

5^{ème} Ecole Thématique

Détection de Rayonnement
à Très Basse Température

Oléron 2 au 8 Juin 2002

Applications astrophysiques des détecteurs
cryogéniques (Rayonnement X)

C. Pigot

CEA/DSM/DAPNIA/SAP

DRTBT2002_17

I- Introduction

Le domaine X du spectre électromagnétique a été découvert à la fin du XIX^{ème} siècle par Wilhelm C. Roentgen en 1895 et les applications en radiographie médicale ont été quasi immédiates. Pourtant ce n'est que dans les années 1960 que fut mise en évidence la première source X extrasolaire, Sco-X1, à l'occasion d'un tir fusée.

Ceci tient à l'opacité de l'atmosphère terrestre pour cette zone du spectre électromagnétique (figure 1). A partir de l'UV, l'atmosphère devient opaque aux radiations de plus courte longueur d'onde. Seules des observations au niveau de ballons de haute altitude et à haute énergie, à partir des rayons X durs, sont réalisables.

C'est pourquoi il a fallu attendre de disposer de plateformes d'observation à bord de satellites, à partir des années 1970, pour que débute l'astronomie X.

Si l'on considère l'absorption du rayonnement par le milieu interstellaire (MIS) (figure 2), on met en évidence une situation paradoxale que le rayonnement X et de plus haute énergie partage avec certaines bandes de l'infrarouge.

Alors que l'atmosphère terrestre est transparente au rayonnement visible et absorbe les rayonnements de part et d'autre, on observe, pour le MIS, de part et d'autre du pic d'absorption (à quelques dizaines d'eV), une amélioration graduelle de la transparence vers les X et les infrarouges, avec une même absorption à $1\mu\text{m}$ et à 1 keV , même si les mécanismes d'absorption sont différents.

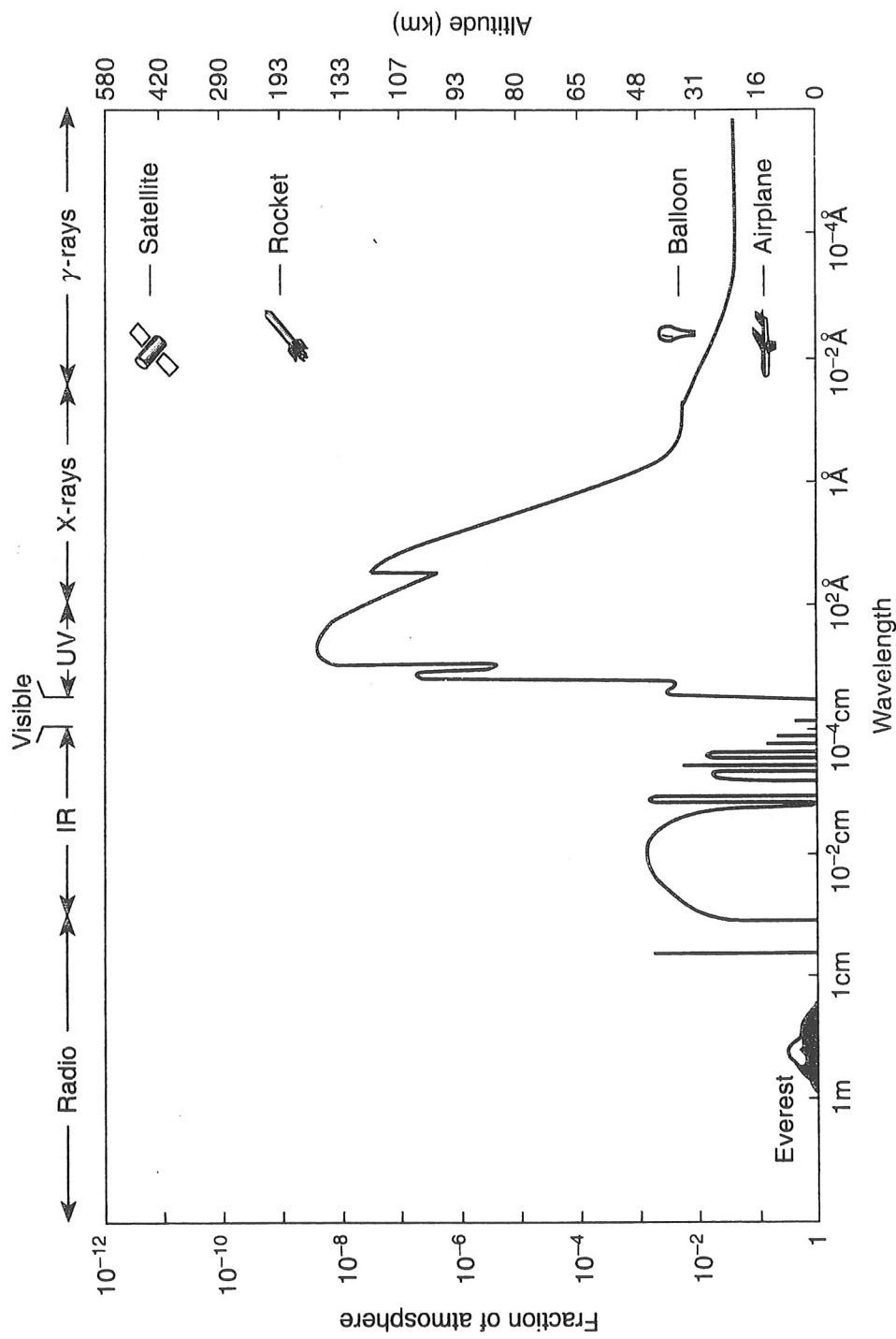


Figure 1

EXTINCTION IN THE DIFFUSE INTERSTELLAR MEDIUM

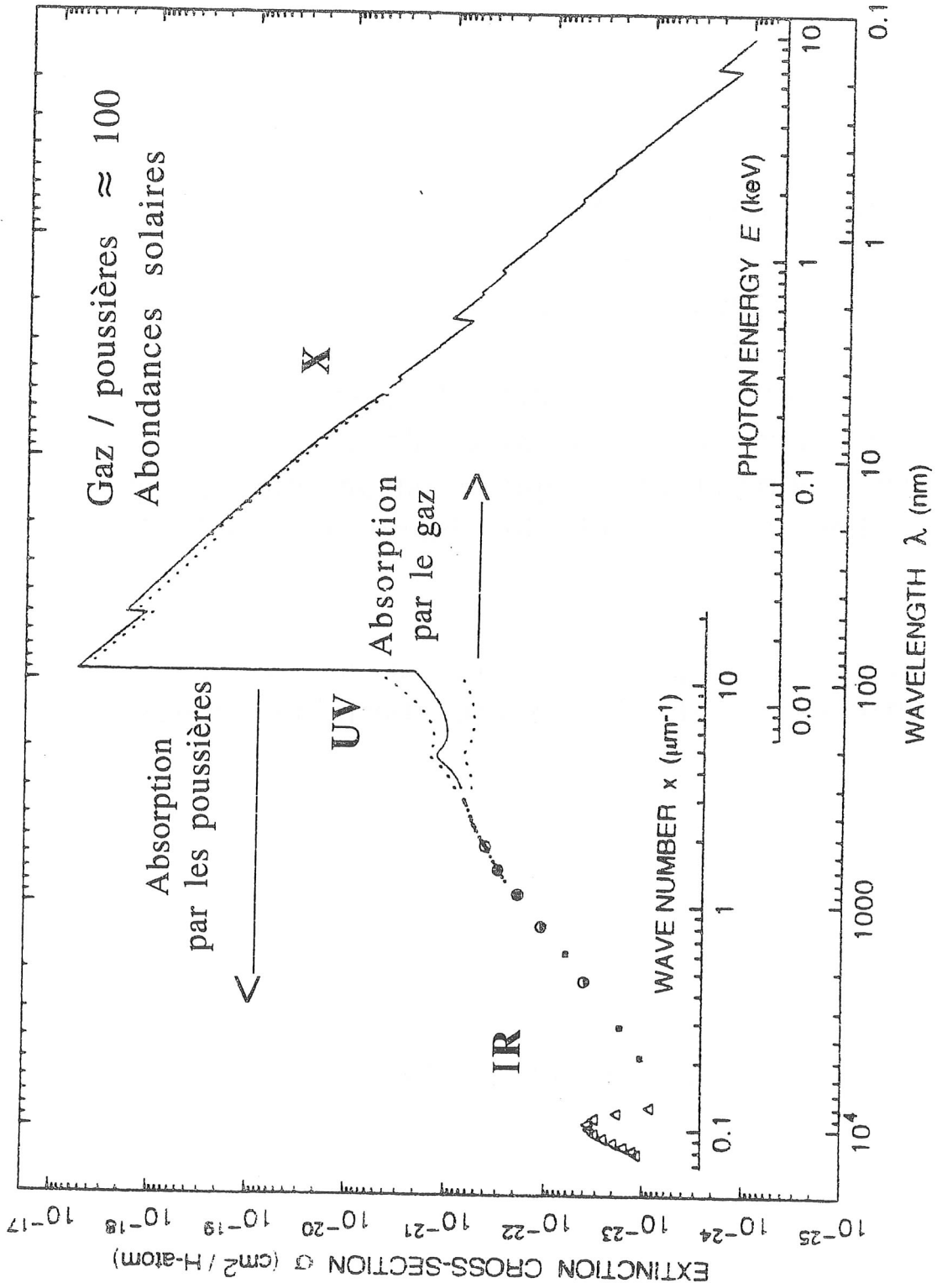


Figure 2

Le MIS étant transparent au rayonnement X, on pourra observer des processus enfouis, cachés dans des nuages de matière et autrement invisibles. On peut citer comme exemple les régions de formation d'étoiles au cœur de nuages denses de matière et de poussières.

D'autre part un photon X typique, à une énergie d'un kiloélectronvolt (keV), correspond à une température de l'ordre de 10^7 K.

Le rayonnement X sera, donc, émis thermiquement par la matière chaude, à des températures de cet ordre. Dans l'univers observable, il existe un certain nombre de mécanismes susceptibles de chauffer la matière à ces températures et que l'astronomie X permettra d'étudier; par exemple le champ de gravitation à proximité d'objets compacts et massifs, ou dans les amas de galaxies, ou encore le choc entre la matière éjectée par l'explosion d'une supernova et le MIS. L'observation de l'émission thermique permettra de diagnostiquer l'état du plasma, sa température, sa densité, sa composition chimique, son état d'ionisation, etc..

Le rayonnement X présente certaines propriétés qui vont conditionner son observation.

La figure 3 présente une partie du spectre électromagnétique. La frontière entre les X et les autres catégories de rayonnement est assez arbitraire.

Classiquement, on distingue le rayonnement X du rayonnement Gamma par le mécanisme d'émission des sources (transition atomique/transition nucléaire).

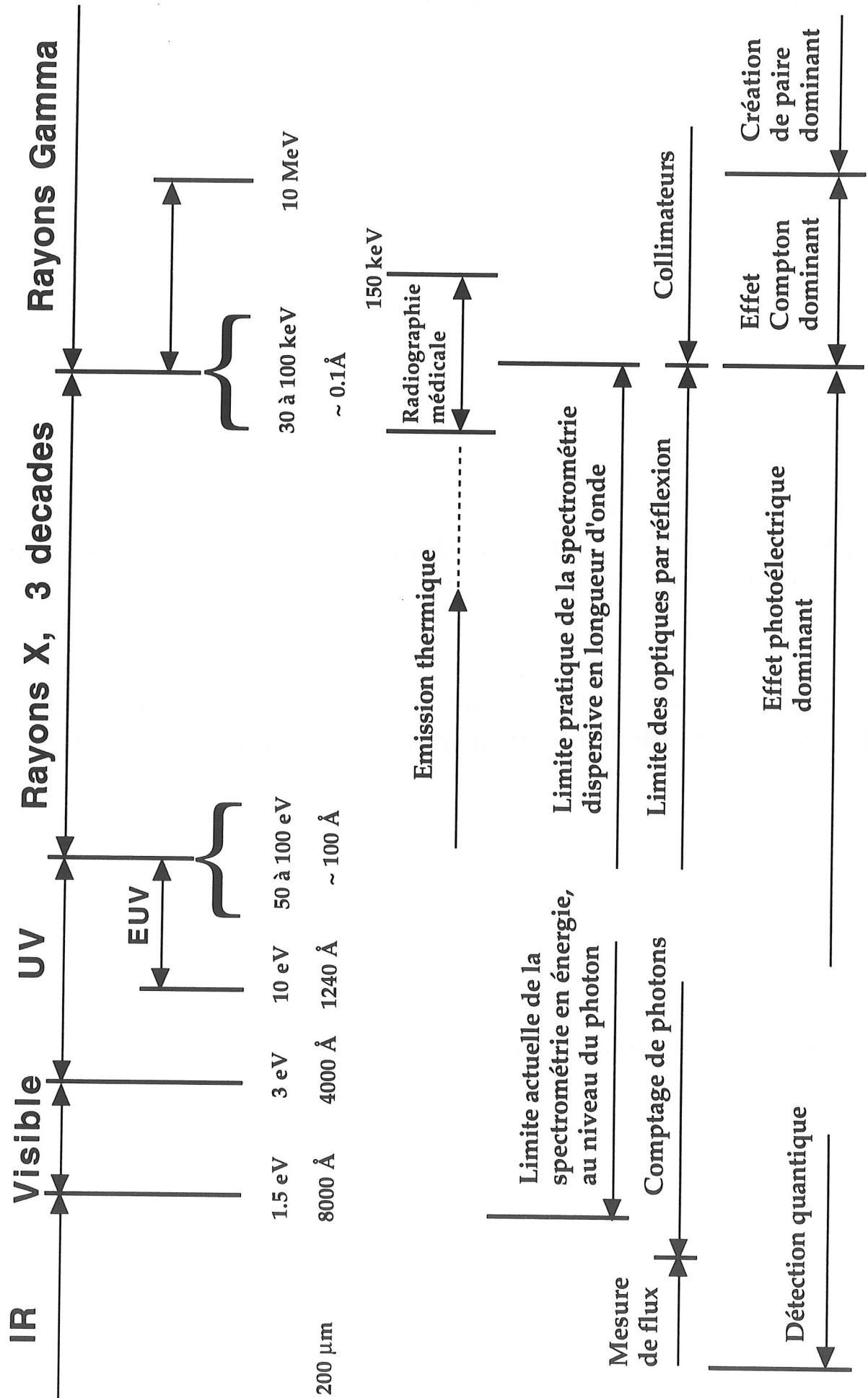


Figure 3

Mais la séparation des différents domaines se fera aussi, et peut être plus naturellement, avec des critères comme :

- Mécanismes d'interaction avec la matière
- Imagerie possible par réflexion/collimateur
- Spectrométrie dispersive en longueur d'onde ou en énergie

Mécanismes d'interaction avec la matière :

On oppose à la détection de l'amplitude d'une onde, telle qu'on la réalise dans le domaine radio avec une antenne, la détection quantique avec création d'une photocharge par l'interaction d'un photon avec la matière du détecteur (Emission d'un photoélectron dans le vide à partir d'une photocathode ou dans un cristal, création d'un paire électron trou dans un semiconducteur, ..). L'état de l'art, en matière de détecteurs, limite actuellement la détection quantique à une longueur d'onde maximum de 200 μm (Germanium dopé au Gallium et contraint). Le bruit de lecture limite, en pratique, la détection individuelle de chaque photon (comptage de photon) au proche infrarouge. Dans le domaine des rayons X, le mécanisme dominant reste l'effet photoélectrique avec extraction d'un photoélectron, préférentiellement de la couche K des atomes du détecteur et dissipation quasi-locale de l'énergie de cet électron dans le matériau du détecteur si celui-ci est assez dense. Ceci permet de considérer l'interaction comme ponctuelle et le plus souvent confinée à un pixel d'un détecteur segmenté.

Par contraste, la mesure d'un photon interagissant par effet Compton implique la mesure d'au moins deux dépôts d'énergie distincts.

Imagerie possible par réflexion/collimateur :

La limite rayons X Gamma correspond aussi à la limite des optiques par réflexion. La seule réflexion possible à haute énergie (Dans le domaine des rayons X et au delà, l'indice des matériaux est très légèrement inférieur à 1) est la réflexion totale externe sous incidence rasante sur la surface d'un matériau à haute densité électronique (Or, platine, irridium,...).

Une configuration optique est maintenant à la base de tous les télescopes X. C'est la configuration de Wolter I, par laquelle le rayonnement X incident à l'intérieur d'une zone annulaire subit une double réflexion sous incidence rasante sur un paraboloïde et un hyperboloïde de révolution (figure 4). Une grande surface effective peut être obtenue en emboîtant toute une série de coquilles de diamètre croissant.

Il s'agit là d'une vraie imagerie. On peut avec ce genre de miroirs, en augmentant la distance focale et en utilisant des revêtements multicouches (au prix d'une réduction de la bande passante en énergie) atteindre quelques dizaines à la centaine de keV, limite au delà de laquelle l'imagerie se fera à l'aide de collimateurs comme les masques codés de la future mission gamma, Integral. Disposer d'une optique imageante et concentratrice permet de réduire considérablement la taille du détecteur et le bruit de fond qui lui est associé. Elle rendra possible l'utilisation de détecteurs cryogéniques.

Miroir X à incidence rasante Configuration Wolter I

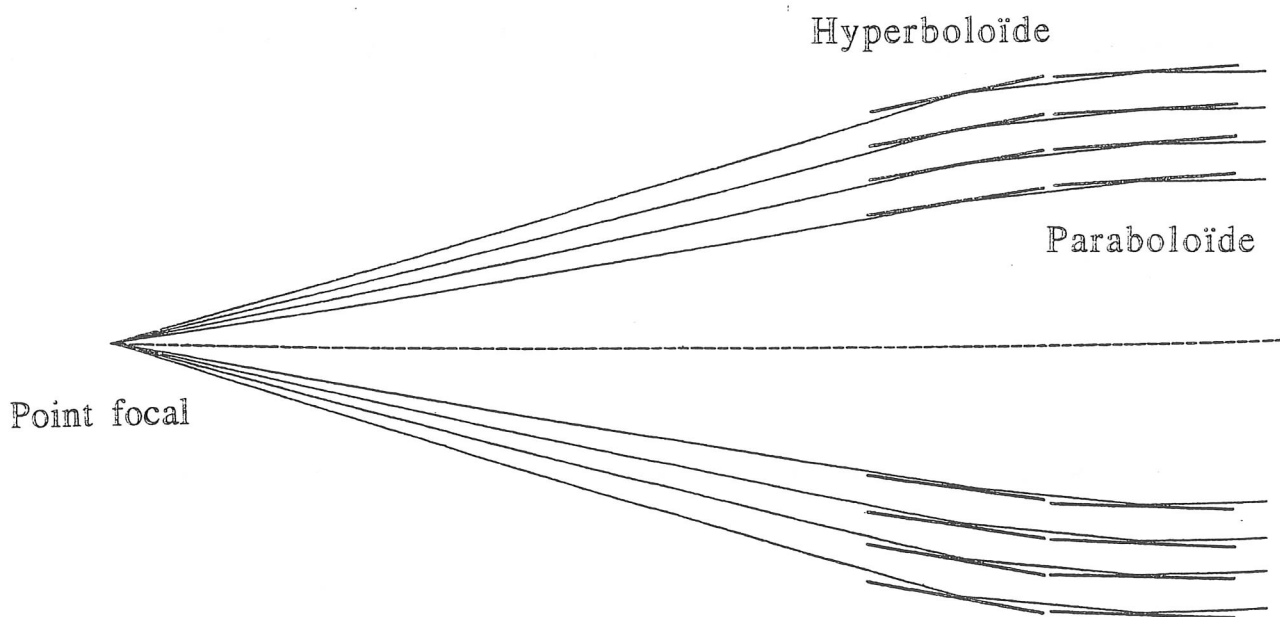
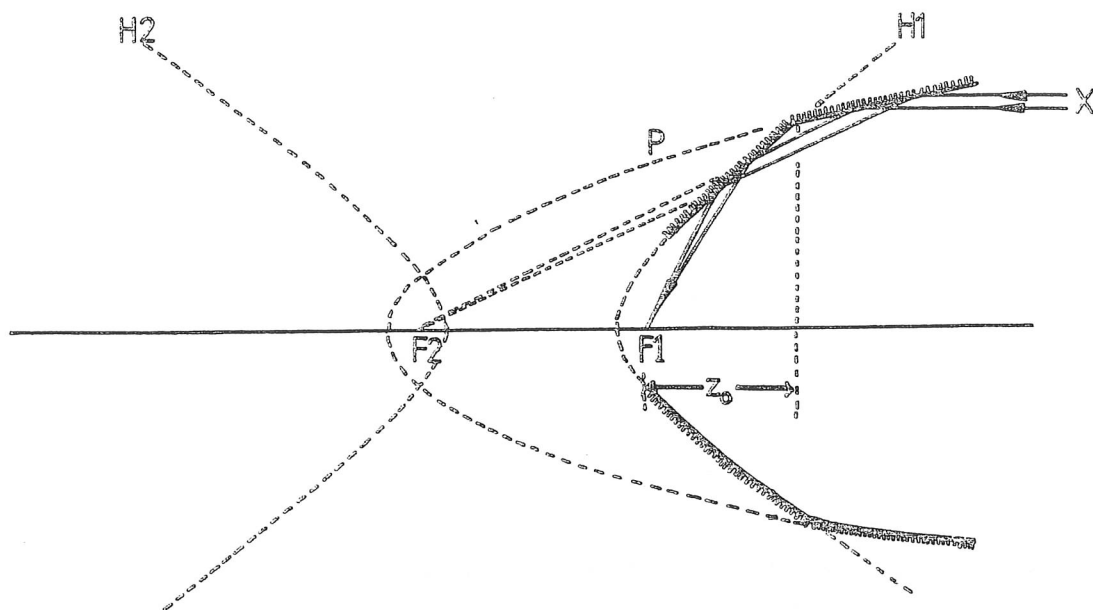


Figure 4

Spectrométrie dispersive en longueur d'onde ou en énergie :

On peut réaliser la spectrométrie d'un rayonnement électromagnétique soit en mesurant sa longueur d'onde, en utilisant une optique (prisme, réseau, cristaux de Bragg, ...), soit en mesurant l'énergie du photon associé. Depuis peu, cette spectrométrie en énergie a pu être étendue, vers les basses énergies, dans le domaine visible ($E/\Delta E @ 10$), grâce aux diodes supraconductrices à effet tunnel.

On peut utiliser les deux méthodes spectroscopiques pour les rayons X.

Spectrométrie en longueur d'onde	Spectrométrie en énergie
$\epsilon @ 10 \text{ à } 50 \%$	QE possible @ 100%
Sources ponctuelles, incompatible avec l'imagerie	Compatible avec L'imagerie
Meilleure résolution à basse énergie	Bonne résolution à haute énergie

L'aspect corpusculaire s'impose progressivement avec les X.

Un astre actif dans le domaine X émet moins de quanta de rayonnement qu'un astre lumineux dans le domaine visible, à puissance rayonnée égale, car chaque quantum emporte une plus grande quantité d'énergie.

En conséquence et contrairement au visible, où l'on mesure le plus souvent un flux, en X on peut et on aura avantage à mesurer chaque photon et ses paramètres (position, énergie, date et plus rarement polarisation) à l'aide d'un spectro-imageur.

D'autre part, on mesurera les inconvénients d'une spectrométrie en longueur d'onde quand les sources sont faibles, les durées d'observations, en conséquence, longues et l'accès aux instruments/observatoires inévitablement limité.

Nous illustrerons les points que nous venons d'évoquer avec un exemple de spectro-imagerie réalisé avec les dernières missions X, les observations d'un reste de supernova, Cassiopée-A (Cass-A).

Uhuru a été le 1^{er} satellite X lancé en décembre 1971. A sa suite Einstein a emporté le 1^{er} vrai télescope (novembre 1978).

Sur ce satellite, un instrument, l'IPC (Imaging Proportional Counter, voir figure 5), était capable d'effectuer de la spectroimagerie, mais à basse résolution spatiale (@ 1 minute d'arc) et à basse résolution spectrale, caractéristique d'un compteur proportionnel à gaz (voir spectre correspondant, figure 6).

La résolution spatiale est tout juste suffisante pour révéler deux zones de surbrillance dans l'image de Cass-A. Une spectrométrie dispersive en longueur d'onde, à haute résolution, est effectuée séparément avec des cristaux de Bragg.

Extrapolée d'Einstein, la mission ROSAT (Roentgen Satellite) a été lancée en 1990.

Einstein, IPC, 1980

— Lifetime : 12 November 1978 - April 1981 Energy Range : 0.2 - 20 keV

— Special Features : First imaging X-ray telescope in space

— A Wolter Type I grazing incidence telescope (0.1-4 keV).
 — Four instruments could be rotated, one at a time, into the focal plane:

— Imaging Proportional Counter (IPC; 0.4-4.0 keV) eff. area 100 cm², FOV 75', ~1 arcmin spatial resolution.

— High Resolution Imager (HRI; 0.15-3.0 keV) eff. area 5 - 20 cm², FOV 25', ~2 arcsec spatial resolution.

— Solid State Spectrometer (SSS; 0.5-4.5 keV) eff. Area 200 cm², FOV 6', E/ΔE of 3-25

— Focal Plane Crystal Spectrometer (FPCS; 0.42-2.6 keV) eff. area 0.1 - 1.0 cm², FOV 6', 1'x20', 2'x20', 3'x30', E/ΔE of 50-100 for E < 0.4 keV, E/ΔE of 100-1000 for E > 0.4 keV

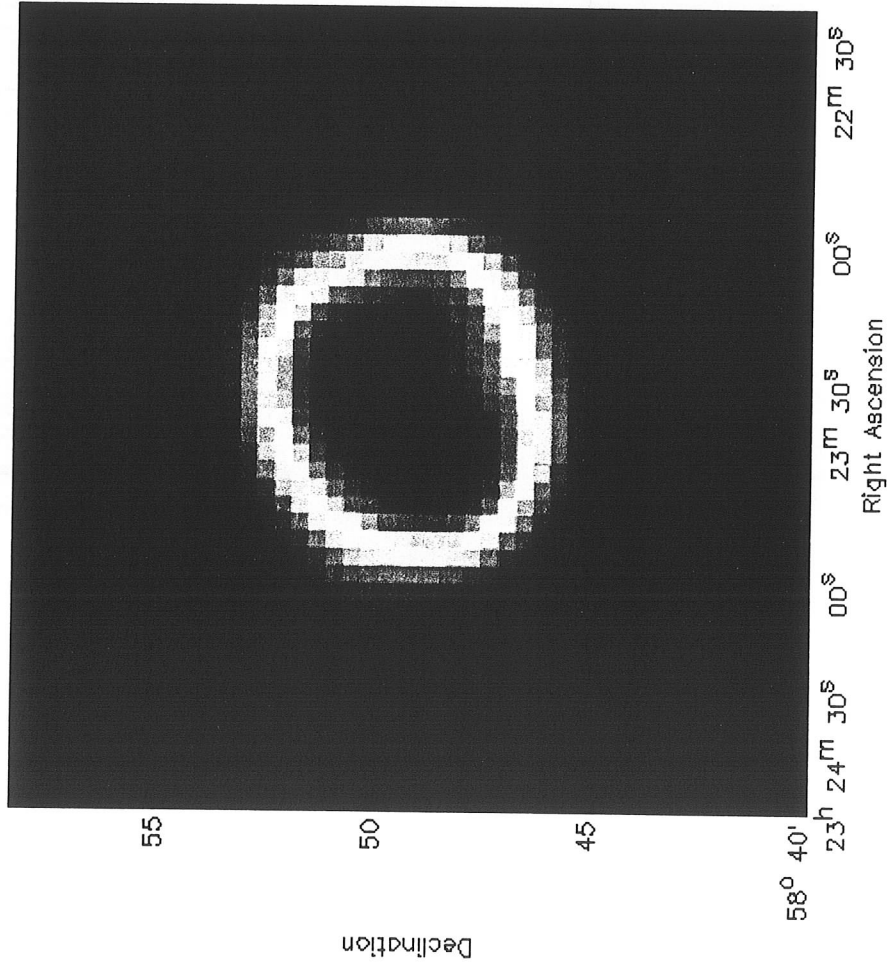
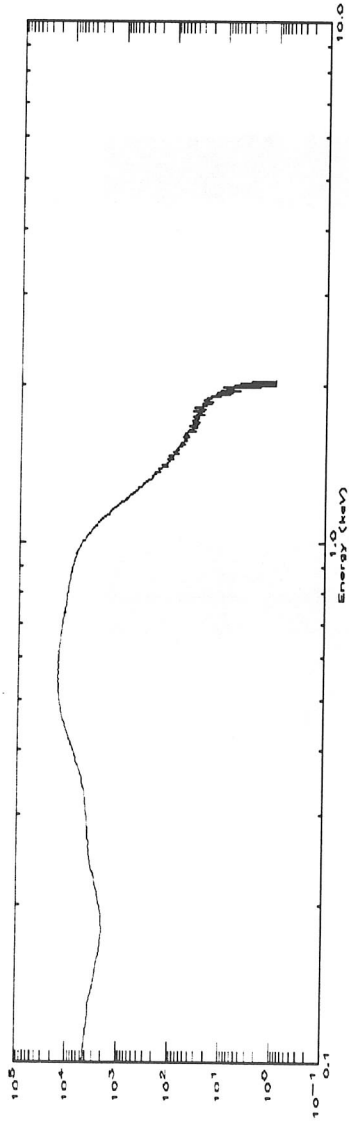


Figure 5

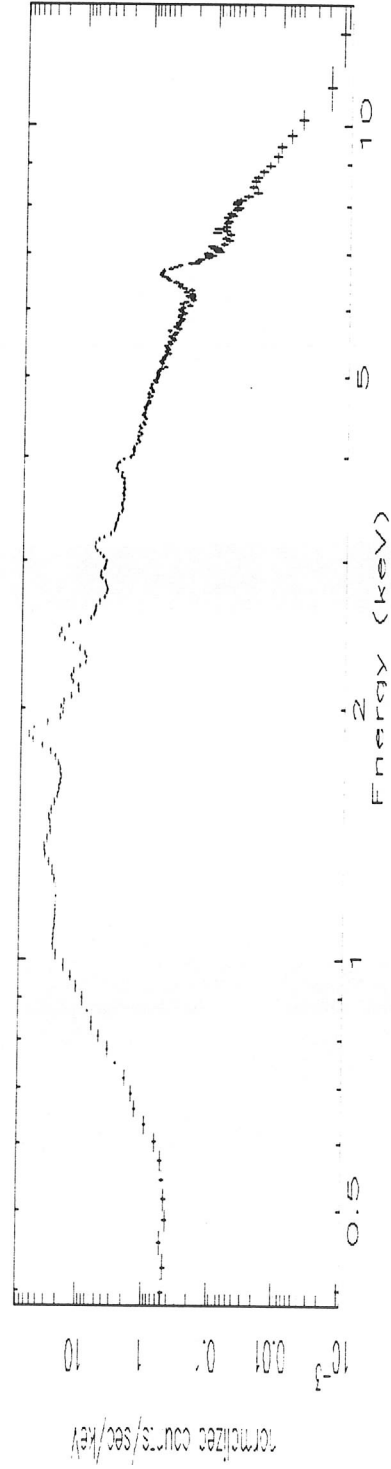
Spectre de SNR en fonction de la résolution spectrale



Compteur à gaz

$E/\Delta E \sim 2$

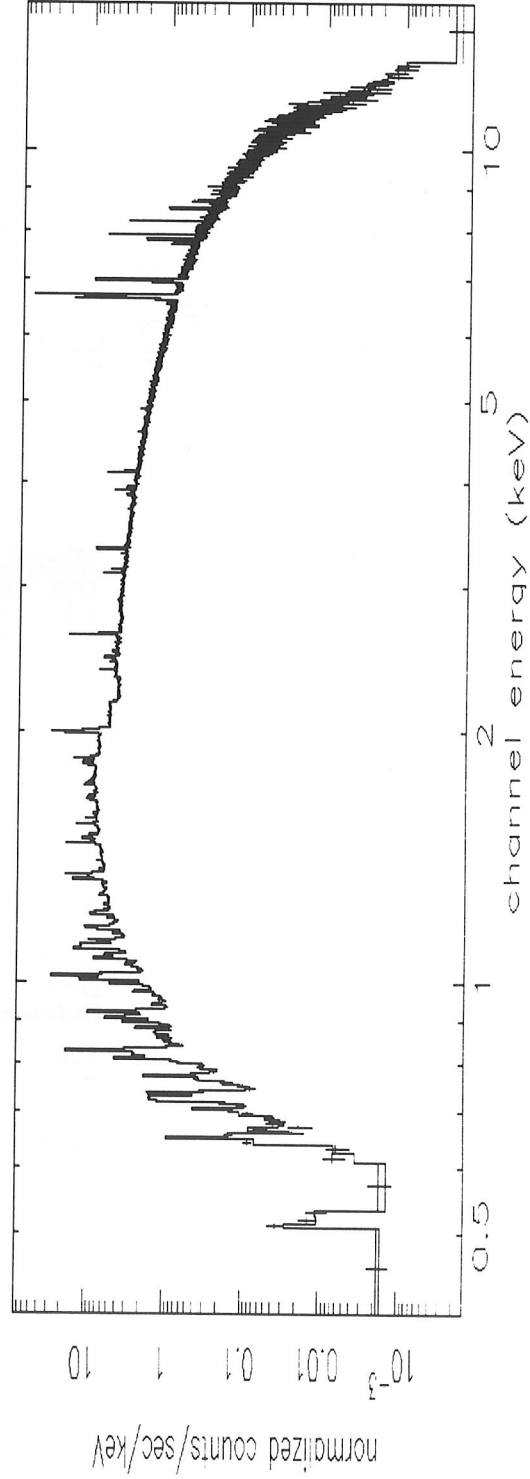
$0.1 \text{ keV} < E < 2.5 \text{ keV}$



CCD

$E/\Delta E \sim 40$

$0.5 \text{ keV} < E < 12 \text{ keV}$



Microcalorimètres

$E/\Delta E \sim 1000$

$0.5 \text{ keV} < E < 30 \text{ keV}$

Figure 6

La résolution spatiale du spectroimageur a été considérablement améliorée et les détails de la source commencent à apparaître (figure 7).

Après ASCA, les satellites de la génération actuelle, lancés en 1999, toujours en opération, Chandra (figure 8) pour les Etats-Unis et XMM-Newton (figure 9) pour l'Agence Spatiale Européenne (ESA), exploitent des spectroimageurs à base de matrices CCD, à haute résolution spatiale et moyenne résolution spectrale. Chandra dispose d'une optique de grande qualité, qui a donné, pour l'instant, la meilleure image de Cass-A. Une source ponctuelle, au centre de l'image devient apparente (figure 10).

Les CCDs de Chandra ont été dégradés en début de vie par une exposition accidentelle à des protons de basse énergie. En conséquence, la spectroimagerie la mieux résolue en énergie est actuellement réalisée par XMM qui dispose aussi d'une surface effective suffisante pour obtenir des spectres de statistique correcte au cours d'observations de durée raisonnable.

Les raies de différents éléments, dont le fer, se détachent, maintenant, nettement du fond (voir figure 6).

La spectroimagerie permet, alors, de réaliser des cartes de répartition de ces éléments (voir figure 11), des images doppler de ces raies, etc...

Une simulation d'un spectre tel qu'il pourrait être obtenu avec une matrice de microcalorimètres est présentée, pour comparaison, dans la figure 6. La résolution en énergie est très comparable à celle d'un spectromètre dispersif en longueur d'onde, mais obtenue avec l'image et une efficacité quantique qui se rapproche de 100%.

On imagine les possibilités d'un tel instrument !

ROSAT, HRI, 1995

- " Lifetime : 1 June 1990 - 12 February 1999
 - " Energy Range : X-ray 0.1 - 2.5 keV , EUV 62-206 eV
 - " Special Feature : All sky-survey in the soft X-ray band
- An X-ray telescope used in conjunction with one of the following instruments (0.1-2.5 keV) :
- " Position Sensitive Proportional Counter (PSPC)
 - " 2 units : detector B, used for the pointed phase, detector C, used for the survey FOV 2 ° diameter eff area 240 cm² at 1 keV energy resolution of $\Delta E/E=0.43$ (E/0.93)-0.5
 - " High Resolution Imager (HRI)
 - " FOV 38 ' square ; eff area 80 cm² at 1 keV ~ 2 arcsec spatial resolution (FWHM)
 - " A Wide Field Camera with its own mirror system (62-206 eV) FOV 5 ° diameter

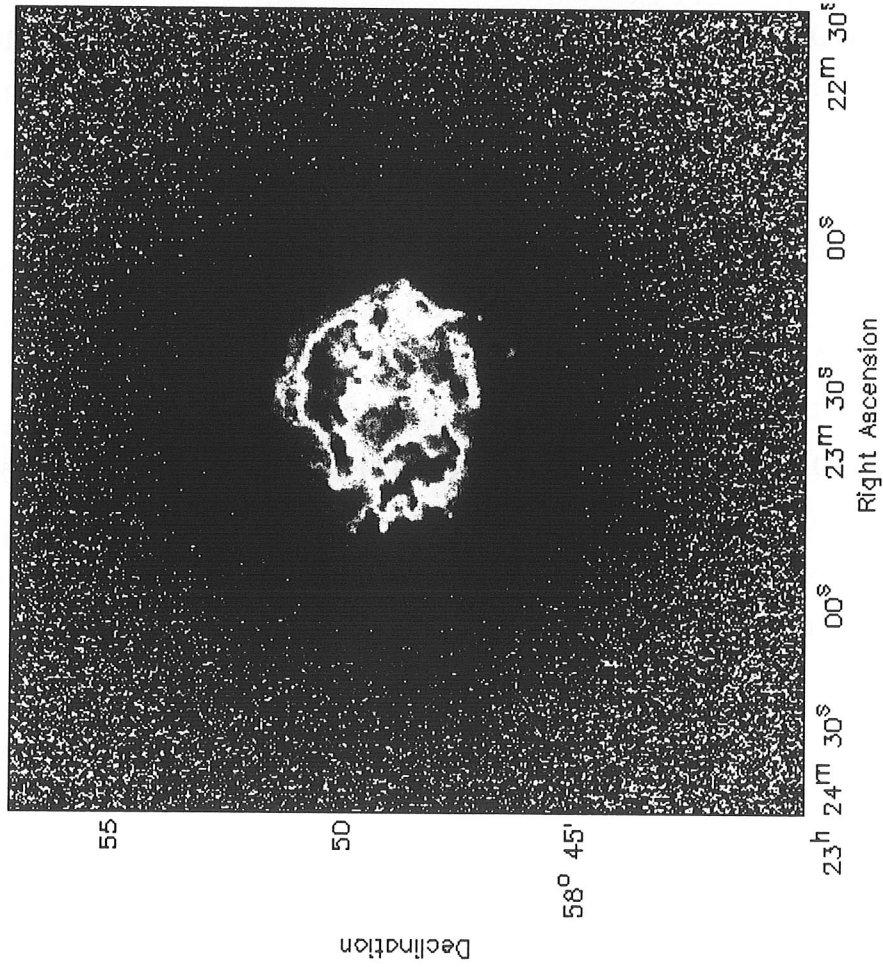


Figure 7

CHANDRA, July 1999

Lifetime : 23 July 1999 - (nominal 5 year mission)

Energy Range : 0.1-10 keV

Special Features : 64 Hours highly-eccentric Earth orbit.

Spatial resolution < 1 arcsec

A single Wolter Type 1 grazing incidence iridium-coated imaging telescope with a ghost free FOV $\sim 30'$ diameter and an effective area of 800 and 400 cm² @ 0.25 and 5 keV respectively. Four detectors could be inserted, one at a time, into the focal plane. Two of these were designed to be used primarily with the gratings.

AXAF Charged Coupled Imaging Spectrometer

(ACIS; 0.2-10 keV) 2 CCD arrays for a total of 10 chips.

8 chips are Front Illuminated (FI) and 2 are Back Illuminated (BI).

FI: Eff area 340 cm² @ 1 keV, E/ Δ E = 20-50 @ 1 and 6 keV

BI: Eff area 340 cm² @ 1 keV, E/ Δ E = 9-35 @ 1 and 6 keV

ACIS-I. One 4-chip imaging array, all FI. FOV 16' X 16'

ACIS-S. One 6-chip spectroscopic array, 4 FI and 2 BI

FOV 8' X 48'. To be used primarily with the grating.

High Resolution Camera (HRC; 0.1-10 keV)

2 micro-channel plate detectors.

HRC-I One 90mm square detector optimized for imaging. FOV $\sim 30' \times 30'$,

eff. area 225 cm² @ 1 keV, ~ 0.5 arcsec spatial resolution

HRC-S One 20 X 300 mm rectangular detector optimized for use with the

LETG transmission gratings experiment. FOV 7' X 97'

High Energy Transmission Grating + ACIS-S (HETG; 0.5-10 keV)

spectral resolving power (E/ Δ E) 60-1000.

Low Energy Transmission Grating + HRC-S (LETG; 0.08-6 keV)

spectral resolving power (E/ Δ E) 30-2000.

Figure 8

XMM/Newton, Dec 1999

Lifetime : December 1999 - (nominal 10 year mission)

Energy Range : 0.1-15 keV

Special Feature : Very large collecting area.

Simultaneous X-ray & Optical observations.

Three co-aligned Wolter Type I grazing incidence gold-coated imaging X-ray telescopes each with an effective area of ~ 1500 cm² @ 1 keV Spatial resolution 6" FWHM.

European Photon Imaging Camera

- Metal-Oxide-Silicon (EPIC-MOS; 0.1-15 keV; 2 units)

The EPIC-MOS are mounted under two telescopes and are used for spectro-imaging.

Each unit consists of an array of 7 CCDs and each CCD is 600 X 600 pixels FOV 33' X 33'

spectral resolution (E/dE) ~ 20-50 Eff area 922 cm² @ 1keV

- European Photon Imaging Camera-PN (0.1-15 keV; 1 unit)

This is an array of 12 CCDs (64 X 200 pixels each) used for spectro-imaging

FOV 27.5' X 27.5'

spectral resolution (E/dE) ~ 20-50 Eff area 1227 cm² @ 1keV

Reflection Grating Spectrometer

(RGS; 0.35-2.5 keV two units) + MOS CCDs

The gratings, mounted under two telescopes, deflect about 50% of the X-ray light onto an array of 9 CCD detectors.

Line density ~645 lines mm⁻¹ at the centre

Spectral resolution (E/ΔE) 200-800

Eff area 185 cm² @ 1 keV, FOV 5'

Optical Monitor (OM; 180-650 nm)

co-aligned 30 cm optical/UV telescope. FOV ~17', ~1" spatial resolution.

Figure 9

CHANDRA ACIS-I, 2000

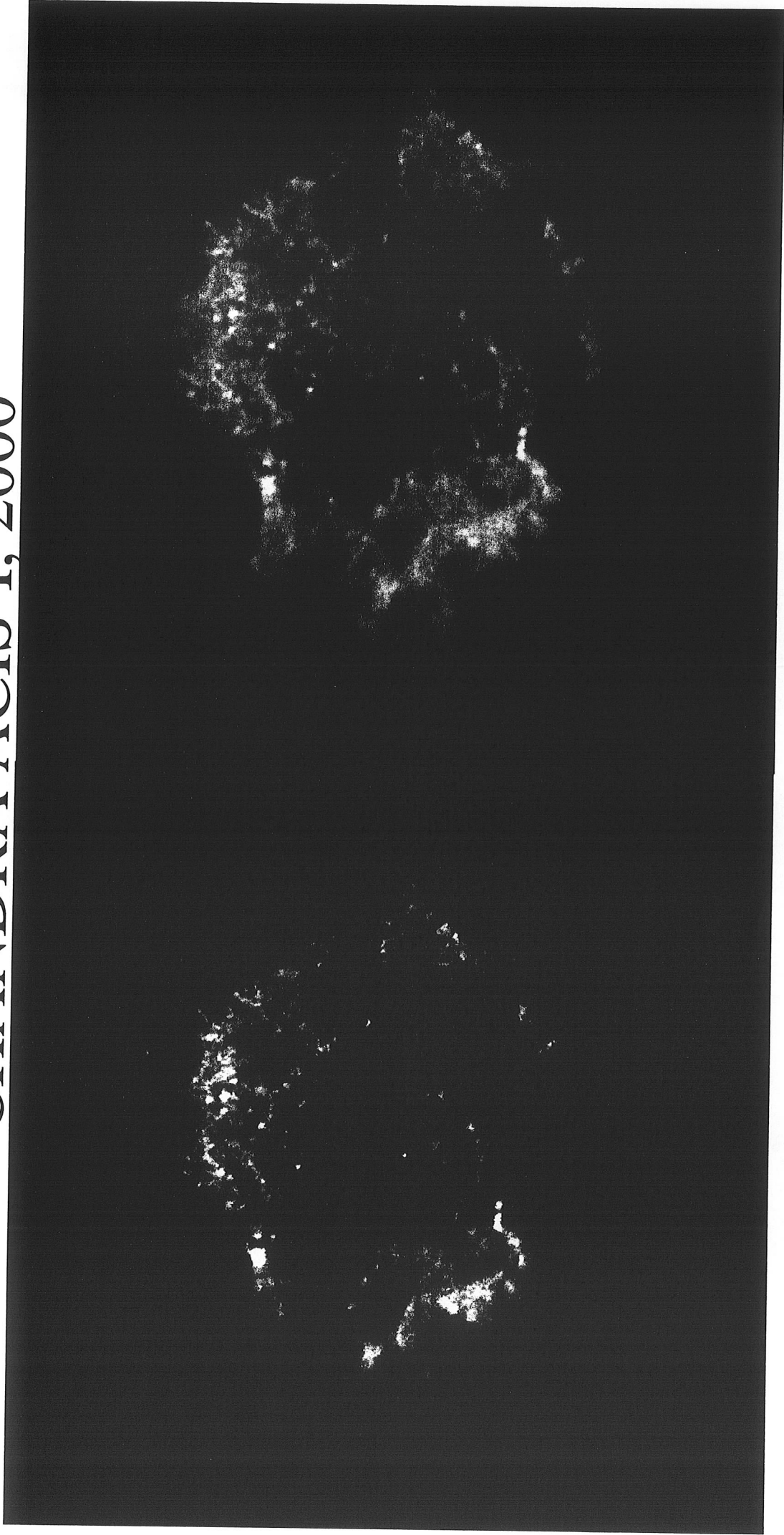
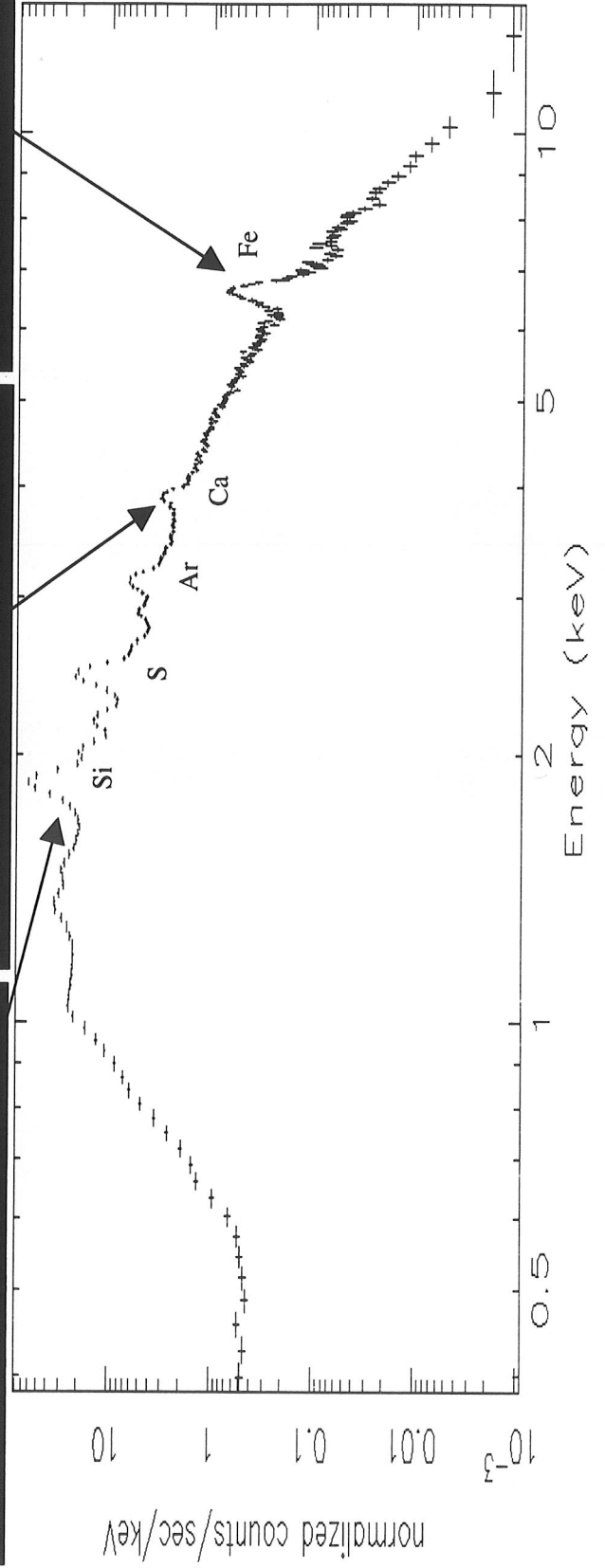
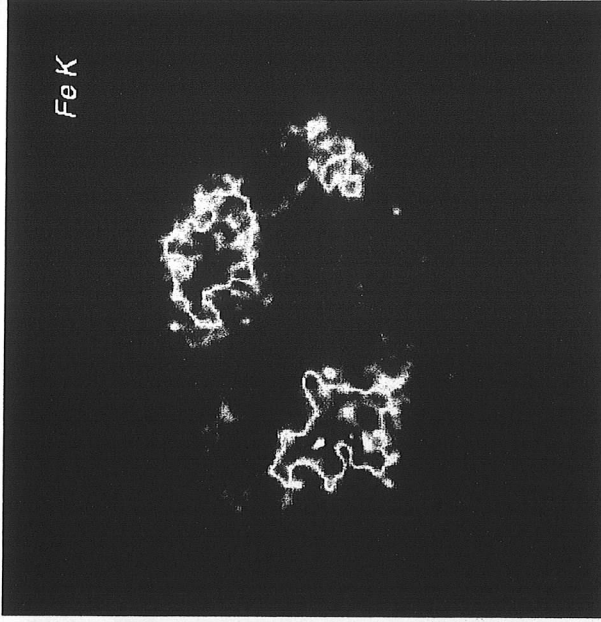
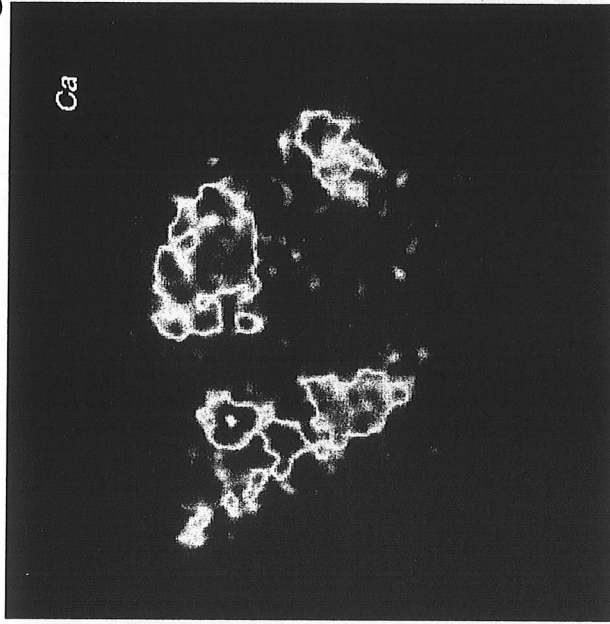
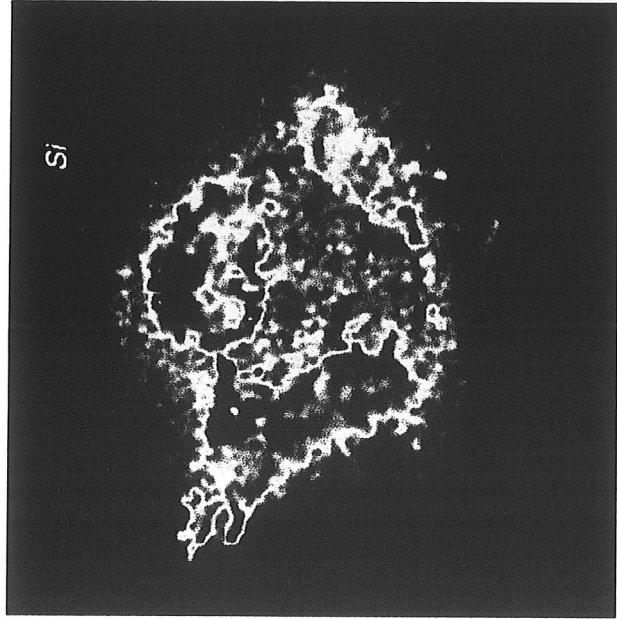


Image 0.2 - 10 keV

The red, green, and blue regions in this Chandra X-ray image of the supernova remnant Cassiopeia A show where the intensity of low, medium, and high energy X rays, respectively, is greatest. The red material on the left outer edge is enriched in iron, whereas the bright greenish white region on the lower left is enriched in silicon and sulfur. In the blue region on the right edge, low/medium energy X rays have been filtered out by a cloud of dust and gas in the remnant.

Figure 10

CHANDRA ACIS-I 2000 Images dans les Raies



Dans la figure 12, sont présentées les performances des spectroimageurs passés, présents et futurs. On y observe une tendance évidente à l'accroissement global de la résolution spectrale et spatiale, allant de pair avec l'abandon progressif de la spectrométrie dispersive en longueur d'onde, qui se trouve confinée dans la région de plus basse énergie du spectre X avec la future mission Constellation-X, pour disparaître avec la future mission XEUS.

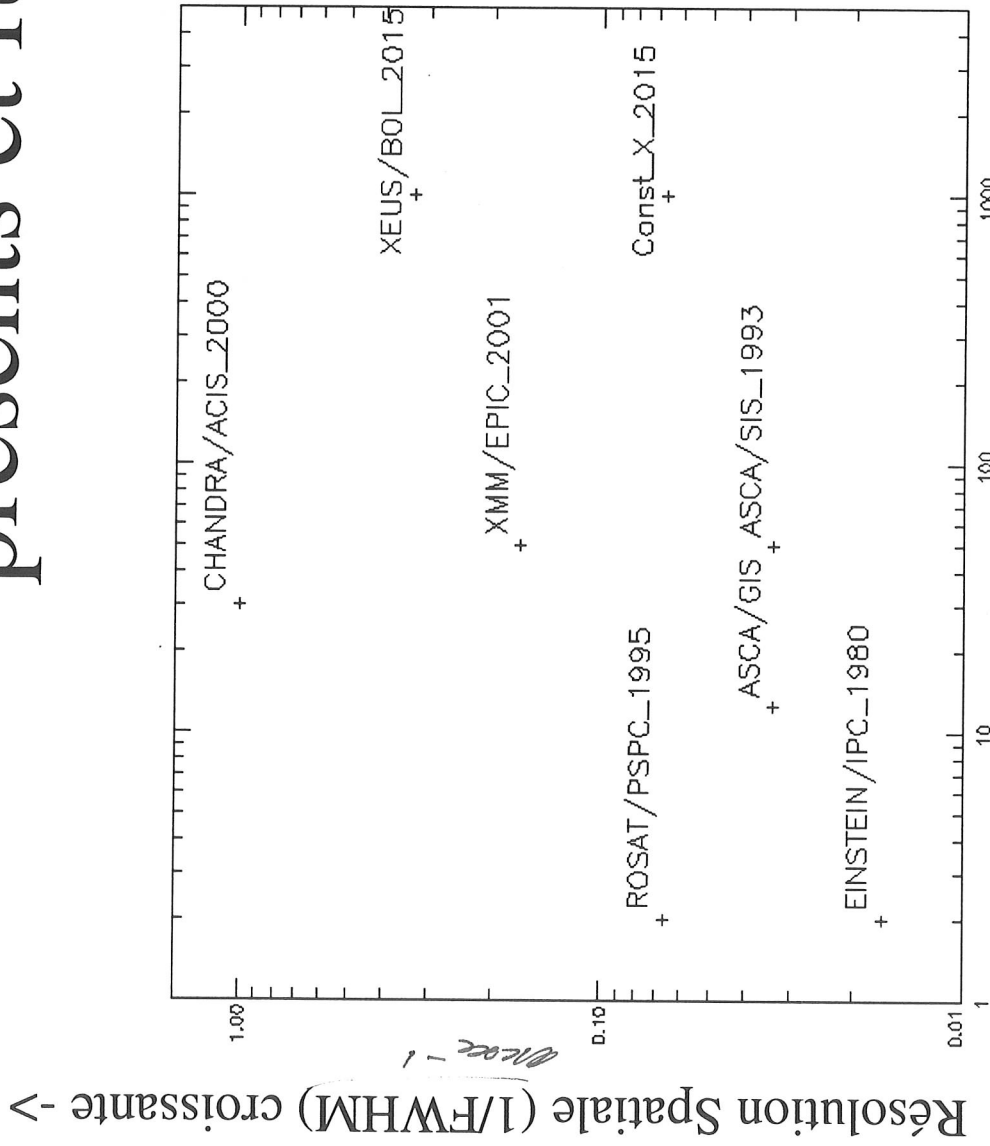
En conclusion, le domaine du rayonnement X est une partie, et l'une des rares parties du spectre électromagnétique, où il est possible d'observer en spectroimagerie.

On constate, d'autre part, en examinant l'évolution des différentes missions X, une tendance à remplacer tous les instruments par un spectroimageur.

L'utilisation de spectroimageurs de hautes performances sera nécessaire pour tirer le meilleur parti des futures missions X et des investissements lourds qui seront engagés pour accroître leur surface effective.

Dans l'état de l'art, seuls les détecteurs cryogéniques sont susceptibles d'être à la base de ces spectroimageurs de hautes performances.

Les spectro-imageurs X présents et futurs



Trois familles :
 Les Compteurs à Gaz
 (1980-1995)
 Les CCDs
 (1993-2000)
 Les Bolomètres
 (>2005)

Résolution Spectrale (E/ΔE) croissante ->

Figure 12

II- Les futures missions

Constellation X (Con-X):

La mission de la NASA consistera, suivant la configuration du Goddard Space Flight Center/ Smithsonian Astrophysical Observatory (GSFC/SAO) en quatre sondes placées en orbite autour du point de Lagrange L2 du système terre soleil (voir figure 13). La surface effective est augmentée en multipliant le nombre de télescopes et de sondes.

Le domaine d'énergie est étendu vers les hautes énergies par une distance focale allongée à 10 m et l'utilisation de miroirs multicouches.

Les sondes seront lancées sous une configuration compacte et déployées dans l'espace (figure 14).

Sur chaque vaisseau, seront installés trois télescopes à haute énergie (HXT) et un télescope (SXT) réalisant de la spectro-imagerie à basse énergie à l'aide d'une matrice de microcalorimètres (figure 15).

A très basse énergie seulement, on utilisera un spectromètre dispersif en longueur d'onde, un réseau par réflexion monté immédiatement derrière le miroir du SXT (suivant la configuration adoptée pour XMM-Newton) pour disperser la moitié du faisceau sur des détecteurs CCD.

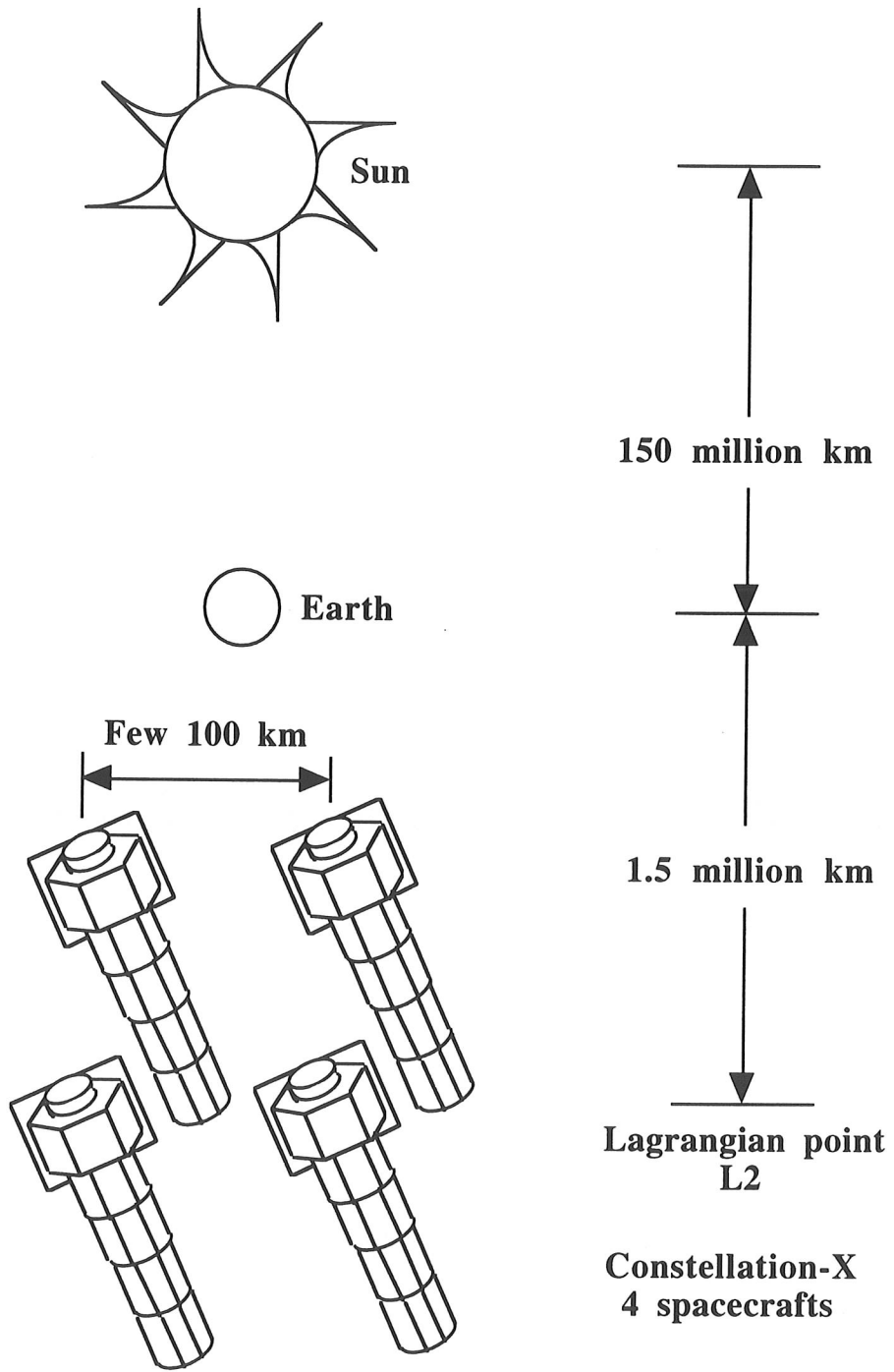
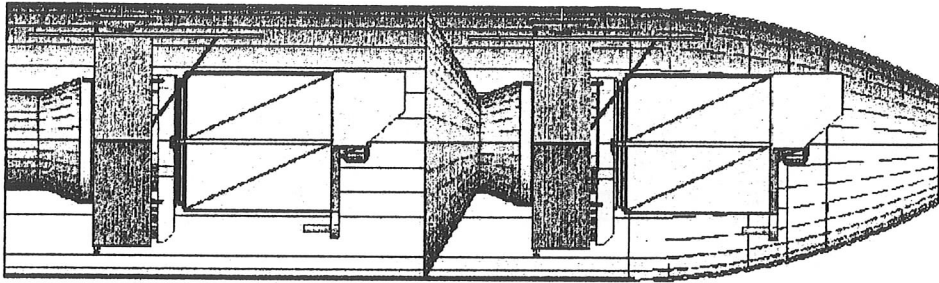
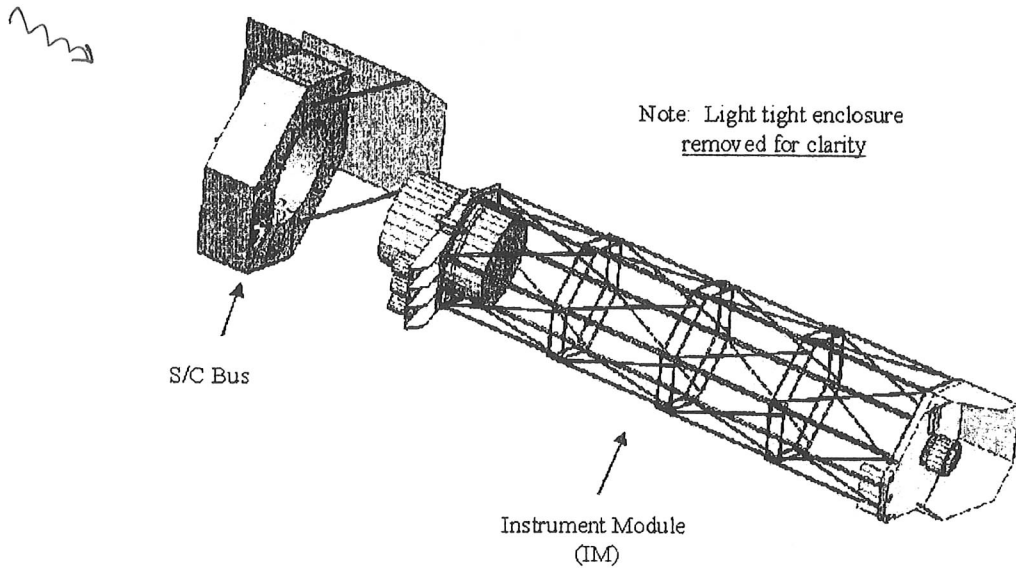


Figure 13



Atlas V DM Launch Configuration - Side View



Note: Light tight enclosure
removed for clarity

S/C Bus

Instrument Module
(IM)

Exploded View (Top/Side) - Spacecraft

Figure 14

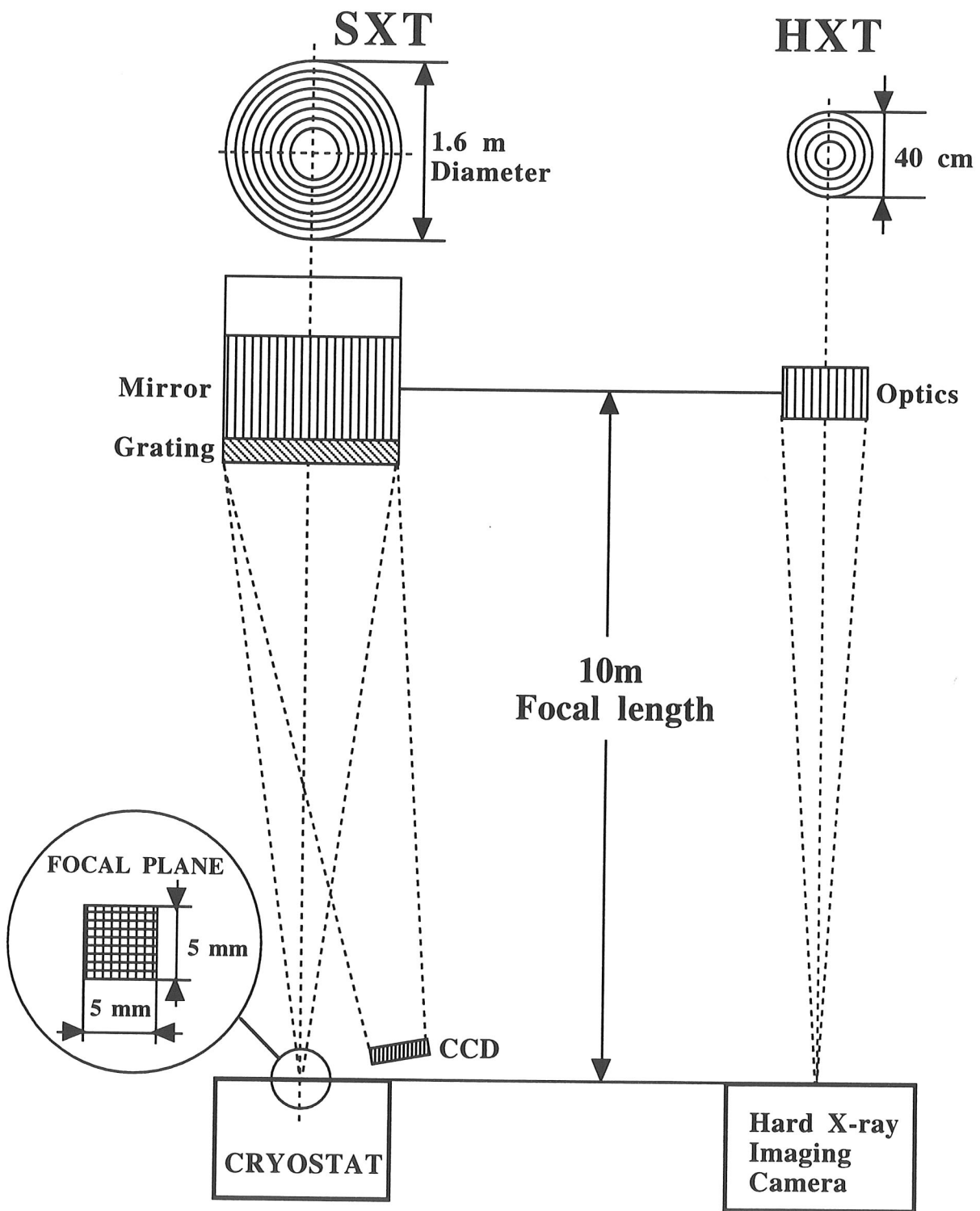


Figure 15

Taux de comptage $\approx 50 \text{ s}^{-1}$

XEUS :

La mission XEUS de l'agence spatiale européenne consistera en deux satellites en orbite terrestre basse (figure 16), positionnés dynamiquement l'un par rapport à l'autre à mieux que le mm suivant les trois axes.

Cette configuration permettra d'étendre la distance focale jusqu'à 50 m et d'utiliser un seul miroir (multitonnes) pour obtenir une surface effective plus de deux ordres de grandeur supérieure à celle de la mission actuelle XMM-Newton.

Ce miroir sera en partie assemblé en orbite grâce à la station spatiale internationale. Le satellite détecteur pourra être remplacé après 5 ans d'opération de façon à disposer de la dernière technologie en matière de détection.

Un profil en temps et en orbite de la mission est présenté dans la figure 17.

La spectro-imagerie sera réalisée à basse énergie ($< 2 \text{ keV}$) par des matrices de diodes supraconductrices à effet tunnel (développées à L'ESTEC) et sur tout le domaine d'énergie par des matrices de microcalorimètres.

Il n'est pas prévu d'utiliser de spectromètres dispersifs en longueur d'onde.

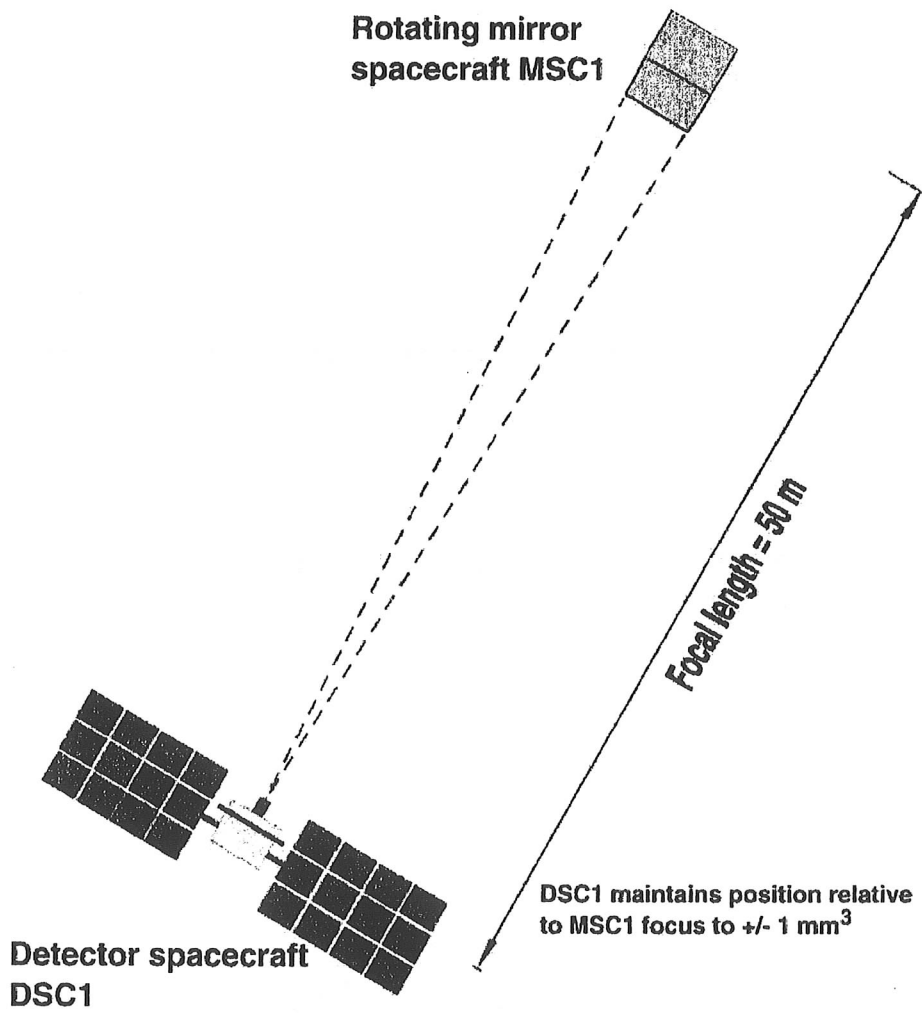


Figure 16

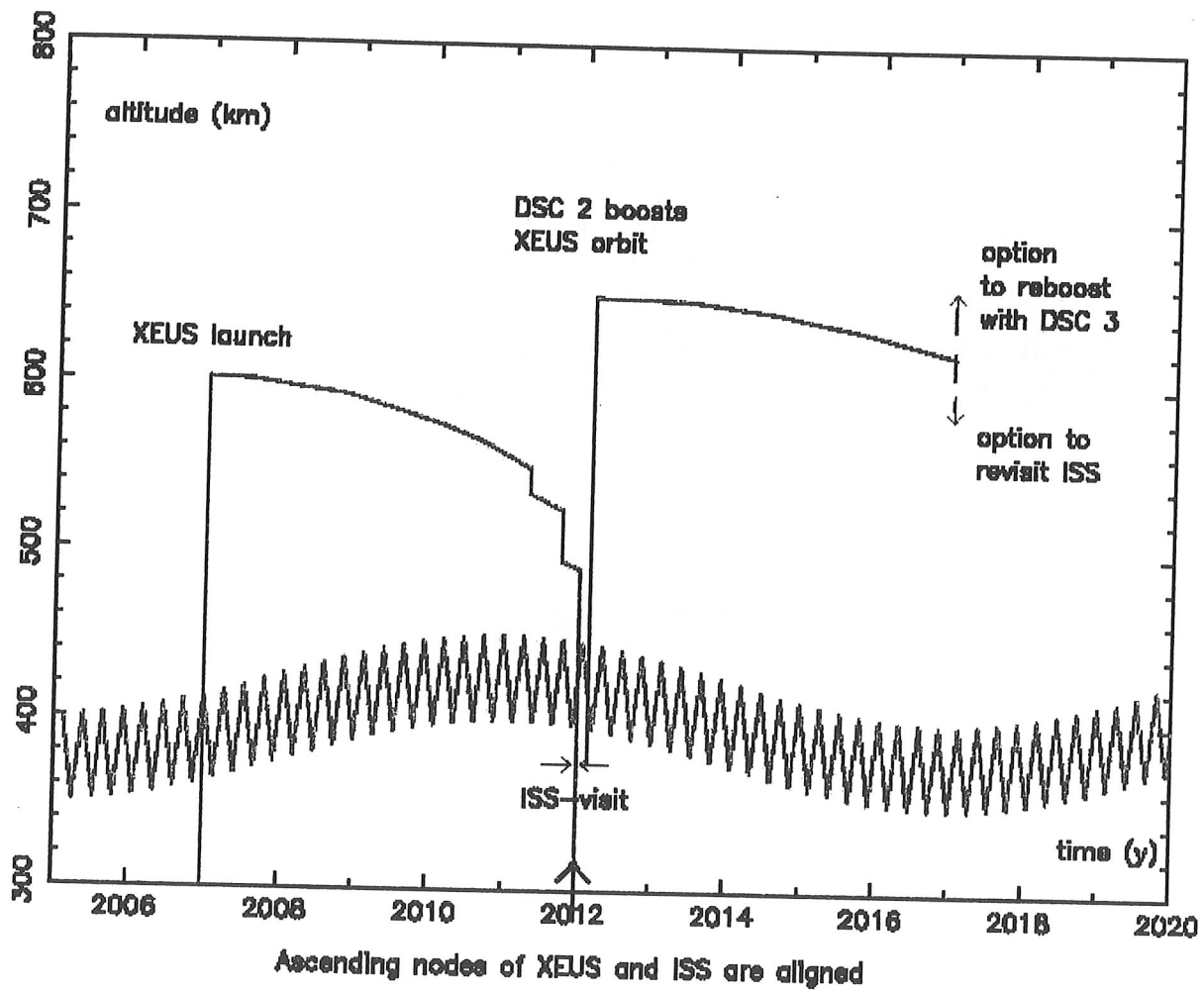


Figure 17

Les caractéristiques des deux missions sont résumées dans le tableau ci-dessous.

	XEUS	Con-X
Distance focale	50 m	10m
Surface effective	6 m ² @ 1 keV 3 m ² @ 8 keV	1.5 m ² @ 1 keV 0.6 m ² @ 6 keV
Résolution angulaire	2 à 5 secondes d'arc	15 secondes d'arc
Champ de vue Narrow Field Wide Field	1 minute d'arc 5 minutes d'arc	2.5 minutes d'arc
Résolution spectrale	2 eV @ 1 keV 5 eV @ 8 keV	5 eV

Pour XEUS, on définit un champ de vue étroit de 1 minute d'arc à 100 secondes d'arc que l'on espère équiper avec des détecteurs cryogéniques.

Le champ de vue large, jusqu'à 5 minutes d'arc et au delà, sera vraisemblablement équipé de CCDs.

Les spécifications des deux instruments sont proches. Chaque mission demande une résolution d'au moins 5 eV (FWHM) sur tout le domaine d'énergie.

La résolution angulaire correspond au niveau du plan focal à @ 700 μm pour Con-X et @ 500 μm pour XEUS.

Un suréchantillonnage de la tâche focale par un facteur raisonnable (2 à 3) implique une taille de pixel pas plus grande que 250 x 250 μm^2 .

Avec cette taille de pixel, une matrice de @ 1000 pixels (32 x 32 pixels) couvrira la totalité du champ de vue de Con-X alors qu'une mosaïque de quatre de ces matrices sera nécessaire pour le champ de vue de XEUS.

L'investissement considérable réalisé pour augmenter la surface effective des miroirs à haute énergie justifierait qu'un effort soit fait pour atteindre une efficacité quantique @ 100% à 10 keV.

XEUS concentrera toute sa surface effective sur un seul plan focal (16 plans focaux pour Con-X), ce qui pourra imposer des contraintes sur le taux de comptage admissible par les détecteurs.

III- Les développements de détecteurs cryogéniques :

La mission ASTRO-E :

La mission japonaise ASTRO-E a été perdue lors de son lancement en Janvier 2000. Elle aurait, sinon, permis de tester les premiers microcalorimètres (instrument XRS) dans l'espace.

On ne peut pas parler de spectro-imageur, puisqu'il s'agit d'une double barrette de 2 fois 16 pixels.

De toute façon, avec 100 secondes d'arc de résolution angulaire, l'optique d'ASTRO-E ne permet pas de faire une réelle imagerie.

Chaque pixel (voir figure 18) mesure $1230 \times 320 \mu\text{m}^2$ et consiste en un absorbeur de HgTe de $8 \mu\text{m}$ d'épaisseur collé sur une plaque en silicium sur laquelle le thermomètre a été réalisé par implantation ionique. Cette plaque est supportée par des poutrelles minces de silicium servant d'impédance thermique vers la source froide.

Le nombre de pixel est suffisamment faible pour permettre l'utilisation d'une chaîne de lecture par pixel.

La résolution obtenue est de 12 eV @ 6 keV.

Chaque absorbeur étant collé individuellement sur les senseurs, il s'agit d'une solution qui ne pourra pas être extrapolée aux missions de nouvelle génération.

Un processus de réalisation collective est nécessaire pour l'obtention de matrices d'un millier de pixels.

Une mission de remplacement, ASTRO-E2, a été approuvée, qui doit être lancée en Janvier-Février 2005 avec semble-t-il le même instrument.

The XRS instrument on ASTRO-E launch failure in January 2000

- A bilinear array of 32 pixels
- 1230x320 μm^2 pixel size
8 μm thick HgTe absorber
- Ion implanted silicon sensor
- One read-out channel per pixel
- 95 % filling factor
- 12 eV @ 6 keV

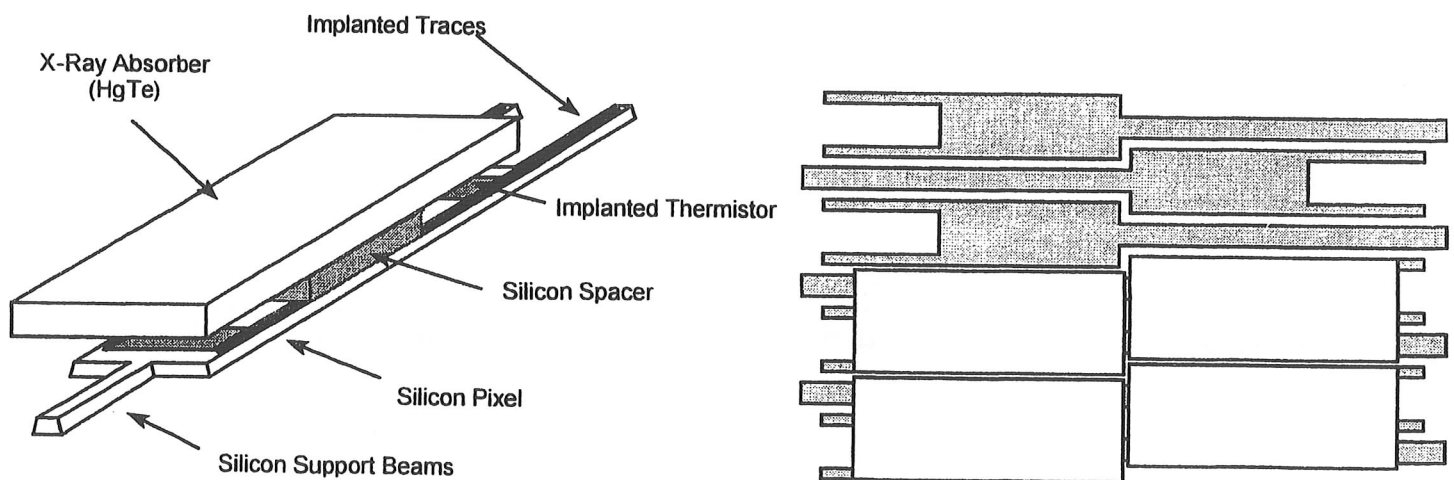


Figure 18

Les missions de nouvelle génération seront lancées au mieux à l'horizon 2010-2015 et cela laisse un peu de temps pour le développement.

3 voies principales sont explorées :

- Les microcalorimètres à transition supraconductrice (TES).
- Les microcalorimètres à semiconducteur (NTD Ge, Si)
- Les diodes supraconductrices à effet tunnel (STJ).

Les microcalorimètres à transition supraconductrice (TES) :

Deux développements sont en cours aux Etats-Unis pour Con-X et en Europe pour XEUS, qui sont très comparables. Des résultats de test sur des prototypes sont présentés dans le tableau ci-dessous.

	dE(eV) @ 5.9 keV	Therm.	T(mK)	Absorbeur
SRON	4.5	Ti/Au	96	Cu
Un.-Jyvaskyla	9.2	Ti/Au	150	Bi
NIST	4.5	Mo/Cu	93	TES
GSFC	6.1	Mo/Au	106	TES

Le thermomètre est un multicouche dont on ajuste la température de transition supraconductrice à l'aide de l'effet de proximité entre un métal résistif et un métal supraconducteur, Ti/Au en Europe, Mo/Cu ou Au aux Etats-Unis.

Le multicouche est déposé sur une membrane de nitrure de silicium (voir figure 19) dont on ajuste par des découpes l'impédance thermique vers la source froide, constituée par un treillis de silicium laissé en place après dissolution chimique de la plaquette d'origine. L'absorbeur est déposé suivant une structure en « champignon », pour découvrir une partie de la membrane de Si_3N_4 où sont déposées les électrodes. Les résultats sont bons au niveau du microcalorimètre prototype monopixel.

Le procédé de réalisation est susceptible d'une réalisation collective.

Les problèmes sont cependant nombreux.

Il faut maintenir, au niveau de la réalisation collective une homogénéité des paramètres des senseurs (T_c , ..), puisqu'un ajustement individuel des paramètres de fonctionnement des pixels est impossible au niveau d'une matrice.

La sortie des signaux de chaque pixel sans diaphonie est aussi un problème épineux.

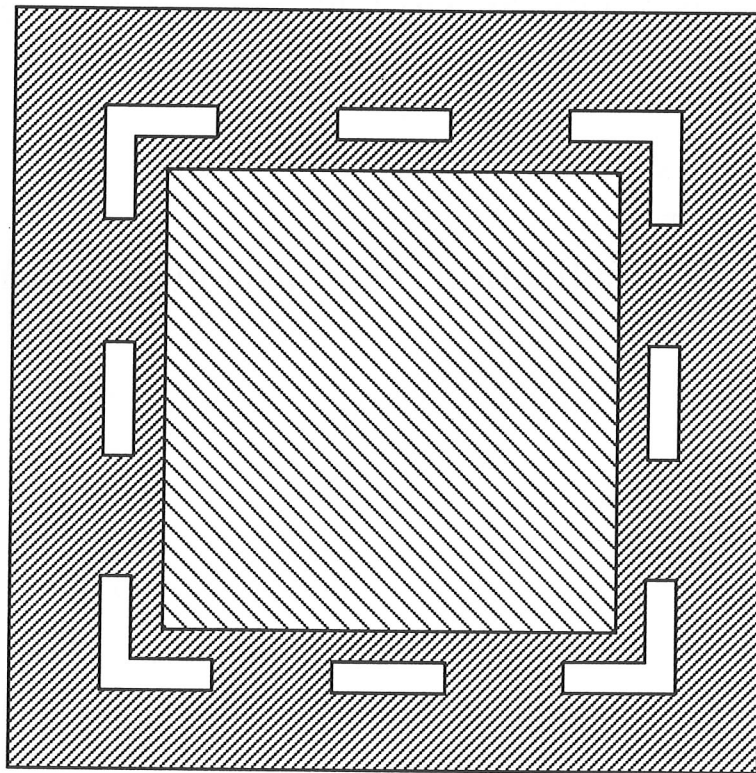
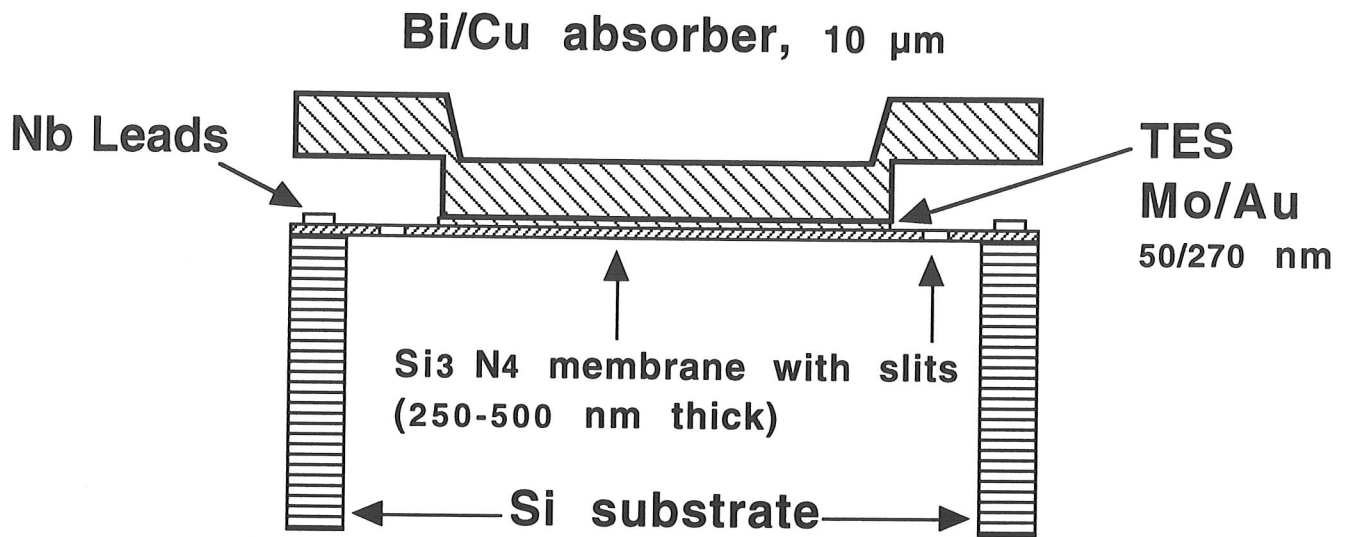


Figure 19

Les microcalorimètres à semiconducteur :

Pour Con-X, le groupe du SAO a exploré une solution à base de NTD Germanium. L'idée est de réaliser de façon collective une barrette de pixels (voir figure 20). Le Ge NTD est implanté ioniquement et métallisé à travers un peigne de silicium pour la réalisation des contacts ohmiques. La plaquette de Germanium est ensuite reportée sur une tranche de silicium pour être découpée en pixels munis d'électrodes qui sont alors soudées par ultrasons sur les pistes correspondantes d'une plaquette de saphir.

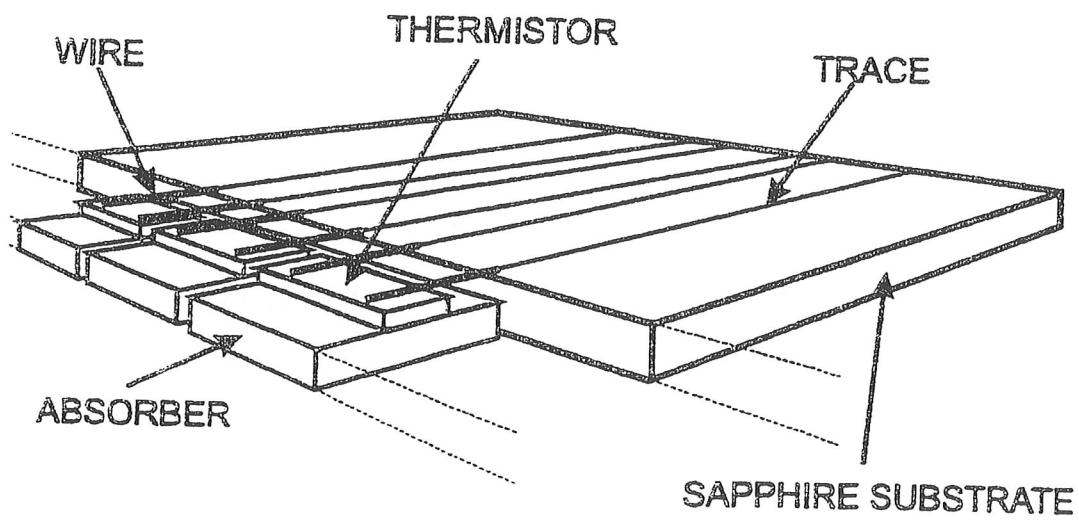
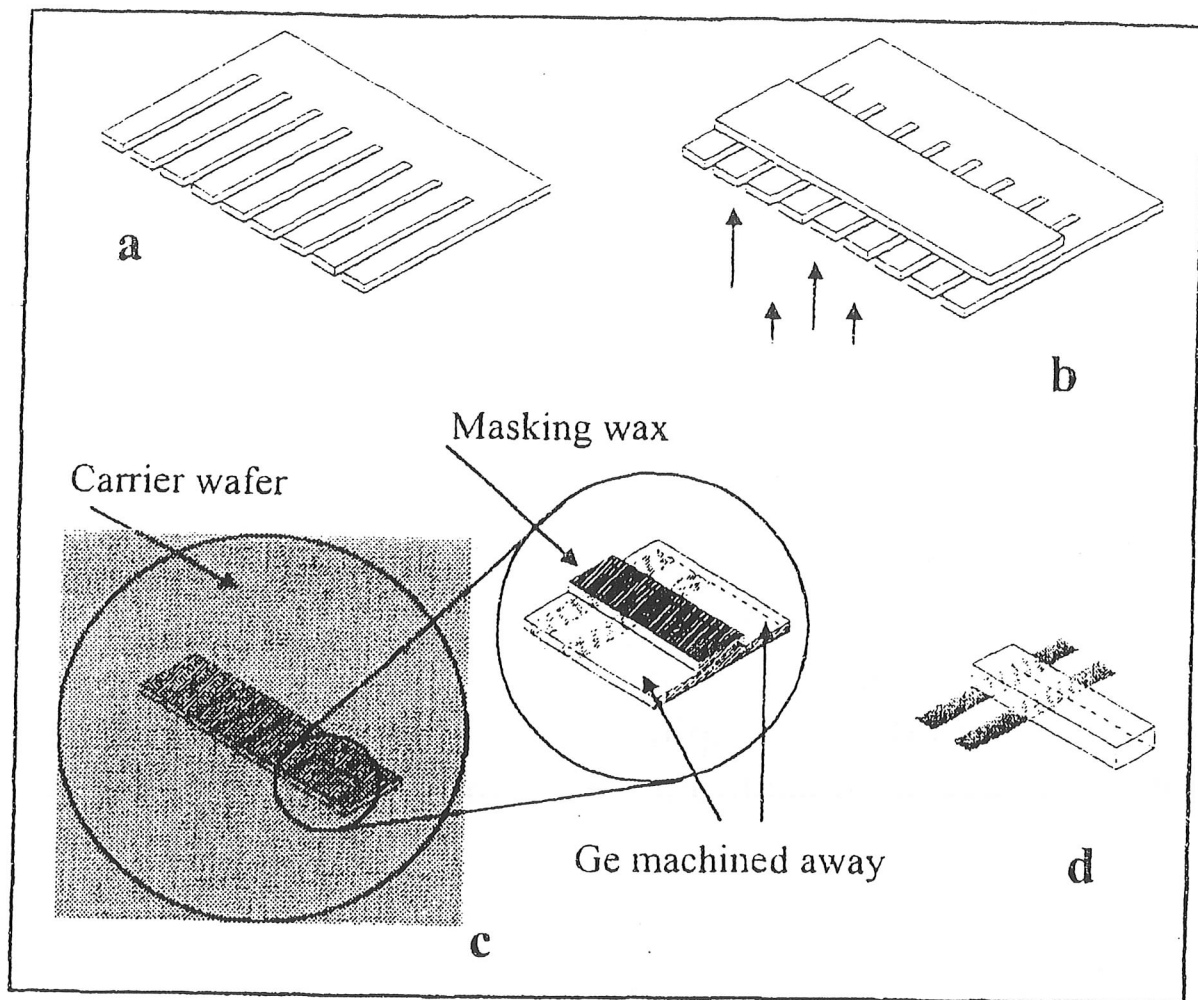
La suspension mécanique et l'impédance thermique vers la source froide sont réalisées par les électrodes. Un absorbeur, de l'étain par exemple, peut alors être collé à la barrette de senseurs.

Ces barrettes de microcalorimètres peuvent alors être empilées pour former une matrice.

L'avantage d'une telle solution est que chaque barrette peut être testée et sélectionnée avant empilement, de façon à améliorer le rendement de fabrication et homogénéiser les paramètres de fonctionnement.

L'empilement ne pose pas de problème compte tenu de la profondeur de champ associée aux grandes distances focales des télescopes de nouvelle génération.

Les performances au niveau du monopixel sont bonnes (résolution meilleure que 8 eV @ 6 keV) et devraient être améliorées.



NTD array technology: a $(1 \times n)$ component.

Figure 20

Pour XEUS, un développement a été entrepris au Service d'Astrophysique du centre d'études de Saclay pour adapter une matrice de bolomètres initialement développée pour l'infrarouge à la spectroimagerie X (voir figure 21).

Le senseur est réalisée sur un substrat double SOI. Le silicium est implanté et diffusé à haute température. Ce procédé permet d'obtenir des thermomètres de grand volume et de dopage homogène, dont les performances en terme de bruit devraient se rapprocher du Germanium NTD.

L'impédance vers la source froide est formée par des poutrelles de silicium qui supportent des électrodes en TiN.

Les absorbeurs sont rapportés collectivement sur les senseurs par hybridation puis libérés de leur support. L'ensemble du procédé de réalisation est collectif et correspond à une technologie silicium standardisée.

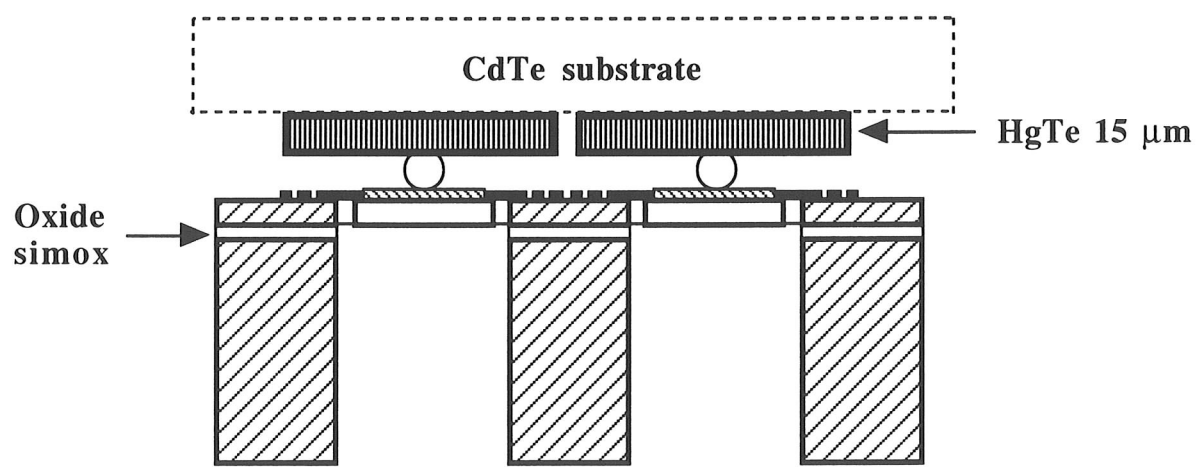
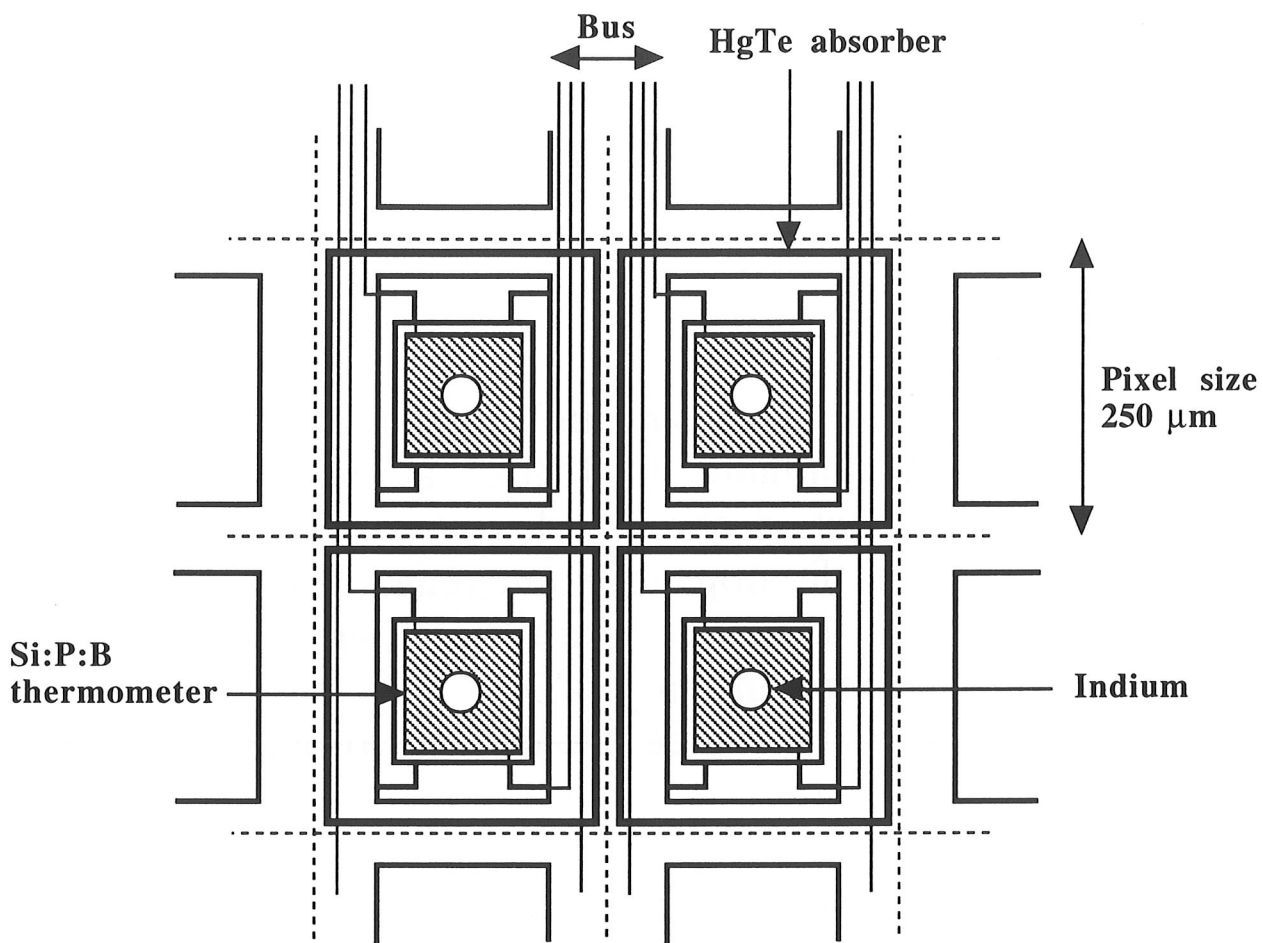


Figure 21

Les diodes supraconductrices à effet tunnel :

Un développement est poursuivi à l'ESTEC (European Space Research and Technology Center de l'ESA) pour réaliser un spectroimageur pour XEUS.

La figure 22 présente le schéma de principe d'une diode supraconductrice à effet tunnel (STJ) adaptée à la détection X à basse énergie.

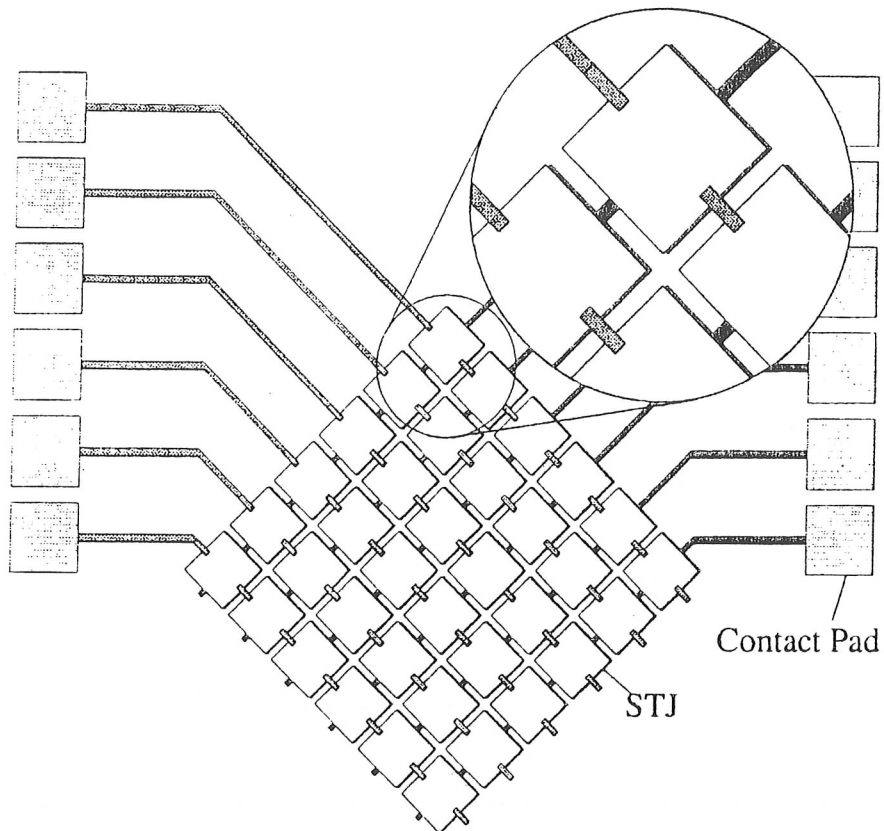
Il s'agit d'un sandwich NbN/Ta/Al/SiO_x/Al/Ta/substrat d'épaisseurs respectives :

20 nm / 30 nm / 5 nm / 1 nm / 5 nm / 200 nm.

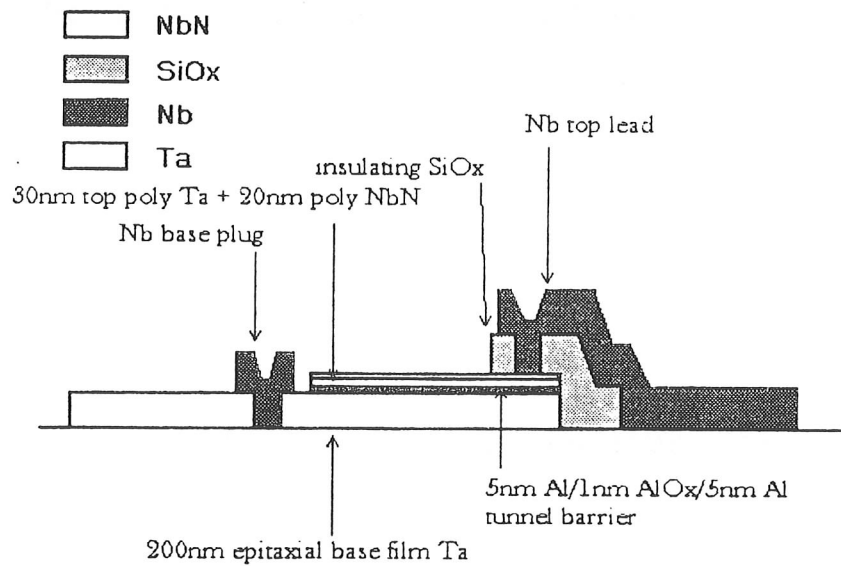
L'électrode supérieure est amincie de façon à privilégier une absorption des X dans les 200 nm de Tantale épitaxié de l'électrode de base dont la meilleure qualité cristalline est compatible avec une bonne résolution en énergie. La résolution en énergie est bonne à basse énergie et se dégrade à plus haute énergie (4.6 eV @ 525 eV, 20.5 eV @ 6 keV).

Il semble difficile d'augmenter, au delà de quelques centaines de nm, l'épaisseur de l'électrode de base sans dégrader sérieusement la résolution en énergie, compte tenu de fluctuations dépendantes de la position dans la réponse de la diode.

L'efficacité quantique sera, donc, limitée par l'épaisseur de l'électrode de base et raisonnable seulement pour des X de basse énergie (≤ 2 keV).



Principle of the matrix read-out scheme: All top films of a line and all base films of a column are connected to a common bias and processing circuit



General layout of the Superconducting Tunnel Junction

$< 2 \text{ } \mu\text{eV}$

Figure 22

La sortie du signal de chaque pixel posera pour les matrices de STJ un problème encore plus insurmontable que pour les matrices de microcalorimètres, car il est impossible de déposer les électrodes sous les absorbeurs, qui pour les STJ, sont aussi les senseurs.

Une partie des connexions restera donc en face avant, dégradant d'autant l'efficacité quantique.

Une solution possible, sans obscurcissement mais au prix d'une dégradation de la résolution en énergie, est le schéma de lecture présenté figure 22, qui requiert $2N$ voies de lecture pour une matrice de $N \times N$ pixels.

IV- Conclusion

Quelle que soit la voie choisie, microcalorimètre ou STJ, les tests sur des prototypes monopixel démontrent déjà des performances proches ou compatibles avec les spécifications des futures missions.

De sérieux problèmes restent cependant à résoudre :

- La réalisation de matrices de pixels de caractéristiques de fonctionnement suffisamment homogènes.
- L'extraction du signal de chaque pixel sans dégrader la QE ou la résolution en énergie et sans diaphonie.
- Le multiplexage de matrices de l'ordre d'un millier de pixels.

Une voie alternative aux matrices de pixel est aussi explorée avec les spectroimageurs sensibles à la position comme les DROIDS (Distributed Read-Out Imaging Device) à base de STJ ou les POSTs (Position Sensing Transition edge sensor) qui dérivent des microcalorimètres.

Les difficultés à résoudre pour l'obtention d'un plan focal de spectroimageurs X de nouvelle génération semblent déjà assez formidables pour ne pas mentionner les problèmes d'intendance comme la disposition de cryogénie spatiale à basse température (< 100 mK), parfaitement stabilisée et capable d'évacuer la puissance non négligeable dissipée par le plan focal, ou encore la capacité de traitement temps réel, nécessaire à bord, pour extraire des courbes thermiques de chaque pixel les paramètres du signal sans dégradation des performances.

Un lancement à l'horizon 2010-2015 ne laisse pas trop de temps pour la réalisation de telles missions !

Bibliographie

Exploring the X-ray Universe
P.A. Charles & F.D. Seward
Cambridge Univ. Press 1995

High Energy Astrophysics
Vol 1, particles, photons and their detection
Malcolm S. Longair
Cambridge Univ. Press 1992 (2ème édition)

Astrophysique, Méthodes physiques de
l'observation
P. Léna
InterEditions/CNRS Editions 1996

X-ray detectors in astronomy
G.W. Fraser
Cambridge Univ. Press 1989