

**Ce cours est enregistré et
diffusé sur la plateforme
MEDIASERVER de l'UNIGE**



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

Astronomie générale - Les grandes missions spatiales pour l'Astrophysique - Saison 3

Astronomie X

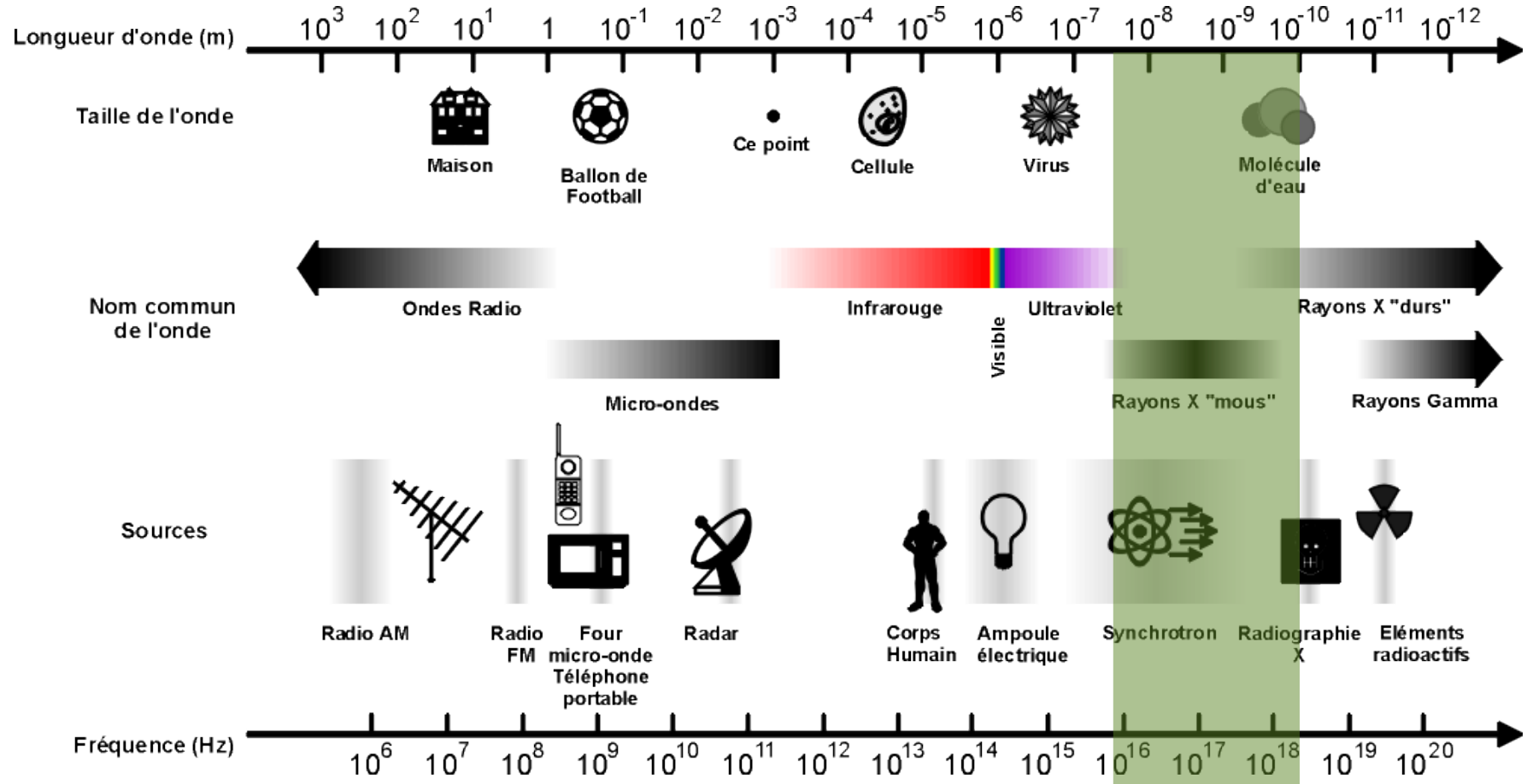
Stéphane Paltani



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

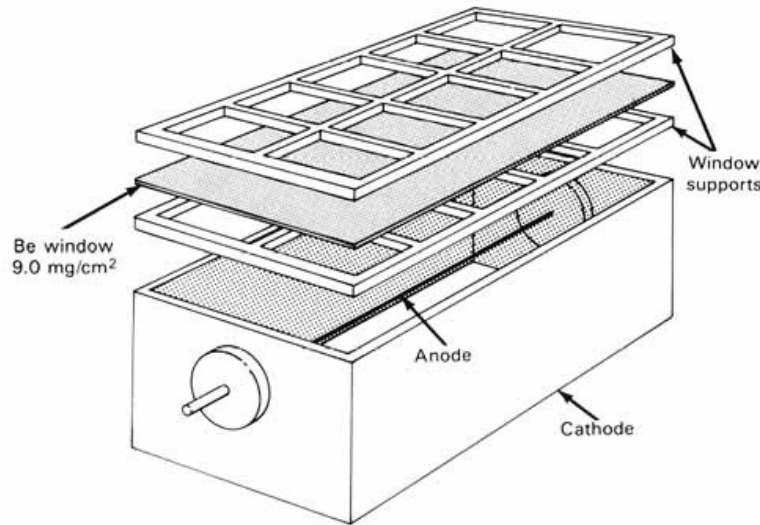
FACULTÉ DES SCIENCES
Département d'astronomie

Les rayons X



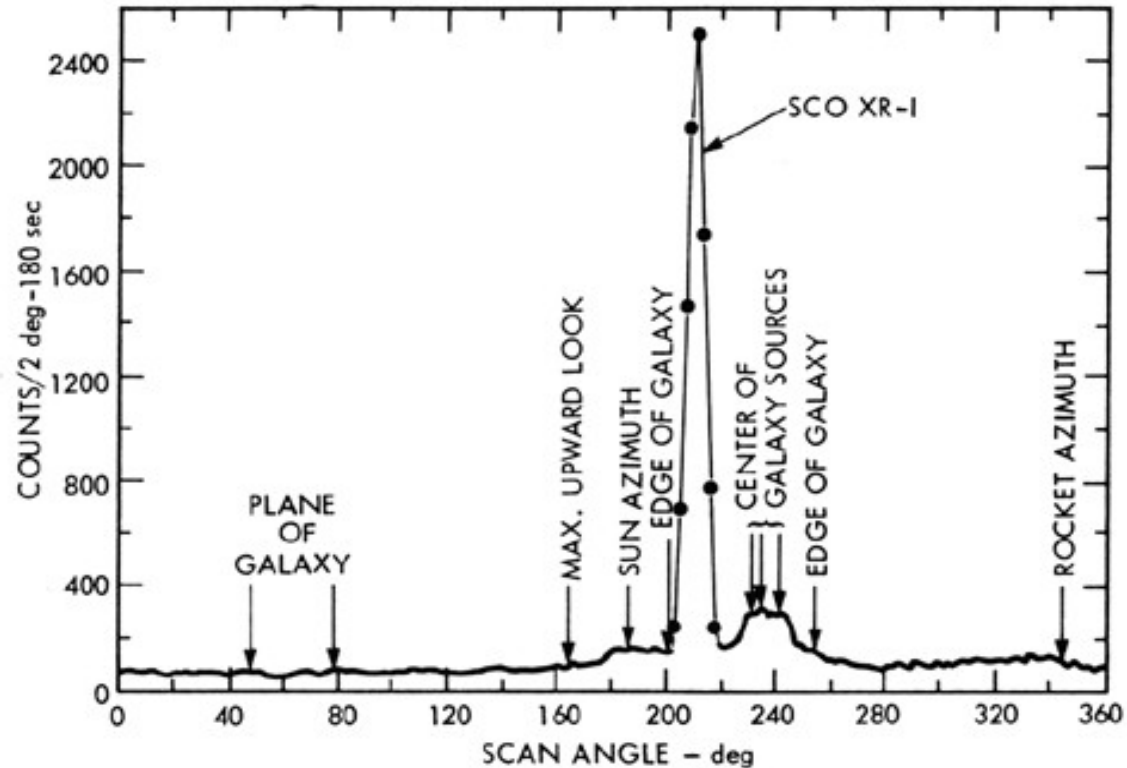
Naissance de l'astronomie X

- 1962: Fusée Aerobee 170
- But: Détecter des rayons X de la Lune
- Collimateur et compteur proportionnel

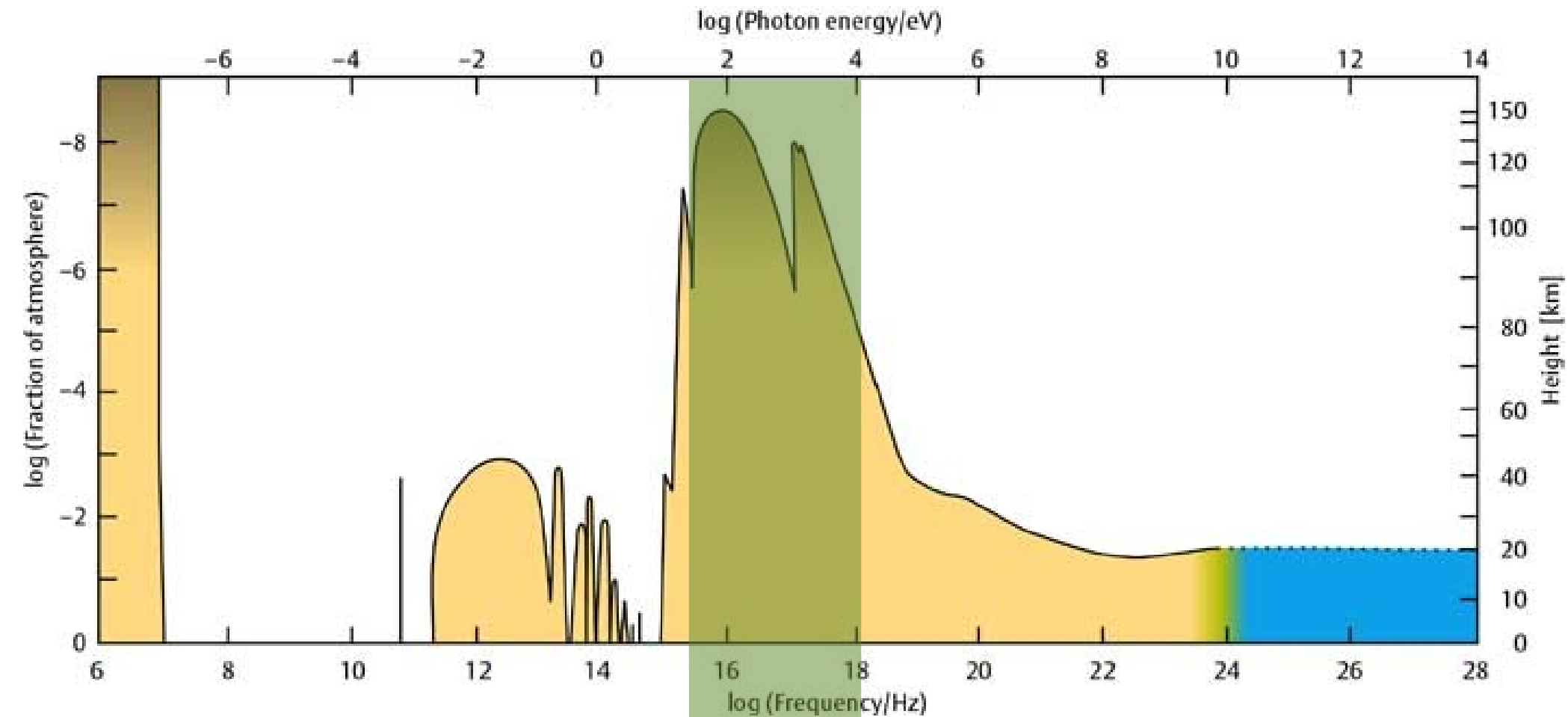


Scorpio X-1

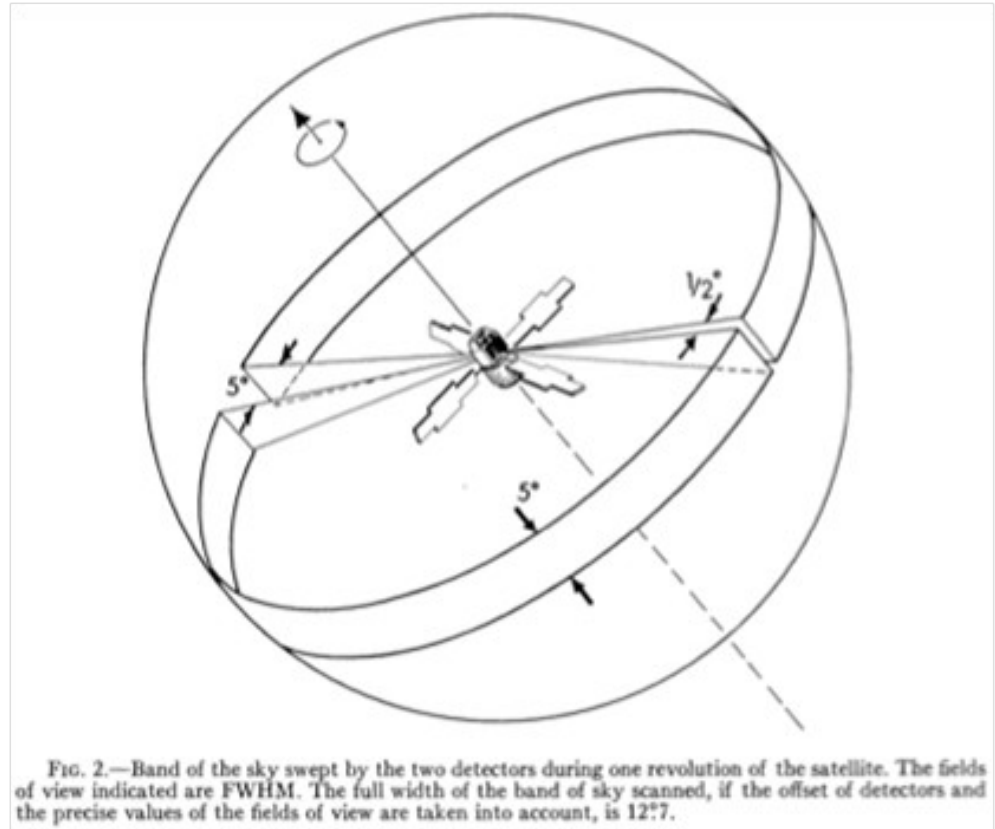
- Prix Nobel de Physique 2002 pour Riccardo Giacconi



L'atmosphère terrestre

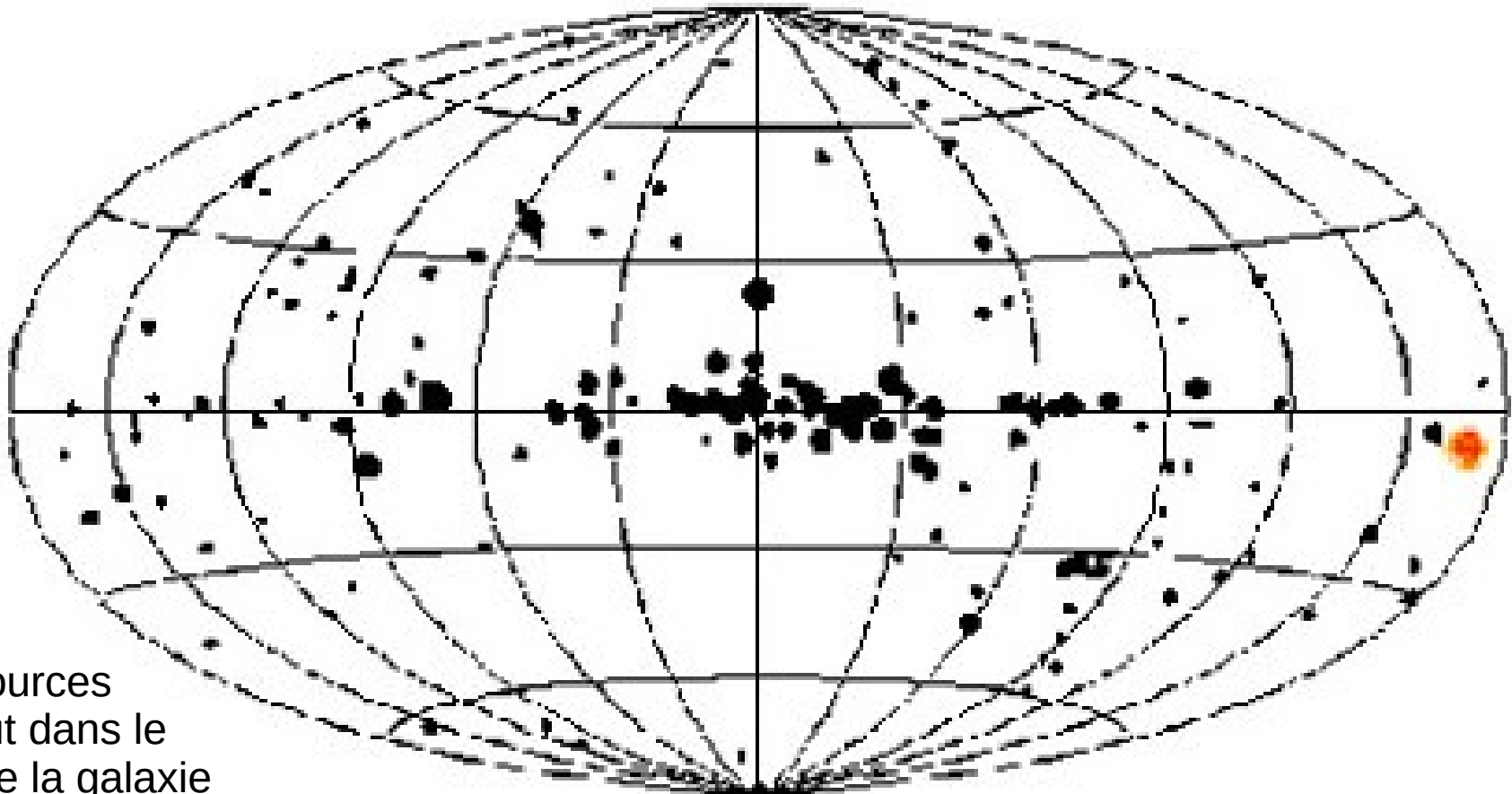


Uhuru (1970-1973)



Deux collimateurs, observation de tout le ciel

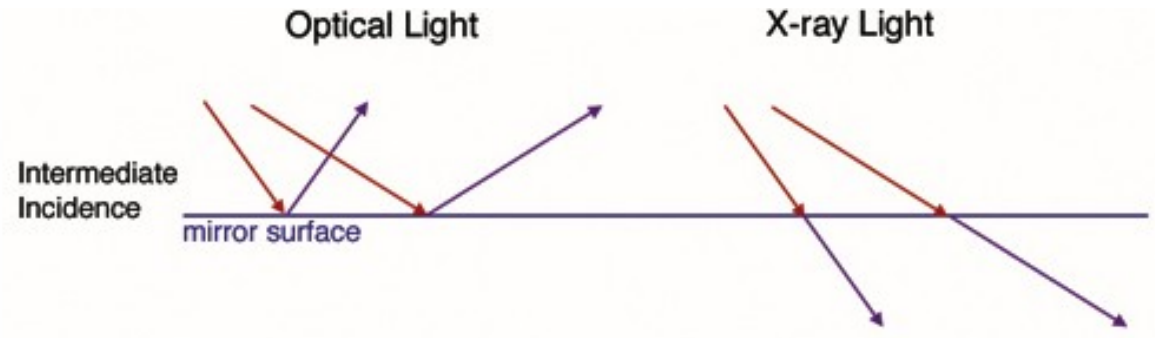
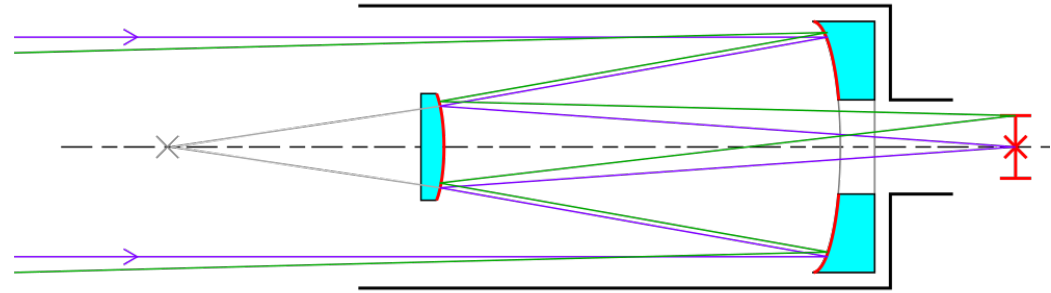
Première carte du ciel en rayons X



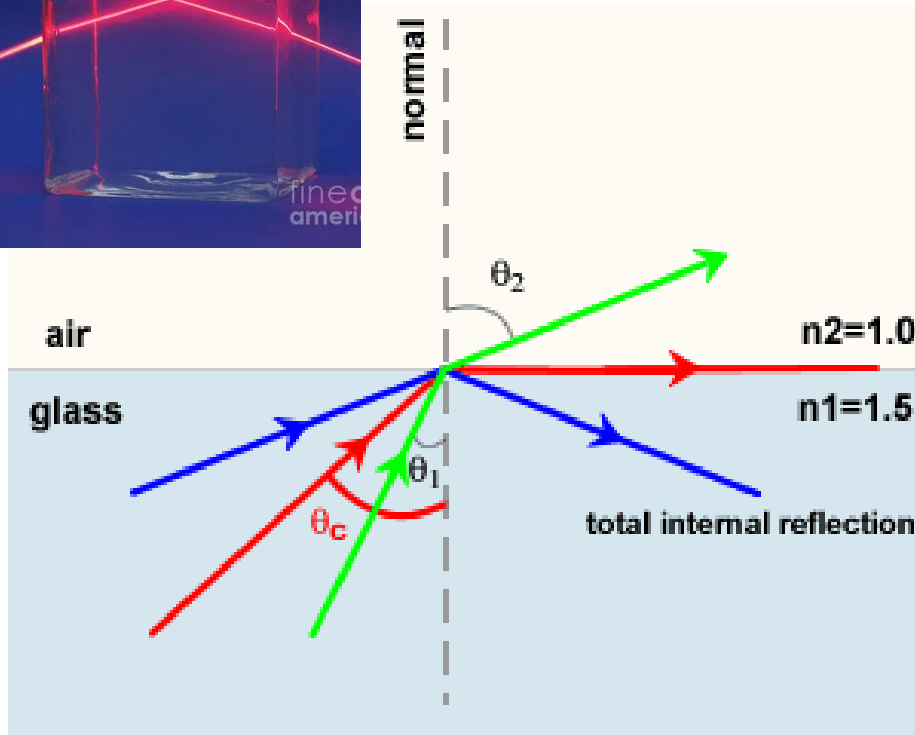
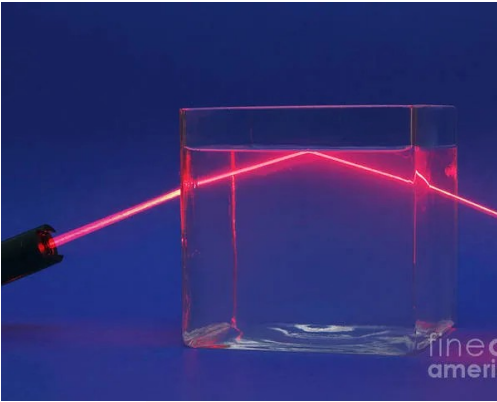
339 sources
Surtout dans le
plan de la galaxie

Télescopes à rayons X

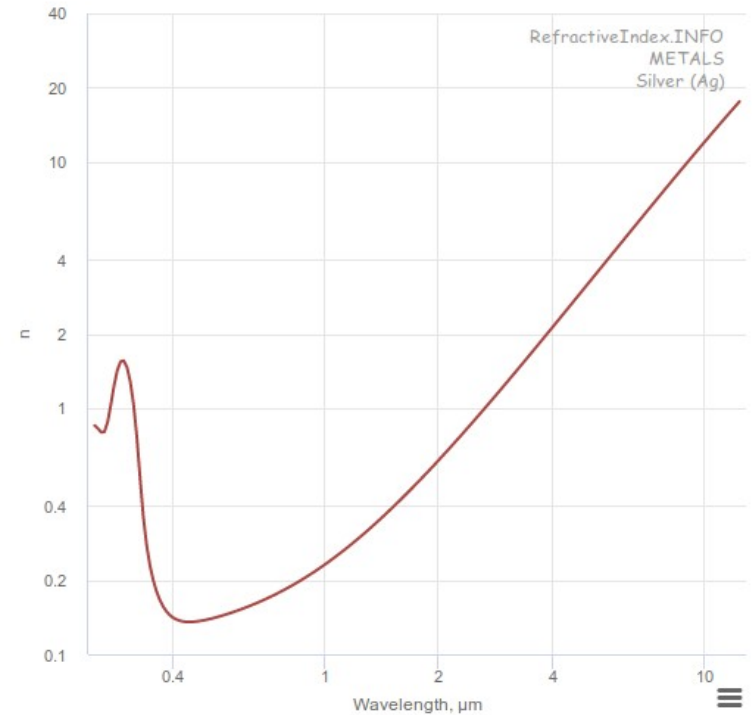
- Un télescope produit des images par réflexion
- Les rayons X ne se réfléchissent (normalement) pas



Réflexion totale

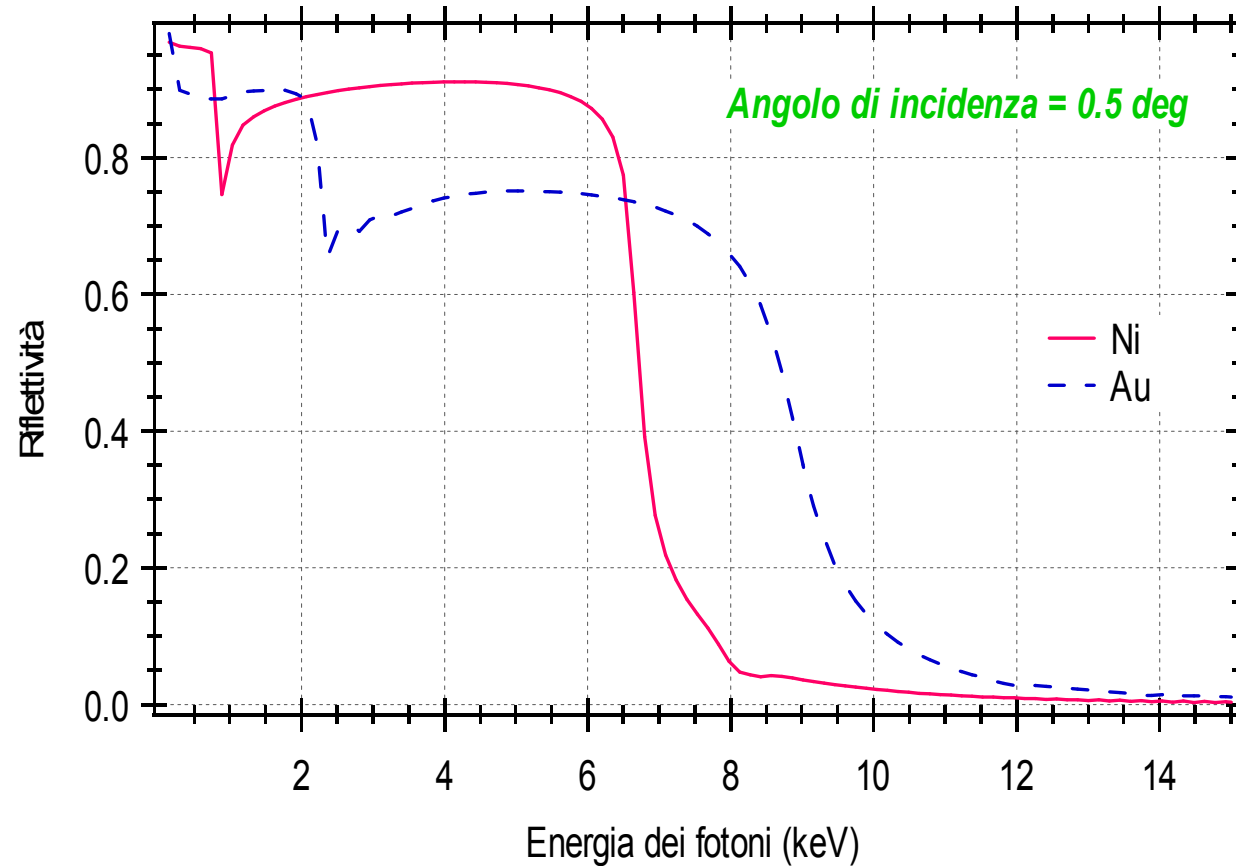


$n_2 < 1$
 $n_1 = 1.0$

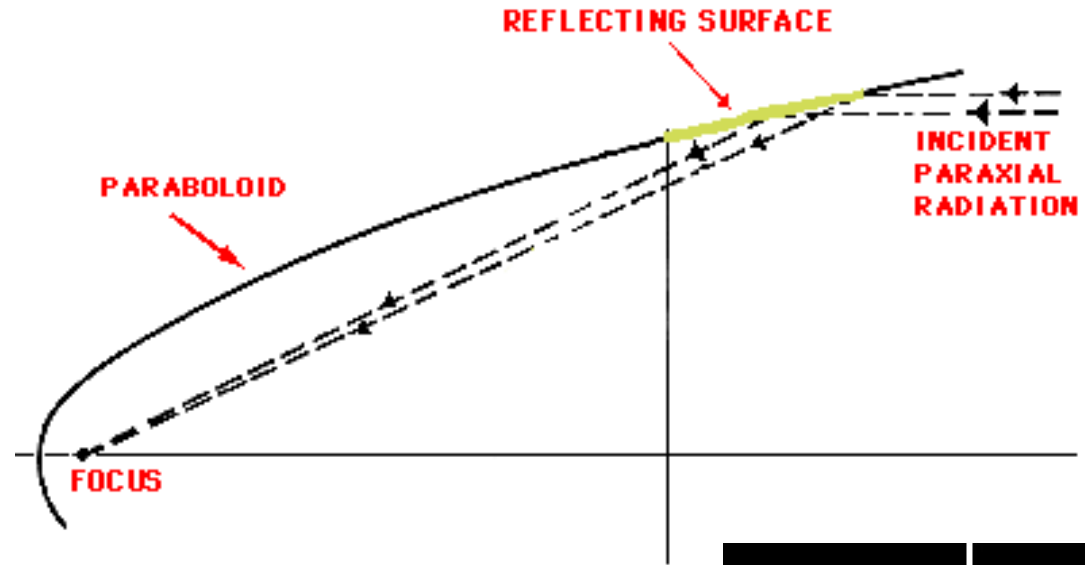
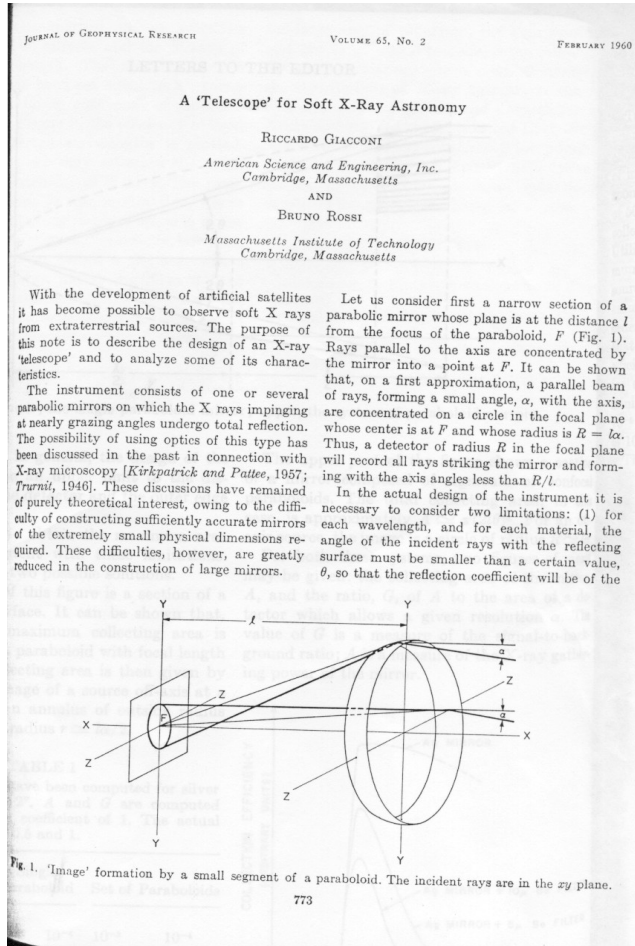


Argent

Réflectivité des rayons X



Focalisation des rayons X

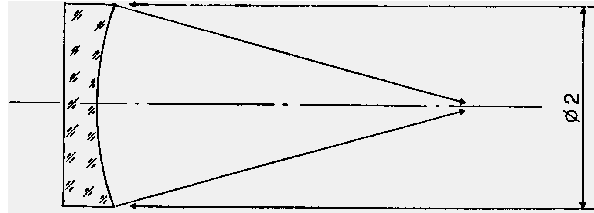


Forte aberration de coma



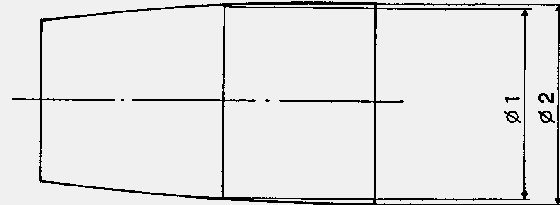
Focalisation des rayons X

Miroir optique



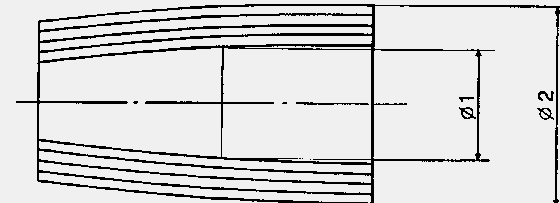
$$S_v = \frac{\pi \varnothing_2^2}{4}$$

Miroir X



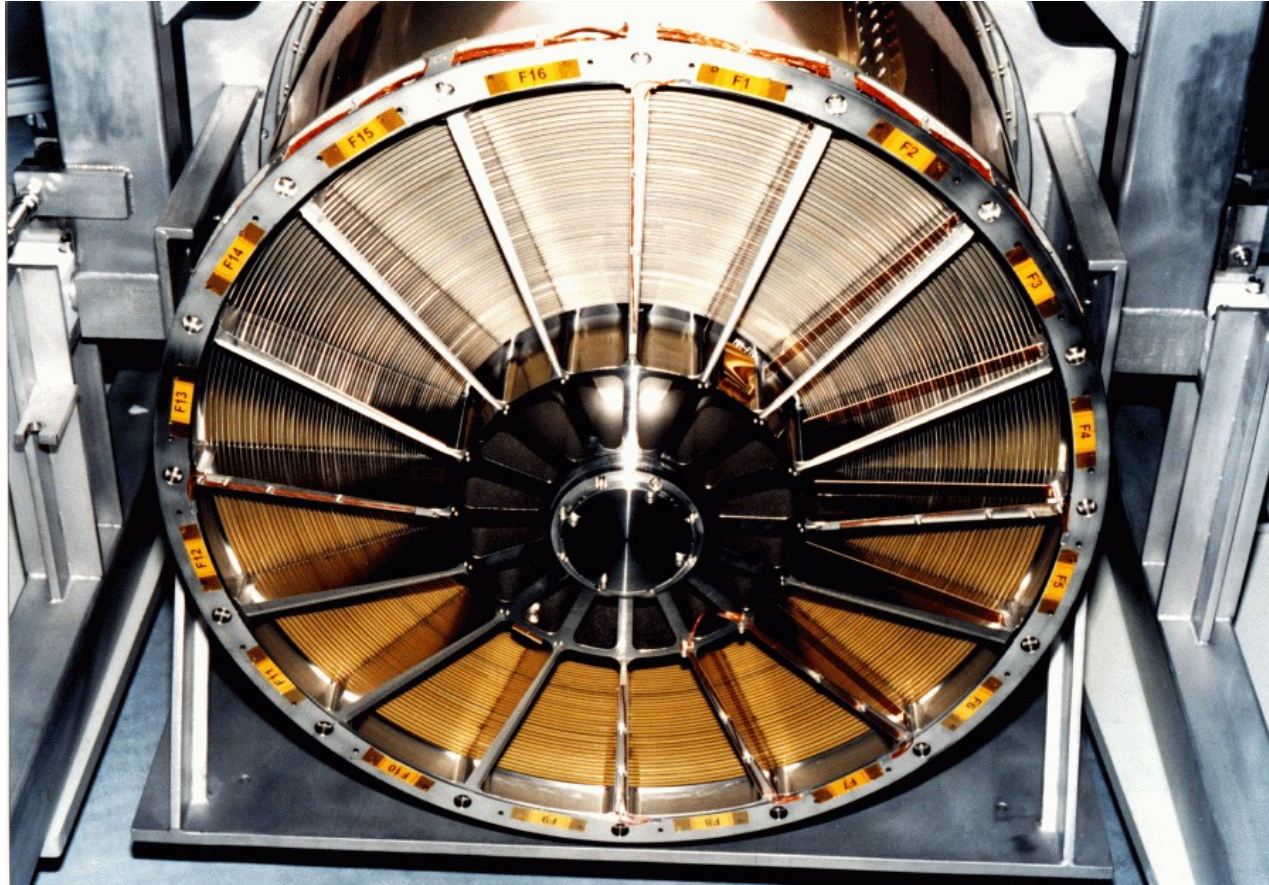
$$S_1 = \frac{\pi (\varnothing_2 - \varnothing_1)^2}{4}$$

Miroirs répliqués
"Woltjer I"

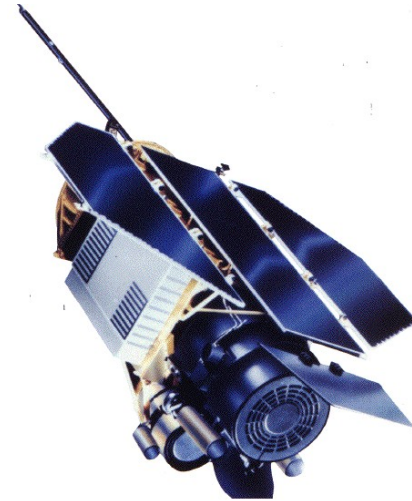
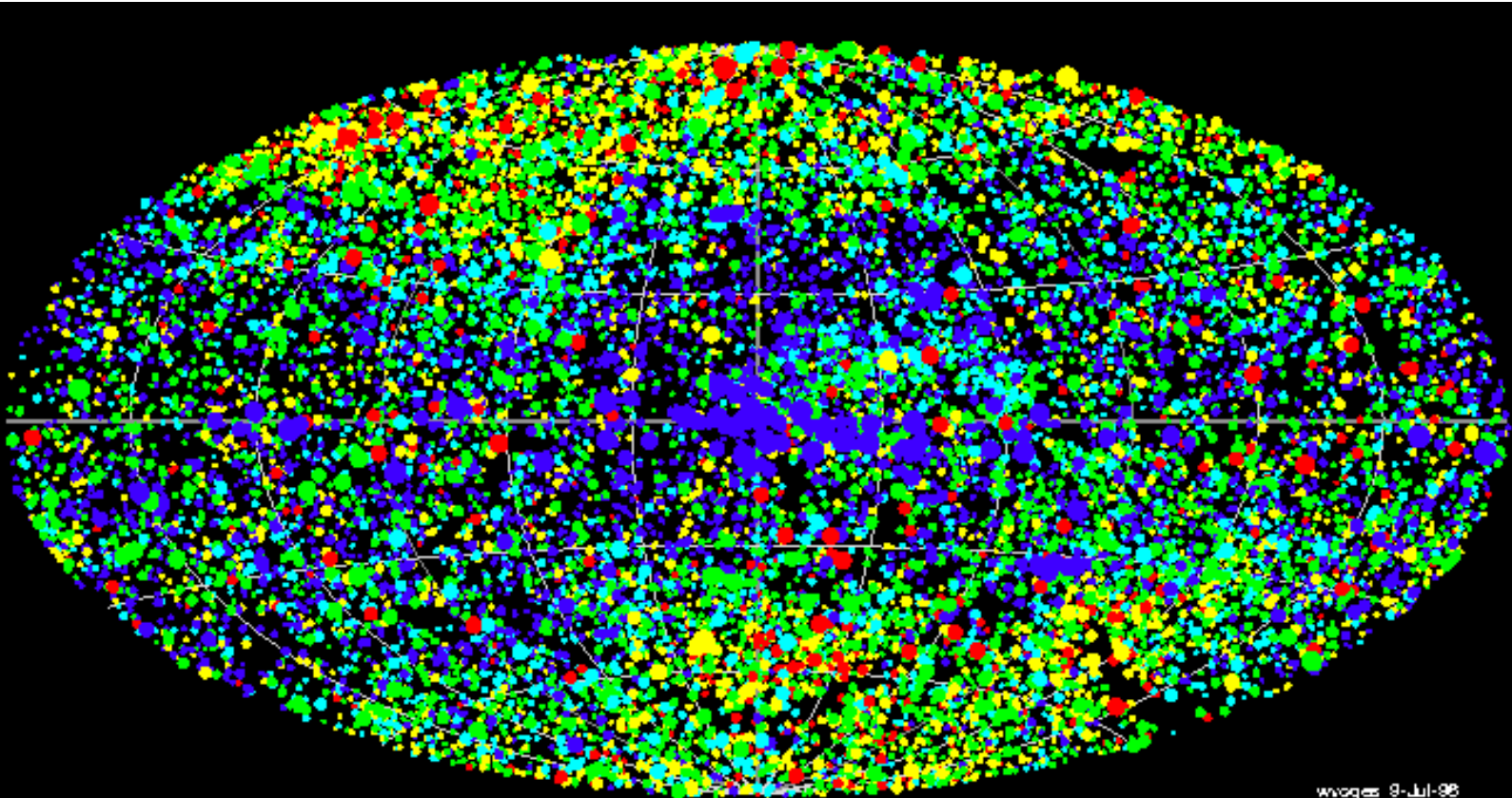


$$S_x = \frac{\pi (\varnothing_2 - \varnothing_1)^2}{4}$$

Télescopes en rayons X



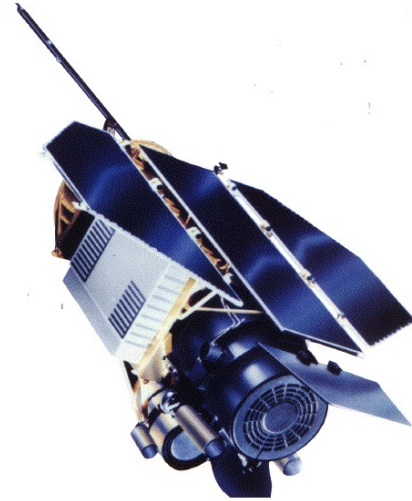
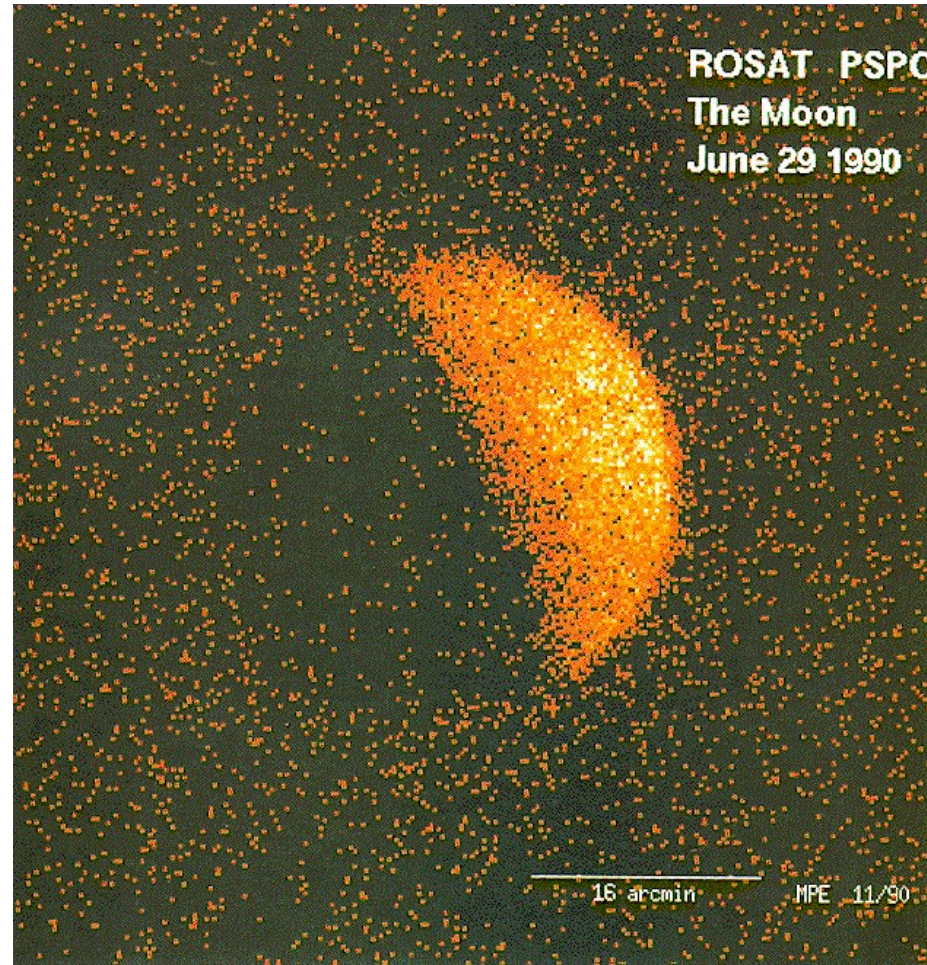
ROSAT (1990-1999)



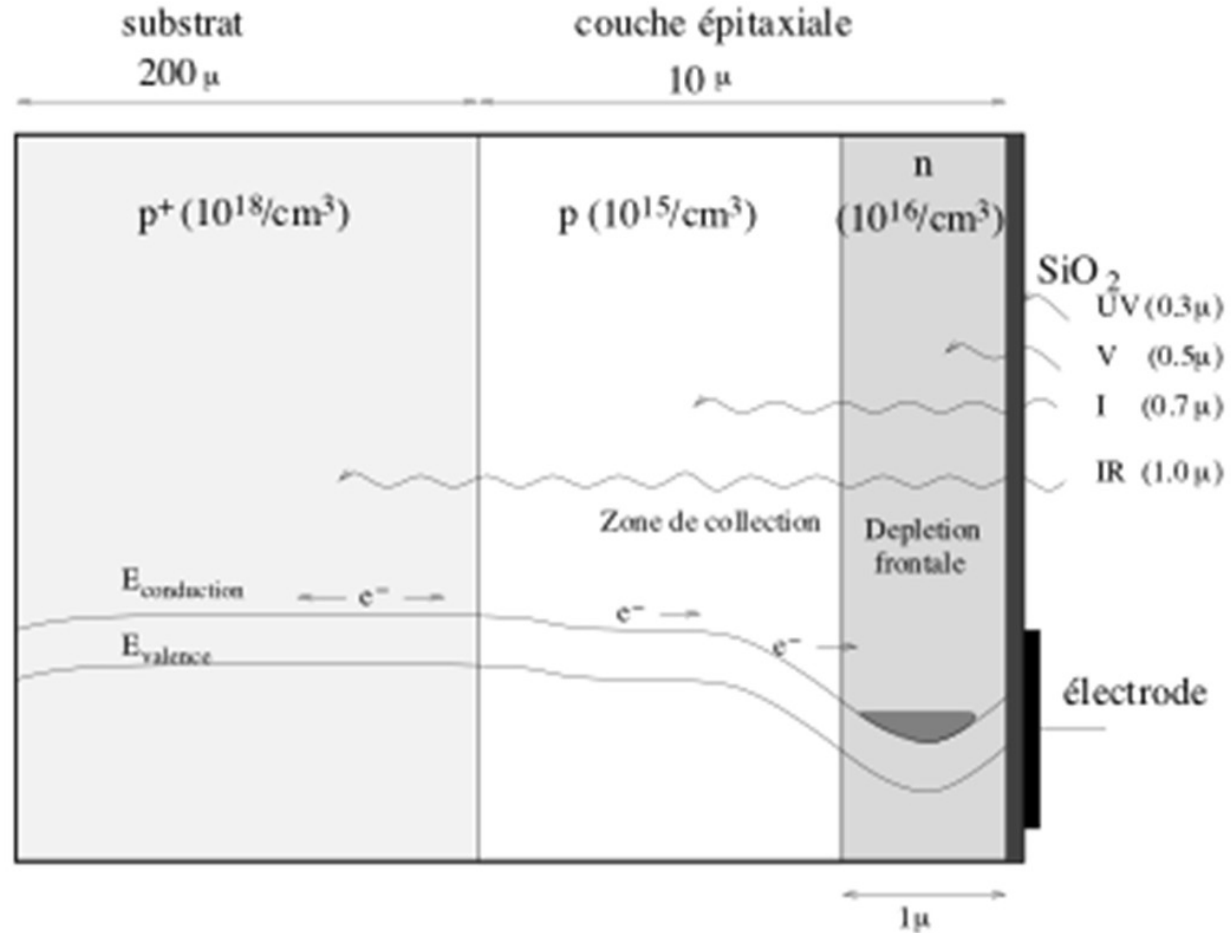
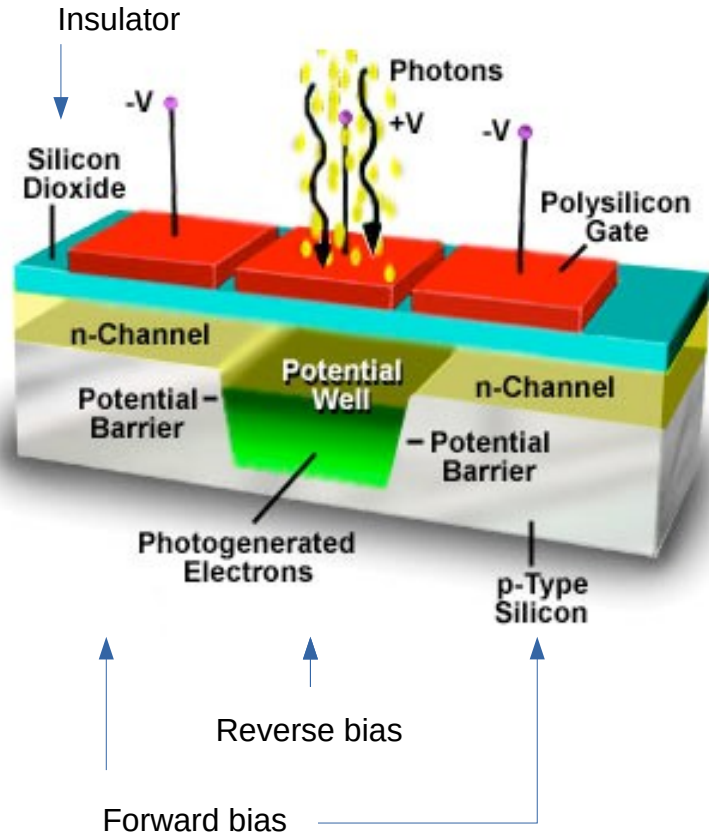
18'811 sources

(60x UHURU)

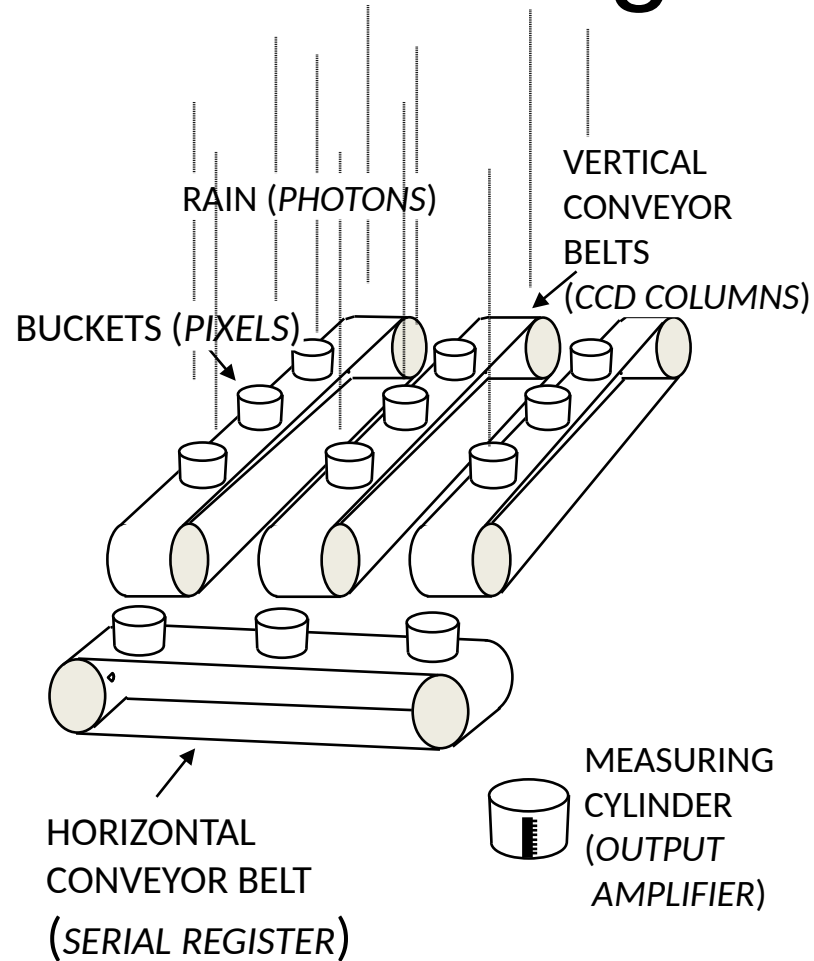
La Lune vue par ROSAT

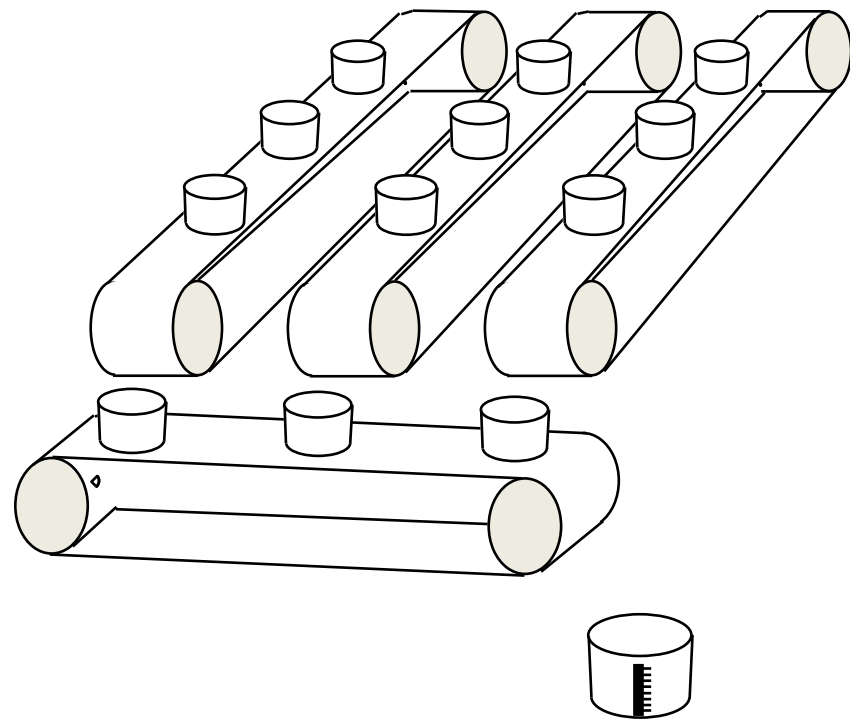


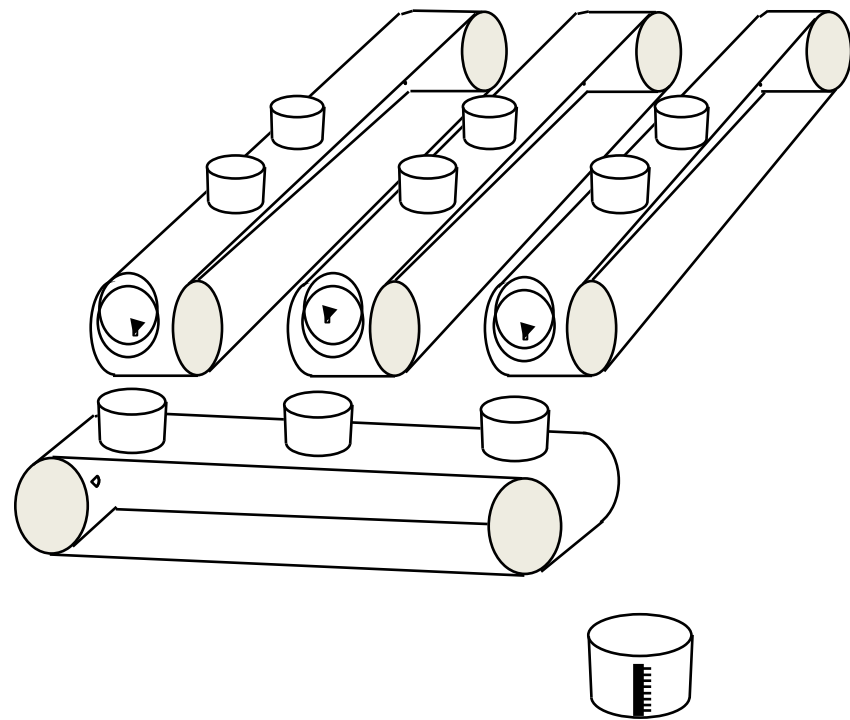
Les CCD

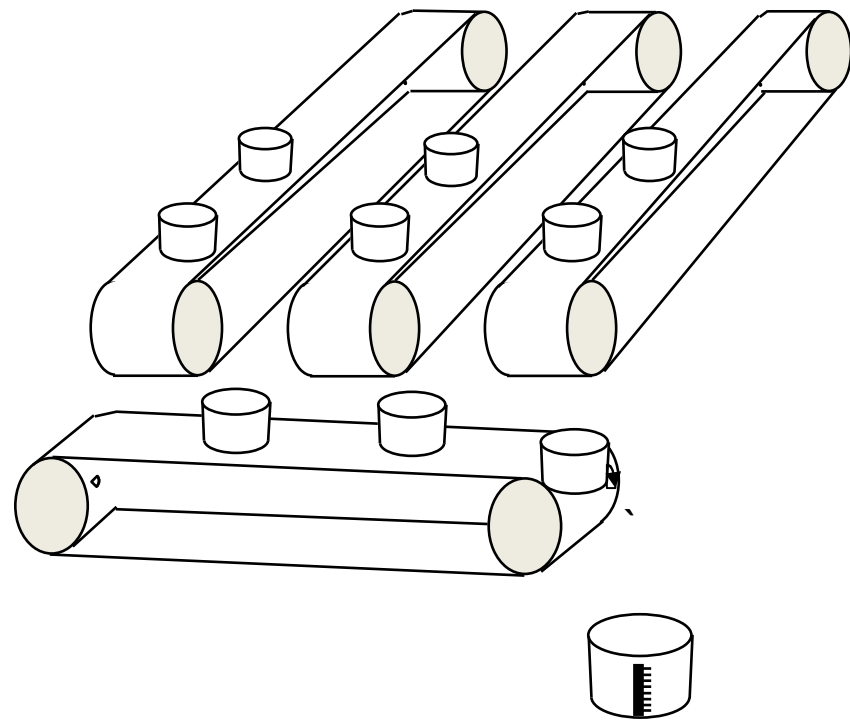


Une analogie





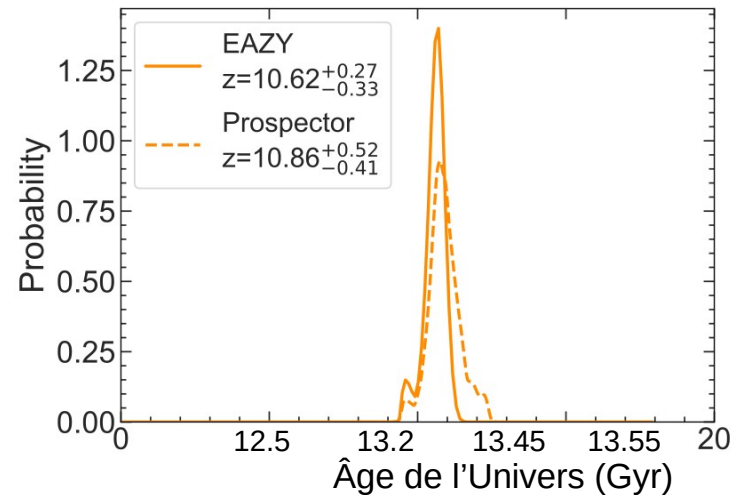
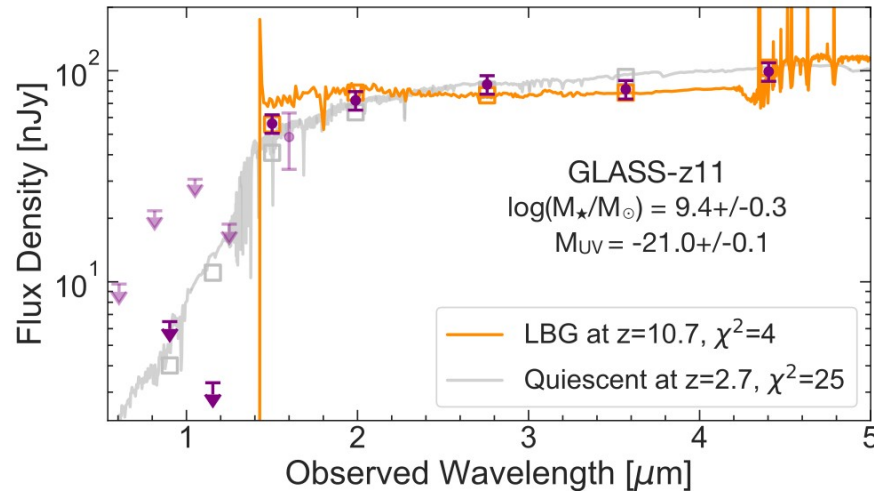
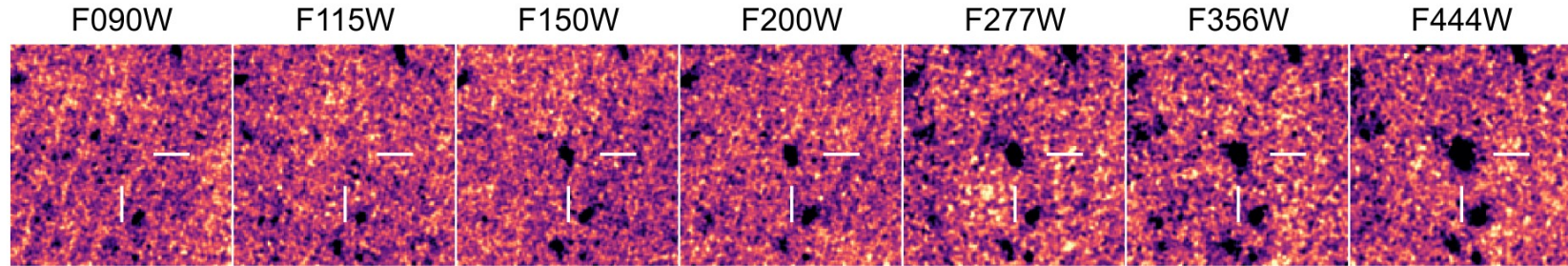




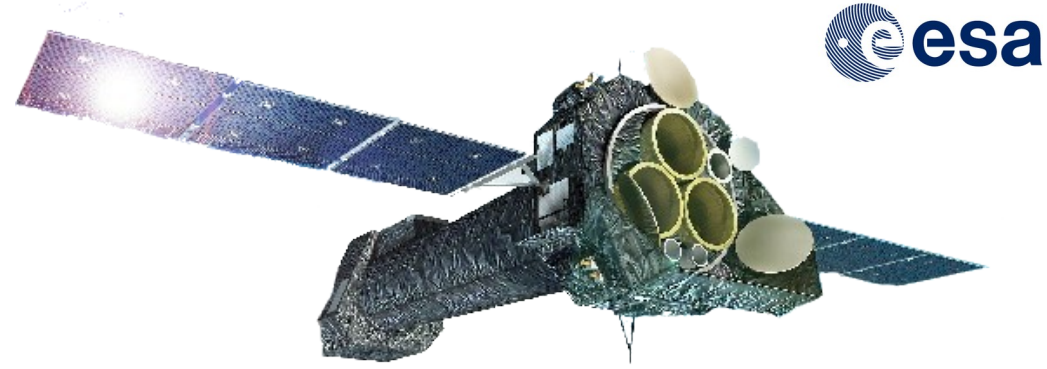
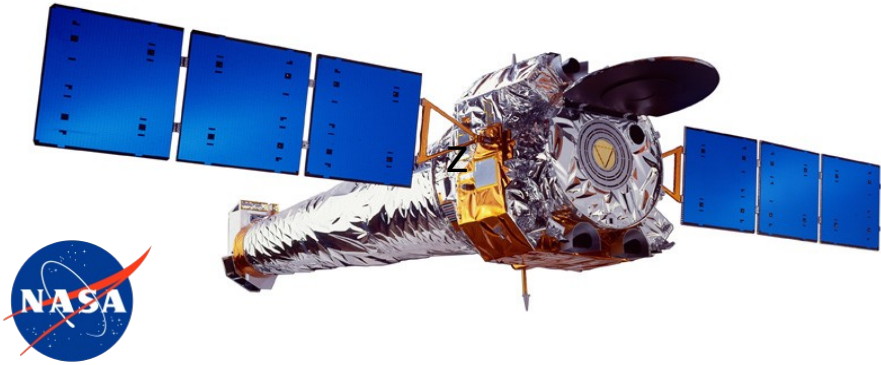
CCD dans les rayons X

- $E_{\text{Gap}} \sim 1.1 \text{ eV}$ (unité d'énergie), correspondant à l'énergie d'un photon infrarouge
 - Un seul électron est arraché et collecté
- $E_{\text{X-ray}} \sim 1 \text{ keV}$, soit ~ 1000 fois plus
 - L'électron arraché a suffisamment d'énergie pour arracher plusieurs centaines d'autres électrons
 - Plus l'énergie est grande, plus le nombre d'électrons arrachés est grand
 - On peut ainsi mesurer l'énergie de chaque photons!

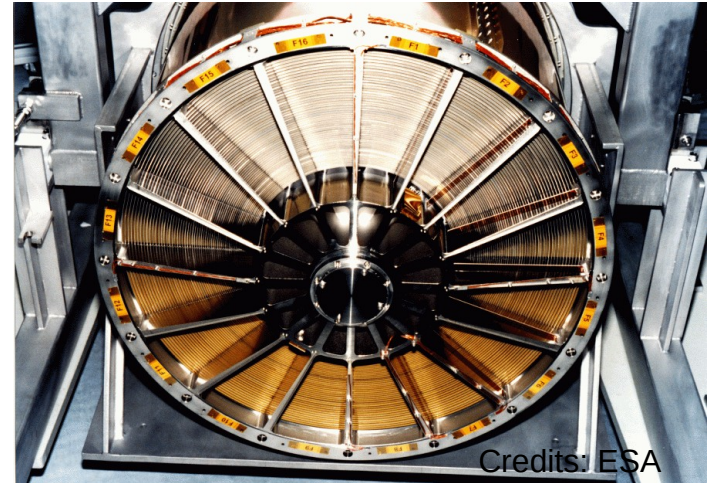
Analogie dans le visible/IR



Chandra et XMM-Newton (1999)



Credits: NASA

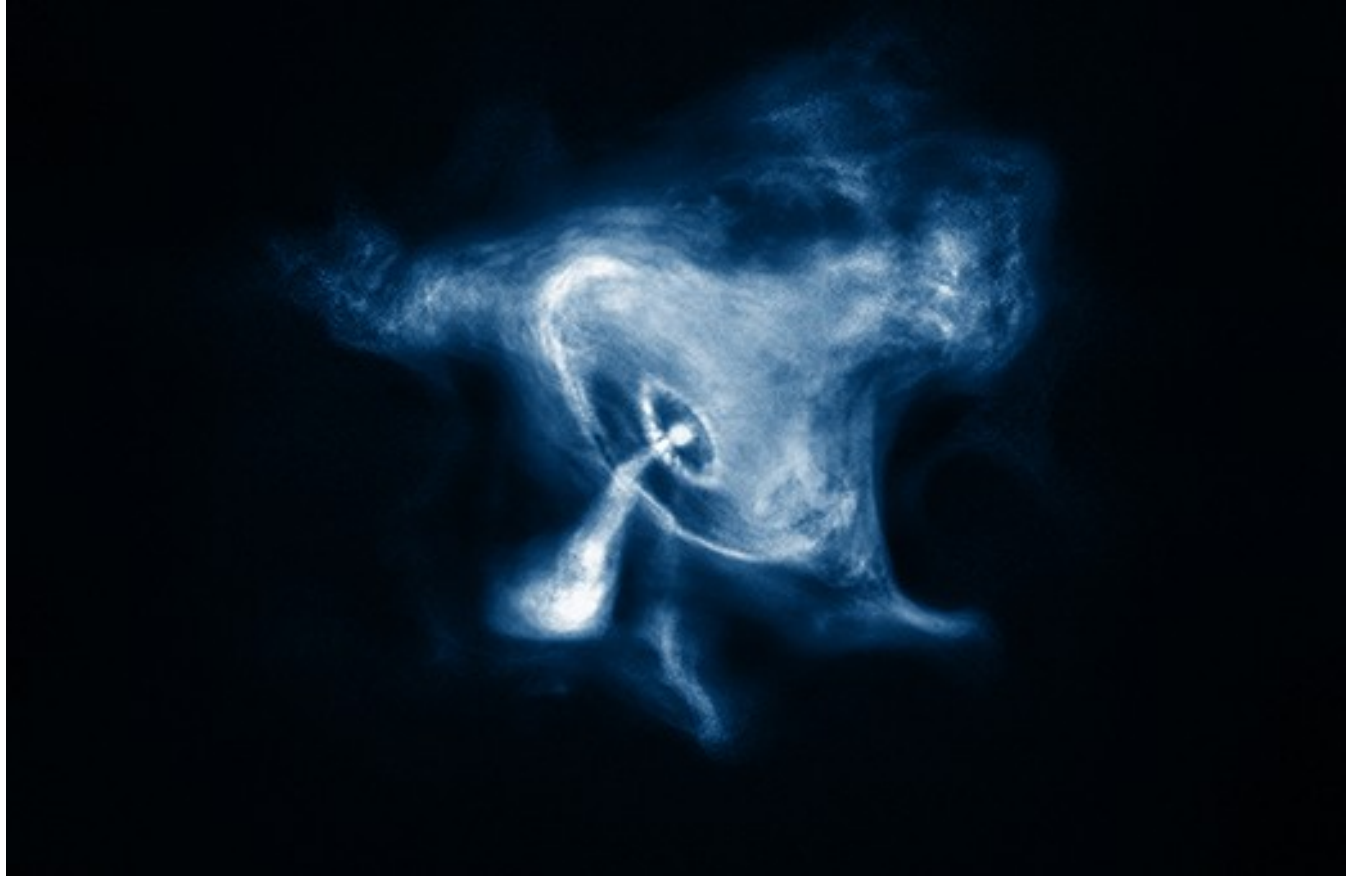


Credits: ESA

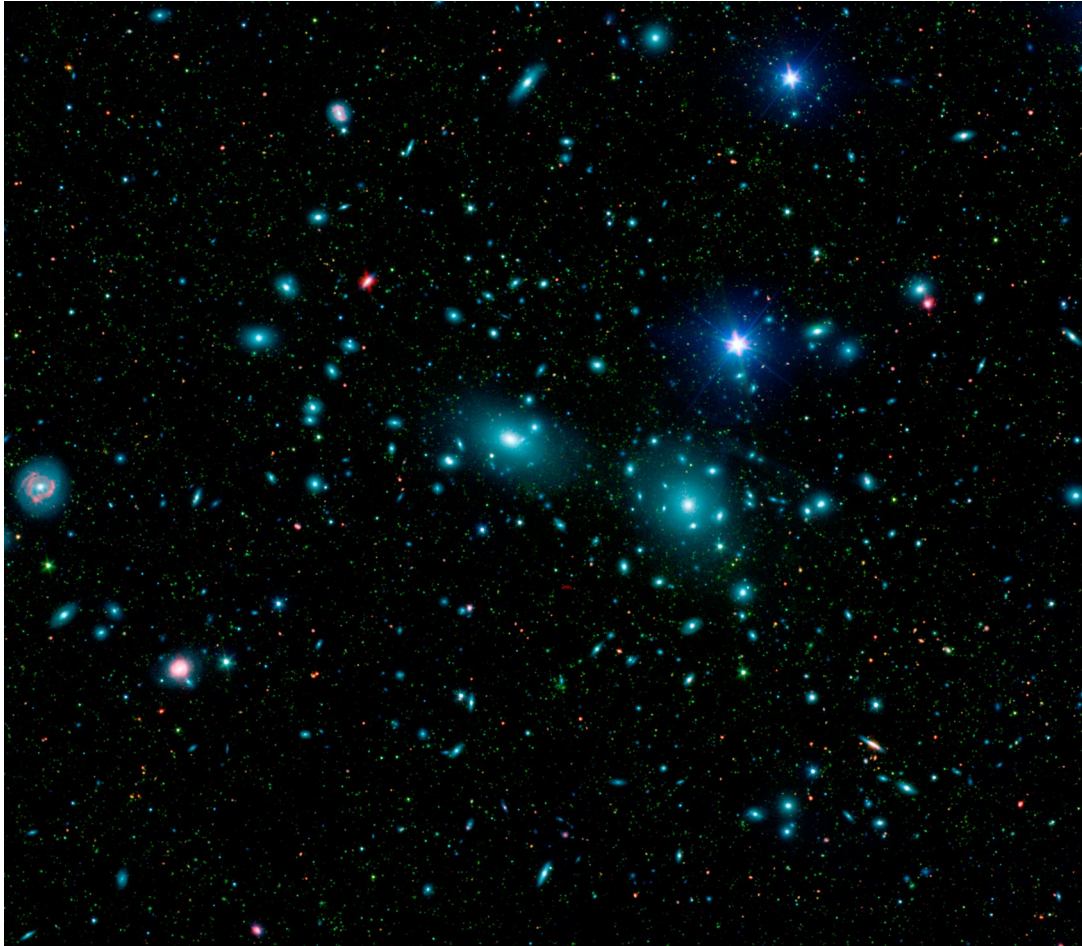
Cassiopeia A (Chandra)



La Nébuleuse du Crabe (Chandra)



Les amas de galaxie



Amas de Coma

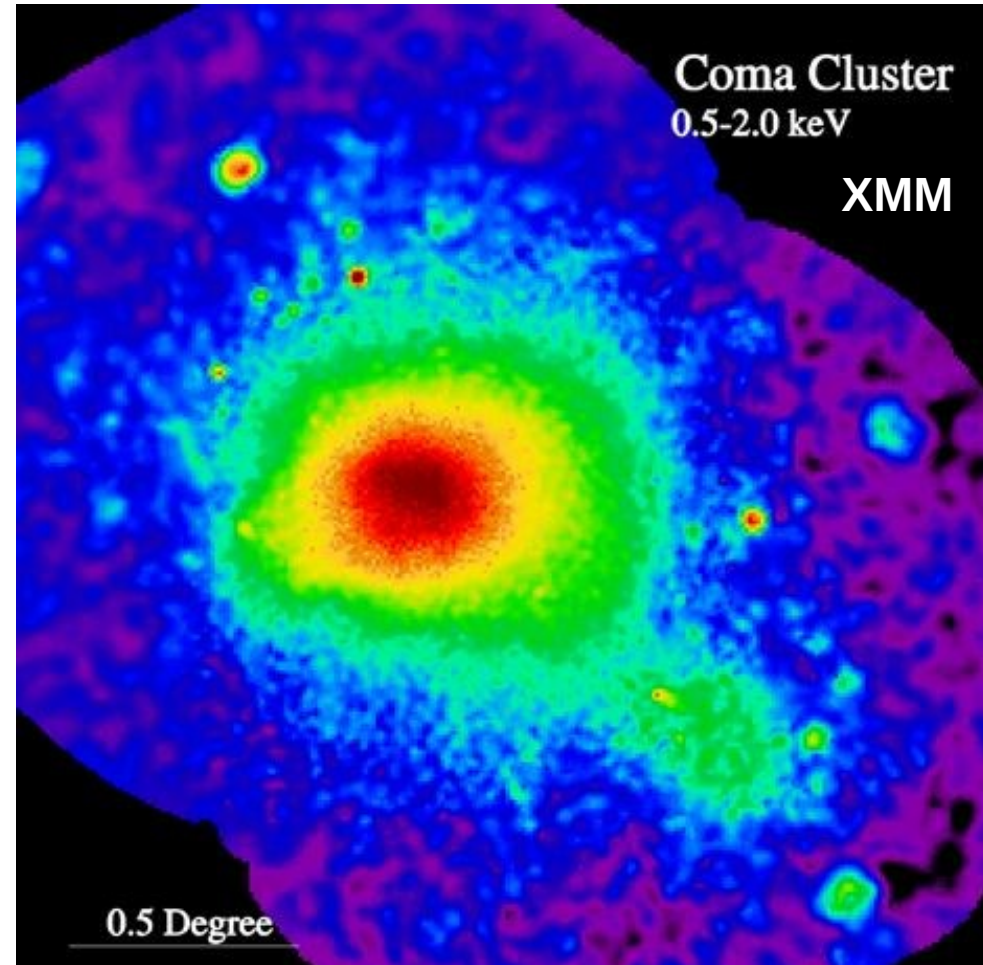
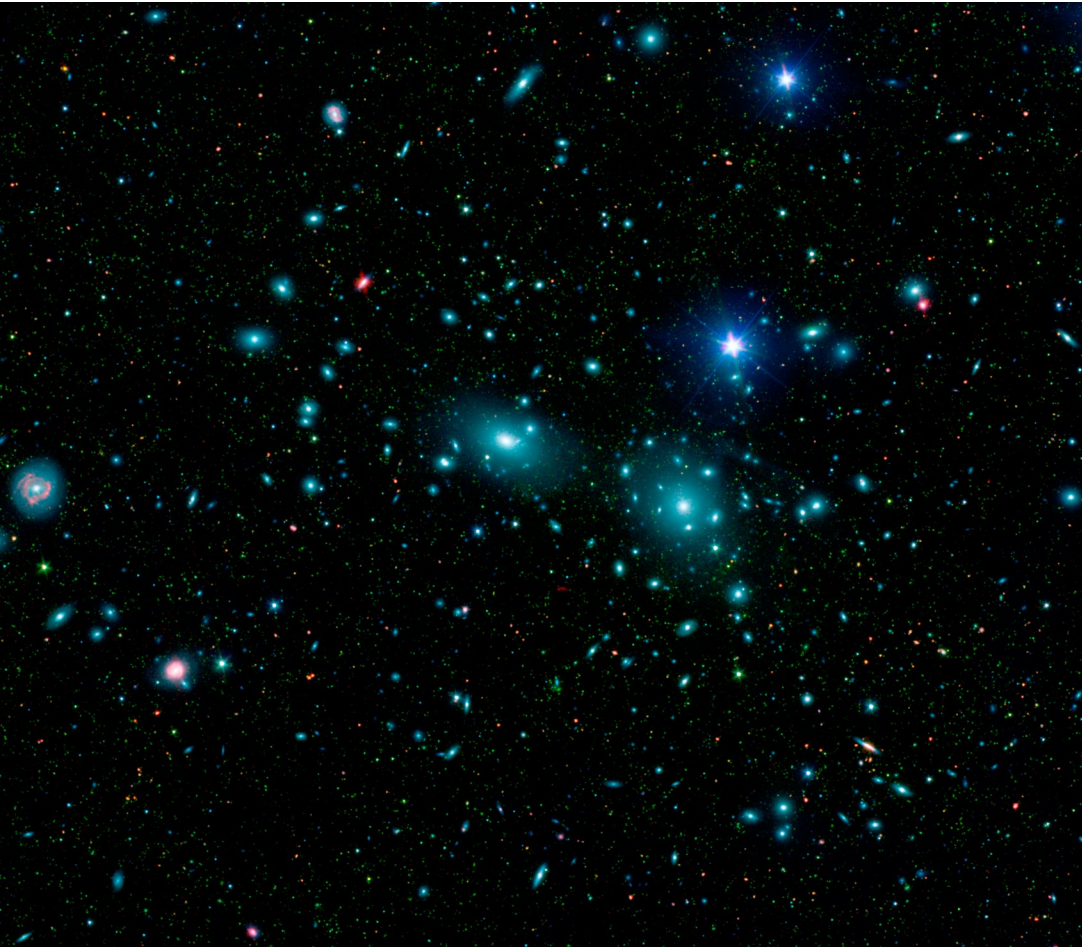
Plus de 1000 galaxies

Dispersion des vitesses
 ~ 1000 km/s

Masse de Coma

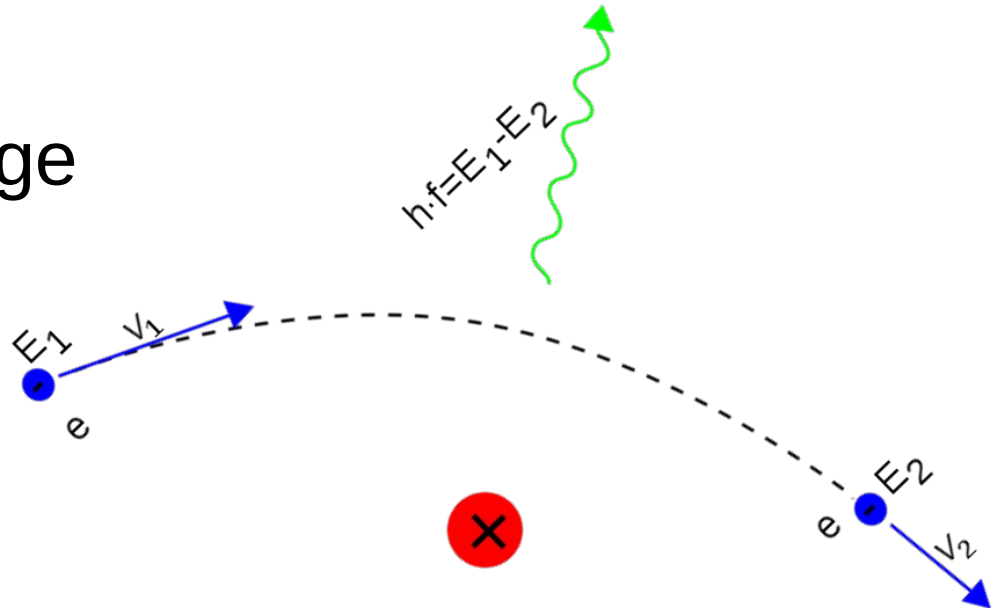
- Si chaque étoile est identique au Soleil
 - $1L_{\odot} \equiv 1 M_{\odot}$
 - $M_{\text{Visible}} = 3 \cdot 10^{13} M_{\odot}$
- Masse gravifique nécessaire pour faire tourner des galaxies à 1000 km s^{-1} (théorème du viriel)
 - $E_{\text{C,Total}} = - \frac{1}{2} E_{\text{P,Total}}$
 - $M_{\text{Total}} = 2 R_{\text{Total}} \langle v^2 \rangle / G = 5 \cdot 10^{15} M_{\odot}$
 - $M_{\text{Total}} \gg M_{\text{Visible}}$

Coma en rayons X

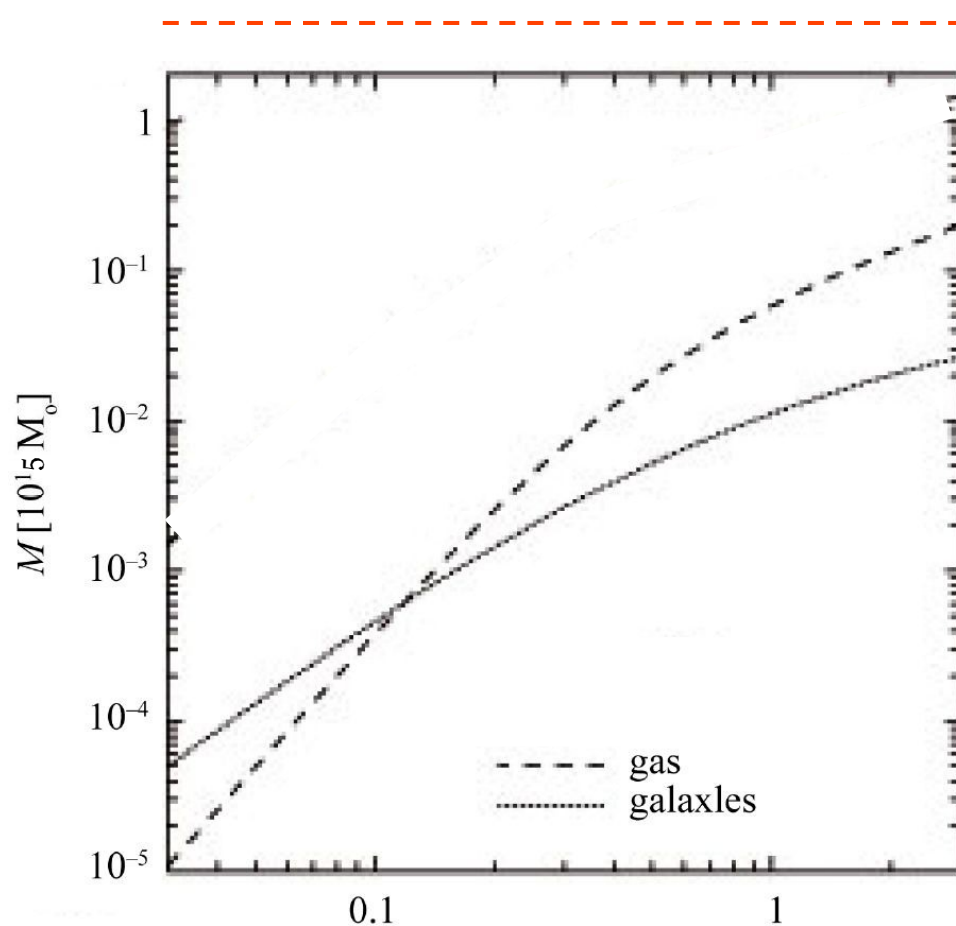


Coma en rayons X

- Un électron plongé dans un amas doit avoir une énergie cinétique de: $E_C = G m_p M_T / R$
 - ~ 10 keV pour Coma, soit l'énergie d'un rayon X
 - $E_C = 3/2 kT \rightarrow T = 10^8$ K
- Rayonnement de freinage (Bremsstrahlung)
 - $L_X \approx c \cdot n^2$



Profil de masse



Masse gravifique

Il manque encore plus de 90% de la masse

→ Matière noire (Zwicky 1933)

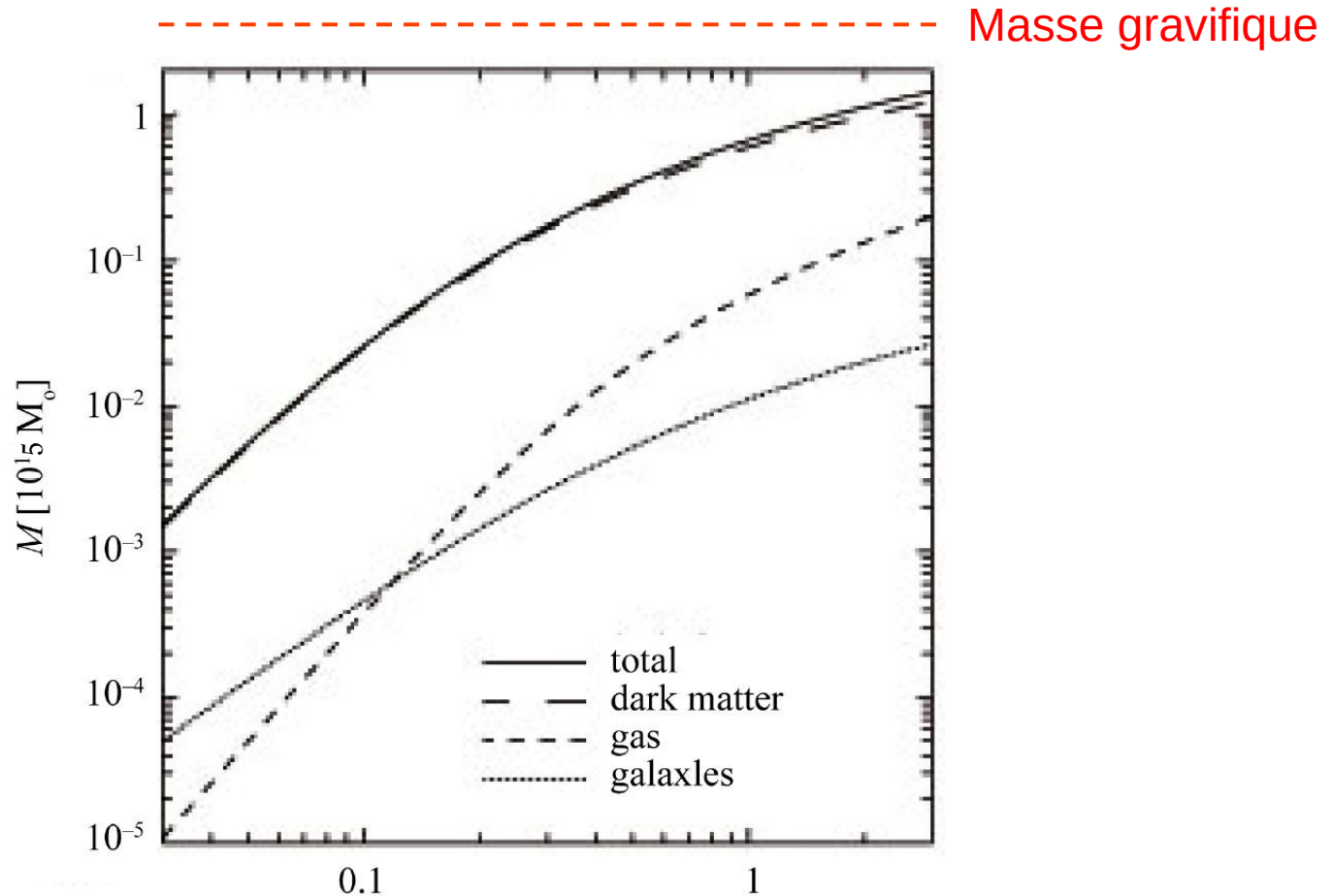
Équilibre hydrostatique

- Équation des gaz parfaits: $P = nkT$
 - n et T peuvent être obtenus par rayons X
- Équilibre hydrostatique:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{-GM(r)n(r)}{r^2}$$

- On peut donc obtenir $M(r)$

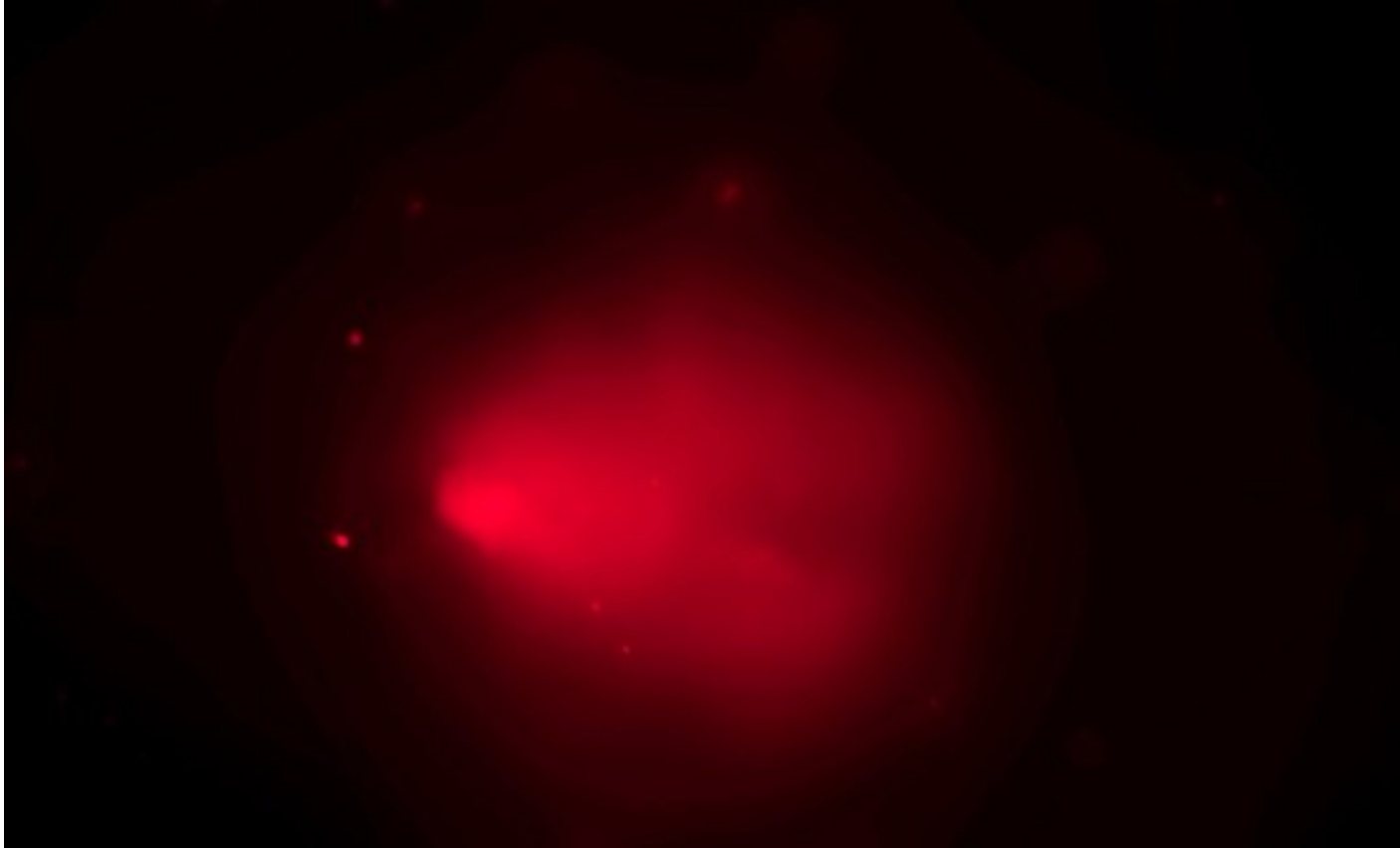
Profil de masse



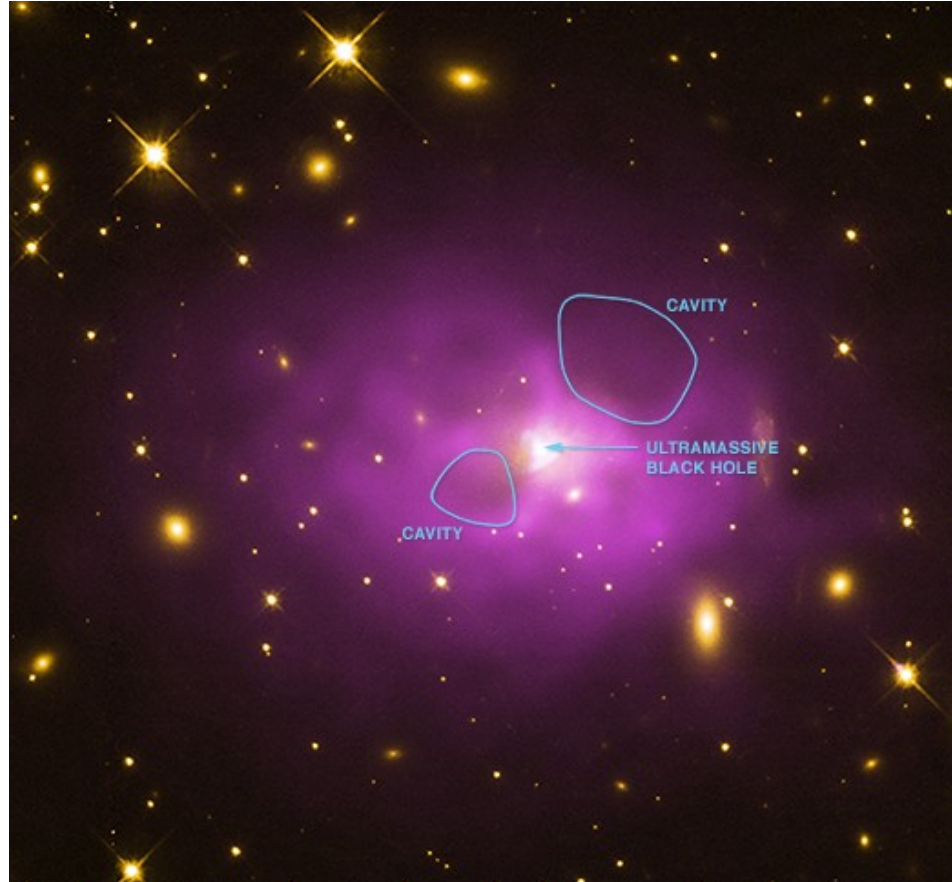
Bilan de masse

- Bilan de masse de Coma:
 - Étoiles : $3 \cdot 10^{13} M_{\odot}$ 2%
 - Gas: $2 \cdot 10^{14} M_{\odot}$ 11%
 - Matière noire: $1.3 \cdot 10^{15} M_{\odot}$ 87%

El Gordo (Chandra)



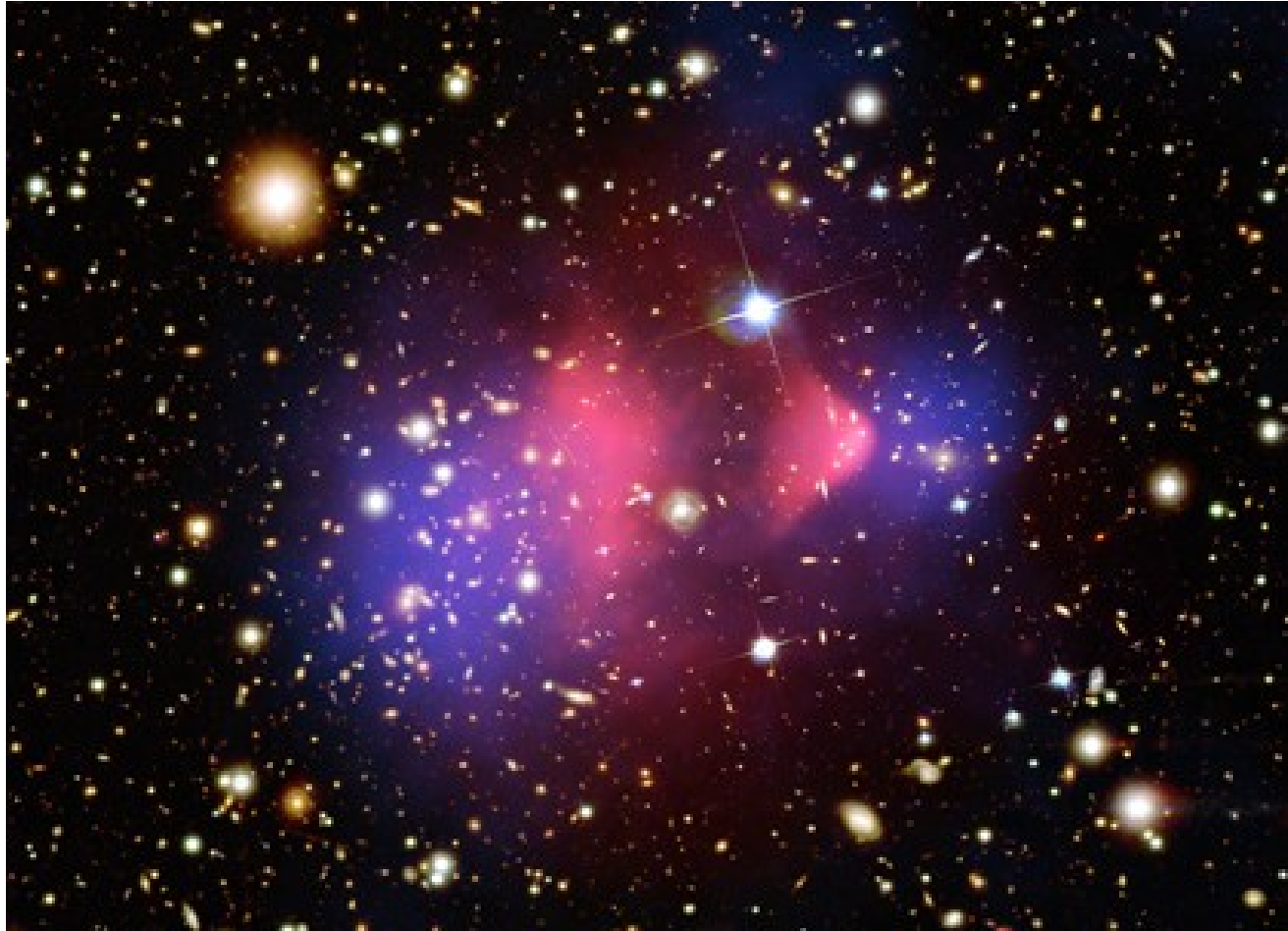
PKS 0745-19 (Chandra)



L'amas du Boulet (Chandra+WL)

Gaz

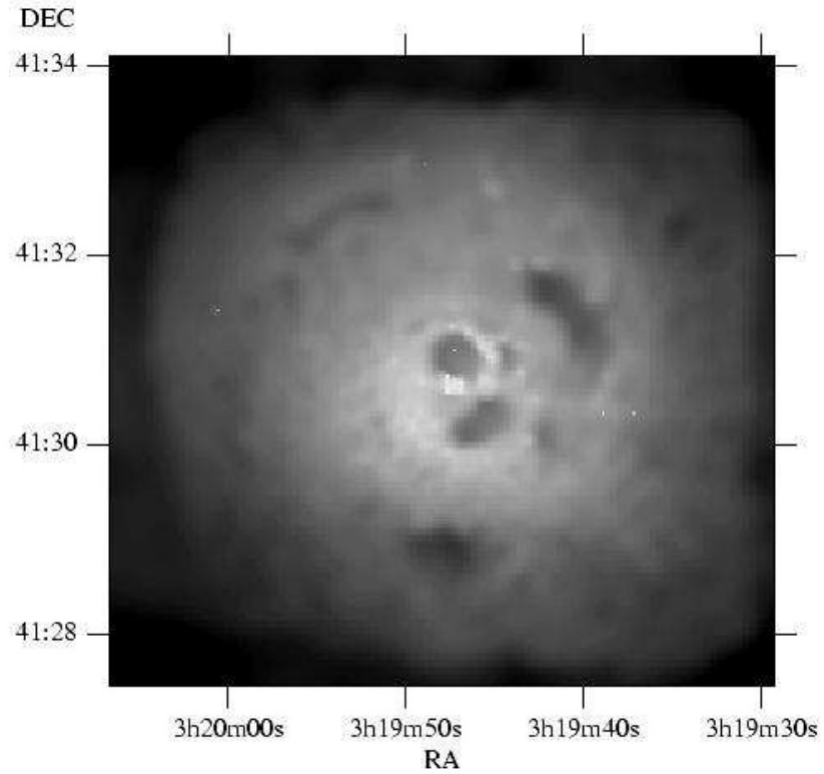
Masse



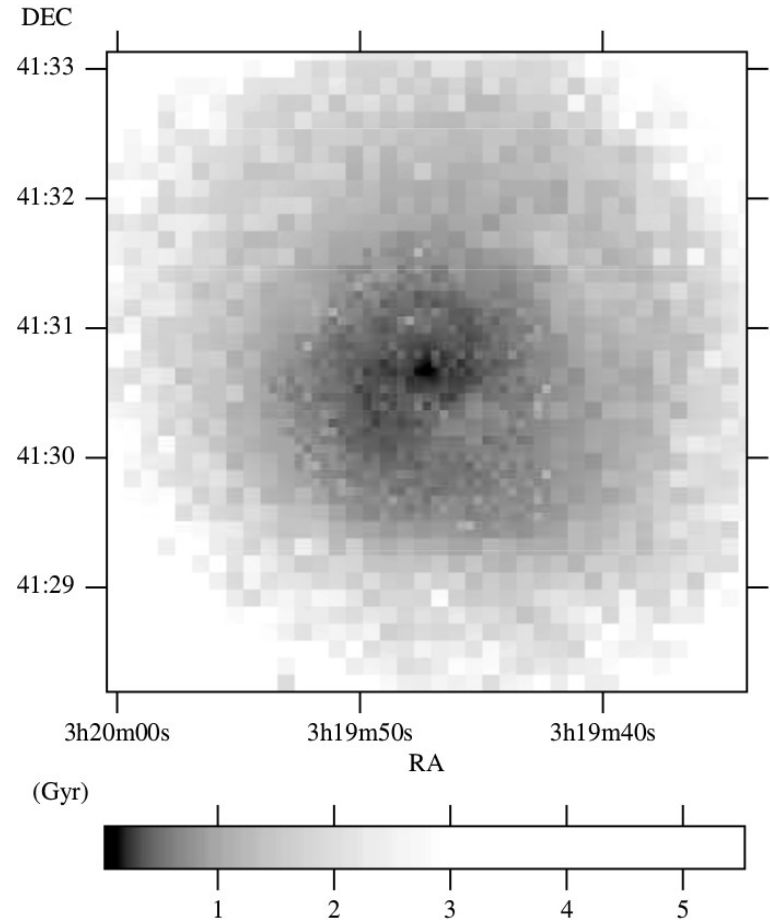
Temps de refroidissement

- $t = E / L_X \simeq 6000 T^{1/2} n^{-1}$ ans
- $n \sim 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$, $T \sim 10^{7-8} \text{ K}$
 - $t \sim 10^{10}$ ans
- Au centre de l'amas, $n \nearrow$, $T \searrow$: $t \ll 10^{10}$ ans
 - Les amas devraient être froids au centre
 - Condensation rapide du gaz
 - Formation d'étoiles intense
 - Mais ce n'est pas observé

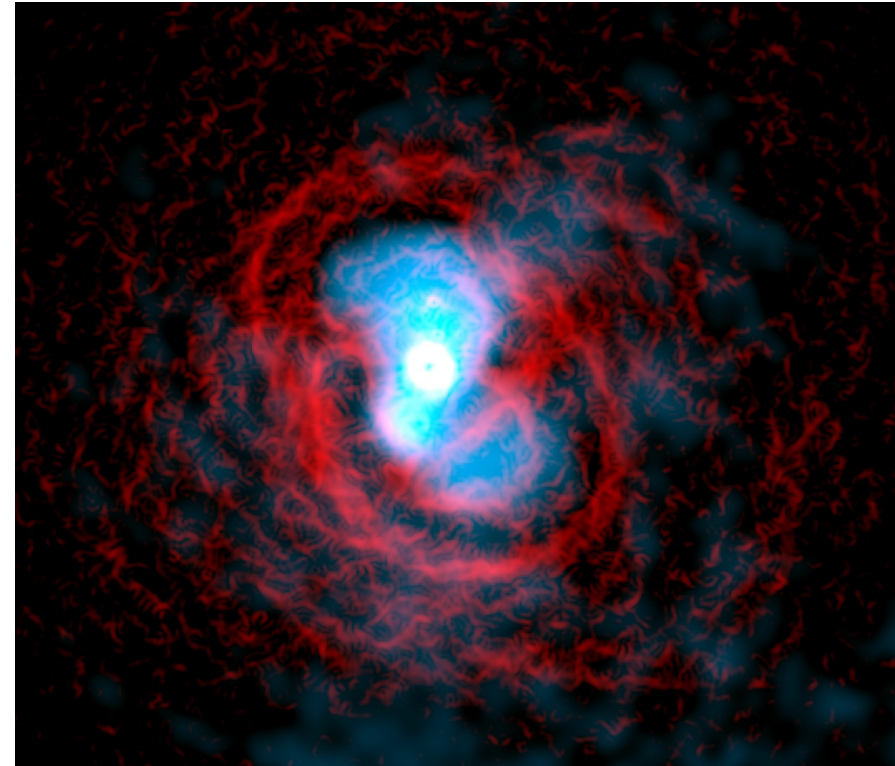
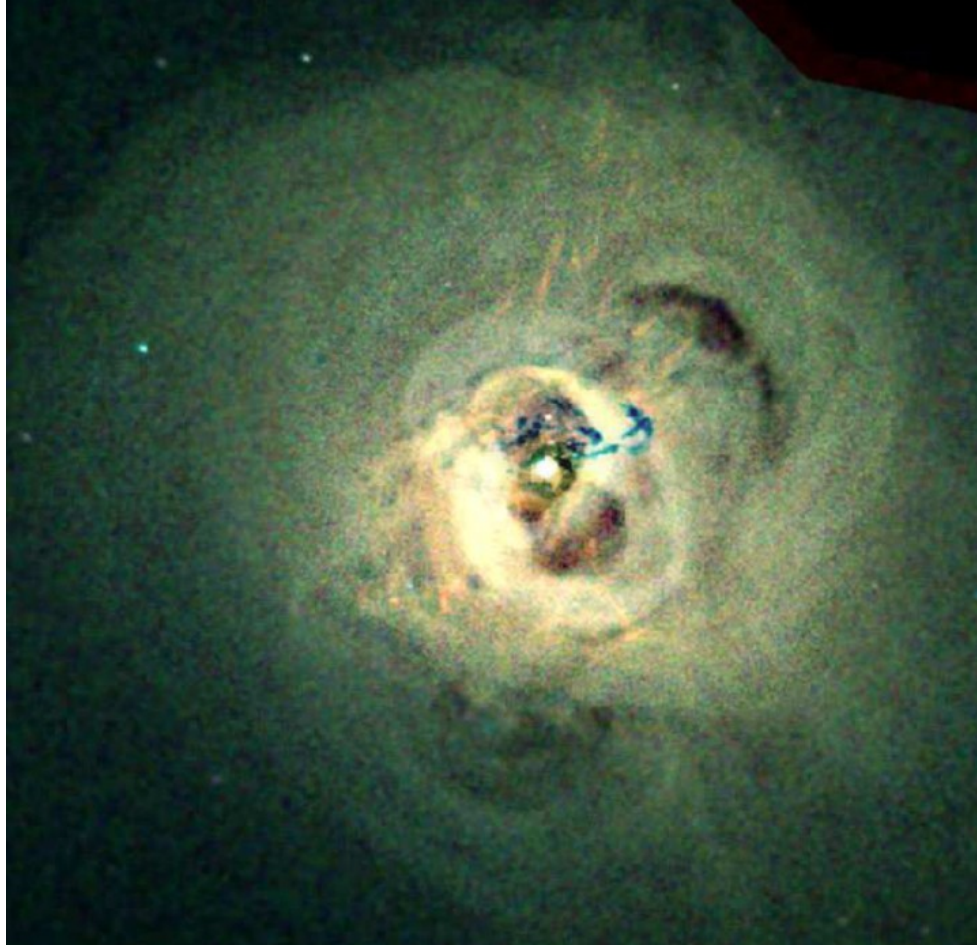
Temps de refroidissement



Amas de Persée

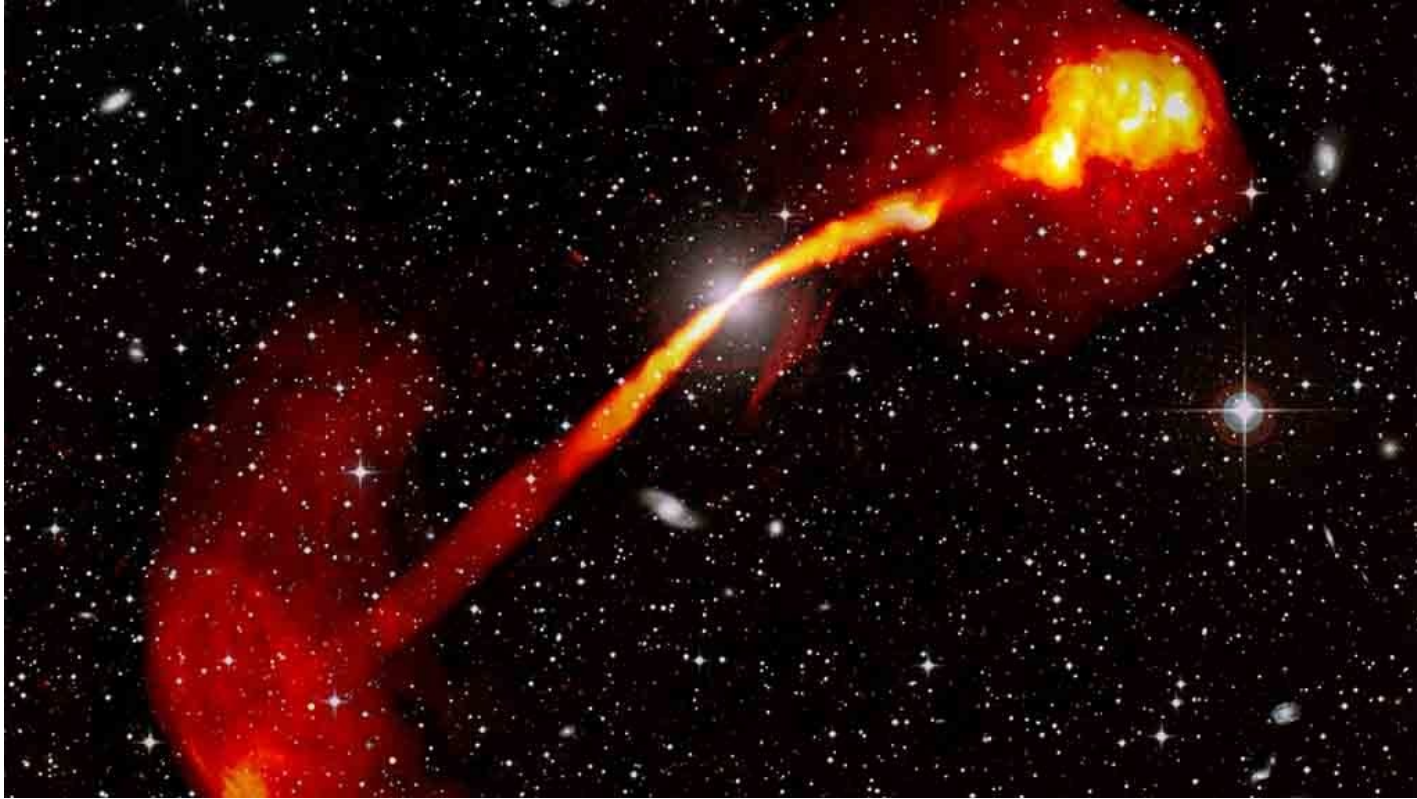


Injection d'énergie



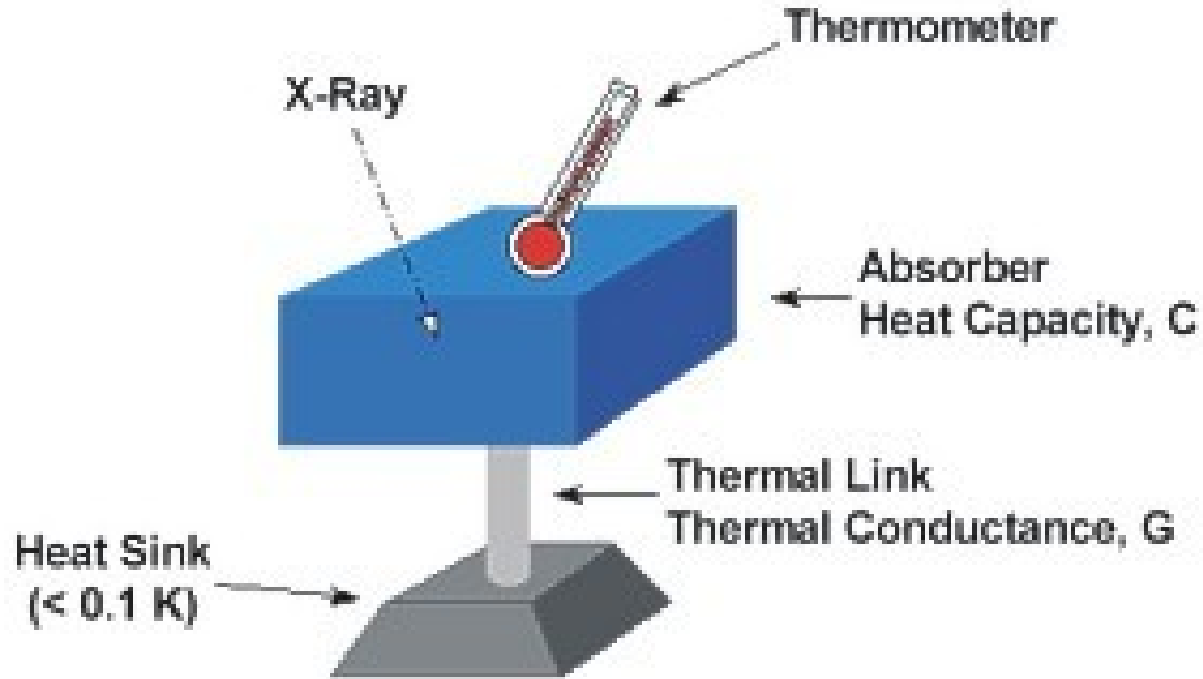
Trou noir supermassif au centre de l'amas

Jets relativistes de trous noirs

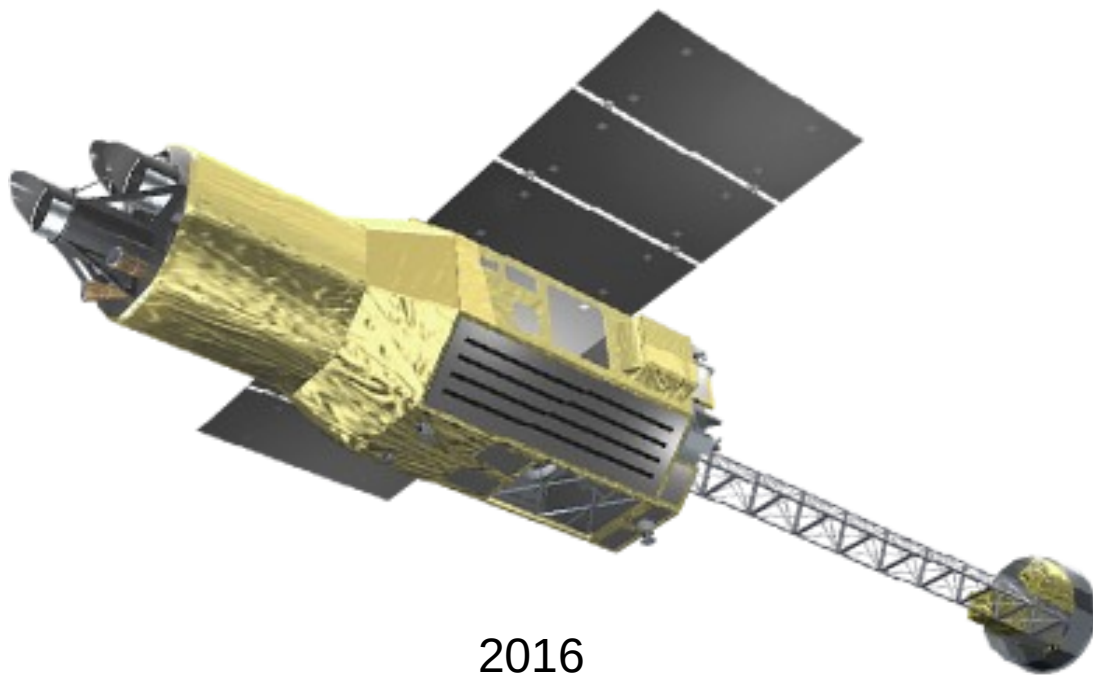


IC 4296

Micro-calorimètre

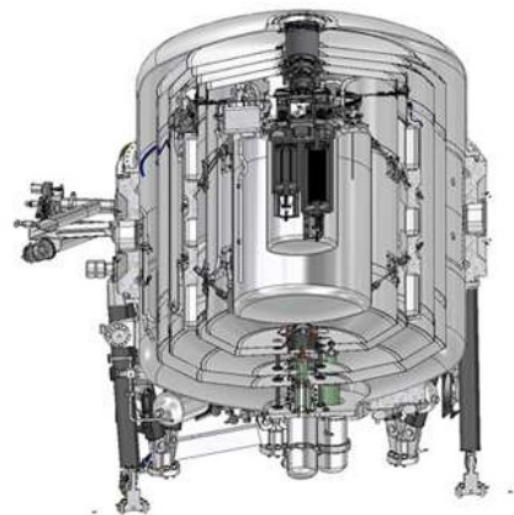
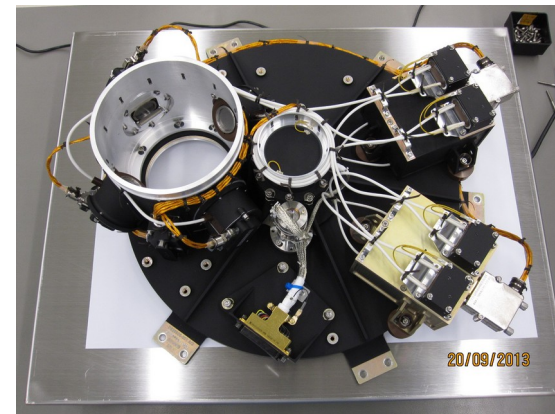


ASTRO-H/Hitomi

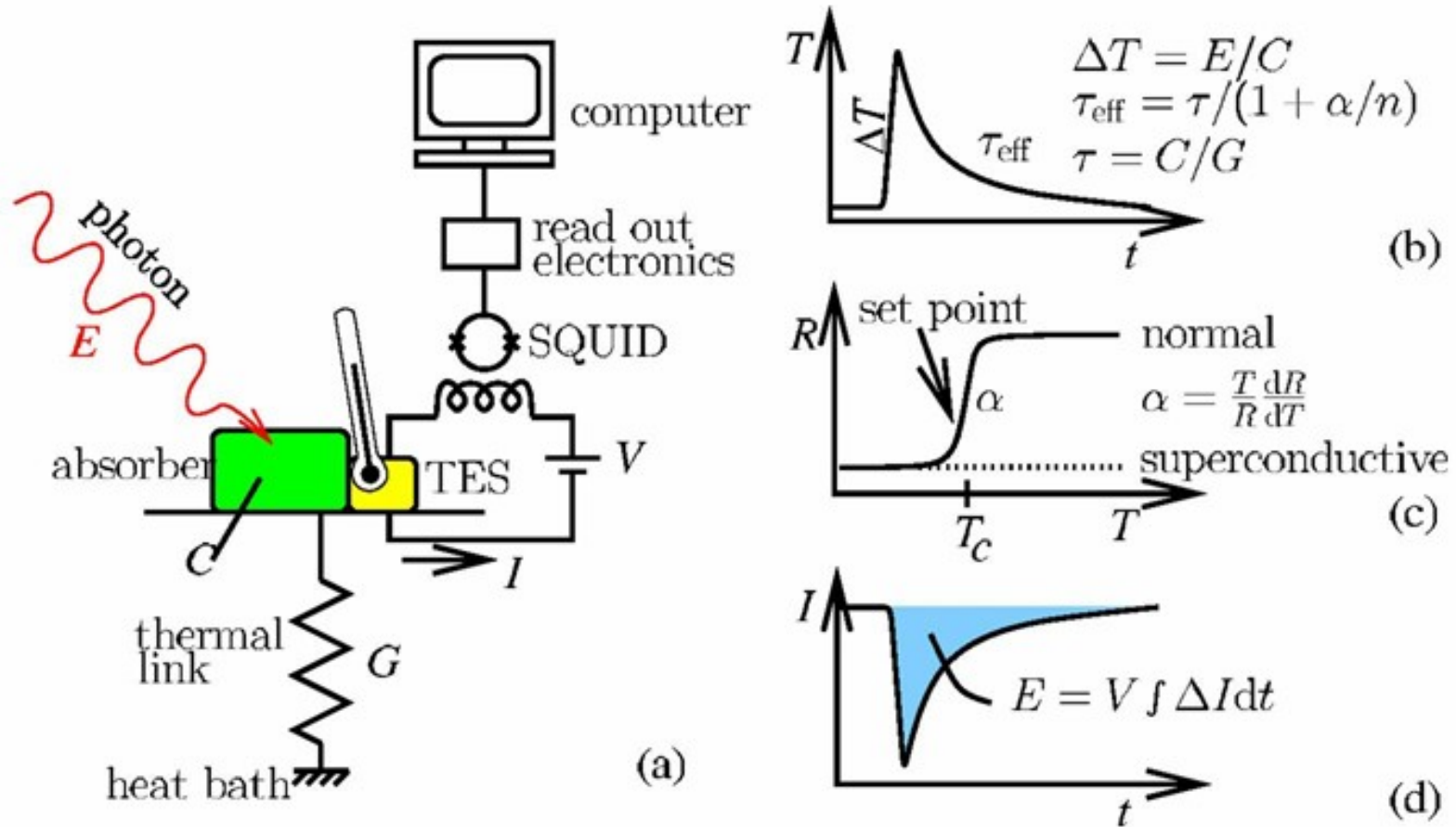


2016

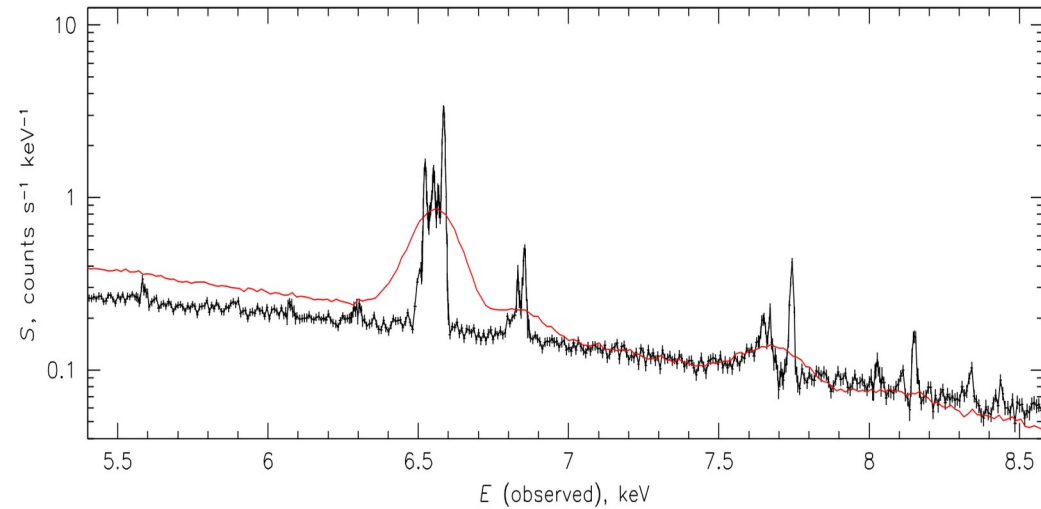
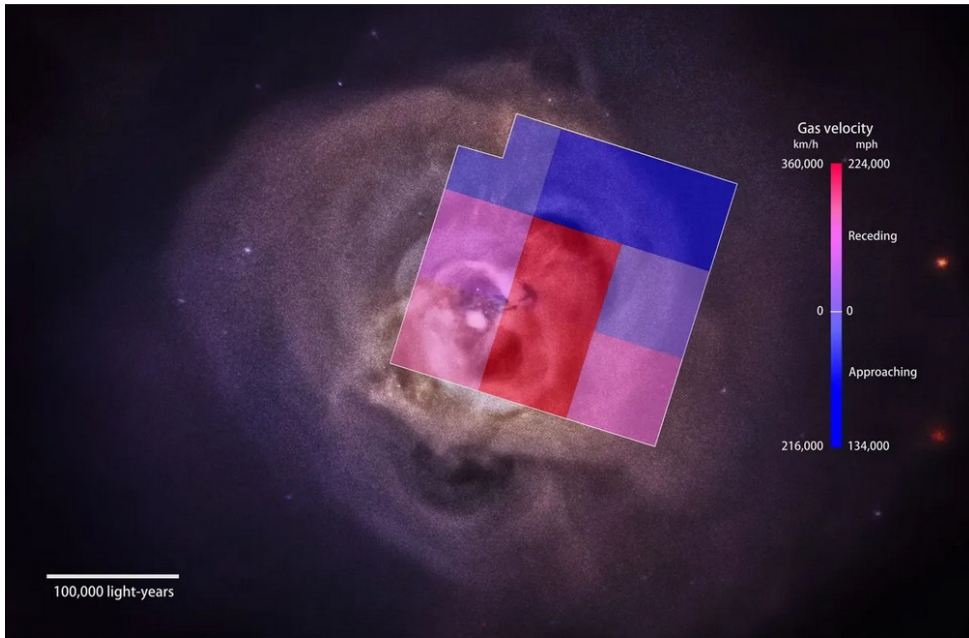
XRISM (2023)



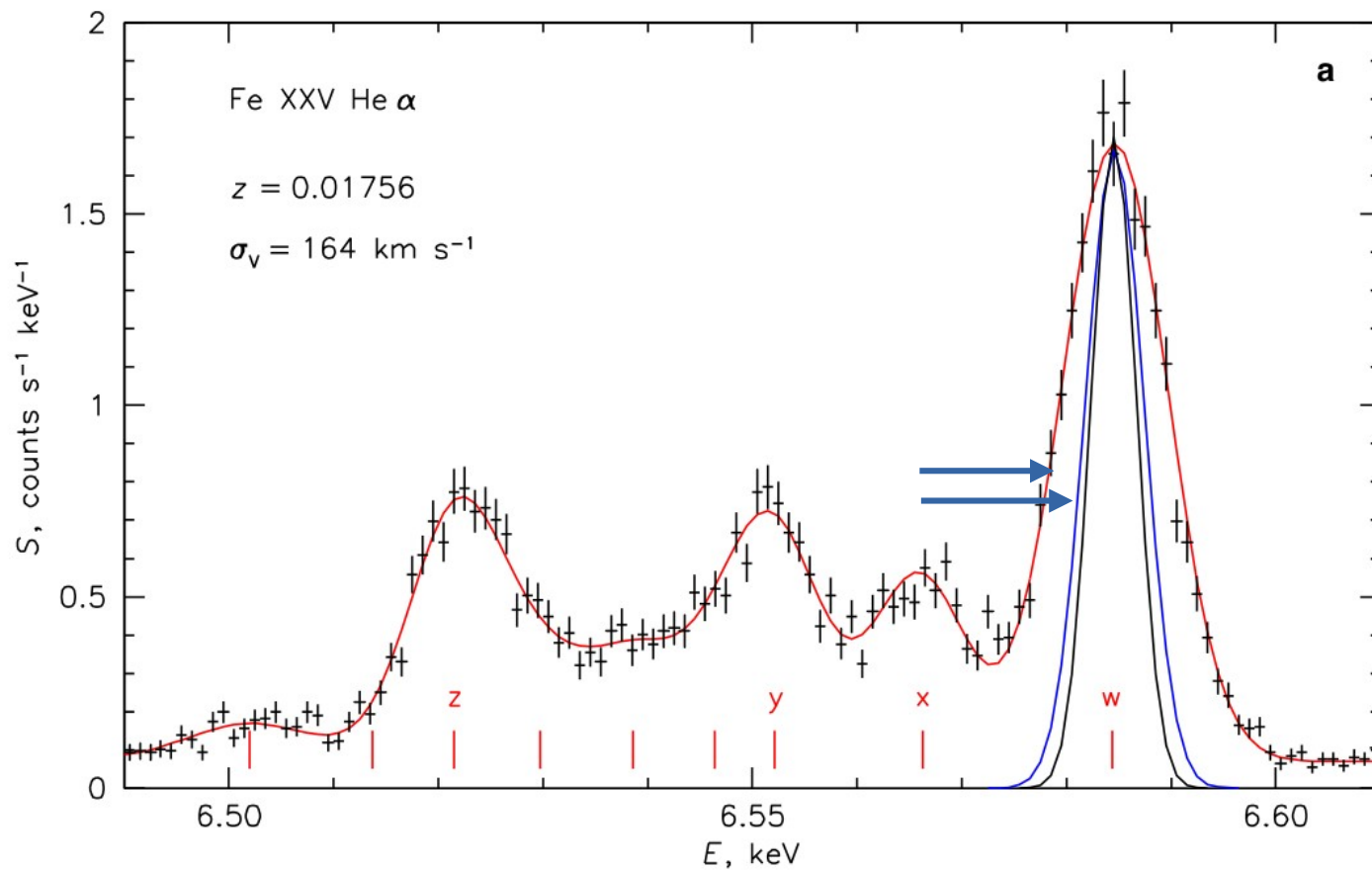
Transition Edge Sensors



L'amas de Persée vu par Hitomi



L'amas de Persée vu par Hitomi



Présence de
turbulence

Indication sur le
mécanisme de
transfert de
l'énergie du trou
noir au gaz de
l'amas

Conclusions

- L'astronomie X permet de voir les objets très chaud (> 1 millions de degrés) et les objets où la densité d'énergie est très grande
- Les amas de galaxies sont les objets liés les plus grands de l'Univers, et sont particulièrement bien observables en rayons X
- Ils constituent des sondes essentielles de la composition de notre Univers