

# Détecteurs pour l'astronomie gamma

F. Lebrun

# Avertissement

- Ce cours n'est pas un cours (théorique) sur la physique des détecteurs pour cela je vous renvoie au cours de Jean Peyré sur les semi-conducteurs
- Ce cours se veut orienté vers les instruments utilisés pour la détection en astrophysique à haute énergie (gamma particulièrement)
- Il aborde quelques aspects du traitement des données gamma

# Les messagers à haute énergie

# Les messagers à haute énergie

- Messagers
  - Photons  $\gamma$
  - Ondes gravitationnelles
  - Neutrinos
  - Rayons cosmiques de haute énergie (UHECR)
- Messages
  - Direction d'origine
  - Flux ou intensité
  - Energie
  - Variations temporelles
  - Polarisation

# Astronomie multi-messagers

## Supernovas:

- Neutrinos (SN1987a)
- Sursauts  $\gamma$  longs
- (Ondes gravitationnelles)
- (UHECR)

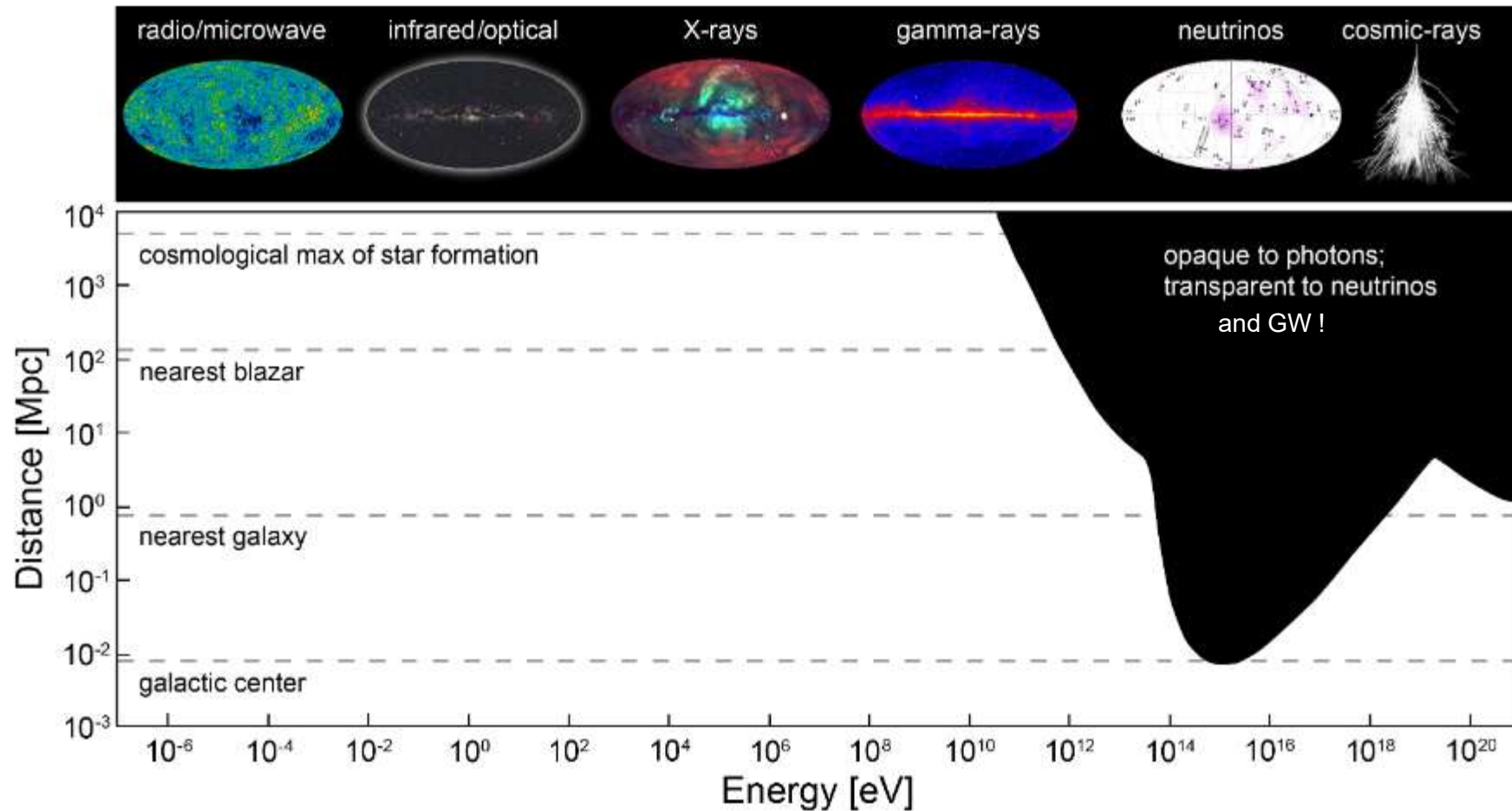
## Interactions RC - MIS:

- Neutrinos
- Emission  $\gamma$  diffuse

## Coalescence d'objets compacts:

- Ondes gravitationnelles
- Sursauts  $\gamma$  courts
- (Neutrinos)
- (UHECR)

# Horizons des messagers

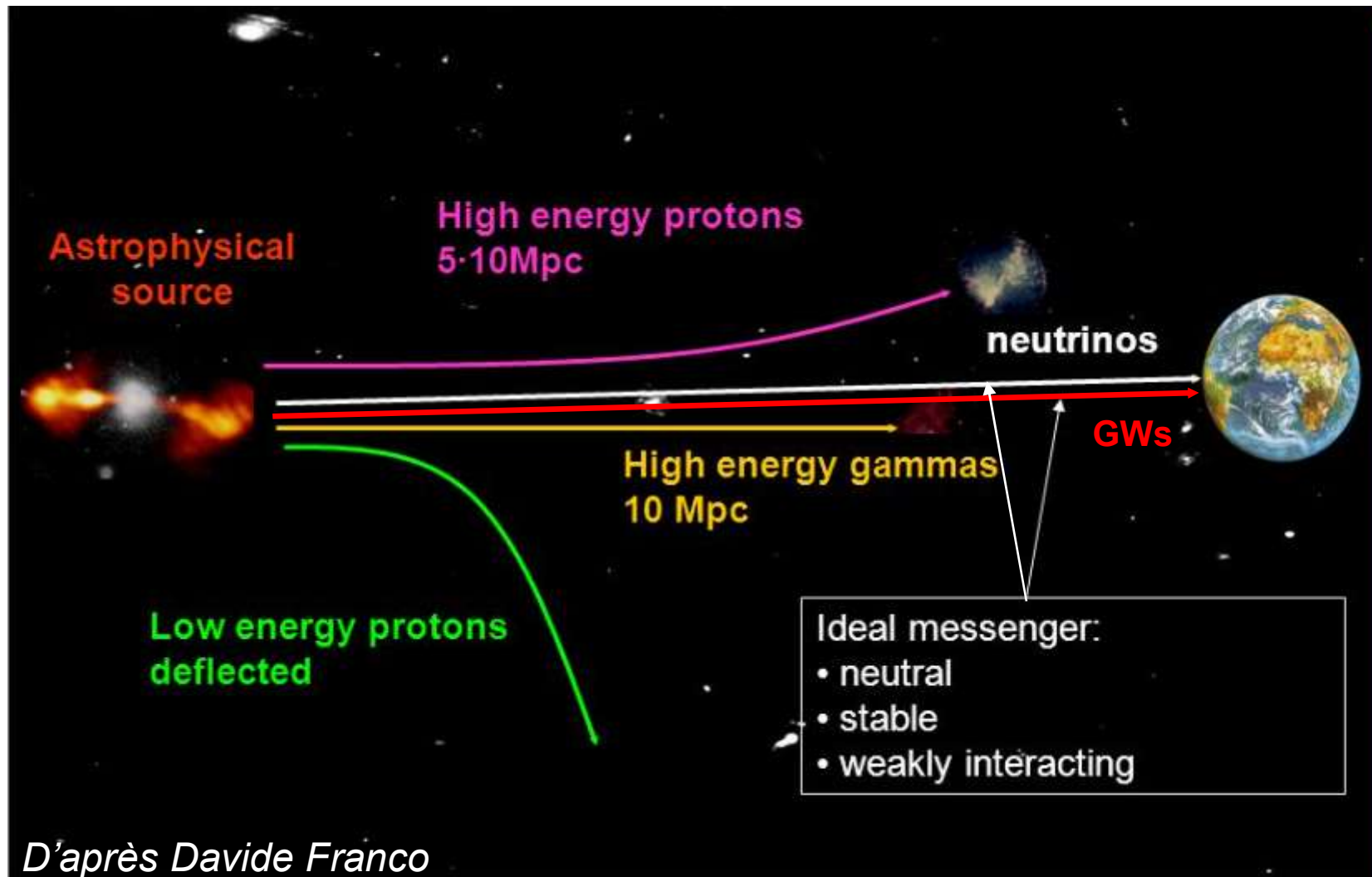


*Energy and wavelength spectra vs distance of the visible universe. About a fifth of the universe cannot be explored using photon-based telescopes.*

# Origine de l'horizon gamma

- L'interaction photon – photon limite le spectre gamma observé à  $\sim 50-100$  TeV
- Les photons cible de cette interaction sont les photons cosmologiques et ceux du fond IR
- L'interaction produit une paire électron-positon
- Dans le référentiel du centre de masse de la paire électron-positon produite, les deux photons sont gamma avec juste assez d'énergie pour produire une paire électron-positon

# GWs & neutrinos messagers cosmiques

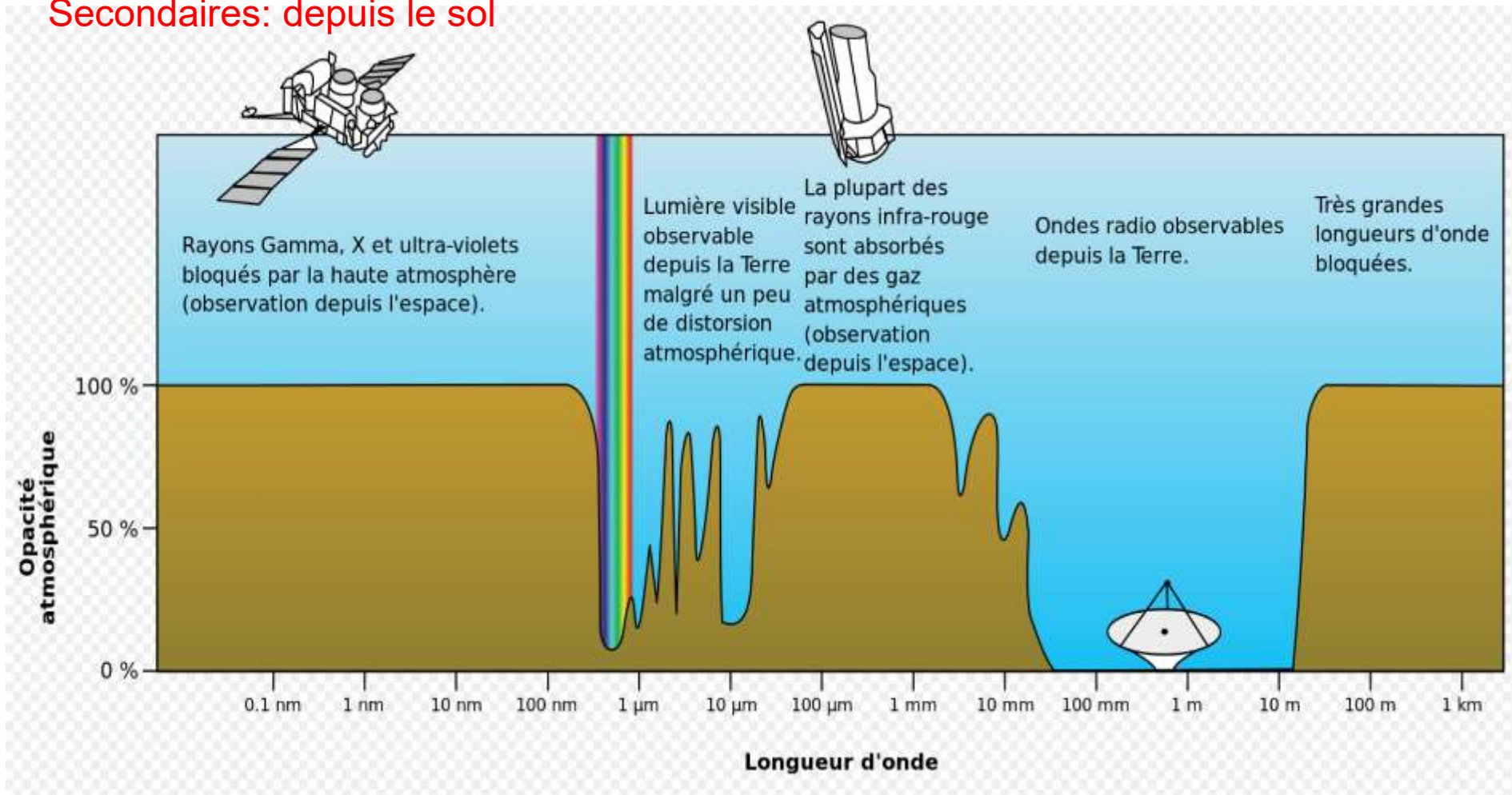




# Photons gamma ( $E > 100$ keV)

# Opacité atmosphérique

Détection primaires: spatial  
Secondaires: depuis le sol



# Recherche spatiale: le paradoxe

- Recherche: nécessite des technologies à la pointe des développements
- Fiabilité spatiale: requiert des technologies éprouvées
- 2 stratégies:
  - Trouver des applications scientifiques à des développements technologiques récents
  - Convaincre des instituts ou des agences de financer la R&D permettant d'atteindre le stade de développement technologique requis pour une sélection de mission

# Interactions des photons dans la matière

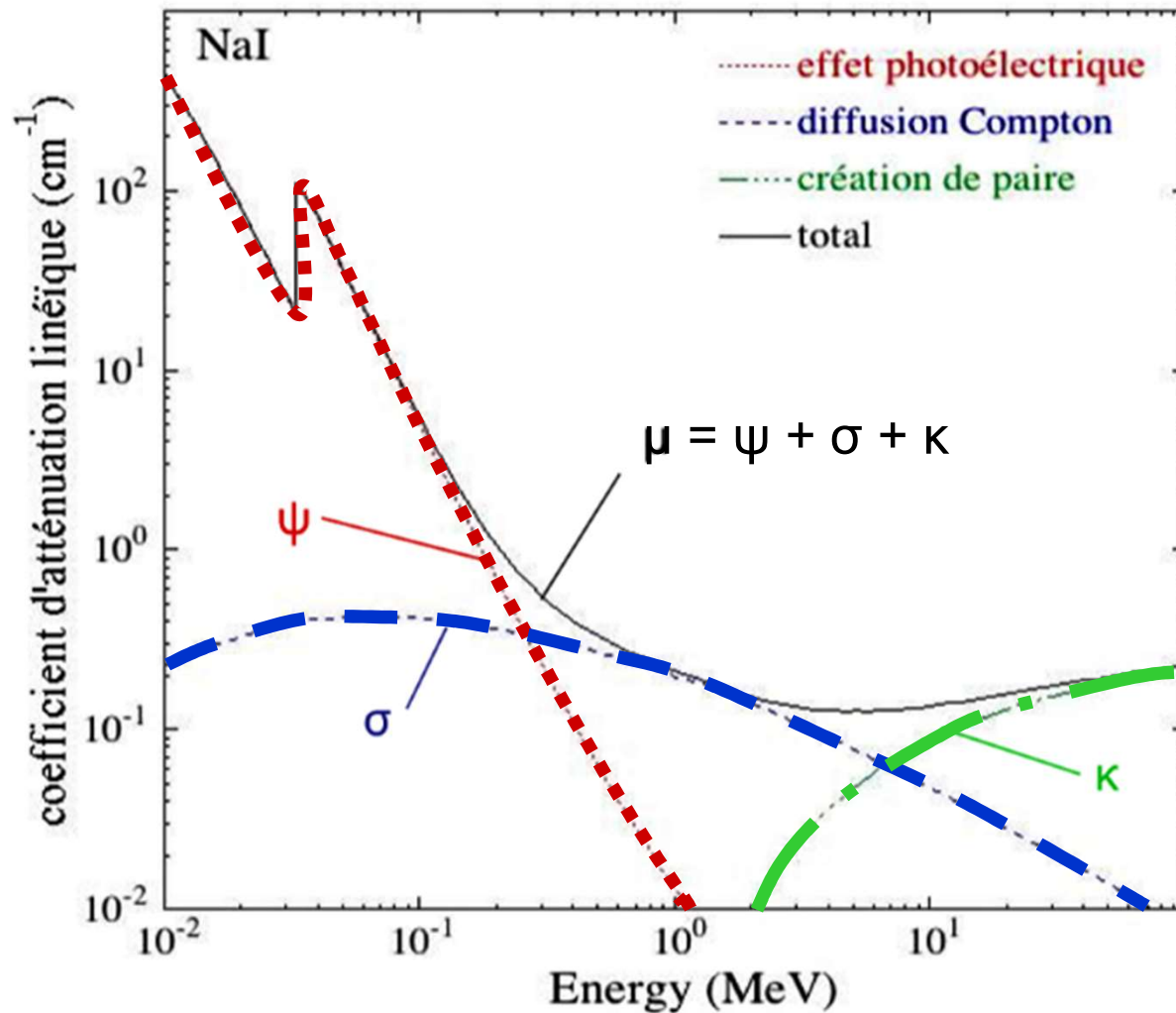
- Les particules chargées (e.g. électrons) subissent continuellement des pertes d'énergie (pertes coulombiennes ou bremsstrahlung) lors de leur propagation dans la matière
- Les photons (particule neutre) peuvent parcourir une grande distance avant d'interagir
- Leurs interactions conduisent à un transfert partiel (diffusion Compton) ou total (effet photoélectrique ou création de paire) de l'énergie des photons à des électrons du milieu.
- Ainsi, la propagation d'un photon dans la matière se caractérise par la disparition soudaine du photon ou par une diffusion accompagnée d'une perte d'énergie
- La pénétration des photons est statistiquement régie par l'intermédiaire de probabilités d'interaction qui dépendent de l'énergie et de la composition ( $Z_{\text{eff}}$ ) de la matière.

# Atténuation linéaire et massique

- Nous nous pencherons sur les trois types d'interaction des photons
  - Absorption photoélectrique
  - diffusion Compton
  - Création de paire
- La probabilité, par unité de distance parcourue, qu'un photon interagisse par un procédé physique (type d'interaction) ou d'une autre est gouvernée par le coefficient d'atténuation linéaire,  $\mu$  et a les dimensions de l'inverse d'une longueur ( $\text{cm}^{-1}$ )
- Le coefficient  $\mu$  dépend de l'énergie des photons et du matériau traversé
- Le coefficient d'atténuation massique est  $\mu / \rho$  ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ) et représente la probabilité d'une interaction par  $\text{g cm}^{-2}$  du matériau traversé.

# Atténuation linéique

La probabilité qu'un  $\gamma$  interagisse sur un parcours infiniment petit  $dx$  est :  $\mu dx$  avec  $\mu$  le coefficient d'atténuation linéique

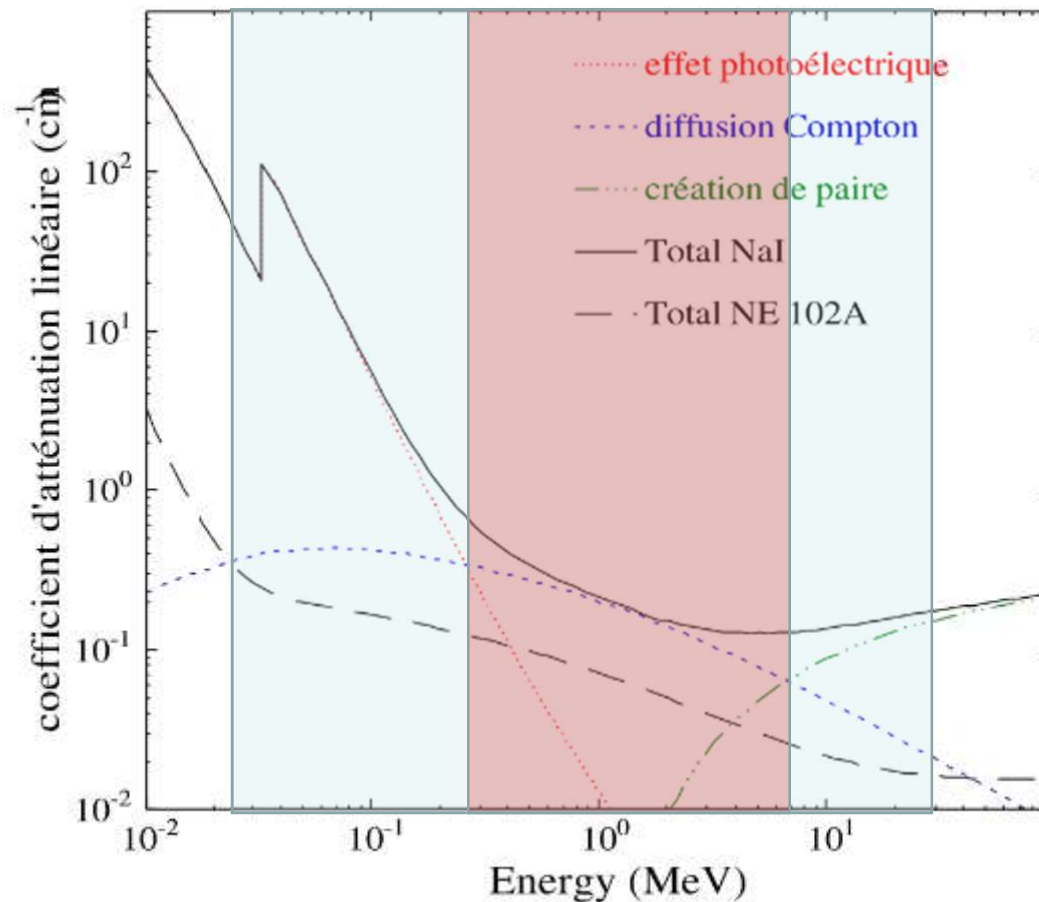


NIST: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

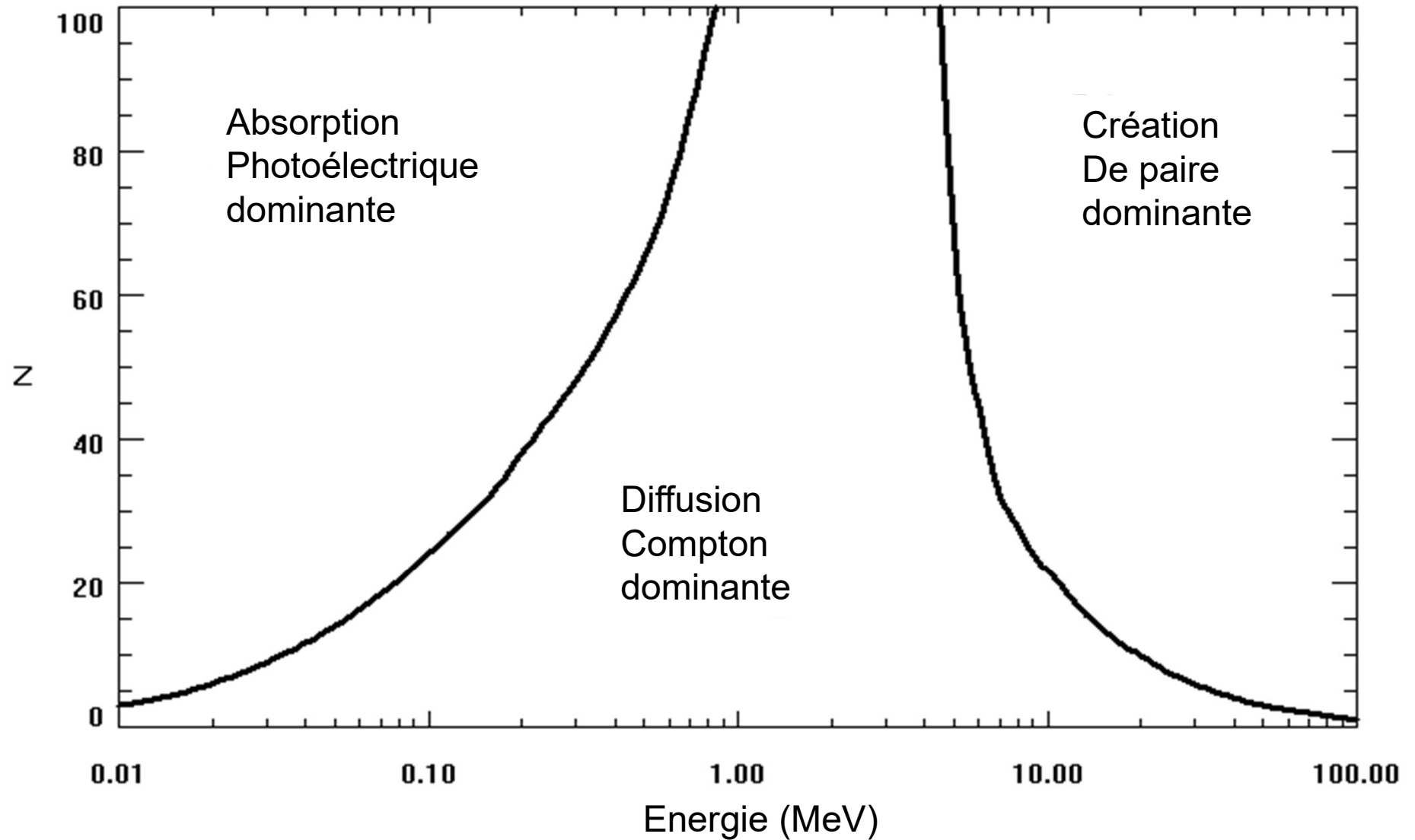
# Effet du numéro atomique

Domaine Compton  
du NE 102A (plastique)

Domaine Compton  
du NaI

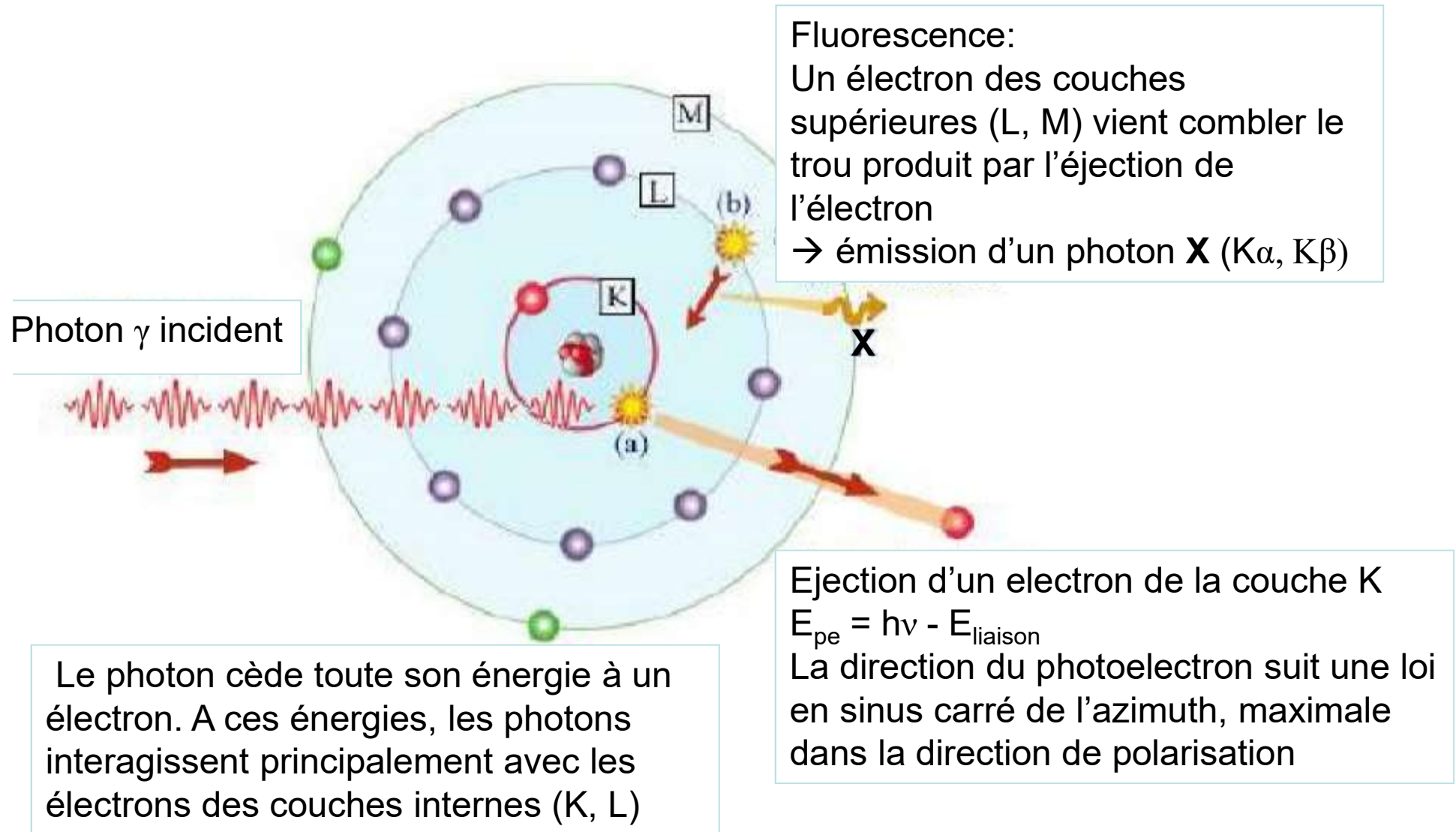


# Les 3 interactions se partagent le plan E-Z





# Absorption photoélectrique



# Absorption photoélectrique

- L'absorption photoélectrique est le principal mode d'interaction des rayons X ou gamma d'énergie relativement faible.
- La probabilité  $\tau$  d'absorption photoélectrique par atome est

$$\tau \sim Z^n E^{-3}$$

où l'exposant  $n$  est comprise entre 4 et 5

- D'où la prépondérance de matériaux à haut  $Z$  comme Pb ou W pour les blindages passifs contre le rayonnement  $\gamma$  et l'emploi du BGO et du CdTe pour la détection.
- L'interaction photoélectrique est d'autant plus probable que l'énergie du photon incident est juste supérieure à l'énergie de liaison de l'électron avec lequel il interagit. C'est l'origine des violentes discontinuités observables dans le spectre du coefficient d'absorption. Elles correspondent aux diverses transitions possibles entre couches ( $K_\alpha$ ,  $K_\beta$ )

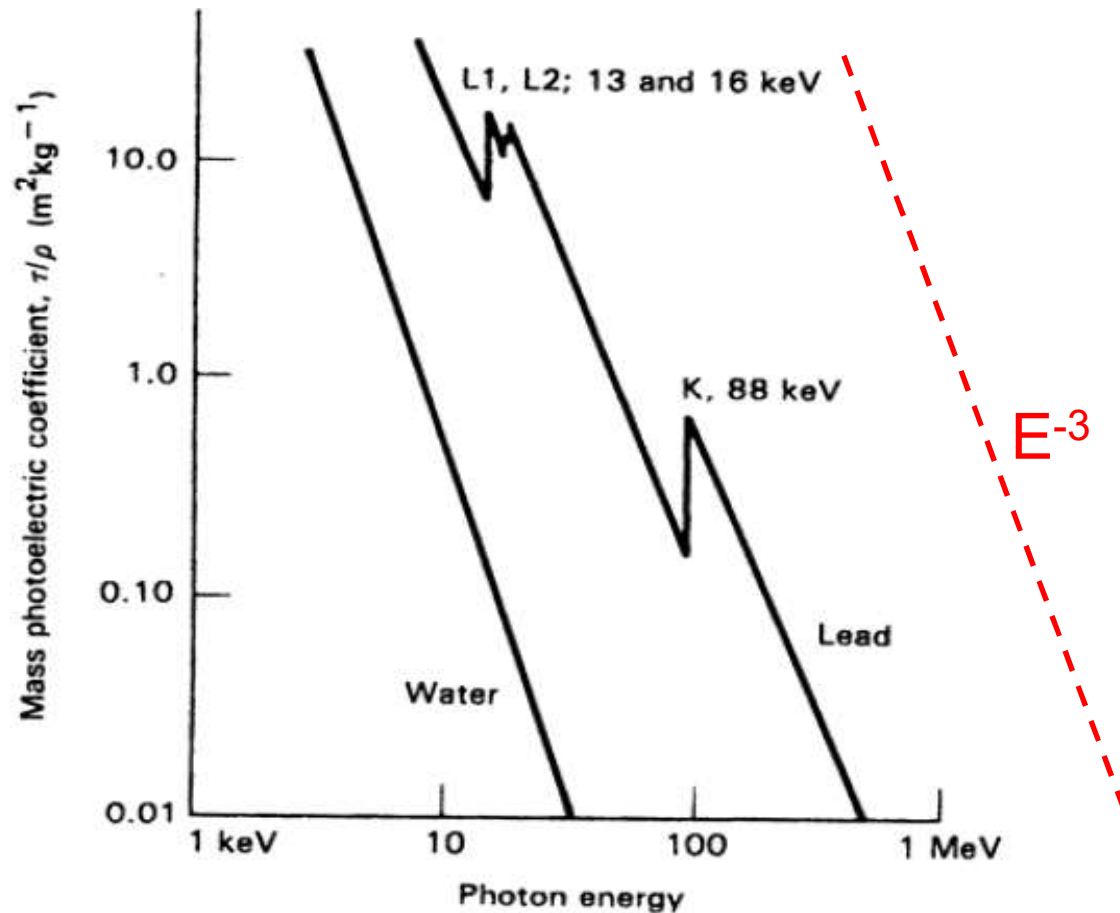
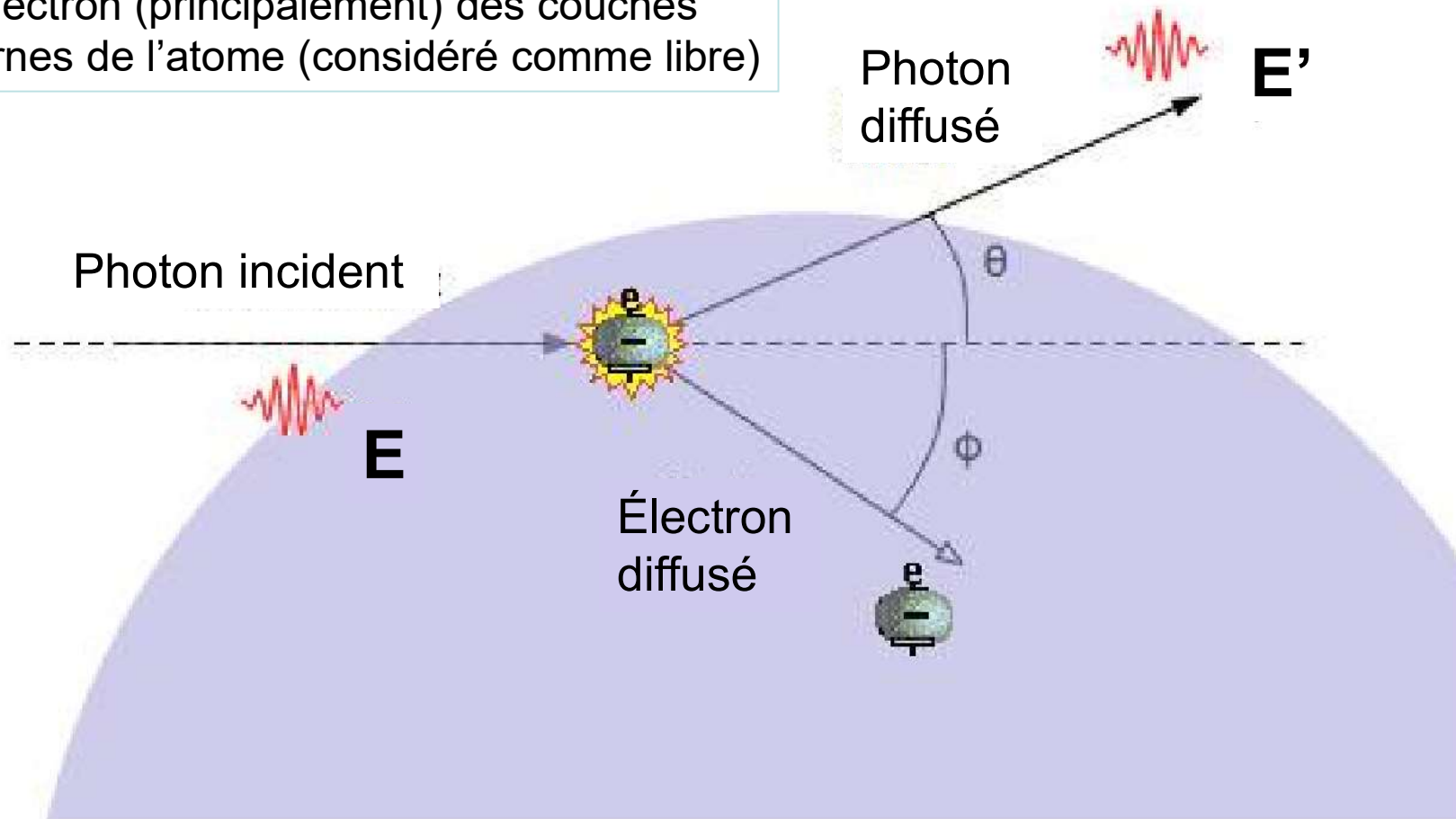


Figure 2. Photoelectric mass attenuation coefficient,  $\tau/\rho$ , plotted as a function of photon energy for water and for lead. The K and L orbital edges for lead are visible. Since the K and L binding energies for water are so low, they are not visible in this plot.

# Diffusion Compton

Le photon cède une partie de son énergie à un électron (principalement) des couches externes de l'atome (considéré comme libre)



# Diffusion Compton

- La conservation de l'énergie et de l'impulsion entraîne:

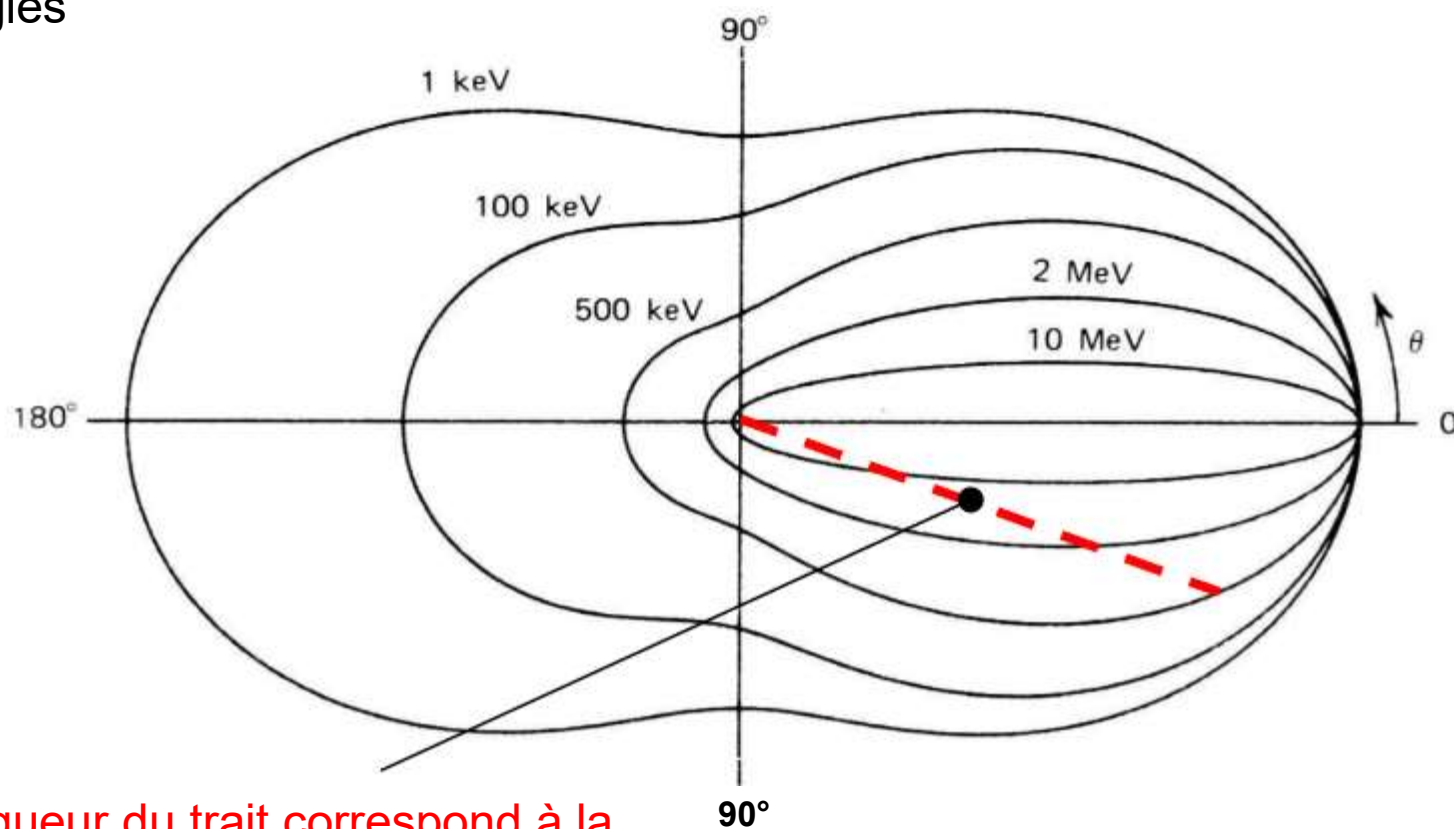
$$E' = E / [1 + E (1 - \cos\theta)], \quad \text{where } E = h\nu / m_e c^2$$

- Diffusion vers l'avant:  $\cos\theta = 1$ ,  $E' = E$  et  $E_e = 0$  (pas d'interaction)
- Vers l'arrière:  $\cos\theta = -1$ ,  $E' = E / (1 + 2E)$  and  $E_e = 2E^2 / (1 + 2E)$
- *Toutefois, l'électron cible n'est généralement pas libre et le lien entre les quantités  $E$ ,  $E'$  et  $\cos\theta$  en est affecté à proportion de l'énergie de liaison de l'électron. L'erreur introduite (souvent dénommée élargissement Doppler) est importante pour les photons de faible énergie ( $E < 1 \text{ MeV}$ ) et est plus grande pour les matériaux à haut  $Z$*
- La section efficace différentielle est donnée par la formule de Klein-Nishina:

$$d\sigma/d\Omega = r_0^2/2 (E'/E)^2 (E'/E + E/E' - \sin^2\theta)$$

# Diffusion Compton

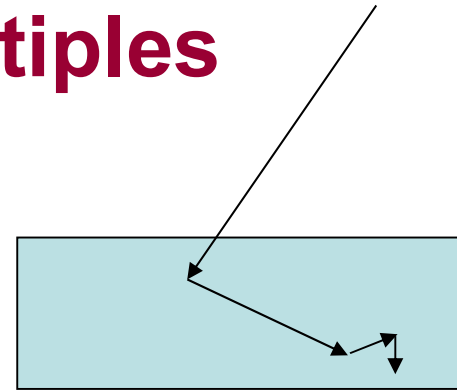
La probabilité de diffuser avec un certain angle  $\theta$  dépend de l'énergie des photons incidents. Les photons de haute énergie diffusent plutôt avec de faibles angles



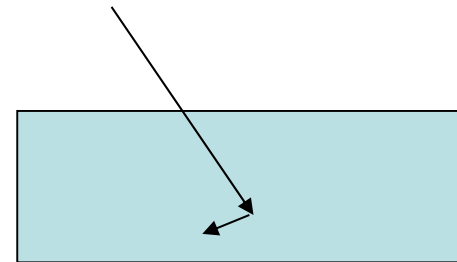
La longueur du trait correspond à la probabilité de diffusion suivant un angle  $\theta$

# Interactions multiples

Dans une cible épaisse, une série de diffusions peut se conclure par une absorption photoélectrique lorsque l'énergie du photon diffusé est assez faible.

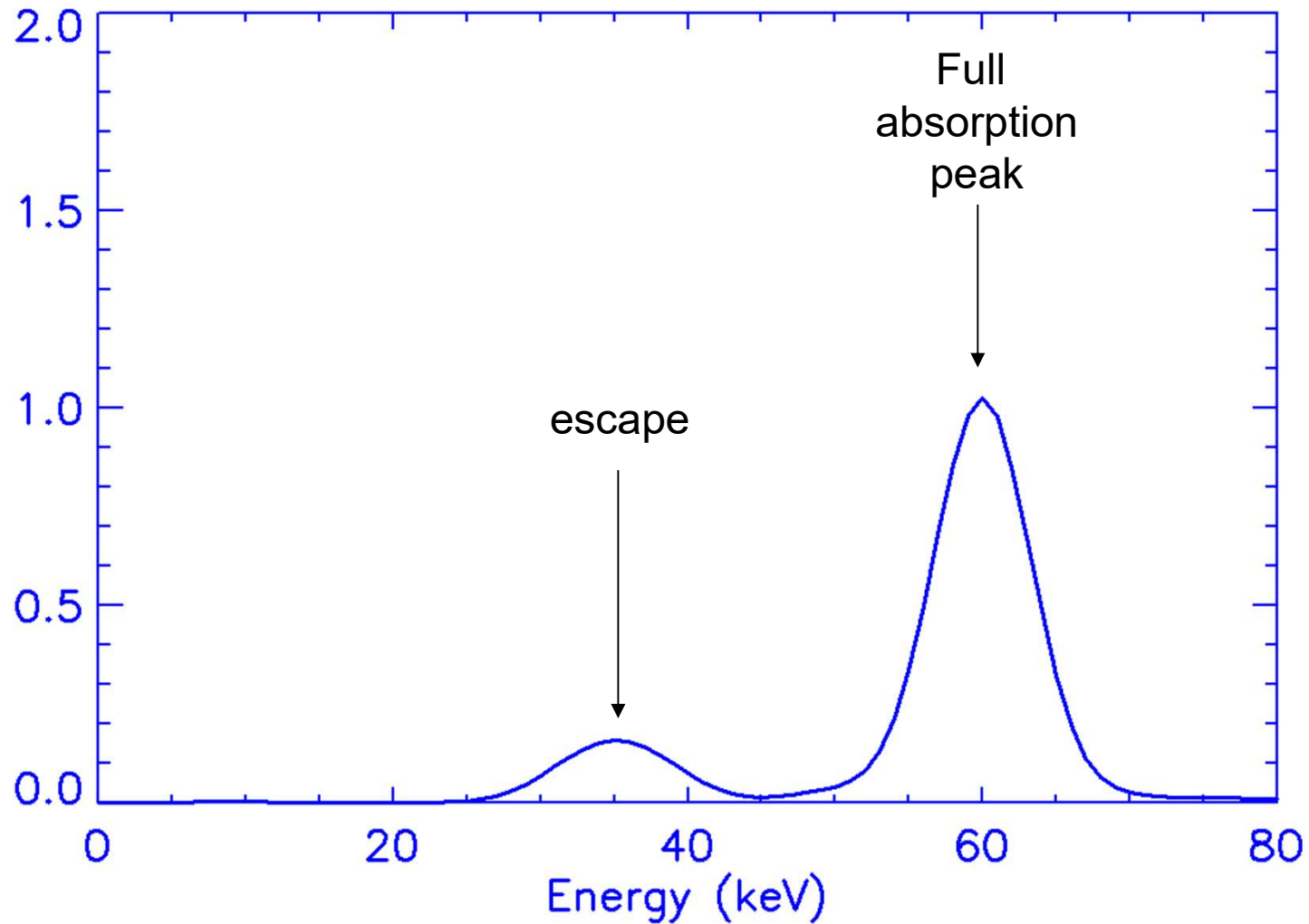


L'absorption photoélectrique peut être suivie d'une émission fluorescente mais le photon de fluorescence peut ensuite être absorbé dans le détecteur



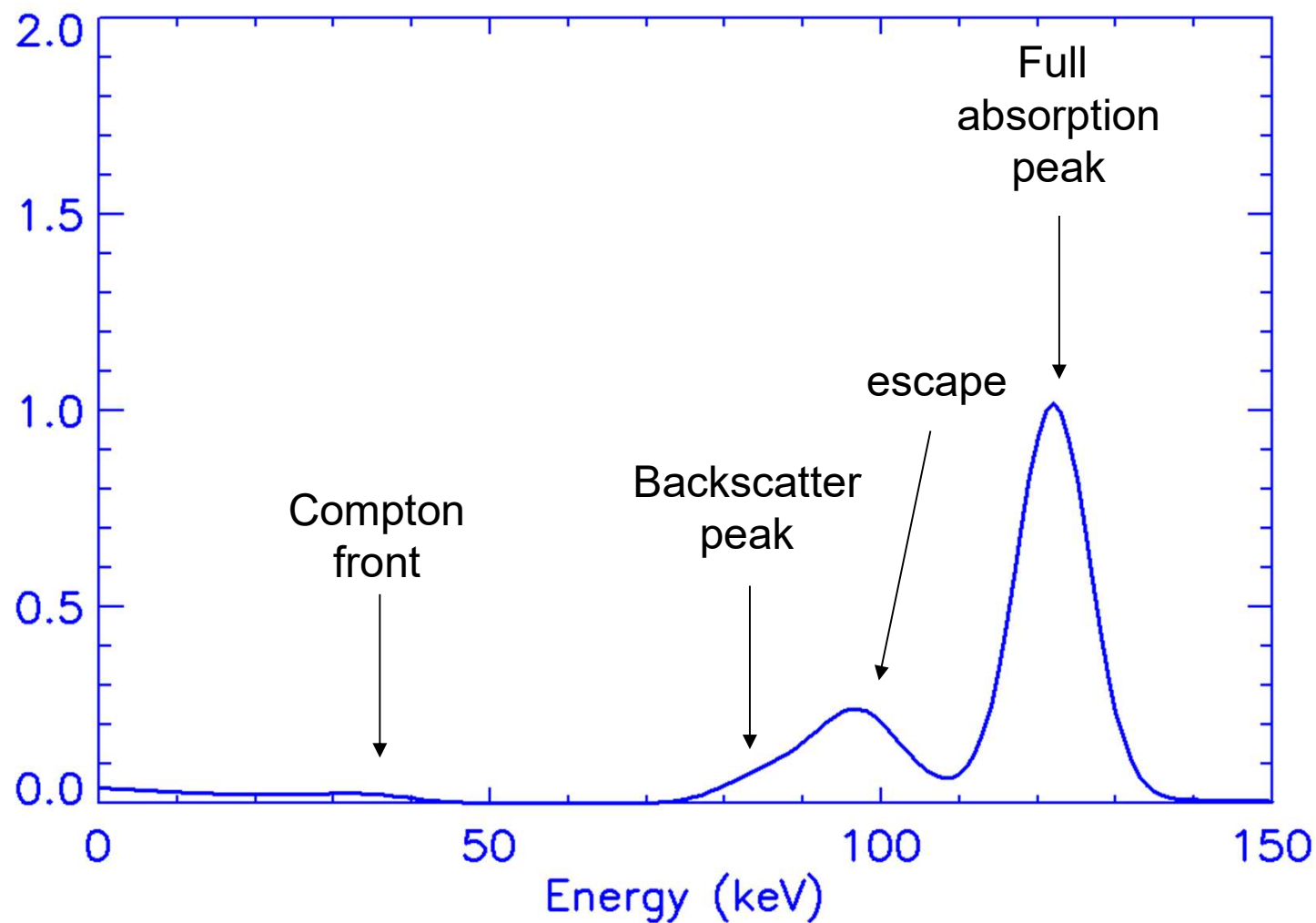
Dans les deux cas, si la cible est un détecteur unique, l'énergie totale déposée est l'énergie du photon entrant, exactement comme si une seule absorption photoélectrique était produite

# Réponse spectrale d'un détecteur CdTe fin à 60 keV

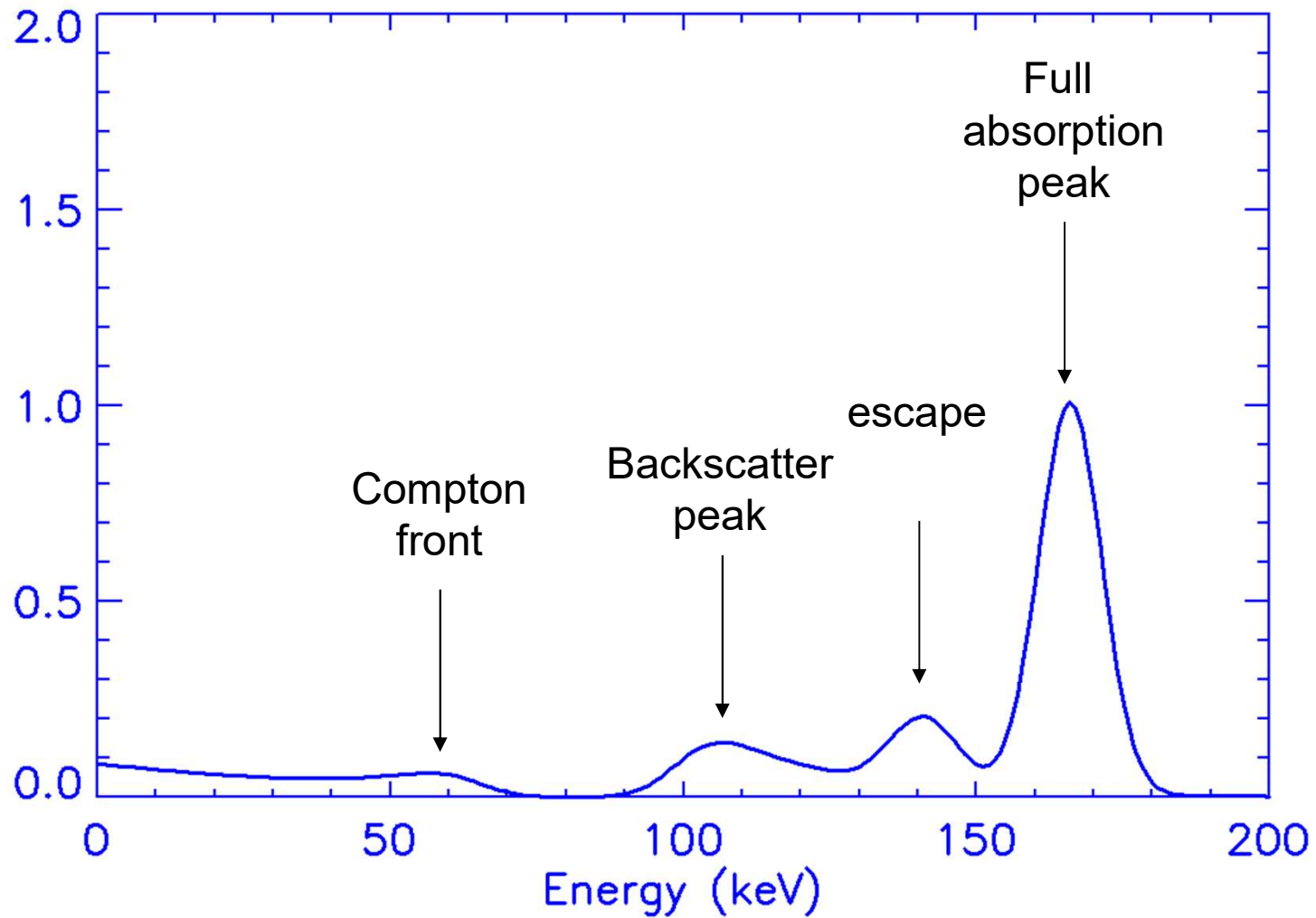




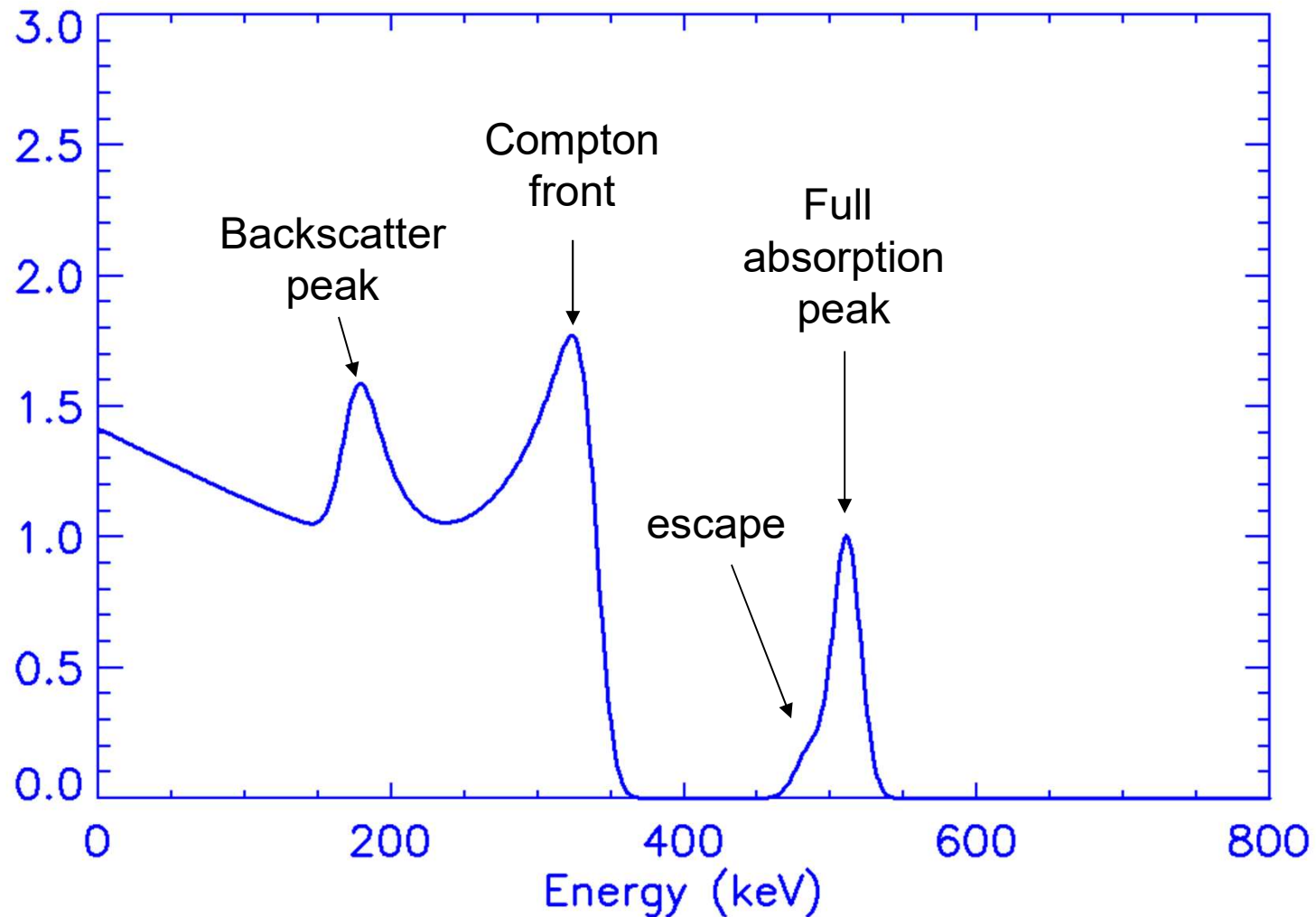
# Réponse spectrale d'un détecteur CdTe fin à 122 keV



# Réponse spectrale d'un détecteur CdTe fin à 166 keV



# Réponse spectrale d'un détecteur CdTe fin à 511 keV



# Création de paire

- Un photon d'énergie supérieure à 1,02 MeV passant près d'un noyau lourd, est soumis à un fort champ électrique et peut disparaître en tant que photon pour réapparaître sous la forme d'une paire  $e^+e^-$ .
- Le noyau emporte un peu d'énergie et d'impulsion et l'électron et le positon se partagent le reste.

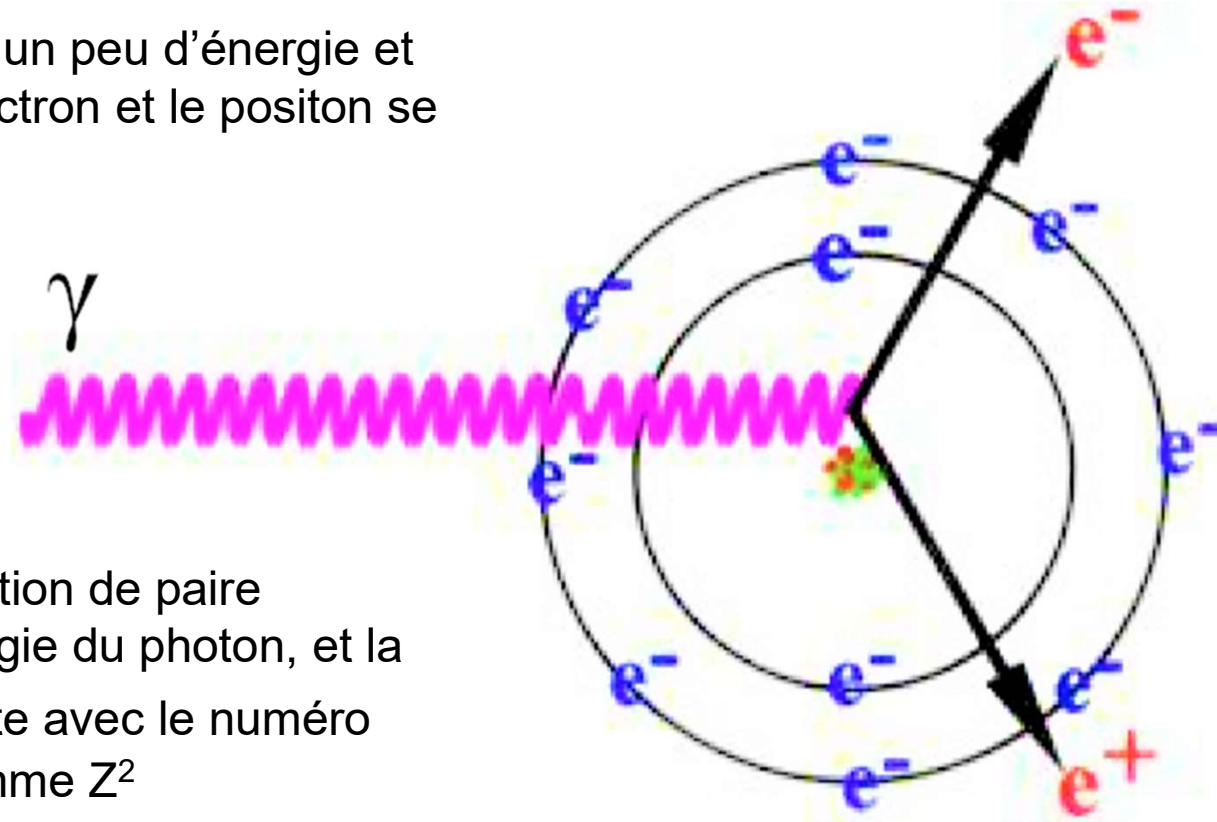
$$E_{e^+} \cong E_{e^-} = ( h\nu_{\text{MeV}} - 1.022 ) / 2$$

(si on néglige le recul du noyau)

- La probabilité de la création de paire augmente avec l'énergie du photon, et la probabilité (symbolisée  $\kappa$  (kappa)) augmente avec le nombre atomique environ comme  $Z^2$ .

# Création de paire

Le noyau emporte un peu d'énergie et d'impulsion et l'électron et le positon se partagent le reste



La probabilité de création de paire augmente avec l'énergie du photon, et la probabilité  $K$  augmente avec le numéro atomique environ comme  $Z^2$

Après avoir perdu son énergie cinétique, le positon s'annihile avec un électron en produisant 2 photons  $\gamma$  d'énergie  $E_\gamma = m_e c^2 = 511 \text{ keV}$

# Polarisation

La polarisation linéaire affecte tous les processus d'interaction, c'est dire que la distribution azimutale des produits interaction n'est pas plate

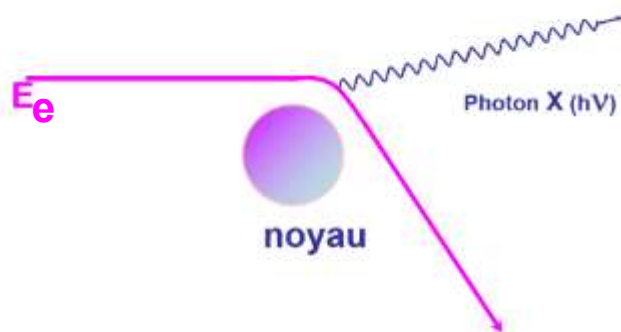
- Absorption photoélectrique : la direction d'échappement d'un électron de la couche K suit une distribution azimutale ( $\sin^2 \varphi$ ), maximale le long de la direction de polarisation
- Diffusion Compton : les directions des électrons et photons diffusés sont préférentiellement dans un plan orthogonal à la direction de polarisation ( $\sin^2 (\varphi-90^\circ)$ )
- Création de paire: la paire électronique est formée préférentiellement dans le plan de polarisation

# Interactions des électrons dans la matière

# Interactions des électrons dans la matière

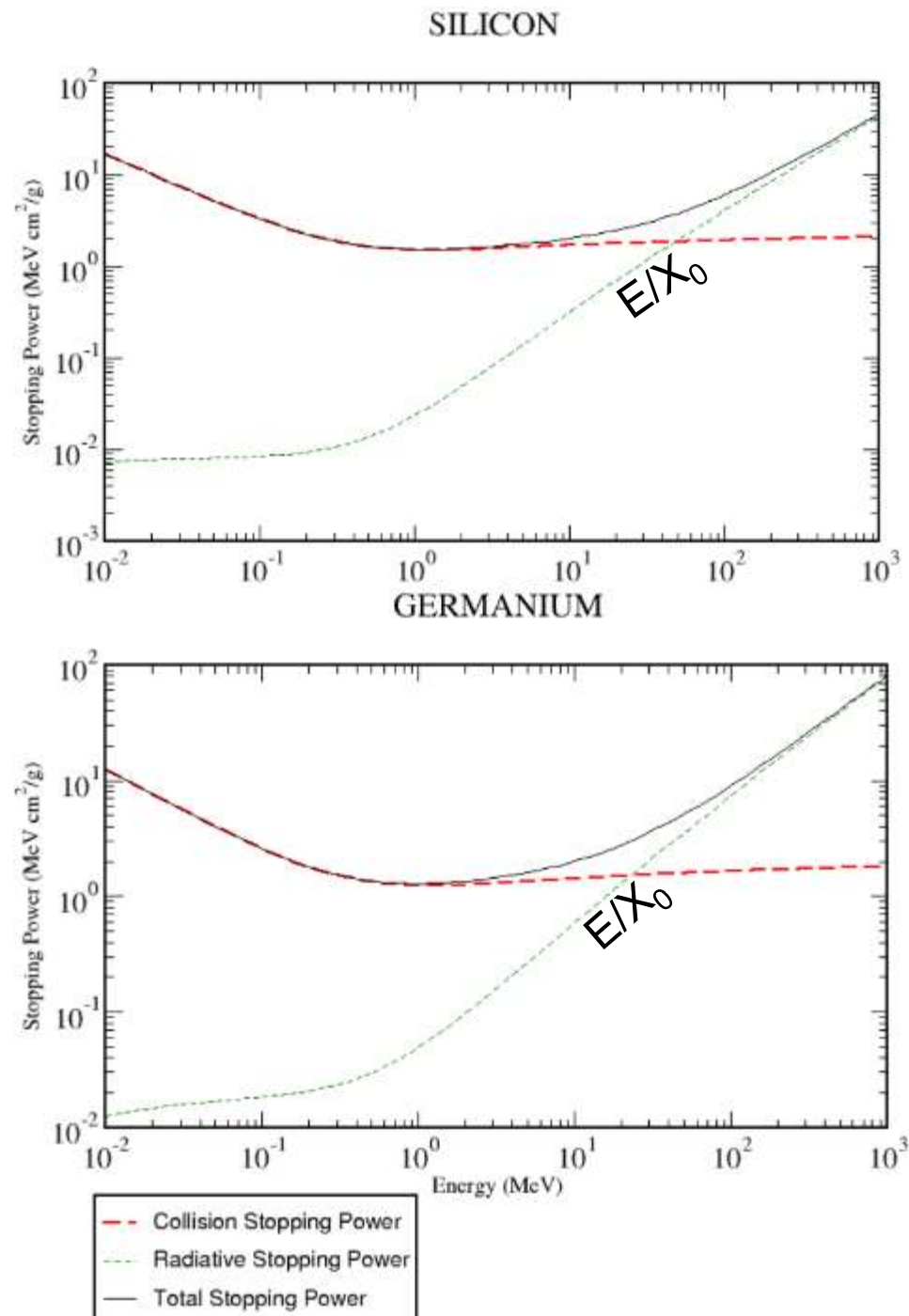
Les collisions coulombiennes dominent à basse énergie ( $E < 10$  MeV).

$$dE_{\text{coll}}/dx \sim Z/A$$



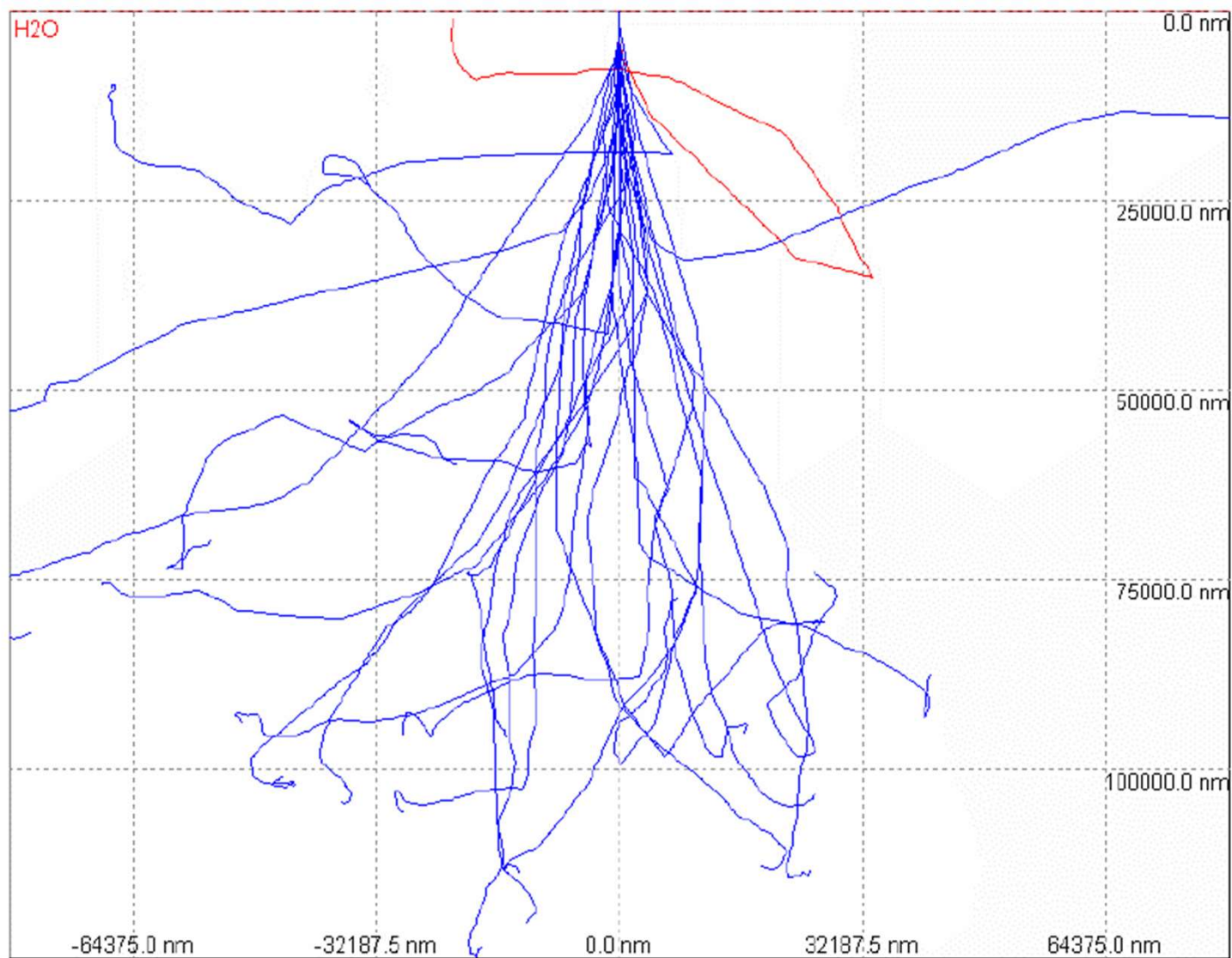
Au-delà de quelques dizaines de MeV les pertes radiatives (rayonnement de freinage, bremsstrahlung ou free-free) l'emportent

$$dE_{\text{rad}}/dx \sim Z^2/A$$





# Traces d'électrons dans l'eau

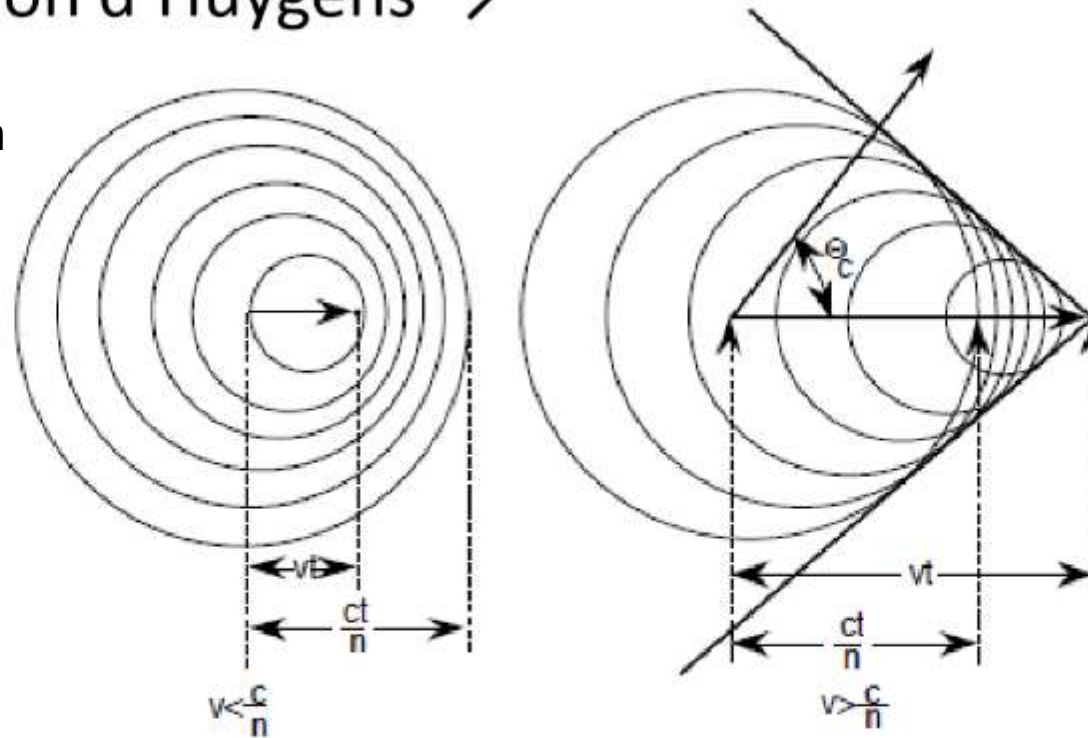


# Effet Tcherenkov

Construction d'Huygens →

$n$ : indice de réfraction  
du milieu

$v$ : vitesse de la  
particule



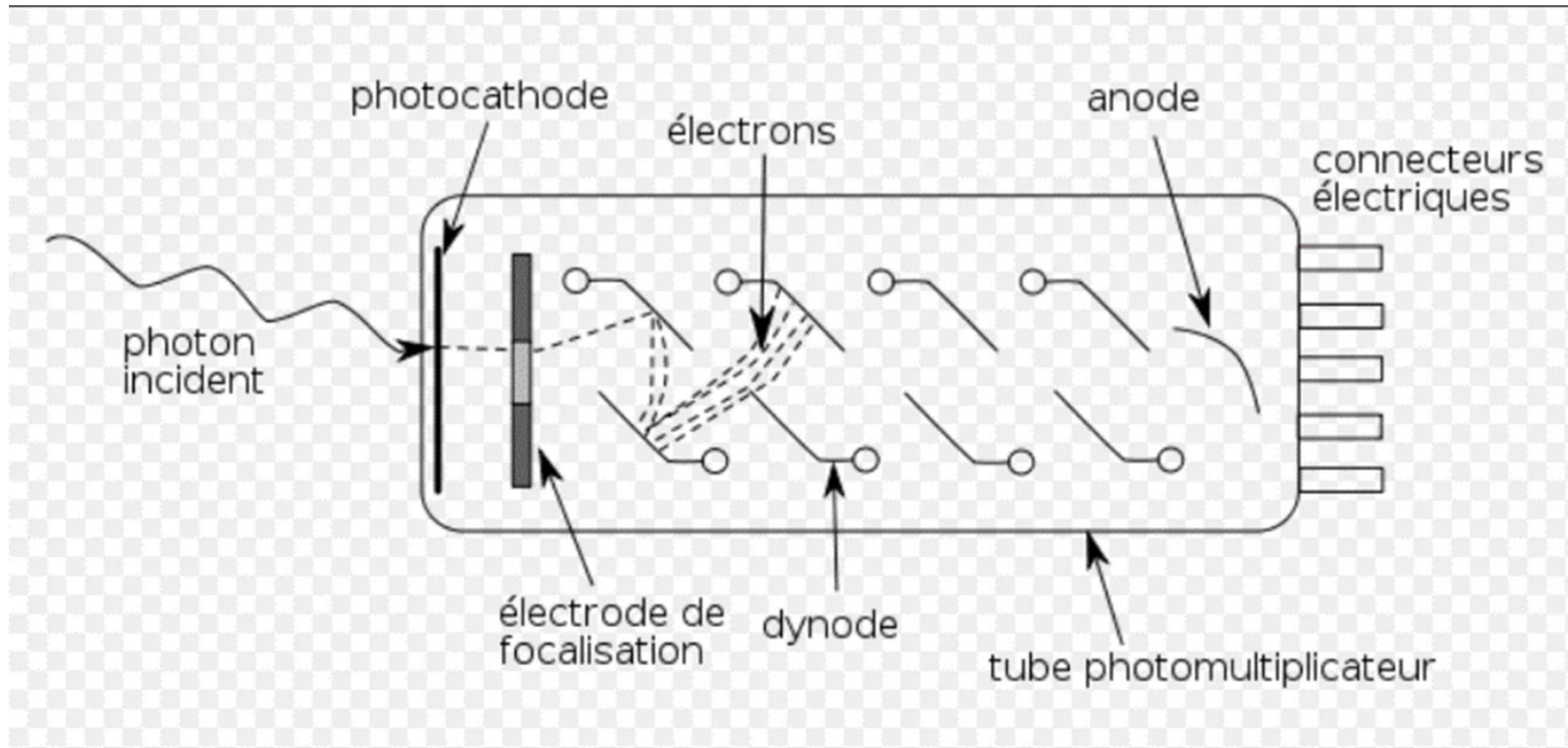
Direction d'émission → 
$$\cos \Theta_c = \frac{(c/n)t}{vt} = \frac{c}{nv} = \frac{1}{n\beta}$$

# Photodétecteurs

# Qu'est-ce qu'un détecteur ?

- Quelque chose qui produit une impulsion électrique lorsqu'une particule interagit dedans
- Sa qualité se mesure par le rapport signal à bruit e.g. la hauteur de l'impulsion par rapport à la fluctuation du fond
- Le fond peut provenir
  - du détecteur lui-même
  - de l'électronique de lecture
- Pour limiter l'impact du bruit de lecture, il est souhaitable que le détecteur produise le signal le plus grand possible
- De ce point de vue, le photomultiplicateur (PM) est un détecteur extraordinaire car le signal est amplifié un million de fois avant d'être présenté à l'électronique

# Le PM



# Le PM

- C'est magique: amplification d'un million presque sans bruit
- Il pourrait faire l'objet de plusieurs cours
  - Photocathodes (matériaux)
  - Fenêtres d'entrée (matériaux)
  - Dynodes (géométrie)
  - Ponts diviseurs etc...
  - Multi-anodes

# Le PM

- C'est magique: amplification d'un million presque sans bruit
- Il pourrait faire l'objet de plusieurs cours
  - Photocathodes (matériaux)
  - Fenêtres d'entrée (matériaux)
  - Dynodes (géométrie)
  - Ponts diviseurs etc...
  - Multi-anodes
  - Malheureusement le PM ne peut pas détecter les photons gamma (ils traversent la photocathode sans interagir)

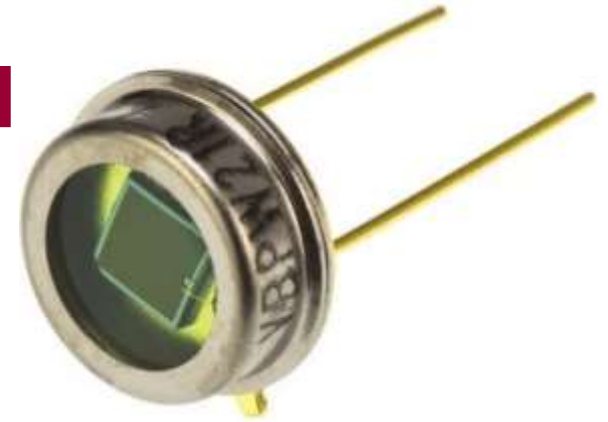
# PMs ... Hamamatsu

- Dimension  $\sim 1 - 20$  cm
- Gain  $\sim 10^6$
- Tension:  $\sim 1000$  V
- Taux de déclenchement en obscurité:  $\sim 0$
  
- PM multi-anodes
  - 4x4 (Taranis)
  - 8x8 (JEM-EUSO)

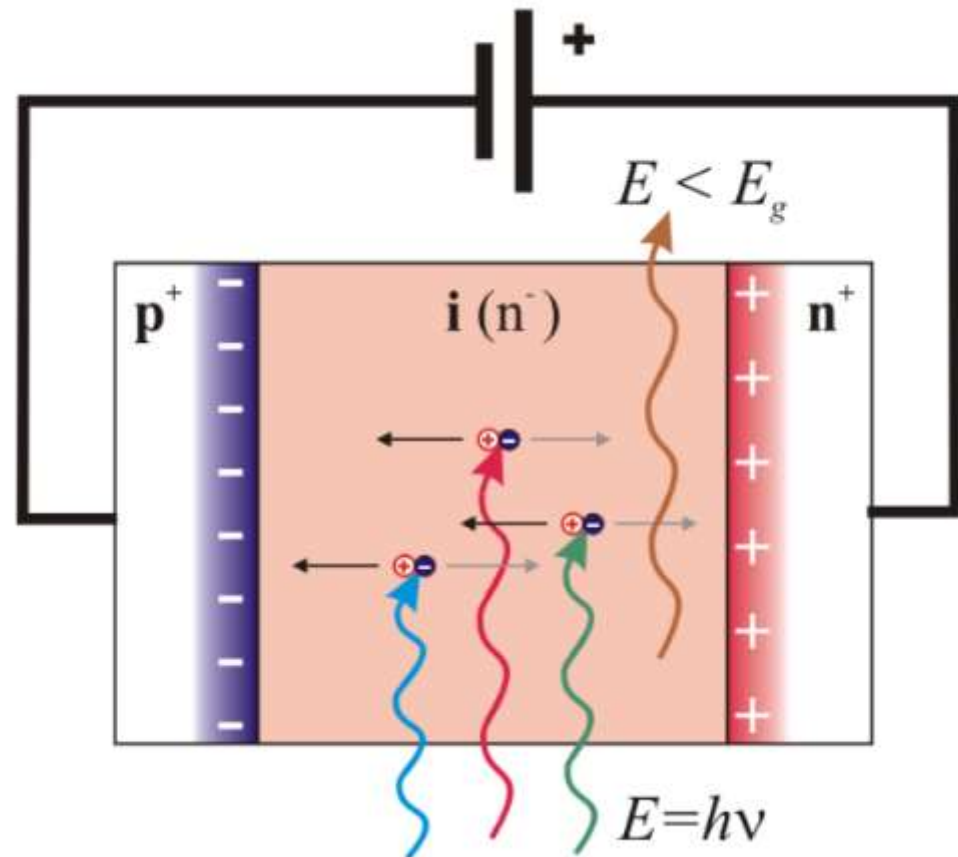




# La photodiode PIN



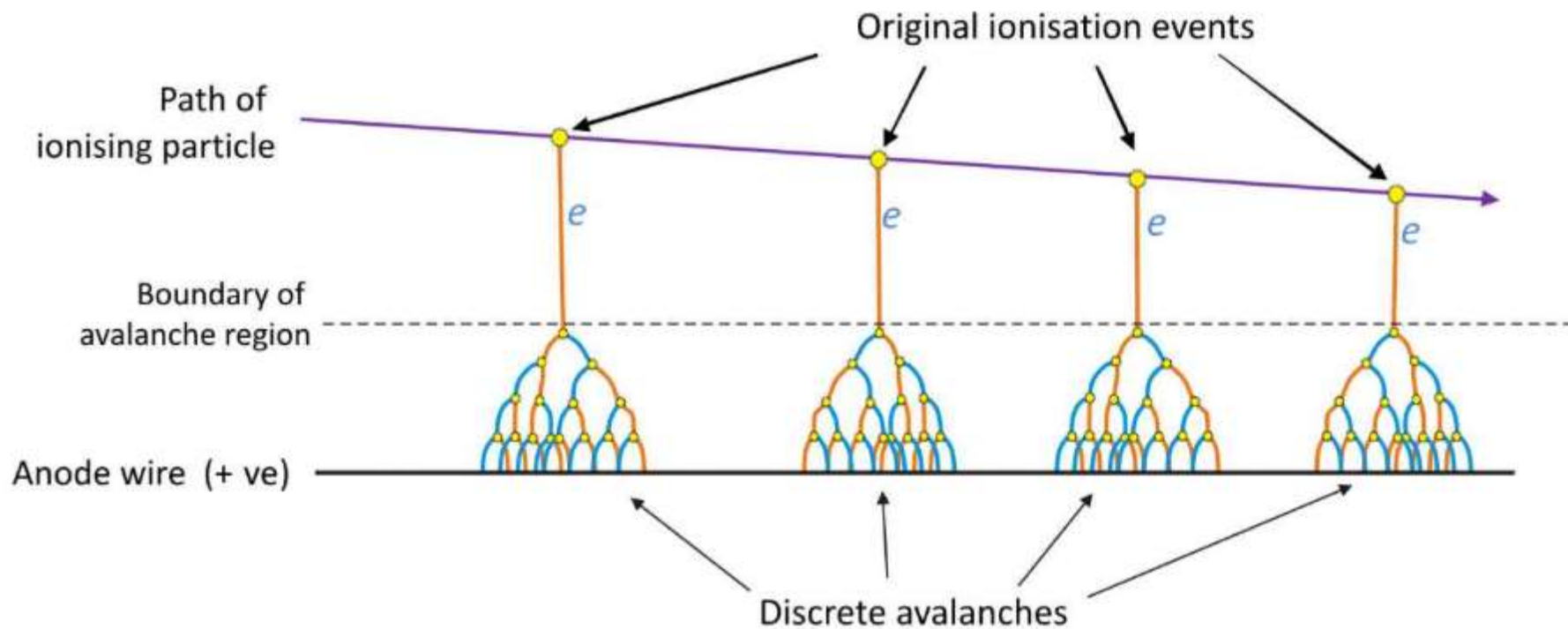
- Dimension  $\sim 1$  mm
- Gain: 1
- Tension  $\sim 50$  V ?
- Efficacité de détection  $\sim 80\%$
- Taux de déclenchement en obscurité:  $\sim 0$



# Avalanche

- ...ni trop, ni trop peu ! Pour déclencher une avalanche d'électrons, il faut:
  - un fort champ électrique pour accélérer les électrons
  - Suffisamment de cibles (électrons libres)
  - Mais pas trop pour que l'énergie acquise (accélération) entre deux collisions dépasse la perte d'énergie par collision
- Le phénomène d'avalanche est à la base du fonctionnement de nombre de détecteurs amplificateurs (PM, APD, SiPM, compteur proportionnel, compteur Geiger) et dans certains phénomènes naturels (e.g. TGFs)
- Il peut être indésirable (claquage) notamment lorsqu'on utilise un fort champ électrique à faible pression (loi de Paschen) ce qui peut se produire lors de la mise sous tension de PM peu de temps après le lancement d'un satellite (atmosphère résiduelle)

# Création d'avalanches dans un compteur proportionnel

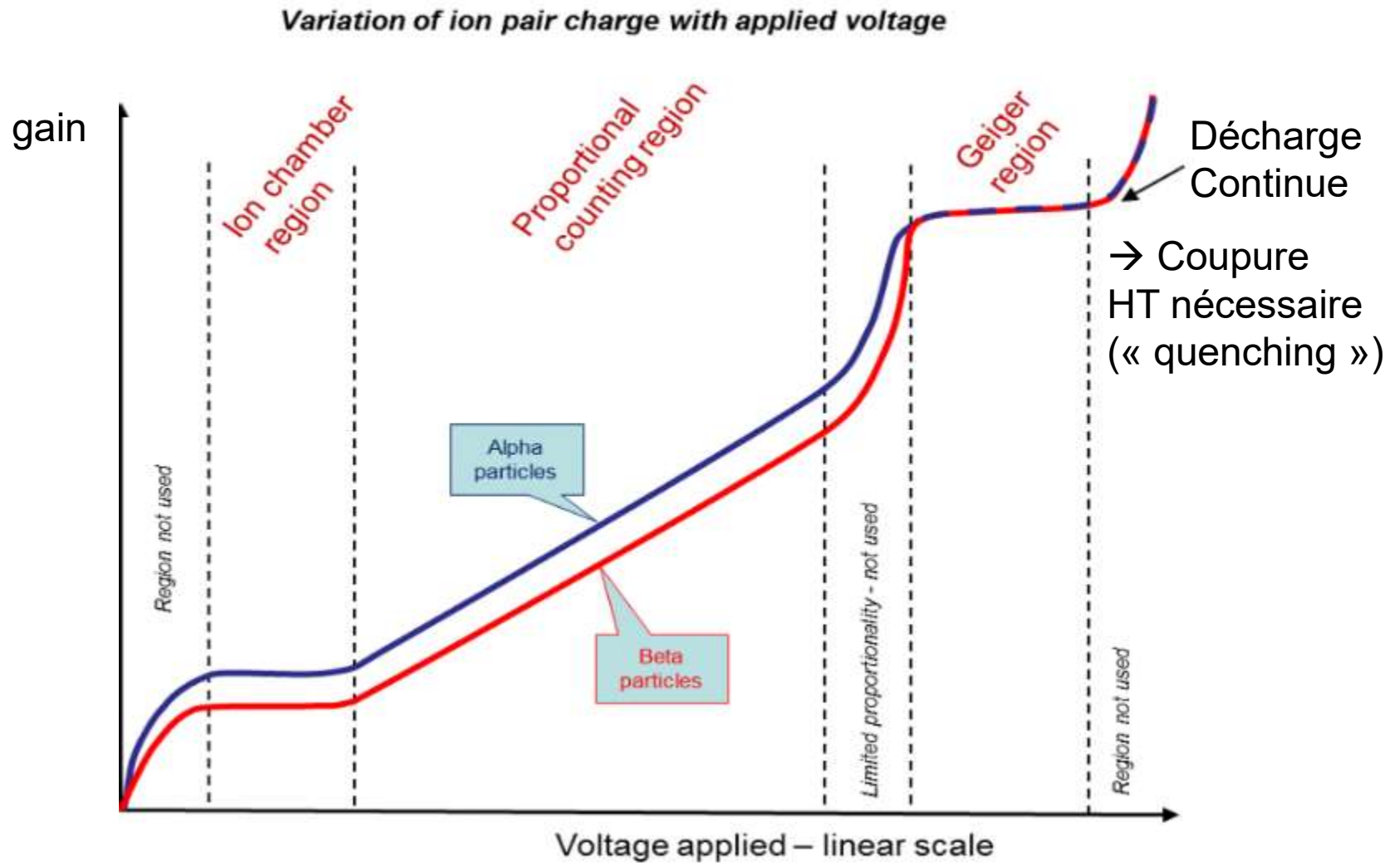


*wikipedia*

# Tension et gain des détecteurs

- Lorsqu'une particule chargée traverse la matière, des électrons libres et des ions positifs sont produits le long de sa trajectoire
- Si aucun champ électrique n'est appliqué, les ions et les électrons se recombinent et des photons de fluorescence sont émis
- En appliquant des champs électriques d'intensité différentes, on peut réaliser différents types de détecteur
- Champ faible: chambre d'ionisation, les électrons et les ions dérivent vers les électrodes (semiconducteurs). Le signal recueilli est juste l'ionisation originale produite.
- Champ plus élevé: les électrons sont accélérés jusqu'à ce qu'ils deviennent eux-mêmes ionisants; une avalanche est alors déclenchée.
  - A gain  $10^3$ - $10^5$ , le signal reste proportionnel à l'ionisation originale, c'est le mode « proportionnel » (APD)
  - A gain fort ( $\sim 10^6$ ), le signal devient constant. C'est le mode « Geiger » utilisé dans les compteurs et les SiPM

# Les différents régimes de tension



wikipedia

mai 2018

Détecteurs pour l'astronomie gamma

François Lebrun

Bénodet

45

# La photodiode à avalanche

- Diode PIN utilisée en régime proportionnel
- Dimension  $\sim 1 - 10$  mm
- Gain: 30-300 ( $f(T)$ )
- Tension  $\sim 100-500$  V
- Eff  $\sim 0.5$
- Courant d'obscurité =  $f(T)$
- Relativement lente (limitée par le temps de transport des porteurs)
- Sensible au champ magnétique: Non
- Fragile: Non
- Résiste à une forte illumination: Oui
  
- SPAD (Single Photon Avalanche Diode) = APD en mode Geiger
- SiPM = Grand nombre de SPADs en parallèle

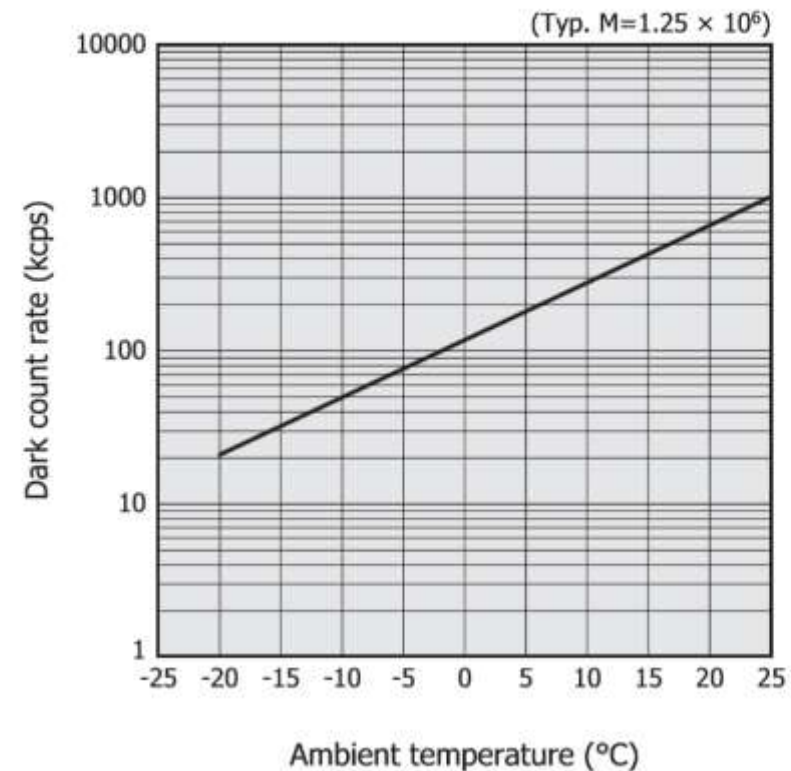
# Le SiPM

- Grand nombre de micro compteurs Geiger (10-100 $\mu$ m) en parallèle
- Chaque photon déclenche une avalanche dans l'un d'eux
- Pour stopper l'avalanche on place en série une résistance dite de « quenching ».
- L'avalanche produit un fort courant dans la résistance et donc une chute de la tension appliquée à la diode
- Cette chute est telle que l'avalanche s'arrête
- Le SiPM n'a donc aucune capacité spectroscopique, il ne fait que compter des photons dont il ne mesure pas l'énergie
- Au premier ordre un scintillateur produit des photons qui ont tous la même énergie.
- Le nombre de photons produits est proportionnel à l'énergie déposée dans le scintillateur donc scintillateur + SiPM = spectromètre

# Le SiPM

[Figure 2-17] Dark count rate vs. ambient temperature  
(photosensitive area: 3 mm sq, pixel pitch: 50  $\mu$ m)

- Gain:  $\sim 10^6 \times f(V,T)$
- Tension V: 30-70 V
- Efficacité de détection  $\sim 50\%$
- Insensible au champ magnétique
- Robuste mécaniquement
- Résiste à une forte illumination
- **Fort taux de déclenchements en obscurité** très dépendant de T ( $\sim \times 100$  tous les  $50^\circ$ )



*hamamatsu*



# Comparaison des photodétecteurs

	PM	APD	SiPM
dimension	1 – 10 cm	1 – 10 mm	~ 1 - 10 mm
gain	$10^4 - 10^9$	30 - 300	$10^5 - 10^7$
Tension (V)	1000 - 3000	100 - 500	30-70
$\epsilon_{\text{det}}$	0.25 – 0.4	~0.5	~ 0.5
<b>Sensible <math>\vec{B}</math></b>	Oui	Non	Non
Fragile	Oui	Non	Non
Résiste à illumination	Non	Oui	Oui
Déclenchements en obscurité	Déclenche peu	N/A	0.1 - 1 MHz/mm <sup>2</sup>

À température ambiante !

# Imagerie

# Imagerie

- Optiques (effet photoélectrique dominant)
  - Miroir: focale =  $\alpha E$  (voir SIMBOL-X, Nustar)
  - Collimateur Balayant (flux stable)
  - Masque codé (INTEGRAL, SWIFT)
  - Collimateur tournant: codage temporel (flux stable): 3 détecteurs, 1 sat.
- 1 seule source (GRB, TGF)
  - Barycentrisation ou pondération: 1 satellite et plusieurs détecteurs à champ de vue limité
  - Décalage en temps (grande distance entre au moins 3 satellites) ~ ondes grav.
- Reconstruction de chaque interaction → direction photon primaire (télescope Compton et à effet de paire, télescope Tchérénkov)
  - Strips Si (Fermi)
  - Chambre à dérive (Harpo)
  - Fluorescence de l'atmosphère

# Miroir multi-couches

- Fait correspondre chaque point d'un imageur à une direction du ciel
- Avantages:
  - Très grande sensibilité (concentre le rayonnement)
  - pas de contrainte sur la stabilité des sources
  - pas de contrainte sur l'étendue des sources
- Inconvénients
  - $E < 100$  keV
  - Faible champ de vue
  - Complexe et couteux
    - requiert un imageur
    - Couteux: très longue focale (e.g. 20 m à 80 keV)
- Domaine d'application: étude de sources faibles et étendues
- Exemple: SIMBOL-X, Nustar

# Collimation à balayage

- Principe: flux =  $f(t [l,b]) \rightarrow \text{flux}(l,b)$
- petit champ de vue (= résolution angulaire)
- Balayage de la sphère céleste par rotation du satellite et/ou de l'instrument
- Conditions requises: sources stables sur des échelles de temps plus grandes que le temps entre 2 passages
- Avantages: simplicité (détecteur non-imageur)
- Inconvénient: plus le champ est petit plus le temps entre 2 balayages augmente
- Domaine d'application: cartographie du ciel
- Exemple: HEAO1-A4, GRO/OSSE

# Masque codé

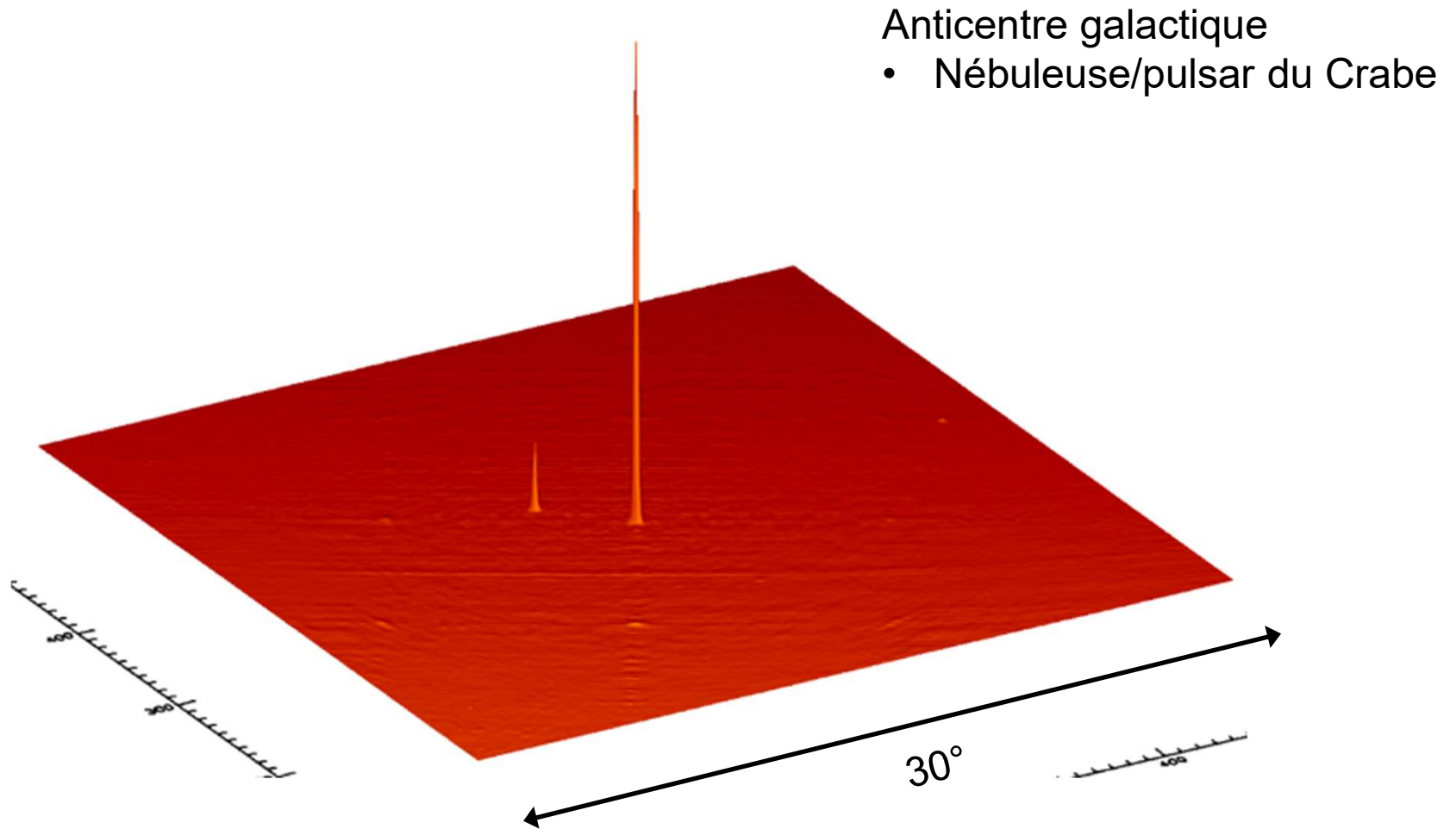
- Principe: chaque direction du champ de vue projette un motif différent sur un imageur
- Le motif est codé (autocorrelation =  $\delta$ )
- Inconvénient:
  - complexe, requiert un imageur
  - Moins sensible pour les sources étendues
- Avantages:
  - ne requiert pas d'hypothèse sur la stabilité du flux de la source
  - Grand champ de vue
- Domaine d'application: cartographie du ciel
- Exemple: GRANAT/SIGMA, INTEGRAL/IBIS, INTEGRAL/SPI, SWIFT/BAT

# La charge utile INTEGRAL



Masque codé  
D'IBIS

# Image INTEGRAL/IBIS/ISGRI





# pondération

- Principe: plusieurs détecteurs se voient affecter une partie du ciel. La direction d'une source est obtenue par « pondération » des flux de chaque détecteur
- Il n'y a qu'une seule source dans le ciel (→ source transitoire, e.g. GRB)
- Inconvénient:
  - mauvaise sensibilité pour des échelles de temps longues
  - Mauvaise précision de localisation (~ quelques degrés)
- Avantages:
  - Simplicité (e.g. quelques détecteurs non-imageurs)
  - Couverture complète du ciel
- Domaine d'application: GRBs, TGFs
- Exemple: GRO/BATSE, TARANIS, INTEGRAL

# Grilles tournantes

- Principe: La rotation des grilles crée pour une source unique un profil temporel caractéristique de la position de la source
- Inconvénients:
  - Pré-requis contradictoires
    - 1 seule source ponctuelle dans le ciel (→ transitoire)
    - Source stable sur échelle temps  $\ll t_{\text{rot}}$
  - Mécanique dans l'espace
- Avantages:
  - Simplicité
  - Grand champ de vue
- Domaine d'application: Novas-X, soleil
- Exemple: GRANAT/WATCH, RHESSI

# Grilles tournantes

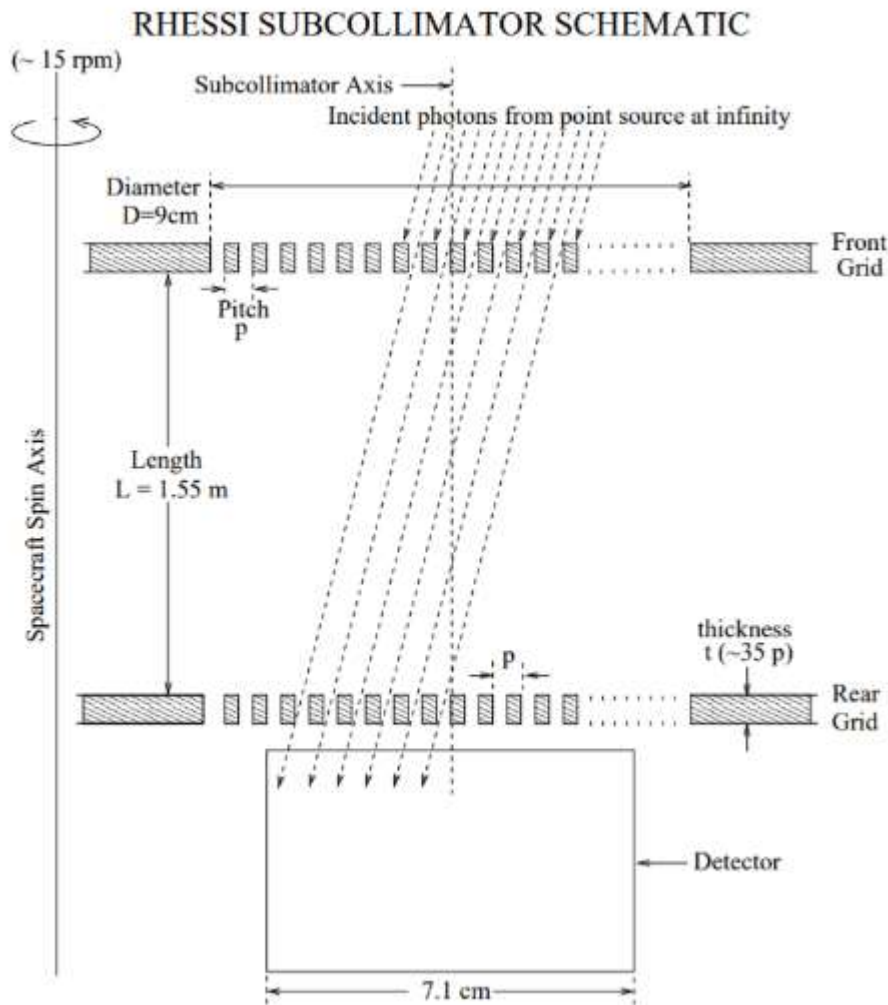


Fig. 1. Schematic of one subcollimator of the *RHESSI* RMC.

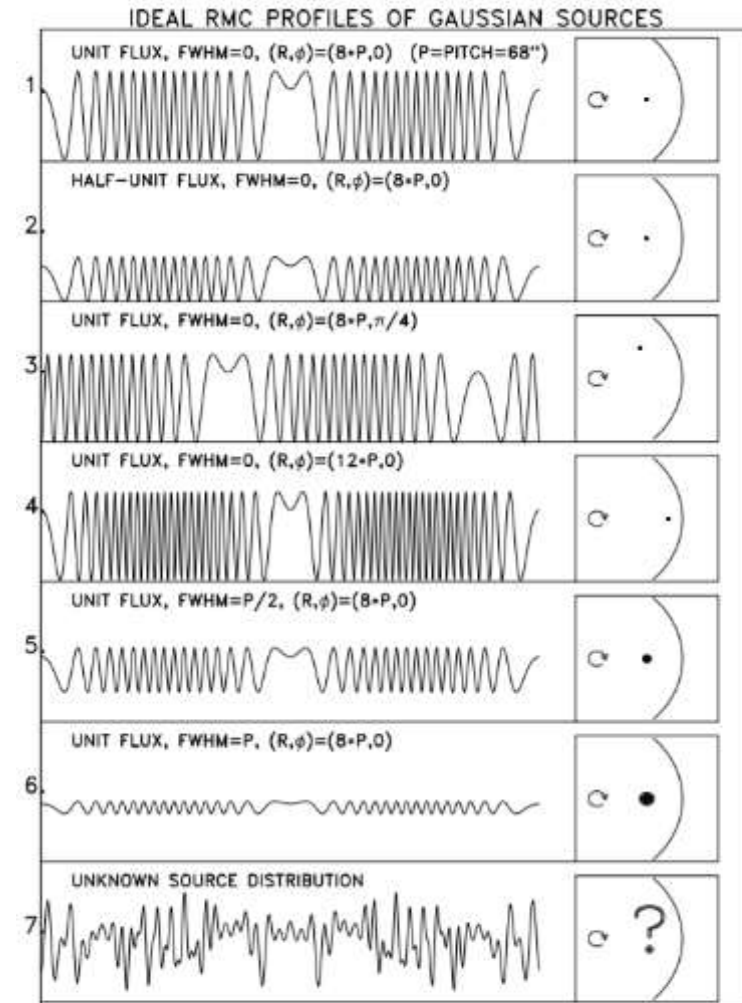
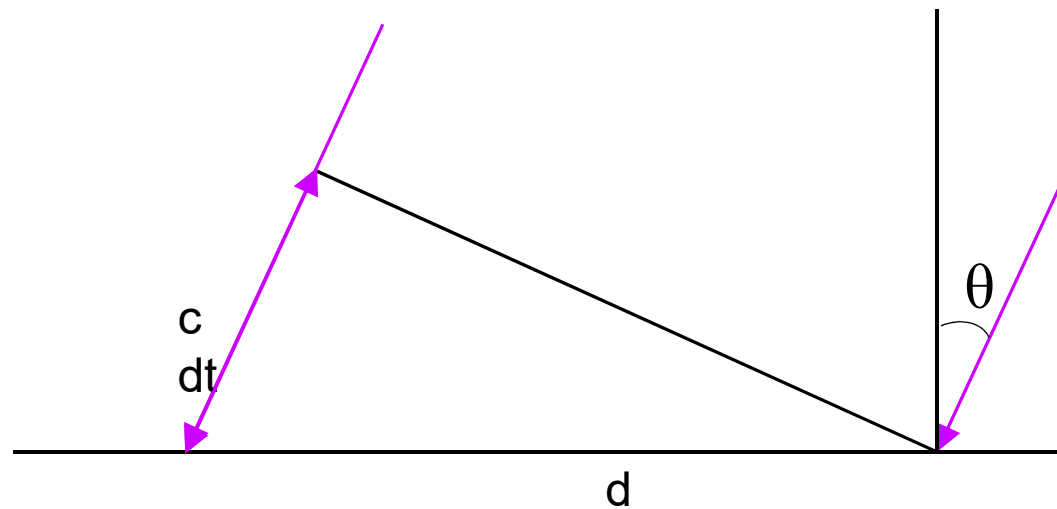


Fig. 2. The RMC principle: images and corresponding modulation patterns.

# Décalage temporel

- Principe: Le flash d'une source atteint les satellites d'une constellation à des instants dépendants de la direction de la source
- Il n'y a qu'une seule source dans le ciel (→ source transitoire, e.g. GRB)
- Inconvénients:
  - Requiert un essaim de satellites très dispersés
  - La précision de localisation dépend de la durée des sursauts
- Avantages:
  - Simplicité (pas d'imagerie)
  - Champ de  $4\pi$
- Domaine d'application: Sursauts gamma
- Exemple: ?

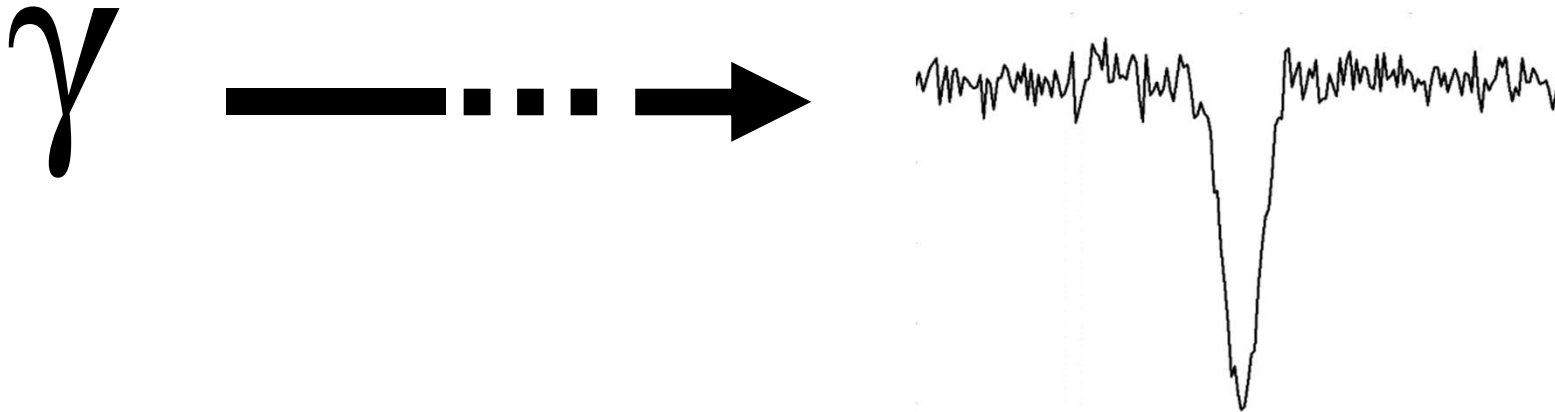
# Décalage temporel



$\sigma_{\text{GRB}}$ : Durée du GRB  
N: Nombre de photons détectés par satellite  
d: distance entre satellites  
dt: décalage temporel

$$\sigma_{\theta} = 2 \text{ arcsec} \times (\sigma_{\text{GRB}} / 1 \text{ ms}) \times (10^3 / N)^{0.5} \times (10^6 / d_{\text{km}})$$

- Une configuration de satellites de type LISA ( $d \sim 5 \cdot 10^6 \text{ km}$ ) localisera les sources à mieux que la seconde d'arc
- Un essaim de satellites en orbite proche localisera les sources avec une précision de l'ordre du degré



# Détecteurs gamma

# Détecteurs et instruments gamma

- Toutes les interactions d'un photon gamma dans la matière transfèrent son énergie à des électrons (ou positons)
- Mesurer l'énergie du photon revient à mesurer l'énergie totale des électrons secondaires (s'il n'y a pas d'échappement)
- Si l'on peut mesurer la direction des électrons secondaires, on aura accès à
  - La direction des photons  $\gamma$
  - La polarisation du flux  $\gamma$
- Sinon il faudra recourir pour l'imagerie à des systèmes de codage de l'ouverture (masque codé fixe, collimateur tournant) ou utiliser la barycentrisation pour les événements impulsionnels (sursauts  $\gamma$ )

# Détecteurs gamma

- **Détection directe:**

$$\gamma \rightarrow e \rightarrow \text{ionisation} + \vec{E} \rightarrow \text{impulsion}$$

- Semiconducteurs: Si, Ge, CdTe
- Chambres à projection temporelles (TPC): Ar, Ne, Xe

- **Détection indirecte:**

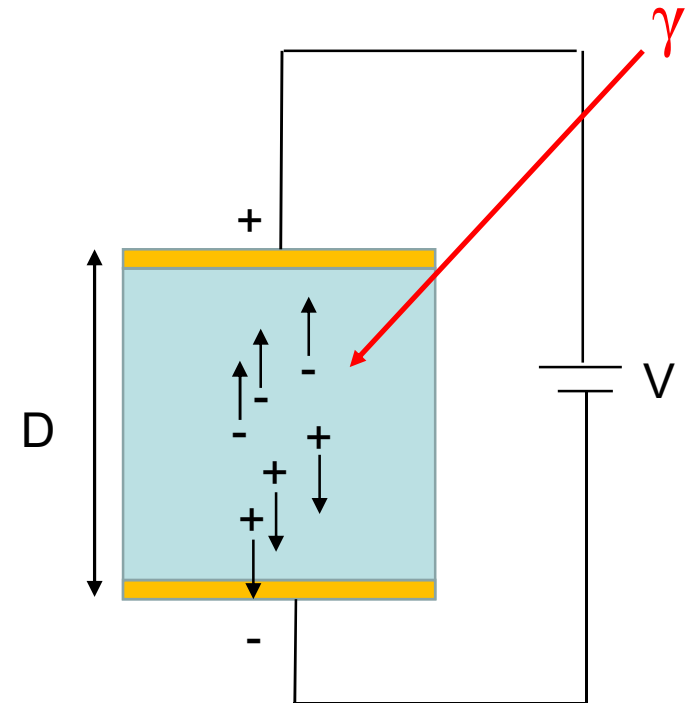
$$\gamma \rightarrow e \rightarrow \text{ionisation} \rightarrow \text{fluorescence} + \text{PM} \rightarrow \text{impulsion}$$

- Scintillateurs: NaI, CsI, BGO, LaBr3...



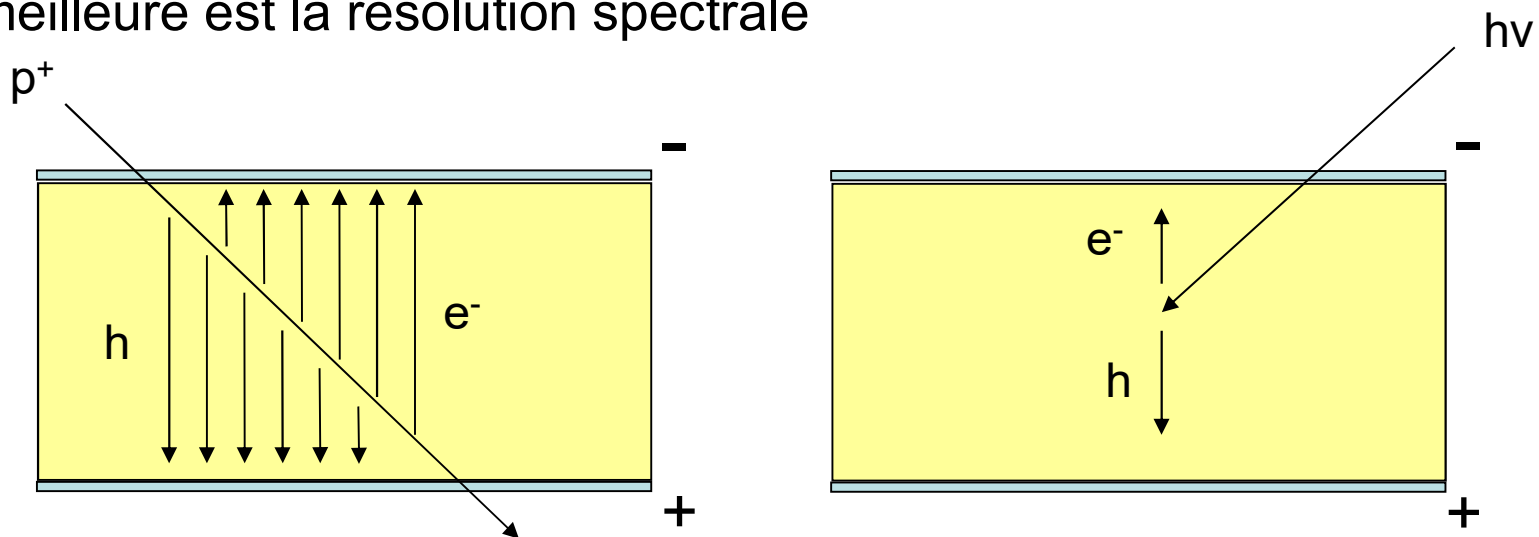
# Chambre d'ionisation

- Une charge électrique se déplaçant dans le champ électrique d'un condensateur induit un courant
- Si  $n$  charges sont produites et transitent sans perte jusqu'aux électrodes l'impulsion sera proportionnelle au nombre de charges créées et donc à l'énergie du photon
- L'impulsion ne résulte pas de l'arrivée des charges aux électrodes mais de leur déplacement entre les électrodes (théorème de Ramo)
- → si une charge est piégée avant d'arriver aux électrodes, elle aura quand même contribué au signal)



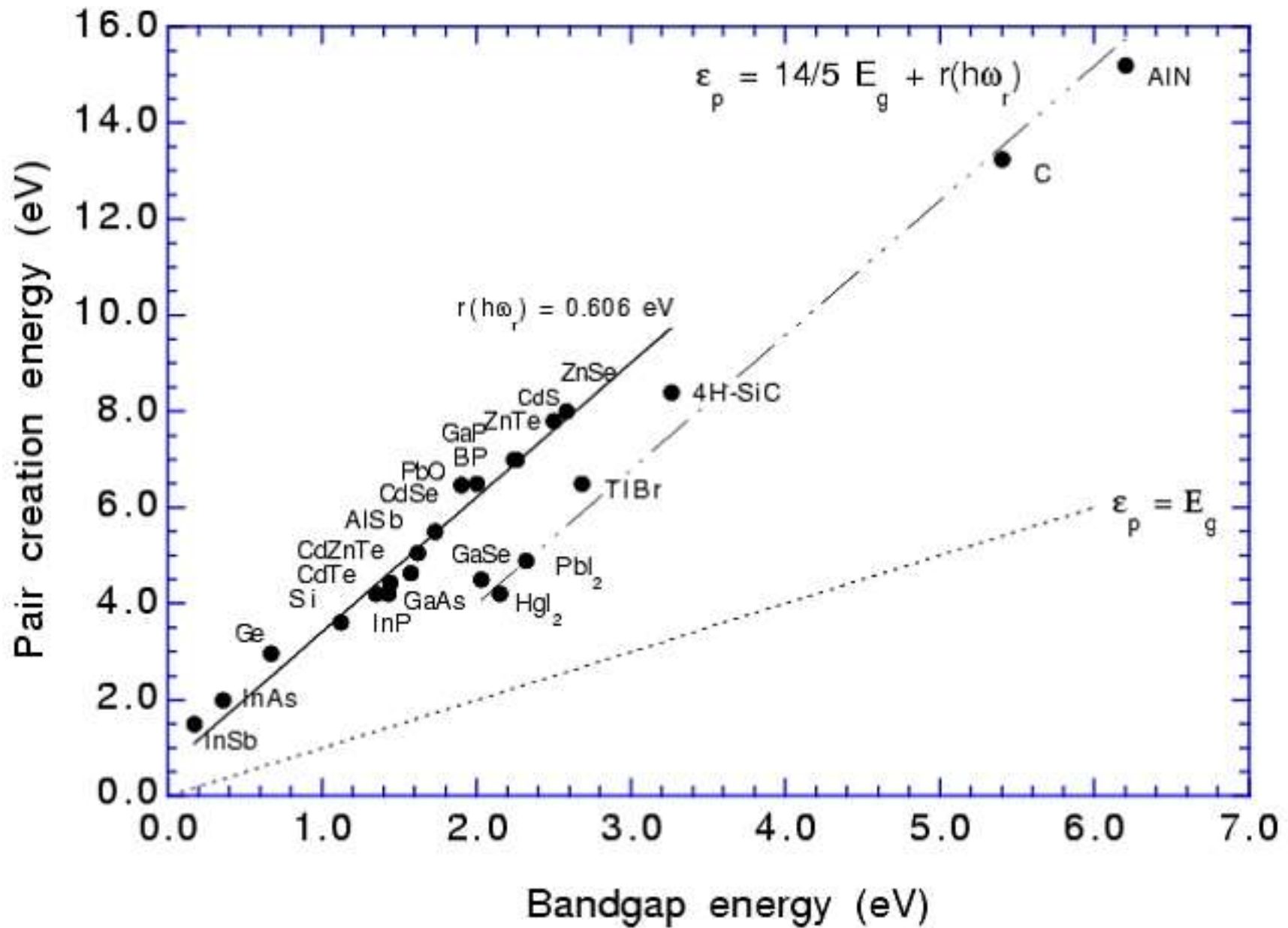
# Détecteurs semiconducteurs

- Ils agissent comme des chambres d'ionisation solides
- Les particules chargées traversantes ou les photoélectrons ionisent les atomes sur leur chemin.
- Une tension est appliquée aux électrodes et les porteurs de charge (électrons et trous) dérivent vers les électrodes ce qui induit une impulsion de courant dans le circuit
- Les semi-conducteurs à faible zone interdite doivent être refroidis (par ex. Ge doit fonctionner à 80 K) plus faible est l'énergie nécessaire à la création d'une paire de porteurs de charge, meilleure est la résolution spectrale



# Détecteurs gamma semiconducteurs

	Si	Ge	CdTe	Hgl2	GaAs
Z	14	32	48-52	80-53	31-33
TRL	9	9	9	3	5?
$\lambda$ (cm) @ 100 keV	2.33	0.34	0.10	0.05	0.34
$\rho$ (cm <sup>-3</sup> )	2.33	5.32	5.8	6.36	5.31
$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> ) @ 100 keV	0.18	0.56	1.67	3.41	0.56
Electron Mobility (cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	1350	3900	950	70	8500
Electron lifetime ( $\mu$ s)	1000	1000	1.2	2.8	0.01
Hole mobility (cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	480	1900	73	2.5	400
Hole lifetime ( $\mu$ s)	2000	1000	4..6	20	0.01
Band gap	1.12	0.66	1.51	2.1	1.22
e-h pair creation energy	3.62	2.96	4.42	4.2	4.2
Maximum thickness (cm)		10	0.6		

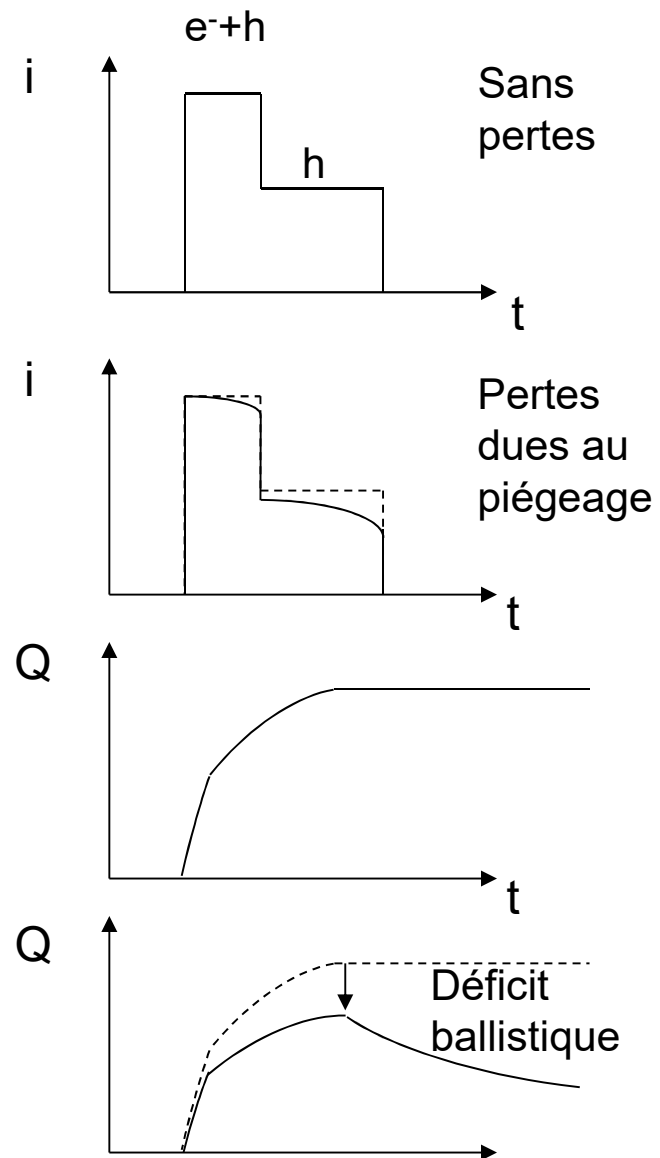


# Propriétés des porteurs de charge

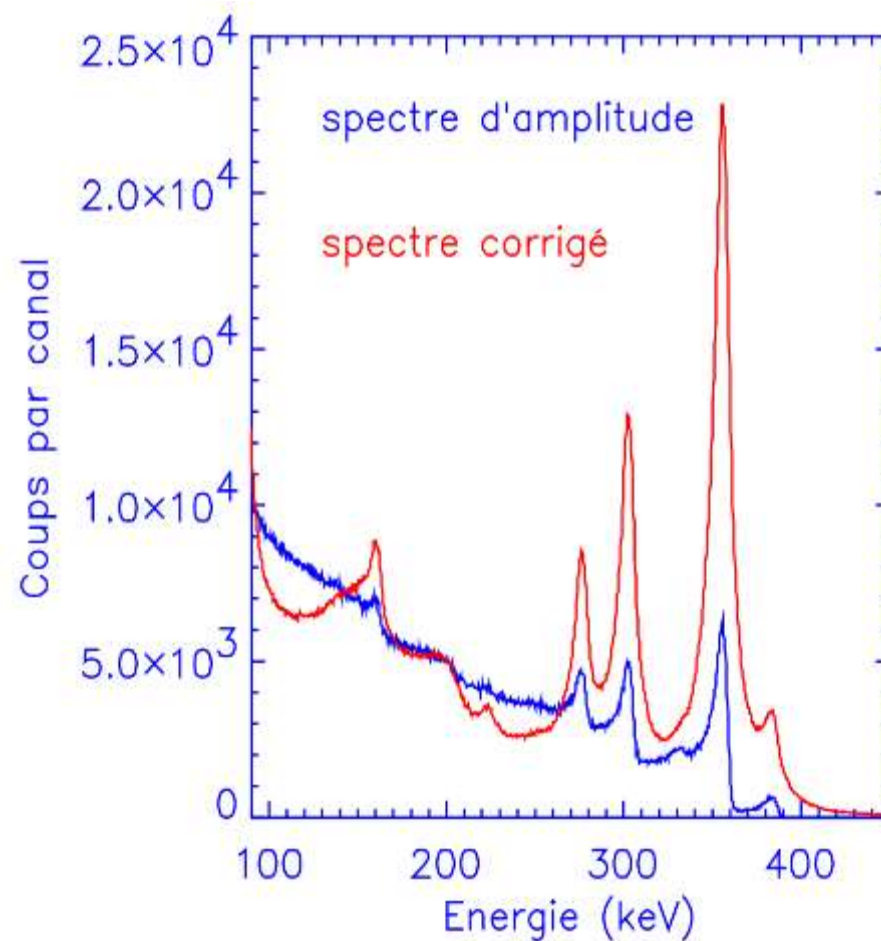
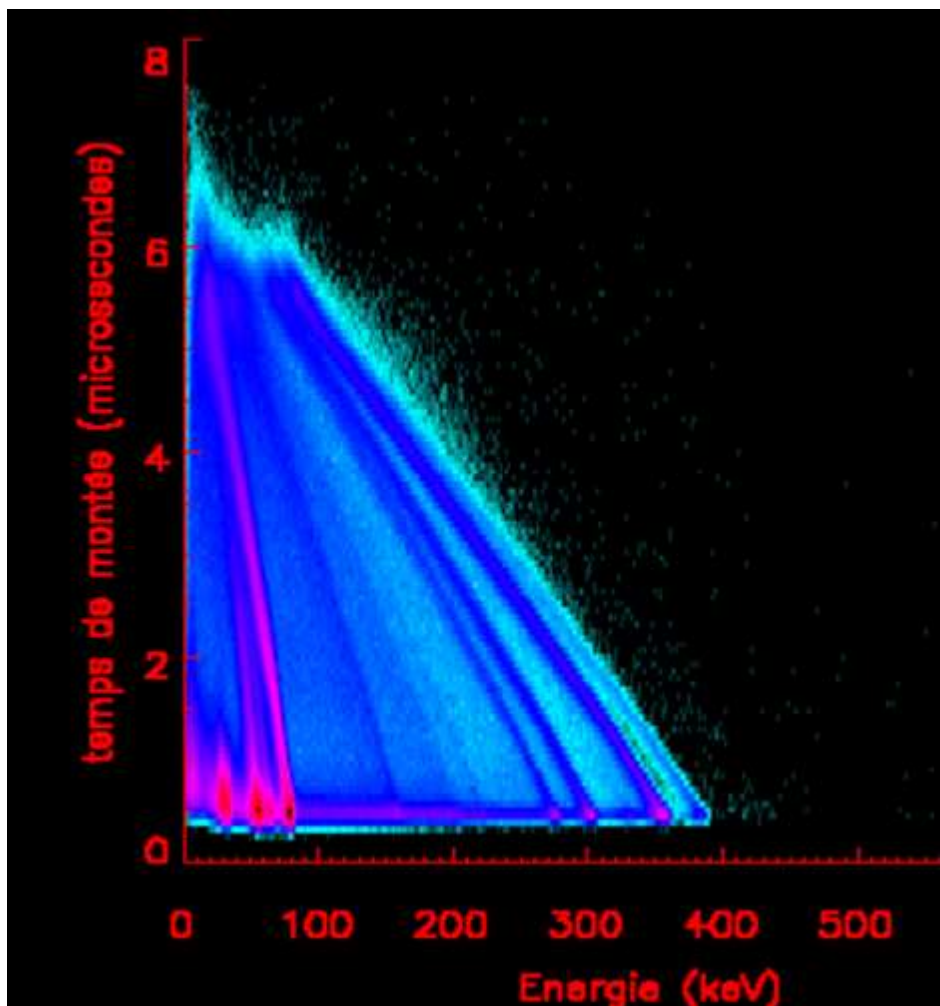
- Des électrons (et des trous) soumis à un champ électrique donné acquièrent une vitesse proportionnelle au champ  $E$  :  $v = \mu E$
- La constante de proportionnalité,  $\mu$  est appelée mobilité.
- Des électrons (ou trous), dérivant sous l'effet d'un champ électrique peuvent être piégés.
- Leur nombre diminue exponentiellement durant le transport vers les électrodes et l'on peut définir un temps de vie ( $\tau$ )
- $\mu$  et  $\tau$  dépendent du matériau du détecteur, de la température et peuvent être affectés par l'irradiation.

# Pertes de “charge”

- Le terme « charge » désigne ici la charge d'un condensateur durant le transit des porteurs de charge.
- On distingue deux sortes de pertes qui amoindrissent le signal:
  - Les pertes dues au piégeage, c'est-à-dire au transport interrompu des porteurs de charge par des pièges (e.g. défauts du cristal)
  - Le déficit balistique qui est due à la décharge du condensateur qui accumule une « charge » pendant le transport des porteurs de charge



# Corriger les pertes de charge



*INTEGRAL/IBIS/ISGRI*

# Réduire les pertes de charge

- Dans le cas du CdTe, ce sont les trous (les plus lents) qui sont responsables du déficit balistique.
- Si au lieu de disposer de 2 électrodes planaires pleines, on segmente l'anode, le champ de pondération sera beaucoup plus fort près de l'anode, favorisant grandement le transport des électrons au détriment de celui des trous
- L'utilisation d'une tension plus élevée sur une diode shottky permet d'utiliser des tensions plus élevées, donc de réduire le temps de transit et donc de réduire le piégeage et le déficit balistique
- Ces principes appliqués au CdTe ont permis d'améliorer les performances spectrales d'un ordre de grandeur à 60 keV (d'ISGRI à Caliste)



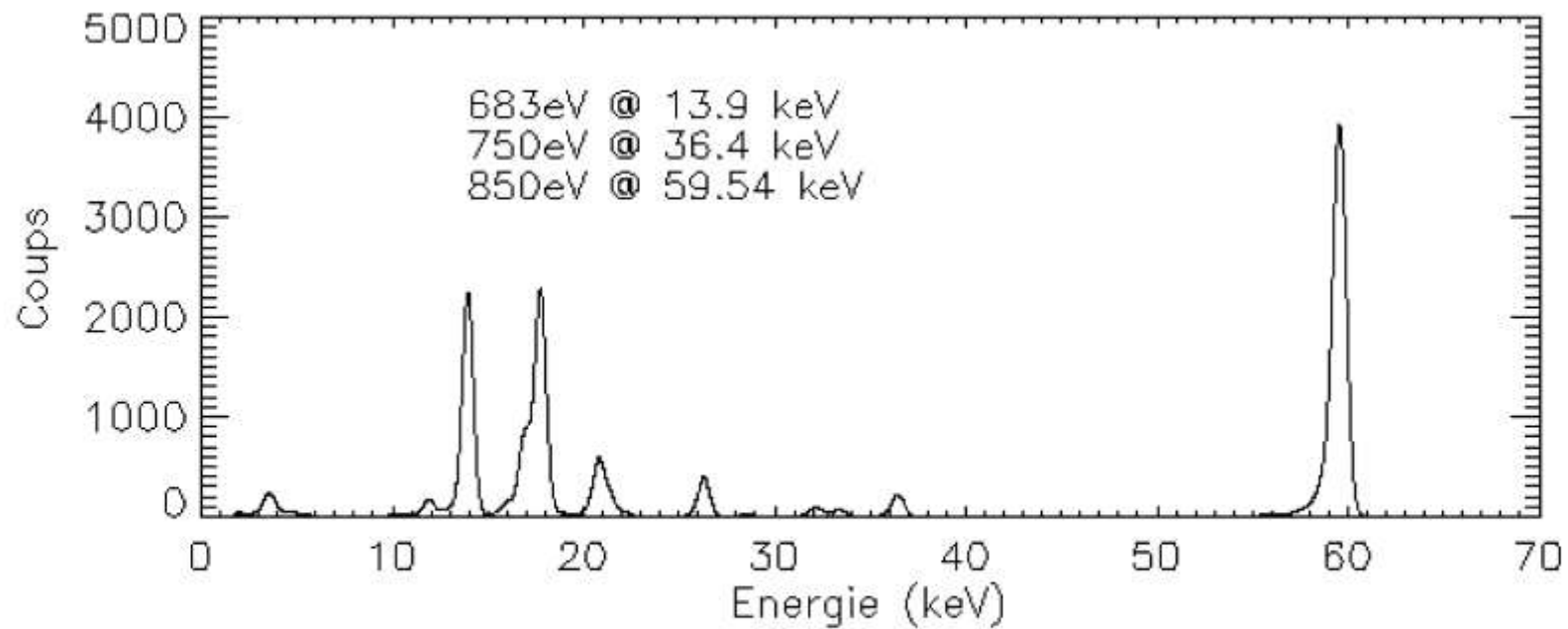
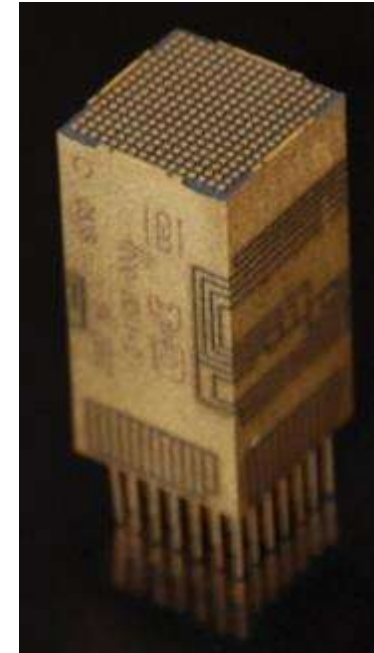
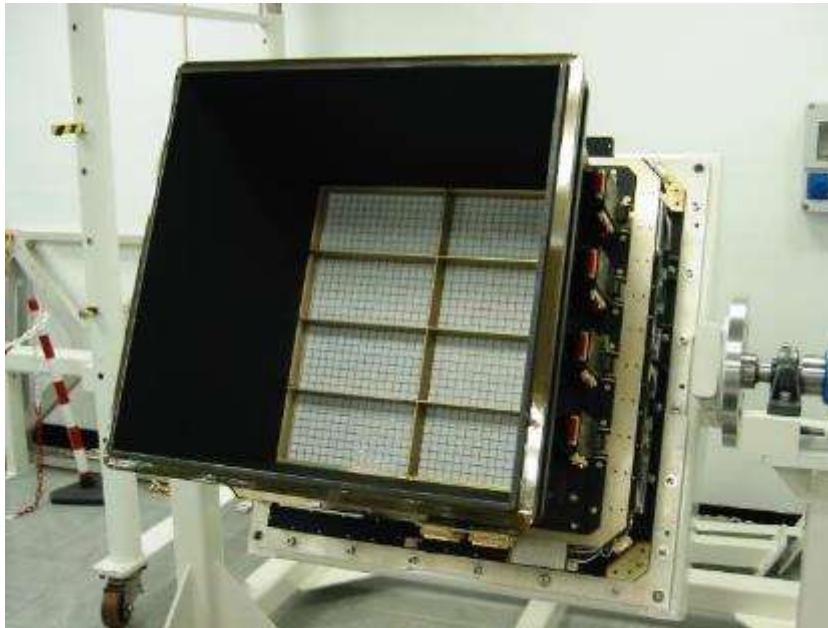


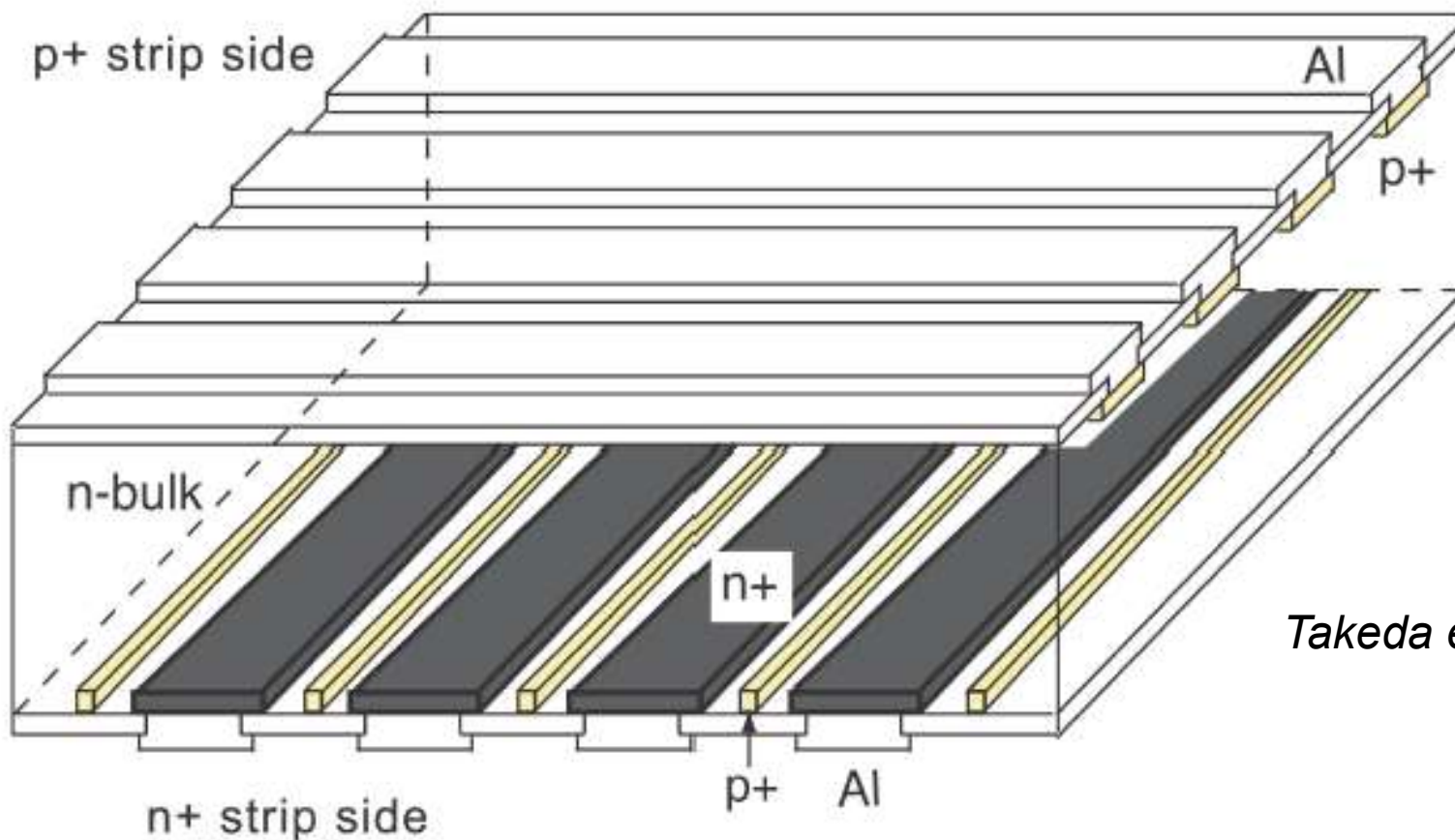
Figure 5.17 – Spectre somme sur  $8 \times 8$  pixels au pas de 1 mm obtenu à l'Irfu du CEA sur une microcaméra Caliste 64 équipée d'une matrice de CdTe Schottky de 1 mm d'épaisseur refroidie à  $-10^{\circ}\text{C}$ .

# Véritables imageurs ( $N^2$ voies de lecture)

- Chaque pixel est un détecteur indépendant avec son déclencheur, son électronique de proximité, et son circuit de lecture
- e.g. INTEGRAL/ISGRI, SIMBOL-X/HED



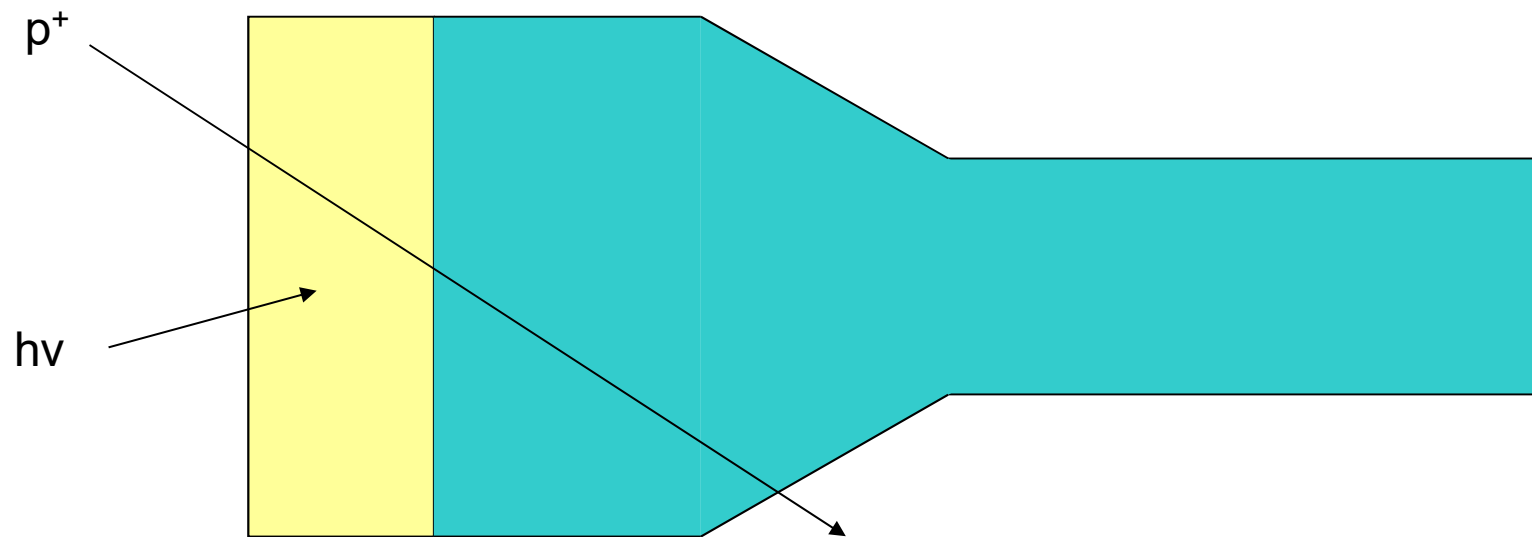
# Imageurs à pistes ou DSSD ( $2N$ voies de lecture)



*Takeda et al., 2007*

# Scintillateurs

- Les particules chargées traversantes ou les photoélectrons ionisent les atomes sur leur chemin
- Lors des recombinaisons dans un scintillateur, une forte lumière fluorescente (scintillation) est émise dans le domaine visible
- Celle-ci est conduite par un revêtement ad-hoc du scintillateur vers un détecteur de lumière visible rapide (PMT, Photodiode) qui recueille la lumière et produit une impulsion électrique



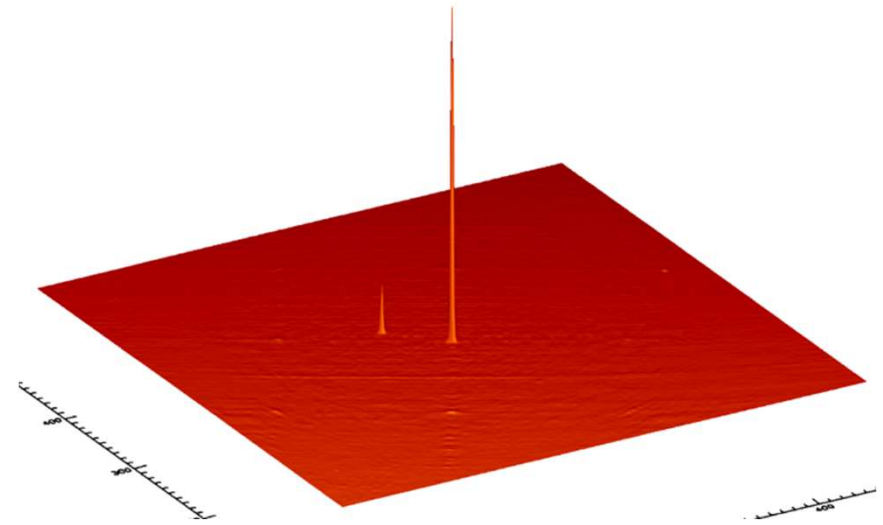
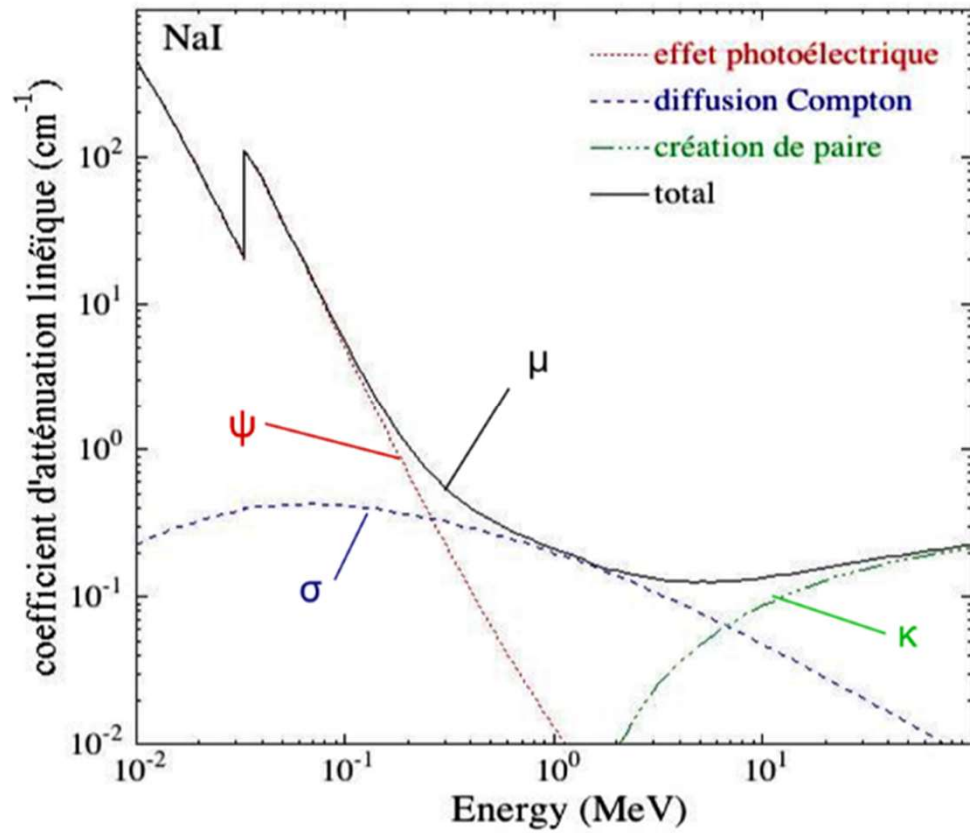
# Propriétés des scintillateurs

- Production de lumière (photons/keV) : régit la performance spectrale, elle est souvent exprimée en référence au NaI
- La longueur d'onde moyenne de la lumière émise. Elle doit être adaptée au photodétecteur (PMT, diode, SiPM)
- Le pouvoir d'arrêt : exprimé en termes de libre parcours moyen à une énergie de photons  $\gamma$  donnée
- Temps de décroissance de la lumière: en principe une propriété intrinsèque des cristaux, mais il peut être affecté par des questions de collecte lumineuse
- Indice de réfraction : affecte la collection de lumière et donc le temps de décroissance et la résolution en énergie
- Certains scintillateurs sont très hygroscopiques et nécessitent une enveloppe hermétique
- La résistance à l'irradiation
- La radioactivité interne

# Quelques scintillateurs disponibles

	Plastic	LaBr3	NaI	BGO	CsI(Na)	CsI(Tl)
Light coll. (%)	25	165	100	20	85	45
$\lambda_{\max}$ (nm)	425	380	415	480	420	550
$\lambda$ (cm) @ 100 keV	5.95	0.15	0.16	0.03	0.11	0.11
$\rho$ (cm <sup>-3</sup> )	1.03	5.29	3.67	7.13	4.51	4.51
$\tau_{\text{dec}}$ (ns)	2.1	16	250	300	630	1000
Index of refraction	1.58	1.9	1.85	2.15	1.84	1.79
radioactif	Non	Oui	Non	Non	Non	Non
Résistant à l'irradiation						
hygroscopic	no	yes	yes	no	yes	no

# Rappels





# Une question de fond

# Fond

- La notion de fond est plus délicate qu'elle n'y paraît à première vue.
- Le fond externe pour un observateur peut être signal pour un autre (par exemple 2 sources proches, fond cosmique etc.)
- Fond interne: il résulte des interactions des particules environnantes sur l'instrument et le satellite.
  - Rapide:  
il résulte de la perte d'énergie des électrons, des protons ou des ions à travers les détecteurs  
ou des interactions des particules secondaires produites par la spallation
  - Retardé: il résulte de la décroissance radioactive des isotopes instables produits lors des interactions de spallation

# Les particules environnantes

- Ceintures de radiations ( $e^-$  et protons)
- Anomalie de l'atlantique sud (protons)
- Rayons Cosmiques de haute énergie
- Neutrons atmosphériques
- Neutrons créés dans l'instrument et le satellite par les interactions du rayonnement cosmique
- Activité solaire
  - Particules émises lors des éruptions solaires
  - Modulation du flux de rayonnement cosmique de basse énergie par la magnétosphère

# Ceintures de Van Allen

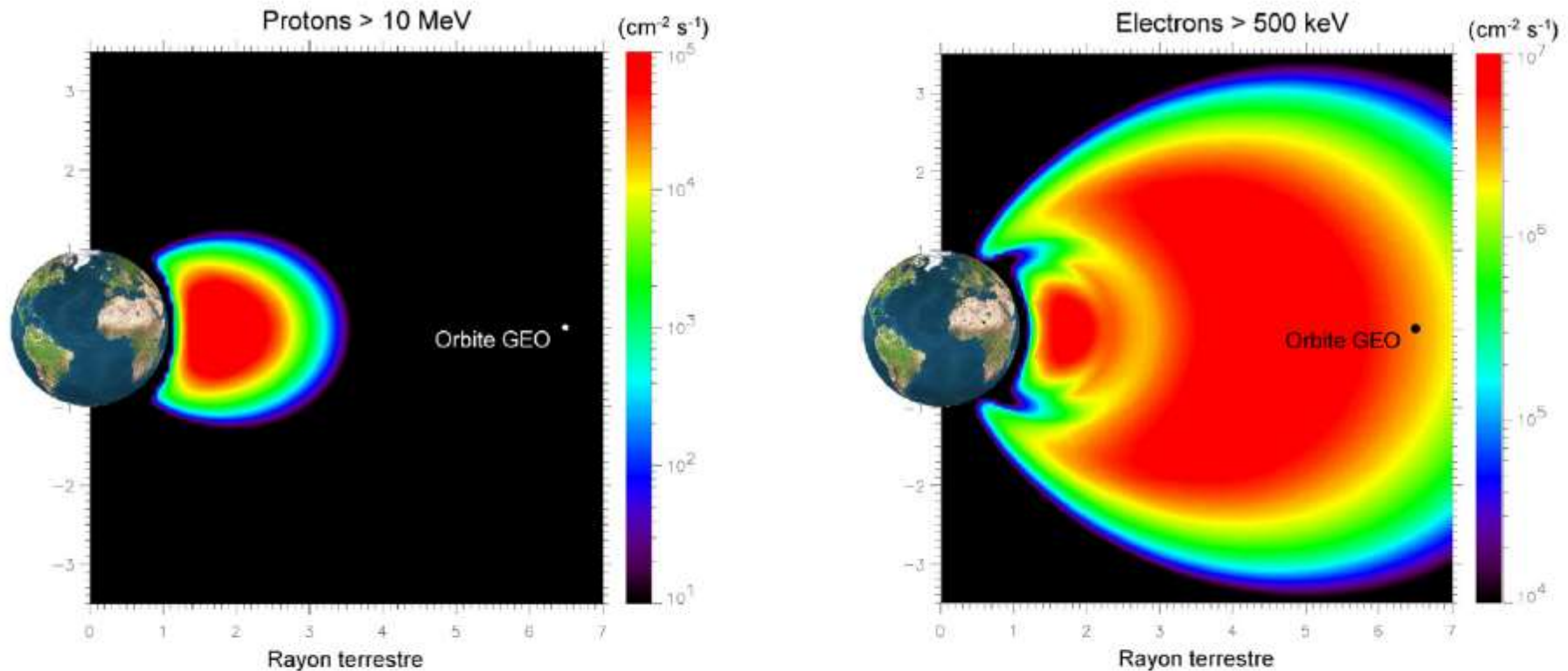
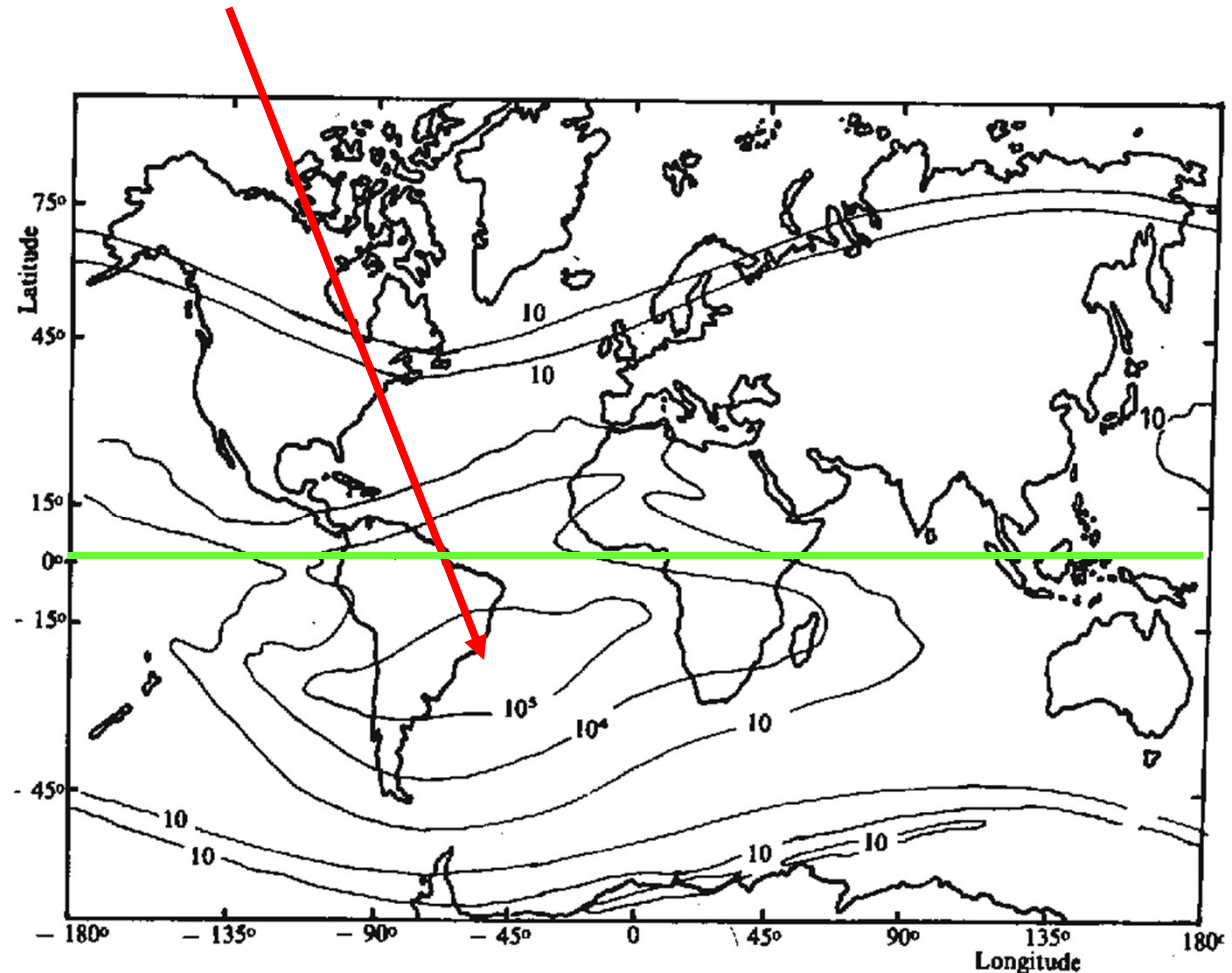


Figure 1.4 – Profil de densité des protons d'énergie supérieure à 10 MeV et des électrons d'énergie supérieure à 500 keV dans la magnétosphère, en fonction de la distance au centre de la Terre, exprimée en nombre de rayons terrestres ( $R_T = 6400$  km). L'orbite géostationnaire, utilisée par exemple pour les satellites de météorologie ou de télécommunications, se situe dans les ceintures externes de Van Allen (Crédit Onera).

Thèse A. Meuris

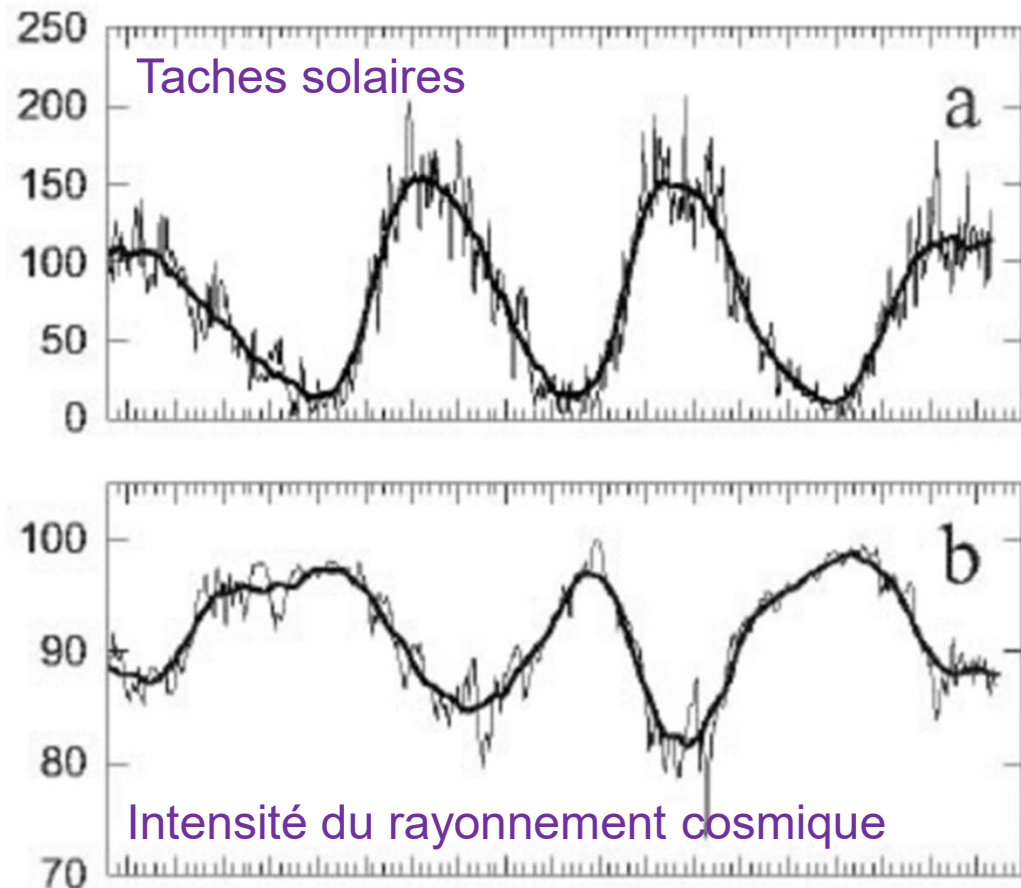
# Anomalie de l'atlantique sud (SAA)

- Affecte les satellites en orbite terrestre basse et inclinée ( $>5^\circ$ ) sur l'équateur
- La traversée de la SAA produit des éléments radioactifs qui décroissent sur différentes échelles de temps, produisant un fond variable
- La HT des PM doit être coupée lors de la traversée de la SAA (risque de destruction du PM)

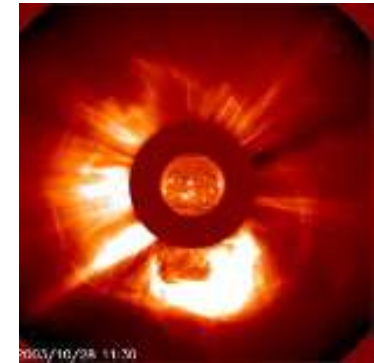


# Activité solaire

- Les rayons cosmiques de basse énergie ( $E < 1 \text{ GeV}$ ) sont “modulés” par l’activité du soleil
- L’héliosphère s’étend et se contracte durant le cycle solaire (11 ans)
- Elle s’étend lors d’une éruption solaire
- En conséquence, le fond interne du détecteur est inversement lié à l’activité solaire si les radio-isotopes à vie longue produits par spallation ne sont pas dominants



# Eruptions solaires



- Résultent de l'éjection de masse coronale (principalement des protons)
- Liées directement à l'activité solaire (plus fréquentes au maximum solaire)
- Saturent les détecteurs de rayons X et gamma (effets d'empilement et de temps mort) et peuvent être dangereuses pour les PM
- L'héliosphère gonfle
- La densité des rayons cosmiques est réduite près de la terre
- Le fond interne des détecteurs X et gamma peut être réduit pendant quelques jours !

# Composantes du fond

- Orbite terrestre basse (LEO) ~ 500 km
  - CGB (ouverture)
  - Emission atmosphérique
    - Albedo CGB
    - Induit par RC de haute énergie
  - SAA (inclination > 5°)
    - immédiat
    - retardé

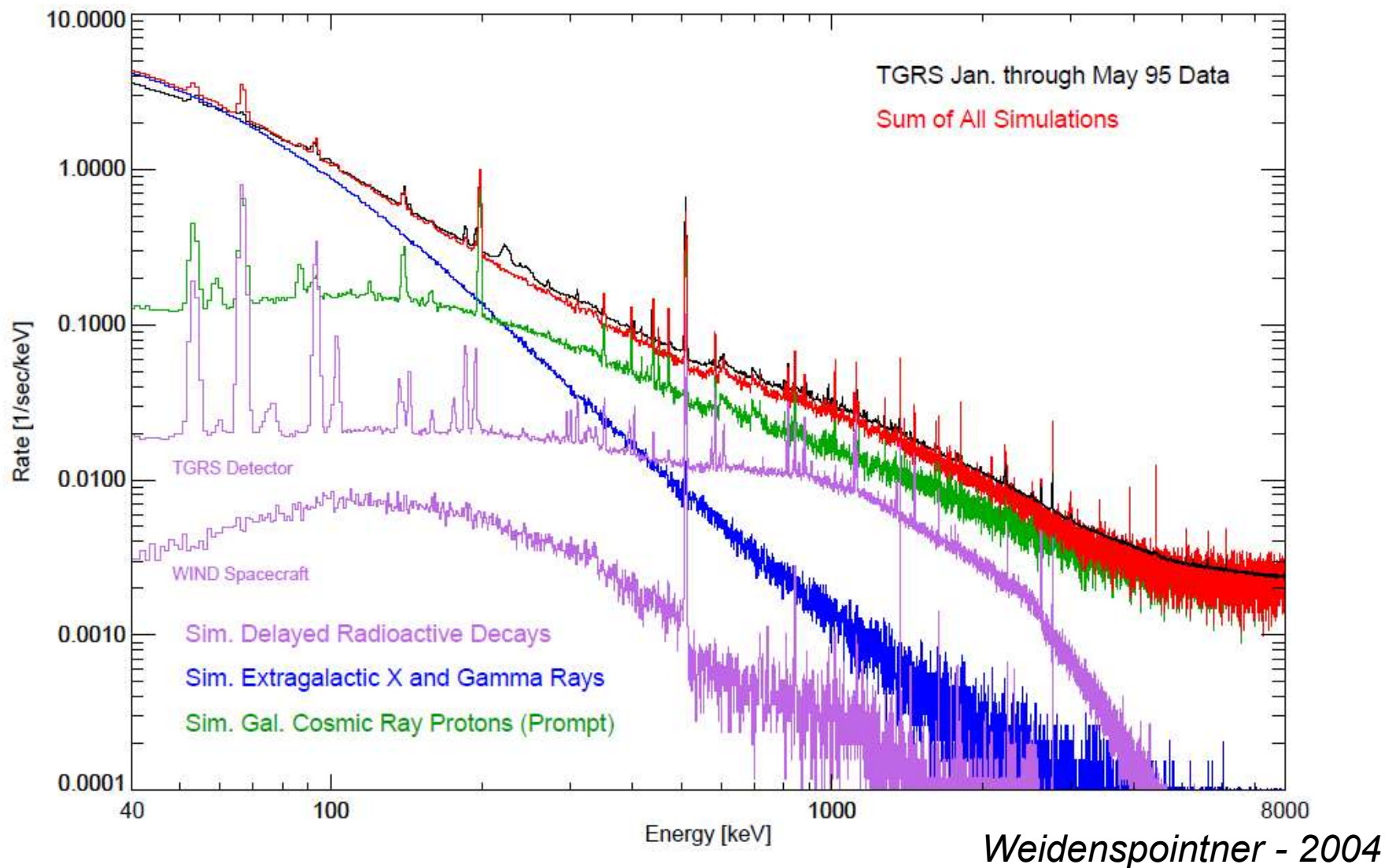
RHESSI, Chandra, SWIFT, Fermi

- Orbite terrestre haute (HEO) ~ 100 000 km
  - CGB (ouverture)
  - Induit par RC (modulé par activité solaire)
    - immédiat
    - retardé

XMM-Newton, INTEGRAL



# Fond TGRS (près de L1)



# Réduire le fond

# Réduction du fond

- Blindages passifs (contre CDB et autres sources)
- Choix des matériaux du détecteur (pour diminuer le fond interne retardé)
- Choix de l'orbite: L'orbite équatoriale basse (par exemple BeppoSAX) est meilleure du point de vue du fond mais
  - On doit retourner le satellite 2 fois par orbite ou accepter un temps d'observation 2 fois moindre
  - Il faut des stations de suivi le long de l'équateur
  - Il faut des batteries suffisantes (rechargées la moitié du temps)
  - Cette orbite n'est pas usuelle → tir dédié ou changement d'inclinaison de l'orbite (moteur et carburant)
- Systèmes anticoincidence (VETO) (contre le fond interne immédiat)
- Détecteurs Phoswich

# Anticoïncidence

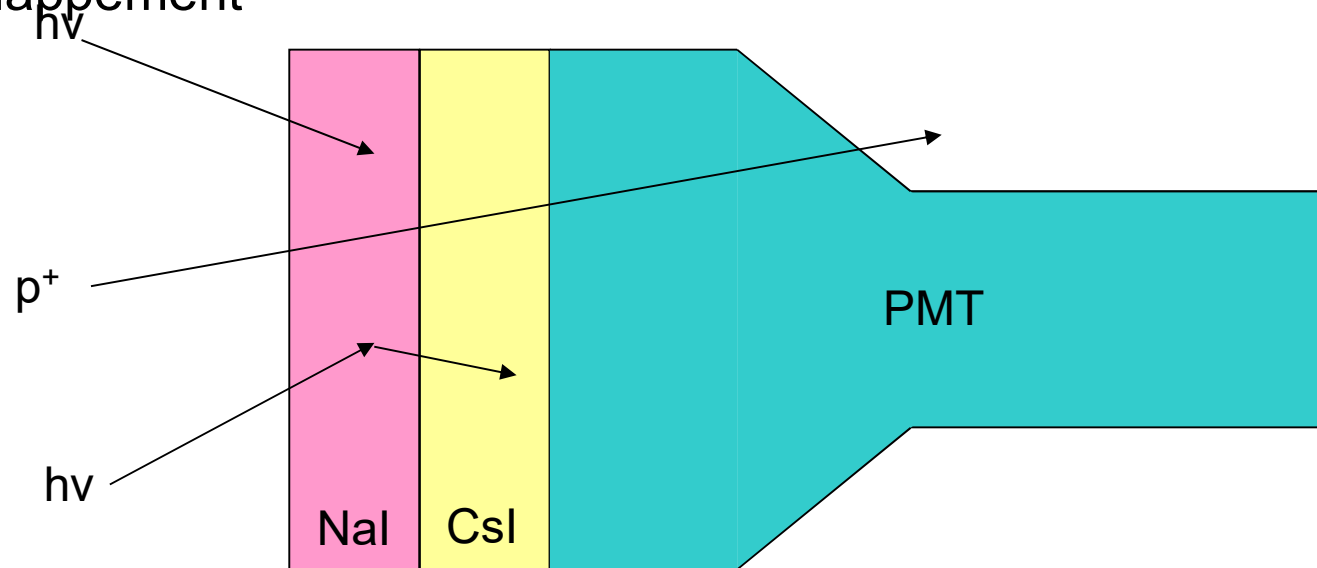
- La plus grande partie du fond interne gamma est due aux interactions des protons dans le détecteur et le satellite
- La plupart des protons du RC sont proches du minimum d'ionisation (1 GeV) et ne peuvent être arrêtés
- En traversant les matériaux (détecteurs), ils laissent de larges dépôts d'énergie qui peuvent saturer l'électronique
- Ils peuvent entrer en collision avec des noyaux dans l'expérience et produire des produits de spallation instables qui décroissent en émettant un rayonnement gamma contribuant au fond
- Si la décroissance a lieu en moins de quelques microsecondes, un simple détecteur additionnel traversé par le même proton peut fournir un signal VETO inhibant le codage des événements simultanés dans le détecteur principal

# Détecteurs d'anticoïncidence

- Le choix des détecteurs d'anticoïncidence dépend du contexte (domaine d'énergie) et des événements que l'on veut rejeter
- Si le but est de simplement de bloquer le déclenchement de l'expérience lors du passage d'un proton, un simple scintillateur plastique lu par des PM fera l'affaire
- Si l'on cherche aussi à réduire les diffusions Compton (anti-Compton) ou la radioactivité  $\beta^+$  il faut utiliser des détecteurs à Z élevé. Il est important que le seuil bas en énergie soit inférieur à 100 keV et l'on privilégiera des scintillateurs lourds peu onéreux (BGO, CsI)

# Détecteur phoswich

- Utiliser deux scintillateurs avec des temps de décroissance différents, par ex. NaI (250 ns) et CsI(Tl) (1  $\mu$ s), lus par un seul PMT
- Rejeter tous les événements avec une durée d'impulsion plus longue que le temps de décroissance du scintillateur le plus rapide (e.g. > 500 ns)
- Le Phoswich s'est avéré très efficace pour réduire le fond et l'échappement



# Spectroscopie

En général les semiconducteurs sont de meilleurs spectromètres que les scintillateurs

- Ge refroidi à 80K (SPI): 1% à 100 keV
- CdTe (Caliste): 1% à 100 keV
- DSSD: ~ 5% à 100 keV
- La Br3 (scintillateur !): ~ 10% à 100 keV

# Etalonnage des instruments gamma

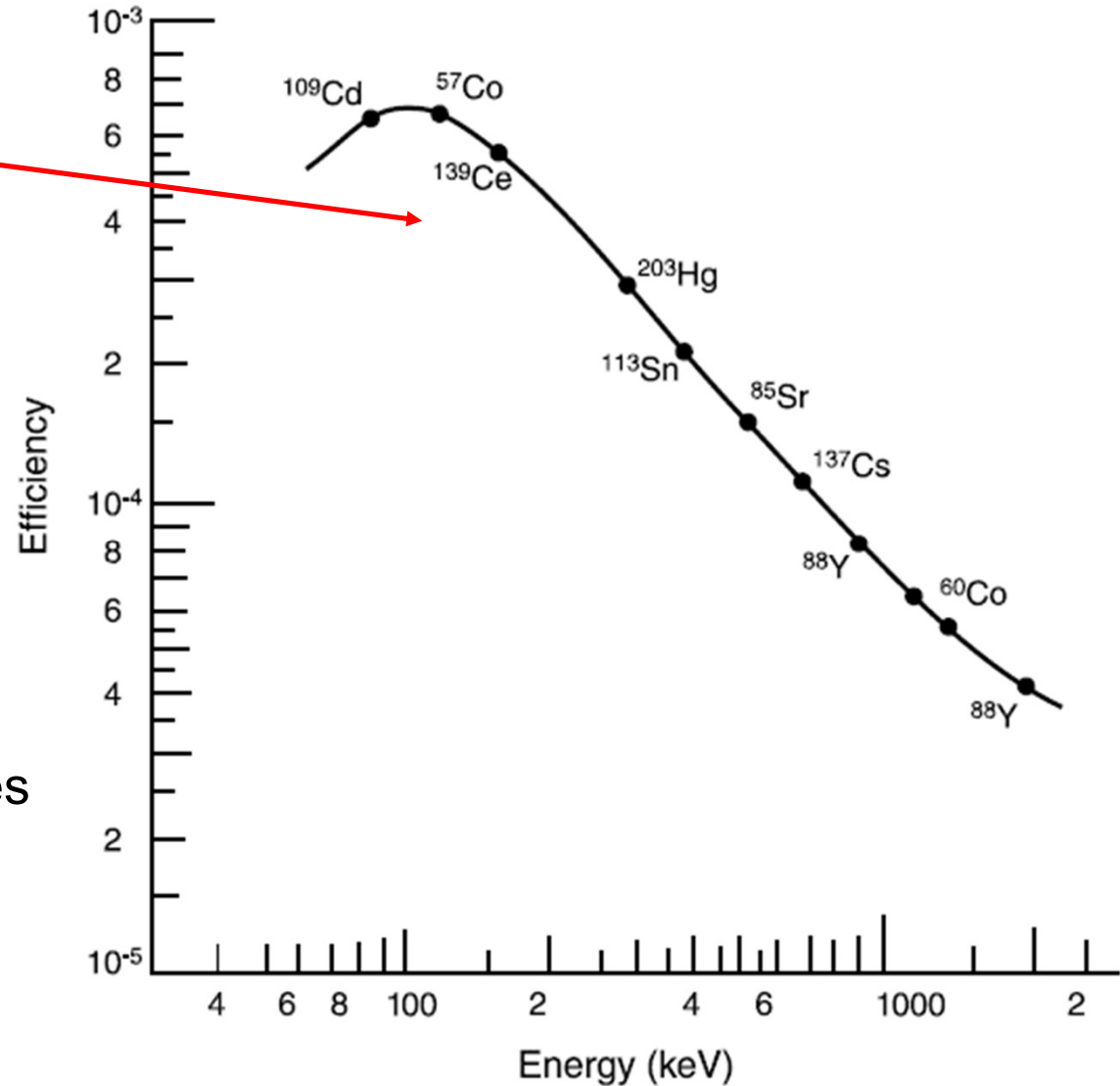
Nécessite

- Sources radioactives
- Accélérateurs de particules ( $E > 5$  MeV)

Mais

- Diffusion Compton dans les matériaux environnants
  - Plafonds, sol et murs
  - Satellite en vol
- Distance finie des sources radioactives

→ Simulations Monte-Carlo





# Simulations Monte-Carlo

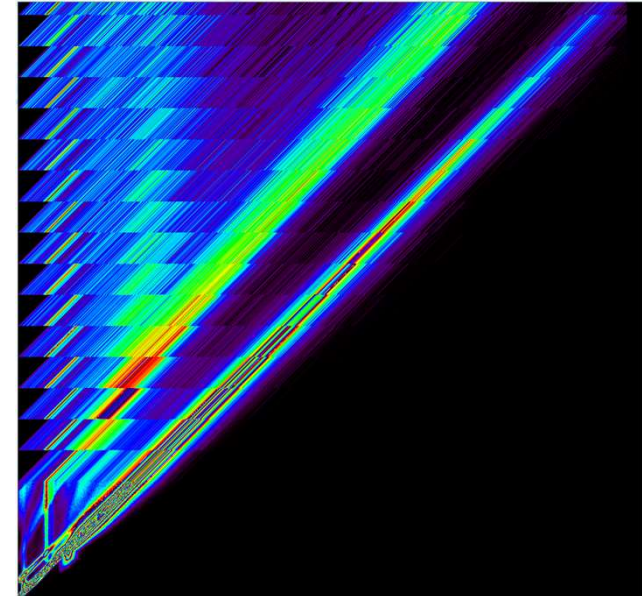
Permettent de calculer

- La surface sensible ou ARF (fonction de réponse auxiliaire)
- La réponse spectrale ou RMF (Redistribution Matrix File)



Elles sont nécessaires pour

- Obtenir la réponse de l'expérience à toute énergie
- Simuler l'effet des logiques de déclenchement
- Re-calculer la réponse pendant le vol pour prendre en compte l'évolution de l'instrument

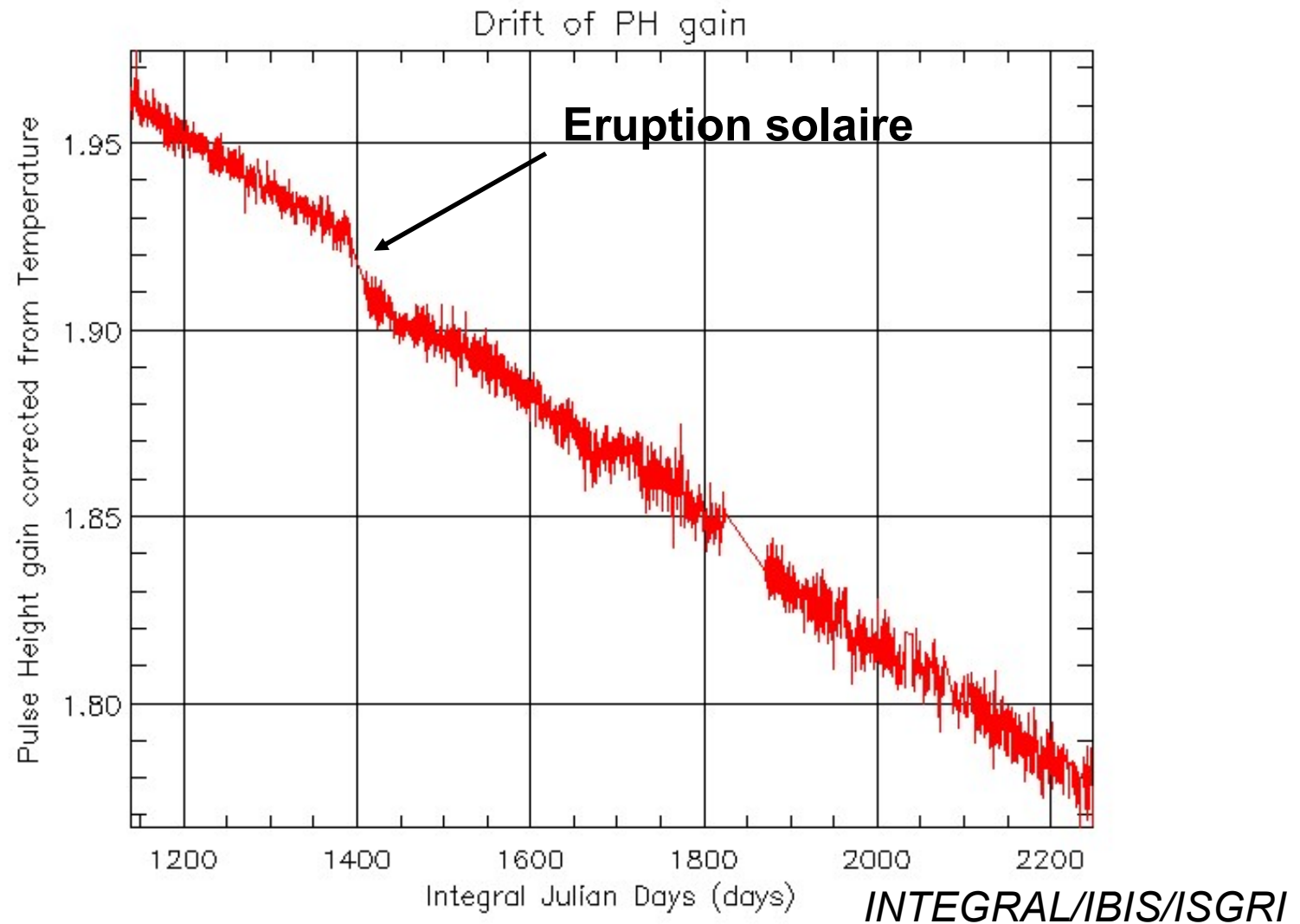


# Etalonnage en vol

Nécessaire pour prendre en compte

- Le changement dans la réponse dû au stress lors du lancement
- Les gradients thermiques (dans le vide)
- Les variations thermiques (angle d'aspect du soleil)
- Les Mesures au sol manquantes
- Le vieillissement du détecteur
- Les effets de l'irradiation (sur les détecteurs et l'électronique)

# Dérive du gain d'ISGRI



# Photométrie

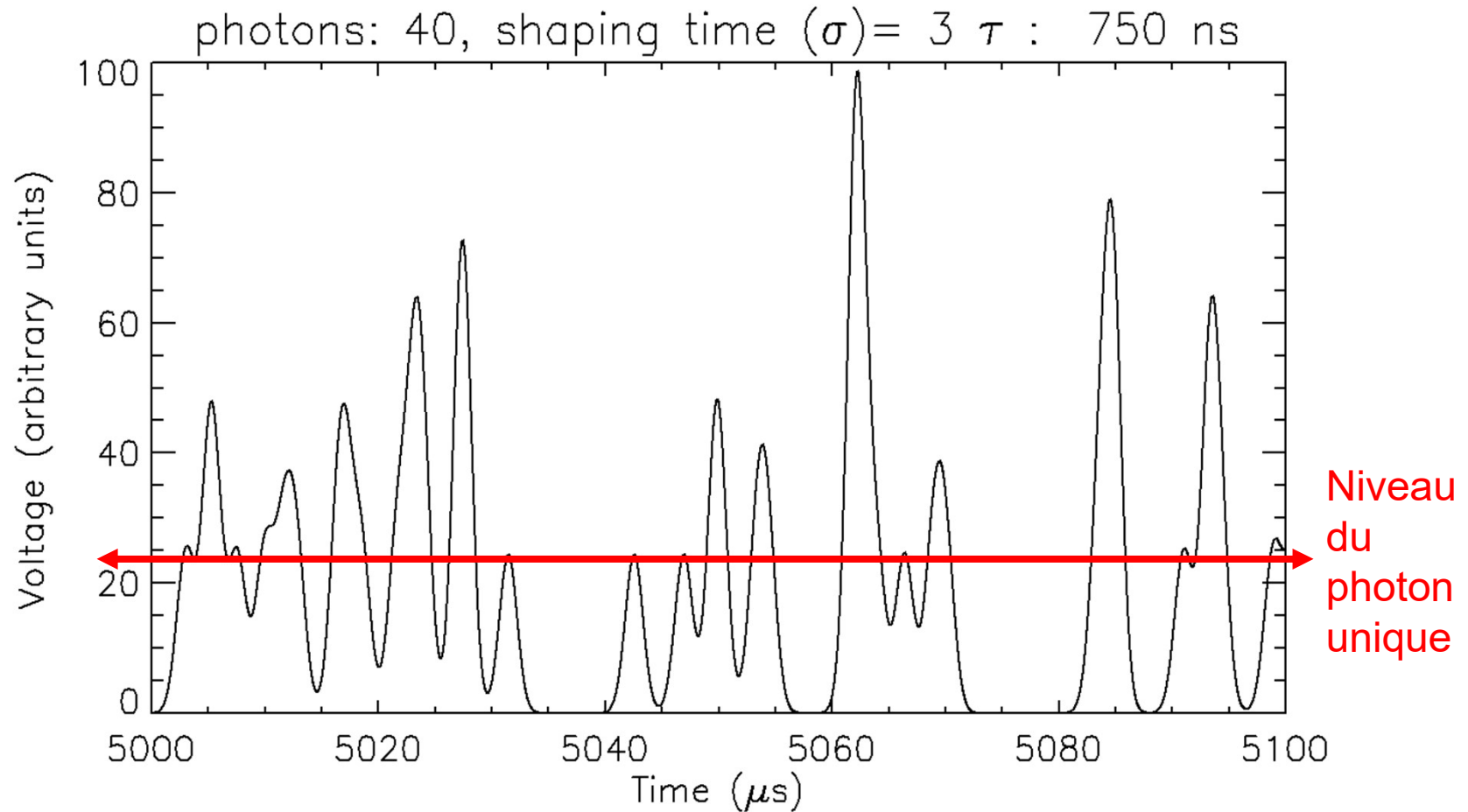
- Le besoin est une mesure constante
  - de l'efficacité du détecteur
  - De la réponse spectrale (gain)
- Par ailleurs, les flux très élevés (par exemple durant un sursaut de magnétar proche) peuvent induire
  - Une perte d'efficacité (temps mort)
  - Une dérive spectrale (empilements)

Ils nécessitent des détecteurs rapides et une électronique rapide ou de nombreux petits détecteurs pour limiter ces effets

# Empilements

Spectroscopie faussée !

Photométrie faussée !



# Temps mort

Il désigne habituellement la fraction de temps (%) pendant laquelle un instrument ne peut pas effectuer de mesures.

Dans certains cas ou circonstances, il pourrait être très grand:

- Flux de rayons gamma très élevé (temps mort de codage ou de traitement). Par exemple en cas de nova X brillante ou d'un fort sursaut de magnétar)

Flux de particules très élevé qui inhibe le fonctionnement du détecteur (temps mort dû au système d'anticoïncidence). Par exemple dans les ceintures de radiation, la SAA ou lors d'une éruption solaire.

L'exigence de rapidité concerne à la fois le détecteur principal et le détecteur d'anticoïncidence !

Pour parer les inconvénients de ces flux extrêmes, on réduit la surface des détecteurs (quitte à augmenter leur nombre et la consommation). Car ce qui compte c'est le taux de comptage par détecteur.

# Etudes temporelles

Les signaux périodiques à haute fréquence (e.g. pulsar milliseconde) ne sont généralement pas un problème pour les détecteurs. Il suffit de disposer:

- D'une horloge stable
- D'une connaissance précise de la position du satellite (< 100 km)
- Une connaissance précise de l'efficacité du détecteur (photométrie instantanée)

A très fort flux, les problèmes de temps mort affectent les études temporelles de signaux périodiques ou non-périodiques.

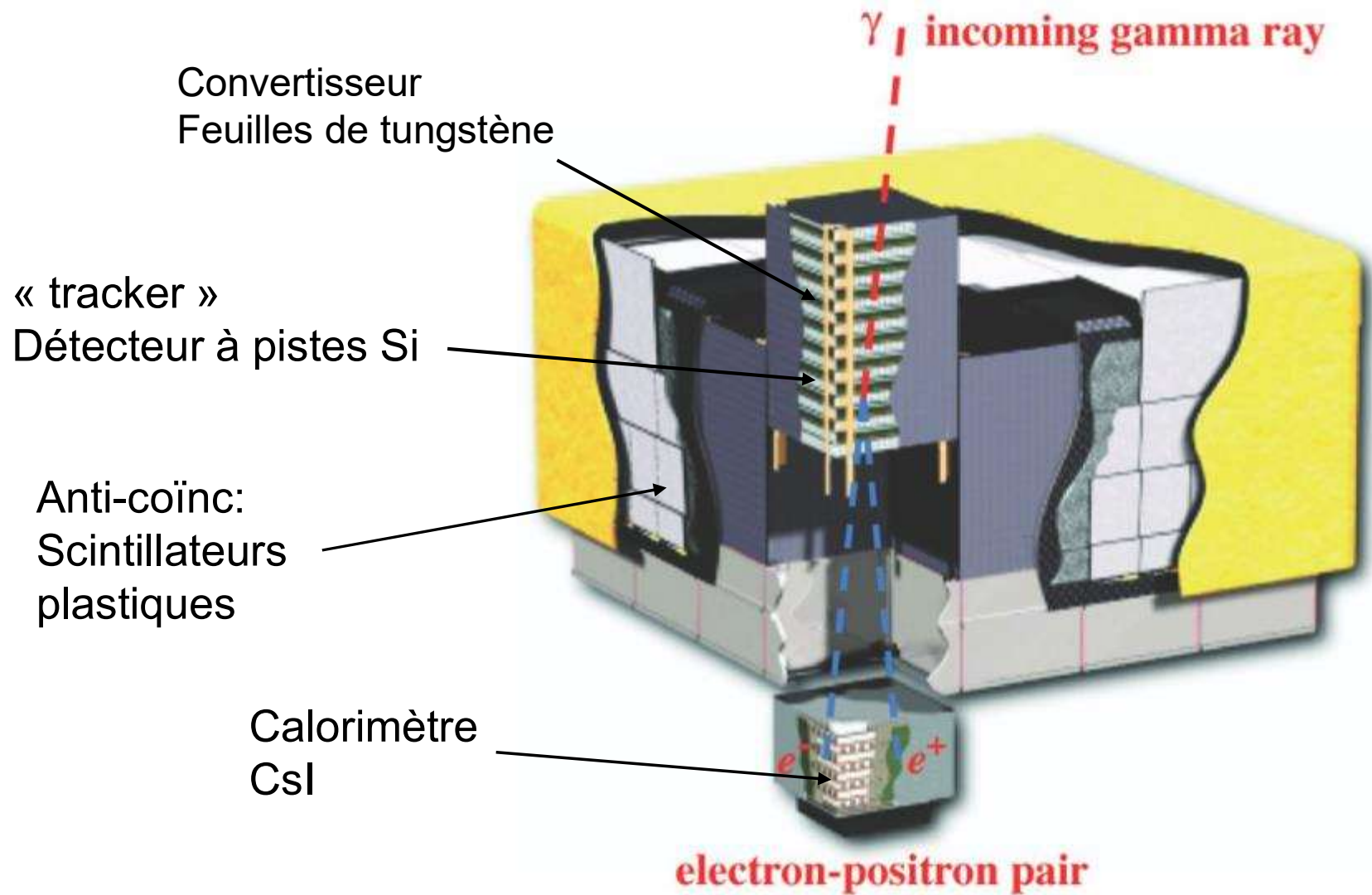
# Imagerie par reconstruction d'interaction

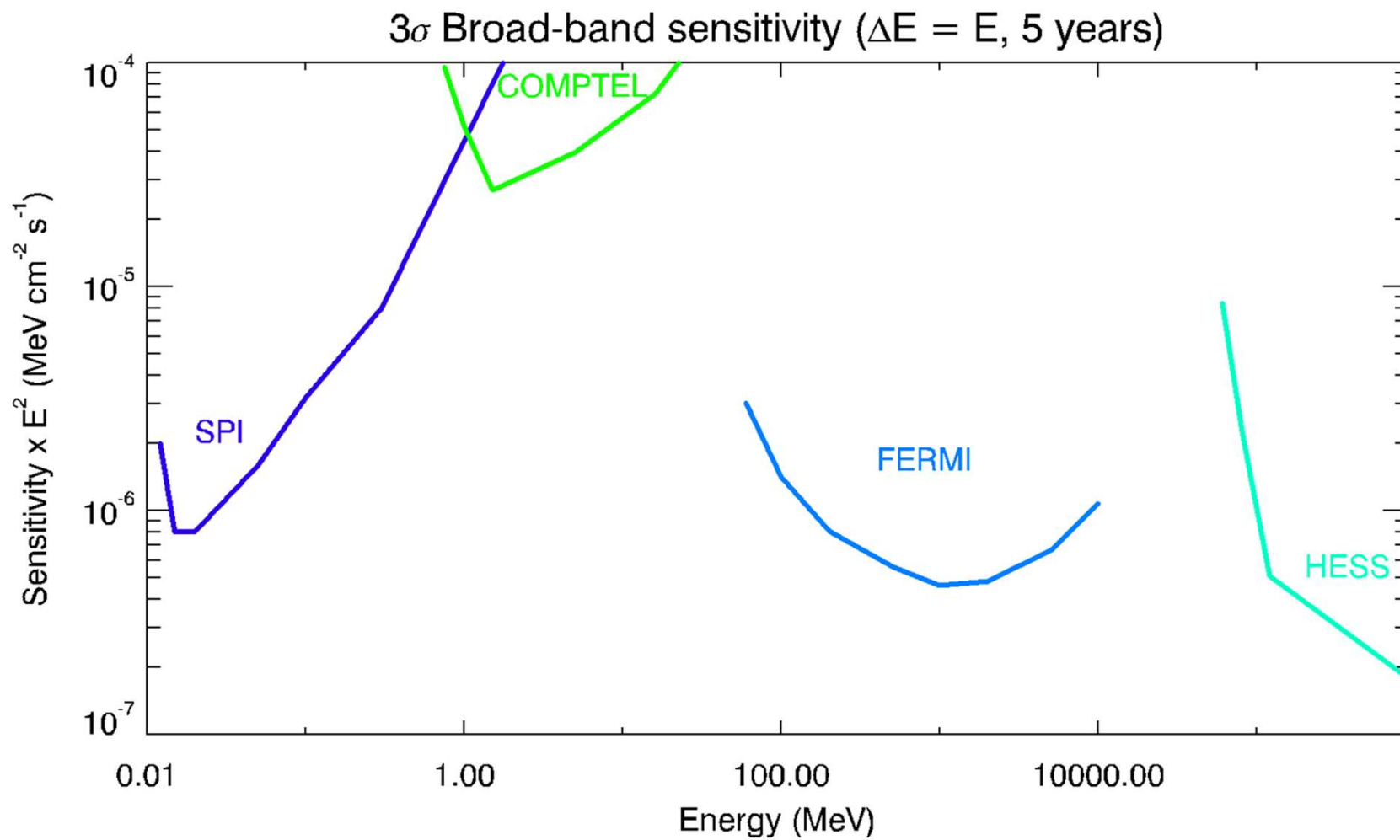


# Imagerie en régime création de paire

- Principe: on déduit la direction du photon incident de celles de l'électron et du positon (émis dans des directions opposées dans le centre de masse si on néglige le recul du noyau)
- Paradoxe:
  - La création de paire requiert un matériau à haut Z assez épais
  - La diffusion des électrons (perte de la direction d'origine) augmente avec l'épaisseur du matériau
  - Pour réduire ce paradoxe on utilise un grand nombre (forte épaisseur totale) de couches minces alternant un convertisseur à haut Z (e.g. W) et un détecteur (Si à pistes)
- la sensibilité est bien meilleure que celle des télescopes Compton surtout ceux ne mesurant pas la direction de l'électron

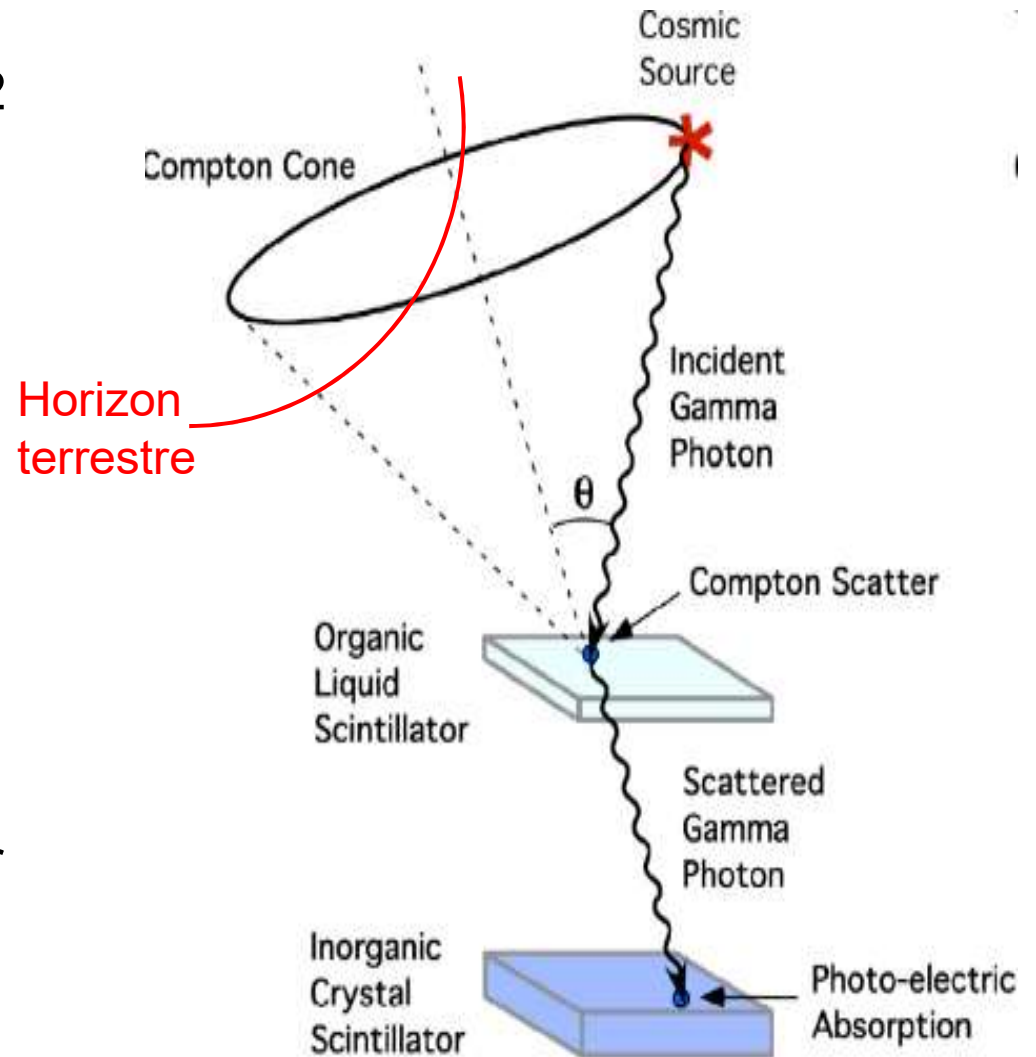
# Fermi



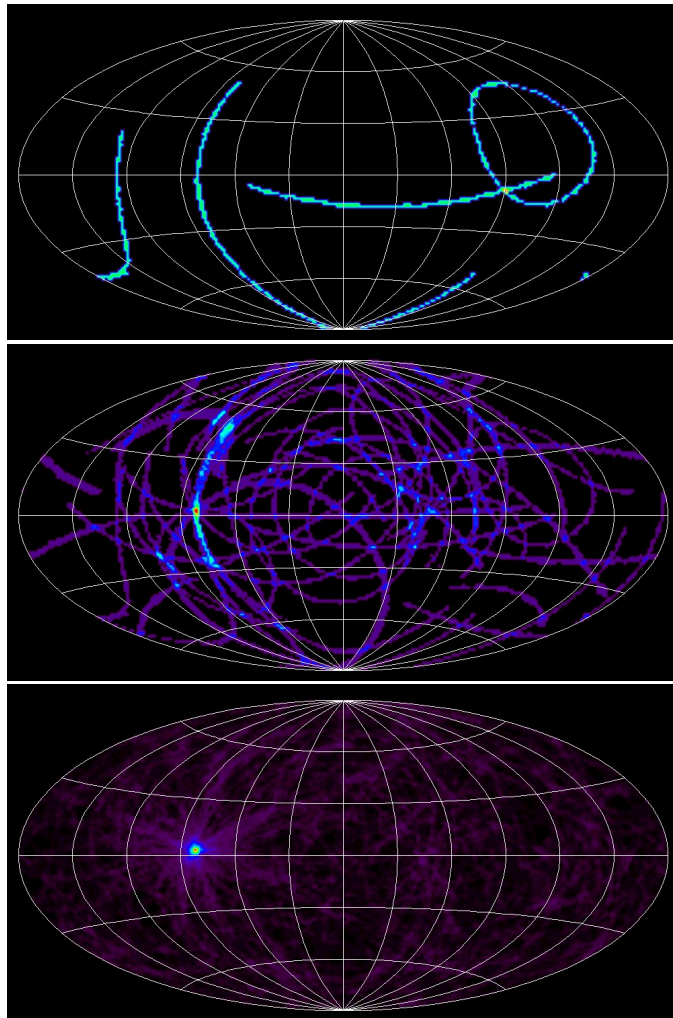


# Télescope Compton

- Si l'on connaît les positions de 2 interactions, on connaît la direction du photon diffusé qui est la génératrice d'un cône « Compton »
- Si toute l'énergie du photon incident est partagée entre ces deux interactions, l'ouverture du cône est donnée par la formule Compton (en négligeant l'énergie de liaison de l'électron)
- Cela correspond à un cercle sur la sphère céleste
- Si la terre est proche (orbite basse) le cercle se limite à un arc



# Télescope Compton



*Simulation à 511 keV*

- En l'absence de fond, 3 photons d'une même source suffisent en principe pour indiquer sa direction
- En présence de fond (et d'autres sources) il faut beaucoup de photons d'une même source pour la révéler
- Si l'on peut mesurer la direction de l'électron Compton (extrêmement difficile), on a plus qu'une seule direction possible (aux incertitudes près) pour le photon incident (comme dans l'effet de paire)

# Imagerie Compton besoins

Le fond des images reconstruites dépend de façon critique de

- La précision de localisation qui dépend de façon cruciale
  - des performances spectrales des détecteurs
  - à basse énergie du numéro atomique des détecteurs (énergie de liaison des électrons)
  - de la capacité à mesurer la direction du photon diffusé (ce qui permet aussi de mesurer la polarisation)
  - de l'énergie du photon incident (à haute énergie les cercles sont plus petits et plus fins)
- La sensibilité dépend de
  - la rapidité des détecteurs (coïncidences fortuites)
  - la capacité à mesurer la direction du photon diffusé

# Télescope Compton performances

- Très grand champ de vue
- Résolution angulaire limitée ( $>2^\circ$  à 511 keV)
- Bonne rejection du fond
- Excellent polarimètre
- Réponse spectrale “diagonale”
  
- La mesure du photon diffusé est “le Graal” car dans ce cas on se retrouve avec une imagerie semblable à celle des instruments à effet de paire et un énorme gain en sensibilité
  
- Le domaine Compton (0.5-50 MeV est très en retard en termes de sensibilité par rapport à ses voisins

# Imagerie Compton: performance

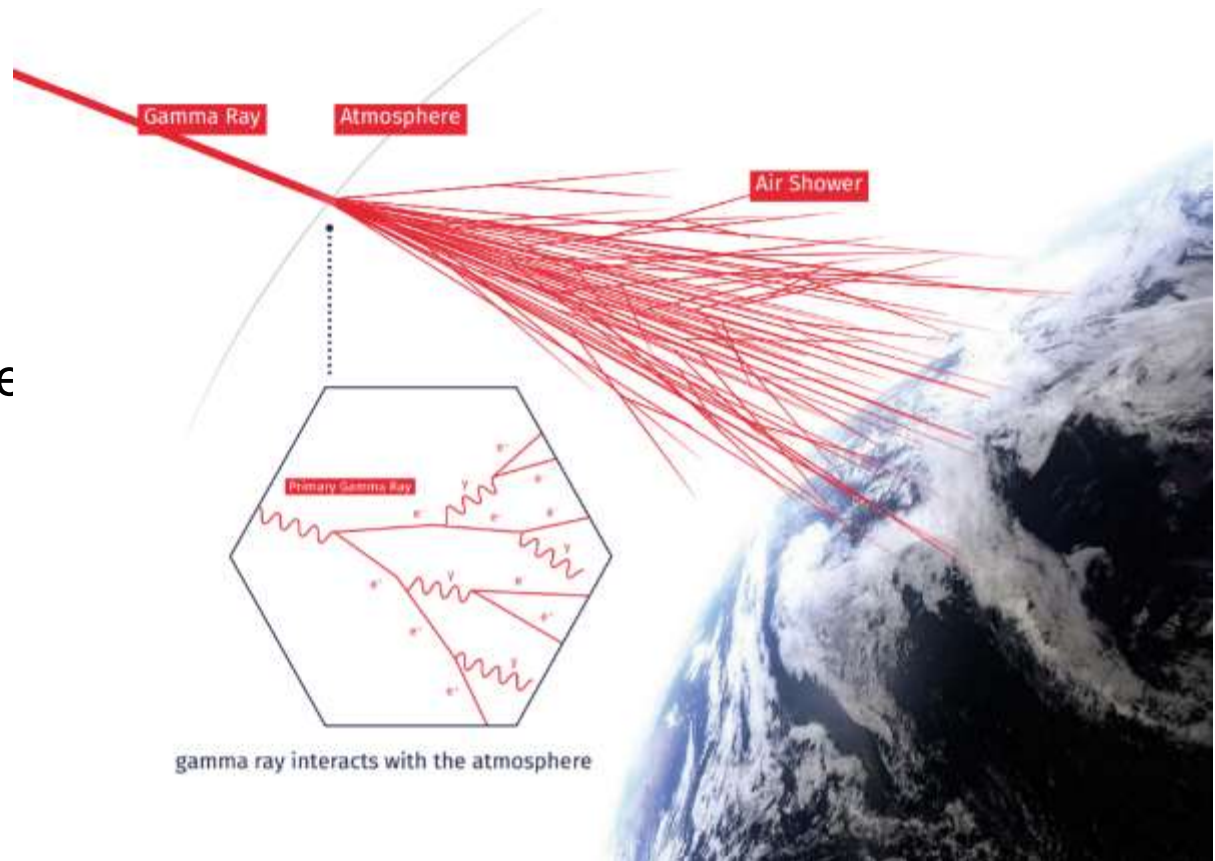
Le fond des images reconstruites dépend de façon critique de

- La précision de localisation qui dépend de façon cruciale
  - des performances spectrales des détecteurs
  - à basse énergie du numéro atomique des détecteurs (énergie de liaison des électrons)
  - de la capacité à mesurer la direction du photon diffusé (ce qui permet aussi de mesurer la polarisation)
  - de l'énergie du photon incident (à haute énergie les cercles sont plus petits et plus fins)
- la rapidité des détecteurs (coïncidences fortuites)



# Astronomie gamma Tchérénkov

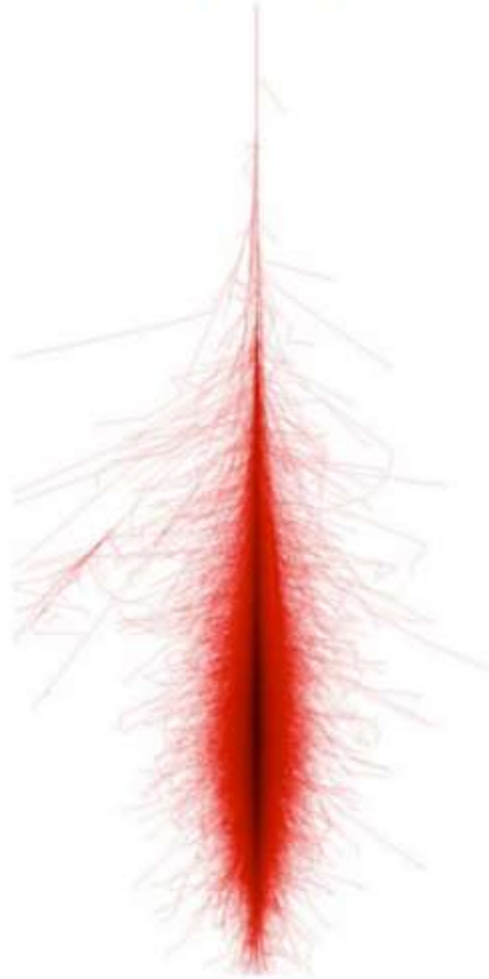
- Principe: imagerie de la lumière Tchérénkov des grandes gerbes atmosphériques électromagnétiques
- Imagerie par stéréoscopie (>3 télescopes)
- Besoins:
  - Ciel très pur
  - Altitude ad-hoc
  - Détection à la ns
  - Distinguer gerbes hadroniques (Auger) et électromagnétiques



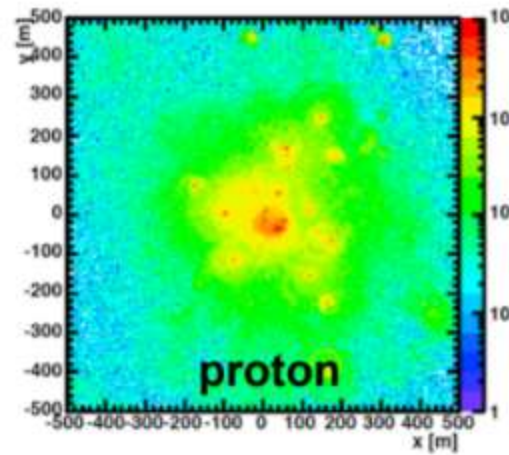
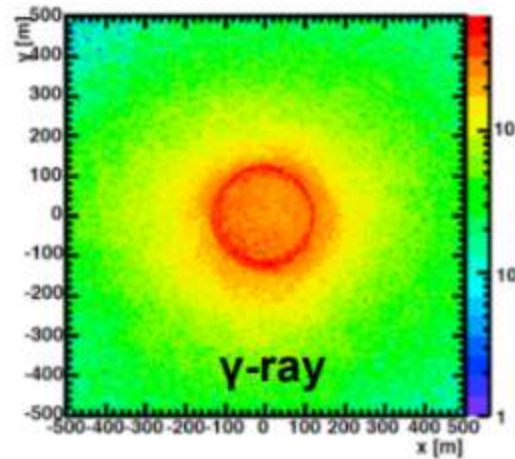
*CTA brochure*

# Proton vs Gamma-ray showers

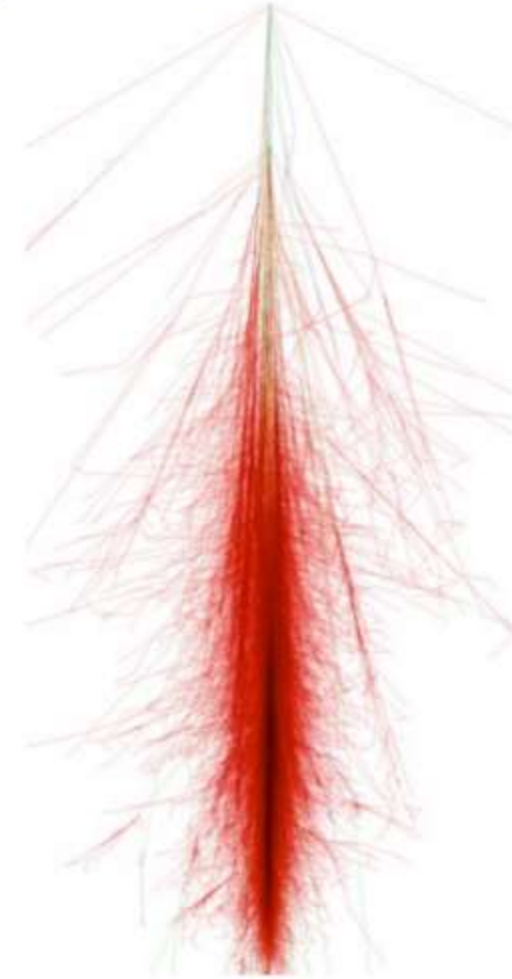
**$\gamma$ -ray**



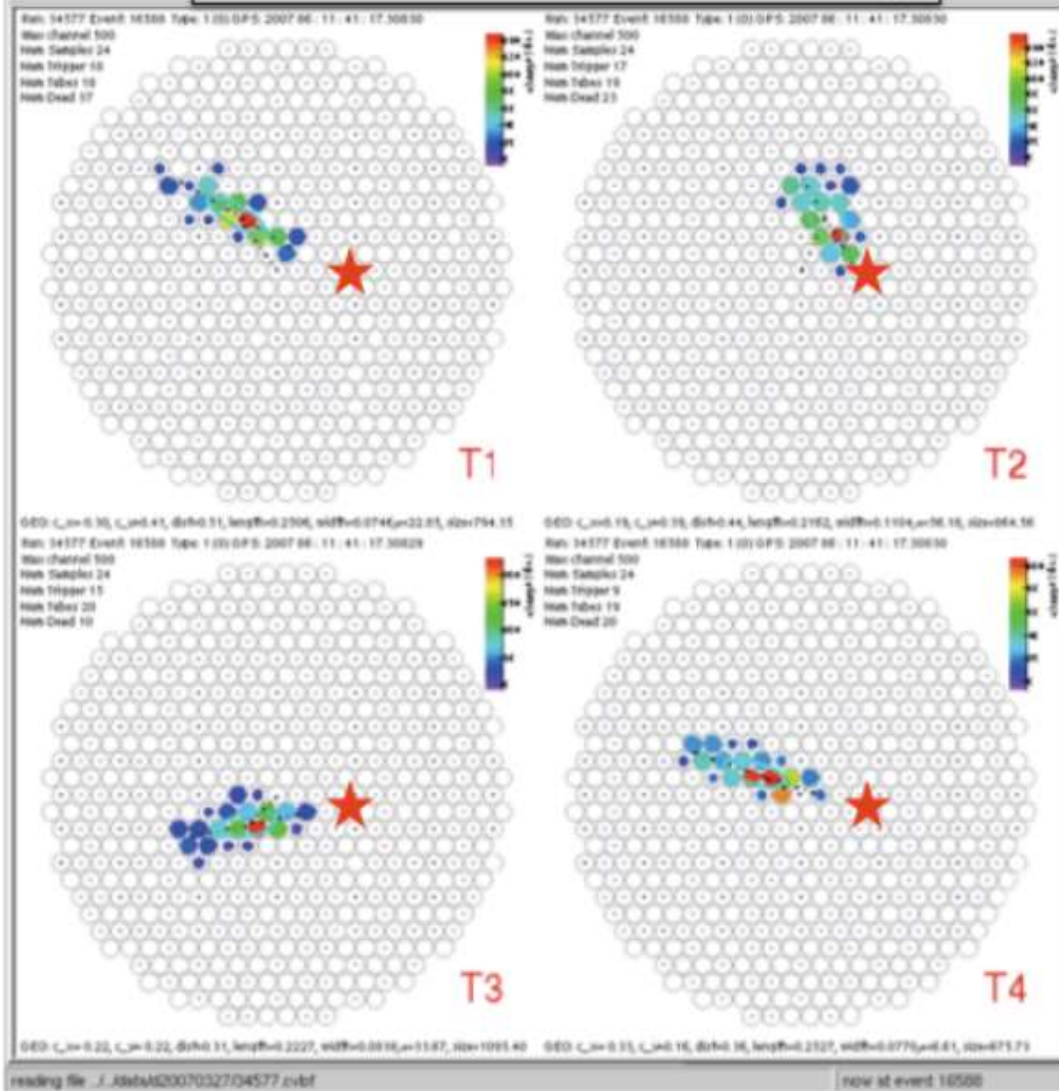
**Cherenkov photons on ground**



**proton**

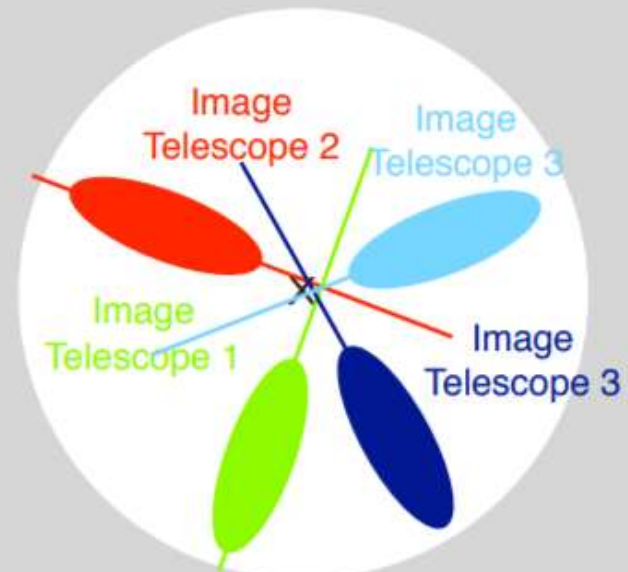
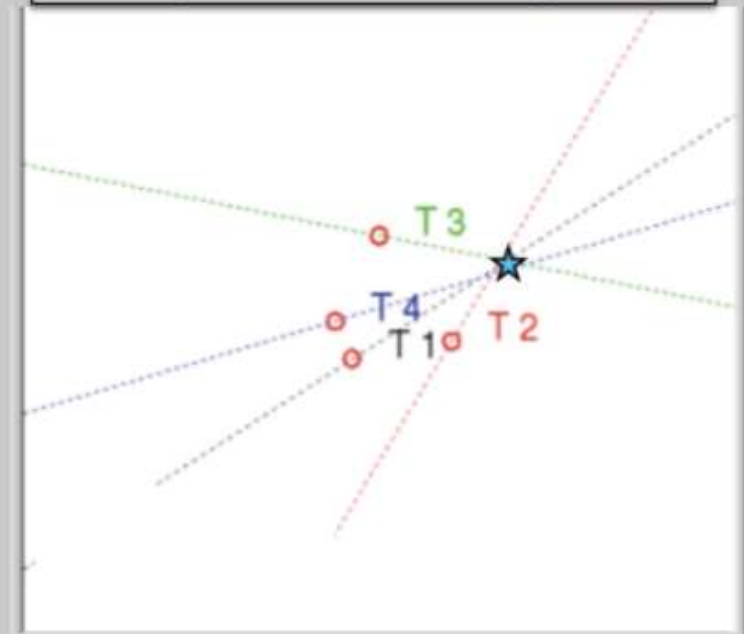


## Arrival direction from the sky



typical reconstruction  
 accuracy:  $0.1^\circ$  (per event)

## Core position on the ground

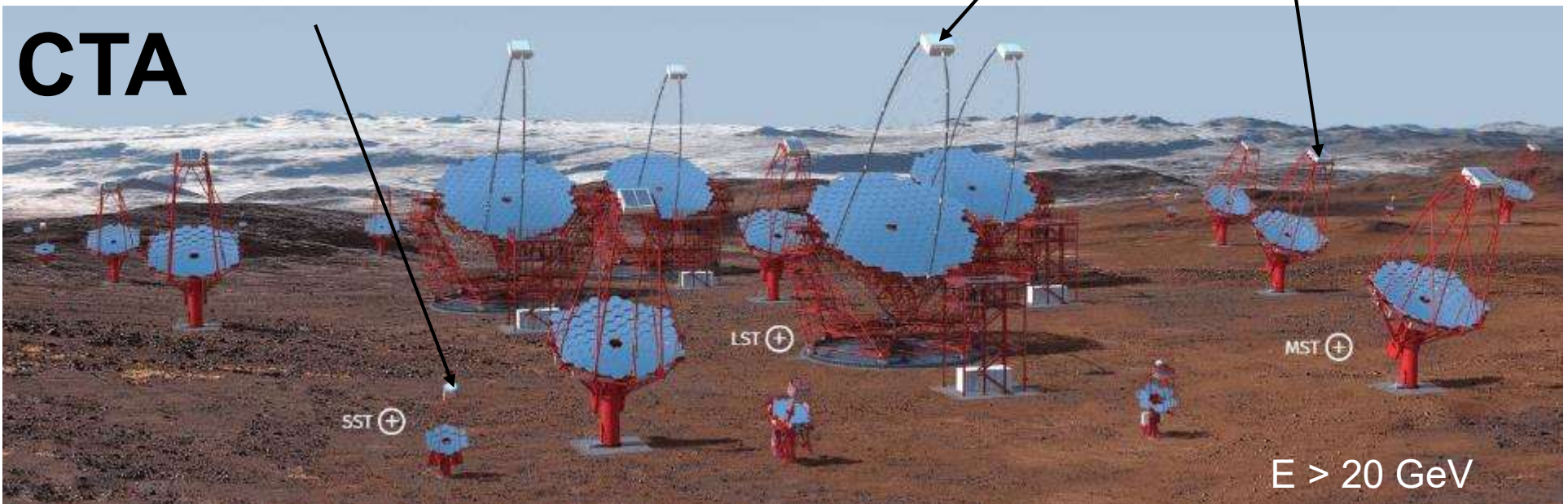




**H.E.S.S.**  
High Energy Stereoscopic System

miroirs

Caméra  
Cônes de Winston  
PMs



**CTA**

SiPMs

PMs

PMs ou SiPMs ?

SST ⊕

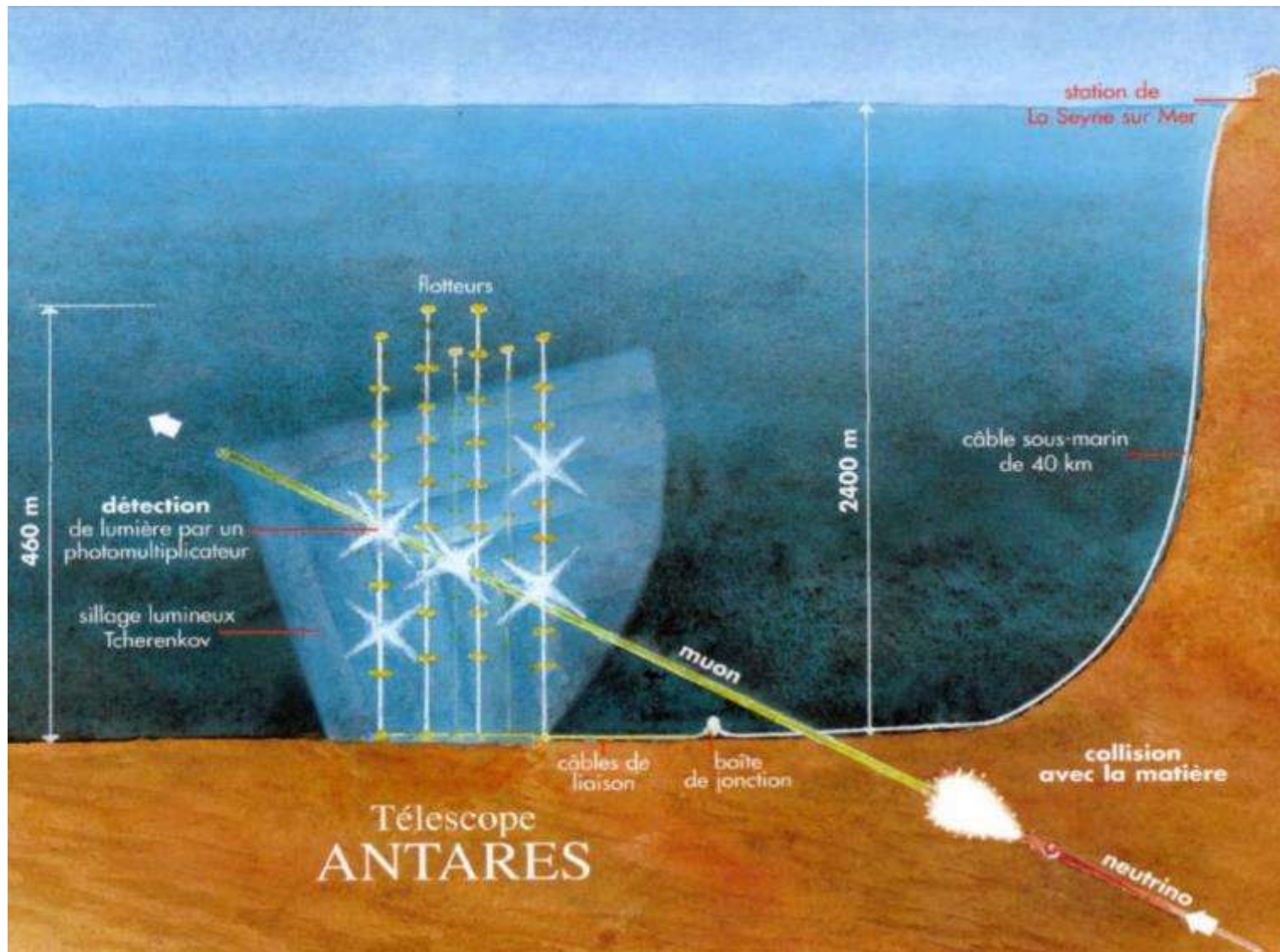
LST ⊕

MST ⊕

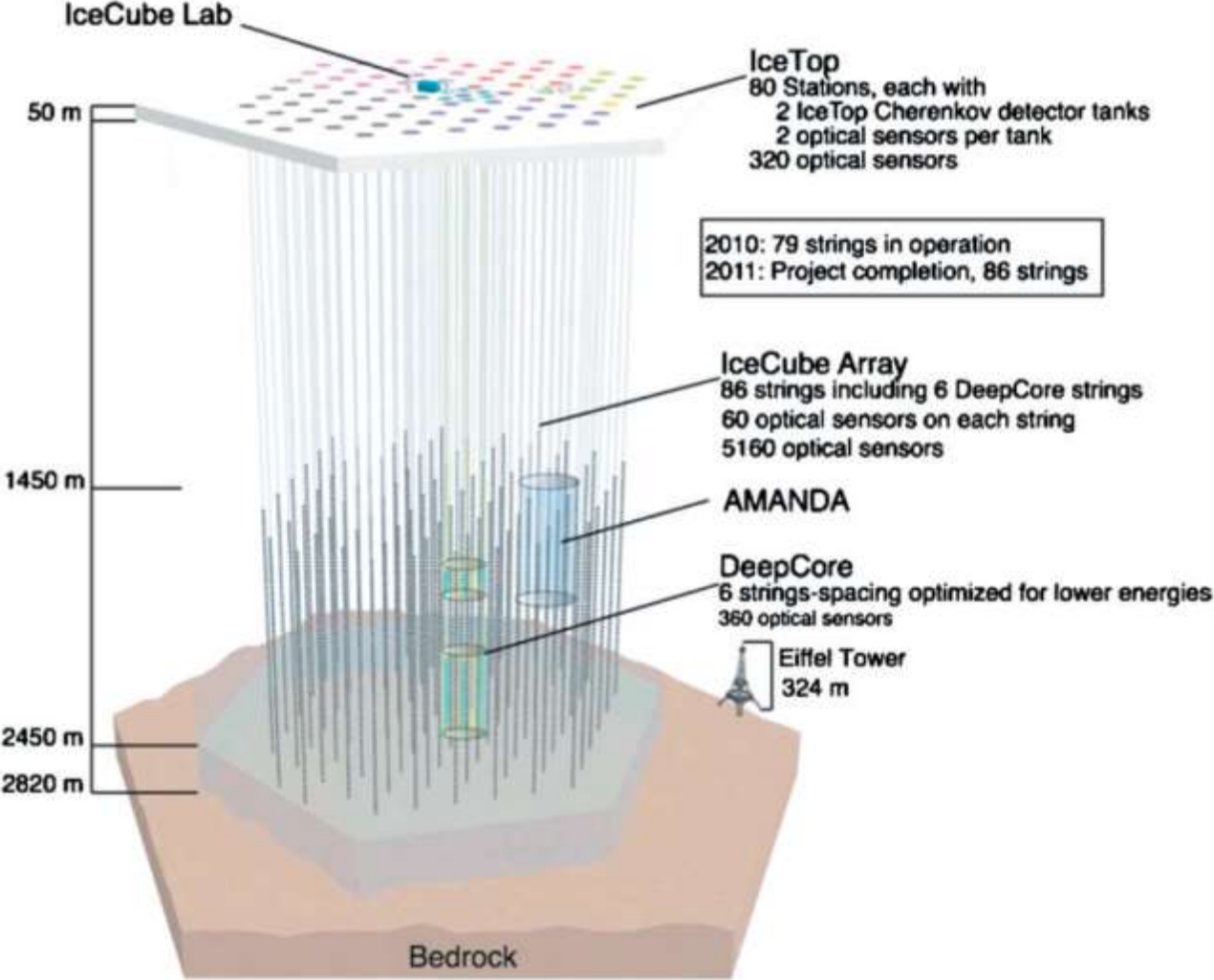
$E > 20 \text{ GeV}$

# Neutrinos

# ANTARES



# ICE Cube





# UHECR

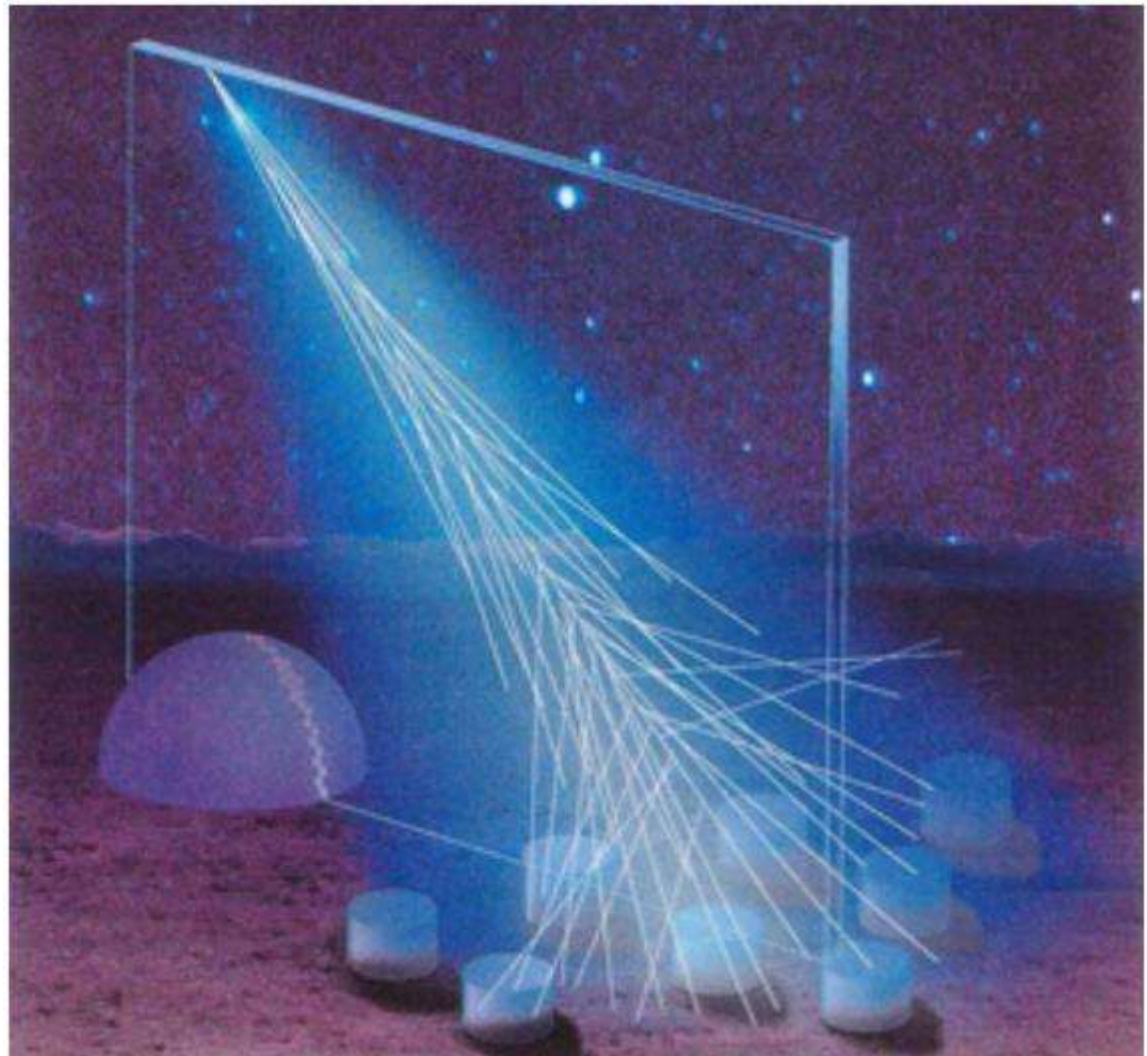
Les grandes gerbes atmosphériques hadroniques et les rayons cosmiques de ultra-haute énergie



# Observatoire Pierre AUGER

Dans la pampa  
Argentine,  
l'observatoire Pierre  
Auger détecte les  
grandes gerbes  
atmosphériques

- par l'émission  
Tchérenkov des  
particules  
superluminiques  
dans l'eau
- Par la fluorescence  
de l'atmosphère

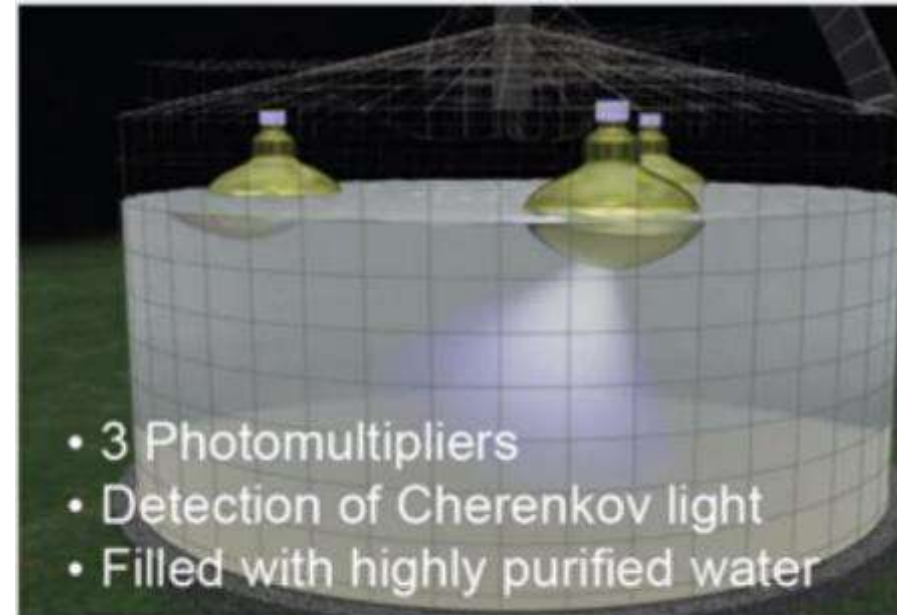
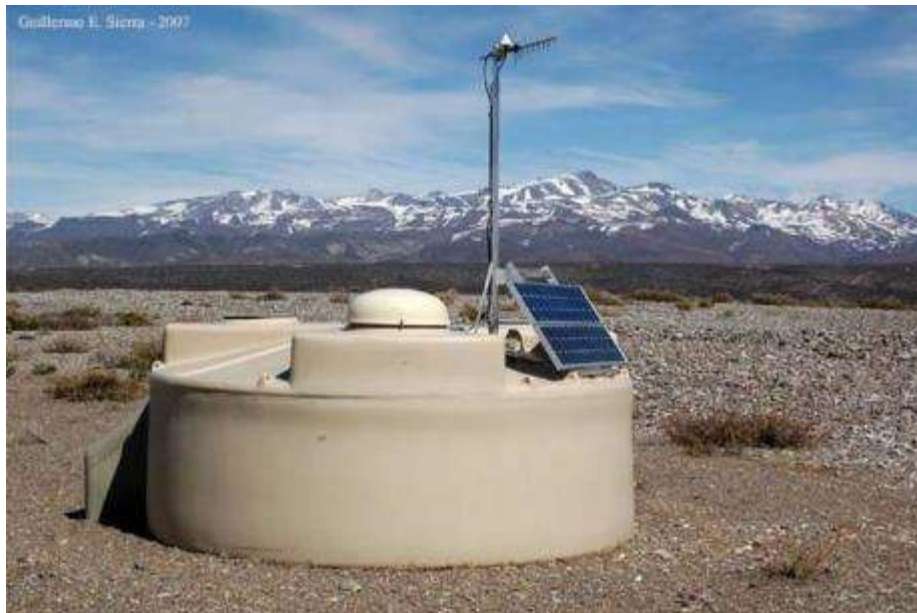


# AUGER: les cuves Tchérénkov

## (des satellites posés sur le sol)

1660 cuves 3.6 m de diamètre, 1.2 m de haut (12 m<sup>3</sup>) distantes de 1.5 km

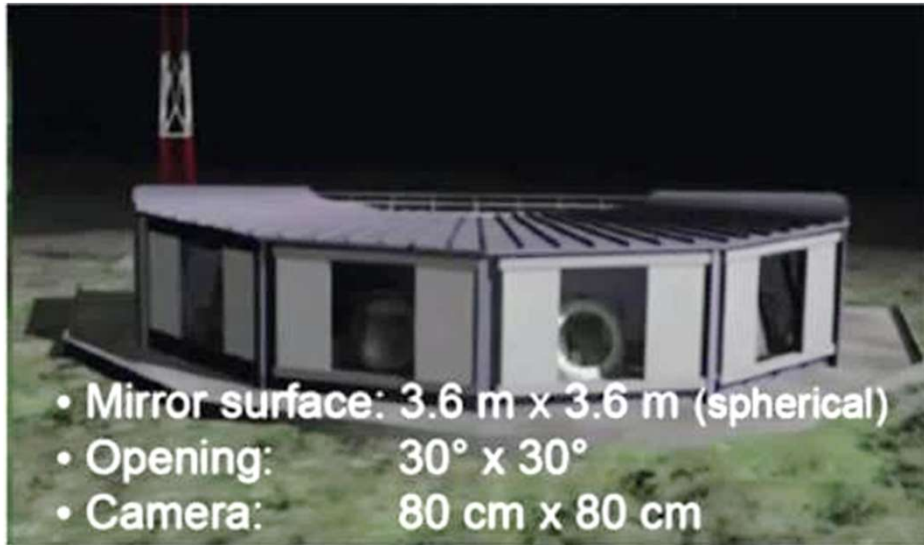
- Totalement autonomes (panneaux solaires)
- un GPS fournit la référence temporelle
- Elles communiquent par télémétrie



Cette technique ne fournit qu'un échantillon de la gerbe mais elle autorise un fonctionnement jour et nuit et par tout temps.

Les différences de temps entre cuves permettent d'estimer grossièrement la direction de la particule

# AUGER: détecteur de fluorescence



Caméra à 440 PMs de 23 cm de diamètre  
PMs bien adaptés pour mesurer la fluorescence de l'azote (330-400 nm)

- Voit toute la gerbe
- Mesure précisément son énergie
- Une double détection permet de déterminer précisément la direction de la particule
- Ne fonctionne que par nuit très claire



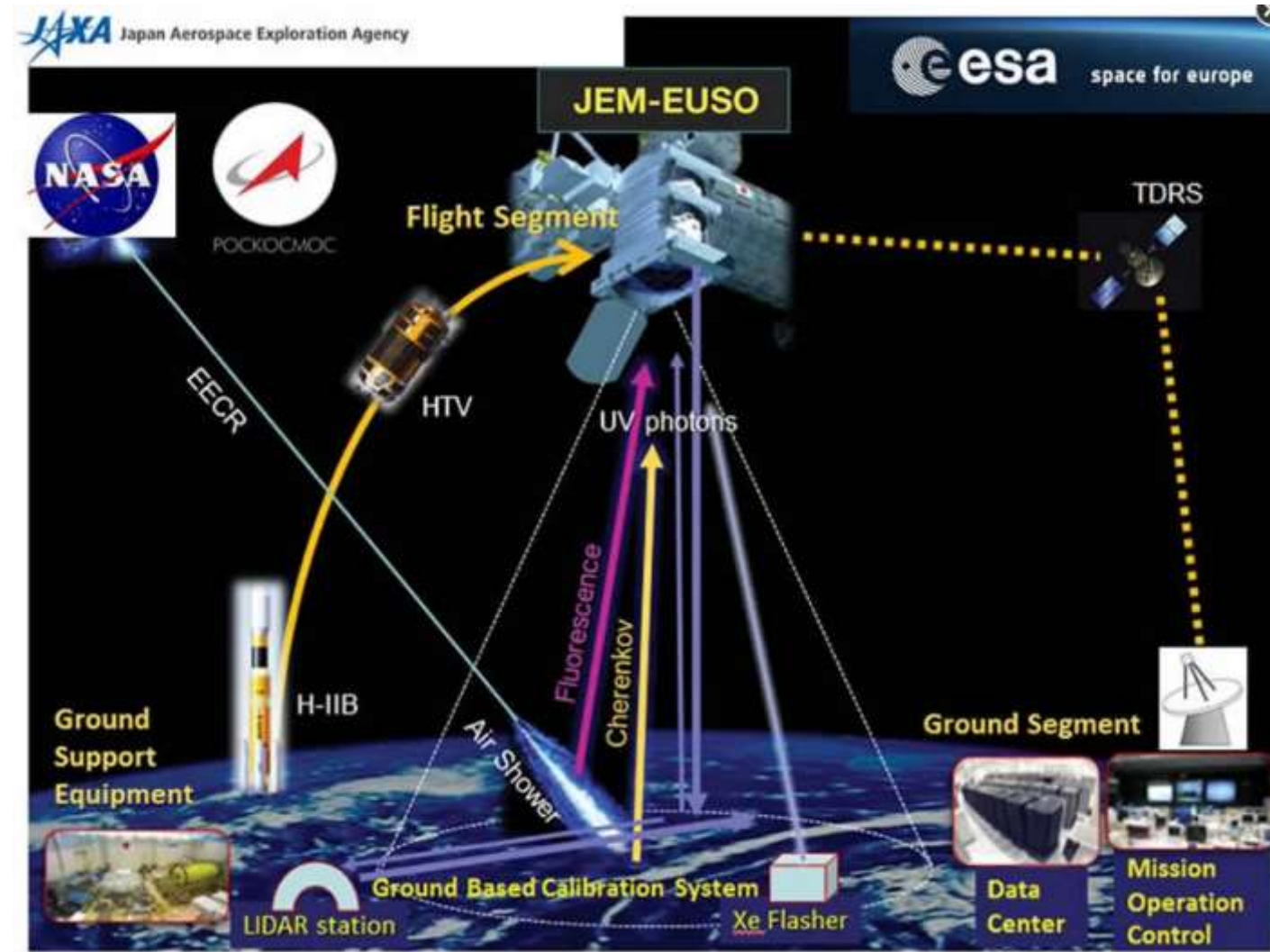
# JEM-EUSO

Détecte

- la fluorescence de l'azote
- la lumière Tchérénkov

Peut voir beaucoup plus de gerbes (champ de vue de  $30^\circ$ ) mais de plus loin (430 km)

Utilise un miroir (schmidt) et des PMs multi-anodes (64 pixels)



**Fin**