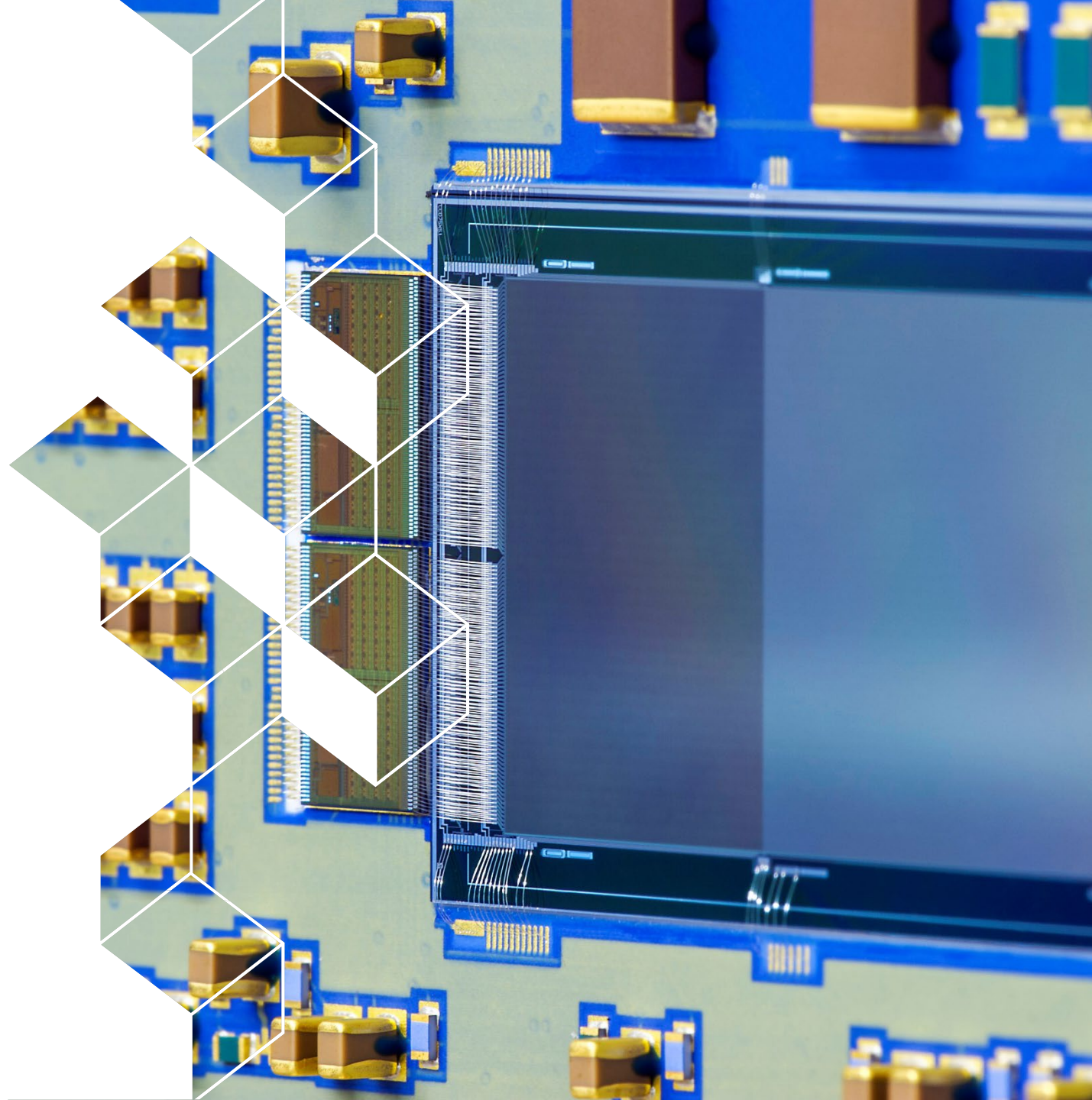




Détecteurs pour l'astronomie des hautes énergies

Formation du détecteur à la mesure, Roscoff, 2025

Aline Meuris



Plan du Cours

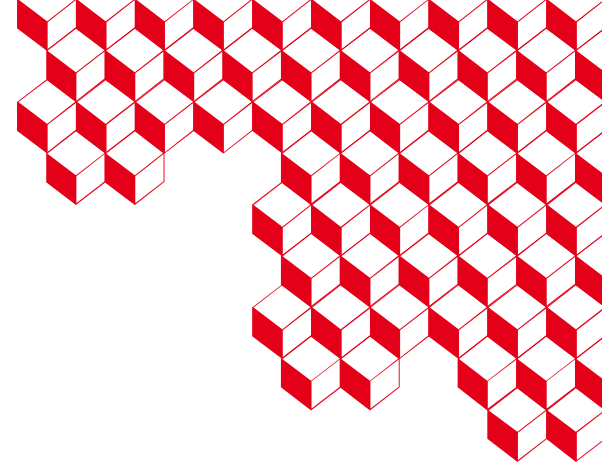
- 1. Introduction à l'astrophysique des hautes énergies (Rappels)**
- 2. Comment détecter les photons de l'univers ?**
- 3. Comment mesurer les paramètres astrophysiques ?**
- 4. Etat de l'art des technologies et préparation des futures missions**



1 ■ Pourquoi observer les photons de hautes énergies ?

Les observables

Les enjeux



1.1. La nature des rayonnements observables

Interaction rayonnement - matière

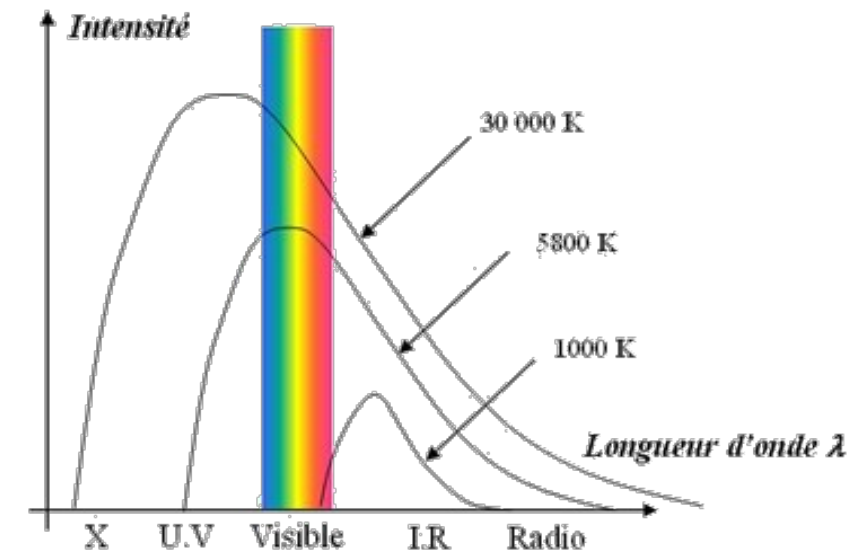
Rayonnement thermique

Tout corps émet un rayonnement électromagnétique dû à l'agitation thermique des électrons dans la matière. L'intensité est donnée par la **loi de Planck** :

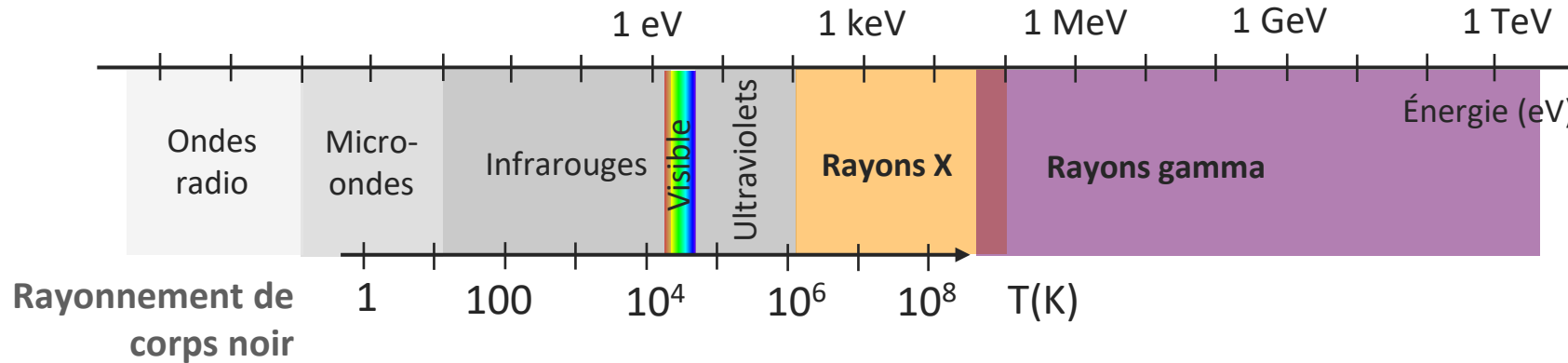
$$I_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

La **loi de Wien** permet de déterminer la longueur d'onde (en m) pour laquelle le rayonnement du corps noir est le plus intense.

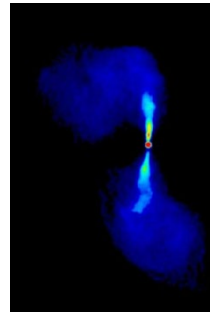
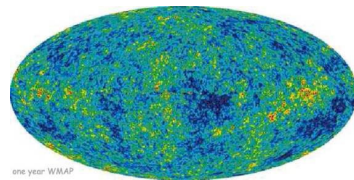
$$\lambda_0 = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T}$$



Rayonnement thermique



Fond cosmologique
Milieu interstellaire
Etoiles
Plasmas chauds



Au-delà de 30 keV, les photons ne proviennent pas d'un rayonnement thermique

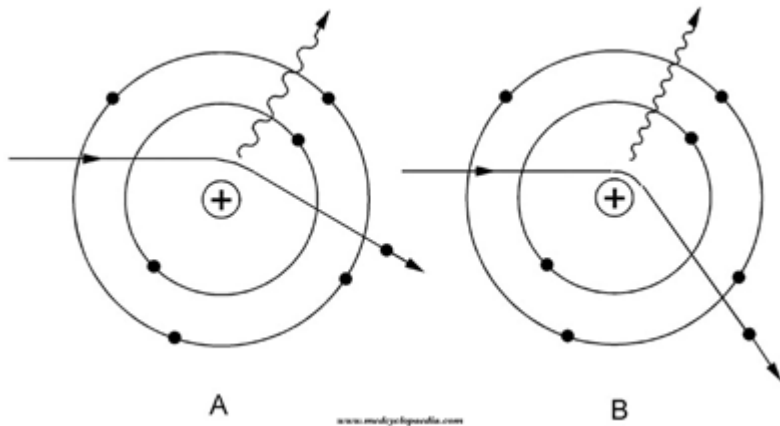
- Théorie ondulatoire de la lumière: ν (unité Hz) et λ (unité m)
- Théorie corpusculaire de la lumière: E unité électron-volt: 1 eV = 1,6.10⁻¹⁹ J

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$E = h\nu$$

Rayonnement de freinage (Bremstrahlung)

Le Bremsstrahlung (rayonnement de freinage en allemand) provient de la décélération des électrons dans les collisions coulombiennes avec d'autres électrons, des ions et des noyaux.



L'énergie du photon correspond à l'énergie perdue par l'électron.

$$I_\nu \propto e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

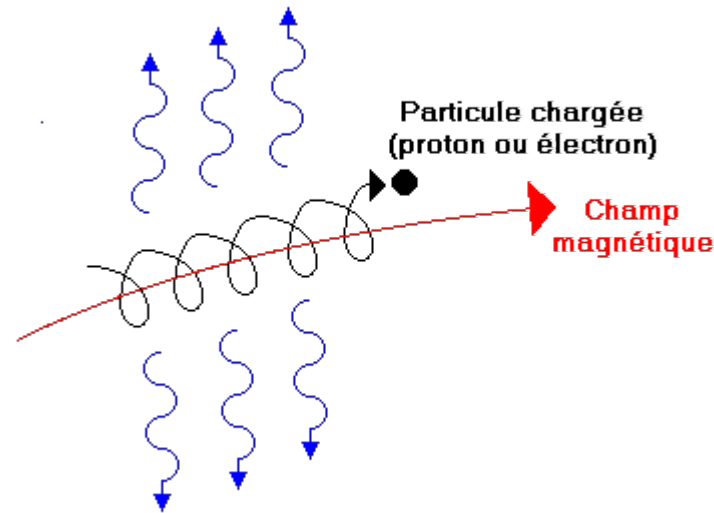
Dans les gaz ou plasmas chauds (amas de galaxies, héliosphère), les électrons entrent en collision avec les noyaux en raison de leurs mouvements thermiques aléatoires. On parle de Bremsstrahlung thermique. L'énergie moyenne des photons est proportionnelle à la température du plasma. Il s'agit de photons X pour $T = 10^7$ K.

Rayonnement synchrotron

Le rayonnement synchrotron est associé à l'accélération subie par les électrons lorsqu'ils spiralent autour d'un champ magnétique. La fréquence du rayonnement est la fréquence de giration qui dépend du champ magnétique.

$$\nu = \frac{eB}{mc}$$

- e, m : charge et masse de l'électron
- B : intensité du champ magnétique



Le spectre de rayonnement synchrotron suit généralement une loi de puissance.

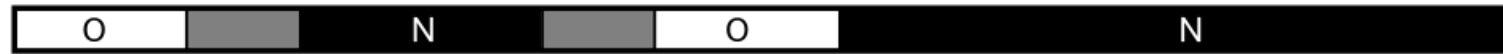
$$I_\nu \propto \nu^{-\alpha}$$

Le rayonnement synchrotron est fortement polarisé.

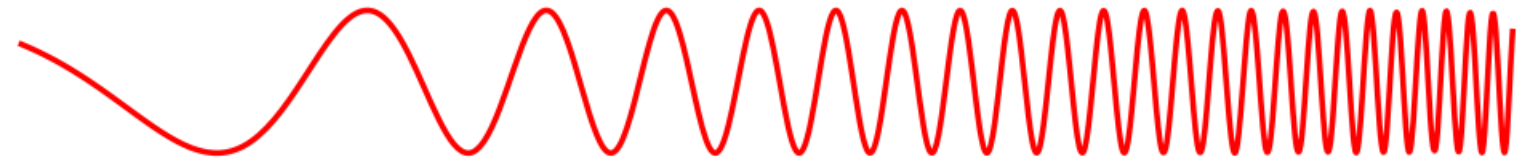
Rayonnements de raies (spectres discrets)



Traverse
l'atmosphère
terrestre ?



Type de
rayonnement
Longueur
d'onde (m)



Radio
 10^3

Micro-onde
 10^{-2}

Infrarouge
 10^{-5}

Visible
 $0,5 \times 10^{-6}$

Ultraviolet
 10^{-8}

Rayons X
 10^{-10}

Rayons γ
 10^{-12}

**Processus
physiques créant
des raies spectrales**



Transitions
moléculaires



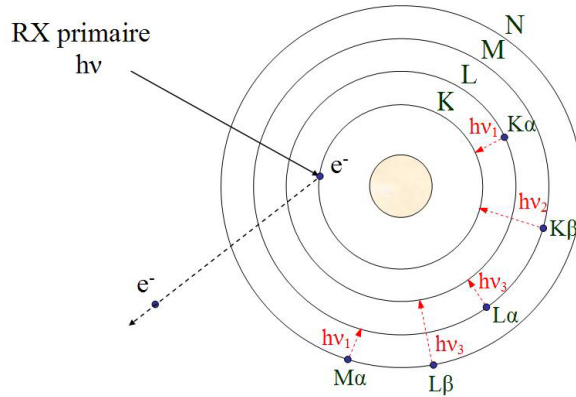
Transitions
électroniques



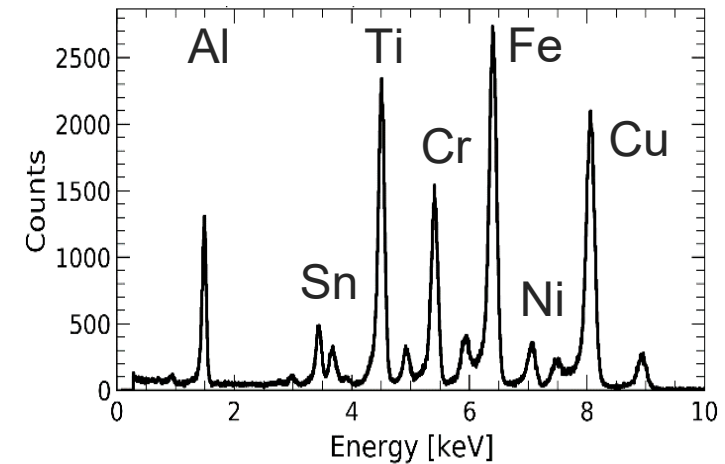
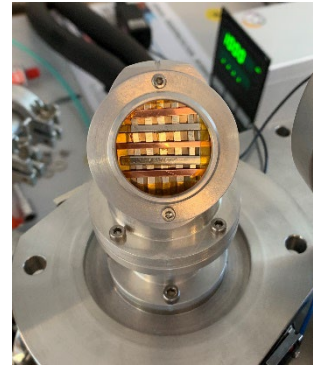
Transitions
nucléaires

Transitions électroniques (2/2)

- L'énergie dépend du type d'atome et des couches électroniques impliquées. Les éléments légers sont visibles dans l'UV (H, C, O). **Les éléments lourds (Fe) et les transitions dans les couches profondes (K, L, M) sont visibles dans bande X.**



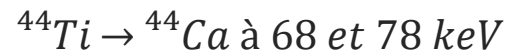
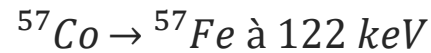
Spectre d'un générateur X éclairant un cible de fluorescence composite (source MXT)



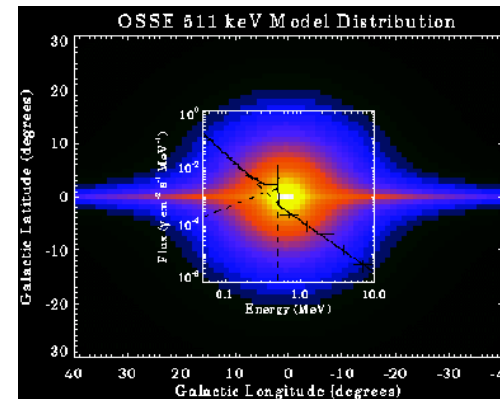
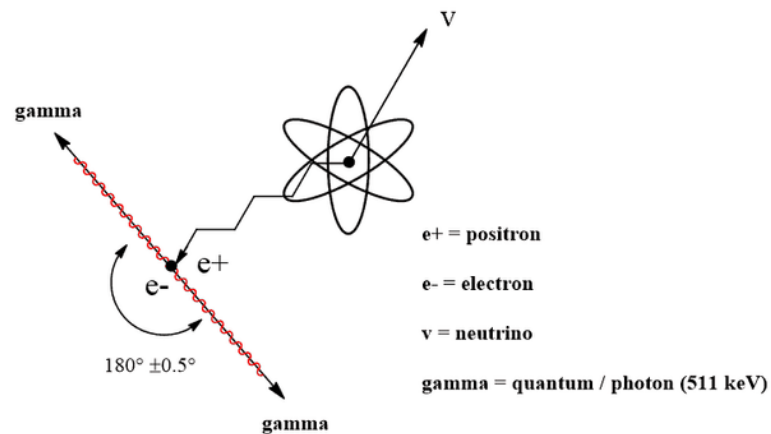
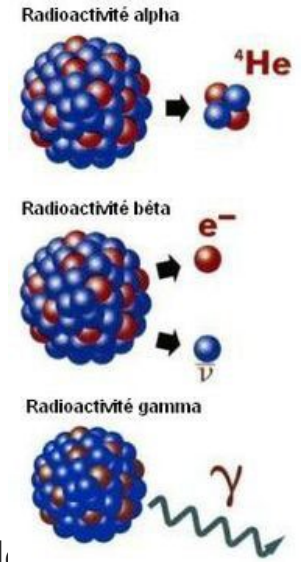
- L'énergie dépend de l'état de la matière (ionisation et effet gravitationnel) ; l'énergie mesurée dépend également de la vitesse relative à l'observateur (effet Doppler). **On observe alors des raies élargies ou d'énergie variable dans le temps.**
- Exemple : **le complexe du fer autour de 6-7 keV dans les objets compacts** donne des informations sur la masse et le spin du trou noir et sur les vitesses dans le disque d'accrétion.

Transitions nucléaires

- **Principe physique : Radioactivité.** Un noyau instable libère son énergie sous 3 formes possibles.
- Radioactivité gamma. Observations dans les supernovae.



- Radioactivité bêta+ : l'annihilation d'un positon et d'un électron crée deux photons à 511 keV (énergie de masse $E = mc^2$). Observations dans le centre galactique.

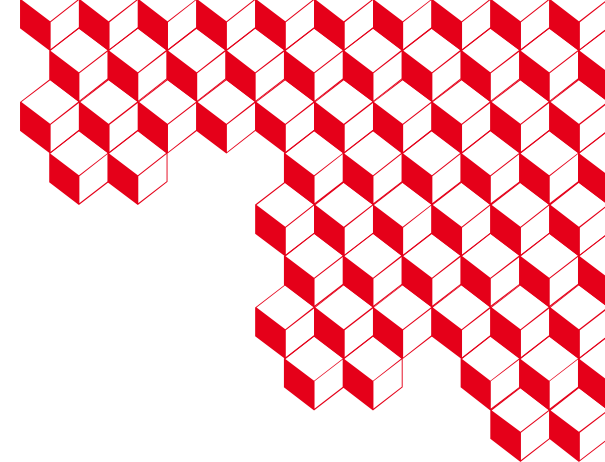


Conclusions

- L'**astrophysique** est la compréhension des processus physiques en jeu dans les objets de l'Univers. Elle s'appuie principalement sur la **distribution spectrale des photons** pour connaître :
 - l'environnement dans lequel ils sont émis: température, champ magnétique, état de la matière, composition chimique
 - l'environnement qu'ils ont traversé pour arriver jusqu'à nous: redshift, densité, composition chimique
- Les systèmes d'observation doivent permettre d'obtenir ces informations spectrales :
 - Au niveau du système optique
 - Au niveau du système de détection



1.2. Les enjeux de la détection dans les hautes énergies



Objets astrophysiques visibles en X-gamma



Fin de vie des étoiles

- Accrétion dans un système d'étoiles doubles
- Explosion d'étoiles massives
- Objets compacts : trous noirs, étoiles à neutrons (pulsars, quasars)
- Fusion d'objets compacts : sursauts gamma



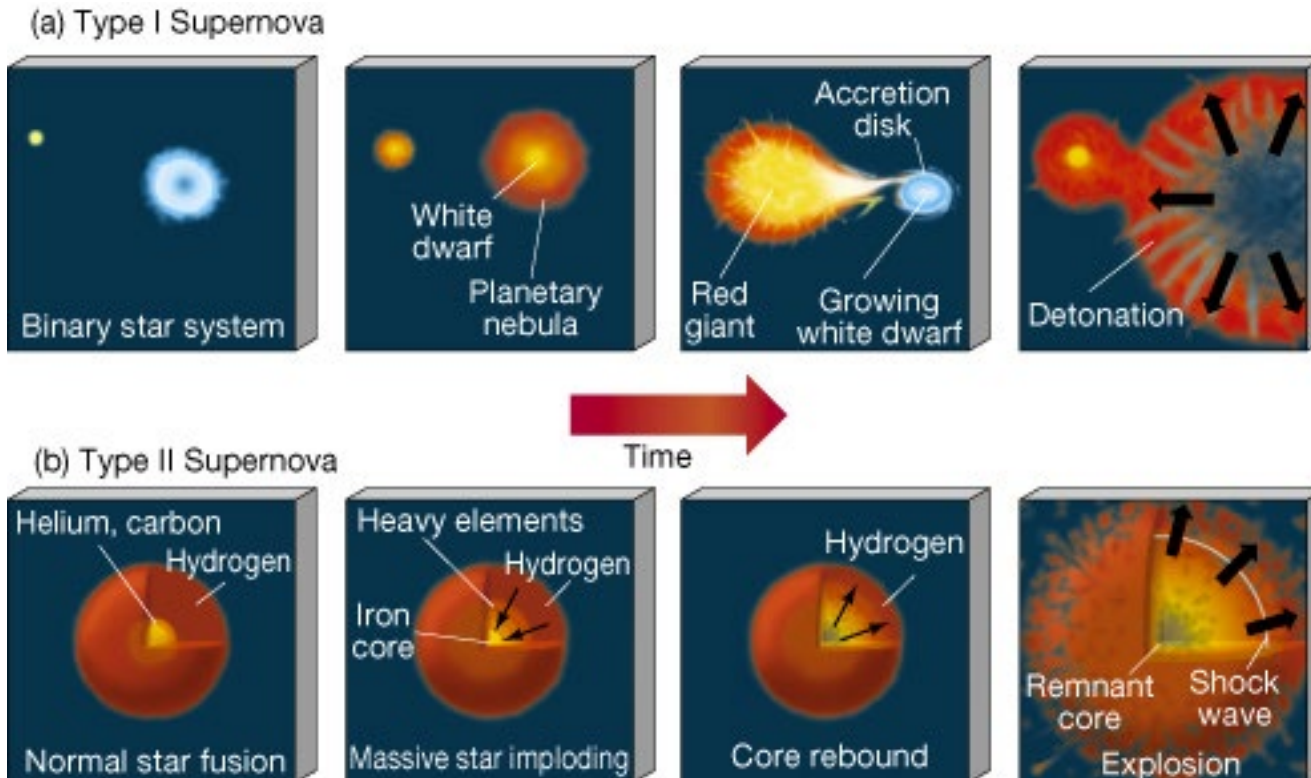
Stade d'évolution

Noyaux actifs de galaxie (trous noirs supermassifs)

Notre système solaire

- interface du Soleil (éruptions solaires),
- interface de la Terre (vent solaire / magnétosphère)

Exemple des supernovae



Phénomènes physiques et type de rayonnement :

Accrétion :

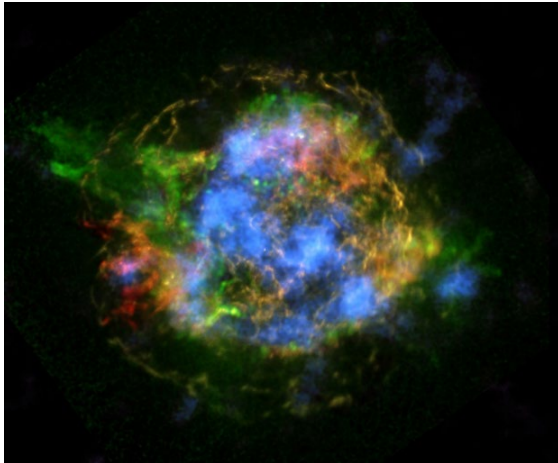
Chauffage du plasma (Thermique)
Diffusion des électrons sur les photons (Compton inverse)

Explosion :

Réaction thermonucléaire
Accélération des particules par ondes de chocs

Besoins de spectro-imagerie

- Astrophysique : la nucléosynthèse dans les supernovae

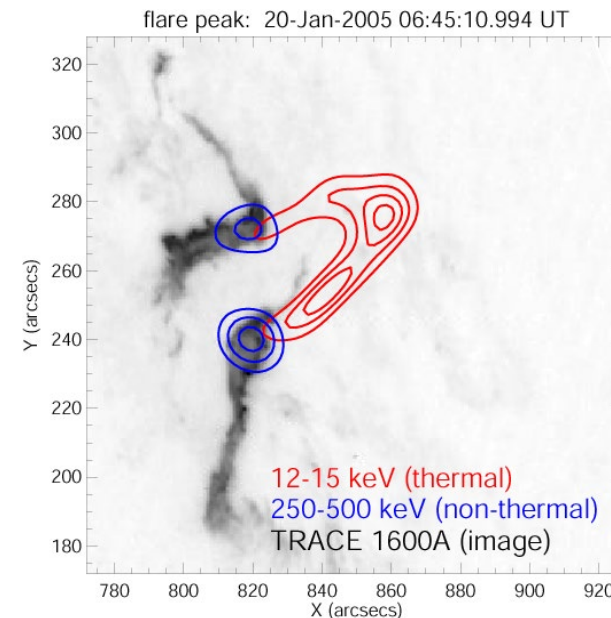


NuSTAR (2014)
Credits: NASA
Vert : fer (6 keV)
Bleu : titane 44 (78 keV)

- Modèles d'explosion
- Mécanisme de production des éléments lourds

- Physique solaire :

Les phénomènes physiques dans
les éruptions solaires
(accélération, transfert d'énergie)

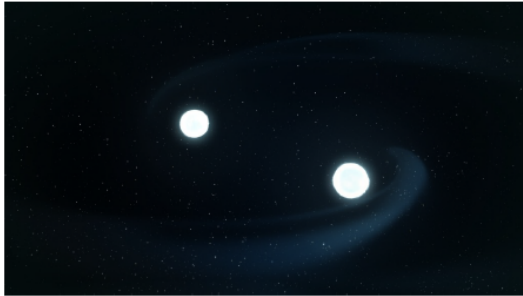


RHessi (2005)

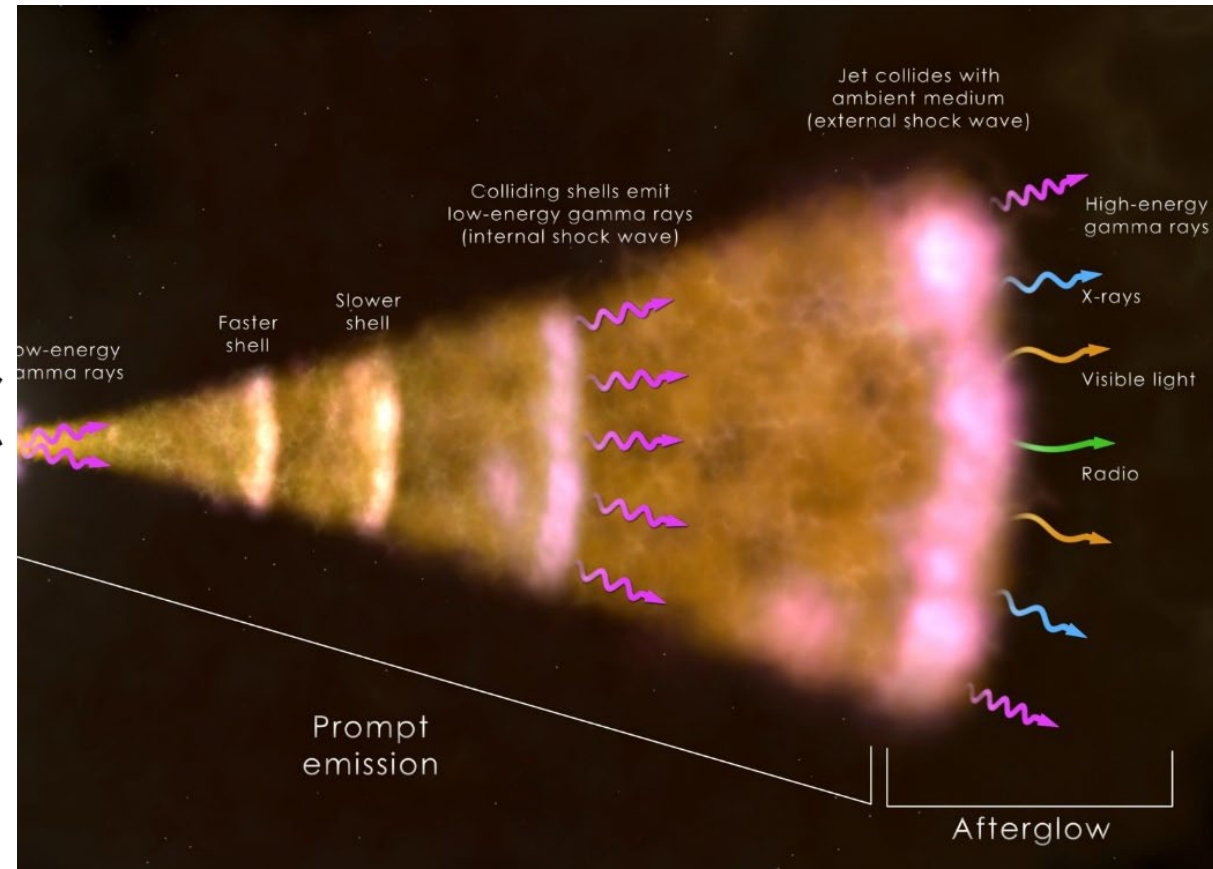
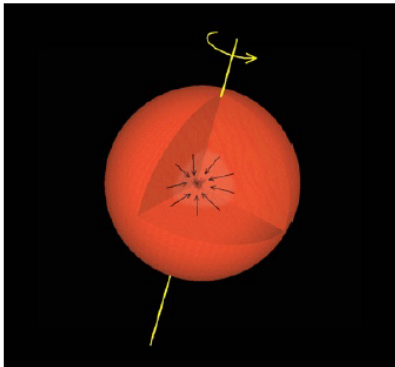
Besoins d'observation multi-longueur d'onde

Modèle du sursaut gamma

Short GRB = merger scenario



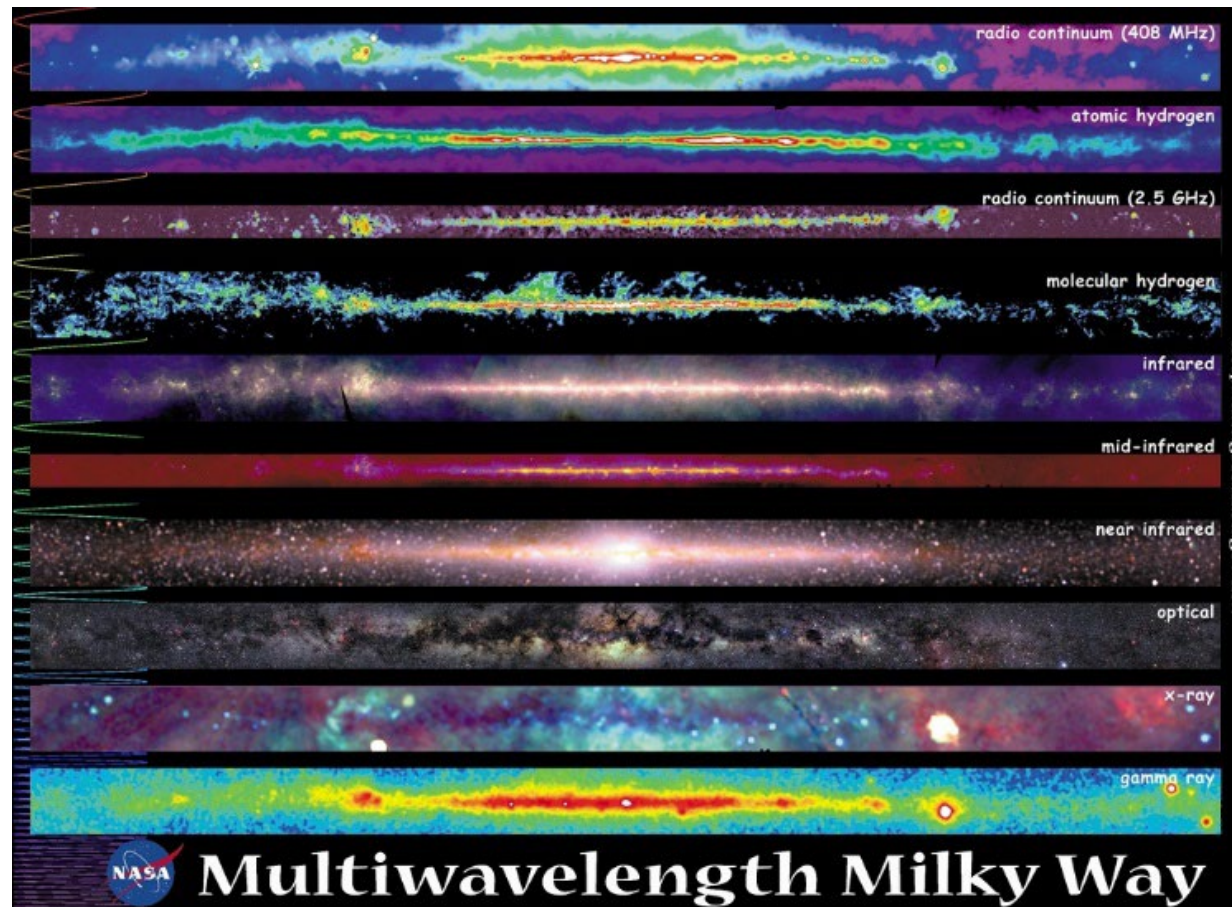
Long GRB = collapsar model



Les sursauts courts (<2) sont associés à des fusions d'étoiles à neutrons produisant une bouffée d'**ondes gravitationnelles**. L'observation des photons est alors appelée **contre-partie électromagnétique**.

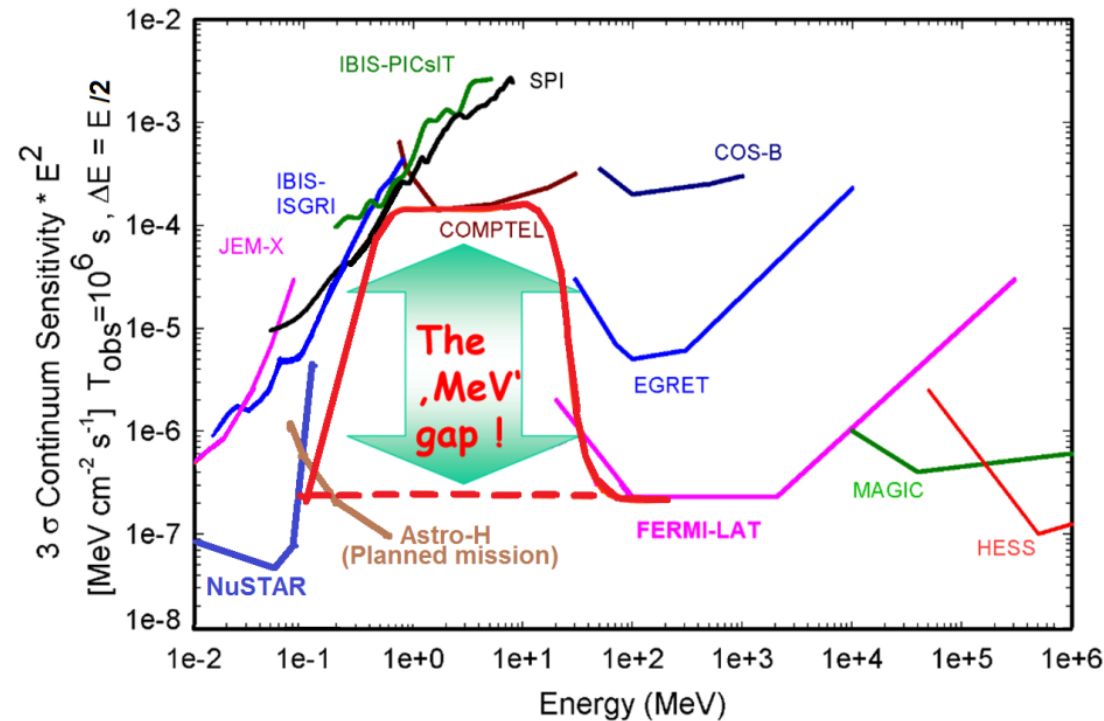
Les difficultés instrumentales

La **résolution angulaire** (**confusion de sources**) et la **sensibilité** (**détection de sources faibles**) sont des gros défis pour l'instrumentation à hautes énergies.



Le défi de la sensibilité

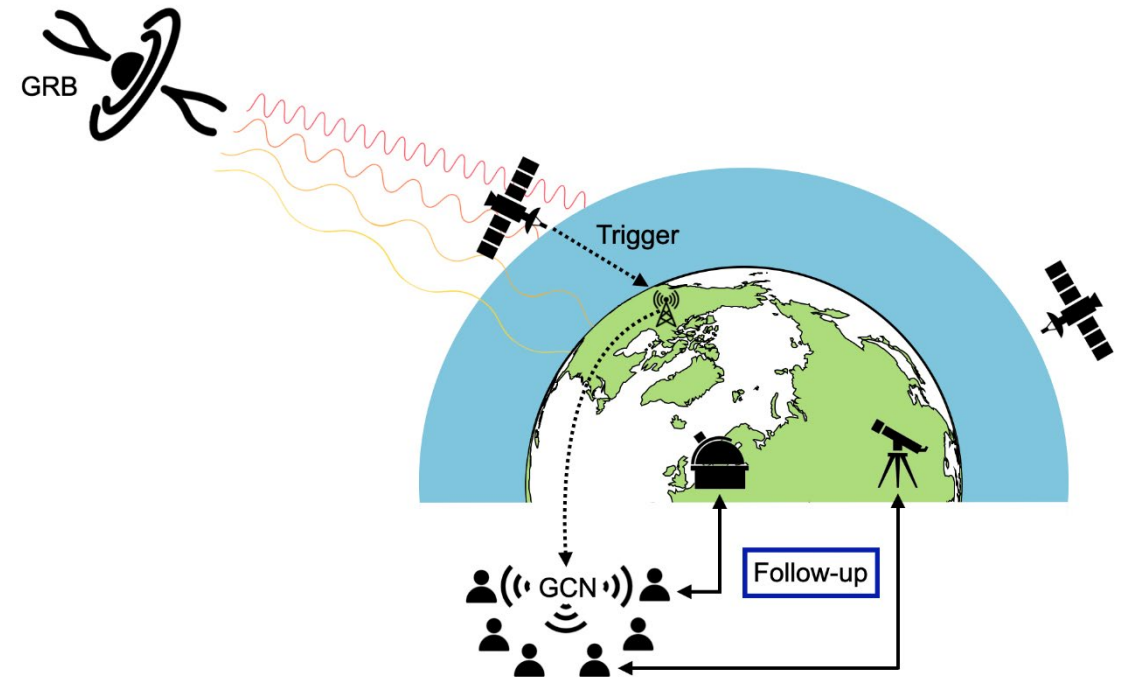
- La sensibilité est le flux de la plus faible source détectable.
- Le domaine du MeV est pénalisé par le **fond instrumental** = photons gamma induit par l'interaction des particules de l'environnement spatial avec l'instrument et interagissant dans le plan de détection.
- Ce fond est proportionnel à la surface de détection, il est minimisé avec des optiques focalisantes.



Autre défi : l'astronomie multi-messager

- Le télescope gamma détecte l'émission prompt (dans l'espace) et doit envoyer l'alerte aux télescopes au sol pour des observations dans le visible (suivi de sursauts gamma = follow-up). L'enjeu est la mesure de la distance.
- Le télescope gamma doit réagir aussi à une alerte d'ondes gravitationnelles ou de neutrinos de haute énergie venant d'observatoires au sol pour détecter la contre-partie électromagnétique. L'enjeu est la localisation.

➔ Le traitement de données **à bord et en temps réel** devient un défi majeur des instruments spatiaux à haute énergie.



Source: Thèse B. Schneider « The environments giving birth to Long Gamma-Ray Bursts: preparing the SVOM science »
Université Paris-Saclay 2022

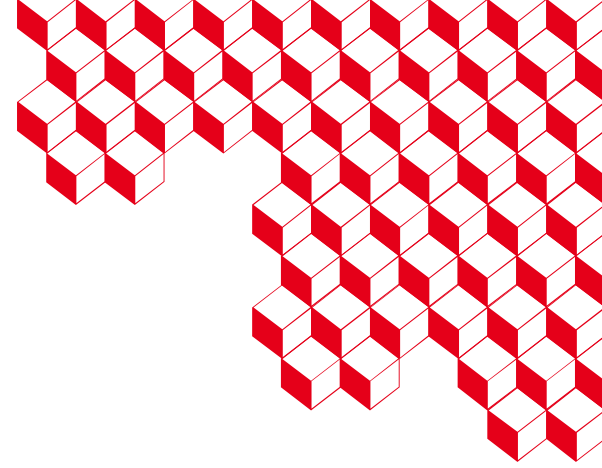


2. Comment détecter les photons de l'univers ?

- 1) S'affranchir de l'atmosphère
- 2) Collecter le signal
- 3) Détecter le signal
- 4) Les familles de détecteurs

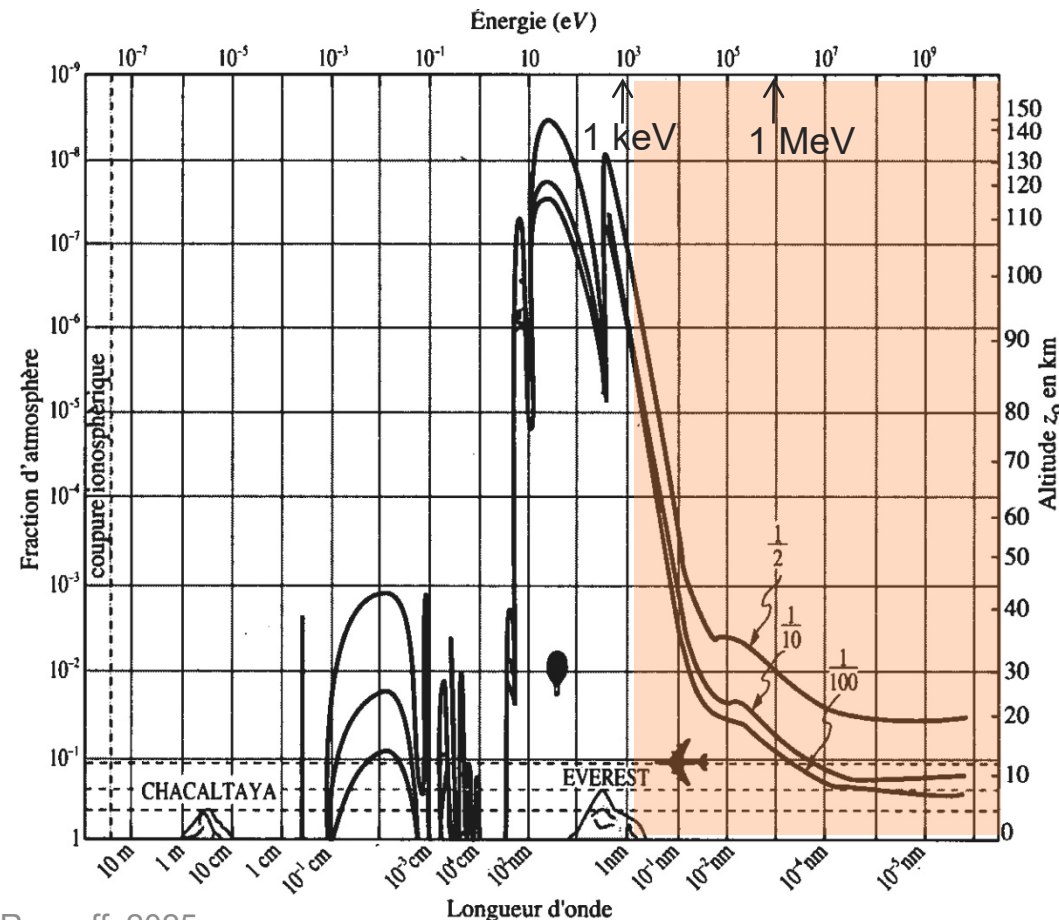


2.1 Les contraintes d'observation



Les contraintes d'observation

- L'atmosphère absorbe les rayonnements X et gamma.
 - Nécessité des télescopes spatiaux
 - Contraintes de développement supplémentaires (fiabilité, ressources...)



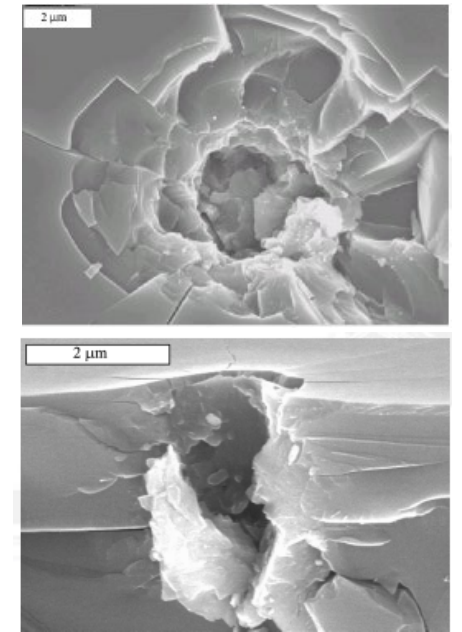
Développer un instrument spatial

Contraintes du lancement et de la mise à poste

- Stockage humide
- Vibrations
- Chocs (décollage, déploiement des panneaux solaires et des antennes)
- Autonomie de l'allumage

Contraintes sur l'orbite

- Variations thermiques : fatigue des matériaux
 - Panne des mécanismes, rupture
- Radiations : particule ionisante ou énergétique
 - Vieillissement accéléré des détecteurs, panne des électroniques
- Contamination : dépôt de particules, réactions de surface...
 - Dégradation des propriétés optiques
- Micrométéorites, débris spatiaux



Particules Fe, $r = 0,3 \mu\text{m}$; $v = 10 \text{ km/s}$
cratères dans le silicium de $0,1$ à $10 \mu\text{m}$

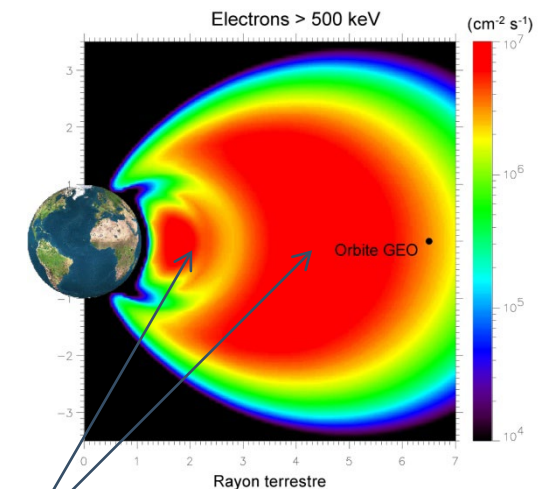
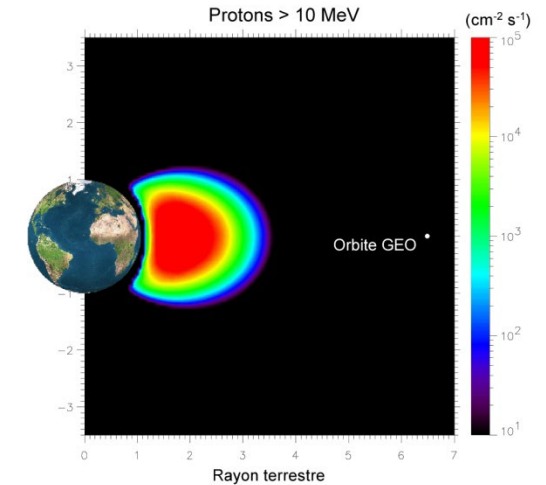
Radiations : origines et effets

Effets cumulatifs

- Interaction d'électrons et de protons de plus de 100 keV (irruptions solaires, ceintures de radiation).
- Accumulation des charges dans les isolants (oxydes).
- Dégradation continue des paramètres électriques au cours du temps puis éventuellement perte de fonctionnalité.
- La dose cumulée s'exprime en rad.Si ; 100 rad = 1 J/kg.

Effets singuliers

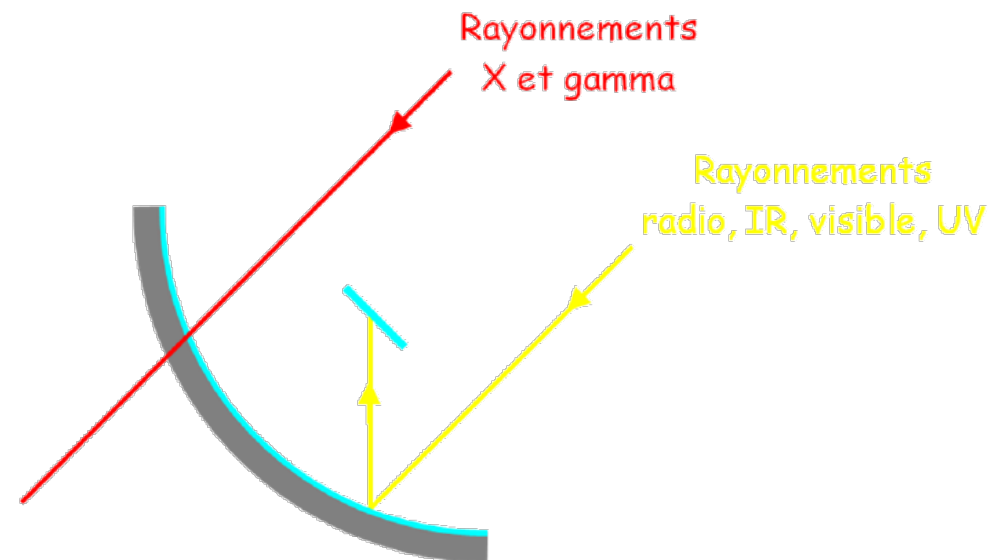
- Interactions des ions du rayonnement cosmique et des protons solaires ou des ceintures de radiation.
- Effets destructifs ou non pour les composants électroniques.



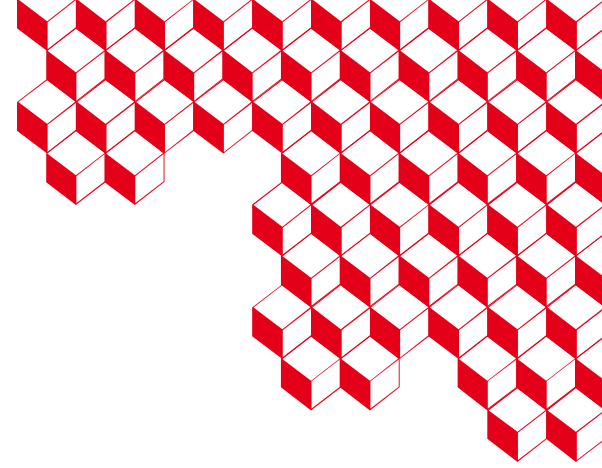
Ceintures intérieure et extérieure
de Van Allen (10^7 électrons. $\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

Oublier les optiques classiques...

- Le rayonnement gamma est trop pénétrant pour être réfléchi par un miroir classique.



- Comment collecter le rayonnement X ou gamma ?
- Comment faire une image du ciel ?
 - Objectifs d'imagerie de sources étendues ou de localisation de sources ponctuelles

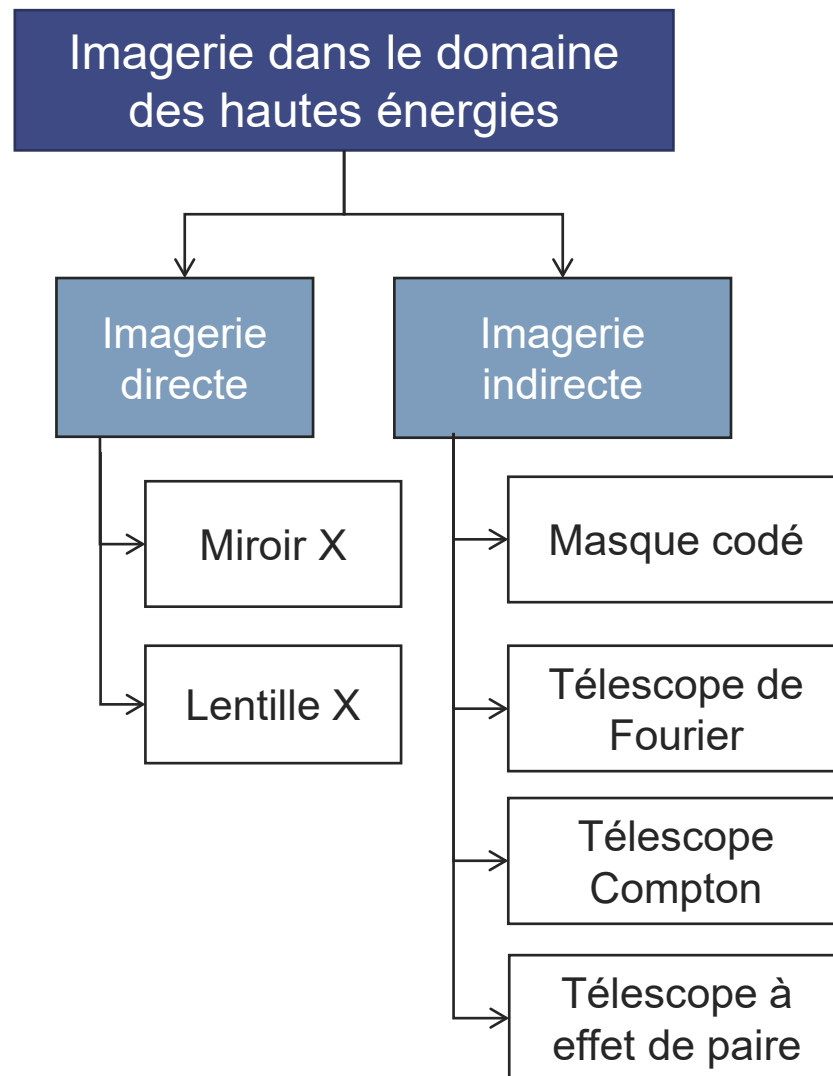


2.2. Collecter le signal

Techniques d'imagerie

Des techniques d'imagerie particulières

Définition : Focalisation des rayons pour créer une image

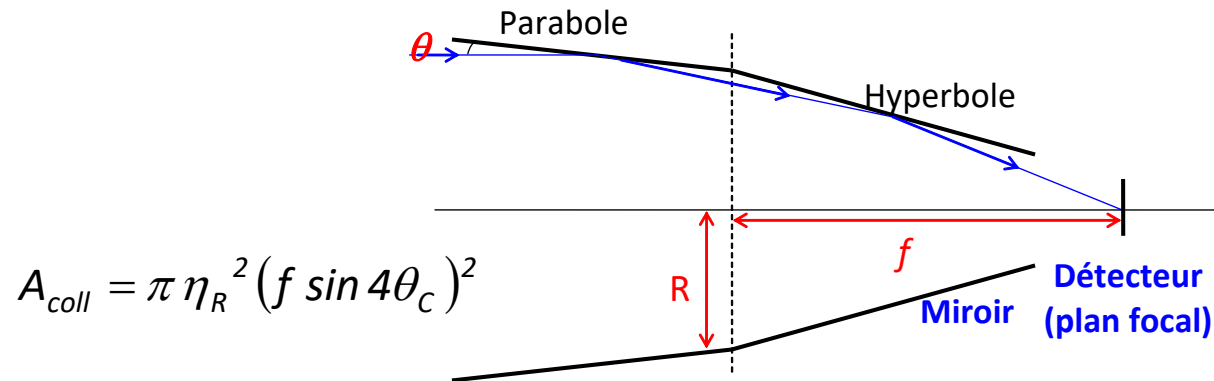


Définition : Modulation du signal permettant de retrouver la direction incidente des photons

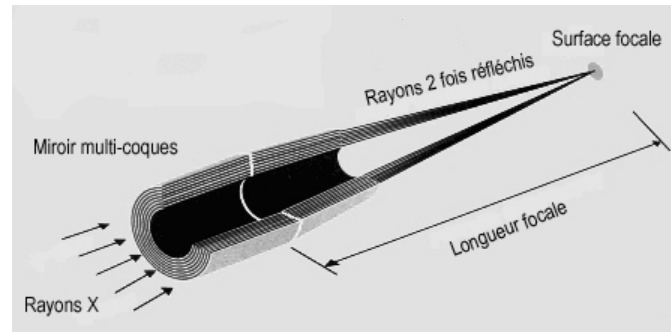
Miroirs à incidence rasante (0,1 – 10 keV)

Principe d'imagerie

Focalisation des rayons X en configuration Wolter I



Empilement de coques concentriques pour obtenir la surface efficace totale

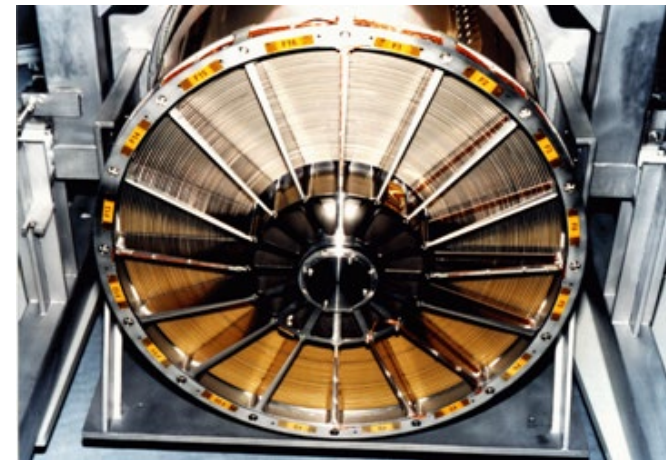


Mise en œuvre dans XMM (1999)

58 coques concentriques en nickel recouvertes d'or d'un diamètre croissant de 30 à 70 cm

Focale de 7,5 m

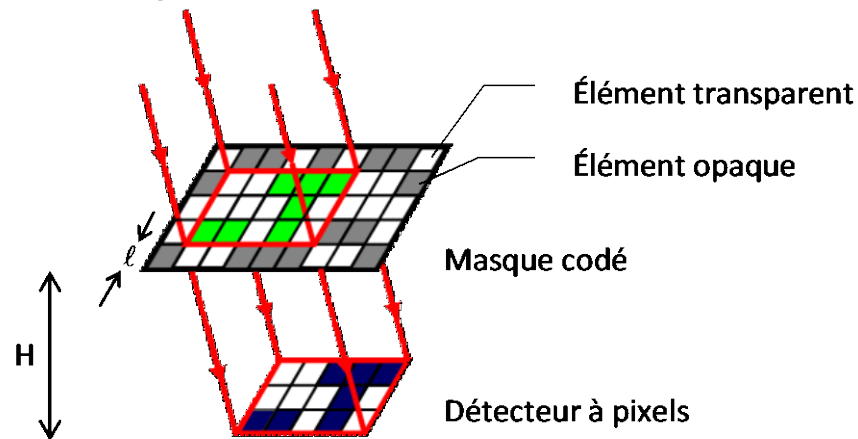
3 télescopes de 500 kg !



L'imagerie indirecte par masque codé (~100 keV)

Principe d'imagerie

- La source à l'infini projette sur le détecteur une « ombre » caractéristique de sa position dans le ciel.



- La résolution angulaire est donnée par la taille du motif du masque et la distance masque-détecteur :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{l}{H}\right)$$

- Les masques pseudo-aléatoires permettent de reconstruire par **déconvolution** la position des sources de manière unique en minimisant l'influence du bruit de fond

Mise en œuvre dans Swift/BAT (2004)

Superficie : 2,6 m²

Distance entre le masque et le détecteur : 1 m

Nombre d'éléments du masque : 52000

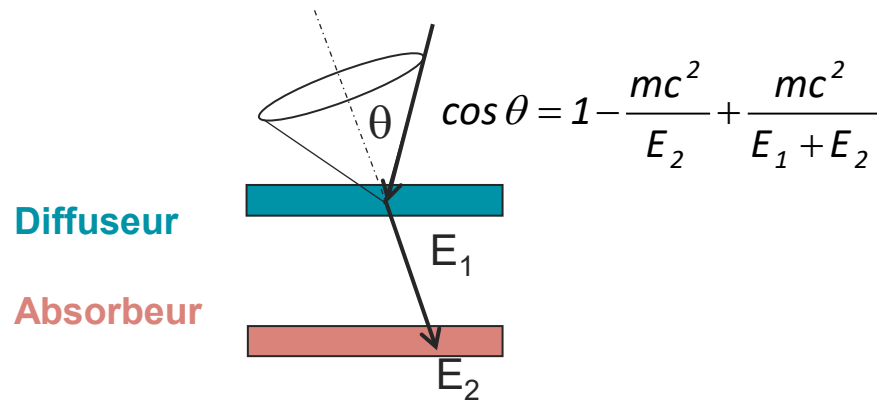
Résolution angulaire : 1-4 arcmin



L'imagerie Compton (~1 MeV)

Principe d'imagerie

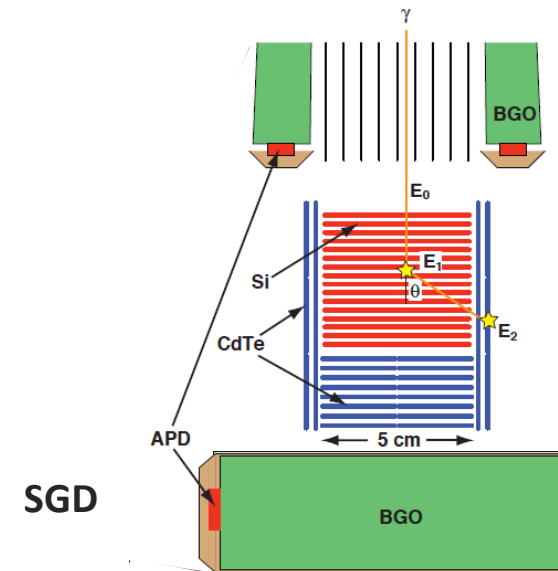
- Diffusion Compton dans le **détecteur 1** : mesures de E_1 , x_1 , y_1
- Absorption photoélectrique dans le **détecteur 2** : mesures de E_2 , x_2 , y_2
- La cinématique Compton donne l'angle et l'énergie incidents.



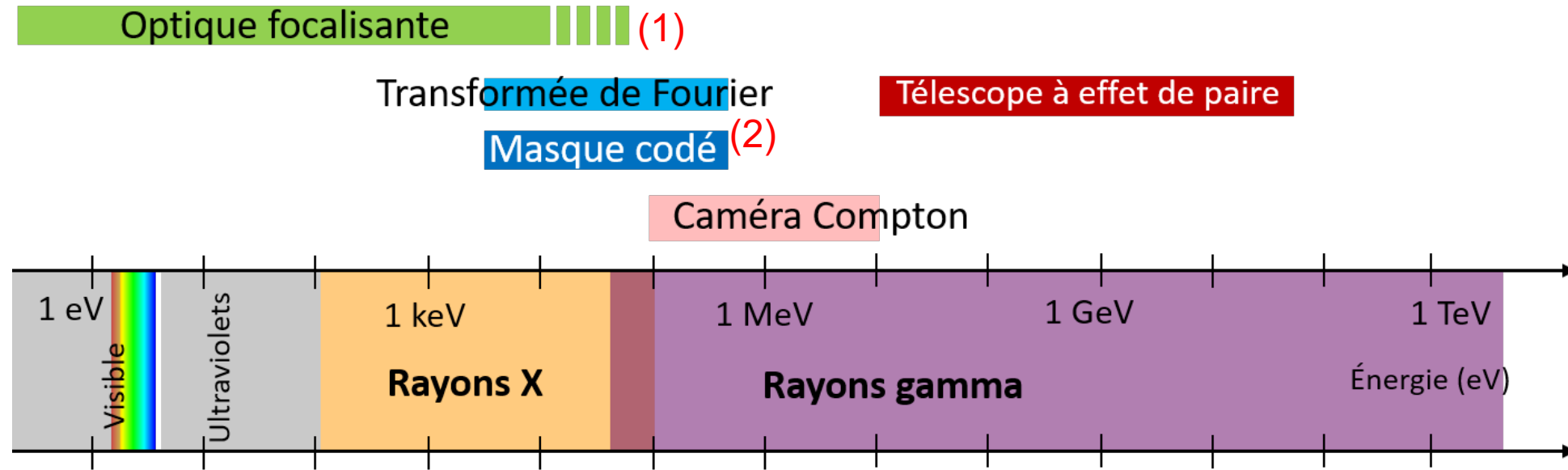
- La distribution de l'angle ψ est non équiprobable si la source est polarisée.

Mise en œuvre dans Hitomi (2016)

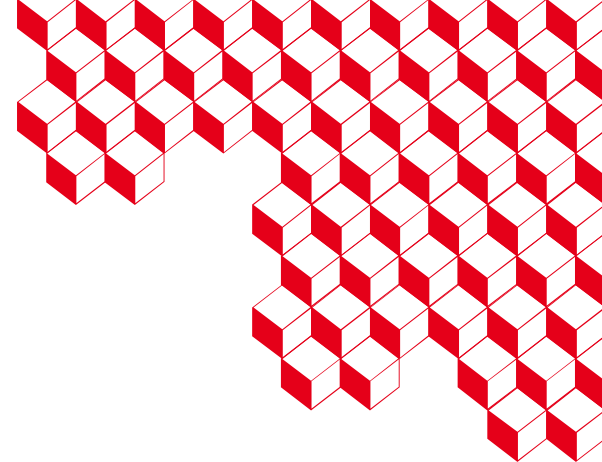
- 4 caméra Compton avec chacune : 32 couches Si, 4 couches CdTe, blindage par scintillateur BGO
- $\alpha = 8^\circ$ à 100 keV (effet Doppler)
- Sensibilité 1 mcrab
- Sensibilité de polarimétrie 10 mcrab
- 150 kg



Utilisation des techniques d'imagerie matures



- 1) Les revêtements multicouche exploitant la diffraction de Bragg permettent d'augmenter les angles de réflexion à haute énergie jusqu'à focaliser des rayons de 50 keV (voire 80 keV dans NuSTAR).
- 2) Les télescopes de Fourier sont une alternative au masque codé pour la physique solaire : petit champ de vue mais bien meilleure résolution angulaire (quelques arcsec au lieu de quelques arcmin).

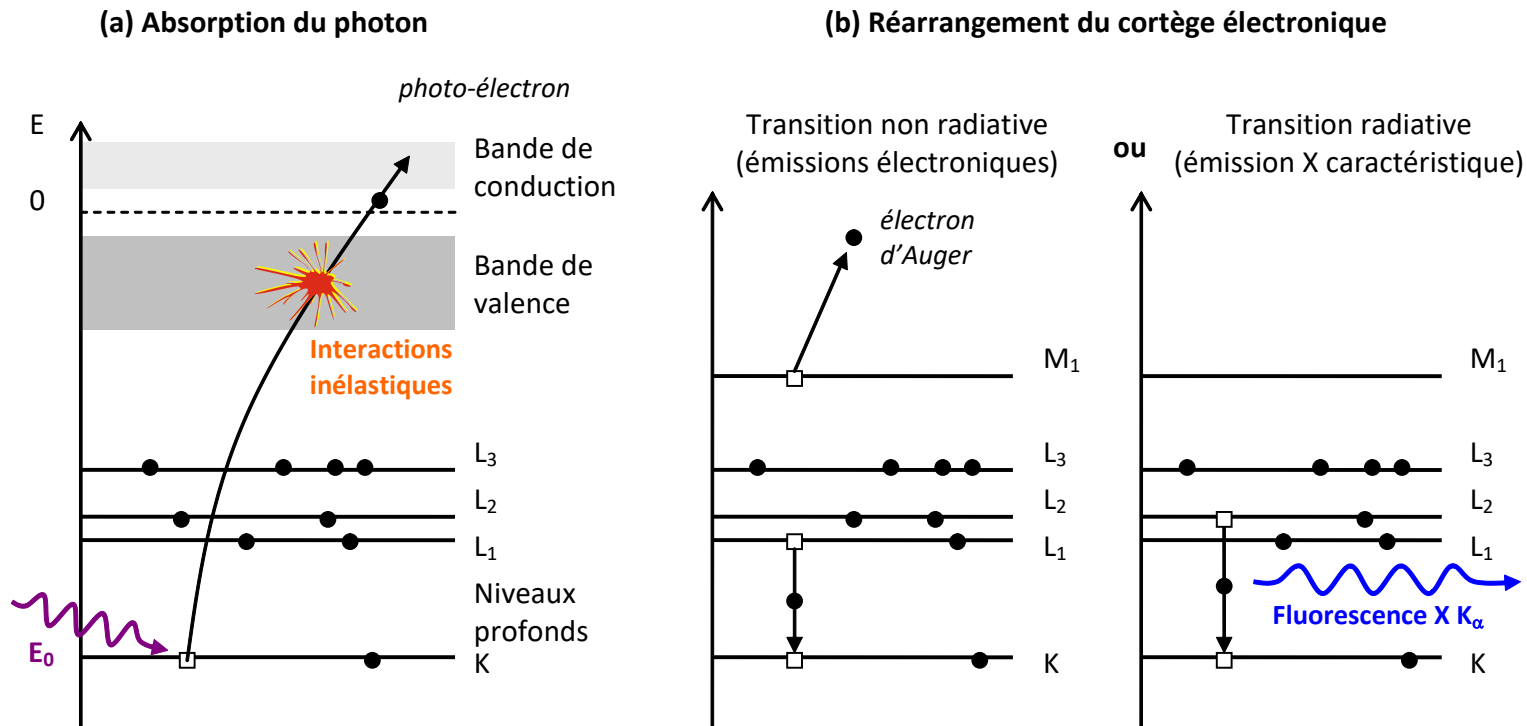


2.3. Détecter le signal

Interaction rayonnement - matière

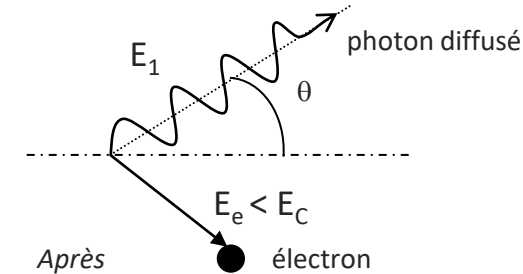
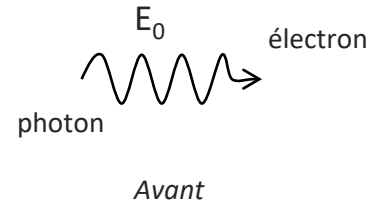
Effet photoélectrique

- **Absorption totale** du photon et libération d'un photo-électron d'énergie cinétique $E_C = E_0 - E_L$
- L'énergie E_C est transférée à d'autres atomes qui ionisent à leur tour
→ création d'un nuage de charges libres
- L'atome se désexcite et libère l'énergie E_L restante.



Diffusion Compton

- **Absorption partielle** de l'énergie du photon



- Le photon diffusé a une énergie :

$$E_1 = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{mc^2}(1 - \cos \theta)}$$

- Toutes les directions de diffusion ne sont pas équiprobables.
- L'électron « de recul » peut prendre toutes les énergies entre 0 et E_C
 - E_C est appelée énergie de front Compton

$$E_C = \frac{E_0}{1 + \frac{mc^2}{2E_0}}$$

Effet de paire

- Conversion de l'énergie du photon en **énergie de masse** et en énergie cinétique
 - Création d'une **paire électron-positon** si $E_0 > 2.m c^2$ (1,022 MeV)
- L'électron et le positon perdent leur énergie progressivement leur énergie dans le milieu.
- Le positon finit par s'annihiler avec un électron du milieu en émettant **2 photons de 511 keV** dans des directions opposées.
- Ces photons s'échapperont ou réagiront par effet photoélectrique ou Compton.

Et ensuite ?

1. Ionisation primaire : création d'un photo-électron par un des processus suivants :

- Effet photoélectrique (absorption totale)
- Diffusion Compton (photon secondaire créé)
- Création de paires électron/positron

2. Ionisations secondaires : le photo-électron cède son énergie au milieu

- Création d'un nuage de charge

3. Relaxation du cortège électronique à l'état stable

- Transitions radiatives (fluorescence) ou non

4. Relaxation du réseau cristallin (pour un solide)

- Retour à l'équilibre thermodynamique

Sections efficaces

- Définition : surface apparente de la particule cible pour rendre compte de la probabilité d'interaction avec le photon.
- Expression : dépend du numéro atomique Z du matériau.

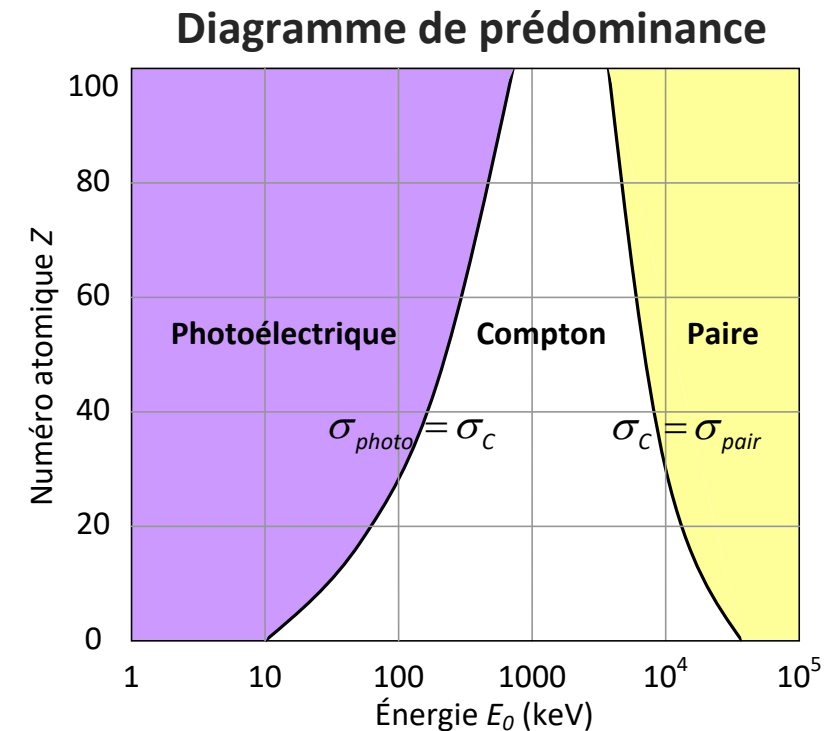
- $\sigma_{photo} \propto \frac{Z^{4,5}}{E_0^3}$

- $\sigma_c \propto \frac{Z}{E_0}$

- $\sigma_{pair} \propto Z^2$

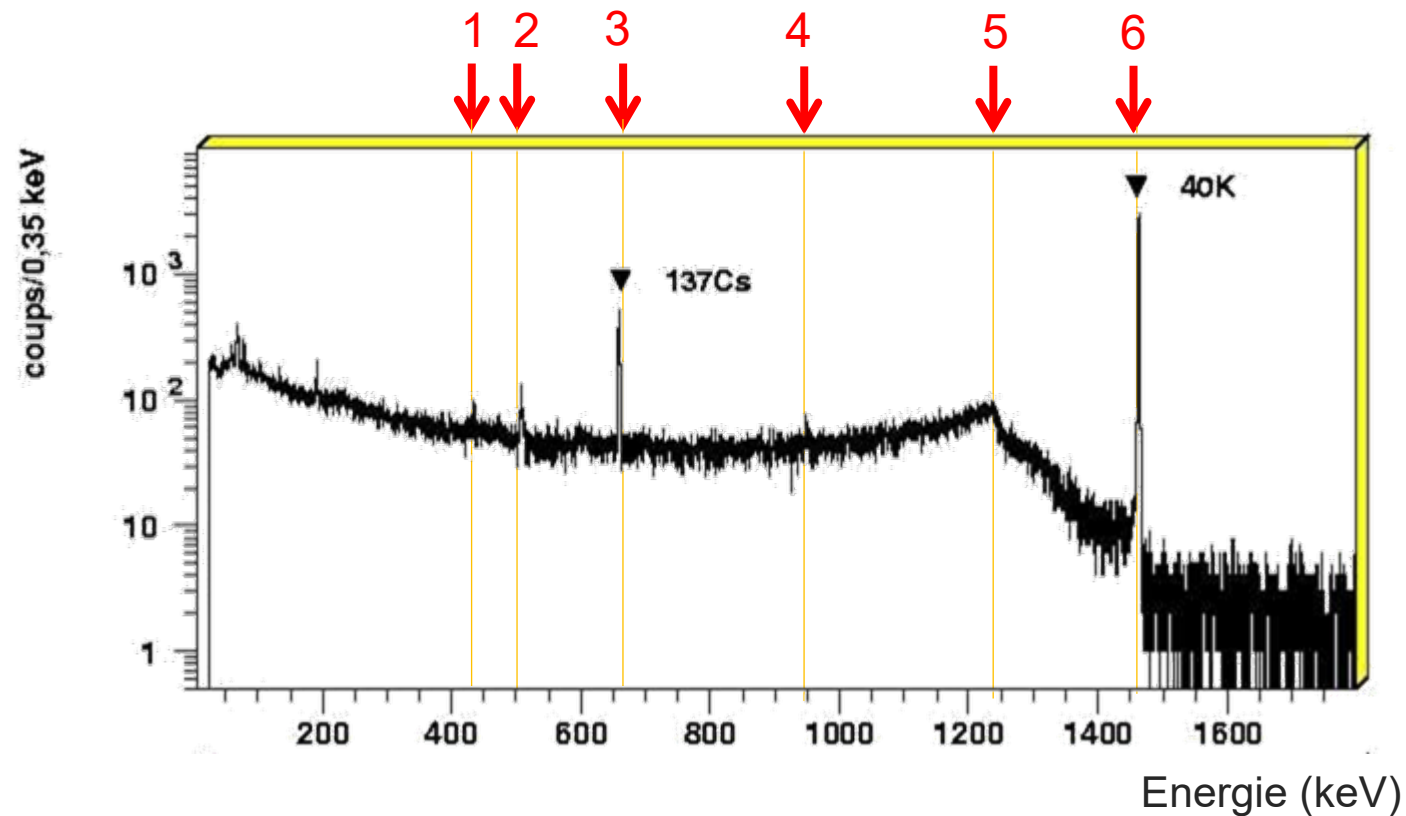
- Section efficace totale d'un atome

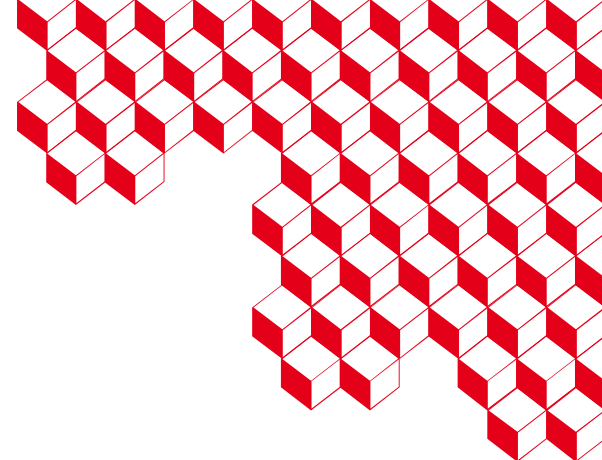
- $\sigma_{tot} = \sigma_{photo} + Z \cdot \sigma_c + \sigma_{pair}$



Application à la spectroscopie gamma

Exemple de la datation du vin en mesurant l'activité du Cs137 (662 keV) et du K40 (1461 keV) avec un détecteur Ge. **Exercice : interpréter les structures 1 à 7 dans le spectre.**





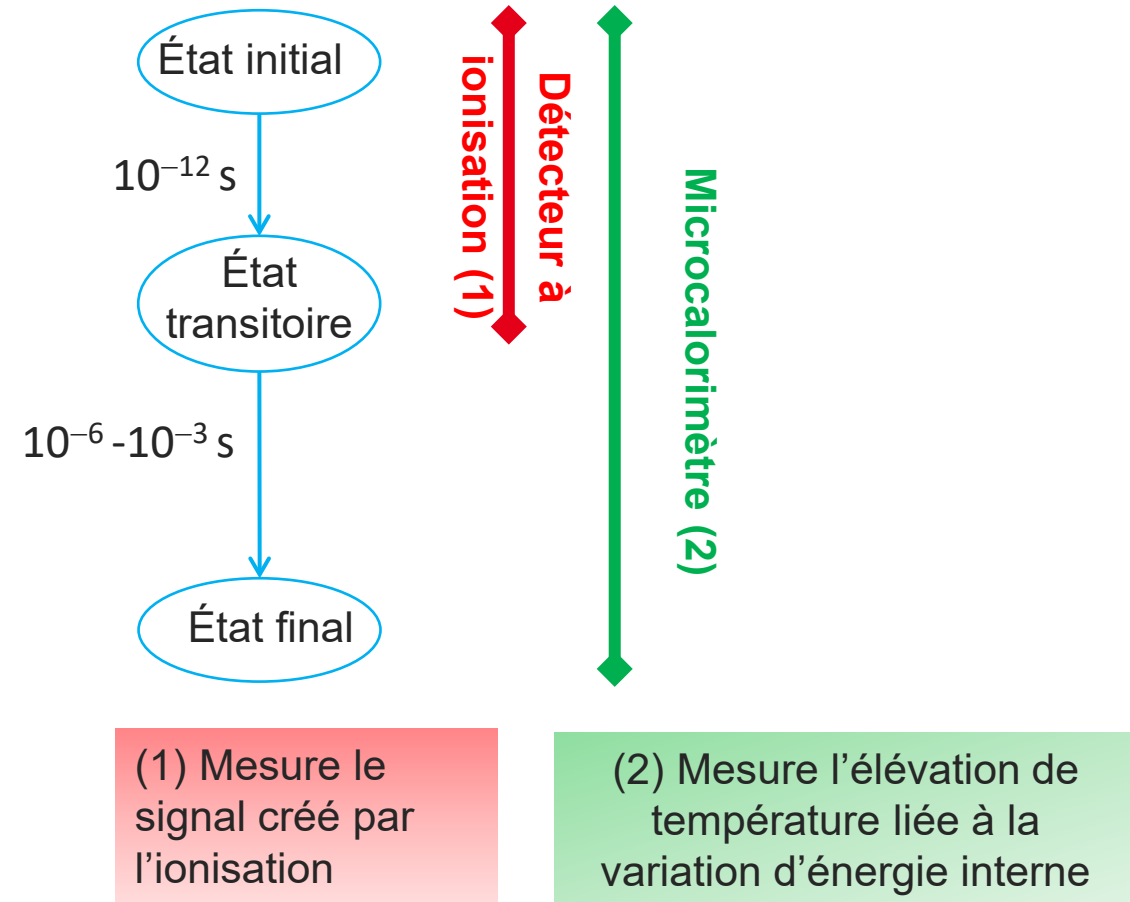
2.4. Famille de détecteurs

Principes de fonctionnement et exemples

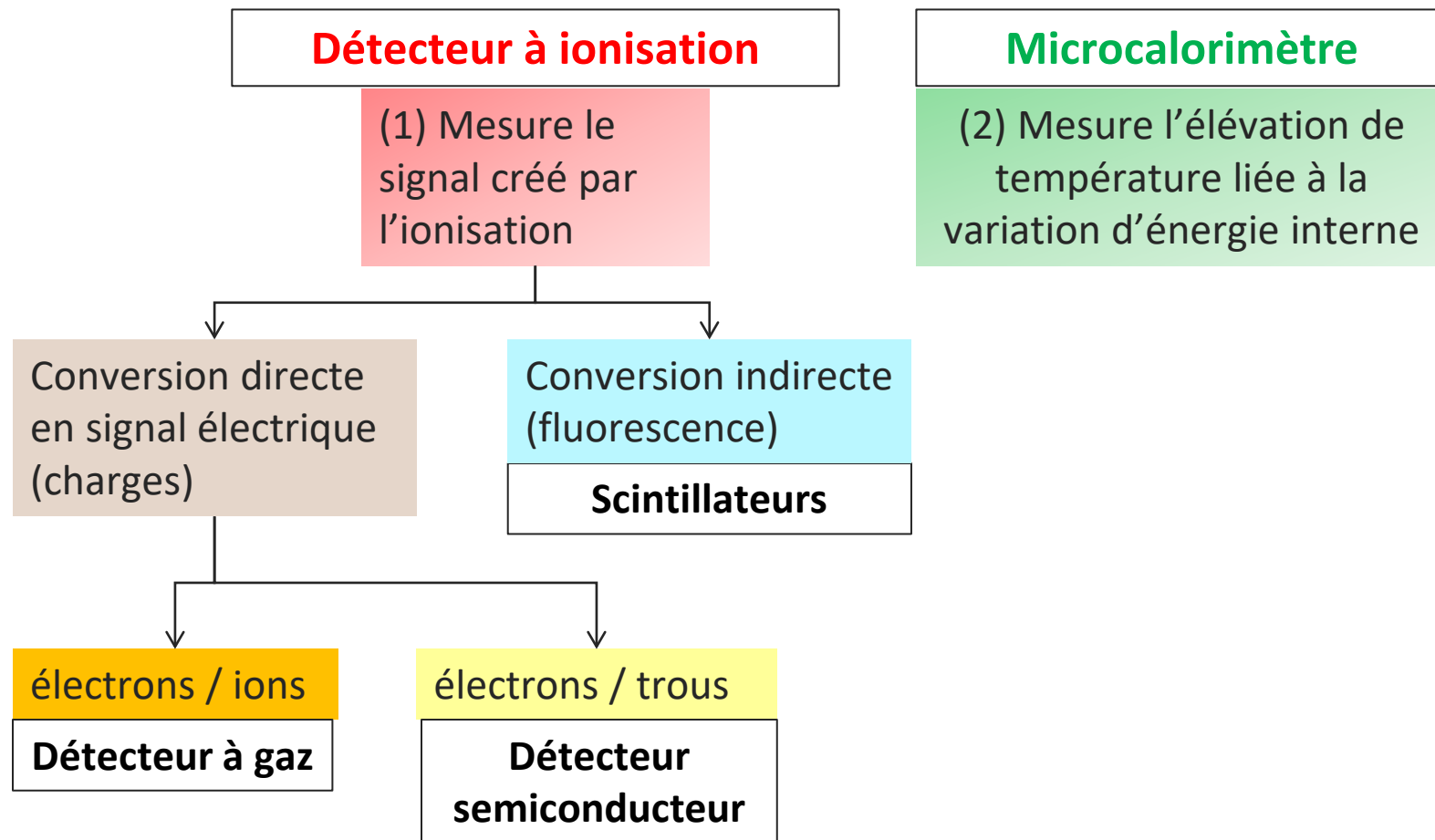
Principes de photodétection

Dans un solide :

- Interaction primaire (photoélectron)
- Interactions secondaires (transitions électroniques successives)
- Désexcitation par des interactions électrons-phonons (transfert d'énergie dans le réseau cristallin sous forme de vibration)
- Retour à l'équilibre des phonons



Classer les détecteurs

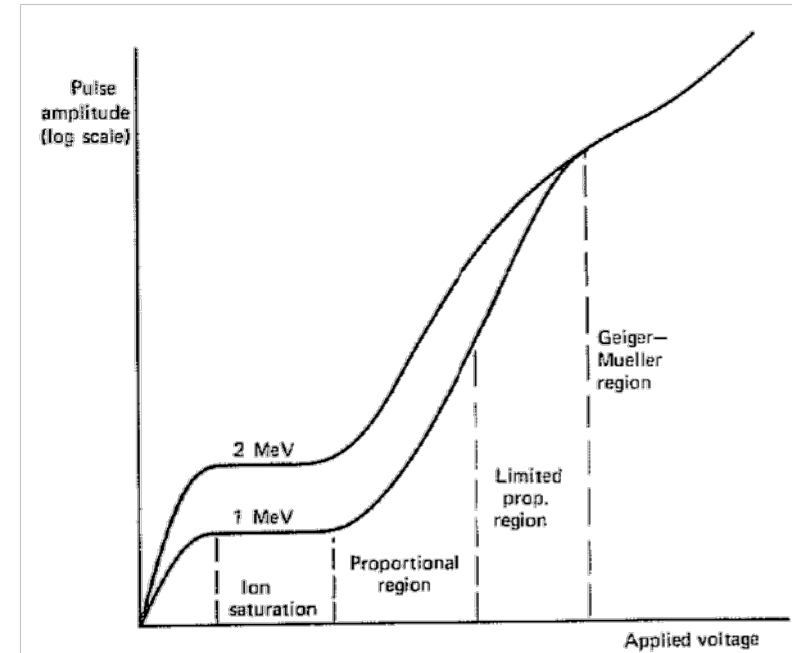


Les détecteurs à ionisation : principes

- Principalement des gaz (He, Ar, CH₄ ...) : chambres à ionisation
- Détection directe des électrons et ions d'ionisation (spectroscopie)

- **Chaîne de mesure :**

1. Création de paires ions-électrons par effet photoélectrique
2. Dérive des charges sous l'effet du champ électrique vers l'électrode de collection
3. Lecture du signal par l'électronique frontale



- La segmentation de l'anode et la mesure des temps d'arrivée permet de reconstituer des trajectoires des photoélectrons (imagerie, polarimétrie)
- *Gaz Electron Multiplier* (1997, Sauli) : région de fort champ électrique pour déclencher un phénomène d'avalanche créant un courant suffisamment élevé pour l'électronique.

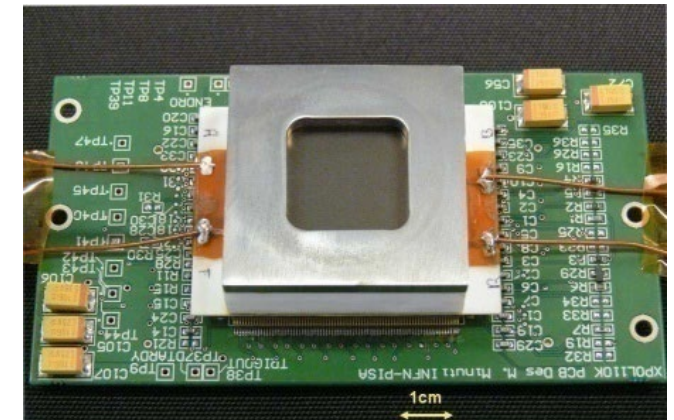
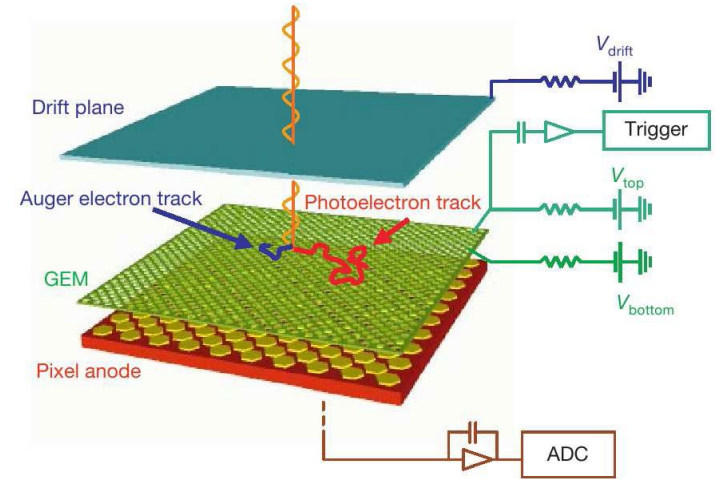
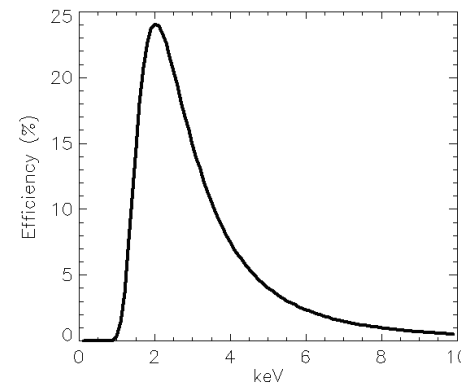
Les détecteurs à ionisation : exemple

■ Gas Pixel Detector

- Mélange de gaz $\text{He}_{20}\text{-DME}_{80}$ sous 1 bar
- GEM: gas electron multiplier
- Une voie de lecture par pixels de $50\ \mu\text{m}$
- Premier détecteur scellé : Bellazini 2007, **lancement de IXPE en 2021**

■ Performances

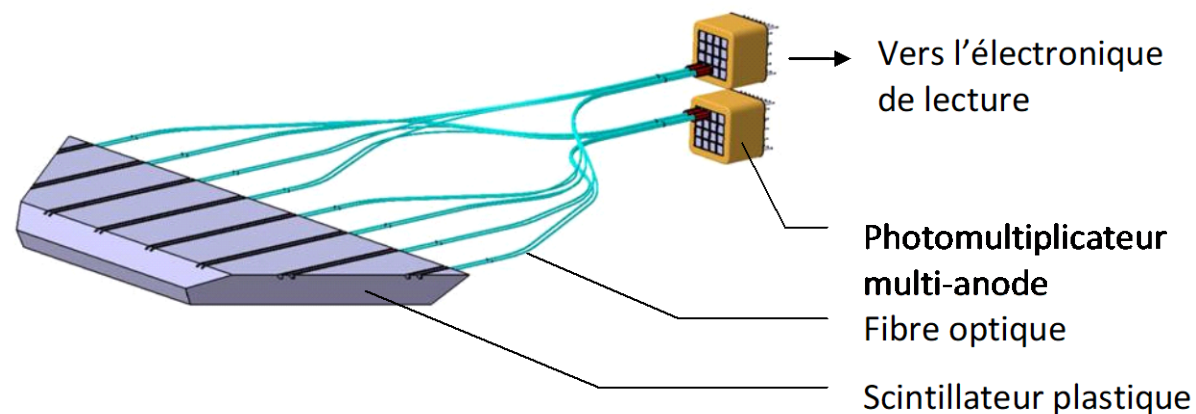
- Sensibilité de polarisation :
1 % MDP (1 mCrab, 100 ks)
- Résolution angle polarisation :
 2° (1mCrab, $P=10\%$)
- Résolution en énergie : 20% à 6 keV
- Efficacité : 25% à 2 keV



Les scintillateurs : principes

Chaîne de mesure

1. Conversion de l'énergie incidente en lumière visible ou UV.
 - L'atome excité par l'absorption du rayonnement se désexcite en émettant des photons de **fluorescence** (10 ps) ou **phosphorescence** ($>1 \mu\text{s}$).
2. Conversion des scintillations en impulsions électriques par un **photomultiplicateur (PM)** couplé en direct ou par un guide d'onde.
3. Détection et la mesure de l'énergie par l'électronique frontale.

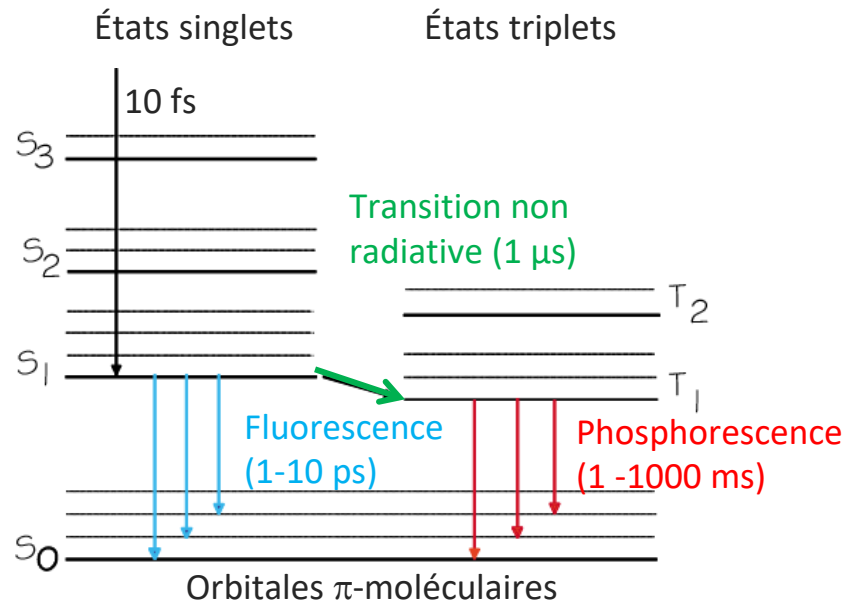


Plaque pour le détecteur d'anticoïncidence de Symbol-X

Les deux grandes familles de scintillateurs

Plastiques organiques

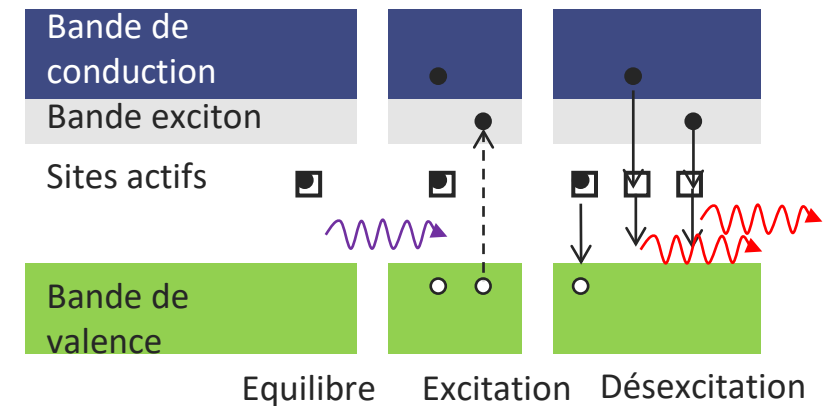
- Liquide scintillant (PBD, PBO, POPOP) dans solvant plastique solide.



- Signal très rapide (2-3 ns)
- Simple à fabriquer et mettre en œuvre
- **Système d'anticoïncidence**

Cristaux inorganiques

- Alcalins avec impureté d'activation NaI(Tl), CsI(Na) ou non alcalins Bi₄Ge₃O₁₂ (BGO)



- Grand pouvoir d'arrêt
- Signal intense → bonne résolution en énergie
- **Spectroscopie gamma**

Etat de l'art des scintillateurs

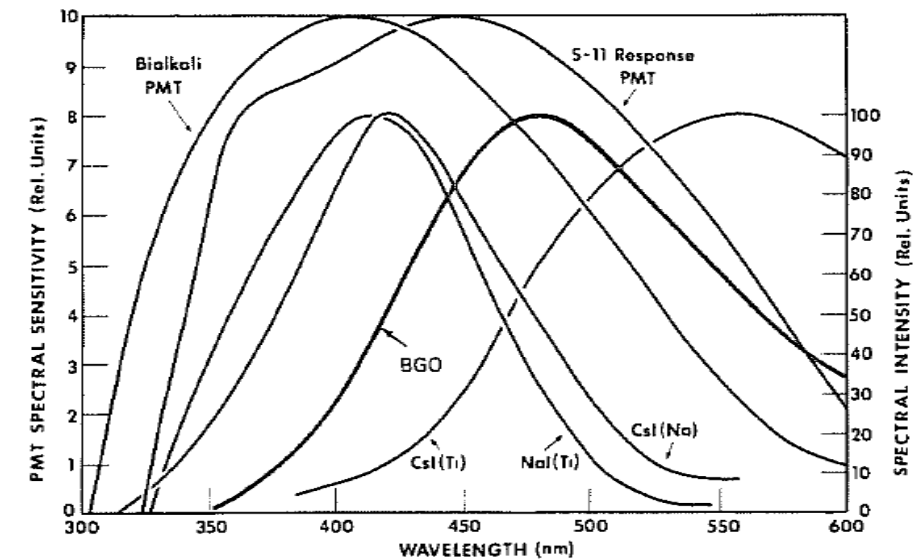
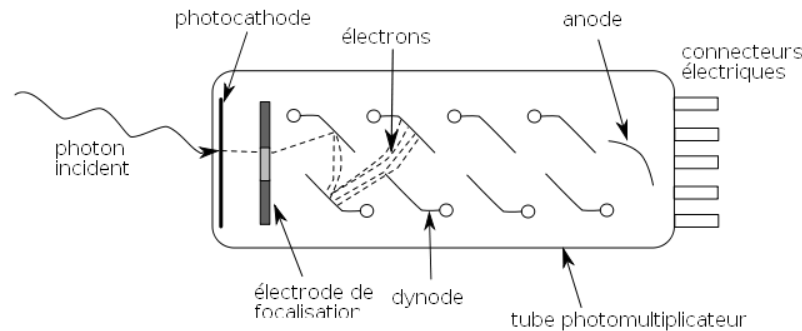
Scintillators	Light yield (photons/keV)	Decay time 1/e (ns)	Wavelength of max emission (nm)	Density g/cm ³	Hygroscopic	self radiation
NaI(Tl)	38	250	415	3.67	yes	no
CsI(Tl)	54	1000	550	4.51	yes	no
BGO	10	300	480	7.13	no	no
GSO	10	60	420	6.7	no	no
LaBr ₃	63	16	380	5.23	yes	yes
CeBr ₃	60	19	380	5.2	yes	no
Yap(Ce)	18	27	370	5.37	no	no
GaGG-F	30	50	520	6.6	no	no
GaGG-HR	50	150	530	6.6	no	no

Pour la spectroscopie gamma, on cherche le meilleur rendement de lumière. Le LaBr₃ / CeBr₃ sont préférés au NaI / CsI pour leur rapidité et leur densité.

Le GAGG est une alternative intéressante non hygroscopique (le piégeage d'eau est irréversible – création de cristaux de sel).

La mesure des scintillations par des PM

- Principe
 - Conversion des photons en électrons par la photocathode
 - Création d'électrons secondaires en cascade sur les dynodes



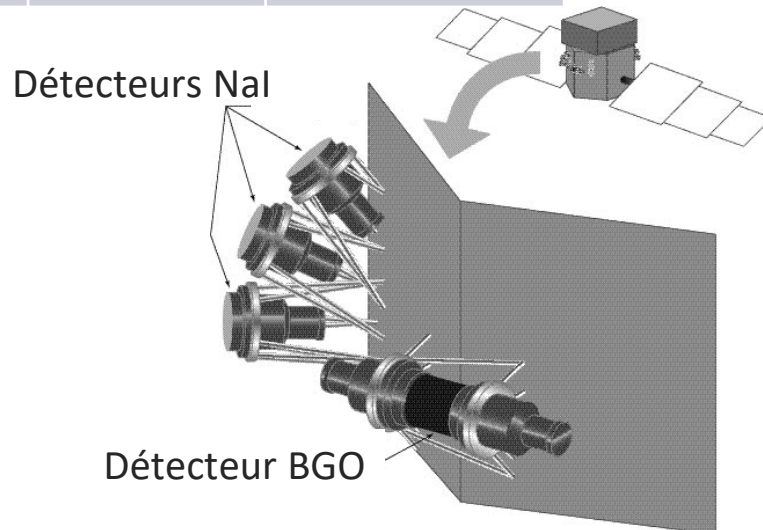
- Efficacité quantique de la photocathode typ. 20 e⁻/ph.
- Résolution temporelle < 1 ns
- Instabilité du gain (dérive, décalage)

Les scintillateurs : exemples

GLAST Burst Monitor

- Champ de vue 8 sr
- Résolution spectrale : 12% FWHM à 511 keV
- Résolution temporelle : Temps mort 3 μ s/cp

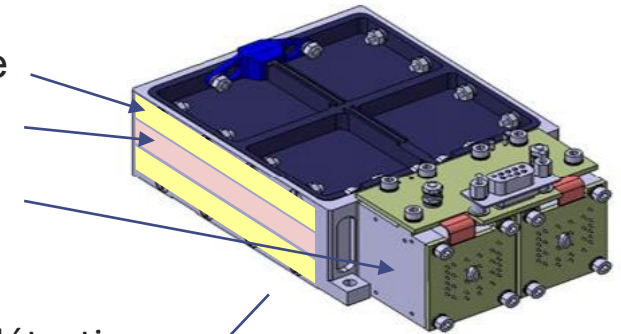
Paramètres	Nal	BGO
Surface	126 cm ²	126 cm ²
Epaisseur	1,27 cm	12,7 cm
Bande d'énergie	8 keV-1 MeV	150 keV-40 MeV



Lancement de
FERMI en 2008

XGRE

- Scintillateur plastique
- LaBr₃
- PM multi-anode



12 Unités de détection

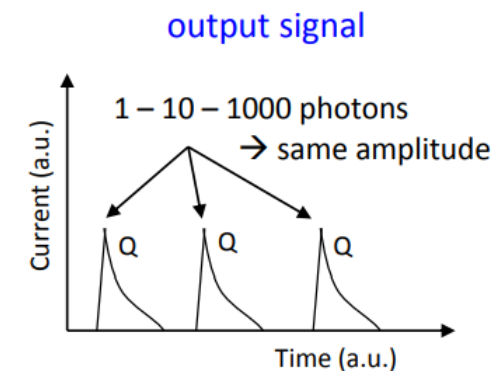
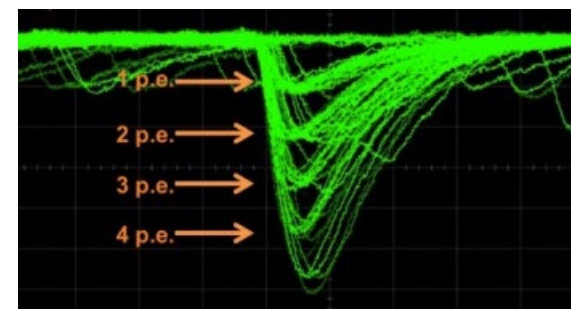
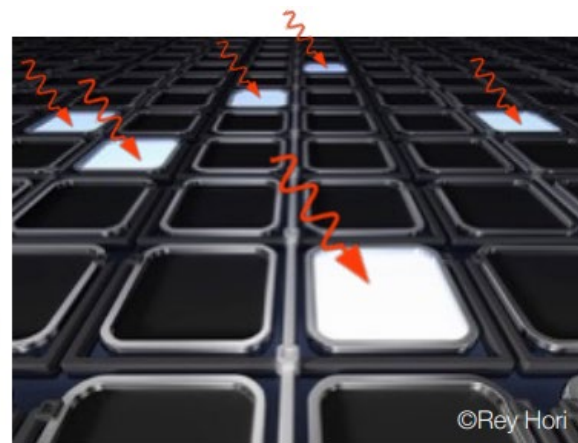
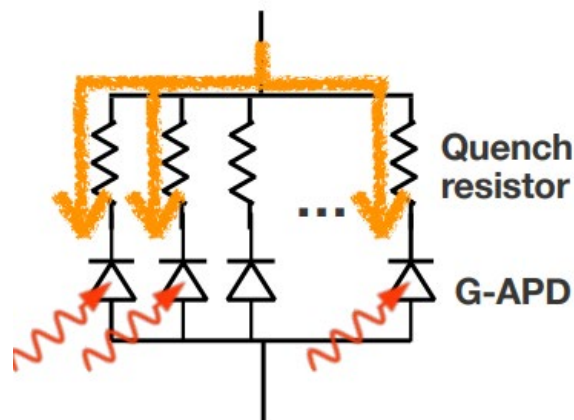


Lancement de
TARANIS en 2020

Perspectives pour la photodétection

Conception et principe de détection des SiPM

- La cellule de base est une photodiode à avalanche en mode Geiger : la charge produite est la même pour chaque détection (capteur numérique)
- L'ensemble de cellules en parallèle produit un capteur analogique dont la sortie est une charge proportionnelle au nombre de photons incident

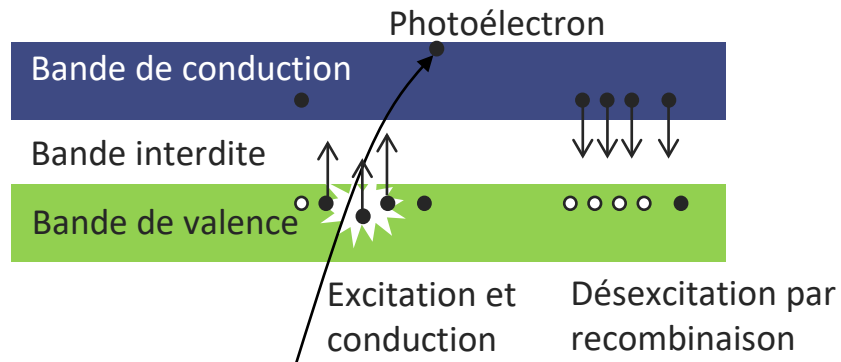


Tenue aux radiations modeste (à l'étude)

Les détecteurs semi-conducteurs : principes

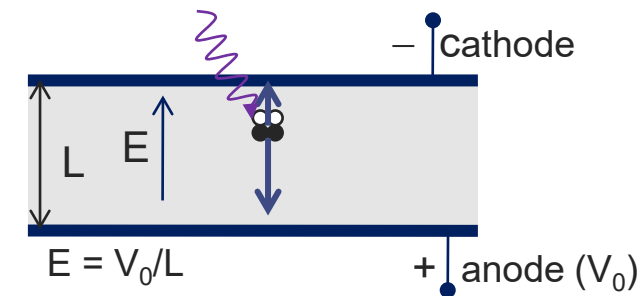
Structure de bande

- Les lacunes laissées par les électrons dans la bande de valence peuvent être considérés comme des charges positives appelés **trous**.
- La conduction dans la matériau est assuré par le mouvement des électrons dans la bande de conduction et celui des trous dans la bande de valence.



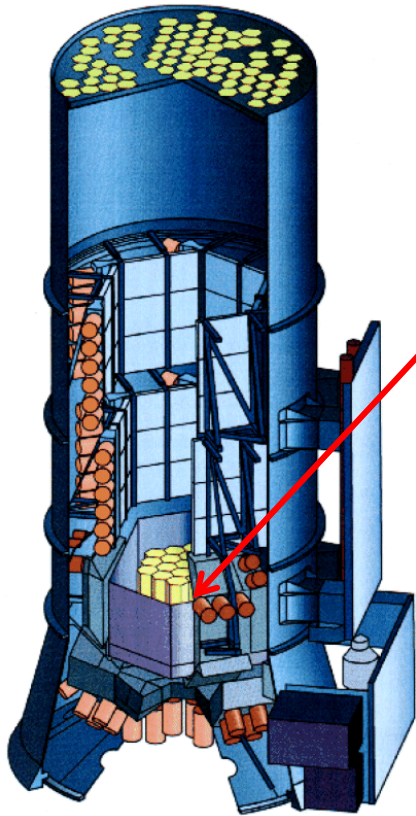
Chaîne de mesure analogue aux gaz à ionisation

1. Création de paires électrons-trous par effet photoélectrique.
2. Dérive des électrons vers l'anode et des trous vers la cathode.
3. Lecture du signal par l'électronique frontale.

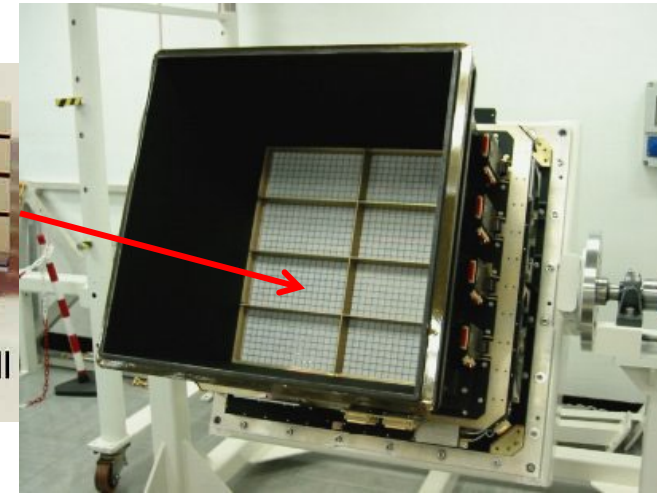
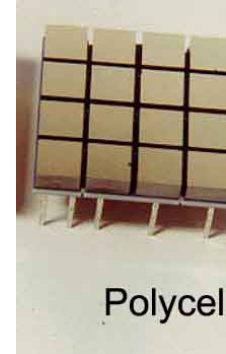
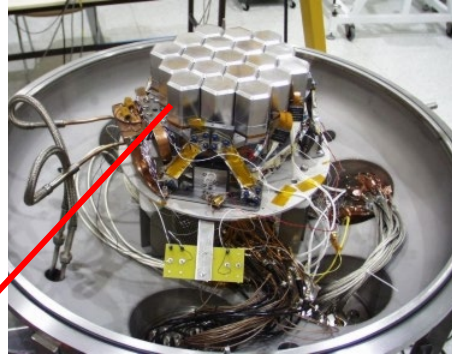


Les semi-conducteurs : exemple d'INTEGRAL

Spectromètre SPI



Lancement
INTEGRAL en 2001

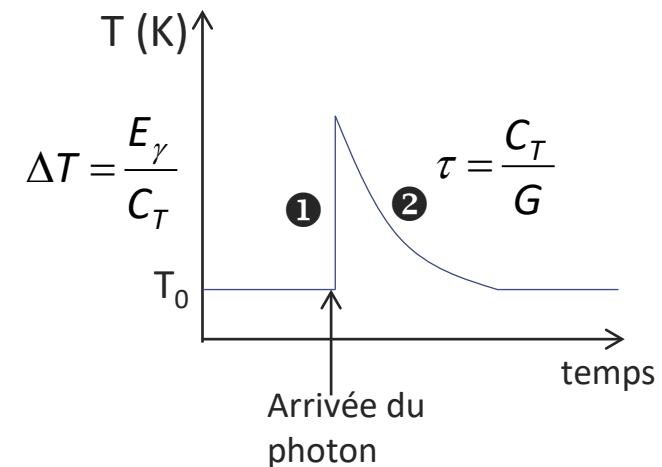
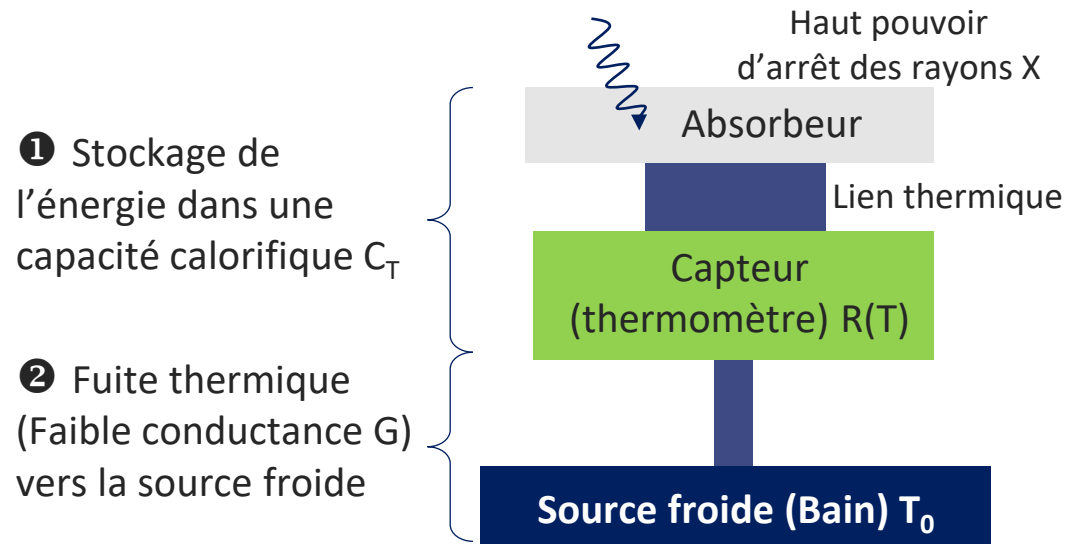


ISGRI pour l'imageur IBIS

Paramètres	SPI	ISGRI
Semiconducteur	Ge haute pureté	CdTe
Nombre de détecteurs	19	16384
Surface totale	500 cm ²	2600 cm ²
Température	85 K	270 K
Bande d'énergie	18 keV-8 MeV	13 keV-200 keV
Résolution en énergie	0,17 % à 1,33 MeV	8 % à 122 keV

Les bolomètres X : principes

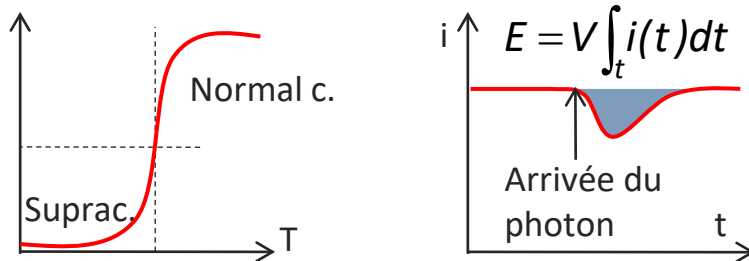
- Bolomètre : tout instrument montrant un excès de température causé par l'absorption d'une particule incidente → nécessite un refroidissement < 1 K : on parle de **microcalorimètre cryogénique**
- Chaîne de mesure classique
 - a. Conversion de l'énergie du photon en impulsion de température par l'**absorbeur**.
 - b. Conversion par la **thermistance** en contact en impulsion électrique détectable.→ Limitation en taux comptage car désexcitation très lente (ms).



Les bolomètres X : réalisations

TES (transition edge sensor)

- Thermomètre supraconducteur
 - Lorsque la température augmente, il passe à l'état de conduction normale → brusque chute de courant détectable.



- Détecteur sensible (Mo/Au)
- Complexité de lecture impédance $m\Omega$, multiplexage par SQUID pour avoir une matrice de détection

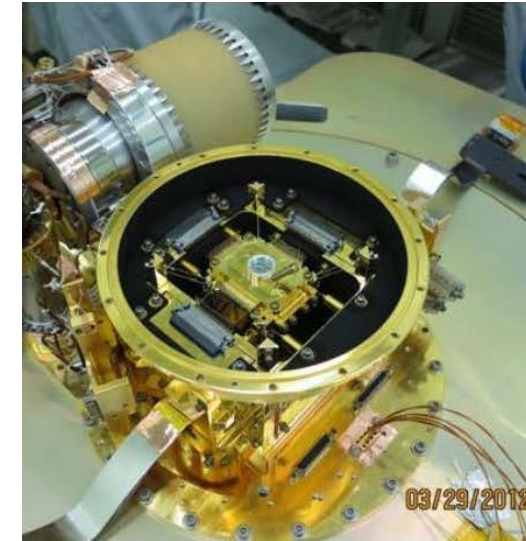
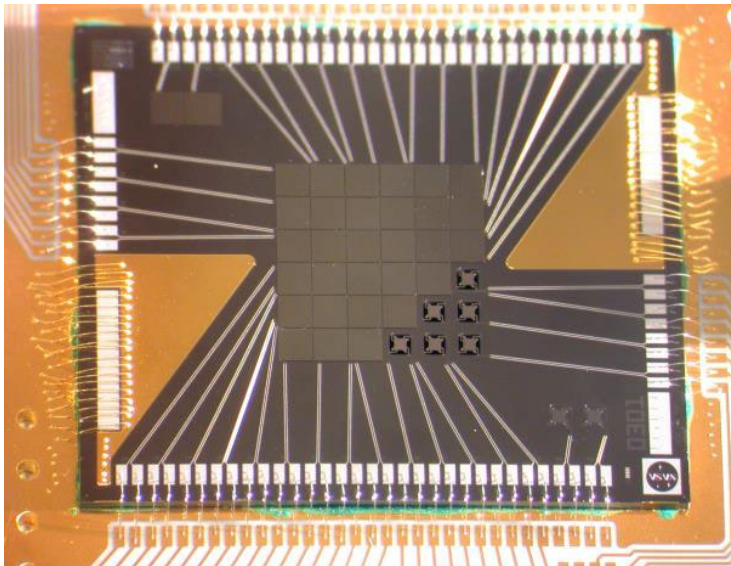
MIS (metal insulator sensor)

- Thermomètre implanté sur silicium
 - Technologies microélectronique disponible pour la matrice
 - Electronique de lecture plus « classique » (cryogénique 4K)
- Complexité de l'absorbeur (tantale) et intrinsèquement plus lent

Les bolomètres X : exemple

X-ray spectrometer (XRS) d'Hitomi et de XRISM

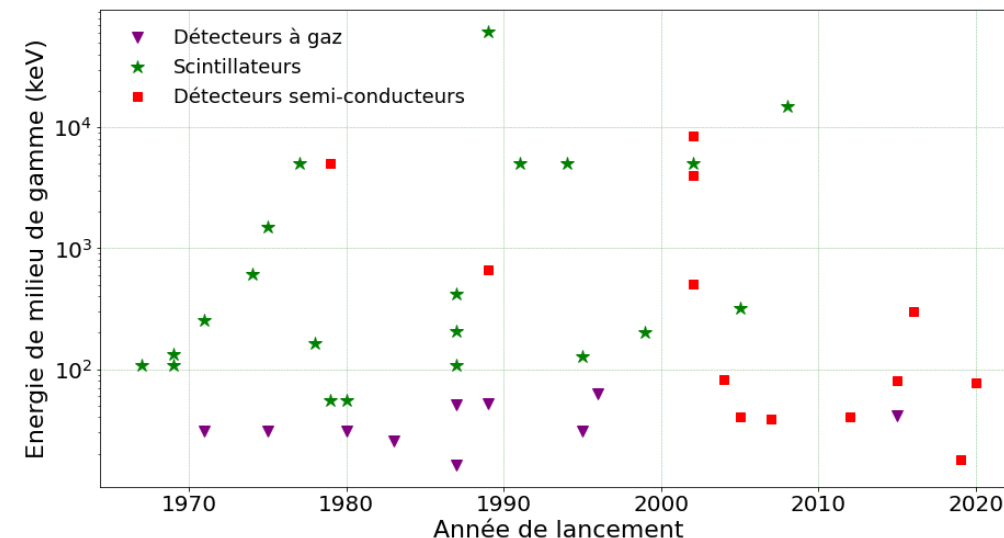
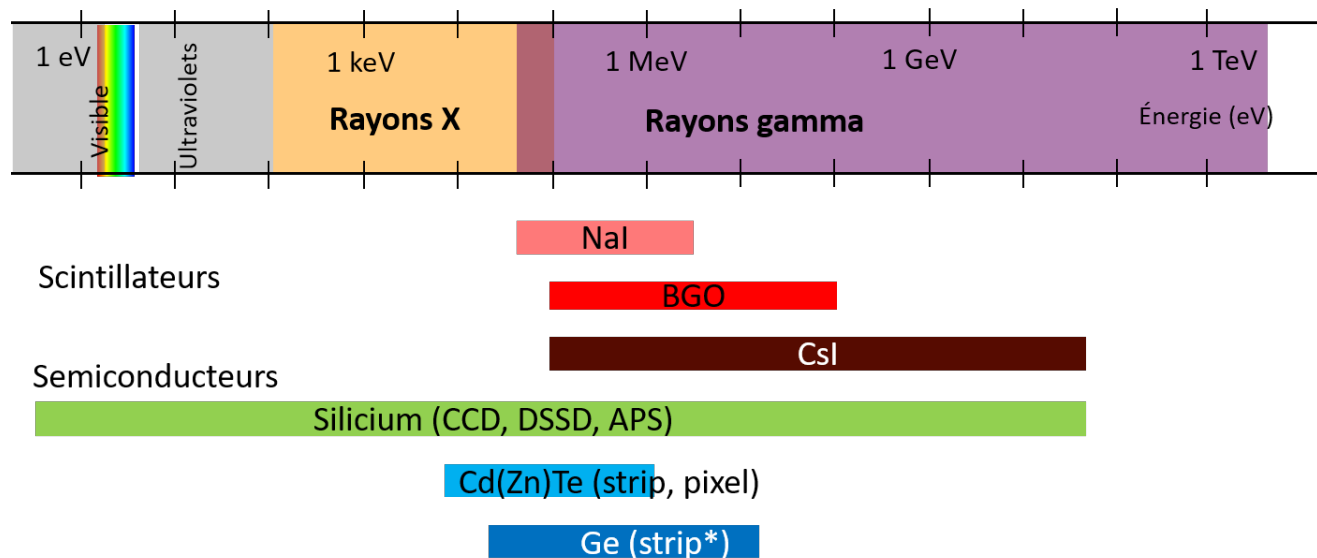
- Absorbeur HgTe collé sur thermomètre Si
- Matrice de 6×6 pixels de $814 \mu\text{m}$ de côté
- Refroidissement à 50 mK : ^4He , LHe, dADR (*adiabatic demagnetization refrigerator*)



- Gamme d'énergie : 0,3 – 12 keV
- Résolution spectrale : 6 eV FWHM à 6 keV

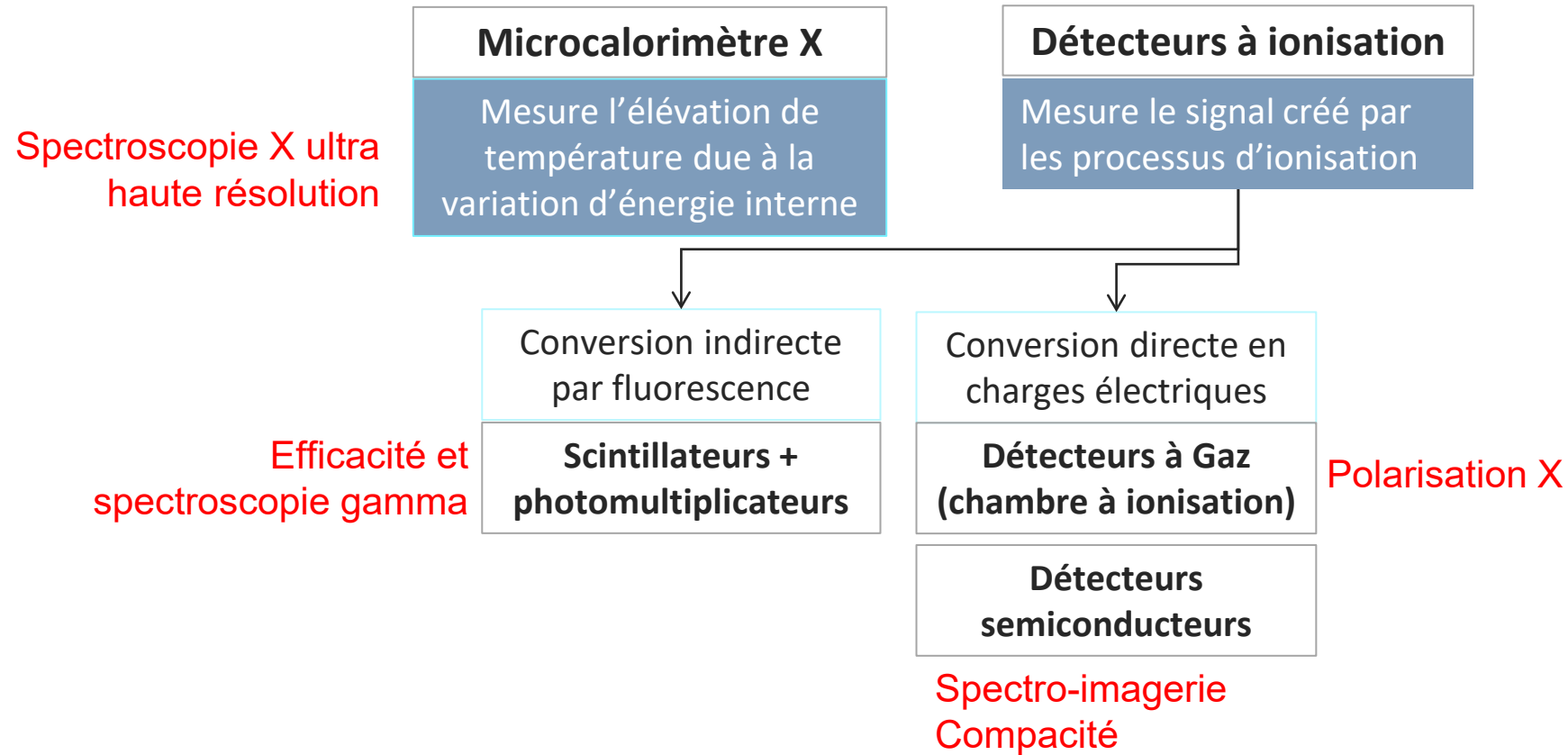
Lancement de Astro-H/Hitomi en 2016 et XRISM en 2023

Evolution des technologies utilisées



- Les scintillateurs sont des solutions efficaces pour la détection gamma mais la tendance est de les remplacer par des semi-conducteurs pour leur compacité et résolution spatiale.
- Le silicium est utilisé dans de nombreuses configurations pour couvrir toute la gamma en énergie et tirer parti de l'industrie des semiconducteurs.

Résumé des détecteurs et leurs atouts



Paramètre attractif

Plan du Cours

- 1. Introduction à l'astrophysique des hautes énergies (Rappels)**
- 2. Comment détecter les photons de l'univers ?**
- 3. Comment mesurer les paramètres astrophysiques ?**
- 4. Etat de l'art des technologies et préparation des futures missions**

Résumé de l'épisode précédent

1. Ionisation primaire : création d'un photo-électron par un des processus suivants :

- Effet photoélectrique (absorption totale) → Spectroscopie
- Diffusion Compton (photon secondaire créé) → Imagerie au MeV, polarimétrie
- Création de paires électron/positron → Imagerie au 10. MeV

2. Ionisations secondaires : le photo-électron cède son énergie au milieu

- Création d'un nuage de charge

Détecteurs à ionisation à conversion directe : **gaz, semi-conducteurs**

3. Relaxation du cortège électronique à l'état stable


- Transitions radiatives (fluorescence) ou non

Détecteurs à ionisation à conversion indirecte : **scintillateurs**

4. Relaxation du réseau cristallin (pour un solide)

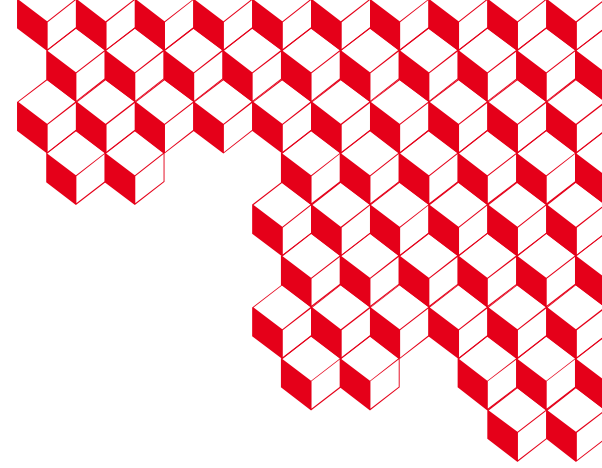
- Retour à l'équilibre thermodynamique

Microcalorimètres
(cryogéniques)



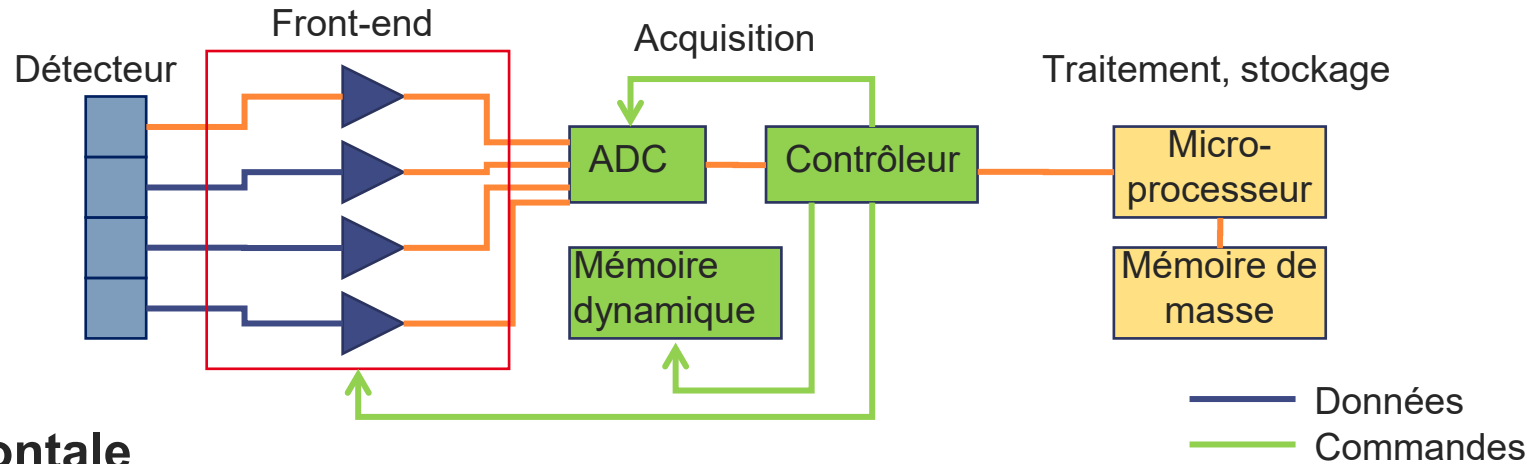
3 ■ Comment mesurer les paramètres astrophysiques ?

- 1) Chaîne de lecture
- 2) Photométrie et efficacité de détection
- 3) Spectroscopie et résolution spatiale
- 4) Imagerie et résolution spatiale
- 5) Polarimétrie et polarisation minimum détectable



3.1. Chaîne de détection pour des photons X et gamma

Architecture d'une chaîne de détection



Electronique frontale

- Mise en forme du signal pour rendre possible la mesure
- Au plus proche du détecteur, généralement analogique (*analog front-end*)
- ASIC (*application specified integrated circuit*)

Electronique de lecture

- Acquisition des informations utiles (encodage)
- Contrôleur souvent réalisé avec un FPGA (*field programmable gate array*),

Electronique de traitement

- Fonctions numériques complexes (*digital processing*)
- Microprocesseur : DSP (*digital signal processor*)

Conversion en charges

Par effet photoélectrique, l'énergie du photon X est absorbée et totalement convertie en charges, en nombre proportionnel à l'énergie :

$$N = \frac{E}{\varepsilon}$$

- **ε : énergie de création de paires** (électron-trou). N'est pas égale à l'énergie de gap car de l'énergie est transmise au réseau cristallin (phonons).

ε (Ge) = 2,96 eV (à 77K) ; ε (Si) = 3,62 eV ; ε (CdTe) = 4,42 eV.

Dépend légèrement de la température : $\sim -10^{-4} \text{ K}^{-1}$

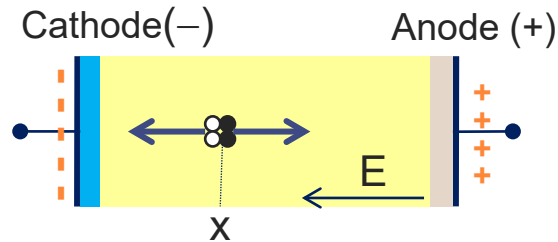
En réalité, il y a une fluctuation statistique sur le nombre de paires créées. Sa variance est :

$$\sigma_N^2 = F \cdot N$$

- **F : facteur de Fano** (< 1). F (Si) = 0,115 ; F (CdTe) = 0,15

Collection de charges

Principe d'induction du signal



- La dérive des charges dans un milieu équipé d'électrodes crée une charge image sur celles-ci appelée **charge induite**.
- Le signal ne se forme pas au moment où les charges atteignent les électrodes mais dès le début de leur trajet.

- **Théorème de Shockley-Ramo** : courant induit sur l'électrode k

$$I_{ind}^k = Q \cdot \overrightarrow{E_W^k(x)} \cdot \overrightarrow{v(x)}$$

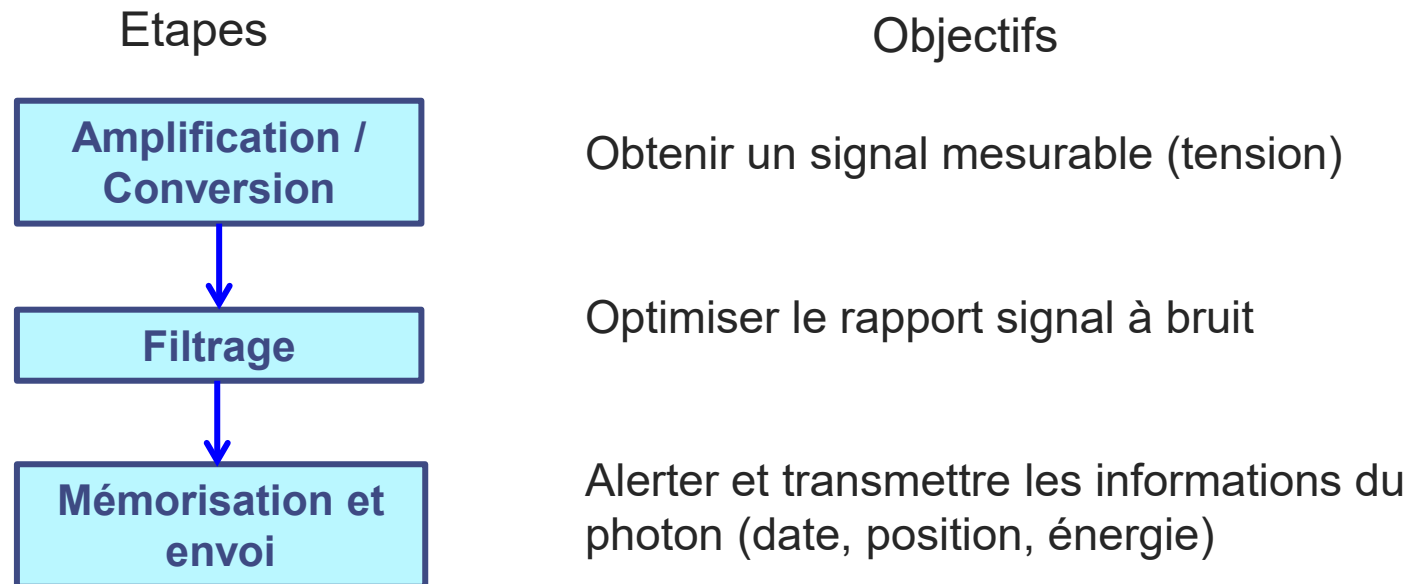
- E_W^k **champ de pondération**: champ si $V_k = 1V$ et $V_{i \neq k} = 0V$

Introduction à l'électronique frontale

Objectif d'une chaîne de lecture spectroscopique : extraire l'information de charge induite sur l'électrode de collecte, pour en déduire l'énergie du photon incident.

- Enjeu : mettre en forme le signal pour qu'il soit mesurable → conversion en tension après une amplification et en ajoutant le minimum de bruit de mesure.

On peut décomposer la mise en forme du signal en 3 étapes



Mode de lecture

« Rolling shutter mode »

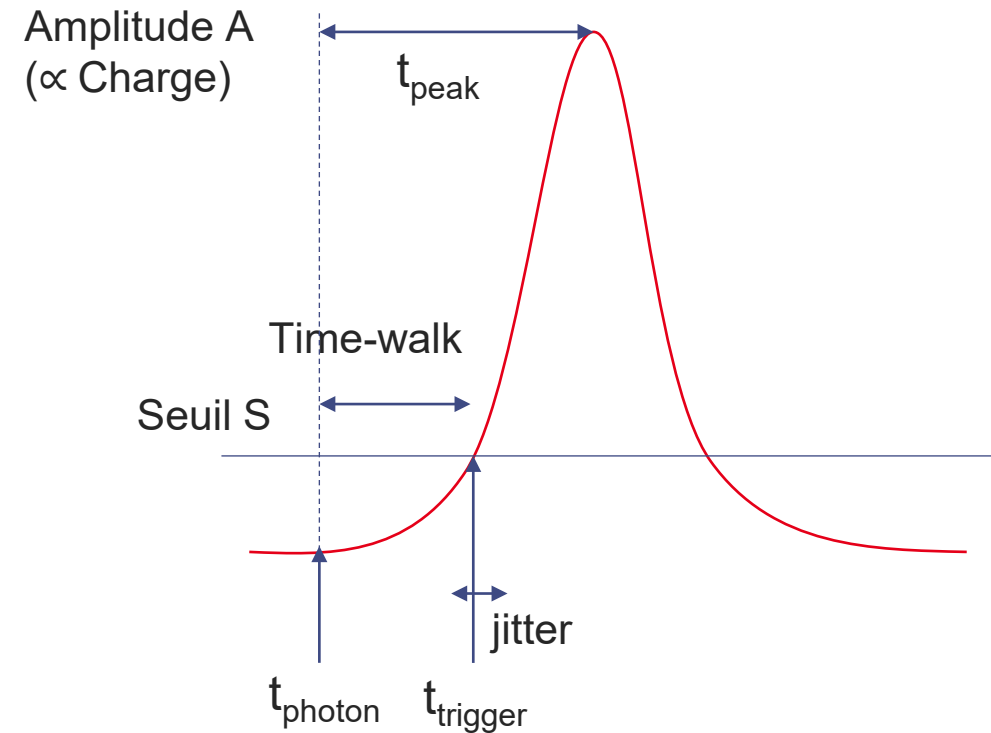
- Lecture permanente d'une matrice de détecteurs
- Mise en forme de la ligne i pendant l'encodage de la ligne $i-1$

Système auto-déclenché

- Seuil bas de détection (+ seuil haut)
- Système de déclenchement (trigger)
- Logique de lecture des voies touchées

Format de sortie des données

- Généralement en série, multiplexeur intégré dans l'ASIC
- Éventuellement en parallèle



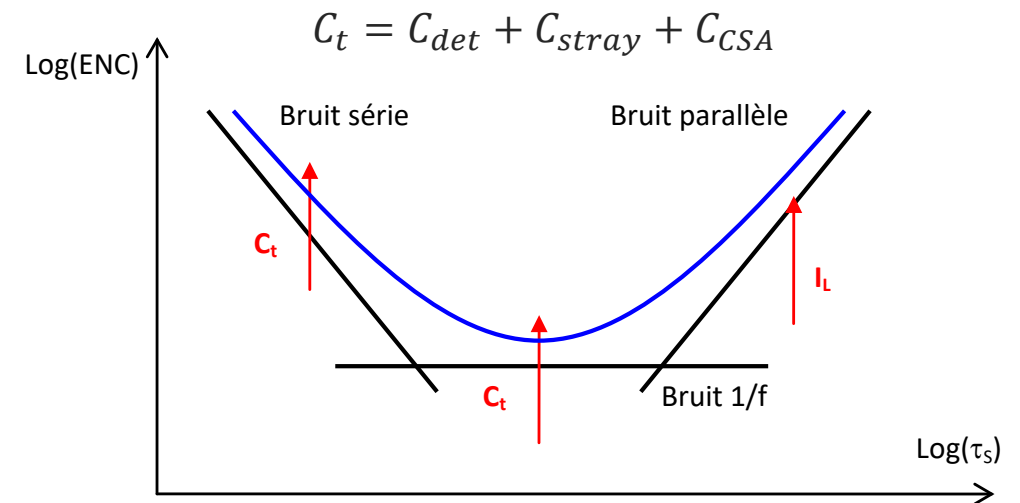
Charge équivalente de bruit

Définition : Le rapport signal sur bruit (SNR : *signal to noise ratio*) est le rapport entre l'amplitude de l'impulsion contenant l'information d'énergie et le bruit quadratique moyen sur ce signal. Dans le domaine de la détection de charges, on exprime généralement le bruit électronique en **charge équivalente de bruit ou ENC** (*equivalent noise charge*) : c'est la charge présentée à l'entrée qui produirait un signal d'amplitude égale à l'écart type du bruit.

$$SNR = \frac{V_0}{\sigma} = \frac{Q}{ENC}$$

Caractéristiques : L'ENC qui résulte du bruit dans l'étage d'entrée dépend *in fine* du temps de filtrage τ de la chaîne.

- Les filtrages courts sont sensibles à la capacité totale à l'entrée du détecteur : détecteur C_{det} , premier étage de l'électronique C_{CSA} et leur interconnexion (C_{stray}).
- Les filtrages longs sont sensibles au courant de fuite du détecteur I_L .



Fonctions numériques embarquées



Les enjeux

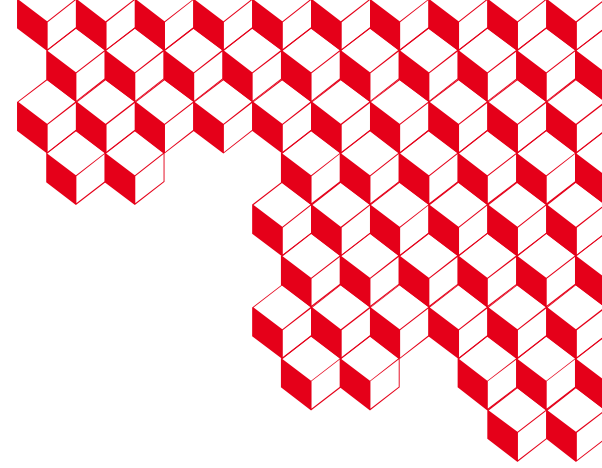
- Réduction des données : limitation de la télémessure spatiale
- Autonomie et prise de décision à bord : réactivité en temps réel

Fonctions de pré-traitement

- Recherche d'événements (nécessaire pour systèmes de lecture matriciel)
- Rejection de particules cosmiques (pas signature du signal ou anticoïncidence temporelle)
- Correction de l'information (reconstruction d'événements, étalonnage...)

Fonctions de traitement

- Construction d'histogrammes (spectres)
- Déconvolution d'images (pour les techniques de modulation)



3.2. Efficacité de détection

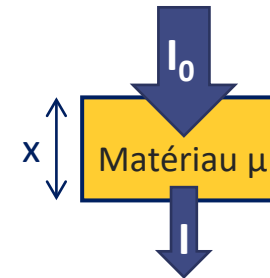
L'efficacité quantique de détection

Efficacité (intrinsèque) totale $\eta_{\text{tot}} = \frac{\text{Nombre d'événements détectés}}{\text{Nombre de quanta incidents}}$

Pour les applications de spectroscopie (mesure de l'énergie), la grandeur la plus pertinente est l'efficacité dans le pic (**peak efficiency**)

$$\eta_P = \frac{\text{Nombre de quanta ayant totalement interagi}}{\text{Nombre de quanta incidents}}$$

L'efficacité dépend du choix du matériau (coefficient d'absorption μ) et du choix de l'épaisseur (x).



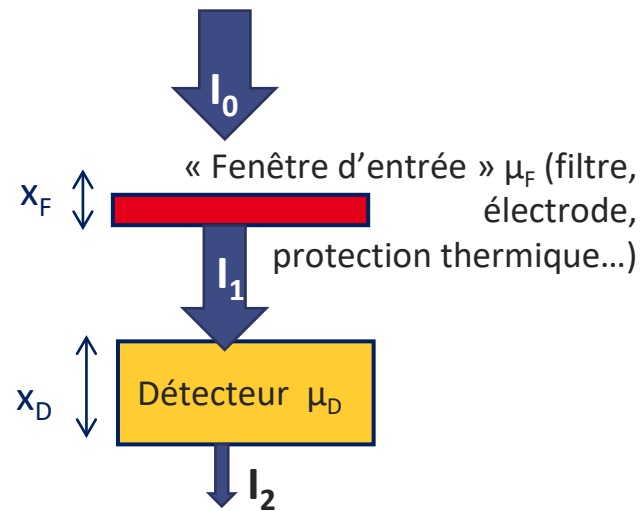
@300 K	Gaz à ionisation	Scintillateurs	Semiconducteurs	
Détecteur	Ar	CsI	Si	CdTe
μ/ρ (cm ² /g)	0,204	2,035	0,183	1,671
η @100 keV pour 1 mm	0,15 %	60 %	4,2 %	62 %

$$\eta = \frac{I_0 - I}{I_0} = 1 - \exp(-\mu x)$$

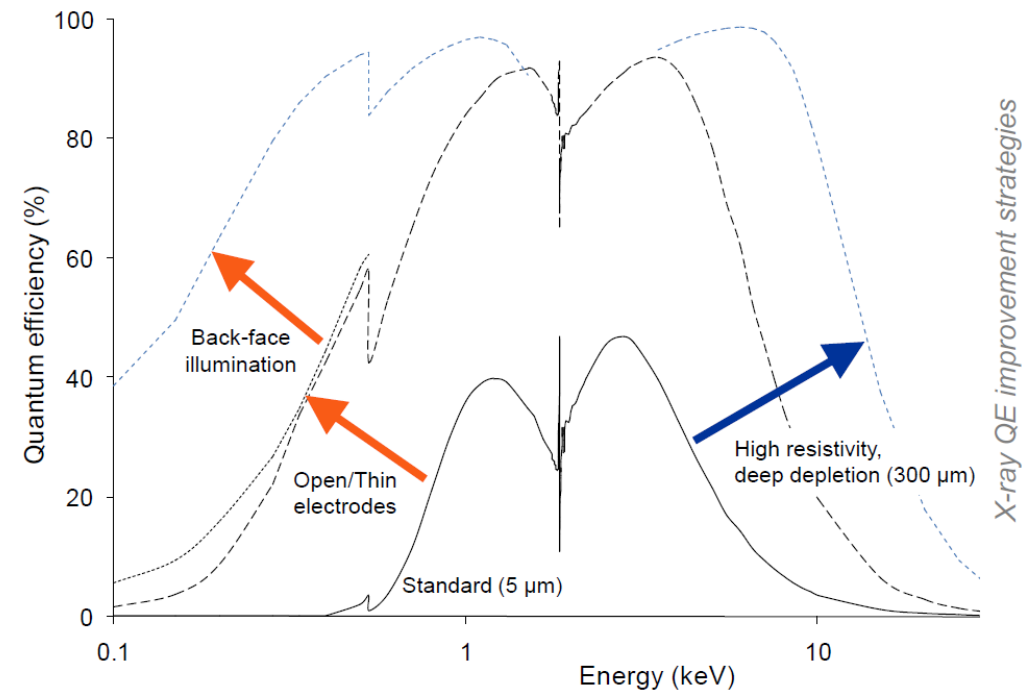
Calcul de l'efficacité quantique

Dans le système de détection, tout matériau entre le ciel et le détecteur réduit l'efficacité quantique.

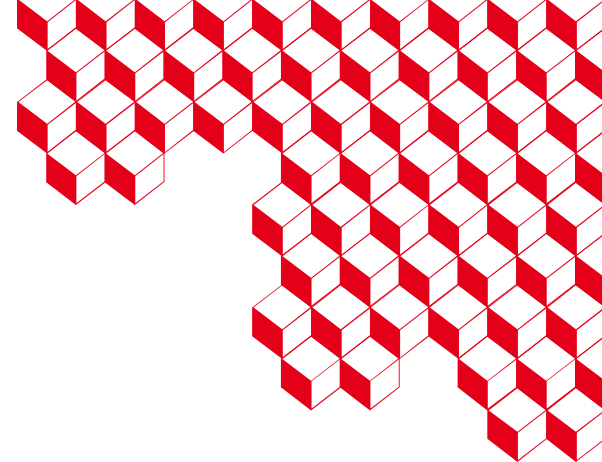
L'épaisseur efficace du détecteur n'est pas nécessairement son épaisseur physique (zone de déplétion dans un semiconducteur).



$$\eta = \frac{I_1 - I_2}{I_0} = e^{-\mu_F x_F} \times (1 - e^{-\mu_D x_D})$$



Exemple : X-ray MOS CCD – Source : Murray, Holland (UK)



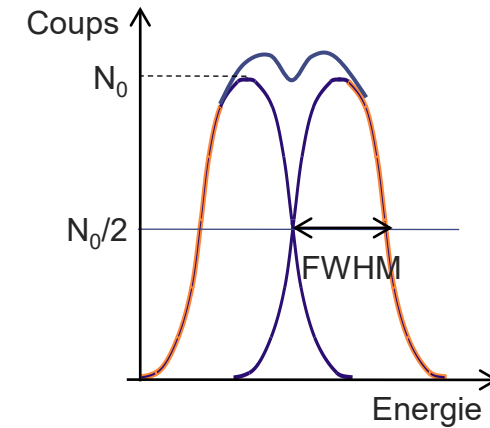
3.3. Réponse spectrale

Résolution spectrale

Résolution spectrale

- Plus petite différence d'énergie mesurable.

- Largeur à mi-hauteur d'une raie *FWHM* : *full width at half maximum*
- Pour une raie gaussienne $FWHM = \Delta E = 2,35 \sigma$



- Dans les détecteurs semiconducteurs, l'imprécision sur la mesure de l'énergie vient :

- De la fluctuation statistique de la création de charges

$$\sigma_{stat} = \sqrt{F \cdot \varepsilon \cdot E_\gamma}$$

F facteur de Fano

ε : énergie de création de paires

- Du bruit électronique, exprimée en charge équivalente de bruit (*ENC equivalent noise charge*)

$$\sigma_{elec} = \varepsilon \cdot ENC$$

- D'une perte de charge dans le détecteur éventuellement (transfert de charges dans les CCD)

- Bilan

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_{stat}^2 + \Delta E_{elec}^2 + \Delta E_{pertes}^2}$$

Remarque : en cas d'événements multiples (sur N pixels = N channels)
 $ENC = \sqrt{N} \cdot ENC_{ch}$

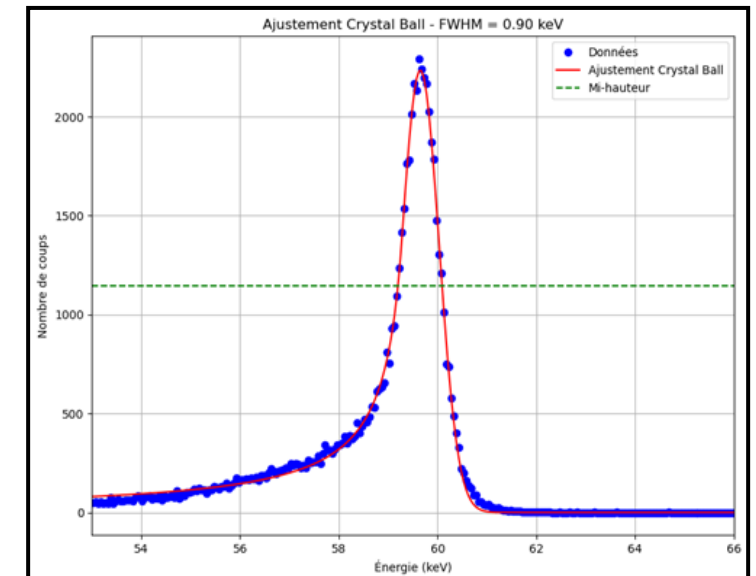
Autres effets du détecteur dans la réponse spectrale

Collection incomplète du signal

Dans les semiconducteurs $\text{Cd}(\text{Zn})\text{Te}$, on distingue 3 types d'effets conduisant à une collection incomplète des charges, en raison des faibles propriétés de transport de porteurs de charges.

- La **perte balistique** (*ballistic effect*) : le temps de filtrage de l'électronique est inférieur au temps total de dérive des charges et donc d'induction du signal.
- La **perte de charge par piégeage** (*charge trapping effect*) : les charges sont piégées au cours de leur dérive.
- La **perte de charge entre les pixels** (*charge loss*) : des défauts dans les lignes de champ provoquent une dérive des charges en dehors des électrodes de collectes.

Dans les semiconducteurs silicium, on peut aussi avoir une collection de charges incomplète en raison du partage de charges et de l'effet de seuillage

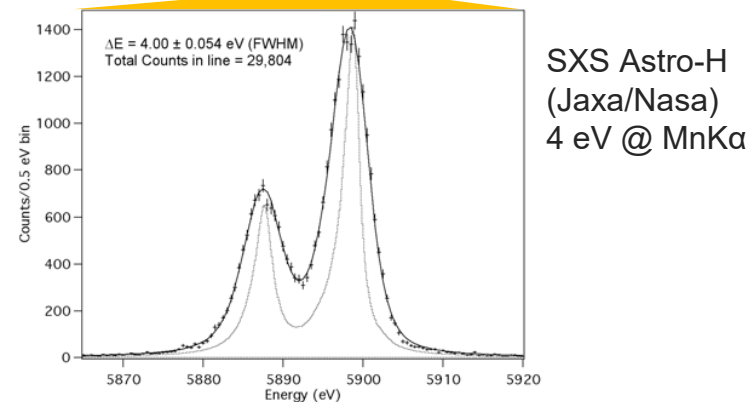
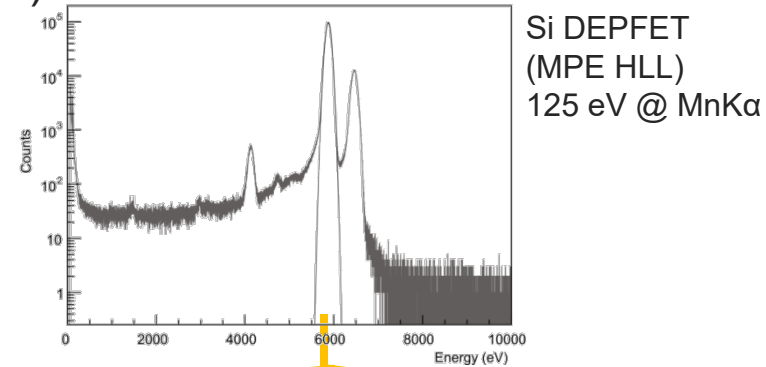


Résolution spectrale : ordre de grandeur

Spectroscopie X

Résolution à 5,9 keV (Mn-K α)

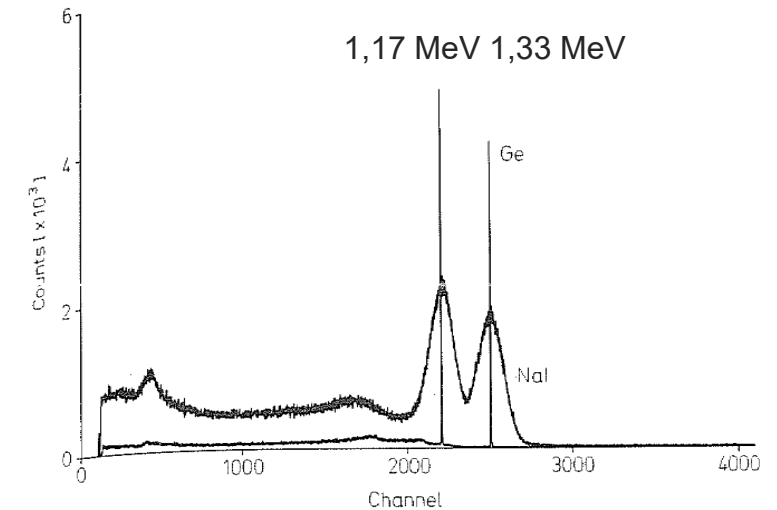
- Gaz : 885 eV (**15 %**)
- Si : **123 eV** (2%)
- TES : **3 eV** (0,05%)



Spectroscopie gamma

Résolution à 1,33 MeV (Co60- γ)

- Ge : 2 keV (0.15 %)
- NaI : > 5 %
- BGO : 10 %



Autre effet de l'électronique sur la réponse spectrale

Seuil bas en énergie

- Que l'électronique soit autodéclenchée ou que les photons soient extraits des images a posteriori, l'énergie du photon doit être située au-dessus du niveau de bruit pour être considéré comme un événement. Typiquement on considère :

$$E_{min} = 5 \sigma_{elec}$$

$$E_{min} = 5 \varepsilon \cdot ENC$$

- Remarque : pour les CCD, l'ENC correspondrait au bruit total en présence de photons pourrait se déduire de la résolution spectrale (en enlevant la contribution de Fano).
- Pour certains systèmes autodéclenchés, le seuil bas est surtout lié à la tension de seuil réglé.

Quid des performances une fois en vol ?

Effets singuliers

Problématique similaire aux accélérateurs de particule : latch-up, single event upsets

Effets cumulatifs

La dose est bien moins forte que dans des accélérateurs de particules.

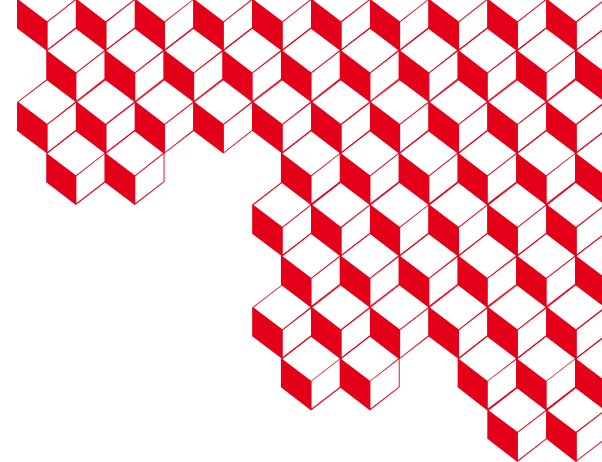
- ❑ Dose ionisante: qq 10 krad (pas 1 Mrad).
- ❑ Dose non ionisante : *displacement damage*
dose dans les réseaux cristallins équivalente à 10^8 à 10^{11} protons de 10 MeV/cm² dans une mission.
 - Courant de fuite → bruit électronique
 - Piégeage de charge → collection incomplète

Effets des
radiations en
accélérateurs

Effets des
radiations
spatiales



Vieillessement depuis 2011



2.3. Réponse spatiale

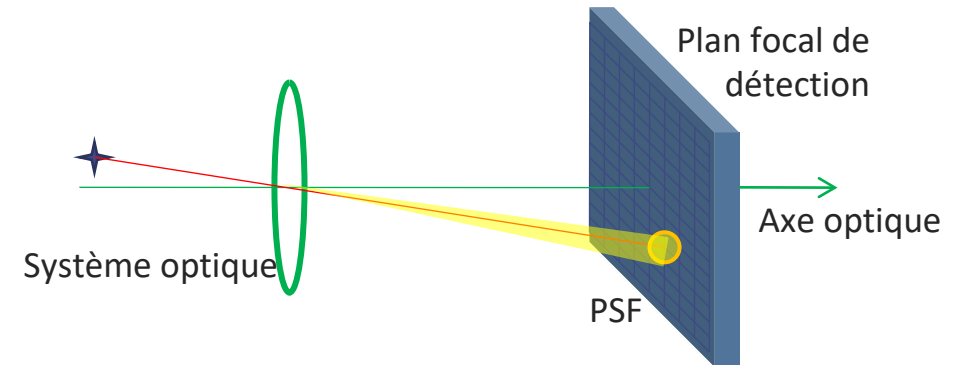
Résolution spatiale

Segmentation, hybridation

Résolution spatiale

- **Plus petite différence mesurable de position** (en 1,2 ou 3 dimensions) d'interaction dans le détecteur.

Doit permettre d'échantillonner la tâche focale (PSF) du système optique pour ne pas dégrader la résolution angulaire du télescope.



- La résolution spatiale est limitée par des contraintes :
 - Physiques : phénomène de diffusion des charges
 - Techniques : procédé de pixellisation, nombre de chaînes de mesure
- La résolution spatiale peut être meilleure que la taille du pixels (voir « effet de sous-pixellisation »)
- Pour un premier dimensionnement, on choisira des pixels trois fois plus petits que la PSF.

Détecteur semiconducteur de position

Détecteur semiconducteur segmenté

- Tout le volume du détecteur est sensible.
- Le signal est induit principalement sur l'électrode la plus proche de l'interaction et du transit.

Dépôt d'électrodes segmentées

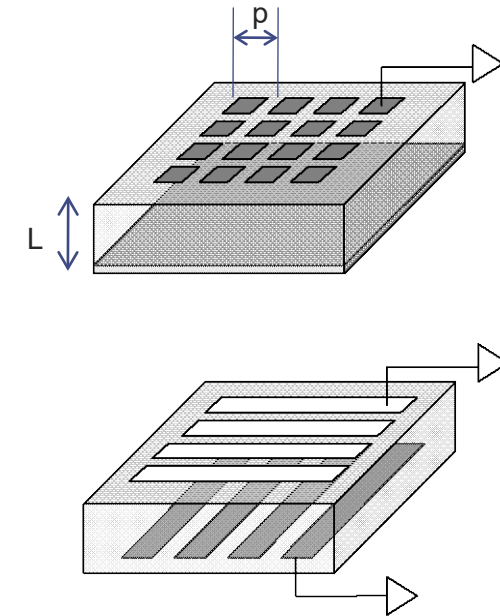
- Procédés chimiques, optiques, mécaniques (photolithographie)

Détecteurs à pixels

- L'induction du signal sur l'électrode est favorisé par l'effet petit pixels.

Double-sided strip detector

- Fine segmentation (10-100 μm)
- Connexion d'un large nombre de voies analogiques sur les bords.



Etat de l'art des technologies

Si :

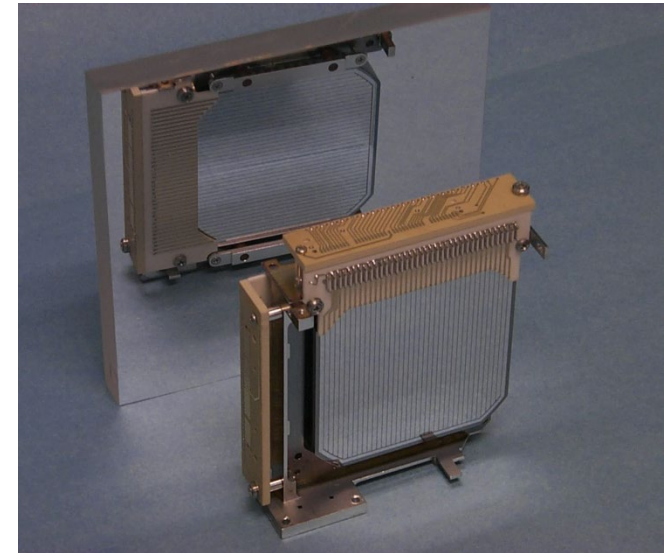
- Epaisseur de 250 à 450 μm , surface jusqu'à 10 cm de côté (8' wafer)
- Pixelisation jusqu'à 15 μm , typ. 50 μm pour les applications d'astronomie X

Cd(Zn)Te :

- Épaisseur de 0,5 à 2 mm en CdTe, 5 mm CZT, surface jusqu'à 2 cm de côté
- Strips $\sim 60 \mu\text{m}$, pixels $\sim 250 \mu\text{m}$

Ge :

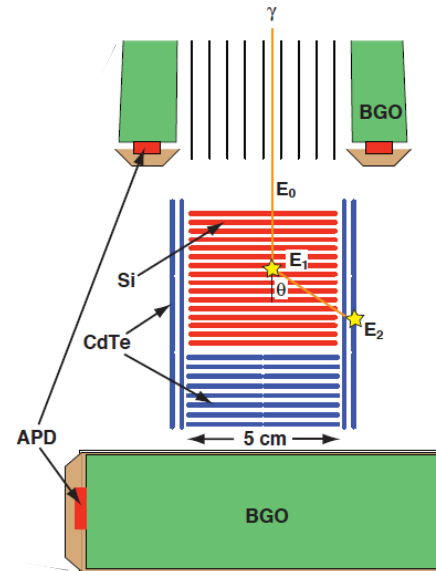
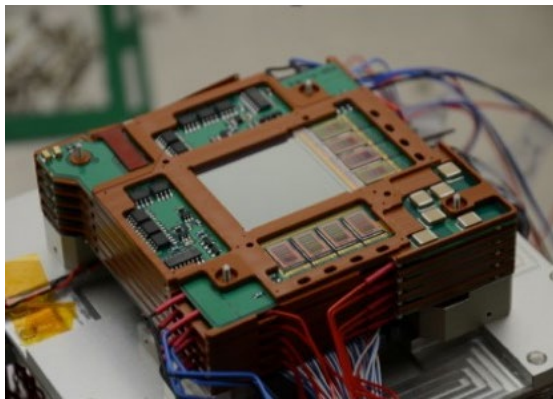
- Epaisseur de 10-15 mm (efficacité gamma)
- Diodes conventionnelles (N-type Li, P-type B) : pas de 2 mm
- Lawrence Berkeley Lab : contact bloquants de Ge amorphe + film métallique : pas de 0,5 mm



Strips ou pixels

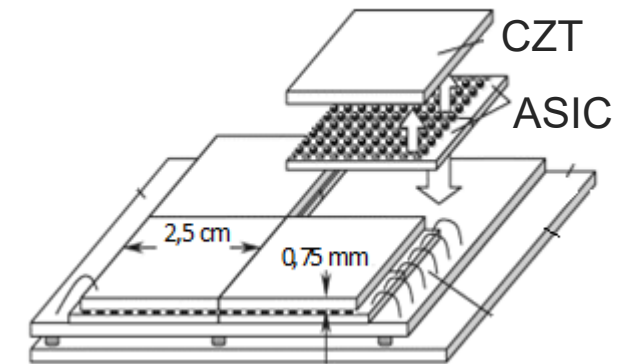
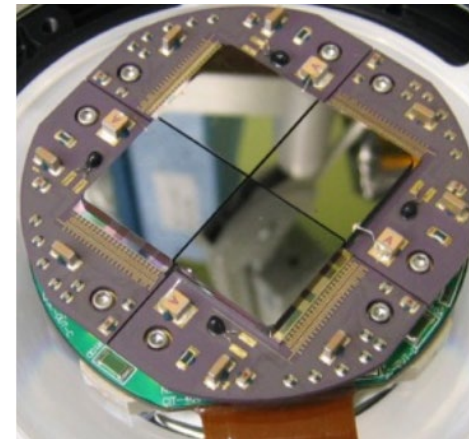
Intérêt des strips

- Segmentation plus fine → meilleure résolution spatiale
- Connexion de l'électronique sur le côté; possibilité d'empiler les couches de détection sans matière morte entre les couches
- Moins de voies de lecture ($2N$ contre N^2), moins complexe, moins de puissance



Intérêt des pixels

- Moins d'ambiguïté sur la position d'interaction, capacité de comptage plus élevée
- Electrode de plus faible surface : moins de courant, moins de capacité → moins de bruit électronique → meilleure résolution spectrale
- Difficulté d'hybridation (connexion des pixels)



Induction dans un détecteur pixelisé

Principes (à partir du théorème de Shockley-Ramo)

- Tout le volume du détecteur est sensible.
- Le signal est induit principalement sur l'électrode la plus proche de l'interaction et du transit.
- Une partie du signal est induite sur les pixels voisins : on parle de **partage de charges**. La fraction dépend du rapport entre la taille du nuage de charges après diffusion et la taille du pixel.
- La fraction d'**événements multiples** résultante dépend aussi de la façon d'extraire les petits signaux (seuil bas de détection).

Taille du nuage de charges

- La concentration dans le nuage de charge peut être approximé avec une gaussienne 2D de variance :
$$\sigma^2 = 2 \cdot D \cdot t$$
- D coefficient de diffusion (relation d'Einstein), t : durée de diffusion (temps depuis l'interaction)

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n; D_p = \frac{kT}{q} \mu_p$$

Effet du partage de charges



Intérêt du partage de charge pour l'imagerie

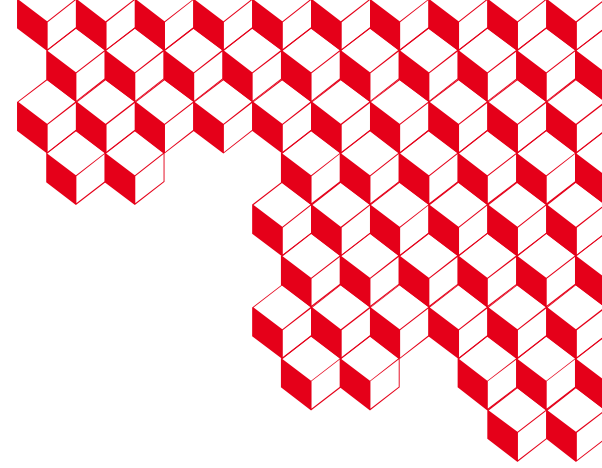
- Par un traitement de données de type barycentre, la position du photon peut être retrouvée à mieux que la taille du pixel → effet de **sous-pixelisation**

Inconvénient du partage de charge pour la spectroscopie

- La mesure de l'énergie totale du photon est effectuée par plusieurs chaînes électroniques qui ajoutent chacune un bruit de mesure (voir partie 2.5).

Conclusions

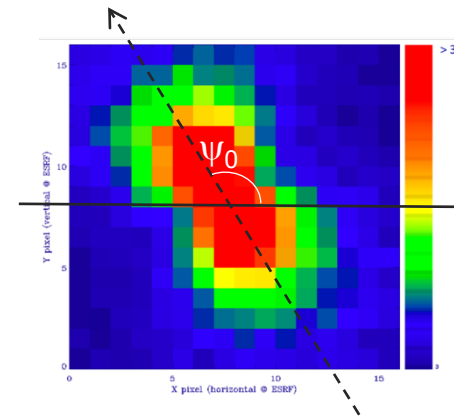
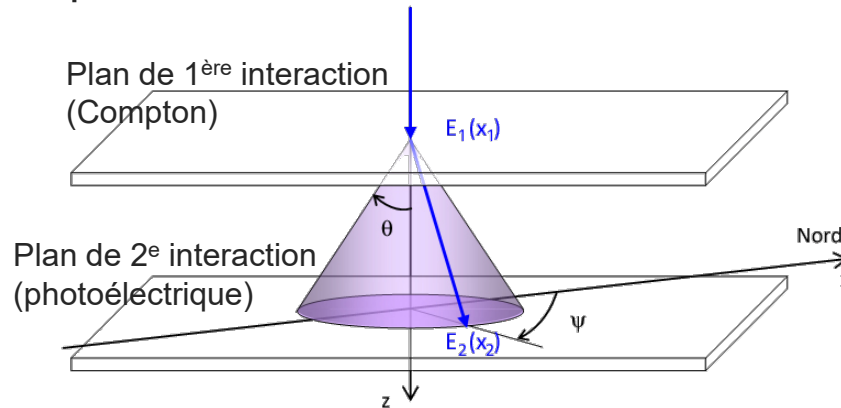
- La taille du pixel pour un spectro-imageur est donc à optimiser à partir d'un modèle de partage de charge (simulations, mesure).



2.4. Capacité en polarimétrie

Mesure de la polarisation par effet Compton

- **Dispositif** : 2 plans de détection, ou même un plan unique qui détecte les diffusions à 90° (moins efficace mais plus précis).
- **Méthode** : Détection d'événements doubles correspondant à une diffusion Compton suivi d'un effet photoélectrique

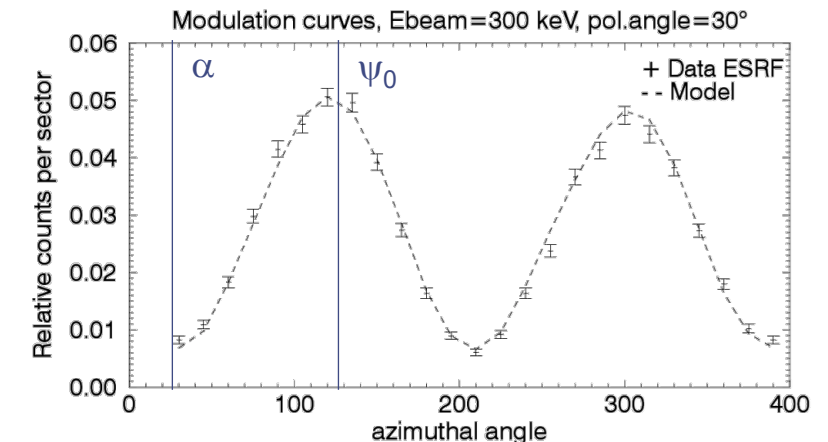


Carte de coups dans le plan pour un faisceau polarisé avec un angle de 30° frappant le centre du détecteur

- **Résultat** : Si l'onde est 100 % polarisée linéairement d'angle α , la distribution des valeurs d'angle azimutal n'est pas uniforme :

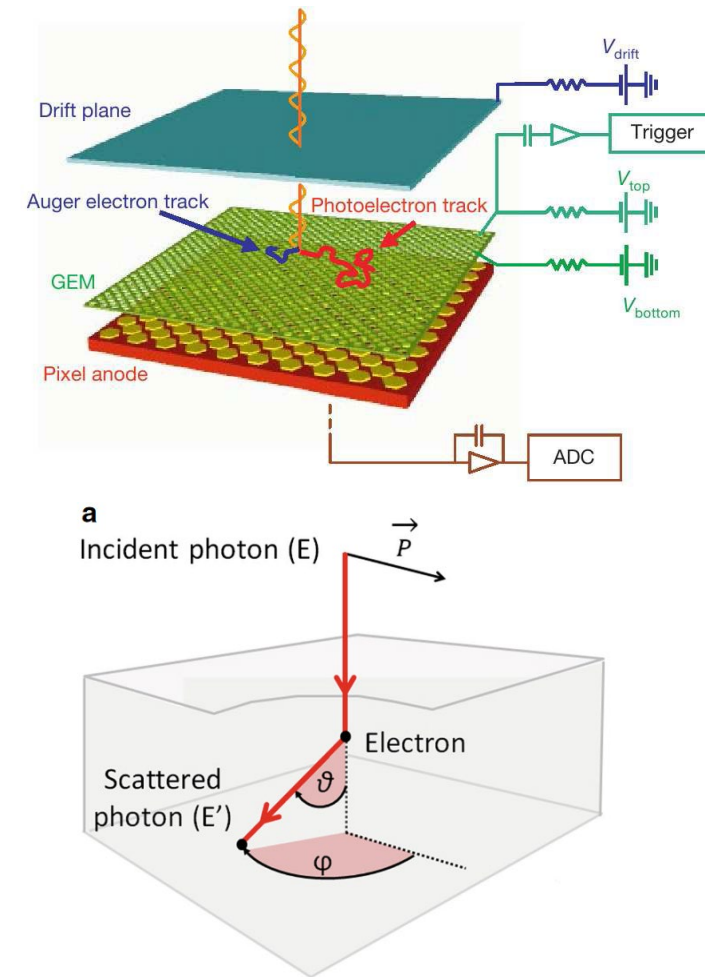
$$N(\psi) = S(1 + \mu_{100} \cos(2\psi - 2\psi_0))$$

$$\text{avec } \psi_0 = \alpha + \frac{\pi}{2}$$



Polarimétrie dans toute la bande 1-1000 keV

- Dans la bande X mou ($E < 10$ keV), l'effet photoélectrique peut être exploité dans les détecteurs à gaz équipés de GEM (gas electron multiplier) et d'anodes pixelisées. La distribution des directions azimutales d'éjection du photoélectron est modulée avec une phase liée à l'angle de polarisation de l'onde. [Première démonstration en vol: IXPE \(2021\)](#).
- Dans la bande X et X dur ($10 < E < 1000$ keV), la diffusion Compton peut être exploitée dans des détecteurs semi-conducteurs résolus spatialement selon deux ou trois dimensions. La distribution des angles azimutaux des photons diffusés est modulée avec une phase liée à l'angle de polarisation de l'onde. [Démonstrations en vol : XMM-Newton, INTEGRAL, AstroSat...](#)
- Au-delà de 1 MeV, l'effet de paire peut être exploité dans des systèmes de détection équipés de détecteurs de traces et de calorimètres. Les deux directions d'éjection du photoélectron et du positron définissent un plan et la distribution des directions azimutales d'éjection du photoélectron est modulée avec une phase liée à l'angle de polarisation de l'onde.

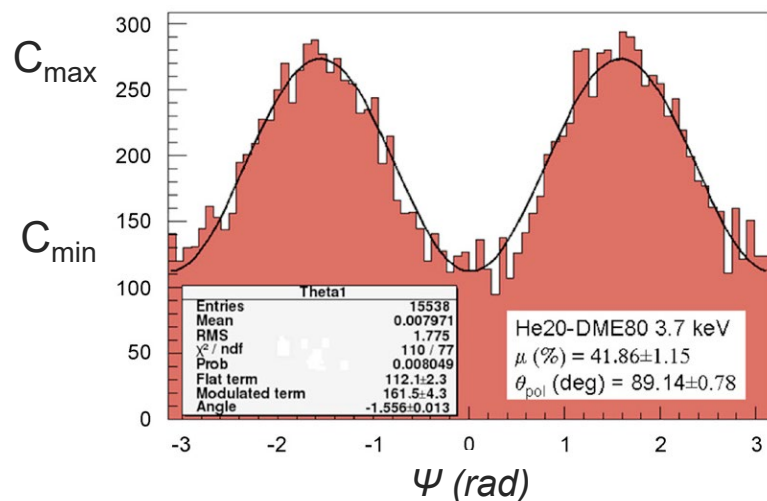
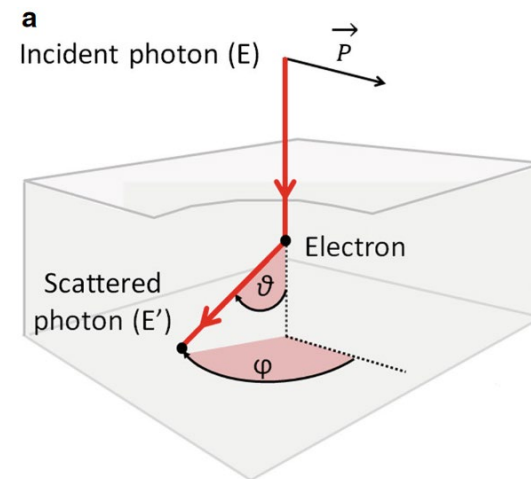


Caractérisation du détecteur

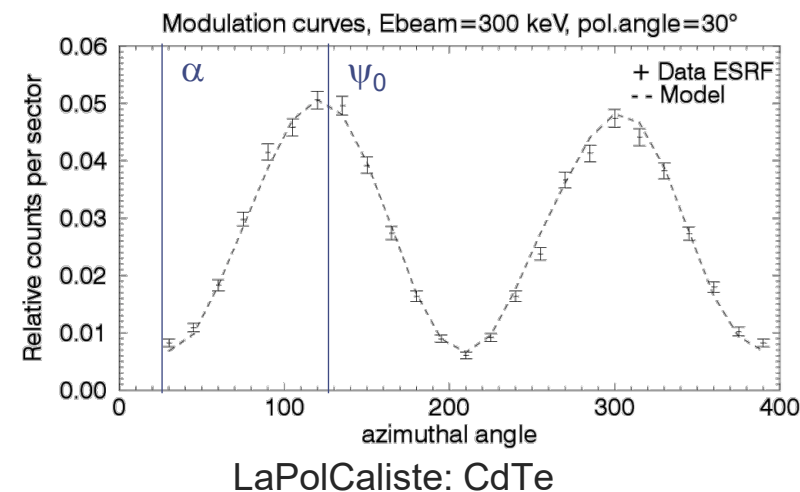
- Rappel : pour une onde 100 % polarisée linéairement d'angle α , la distribution des valeurs d'angle azimutal n'est pas uniforme :

$$N(\psi) = S(1 + \mu_{100} \cos(2\psi - 2\psi_0)) \text{ avec } \psi_0 = \alpha + \frac{\pi}{2}$$

- μ_{100} est le **facteur de modulation**. C'est une caractéristique du détecteur qui peut se mesurer en faisceau synchrotron.



$$\mu = \frac{C_{\text{max}} - C_{\text{min}}}{C_{\text{max}} + C_{\text{min}}}$$



Performance de l'instrument

Paramètres important pour l'astronome

Polarisation détectable minimale ou MDP

- Plus faible fraction de polarisation produisant une modulation supérieure à l'erreur statistique avec un niveau de confiance de 99 %
- S et B taux de comptage de la source et du fond, T temps d'observation

$$MDP = \frac{4.29}{\mu S} \times \sqrt{\frac{S + B}{T}}$$

+ Efficacité de détection Compton

Type de détecteur	Gaz à ionisation He-DME	Scintillateur NaI	POLCAListe
Expérience	XPOL (Bellazini)	POLAR	POLCA (Da Silva)
Gamme d'énergie	2-10 keV	50-250 keV	100-400 keV
Facteur modulation	0,4 à 4 keV	0,4 à 150 keV	0,78 à 300 keV
MDP	1%, 100 ks		35 % ?

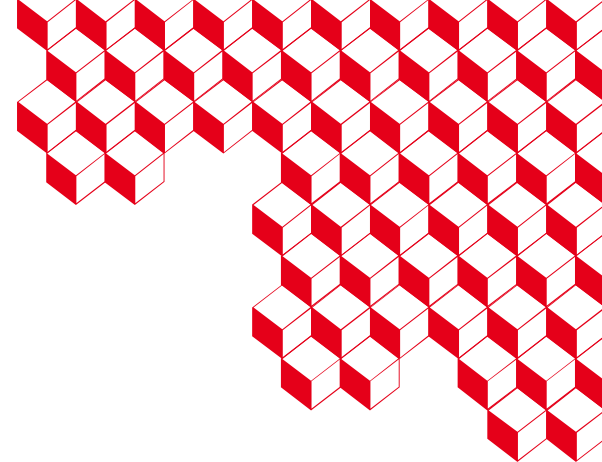
Antier, S. et al, "Hard X-ray polarimetry with Caliste, a high performance CdTe based imaging spectrometer". Experimental Astronomy (2015). 10.1007/s10686-015-9442-5



4. Evolution des technologies et préparation du futur

Exemple des spectro-imageurs en silicium

Projets de l'ESA



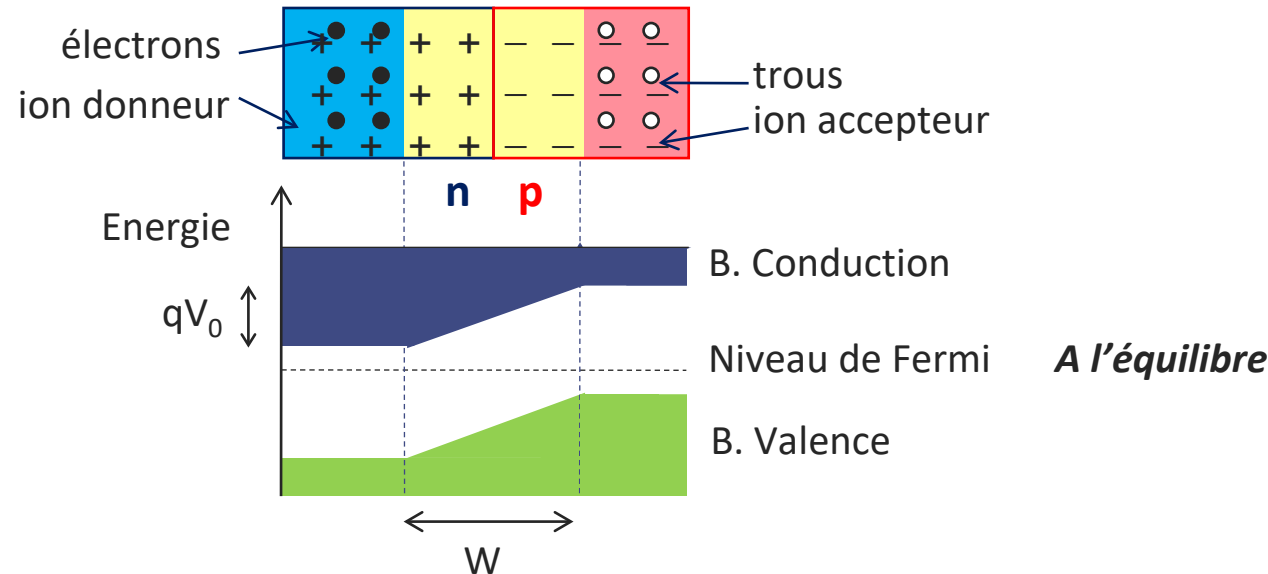
4.1. Spectro-imageurs en silicium pour l'astrophysique X

Approche historique et évolution des technologies

Rappel de la jonction pn

Principes

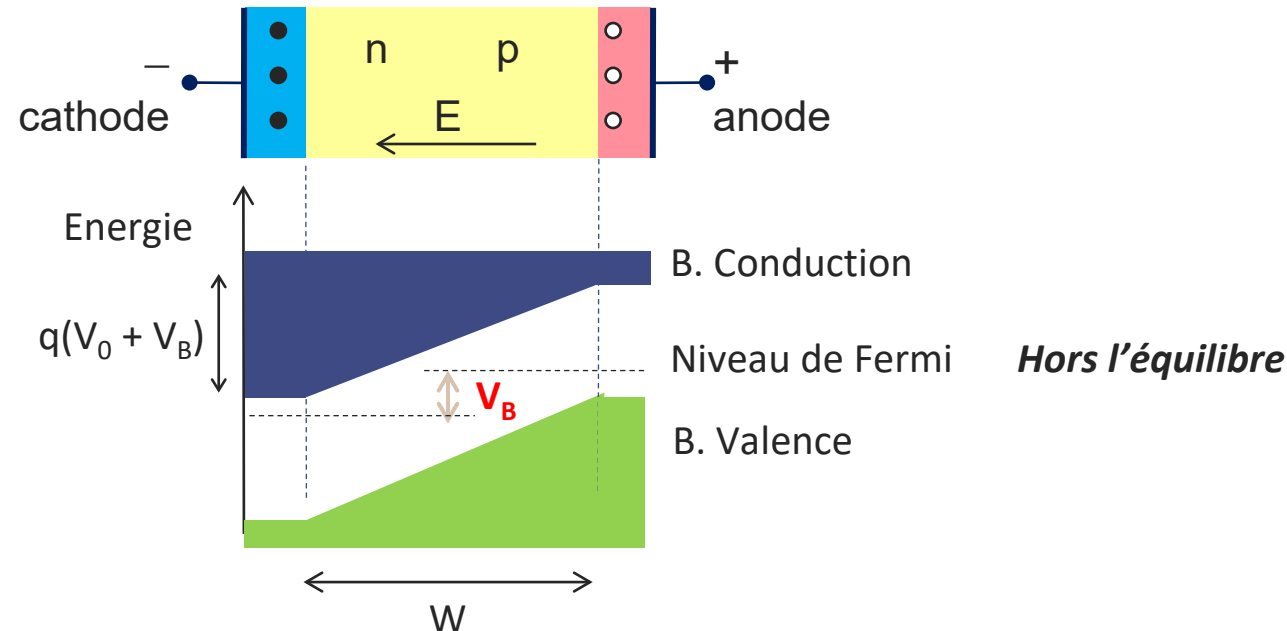
- Mise en contact d'un semiconducteur dopé p et d'un semiconducteur dopé n
- Diffusion et recombinaison des porteurs de charges majoritaires
- Interface vide de porteurs libres (non neutre) : zone de déplétion = zone charge d'espace
- **Présence d'un champ électrique : zone sensible à la détection des radiations**



Rappel de la jonction pn

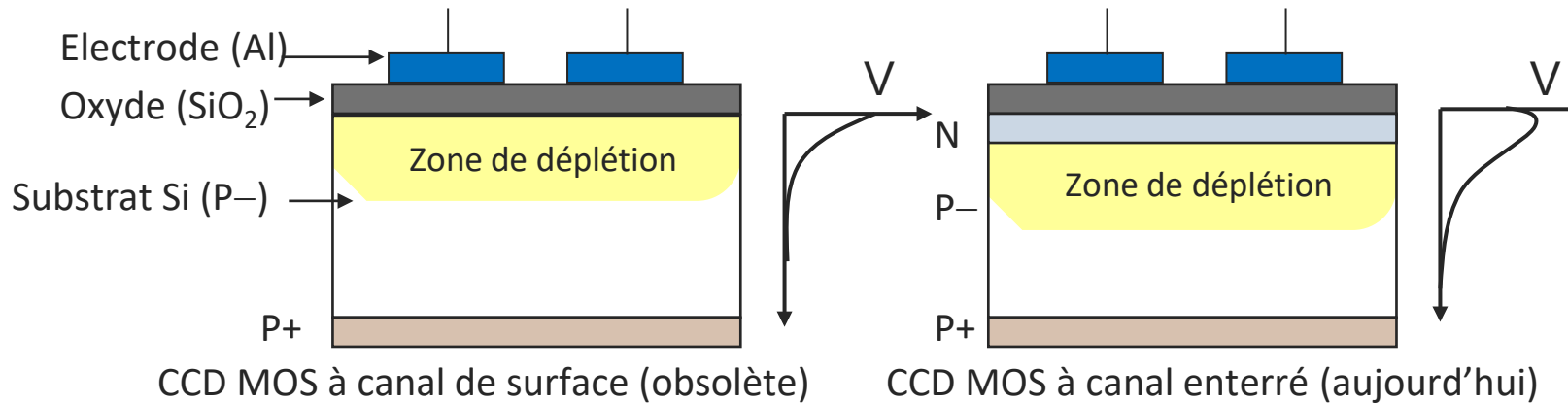
Principes

- Mise en contact d'un semiconducteur dopé p et d'un semiconducteur dopé n
- Diffusion et recombinaison des porteurs de charges majoritaires
- Interface vide de porteurs libres (non neutre) : zone de déplétion = zone charge d'espace
- Présence d'un champ électrique : zone sensible à la détection des radiations
- **Application d'une tension V_B pour augmenter la largeur de déplétion**



Charge coupled device (CCD) : détection

Structure dérivée d'une structure MOS (métal-oxyde-semiconducteur) classique en divisant l'électrode métallique en bandes (strips).



Mesure en 4 étapes

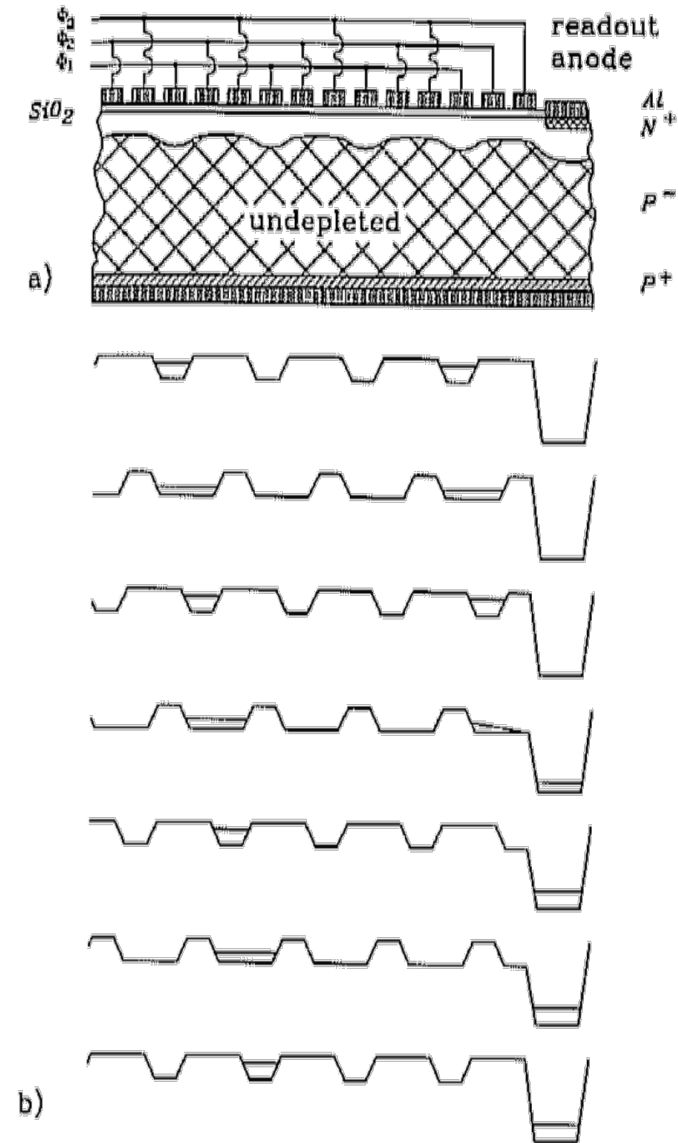
1. **Détection** des photons incidents par effet photoélectrique
 - Zone de déplétion < 50 μm
 - Collection possible par diffusion depuis la région non déplétée (efficacité faible)
2. **Accumulation** des charges dans la capacité MOS
 - Ajout d'une couche n pour s'éloigner des défauts de surface

Charge coupled device (CCD) : transfert

3. **Transfert** des charges de proche en proche vers l'électronique frontale placée sur le substrat
 - Par pixel : Une électrode de collecte, et deux de barrière
 - Bandes p perpendiculaires aux électrodes pour éviter la diffusion des charges dans le plan (*channel stops*)
4. **Lecture** de l'information par l'électronique externe

Remarque : Si le CDD est sous irradiation, les défauts cristallins diminuent le temps de vie des porteurs de charge (piégeage) → risque de perte de charge au cours du transfert.

Efficacité de transfert de charge (CTE) = fraction de perte de charge par transfert (sans unité)

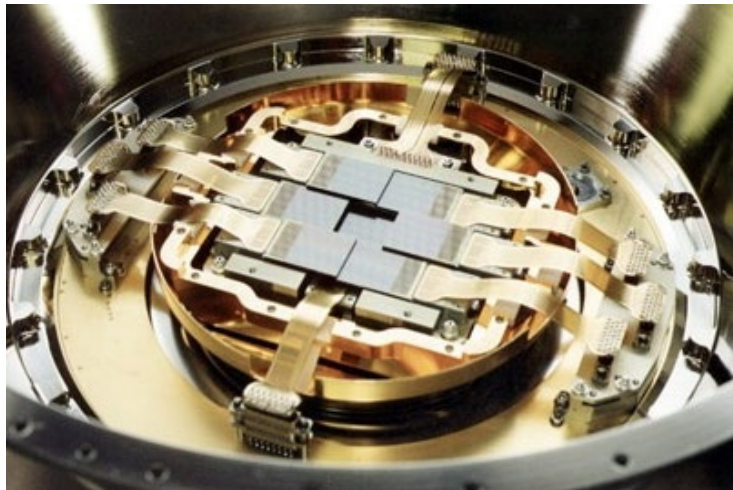


Les MOS-CCD X dans l'espace

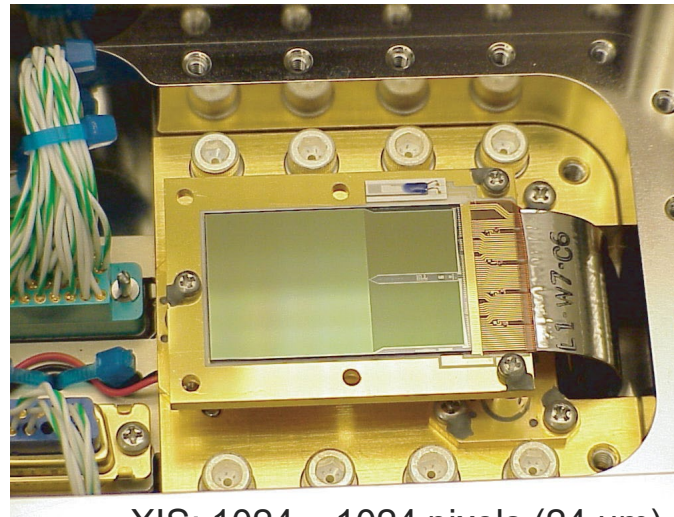
- ASCA (ASTRO-D), JAXA 1993, CCD du MIT
- Chandra ACIS, NASA 1999, CCD du MIT
- XMM-Newton EPIC-MOS, ESA 1999, CCD e2V (UK)
- Suzaku (ASTRO-E), JAXA 2005, CCD d'Osaka University, Kyoto University, MIT
- Hitomi (ASTRO-H) XIS, JAXA 2016, CCD d'Osaka University, Kyoto University

Améliorations

- Illumination face arrière
- Augmentation de la zone sensible



EPIC-MOS 7 détecteurs de $2,5 \times 2,5 \text{ cm}^2$



XIS: 1024×1024 pixels ($24 \mu\text{m}$)



Cas-A par Chandra

Invention de la structure à double diode

Invention de E. Gatti et P. Rehak (1984): sideways depletion

De la diode classique à la structure de double diode

- Diode, contacts sur les 2 faces du substrat

↓ équivalent

- Diode, anode et cathode sur une seule face

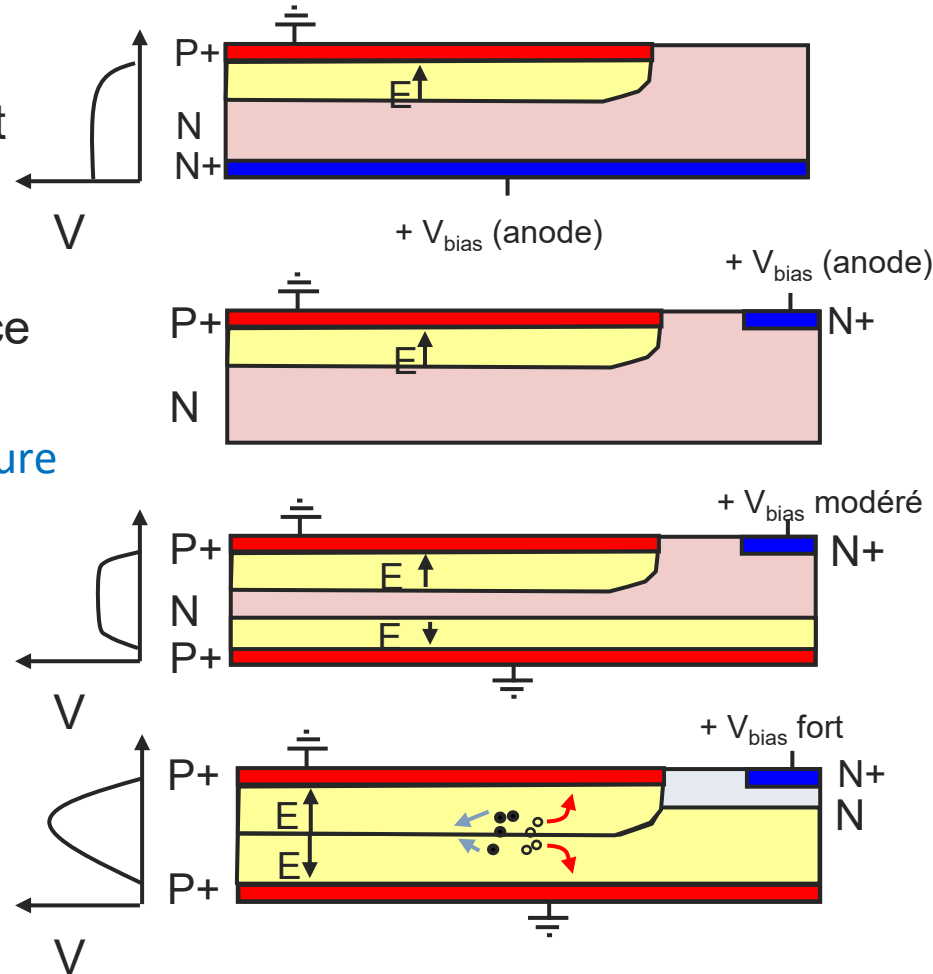
↓ ajout d'une structure

- Double diode partiellement déplétée

↓ polarisation

- Double diode entièrement déplétée

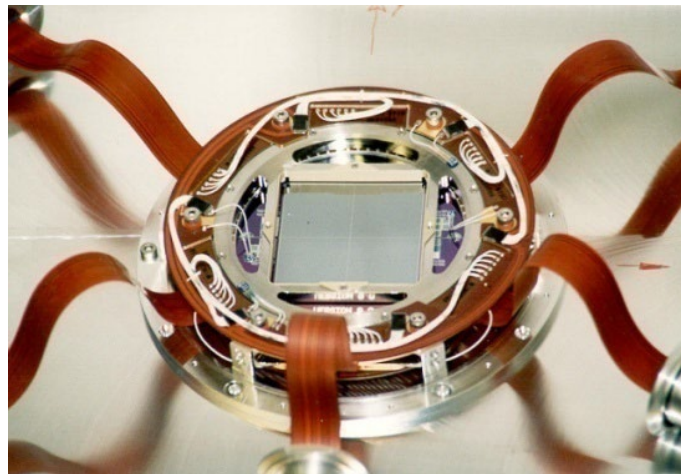
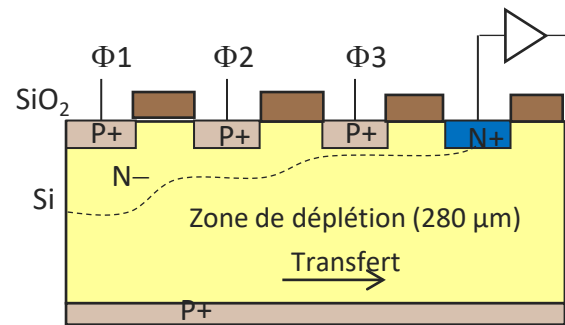
Détecteur sensible tout le volume !



L'arrivée des pn-CCD

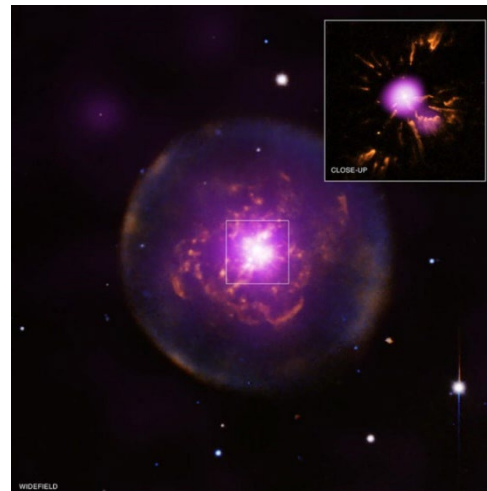
Caméras EPIC de XMM-Newton (1999)

déplétion complète sur 280 μm
→ efficacité de 90 % à 10 keV



détecteur monolithique de $6 \times 6 \text{ cm}^2$

Nébuleuse planétaire

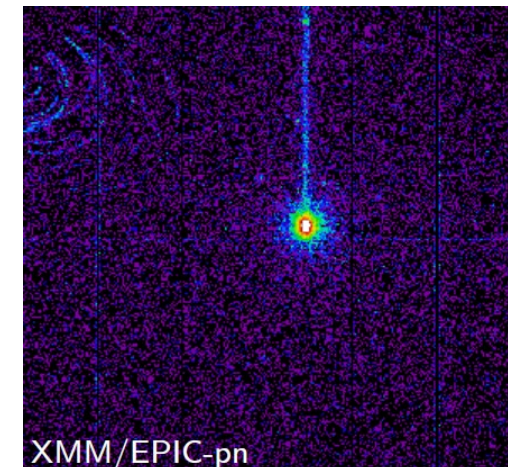


Nouveau défi

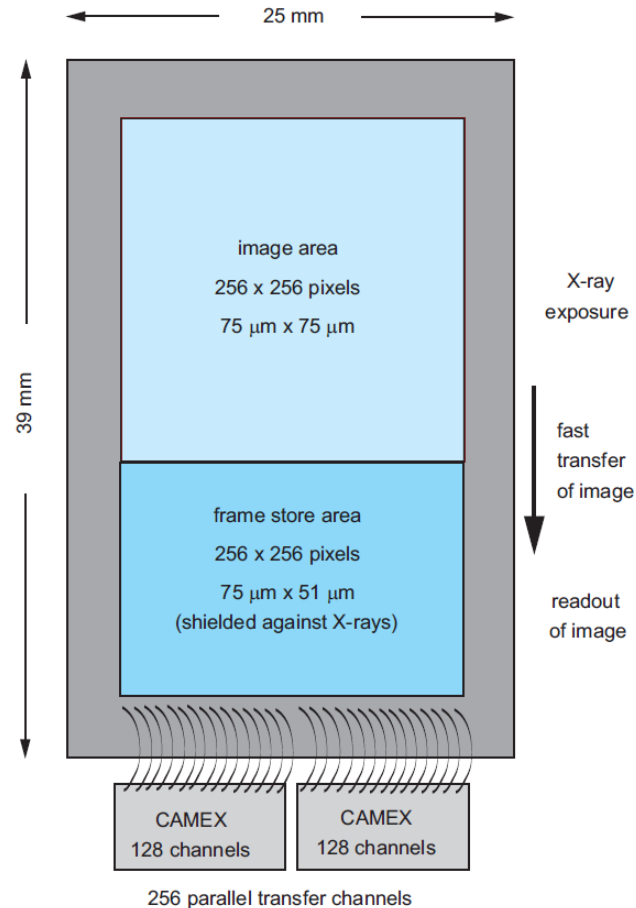
Temps de lecture $\sim 10 \mu\text{s}$ / ligne donc quelques ms pour une matrice

Des photons arrivant pendant le transfert (out-of-time events) sont mal positionnés sur l'image

$$\text{Probabilité} : \frac{\text{temps_lecture}}{\text{temps_intégration}} \cong 1-10 \%$$



pn-CCD avec transfert de charge



- Les charges sont transférées très rapidement ($\sim 100 \mu\text{s}$) dans une zone de stockage protégée des photons X.
- La zone de stockage est lue comme un CCD classique
- Probabilité : $\frac{\text{temps_transfert}}{\text{temps_intégration}} \cong 0,1 \%$

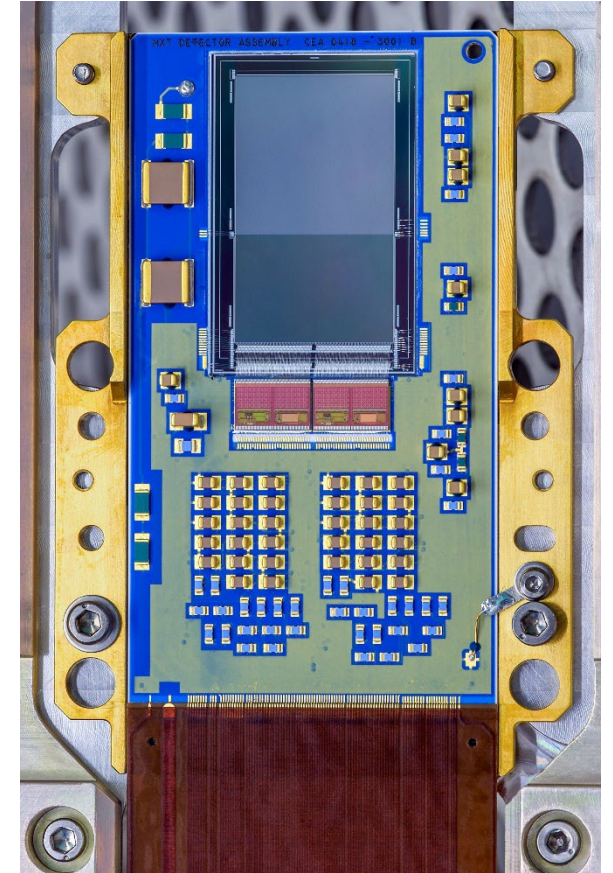
Applications

eROSITA à bord de SRG (2016)

FXT à bord d'Einstein Probe (2024)

MXT à bord de SVOM (2024)

Nouveau défi: dégradation du CTE avec les radiations !



Imageurs sans transfert de charge

Active pixel sensors : le détecteur intègre l'élément sensible et le premier étage d'électronique. Le signal est mesuré sur place. Deux technologies majeures pour l'astrophysique X :

- Le **Depleted p-channel field effect transistor (DePFET)** qui inclut partie sensible et premier étage dans une couche de silicium unique avec des procédés de fabrication double face.
 - Premier DePFET dans l'espace : BepiColumbo/MIXS (2018).
- Le **CMOS scientifique (s-CMOS)** qui est généralement en configuration hybride (une partie sensible aux rayons X et la partie circuit connectés ensemble) et qui est basé sur des structures de photodiodes élémentaires.
 - Premier CMOS X dans l'espace: Einstein Probe/WXT (2024).

CMOS: Préparation de THESEUS/SXI

“Fully Depleted Pinned Photodiode CMOS Image Sensor With Reverse Substrate Bias” = Détecteur CMOS monolithique.

Production e2V (UK)

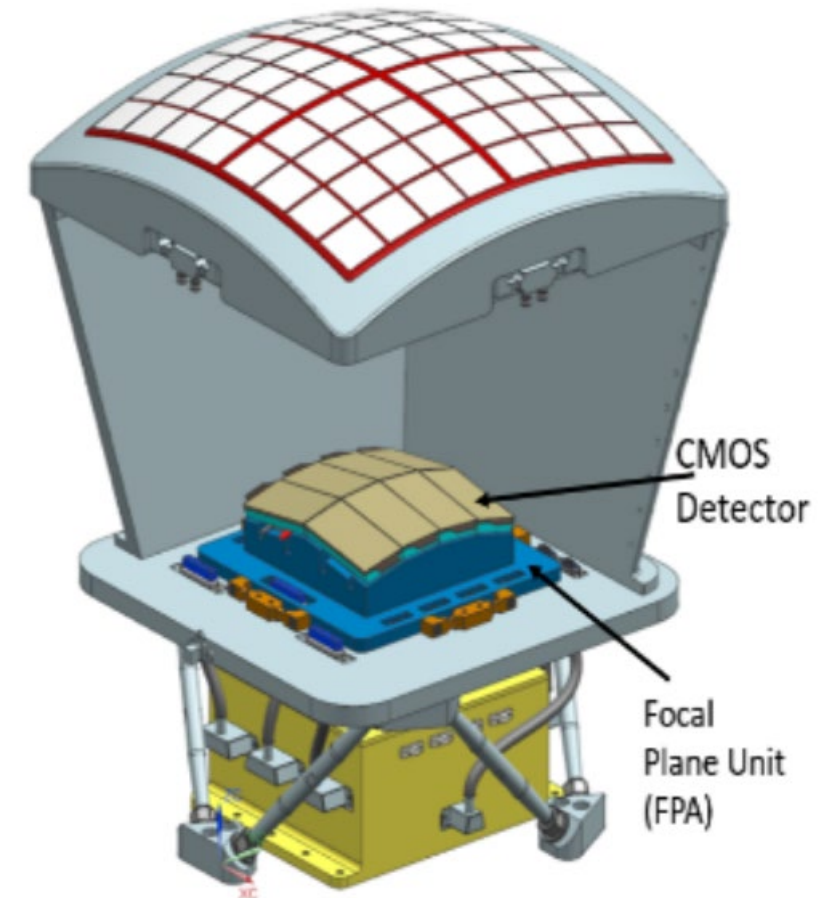
STEFANOV et al. IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 38, NO. 1, JANUARY 2017

Les besoins de la mission

- Matrice de 2000 x 1000 pixels,
- Pixels de 40 μm
- Température de fonctionnement -30°C (orbite basse)

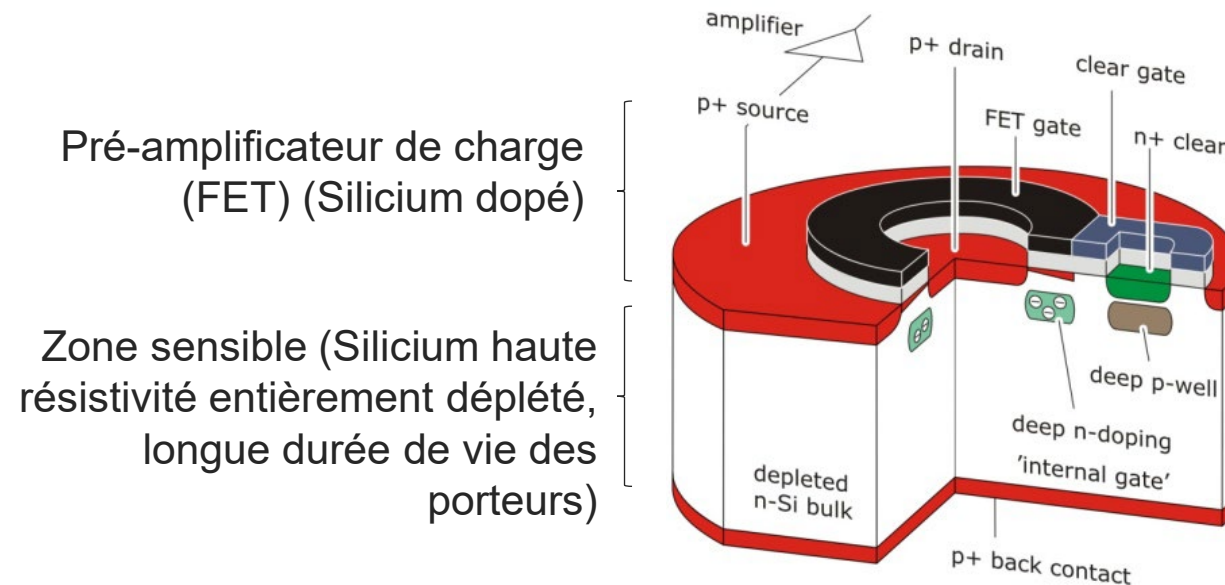
Les défis techniques

- Augmenter la taille de la zone de déplétion ($> 35 \mu\text{m}$)
- Augmenter la taille des pixels pour limiter le partage de charges et améliorer la résolution en énergie
- Réduire le bruit de lecture $\text{ENC} < 5$ électrons rms.



DePFET : structure d'un pixel

- Substrats et standards de fabrication a priori incompatibles.
- Fabrication au laboratoire de semi-conducteurs de la société Max-Planck (Allemagne).

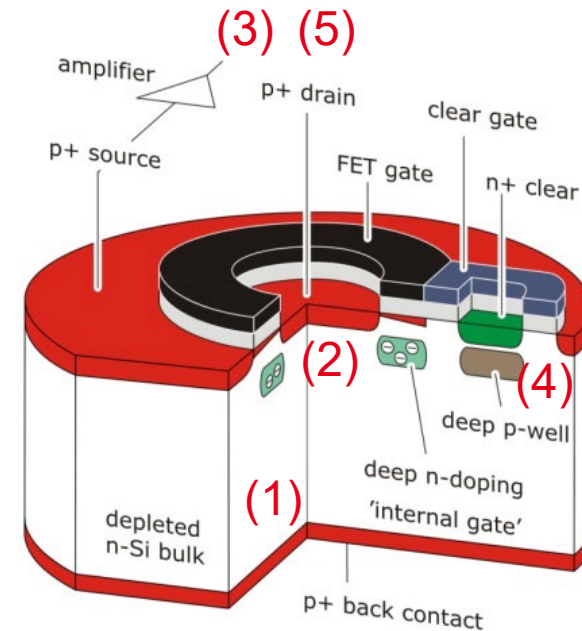
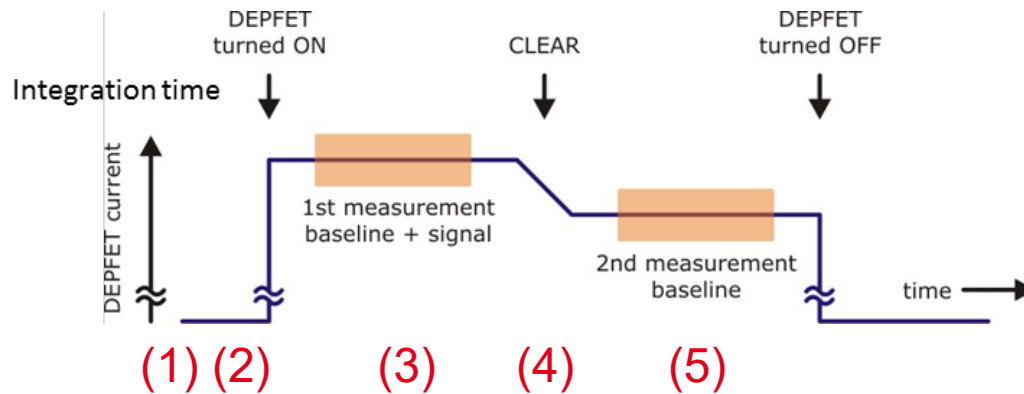


DePFET : lecture dans le pixel

Principe de lecture

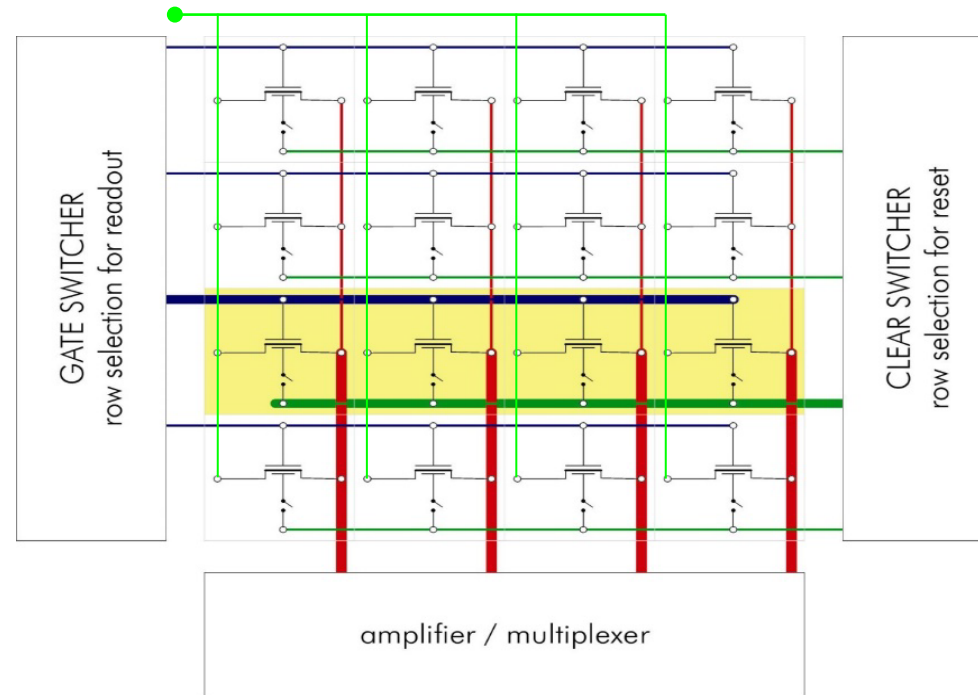
1. Interaction du photon par la face arrière
2. Dérive des électrons dans la grille interne (sous le pixel), accumulation de la charge
3. Allumage du transistor et lecture du courant avec la grille pleine
4. Evacuation de la charge en activant l'électrode clear
5. Allumage du transistor et lecture du courant avec la grille vide

La différence de courant est proportionnelle à la charge collectée.



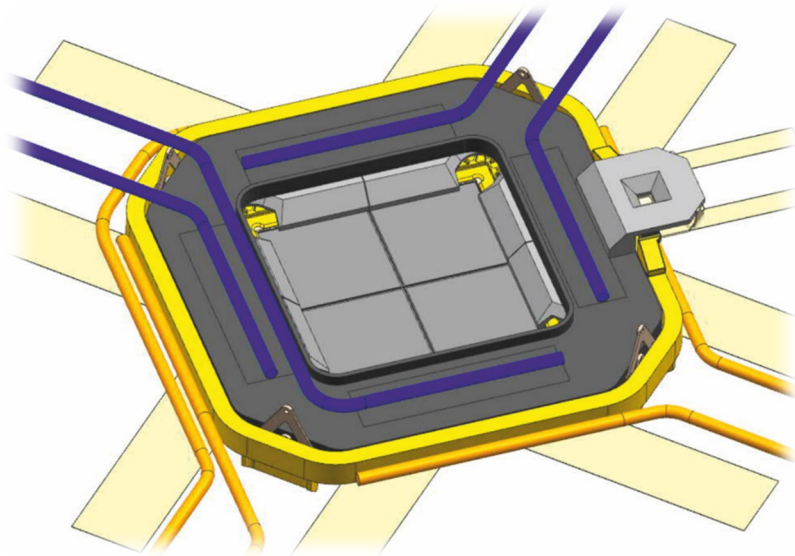
DePFET : lecture d'une matrice

- Les transistors sont allumés ligne par ligne par un ASIC de sélection.
- Les colonnes sont lues en parallèle avec un ASIC de lecture



- Lecture rapide de grande matrices
- Plus tolérant aux radiations
- Pixel allumé seulement pendant la lecture (gain de puissance)
- Faible capacité d'entrée (haute performance specoscopique)

Préparation d'ATHENA/Wide Field Imager



2 Silicon X-ray spectrometers

- based on DePFET
- $130\ \mu\text{m}$ Pixel
- $450\ \mu\text{m}$ thick sensor
- thin entrance window

<https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.01079>

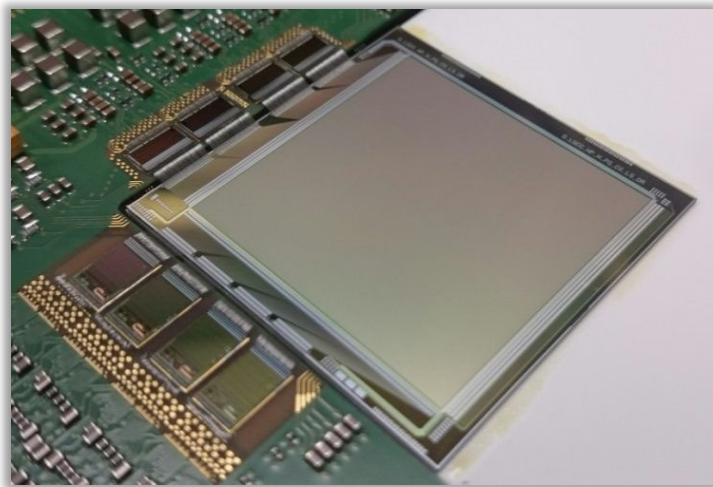
<https://doi.org/10.1117/12.2560507>

Large Detector

- 1 Mpixel ($4 \times 512 \times 512$)
- FoV of 40°
- 5 ms frame time

High Count Rate Detector

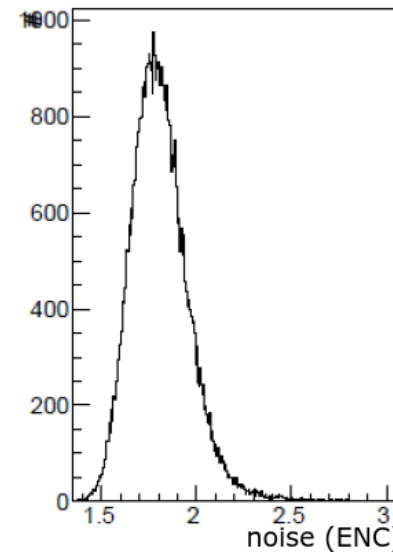
- 64×64 pixels
- defocussed
- $80\ \mu\text{s}$ frametime



9.8 μs per row

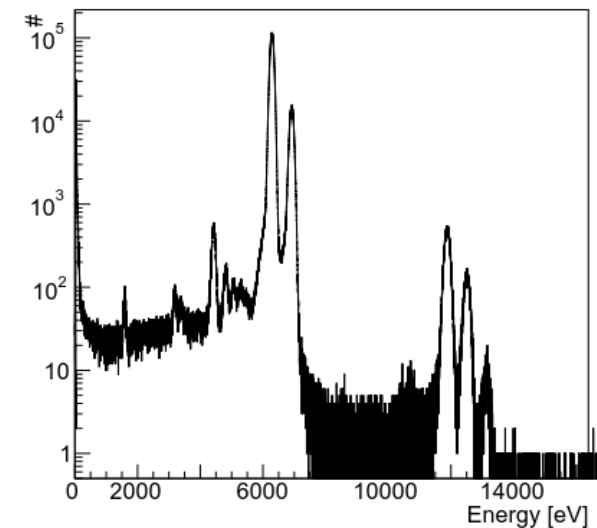
noise = 1.8 e- ENC

All valids



^{55}Fe spectrum

128 eV FWHM @ 5.9 keV



Conclusions sur les détecteurs en silicium

Les détecteurs en silicium peuvent bénéficier des technologies silicium de l'industrie des composants électroniques :

Pour la finesse de gravure permettant la réalisation de petits pixels

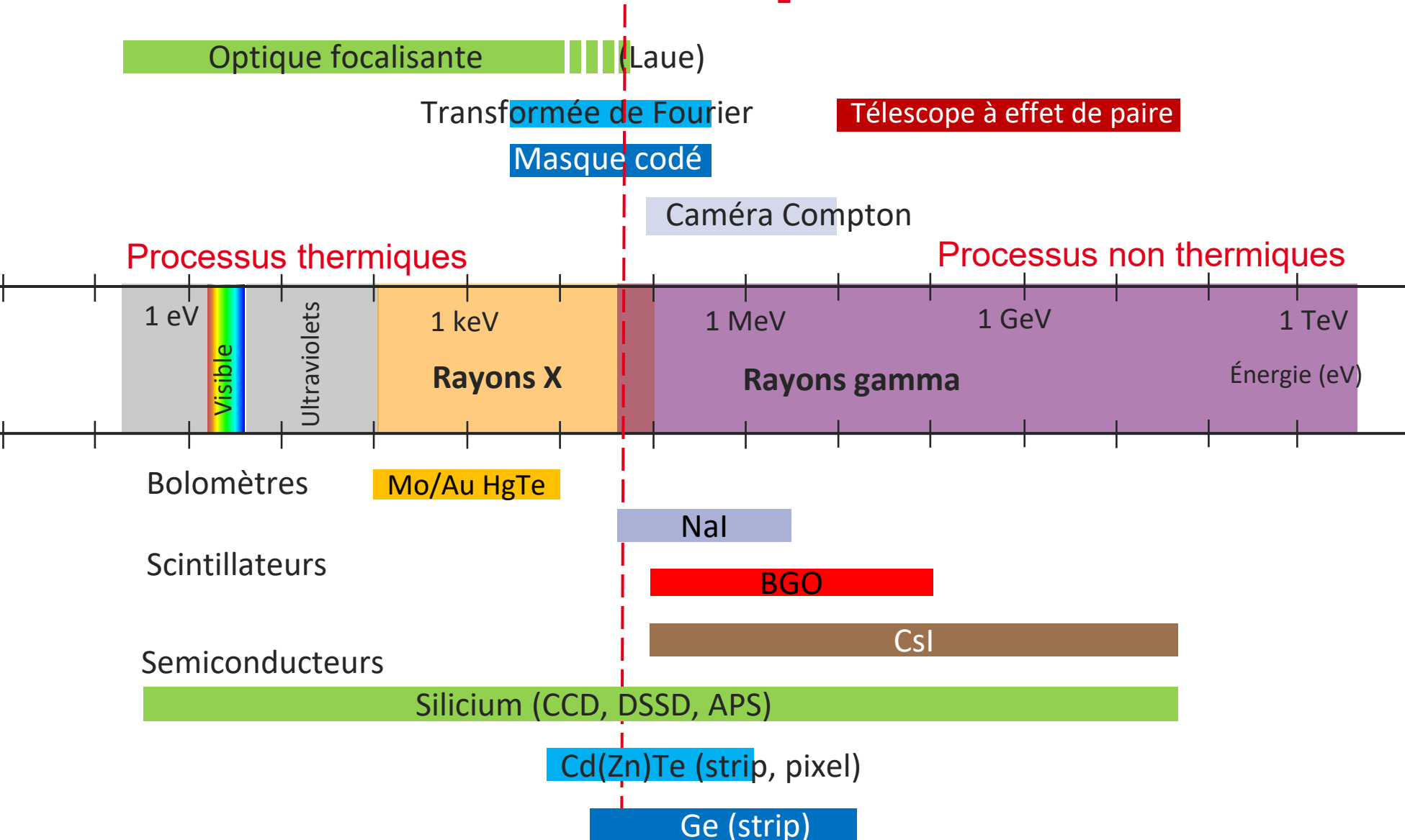
- 15 μm typiquement pour des CCD ou CMOS dans le visible, au-delà des besoins pour des spectro-imageurs X en raison du partage de charges (pas besoin de moins de 40 μm).

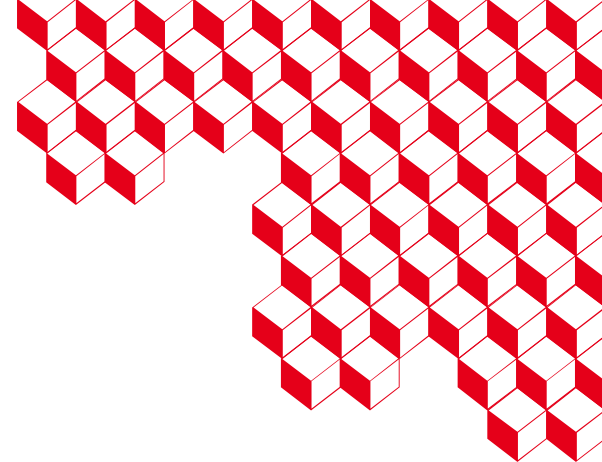
Pour implanter un premier étage d'amplification au cœur de la zone sensible

- JFET sur les lignes des CCD ou au centre des pixels SDD ou DEPFET
- Optimum pour la performance spectrale (petite capacité d'anode, faible bruit)

Mais pas pour réaliser des matériaux intrinsèques et épais (mm), qui reste un défi pour la détection X et gamma.

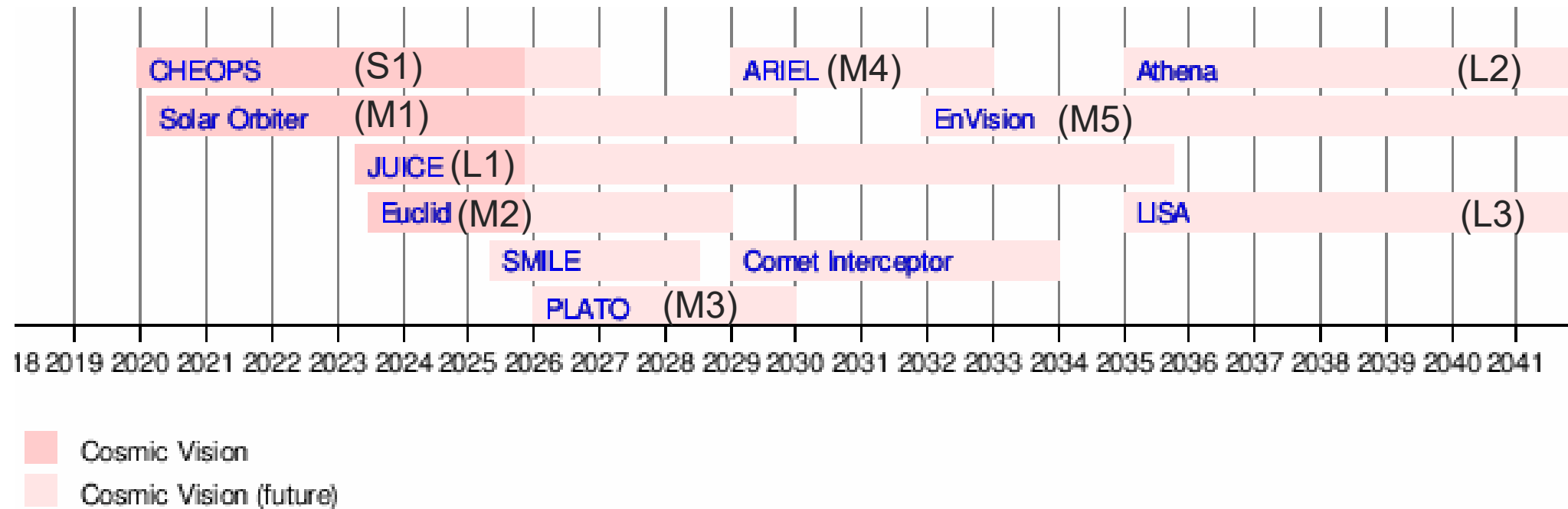
Résumé des techniques instrumentales





4.2. Programme Cosmic Vision de l'Europe

Programme Cosmic Vision



Missions embarquant des instruments X et gamma

- (M1) Solar Orbiter
- (L2) Athena
- (Candidat M7) Theseus (en compétition avec 2 autres missions, pas de mission M6)

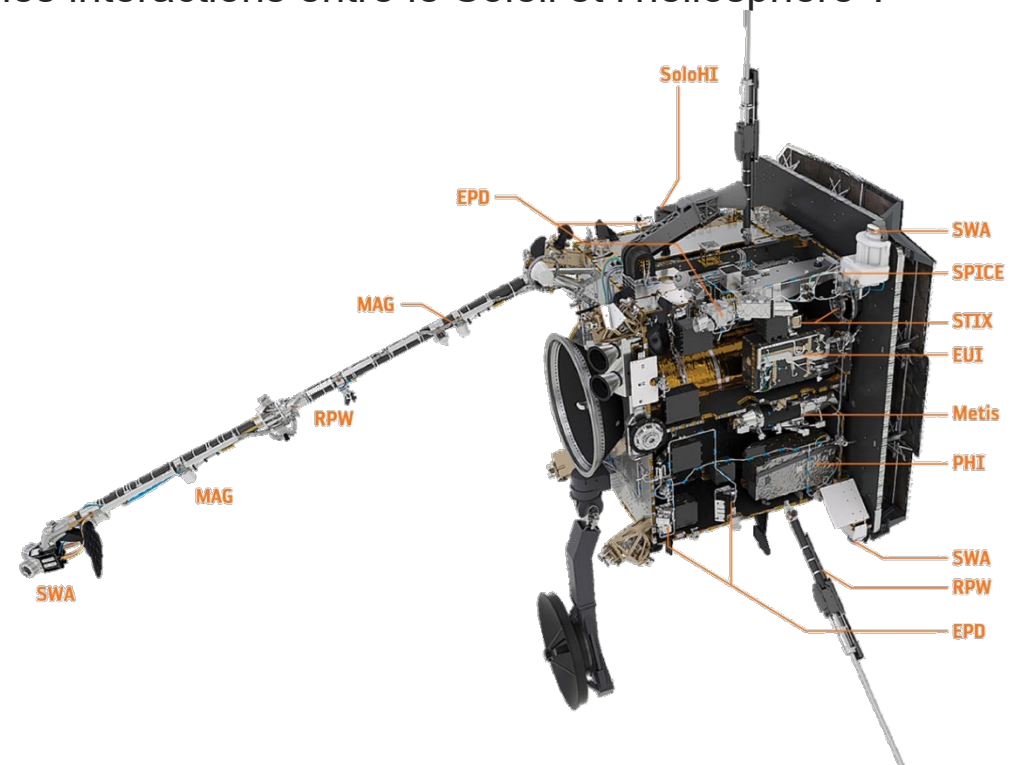
Le Soleil et son environnement : Solar Orbiter

- Quels sont les mécanismes impliqués dans la formation de la couronne et du vent solaire ?
- Quels sont les processus physiques expliquant l'activité éruptive du Soleil et la variabilité de l'héliosphère ?
- Comment les éruptions solaires produisent les particules énergétiques qui remplissent l'héliosphère (et qui impactent l'environnement terrestre) ?
- Comment fonctionne la dynamo solaire et comment régit-elle les interactions entre le Soleil et l'héliosphère ?

Lancement en 2020 (M1)

Suite de 10 instruments pour faire le lien entre les phénomènes à la surface du Soleil et dans l'héliosphère.

- instruments « remote sensing » (imagerie de la couronne et de l'héliosphère dans les domaines visible, spectro-imagerie en bandes ultraviolet, extrême UV et X)
- instruments « in situ » de mesures localisées (champ magnétique, particules énergétiques, ondes plasma, vent solaire)

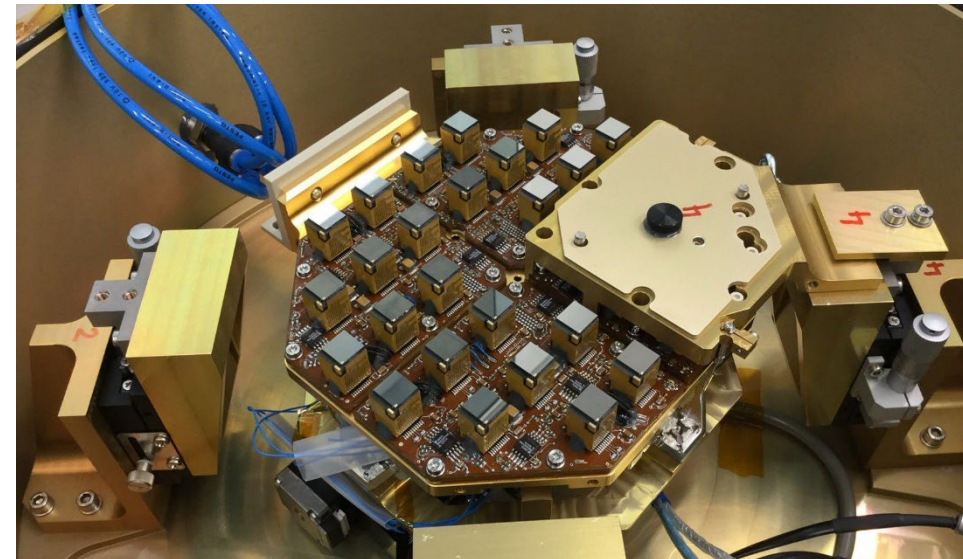
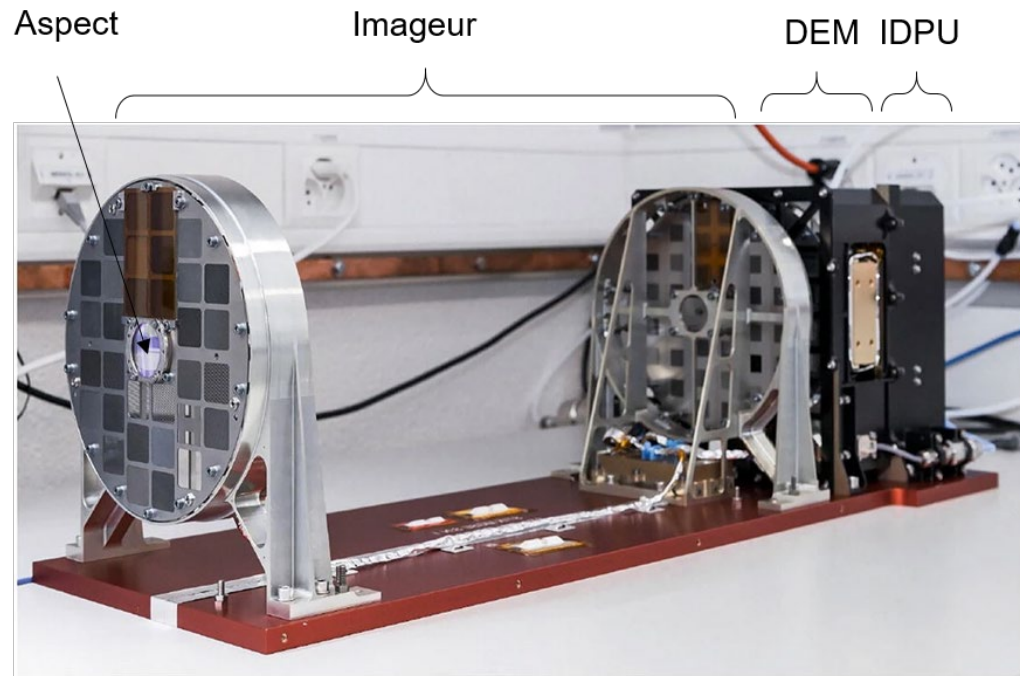


Spectrometer Telescope Imaging X-rays (STIX)

Objectif : déterminer l'intensité, la localisation, le spectre résolu en temps des électrons accélérés près du Soleil en détectant les rayons X dans la bande 4 – 150 keV.

Concept instrumental : telescope de Fourier avec 30 visibilités (fréquences spatiales et orientations)

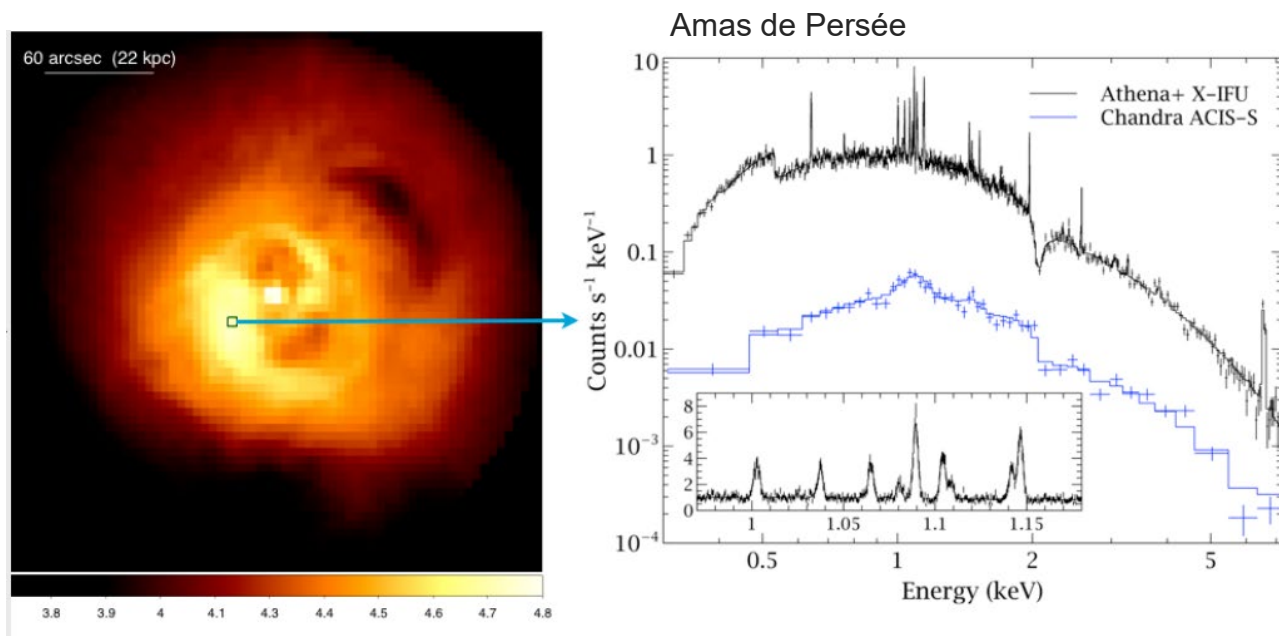
Plan de detection (DEM) : 32 spectromètres Caliste-SO, cristaux de 1 mm CdTe Schottky pixelisé



L'univers chaud et énergétique : ATHENA

[Mission ESA L2 > 2035] Comment et pourquoi la matière ordinaire s'assemble en galaxie et amas de galaxies visibles aujourd'hui ? Comment les trous noirs grossissent et influencent leur environnement ?

- Spectroscopie haute résolution (résolue spatialement) pour comprendre l'état de la matière au moment où elle s'effondre dans le trou noir (noyaux actifs de galaxie)
- Imagerie à grand champ de vue (résolue spatialement) pour observer les interactions à grande échelle dans les amas de galaxies.



P. Nandra et al., "The Hot and Energetic Universe: A White Paper presenting the science theme motivating the Athena+ mission" (2013)

<https://doi.org/10.48550/arxiv.1306.2307>

Les sursauts gamma : SVOM et THESEUS

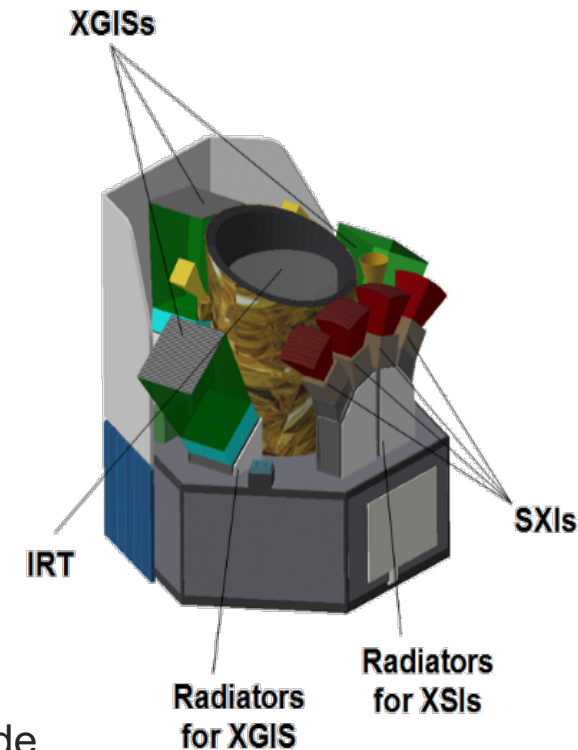
Science

A la suite de SVOM (2022), THESEUS est proposée à l'ESA (M7, 2037) pour explorer l'Univers profond jusqu'à l'époque de la réionisation en dévoilant une population de sursauts gamma inédite produite dans le premier milliard d'année de notre histoire cosmologique.

Les sursauts gamma (ultra brillants) peuvent permettre de détecter les premières populations d'étoiles.

Concept instrumental

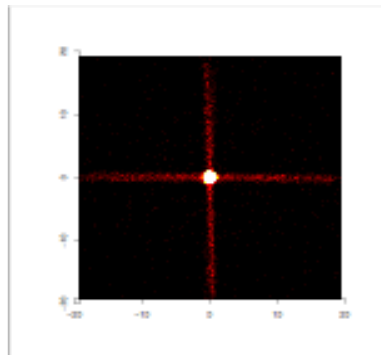
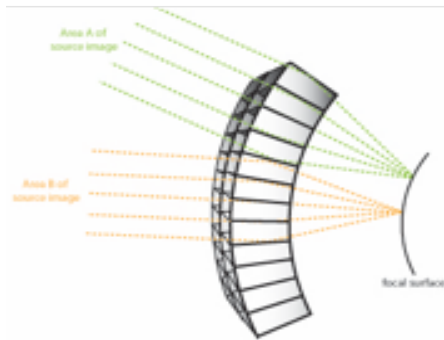
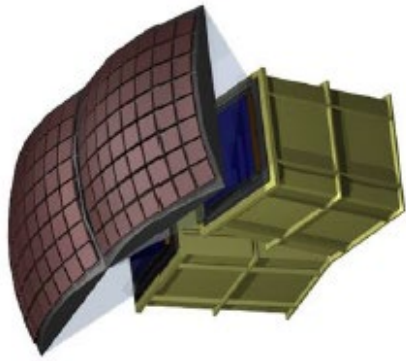
- Détection et localisation des sources transitoires X et γ
 - **SXI (Soft X-ray Imager)** : bande 0,3-0,6 keV, champ de vue 1 sr, localisation à 2 arcmin
 - **XGIS (X-Gamma rays Imaging Spectrometer)** : bande 1 keV - 10 MeV, champ de vue 1 sr, localisation à 5 arcmin
- Observation de l'émission rémanente dans l'infrarouge, notamment pour la mesure du redshift (distance)
 - **IRT (InfraRed Telescope)** : bande 0,7-1,8 microns), champ de vue de 10 x 10 minutes d'arc.



Instruments hautes énergies de THESEUS

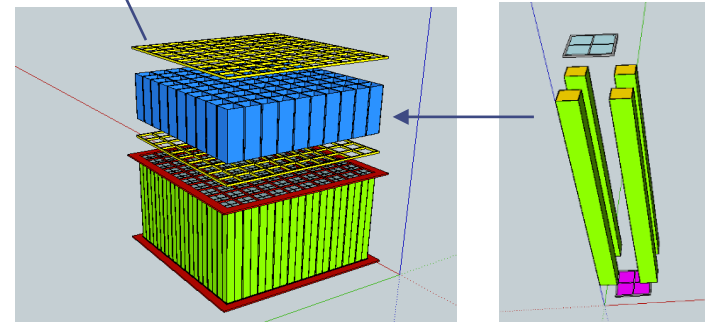
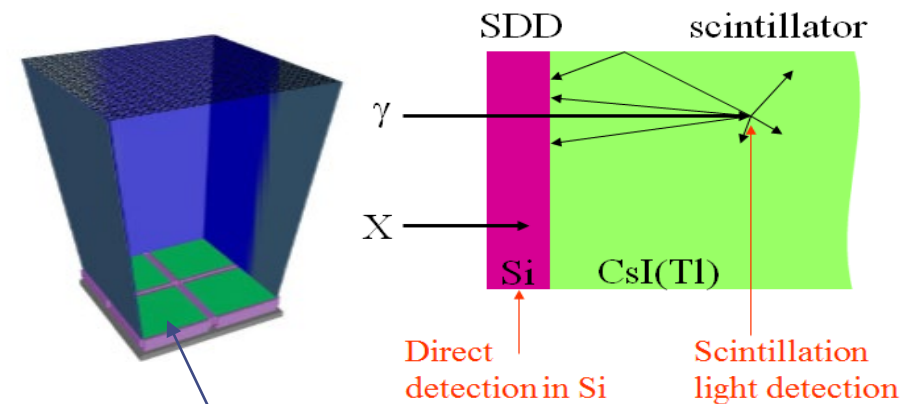
SXI (Soft X-ray Imager)

4 unités basées sur les lentilles X de type lobster eye (compacité) à et des détecteurs en silicium.



X-Gamma rays Imaging Spectrometer

3 caméras à masque codé avec des plans focaux associant des détecteurs silicium (spectro-imagerie X haute résolution) et des scintillateurs (efficacité gamma)



Conclusion technique

1. L'astrophysique des hautes énergies nécessitent des techniques de détection particulières :

- Instrumentation spatiale pour s'affranchir de l'atmosphère.
- Techniques optiques pour maximiser le flux collecter, juste à des techniques de modulation (imagerie indirecte).
- La détection des photons un par un, comme (se rapprochant de la détection des particules).

2. Les détecteurs semi-conducteurs permettent dans un dispositif unique de faire :

- De la **spectroscopie** – en favorisant l'effet photoélectrique (absorption totale)
- De l'**imagerie** – généralement avec une géométrie de pixels, avec ou sans transfert de charge (tenue aux radiations)
- De la **polarimétrie** – en favorisant l'effet Compton
- **Résolus en temps** – en privilégiant une électronique de lecture autodéclenchée (meilleure précision de datation que la lecture par trame)

Les questions scientifiques à résoudre...

- ❑ **Etudier les processus d'accélération (dans les restes de supernova, les vents de pulsars, les éruptions solaires...) à l'origine des rayons cosmiques pour comprendre le contenu non thermique des galaxies**

- Spectro-imagerie X dur,
- Faible sensibilité pour les objets astrophysiques
- Forte capacité de comptage pour l'observation du Soleil

- ❑ **Comprendre les magnétars sûrement à l'origine de nombreux phénomènes physiques : Ultra luminous X-ray sources, Gamma-ray bursts, Fast radio bursts.**

- Polarimétrie X et X dur, Timing
- Observation du ciel transitoire

- ❑ **Etudier la physique des objets compacts et tester les lois de la relativité générale**

- Spectroscopie ultra haute résolution

...et les défis instrumentaux associés

1. Gagner en sensibilité

- **Optique** : focaliser au-delà de 100 keV (miroirs X dur, lentilles gamma)
- **Détecteurs** : augmenter la densité de pixels, inventer de nouveaux concepts instrumentaux pour la sensibilité à 1 MeV
- **Chaînes de lecture** : hybridation, consommation par voie, capacité de comptage

2. Faire de la spectroscopie ultra haute résolution

- **Détecteurs** : matrices de bolomètres X
- **Chaîne de lecture** : chaînes cryogéniques (puissance, techniques de multiplexage)

3. Observer le ciel transitoire

- **Optique** : optiques X légères et performantes (à microcanaux)
- **Chaînes de lecture** : traitement numérique embarqué pour la détection et la décision (FPGA et processeur intégré, intelligence artificielle)