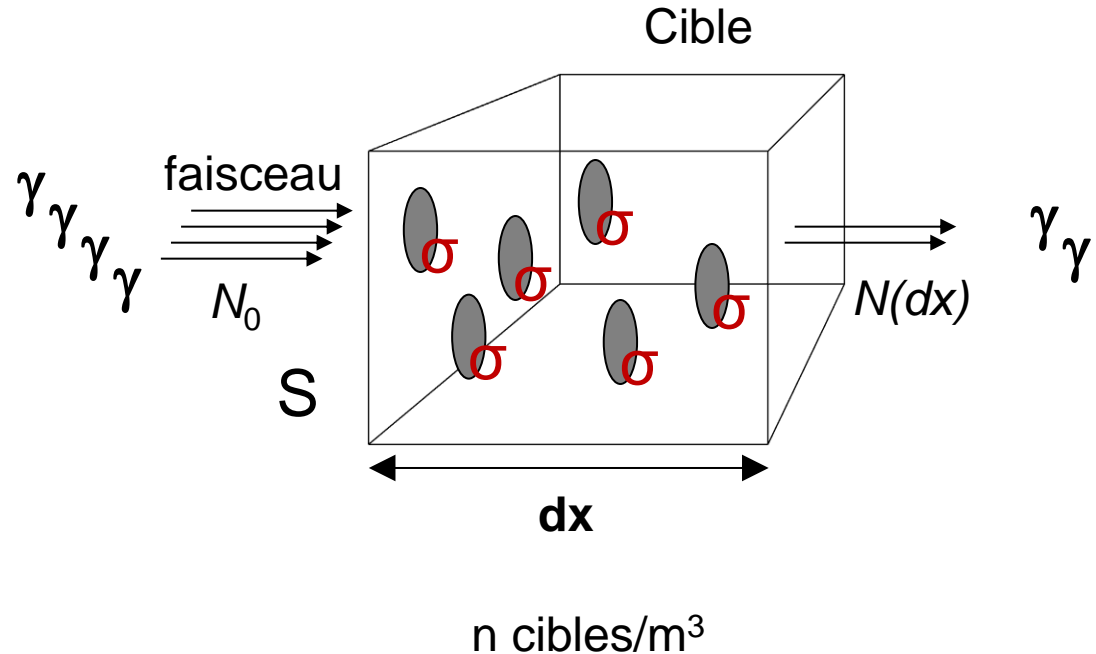
Il manque de l'énergie dans la détection?

Effet photo-électrique

La **section efficace** est reliée à la probabilité d'interagir avec une cible donnée.

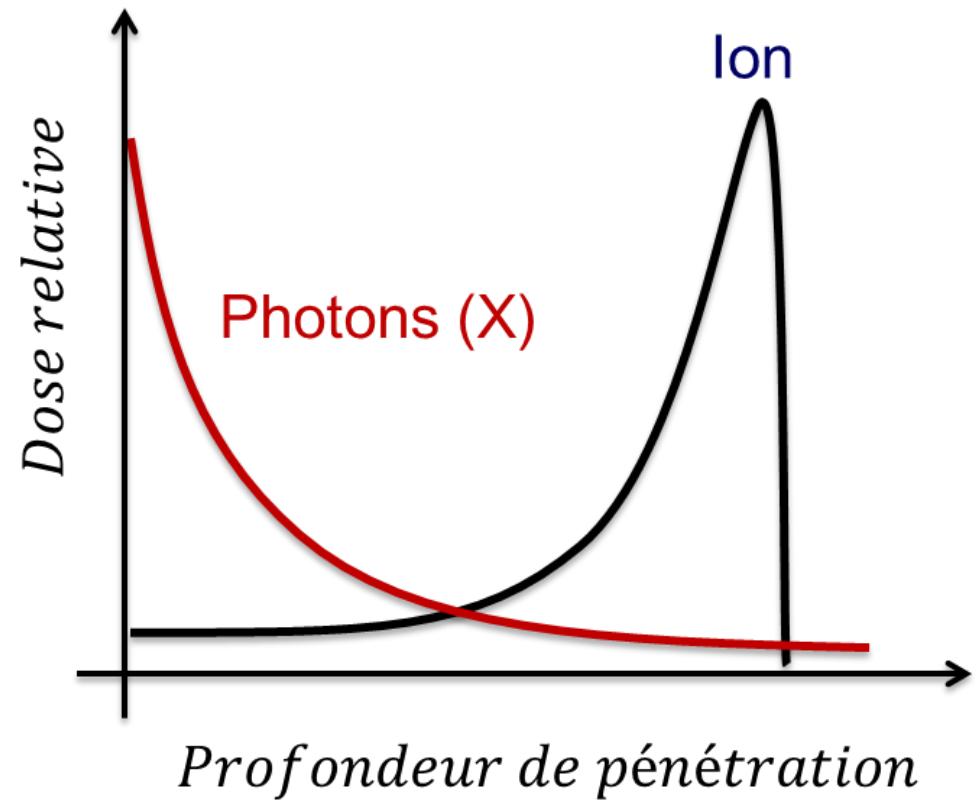
$$N(x) = N_0 e^{-n\sigma x}$$

$$n = \frac{\rho}{A} N_a$$



Effet photo-électrique

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



Effet photo-électrique

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

$$\sigma_{\varphi} \propto \frac{Z^5}{E_{\gamma}^n}$$

L'effet photo-électrique est dominant :

- Aux basses énergies (quelques dizaines de keV)
- Chez les éléments lourds

Interaction des photons dans la matière

Pour atteindre une atténuation des photons équivalente dans le plomb et l'aluminium :

$$\mu_{pb} = n\sigma_{pb} = 52.2 \text{ cm}^{-1}$$

$$\mu_{Al} = n\sigma_{Al} = 0.765 \text{ cm}^{-1}$$

$$I(L_{pb}) = I_0 e^{-\mu_{pb} L_{pb}}$$

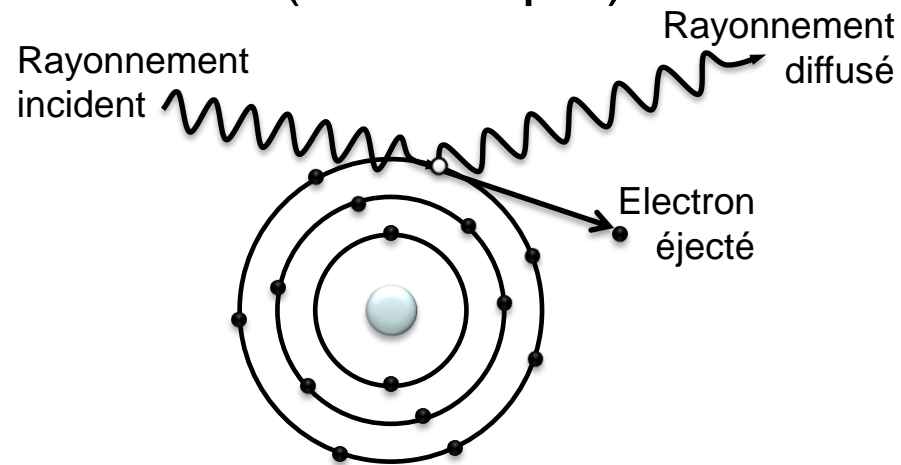
$$I(L_{Al}) = I_0 e^{-\mu_{Al} L_{Al}}$$

$$L_{AL} = L_{pb} \frac{\mu_{pb}}{\mu_{Al}}$$

Pour 5 mm de plomb il faudra 34 cm d'aluminium.

La « diffusion »

Effet Compton (inélastique)



Effet Compton

Section efficace totale a basse énergie :

$$\sigma_c \propto ZE^2$$

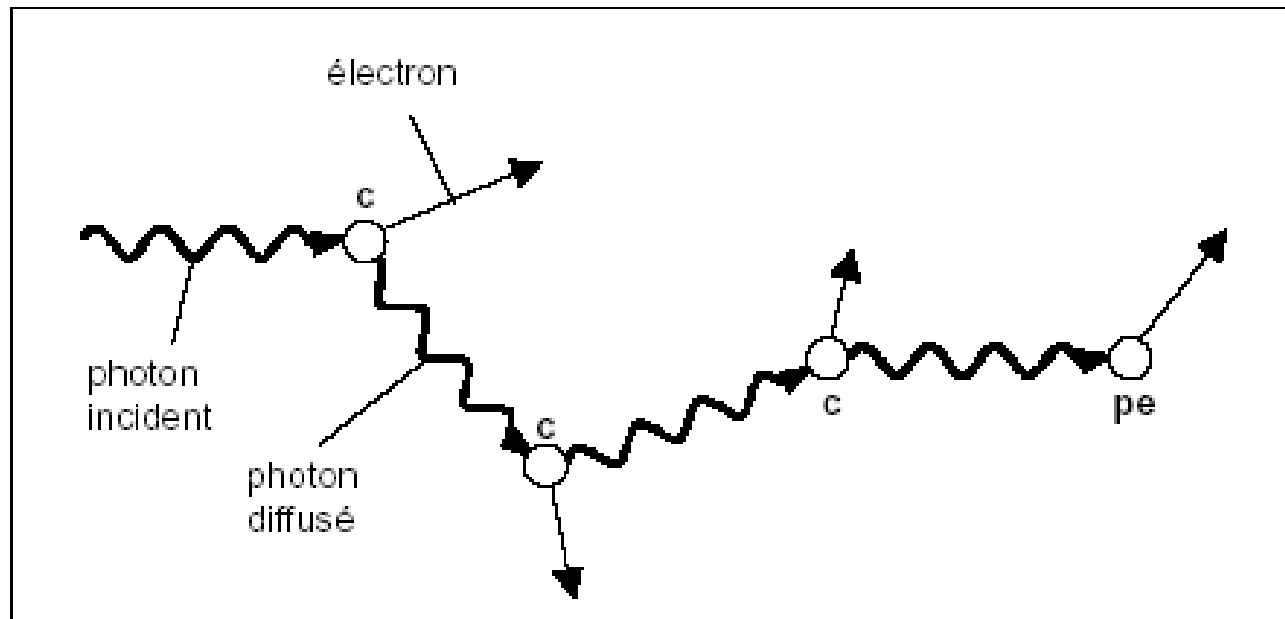
A haute énergie :

$$\sigma_c \propto Z \frac{1}{E}$$

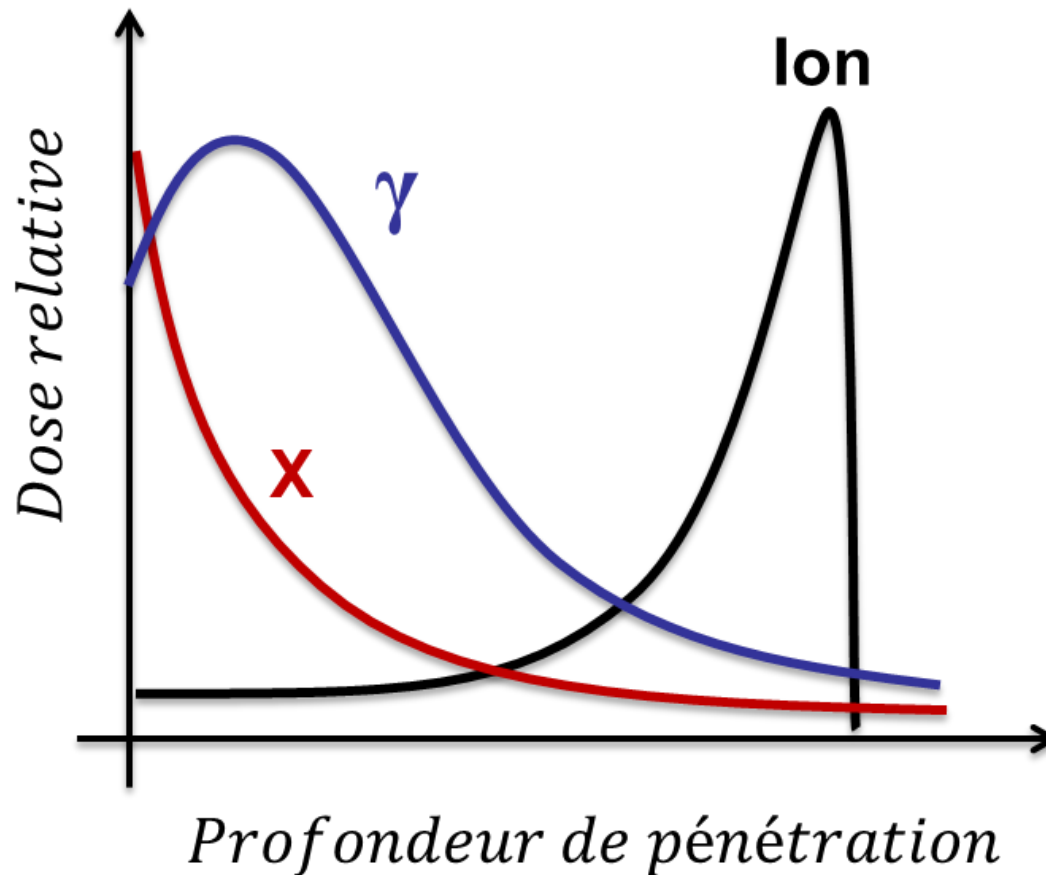
Il est dominant aux énergies intermédiaires (MeV)

Conséquence

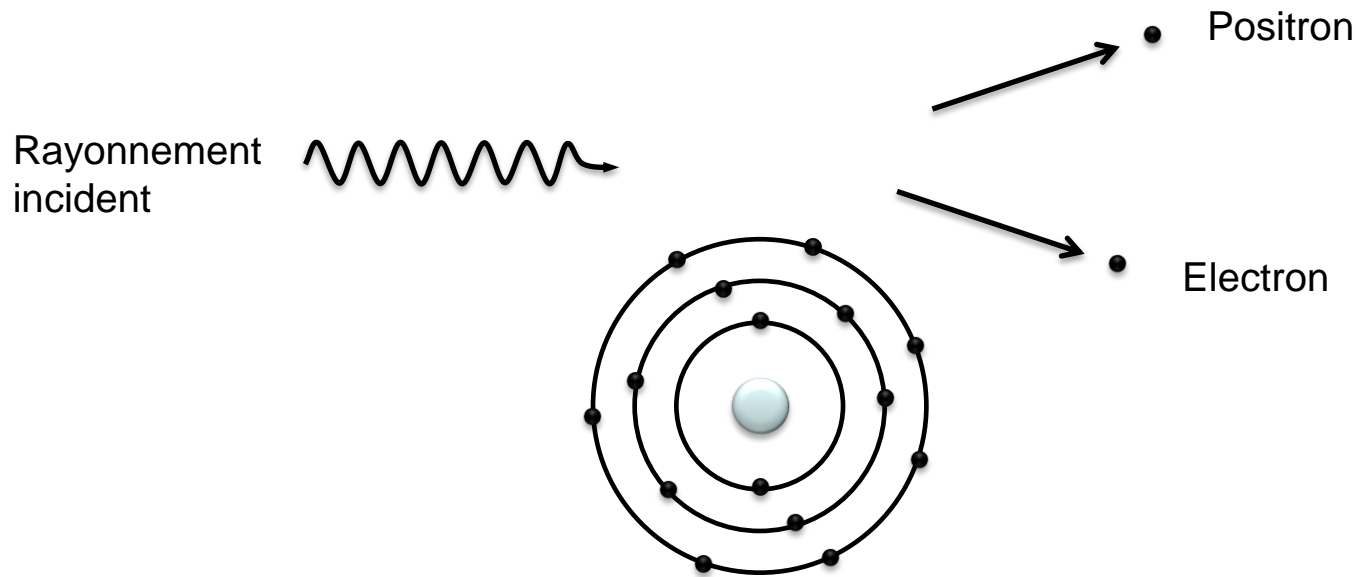
Plusieurs diffusions Compton sont possibles avant une interaction photoélectrique.



Conséquence

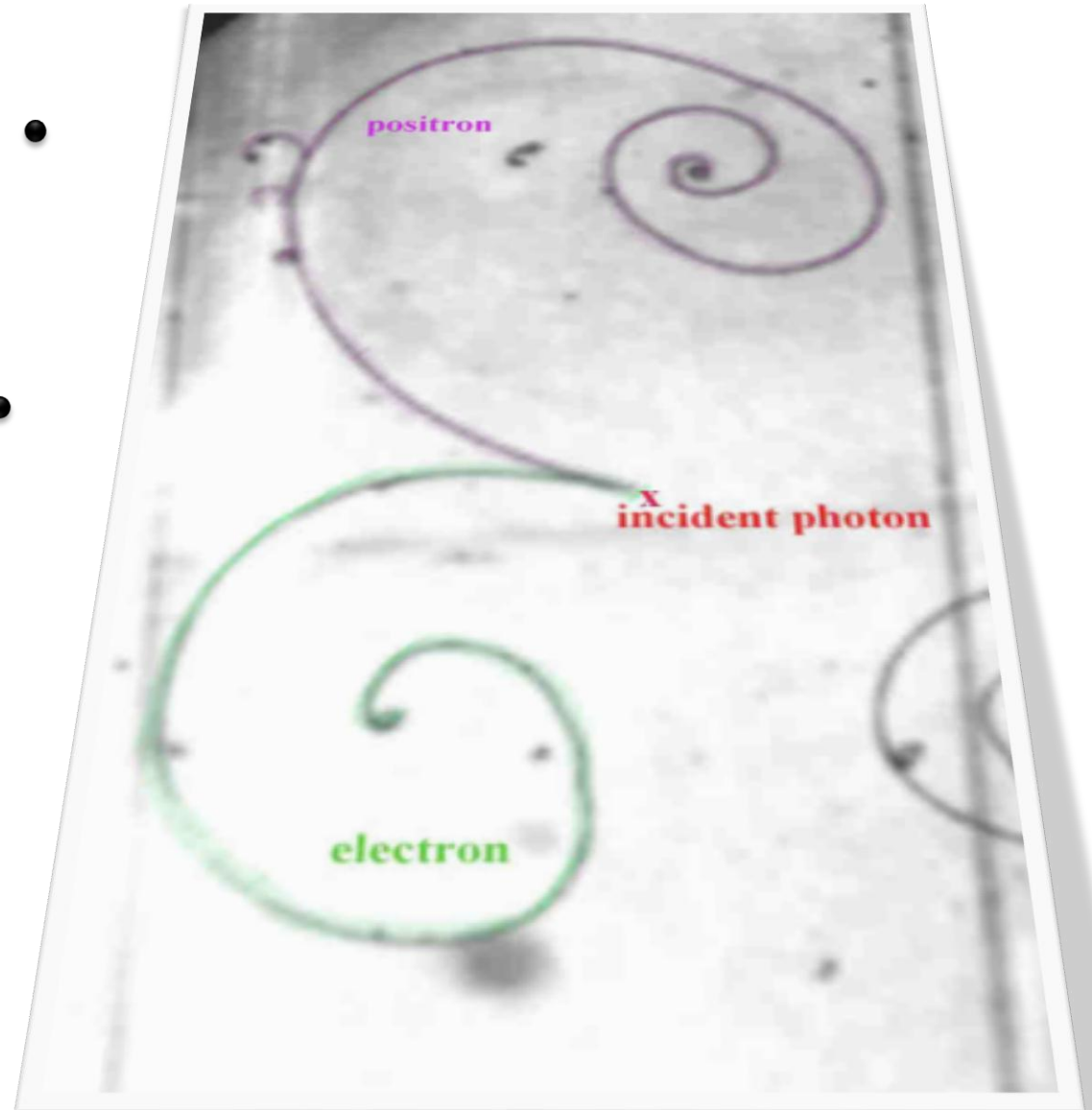
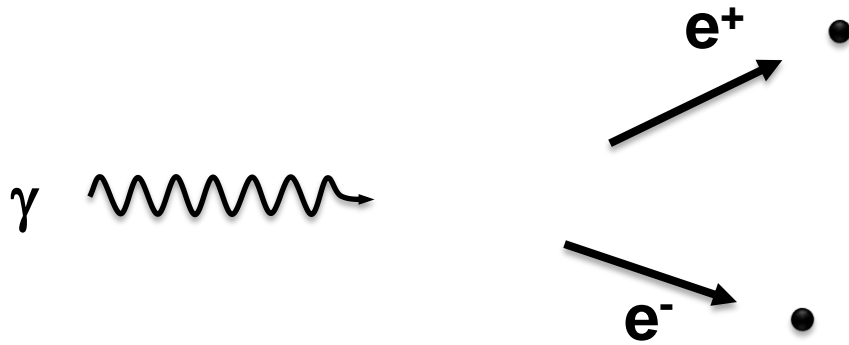


Création de paires

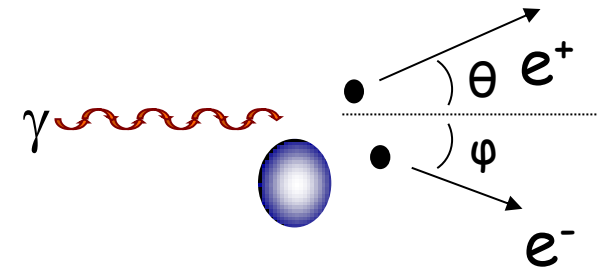


Un photon qui traverse la matière avec une énergie importante peut s'annihiler pour créer une paire électron-positron.

Création de paires



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:

$$\sigma_{\pi} \propto Z^2 \ln(E_{\gamma})$$

A haute énergie :

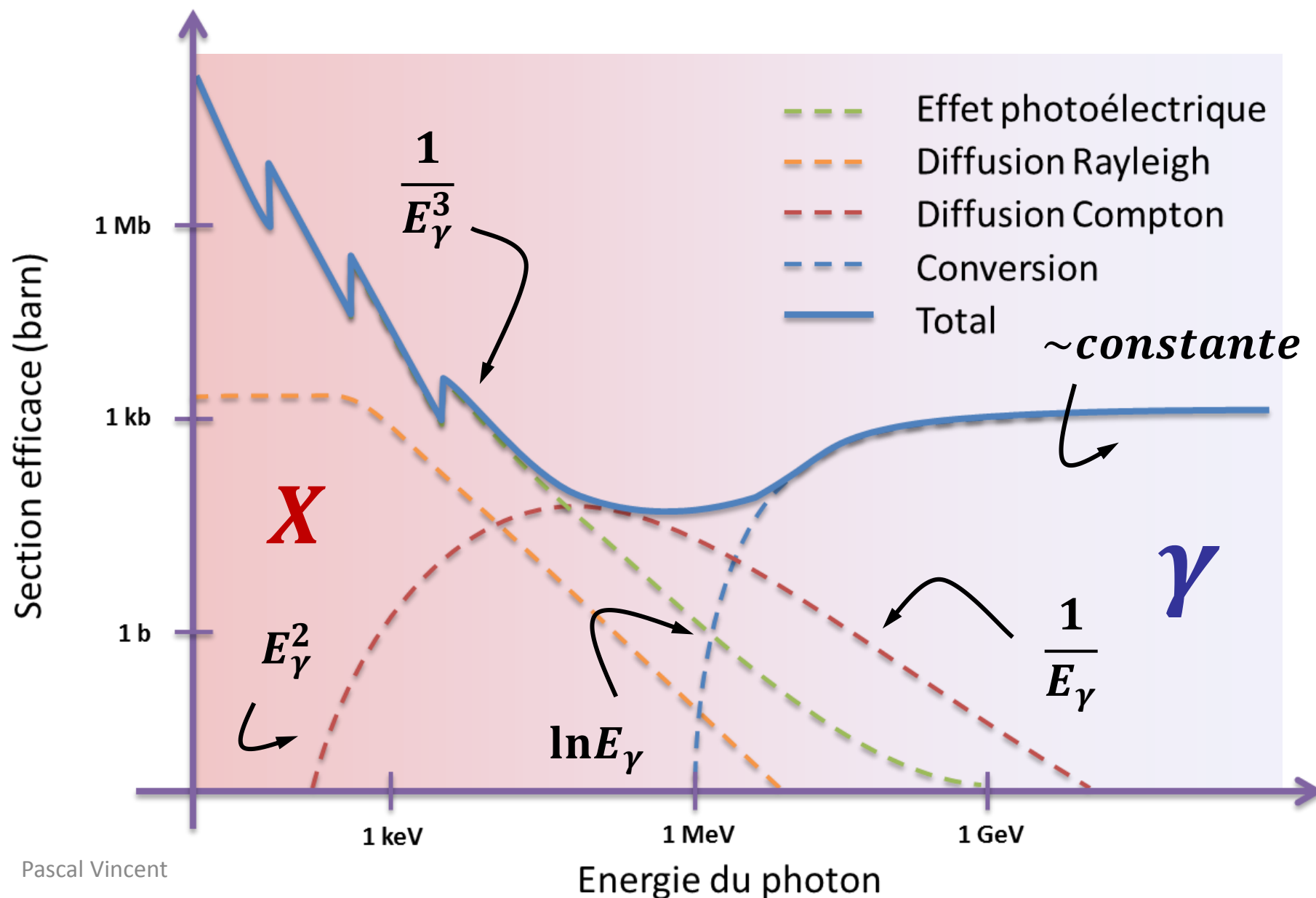
$$\sigma_{\pi} \sim \text{constante en fct de } E$$

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

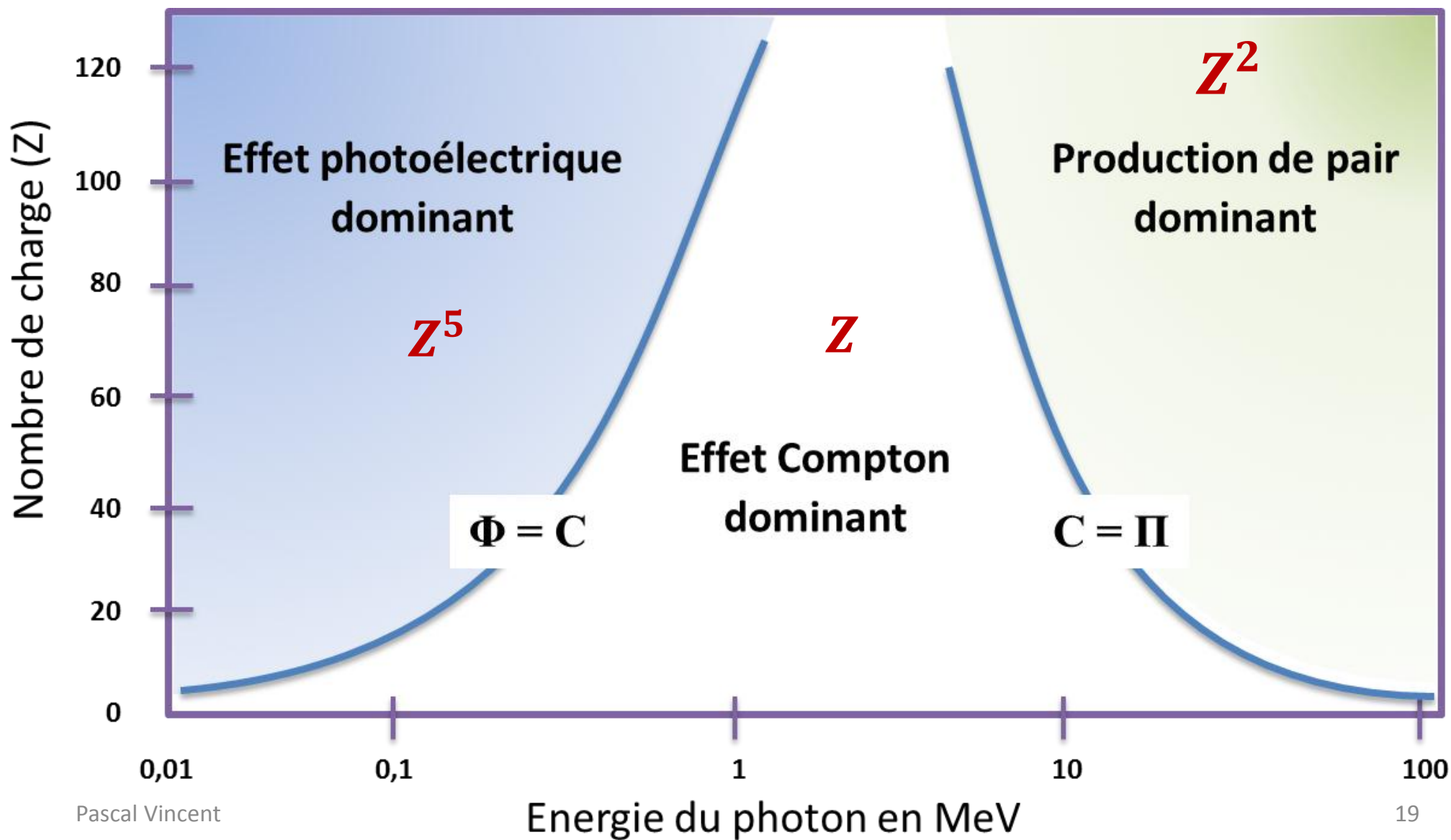
$$E_{seuil} \sim 2m_e = 1,022 \text{ MeV}$$

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

Evolution de la section efficace d'interaction des photons en fonction de l'énergie

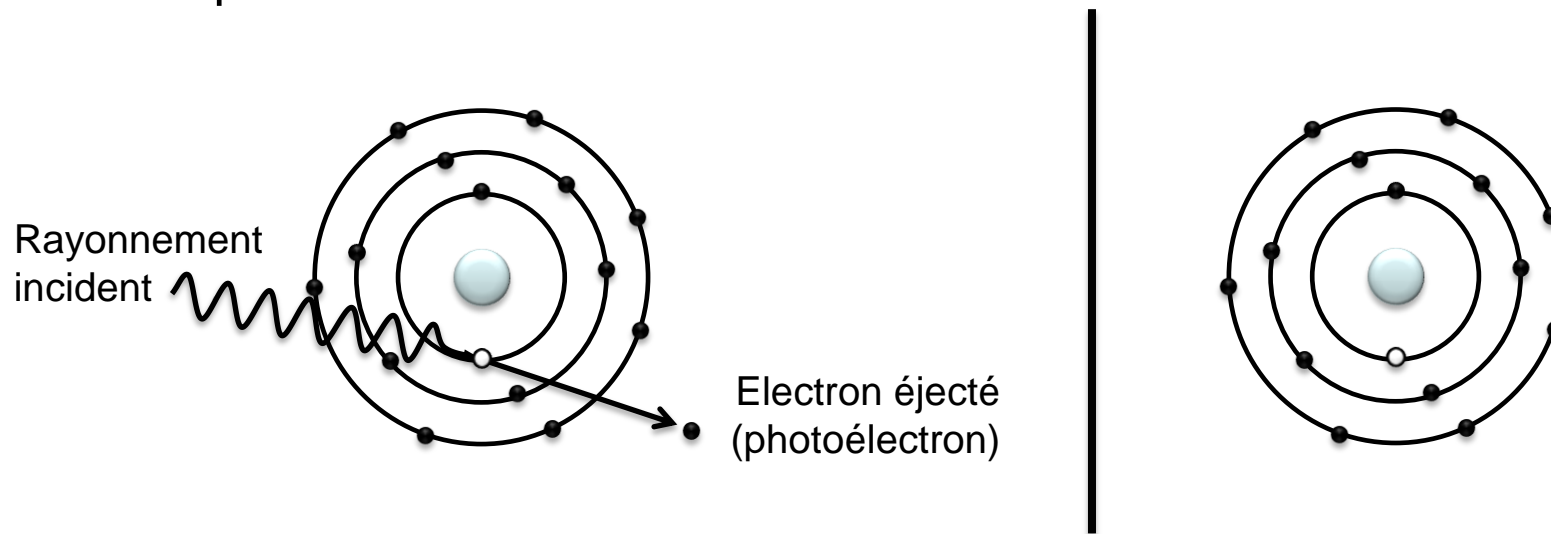


Evolution de la section efficace d'interaction des photons en fonction du milieu traversé.



Que devient d'énergie perdue ?

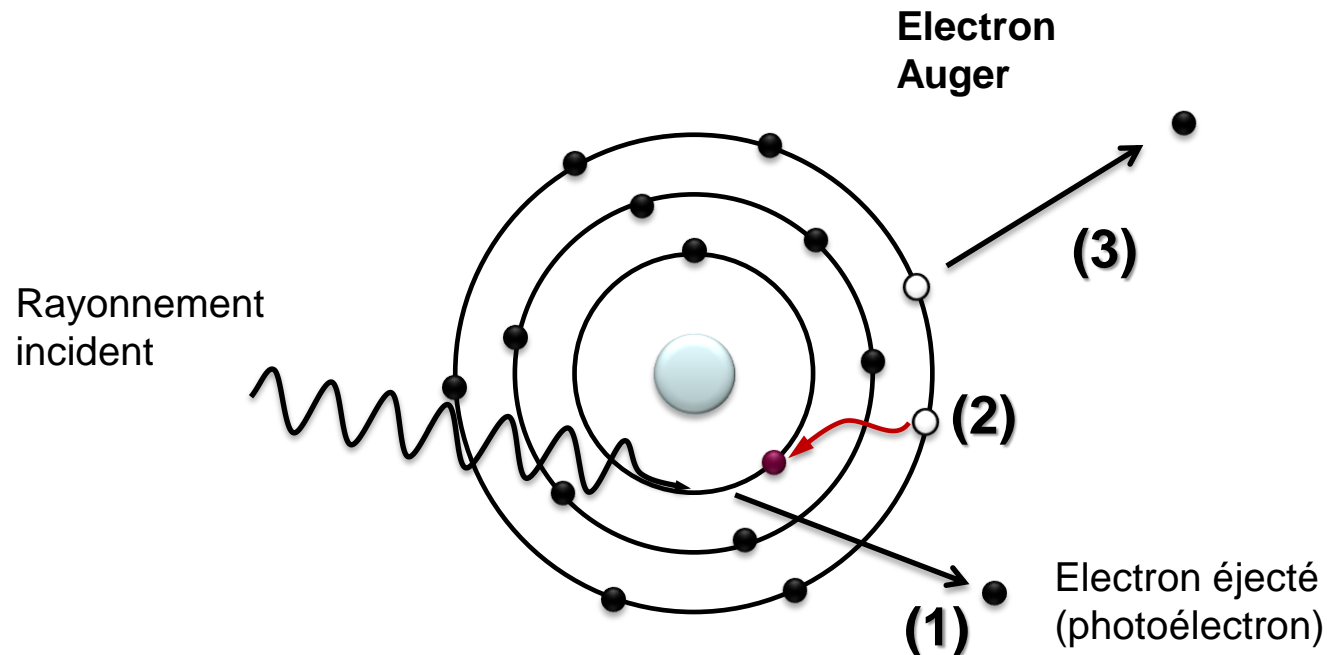
Elle est contenue dans l'état excité de l'atome ionisé. Celui-ci se désexcitera selon deux processus :



- **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.

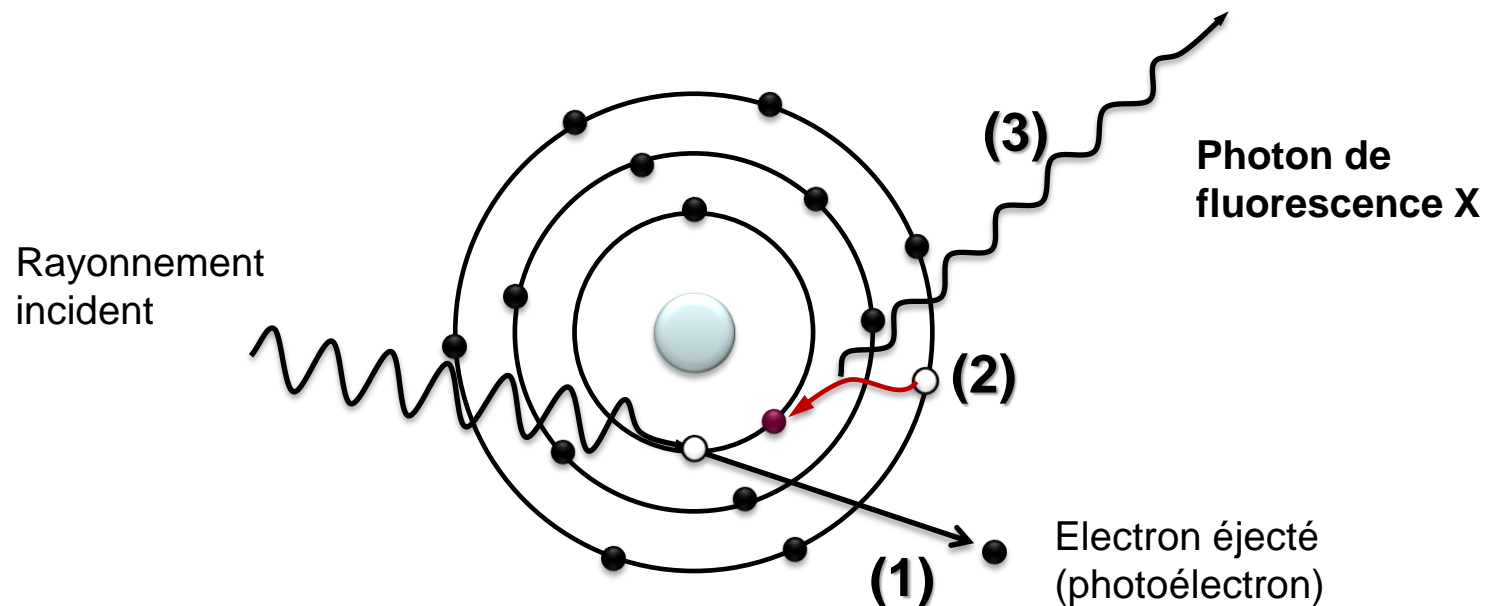
L'émission Auger

Un électron des couches supérieures prend la place qui a été libérée (2).
La variation de son énergie l'éjection d'un électron du cortège électronique (3).



La fluorescence

A la suite d'un processus de ionisation, une lacune est présente dans le cortège électronique de l'atome. Si celle-ci concerne une couche profonde, un électron des couches supérieures prendra la place libre. La variation de son énergie entraîne une émission X.



Exemple 1

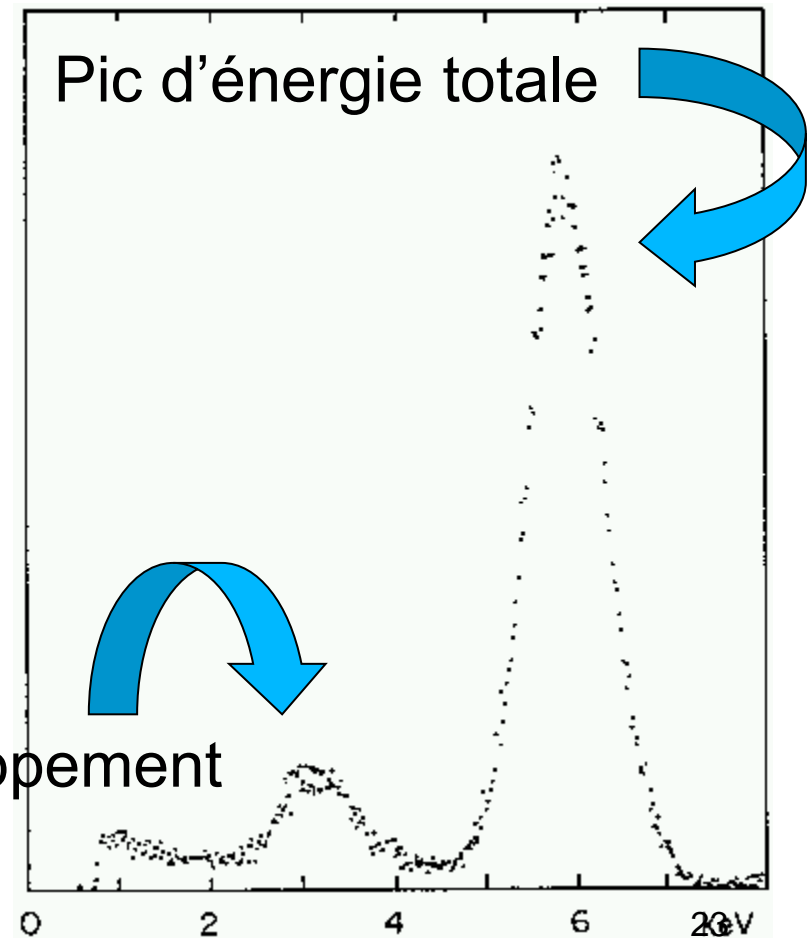
Réponse au rayonnement X du Fer (5.9keV) par une chambre à gaz en mode proportionnel à l'Argon.

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

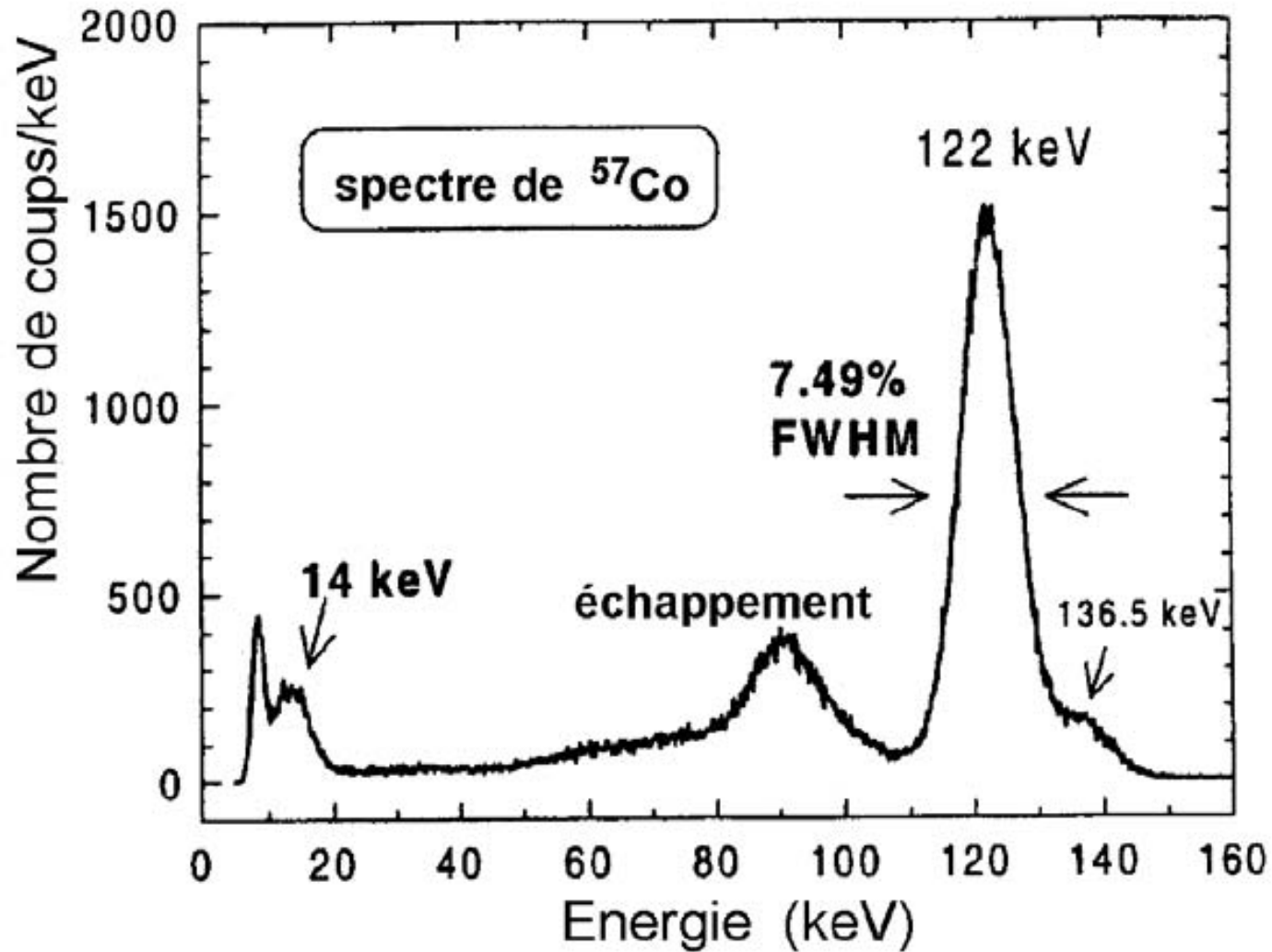
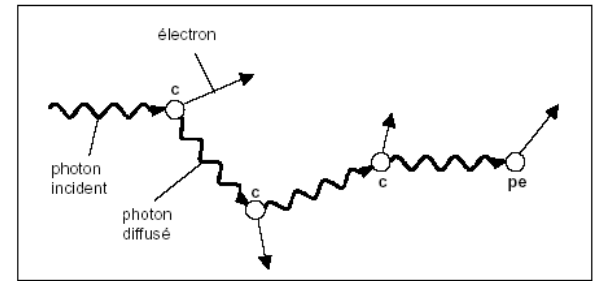
Le pic d'échappement correspond à la perte du photon de fluorescence :

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

Pic d'échappement



Exemple 2



Le parcours dans la matière

**QUE DEVIENNENT LES
POSITONS ?**

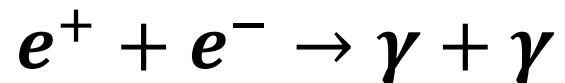
Parcours des positons dans la matière

Les positons sont les antiparticules des électrons. L'antimatière ne coexiste pas avec la matière dans notre univers. Elle s'annihile avec la matière dès qu'elle la rencontre. L'annihilation des positons est contrainte par deux conditions :

Elle intervient avec des électrons (conservation de nombres quantiques).

Le positon s'annihile au repos (c.à.d. qu'il doit au préalable perdre son énergie cinétique dans le milieu).

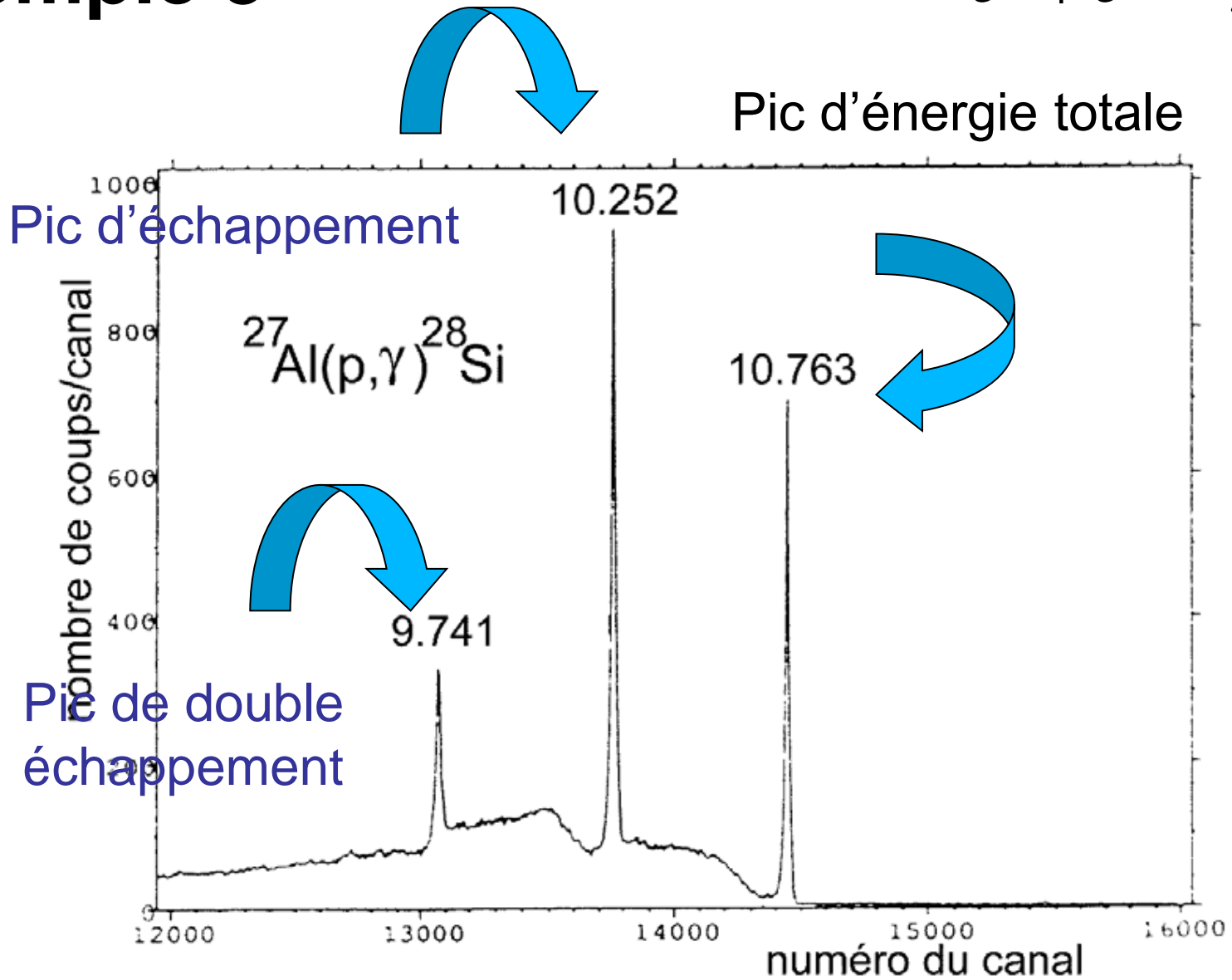
Le résultat de cette annihilation est la production de deux gamma



d'énergie égale à l'énergie de masse de l'électron : $E_\gamma = E_{\gamma'} = 511 \text{ keV}$

Exemple 3

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$



Rayonnement à 10.763 MeV de l'aluminium

Electronthérapie – PET scan

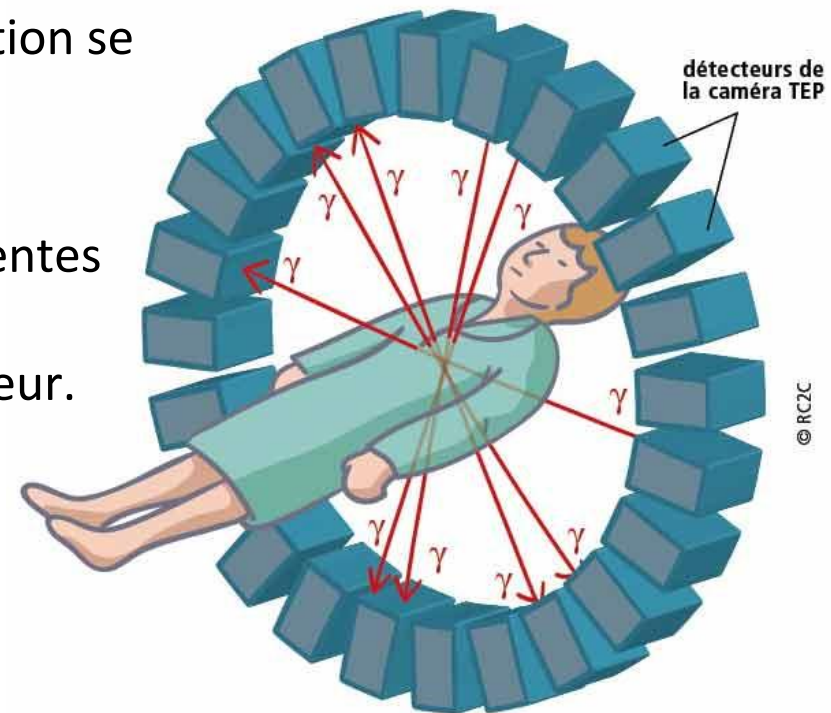
APPLICATIONS

PET-scan (2)

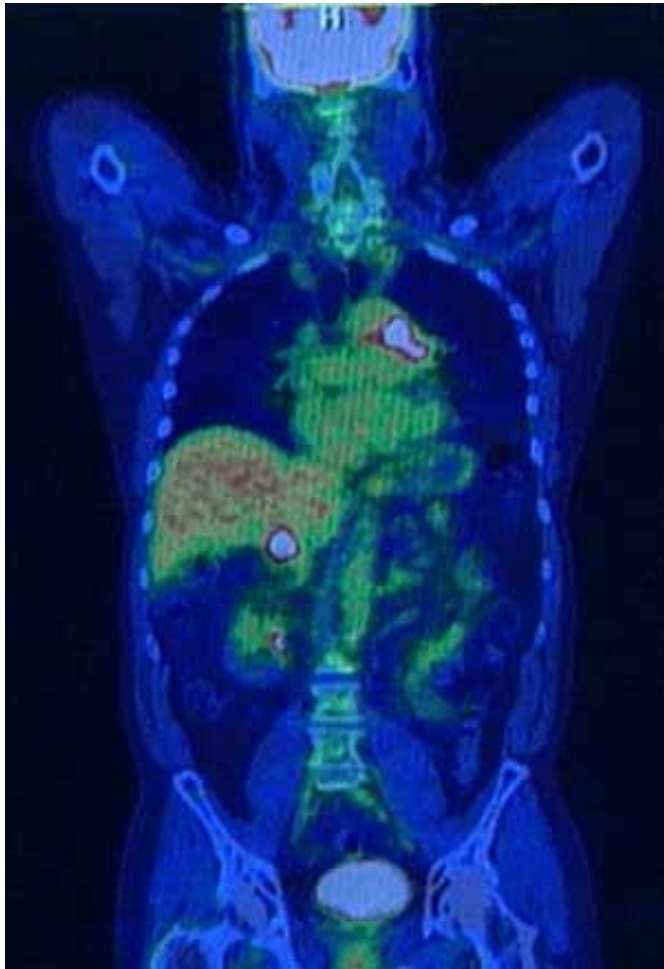
Pour détecter les deux photons émis des détecteurs sont disposés en couronne, autour du patient.

Les photons émis à 180° l'un de l'autre seront détectés par des cristaux opposés et l'endroit précis de l'annihilation se trouve sur une ligne rejoignant ces cristaux.

Grâce à l'enregistrement de ces "lignes" dans différentes directions, le système informatique calcule où s'est produite l'annihilation, et donc l'absorption du traceur.



PET-scan (3)



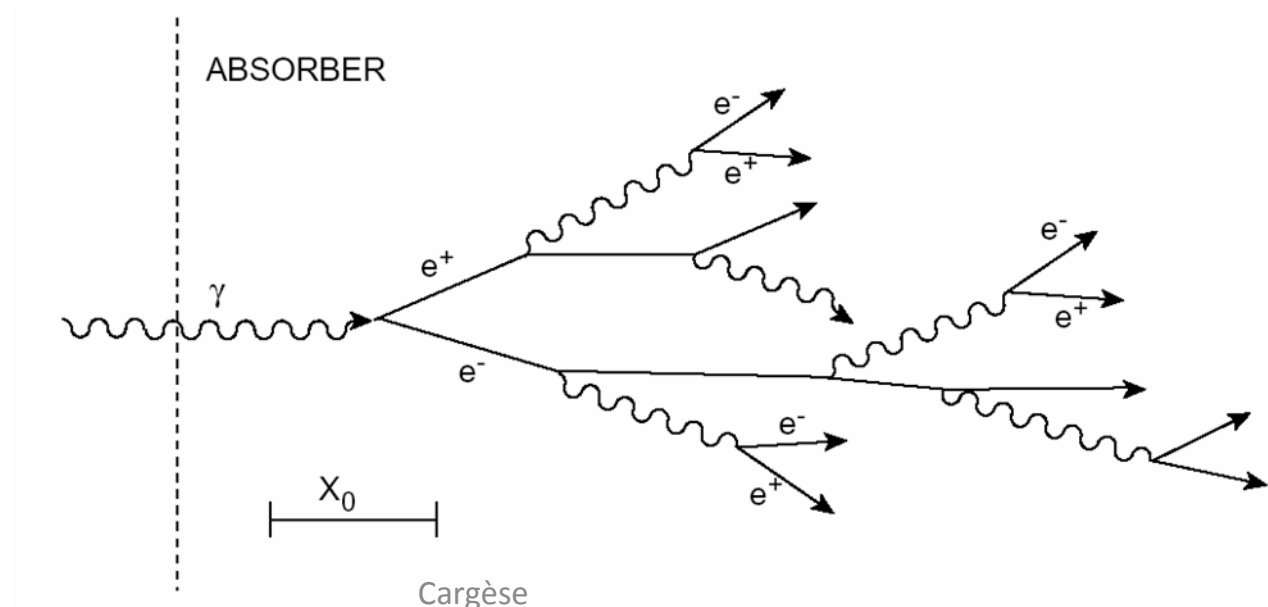
A haute énergie

Gerbes électromagnétiques

À haute énergie (GeV), les électrons perdent leur énergie presque exclusivement par **rayonnement de freinage** et les photons perdent la leur par **production de paires**. Le seuil correspond à l'énergie critique :

$$\frac{(dE/dx)_{rad}}{(dE/dx)_{ion}} \simeq 1$$

La combinaison de ces deux effets résulte en la formation d'une **gerbe électromagnétique** quand un électron ou un photon entre dans un milieu dense.



Développement longitudinal

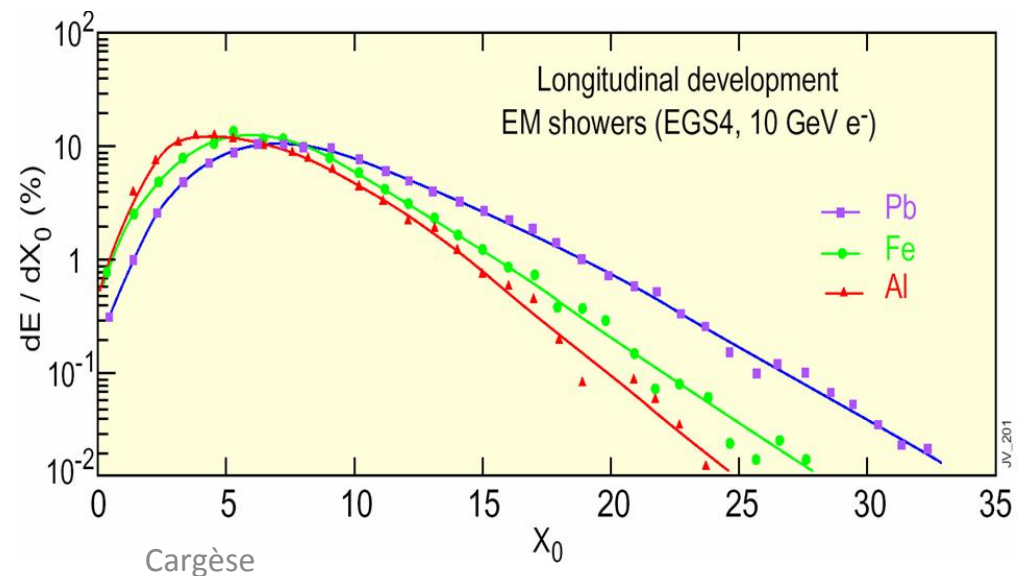
Développement longitudinal : en utilisant des simulations par des techniques Monte Carlo on établit la relation empirique :

$$dE = kx^{a-1}e^{-bx} dx$$

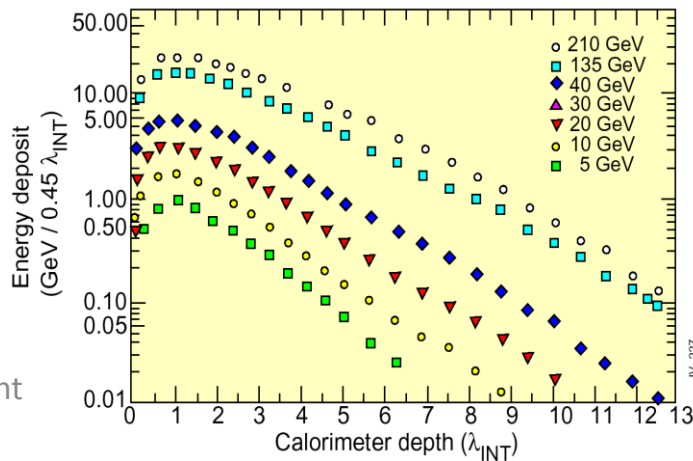
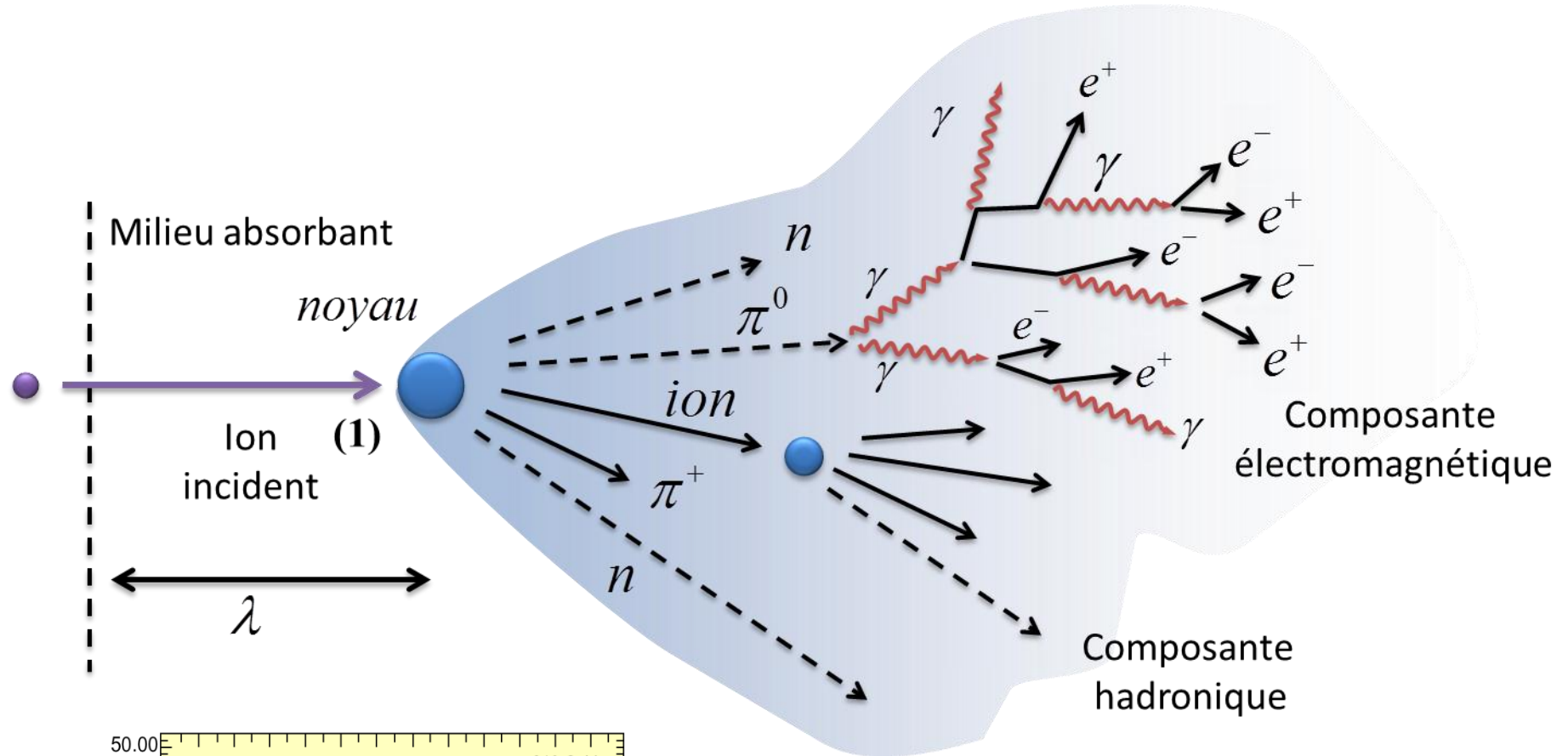
Le position du maximum de développement est donné par :

$$L_{max} = 3,9 + 1,01 \times \ln E_0$$

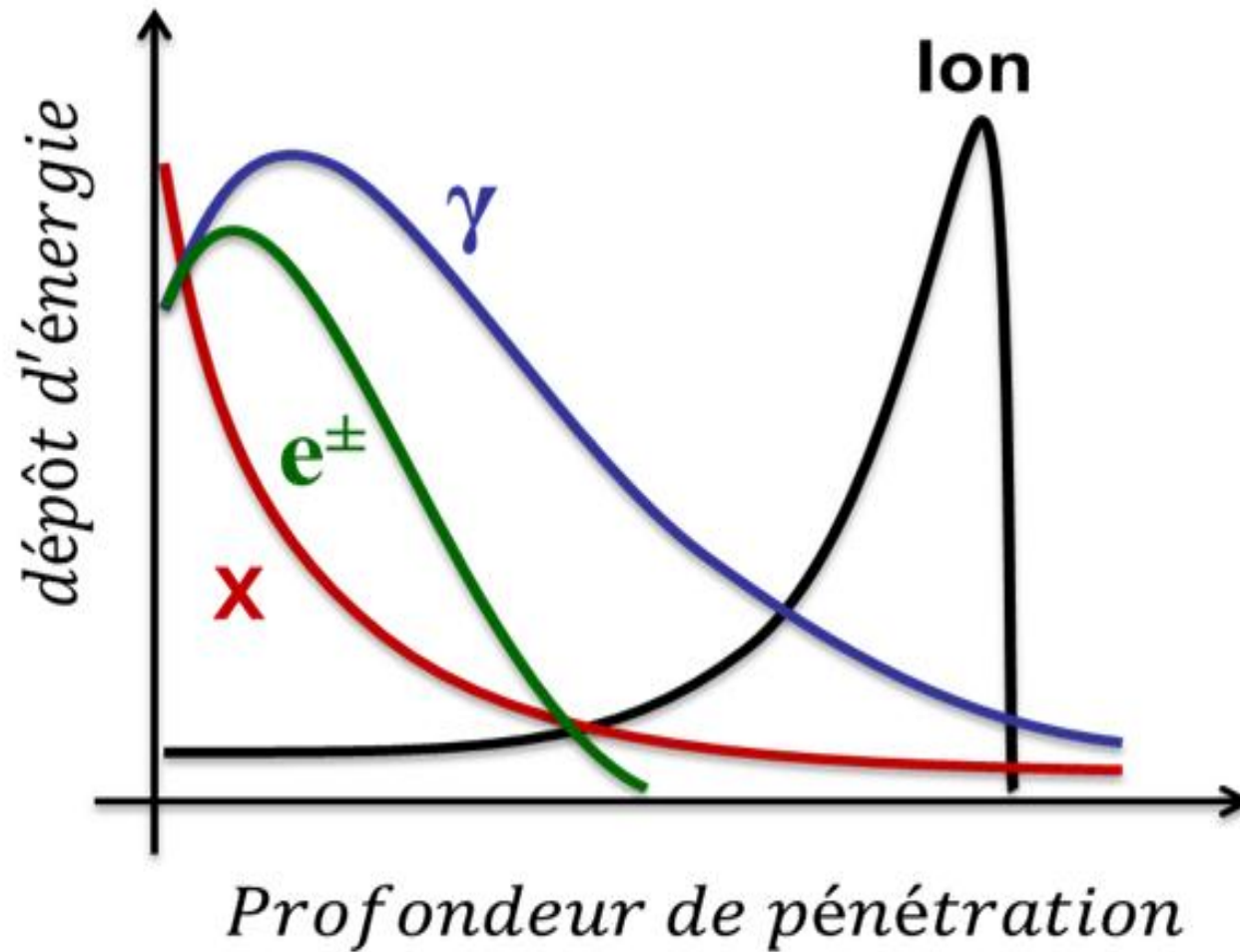
Cette relation n'est pas vérifiée à basse énergie où les gerbes se propagent sur des distances plus grandes.



Gerbes hadroniques



Résumé du comportement des différents types de particules



Interaction des neutrons avec la matière

Les particules neutres

Photons

- Effet photoélectrique
- Effet Compton
- Création de paires

Neutrons

- Diffusion élastique
- Absorption
- La fission

Neutrinos

- Les interactions faibles

Les particules chargés

- L'excitation

- Ionisation

- Cherenkov

Les chargés légers (e^\pm)

- Bremsstrahlung

- Radiation de transition

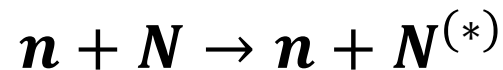
Les particules instables

- Le cerveau

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. Les types d'interaction sont les suivants :

- ✓ 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 :

$$\Delta E_{max} = E_0 |1-\alpha| \quad \Delta E_{min} = 0$$

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 ($A \gg 1$) : $\alpha \sim 1 - O(1/A)$

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

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	σ (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	-

Les neutrons

APPLICATIONS

Imagerie par les neutrons

Les neutrons permettent d'obtenir des images d'organismes (animal et végétal) avec un fort contraste :

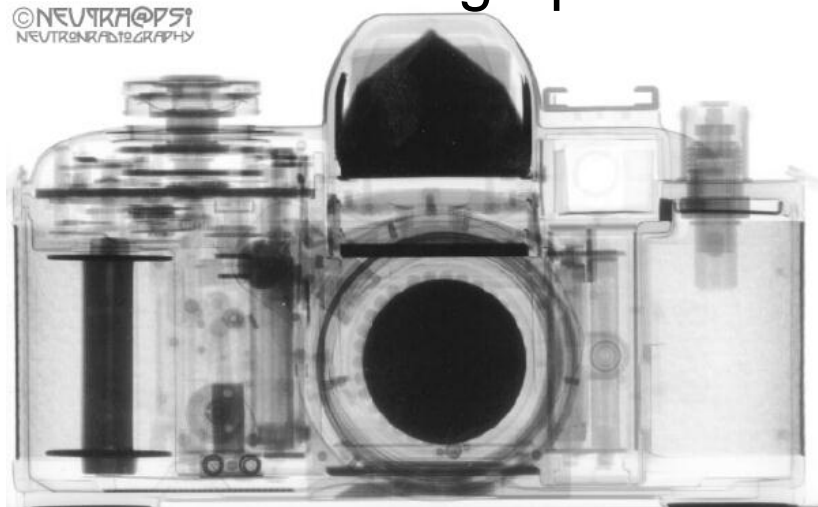


Neutronographie d'un lys

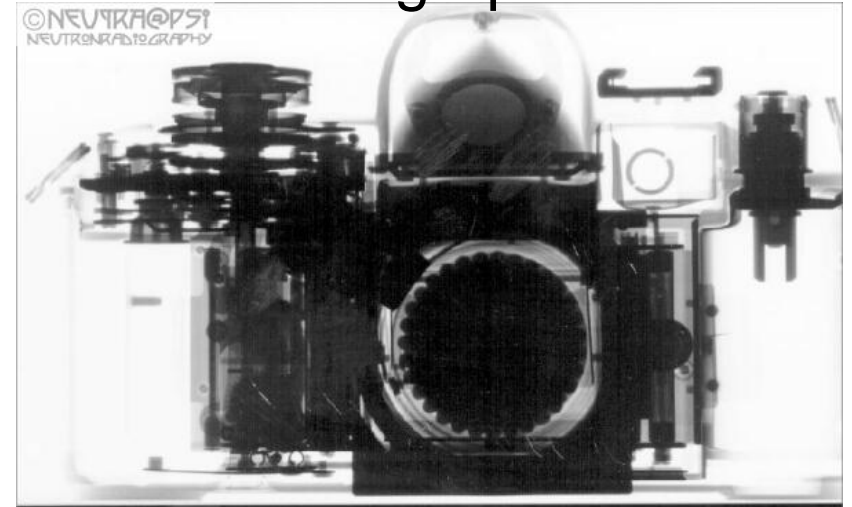
Imagerie par les neutrons

Les neutrons sont « sensibles » aux éléments légers alors que les photons sont très atténués par des éléments lourds.

Neutronographie



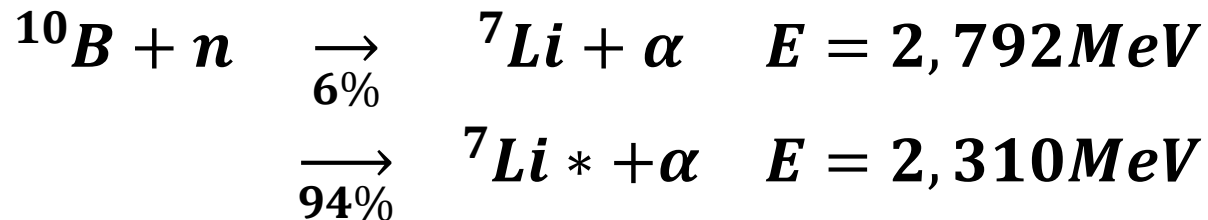
Radiographie X



La boroneutrothérapie

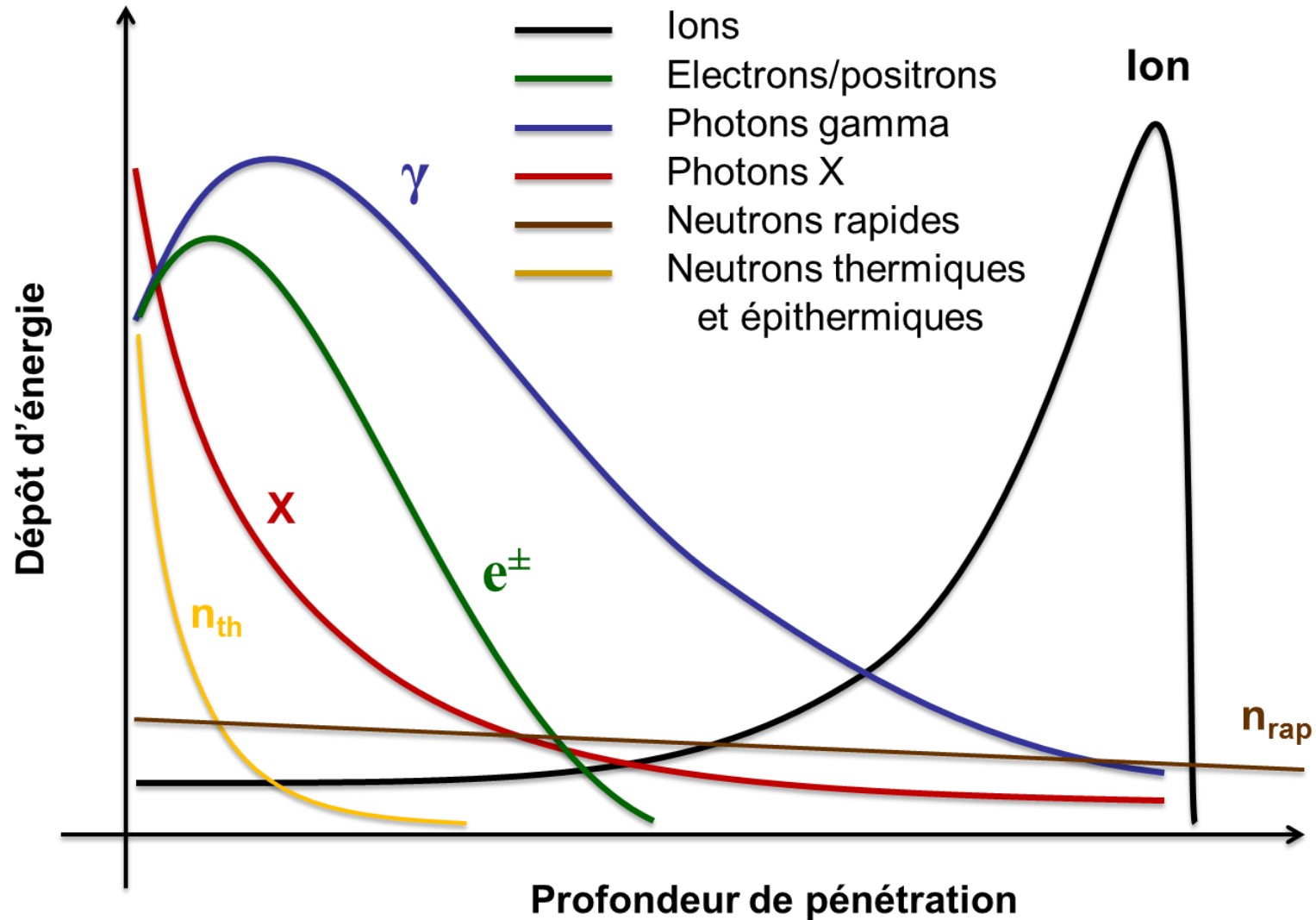
La boroneutrothérapie consiste à transfuser un composant contenant du bore jusqu'à l'accumulation de ce produit dans des tissus cancéreux.

Le cancer est ensuite irradié à l'aide de neutrons obtenus à partir d'un réacteur nucléaire. Cela provoque la scission des atomes de bore au sein du tissu cancéreux suite à la réaction de capture neutronique du bore.



Les particules en résultant (Li et particules alpha) provoquent un rayonnement au sein du tissu tumoral qui détruit les cellules cancéreuses.

Résumé



Interaction des neutrons avec la matière

Les particules neutres

Photons

- Effet photoélectrique
- Effet Compton
- Création de paires

Neutrons

- Diffusion élastique
- Absorption
- La fission

Neutrinos

- Les interactions faibles

Les particules chargés

- L'excitation

- Ionisation

- Cherenkov

Les chargés légers (e^{\pm})

- Bremsstrahlung

- Radiation de transition

Les particules instables

- Le cerveau

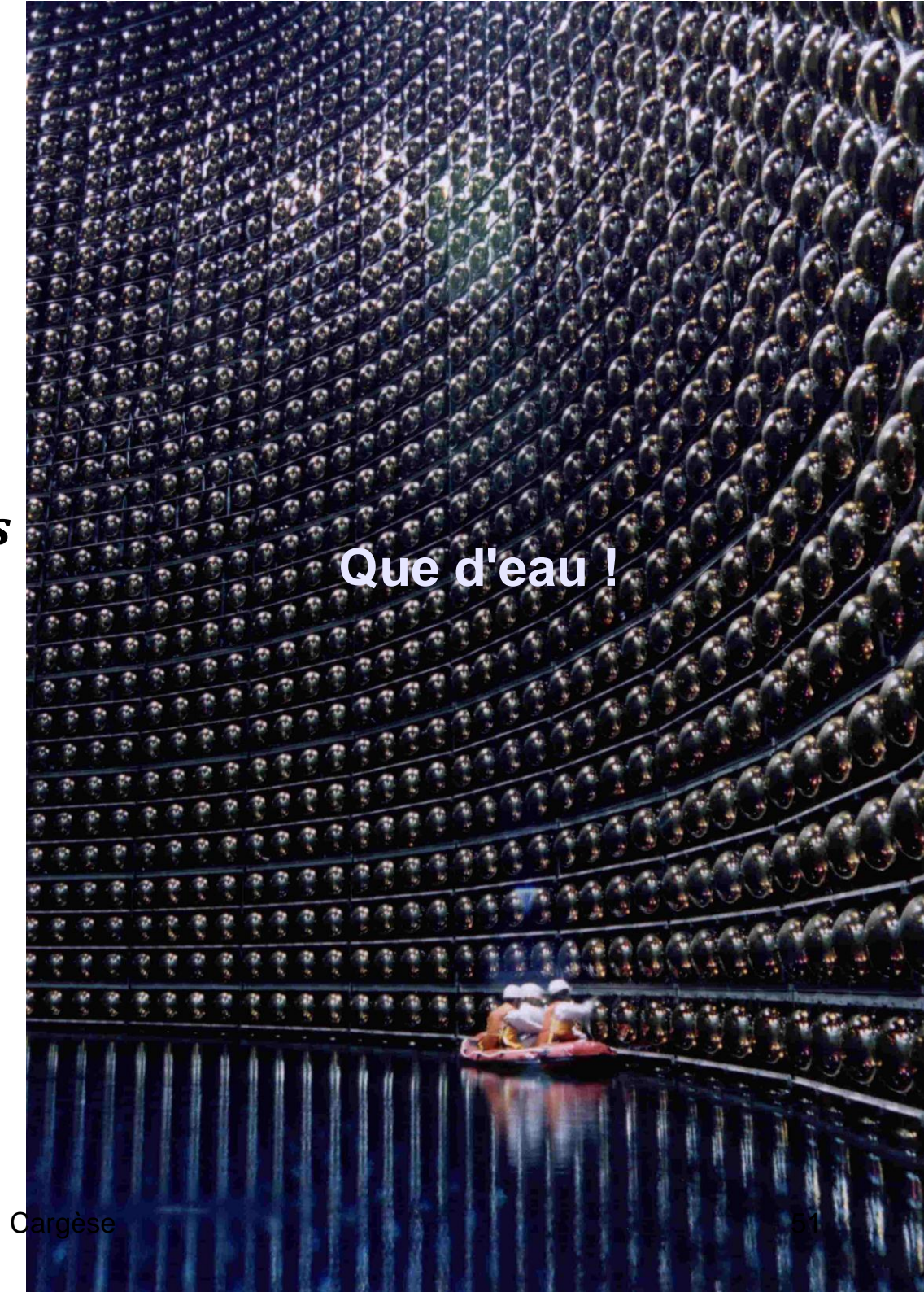
Les neutrinos

section efficace :

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

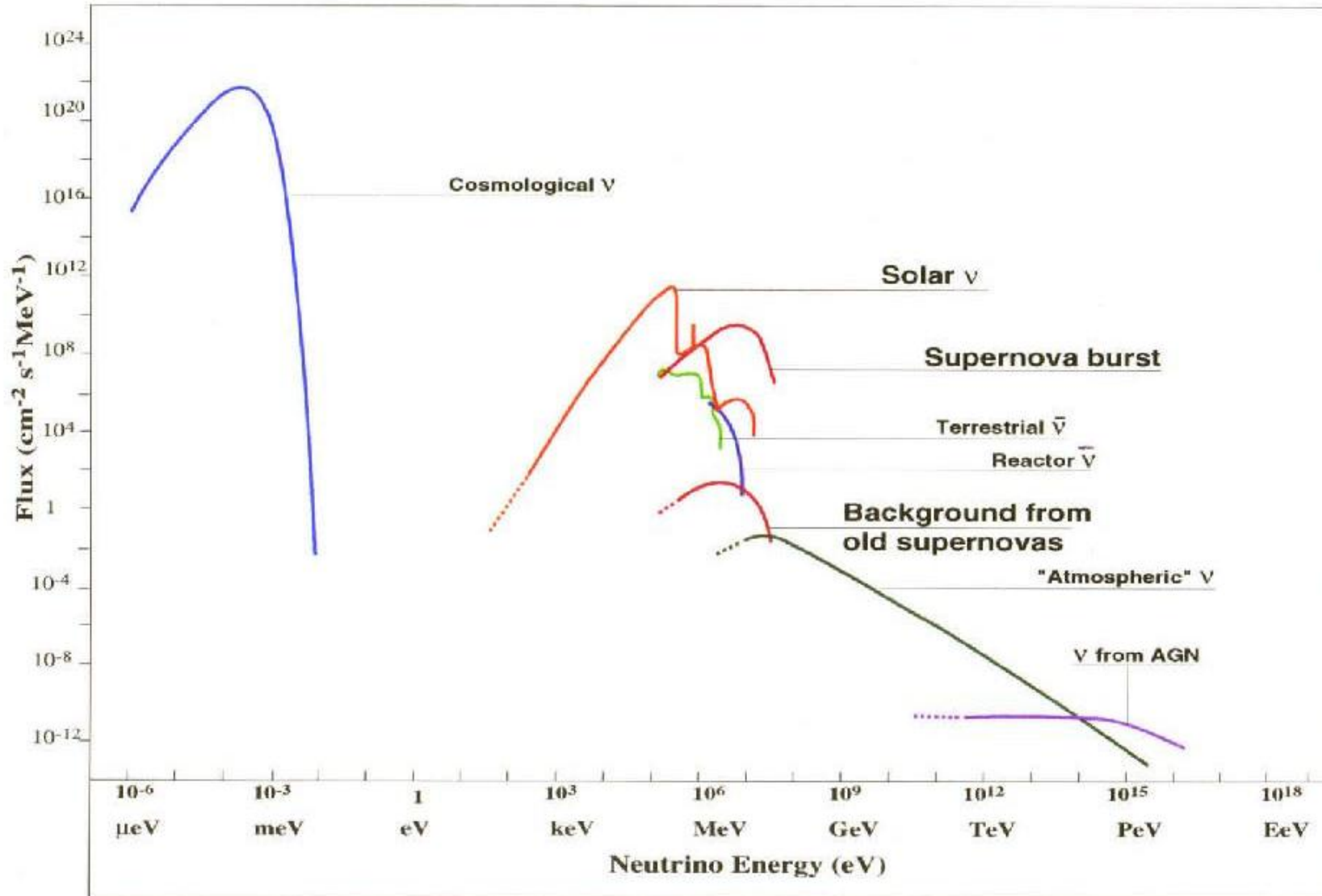
400 000 milliards de ν
solaires par seconde.

→ **détecteurs le plus massif possible, enterrés (pour limiter le bruit de fond).**



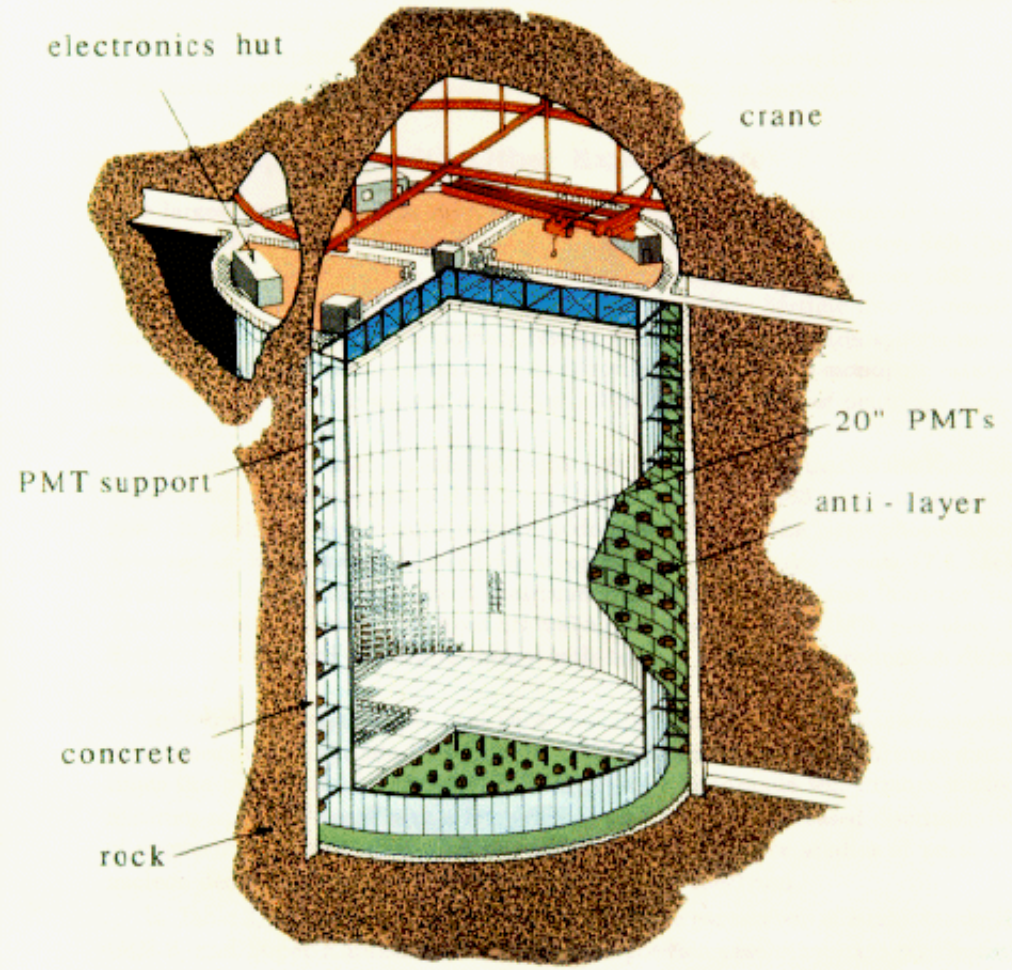
Que d'eau !

NEUTRINOS ASTROPHYSIQUE



50,000 ton Water Cherenkov Detector

11,200 20" PMTs



Super-Kamiokande

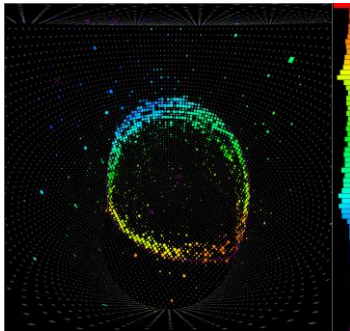
50 000 tonnes d'eau.

39.3 m Φ – 41.4m de hauteur

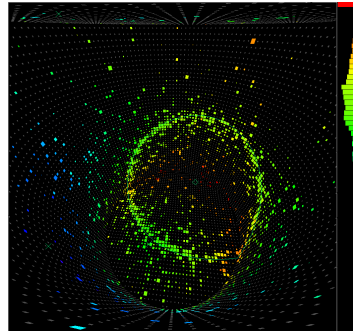
11 146 PM

1km sous terre : réduction du nombre de rayons cosmique
 $1/10^5 \rightarrow 1.88 \text{ Hz}$

eau = cible+détecteur.



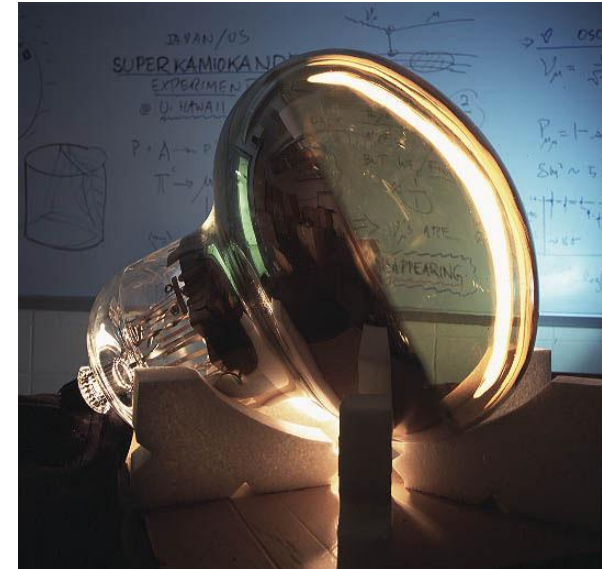
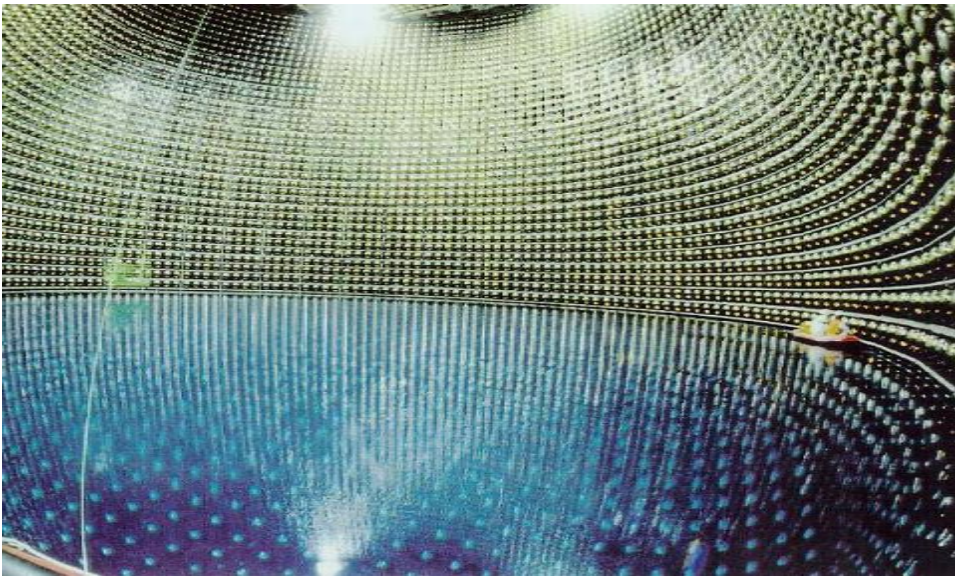
Pascal Vincent



Cargèse

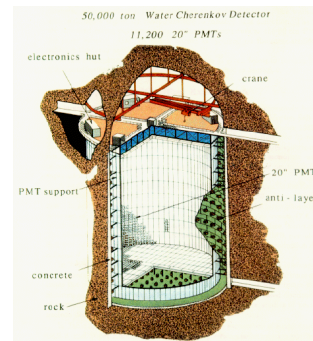
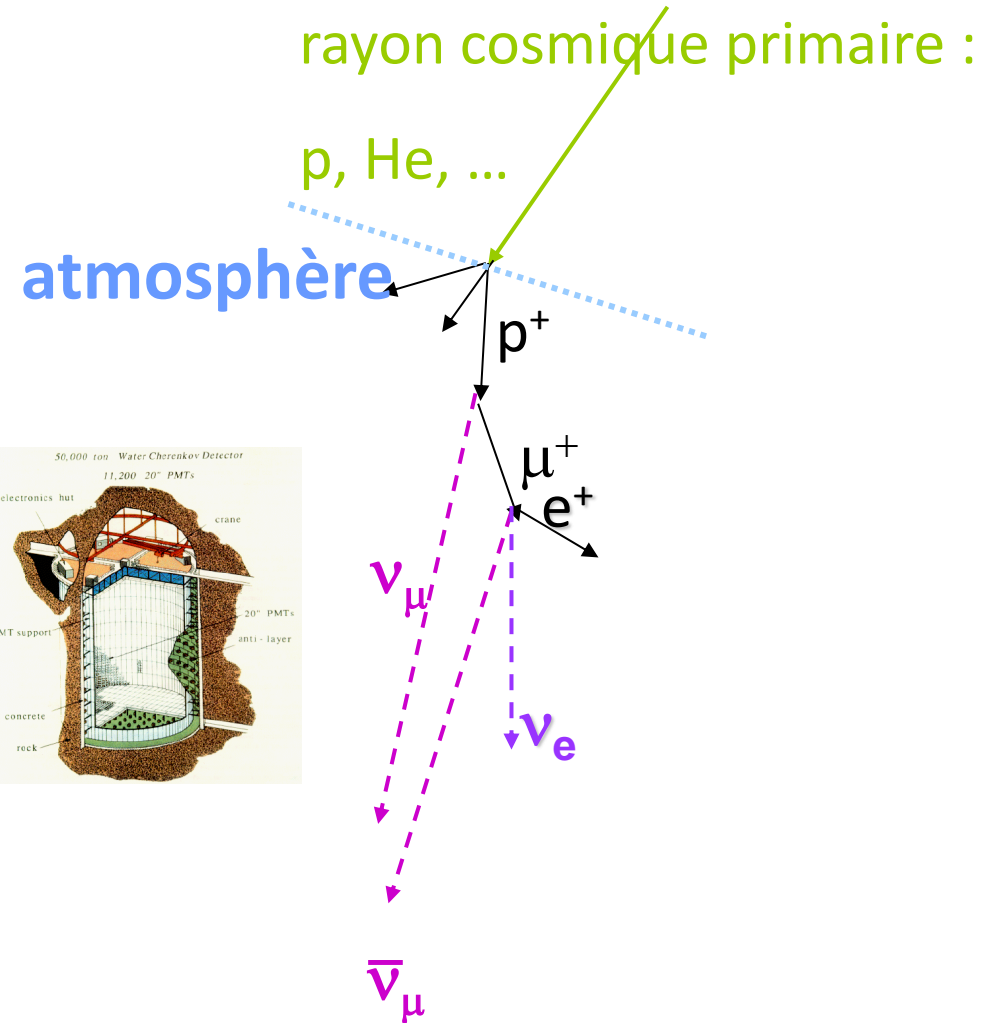
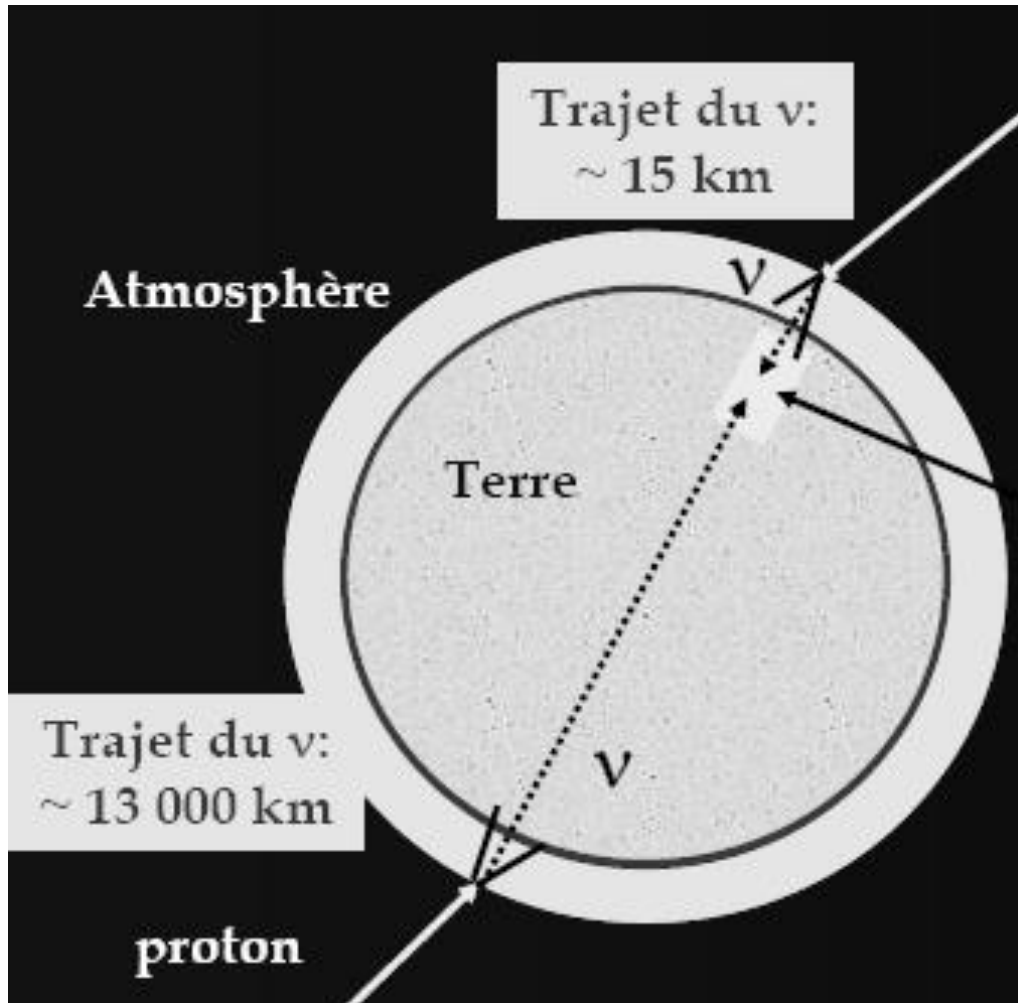
Super-Kamiokande

Les photomultiplicateurs ont été spécialement conçus par la compagnie Hamamatsu pour les besoins de cette expérience.



**100 000 neutrinos atmosphériques par seconde
30 interactions par jour**

Principe de la mesure

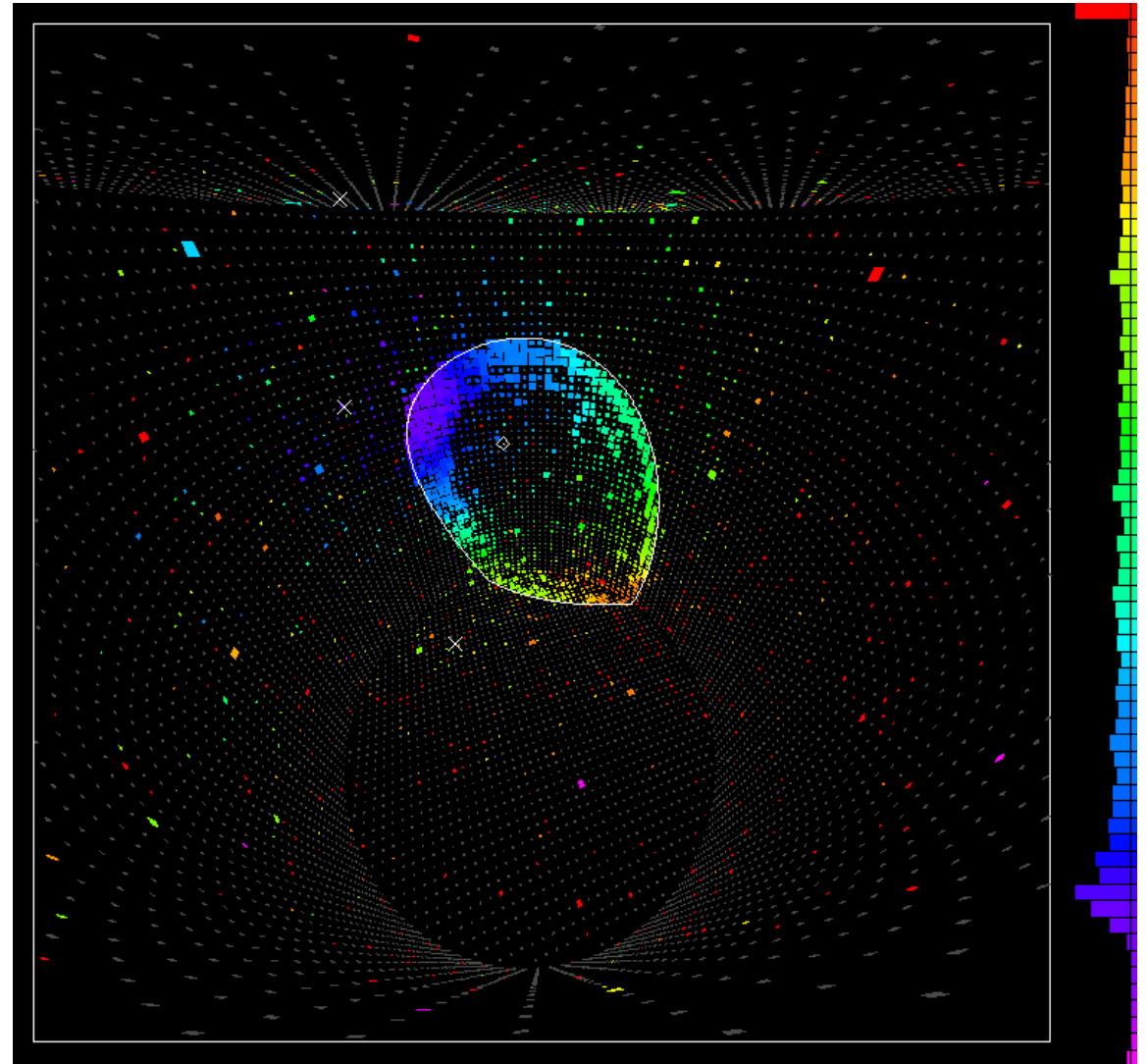


Super-Kamiokande

1063 MeV neutrino
interagissant avec un
proton de la cible.
Production d'un muon de
1032 MeV muon.

L'échelle de couleur donne
le temps d'enregistrement
des signaux dans les PM
entre 987 et 1080 ns.

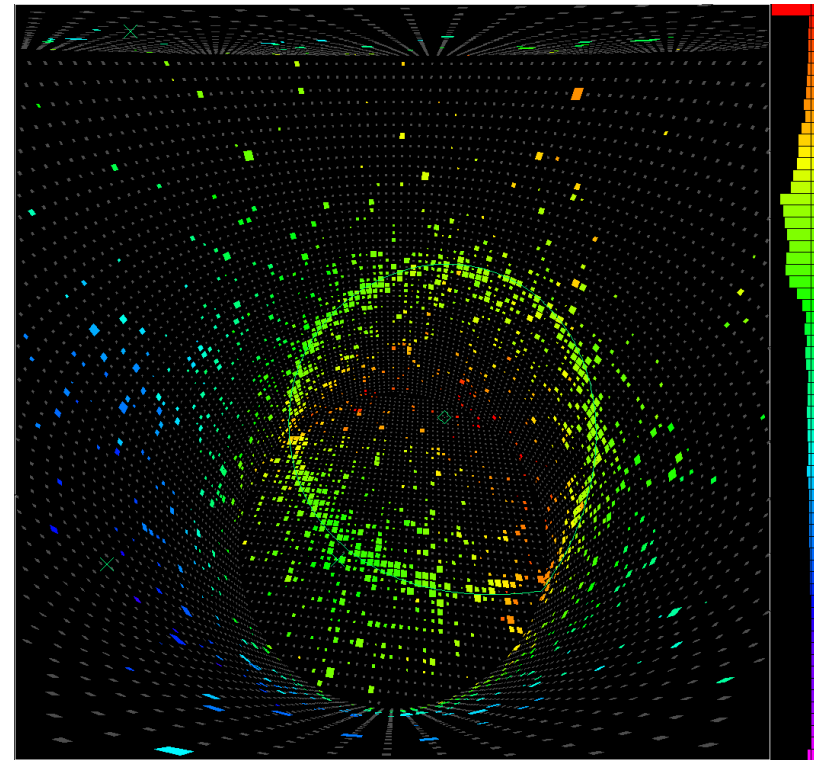
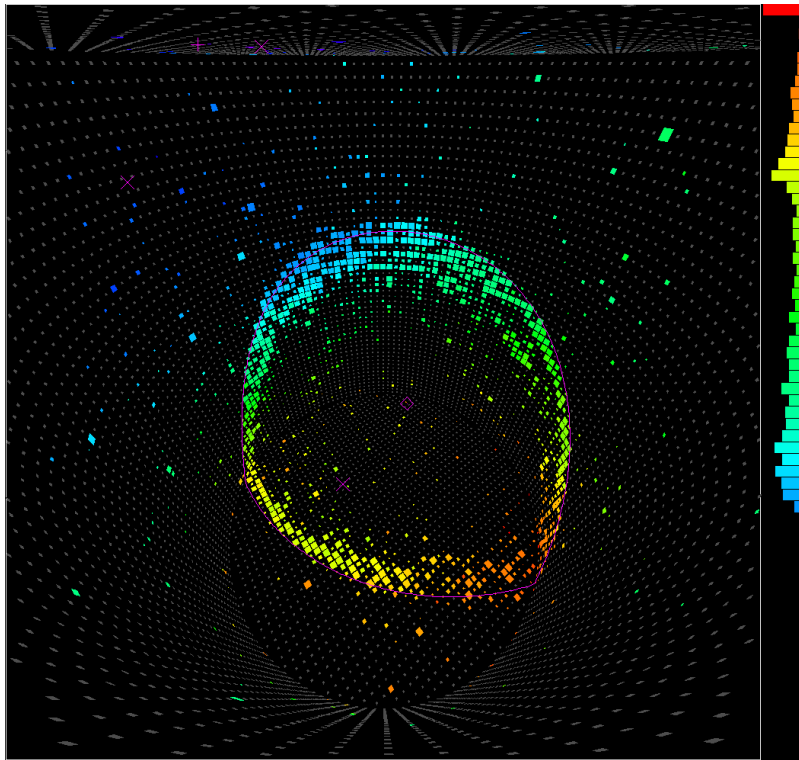
PMTs proches du vertex
enregistre un signal avant
les autres.



Super-Kamiokande

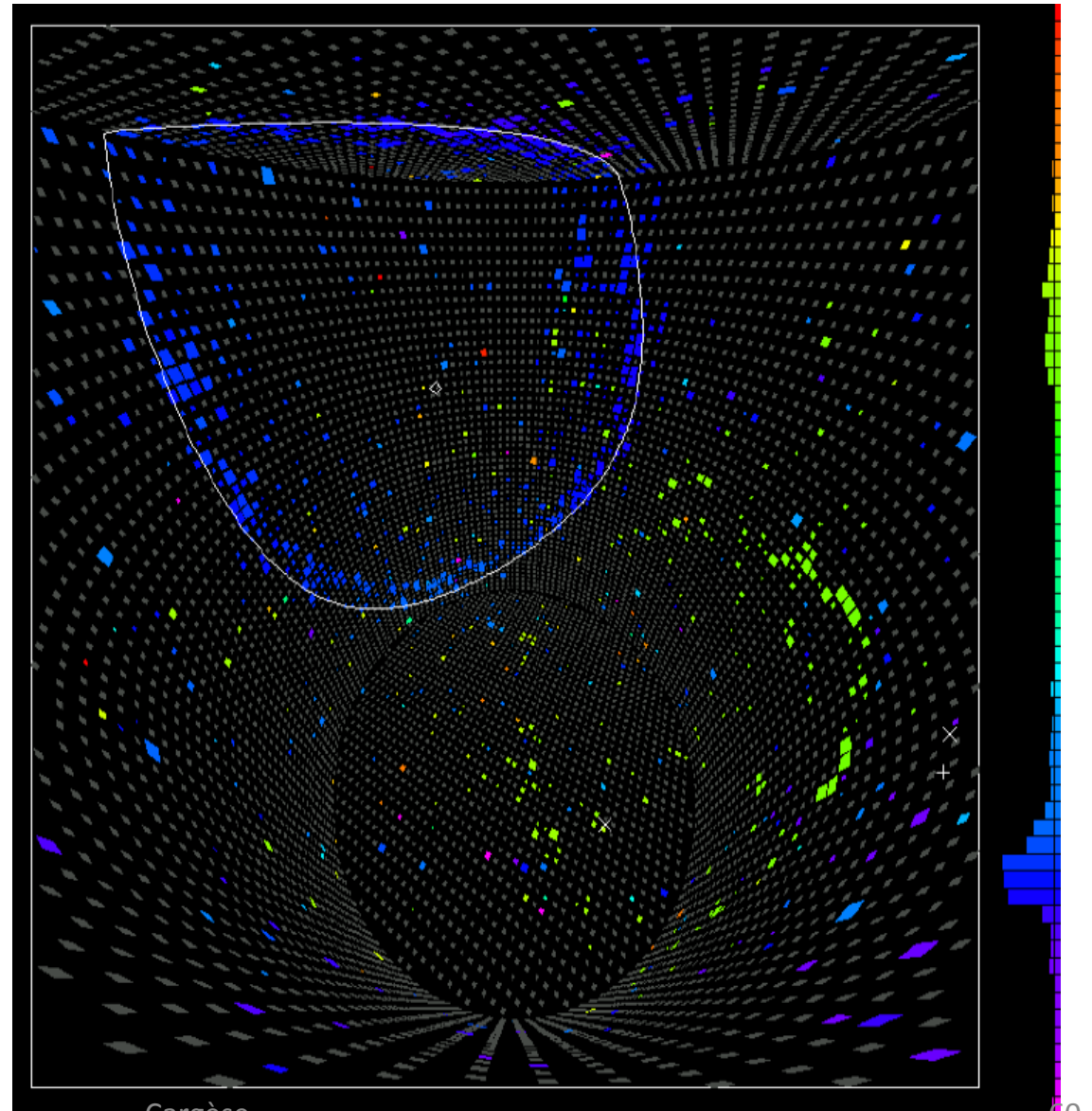
Muon

Electron

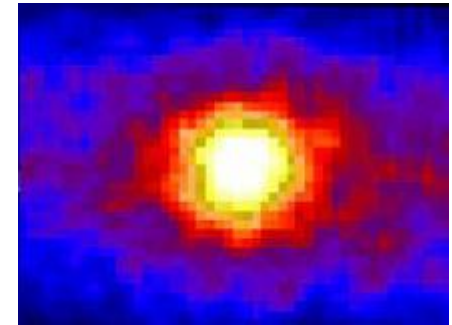
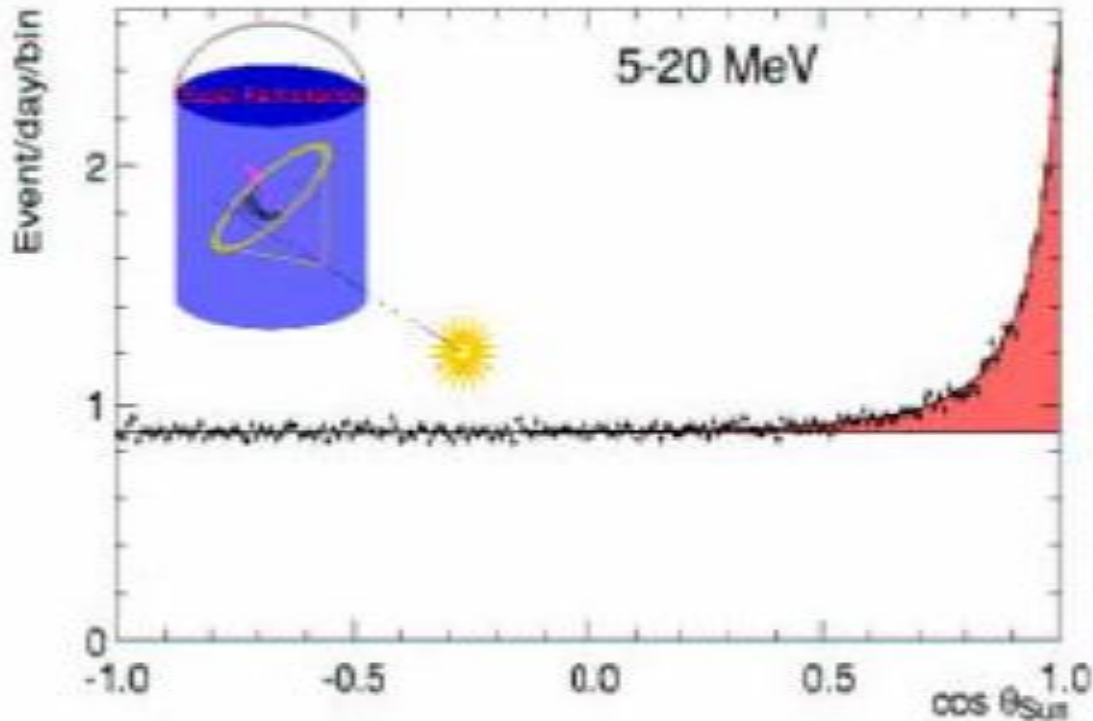


Super-Kamiokande

Superposition d'un muon
et d'un electron.



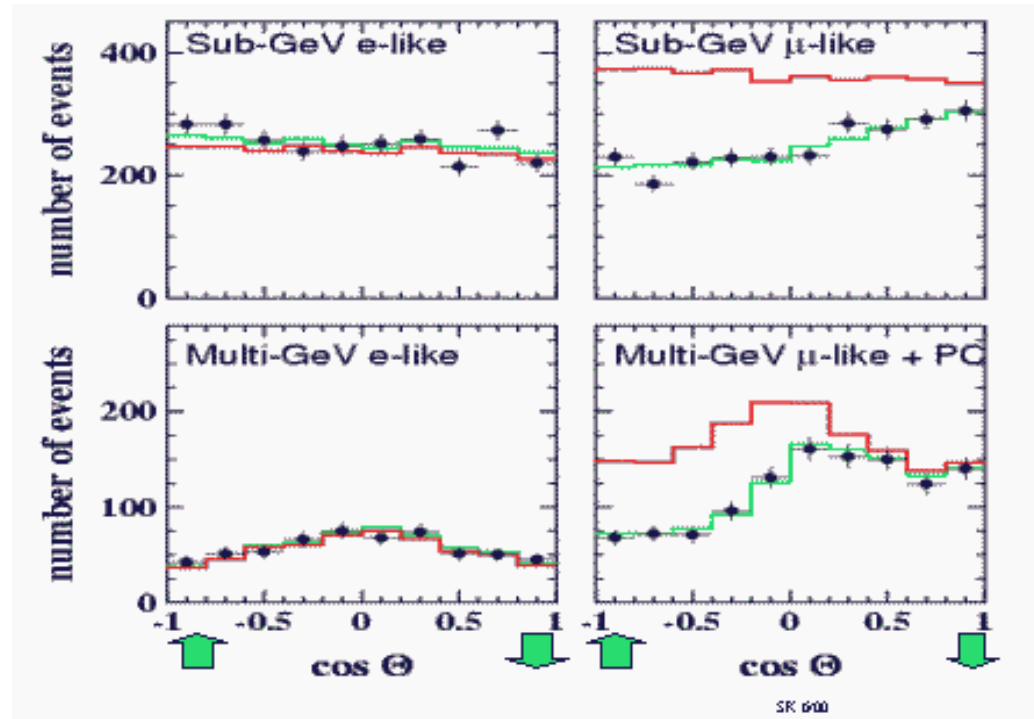
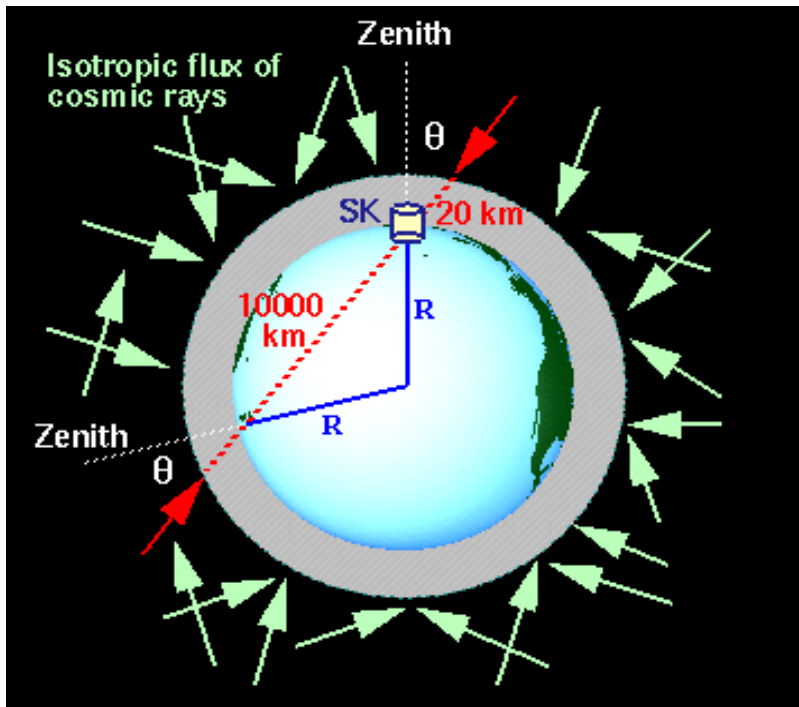
Super-Kamiokande



**Electrons produits par
les neutrino solaires (ν_e).
=> le soleil est bien un
moteur de fusion
nucléaire.**

**Le soleil vu par SuperK,
1000 m sous terre (1500
jours de
pause !)**

Super-Kamiokande



ν_e O.K. !

ν_μ déficit !

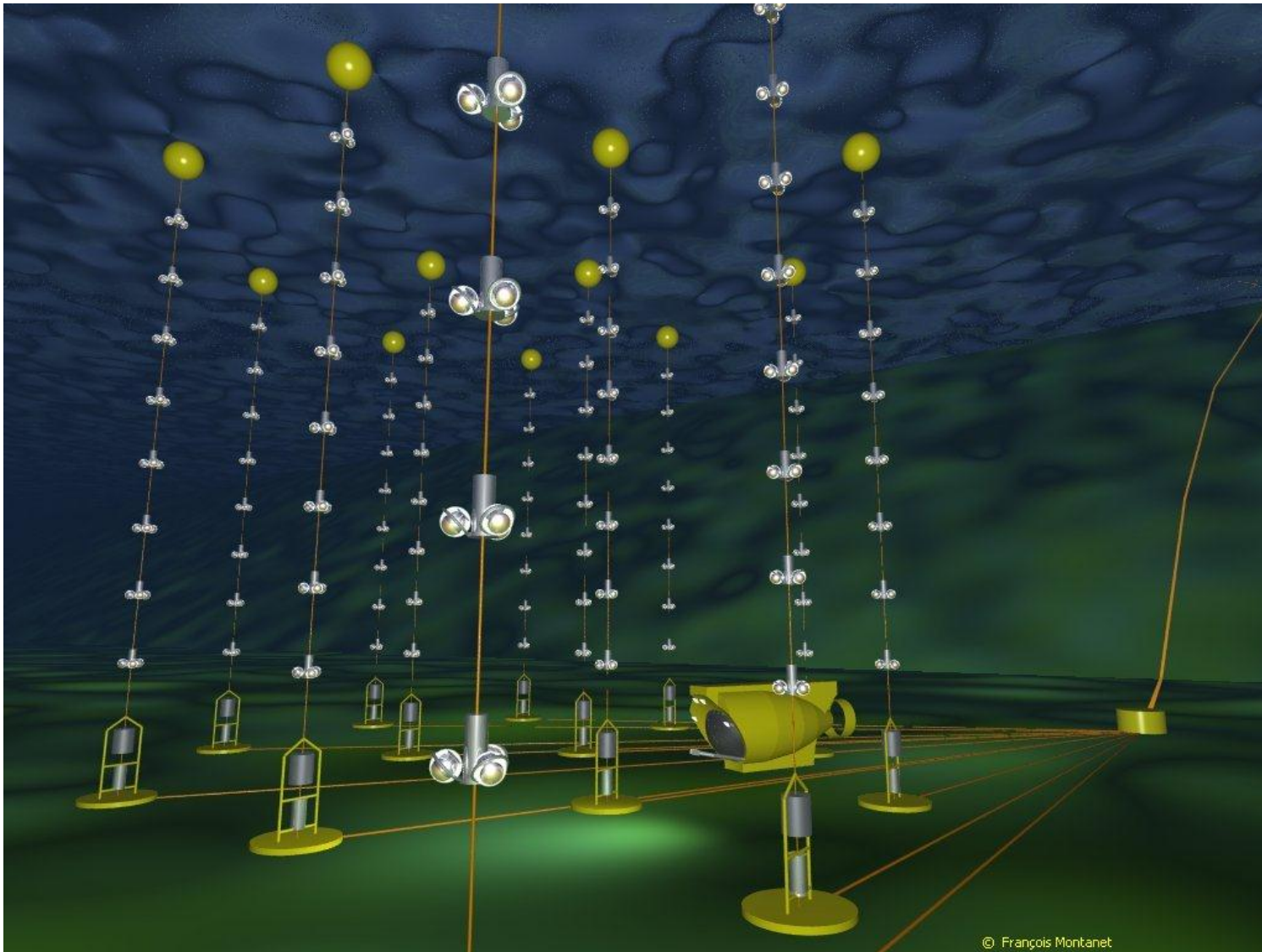


ANTARES

10 lignes de 450 m

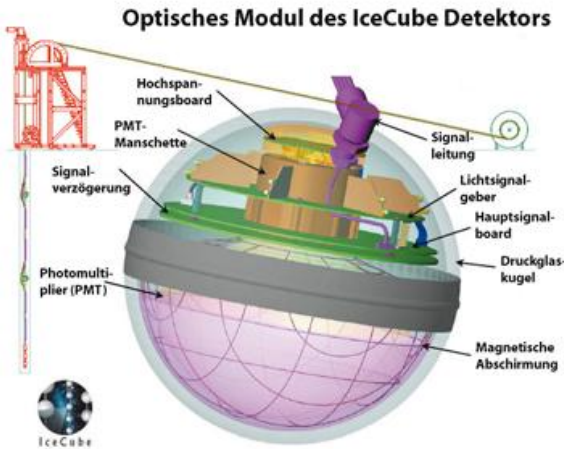
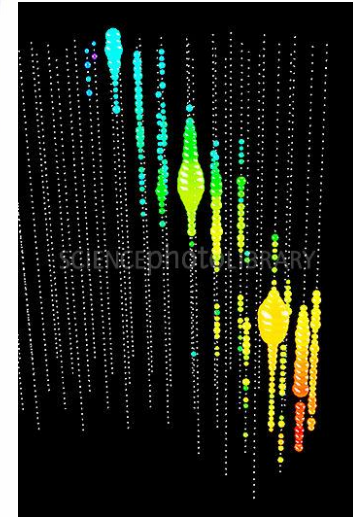
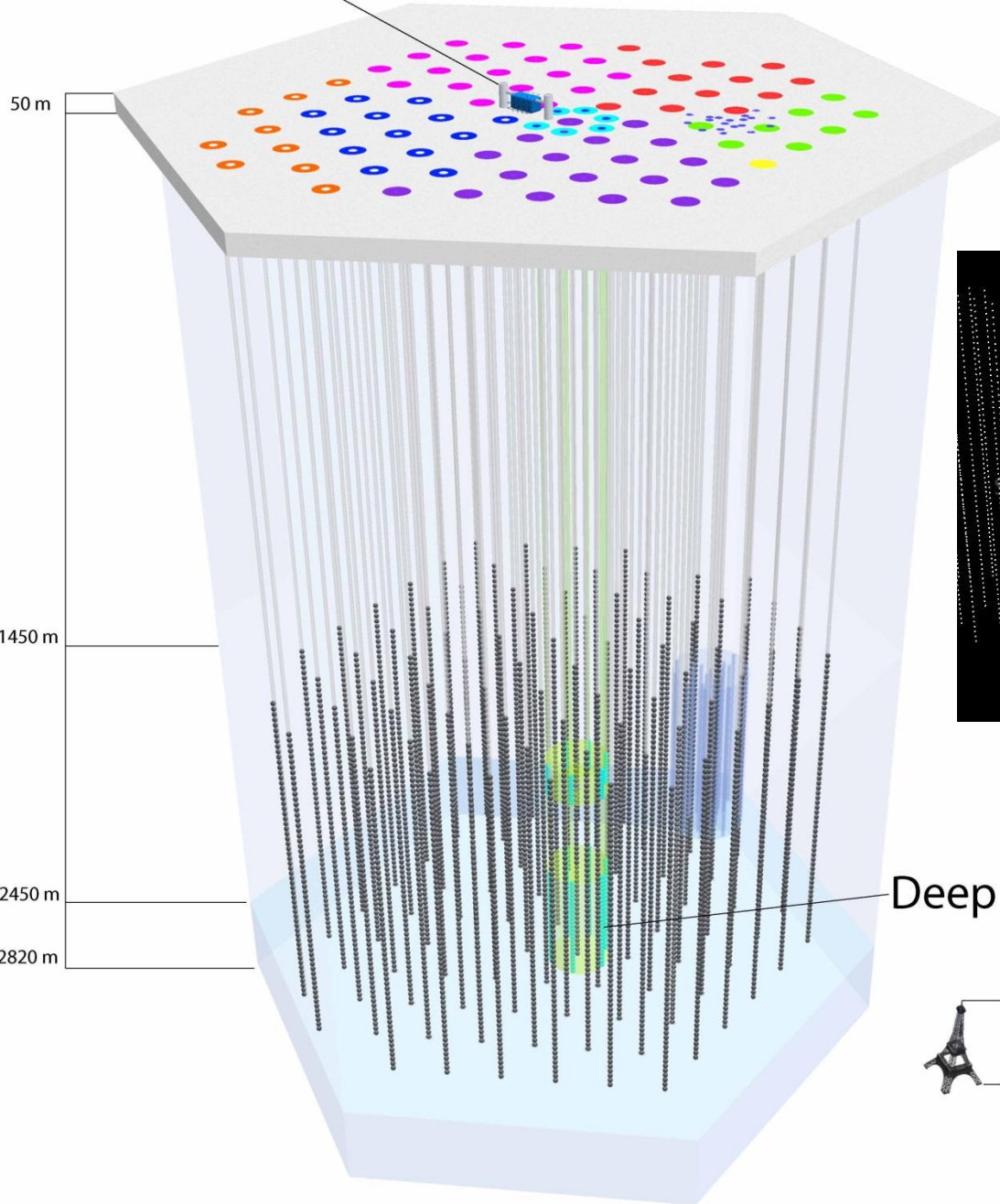
~1 000 modules de 3 PM

~0.1 km²



IceCube

IceCube Lab



A suivre ...