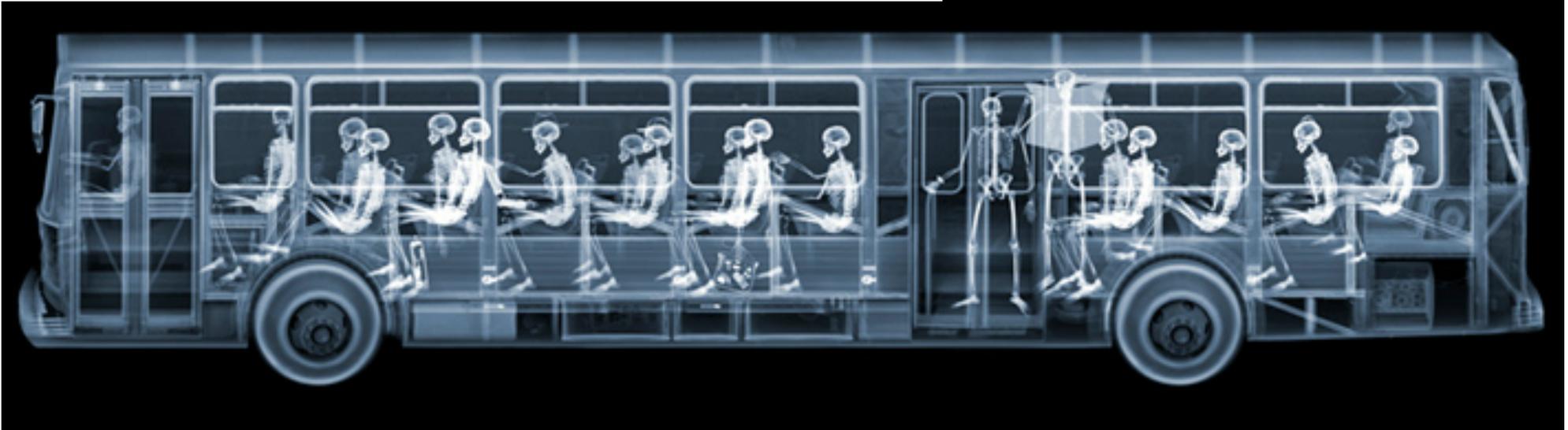
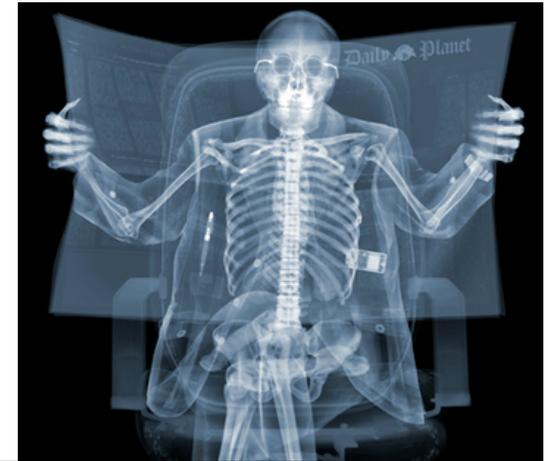


L'Astronomie en rayons X

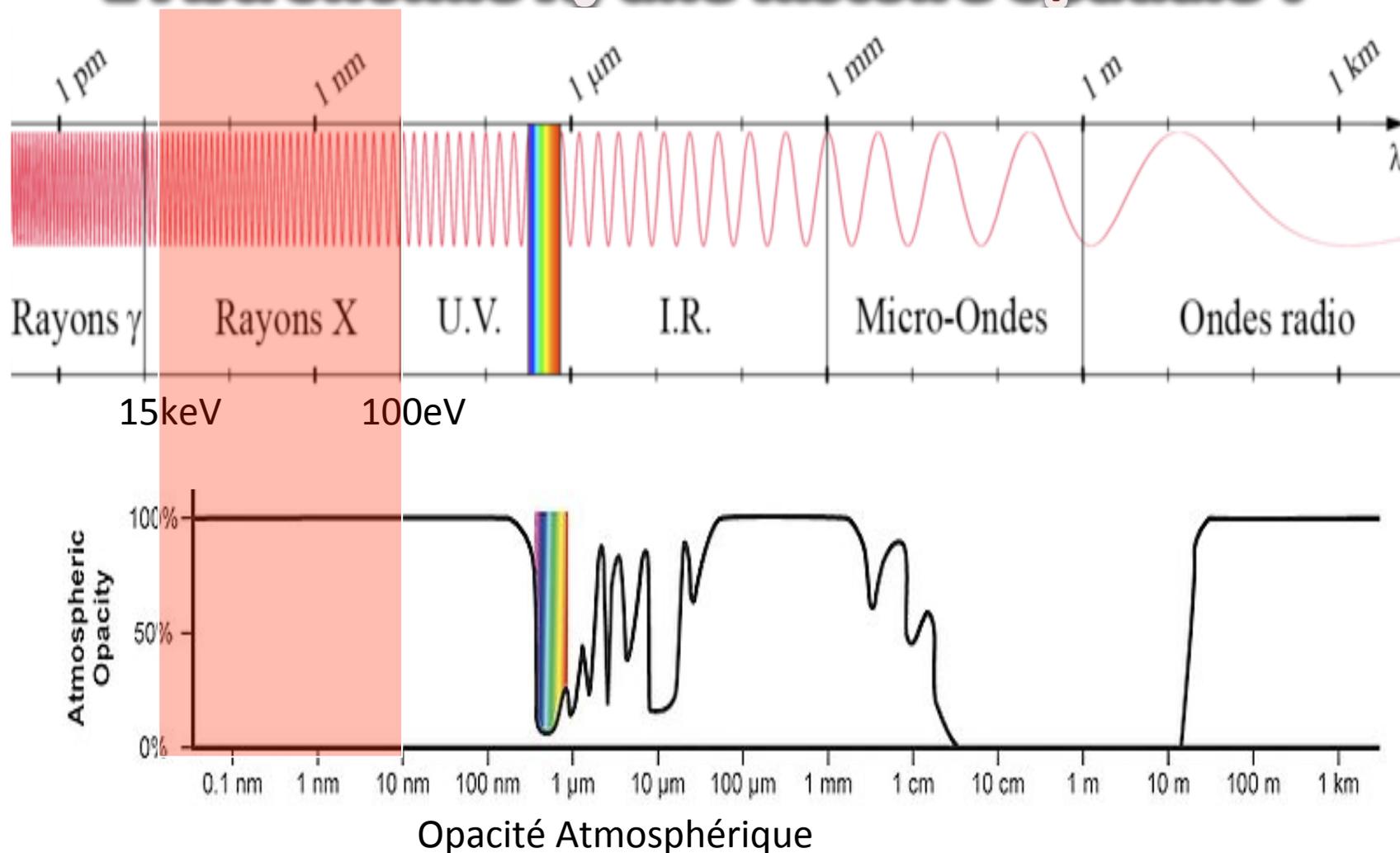
- I. Un peu d'Histoire
- II. Le Ciel en Rayons X
- III. Des perspectives

Jean-Luc Sauvageot CEA/SAp DRTBT2012



I. Histoire

L'Astronomie X, une histoire Spatiale !



Les Rayons X sont absorbés par l'Atmosphère à 100% !!!

→ Observation Satellite (ou Fusée Sonde)

I. Histoire

L'Astronomie X a tout juste 50 Ans ...

Jusqu'en 1960:

Le Soleil $10^6 \text{ ph.cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \rightarrow$

Flux_earth(all stars) = $10^{-4} \text{ ph.cm}^{-2} \text{ s}^{-1} !!$

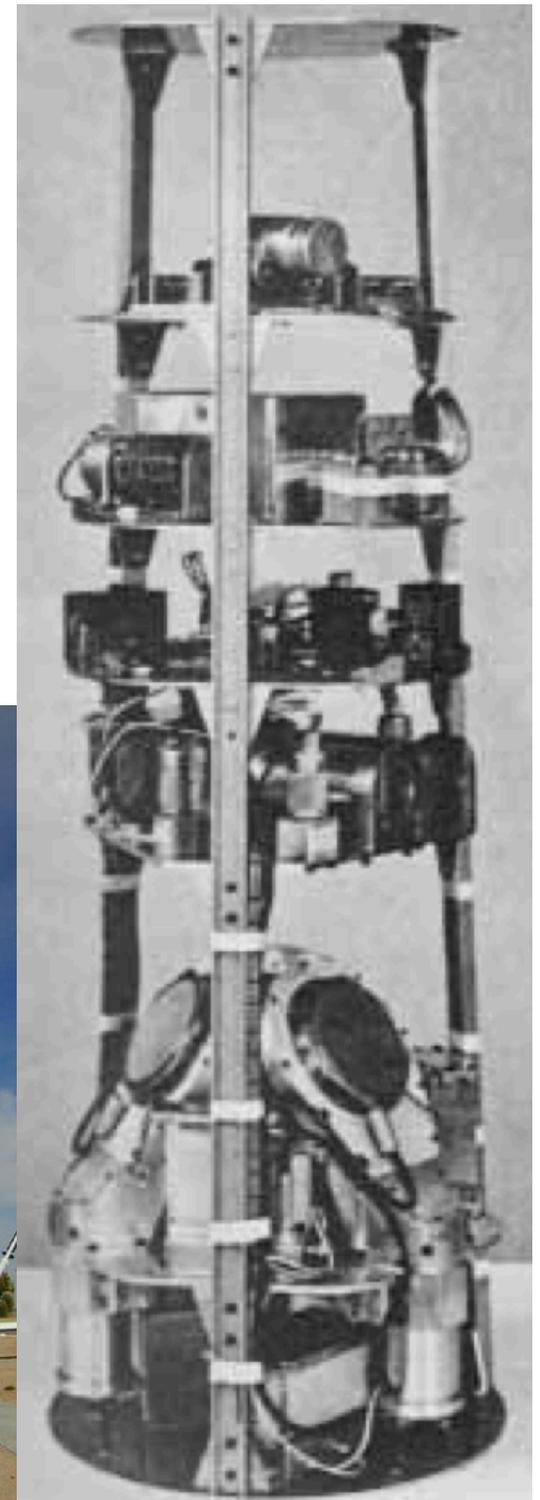
Juin 1962 : Un coup de chance !

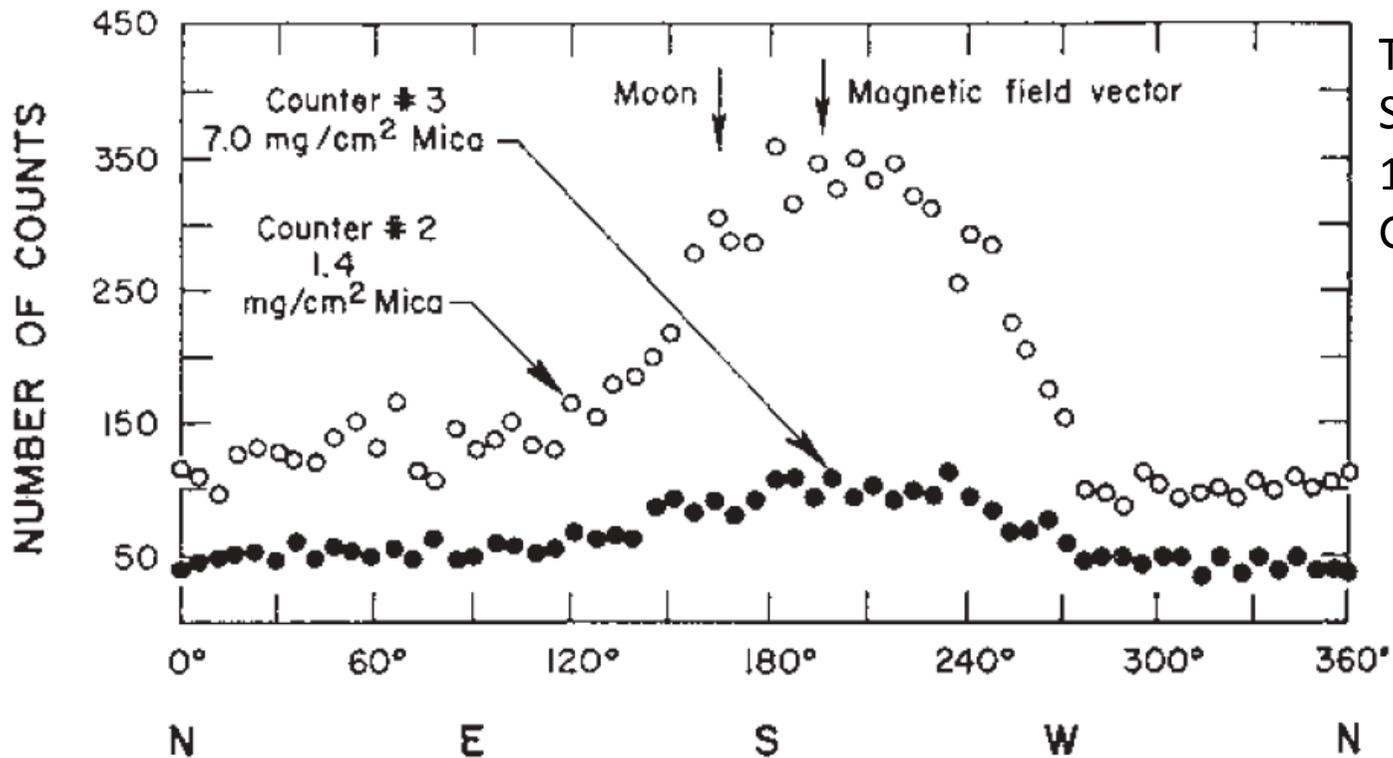
Giacconi, Fusée Sonde

pointée sur la Lune ... pas vue

...mais ...

Sco X1 dans le Champ !!!





The first observation of Sco X-1 in the June, 12, 1962 flight. From Giacconi, et al., 1962.

Sensibilité Instrumentale : $0.1-1 \text{ ph.cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Sco X-1 : $28 \pm 1.2 \text{ counts cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

$$L_X(\text{ScoX1}) = 10^4 L_{\text{vis}}(\text{ScoX1})$$

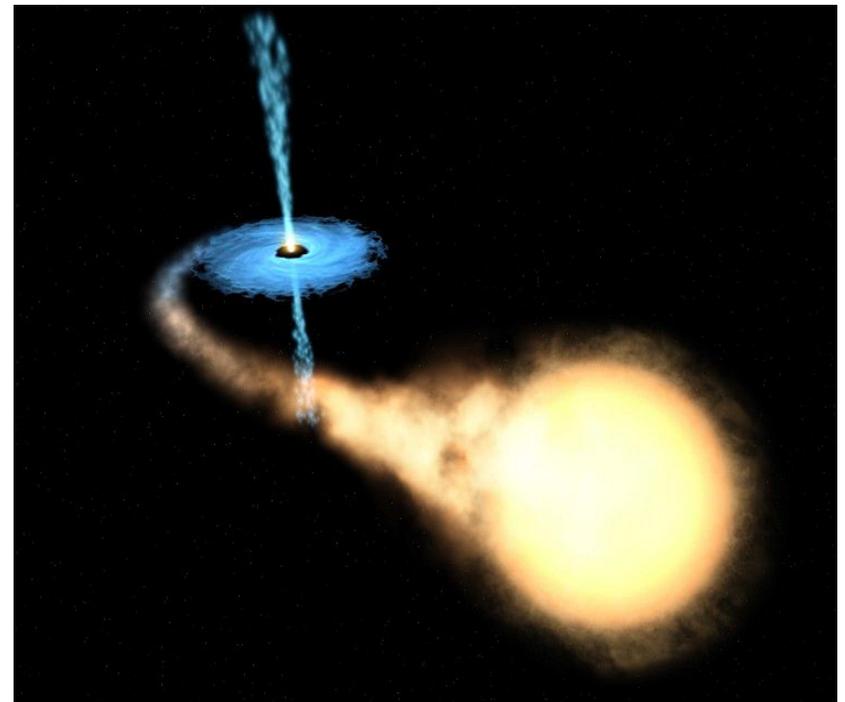
$$L_X(\text{ScoX1}) = 10^5 L_{\text{Bol}}(\text{Soleil}) \text{ !!!!}$$

Binaire X de faible masse

$1.4 M_{\odot} - 0.4 M_{\odot}$, μ -Quasar

Disque d'accrétion, Période 19H...

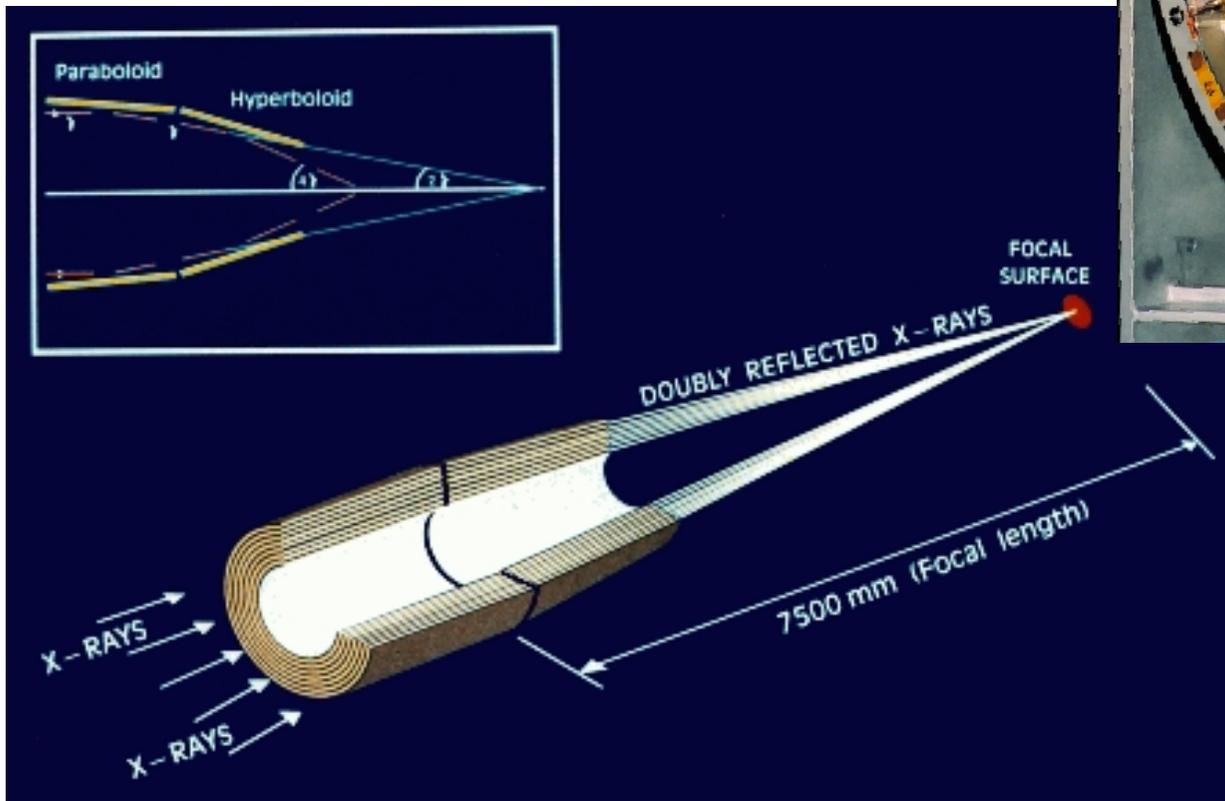
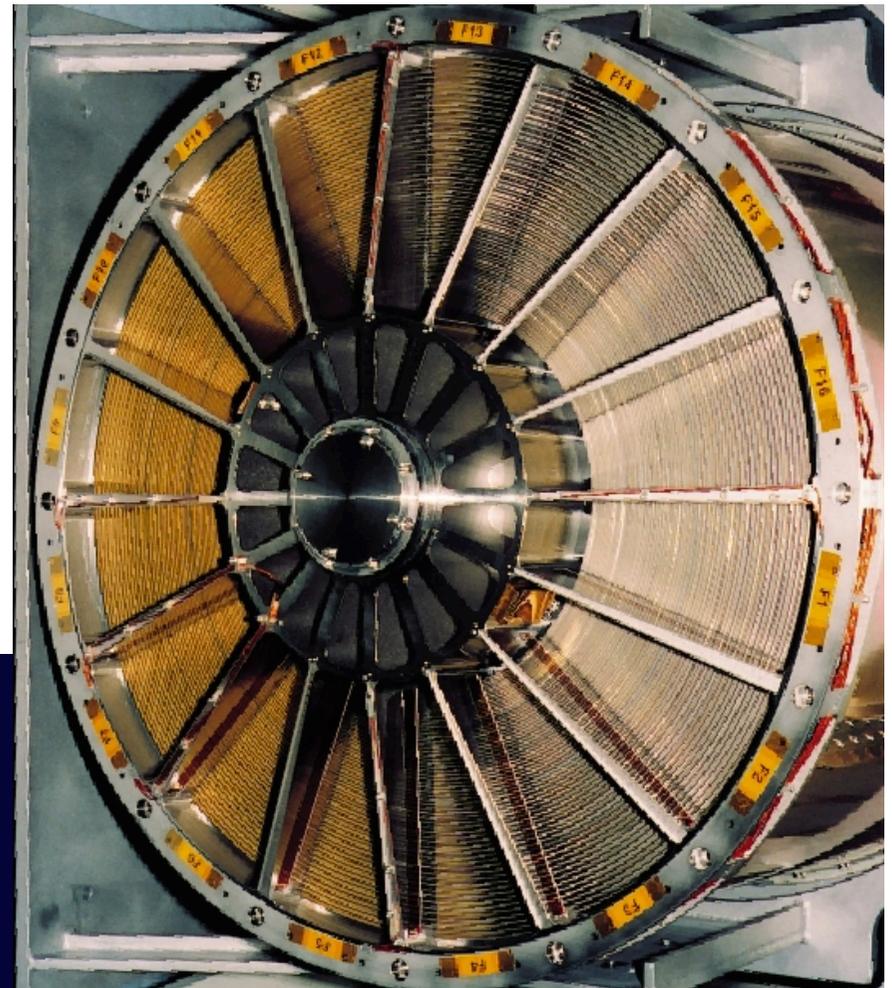
➔ **Début de l'Astronomie des rayons X**



I. Histoire

Sensibilité => Focaliser les X

Incidence RASANTE obligatoire sinon Absorption ...
Focale longue pour Grande Surface ...
en particulier à haute Energie



XMM- Chandra
~7,5 m de focale

Les Grandes Dates

- **1962** Vols Fusées (tps pose ~15min) → 30 Sources
ScoX1, Nébuleuse du Crabe, la galaxie M87 & le quasar 3C273
- **1970** Le premier satellite dédié UHURU :
qq centaines de sources+ identifications (cf. position)
principalement des binaires compactes.
- **1978 HEAO2 (Einstein) Miroir, compteurs & SSS !!!**
- EXOSAT, GINGA, ROSAT (compteurs à Gaz)
- **1990-2010:** ASCA Chandra XMM/Newton (CCDs)
- **Demain:** μ -calorimètres (DéTECTEURS à Basse T)

Que mesure-t-on en X ?

- Avec les CCDs au meilleur de l'art:
- Pixels&Télescopes → 0.5-15 arcsec/pixels
- $T_{\text{ccd}} \sim 115\text{-}150\text{K}$ & Bruit lecture $\sim 1\text{-}2 e^-$ →

Résolution spectrale 120ev@6keV (limitée par Fano)

Pour chaque photon X, on mesure: α, δ, t, E

N.B.: Une observation en rayons X est une liste de photons.

→ Spectro (E)-imagerie(α, δ) résolue en temps(t).

Emission X des sources Célestes

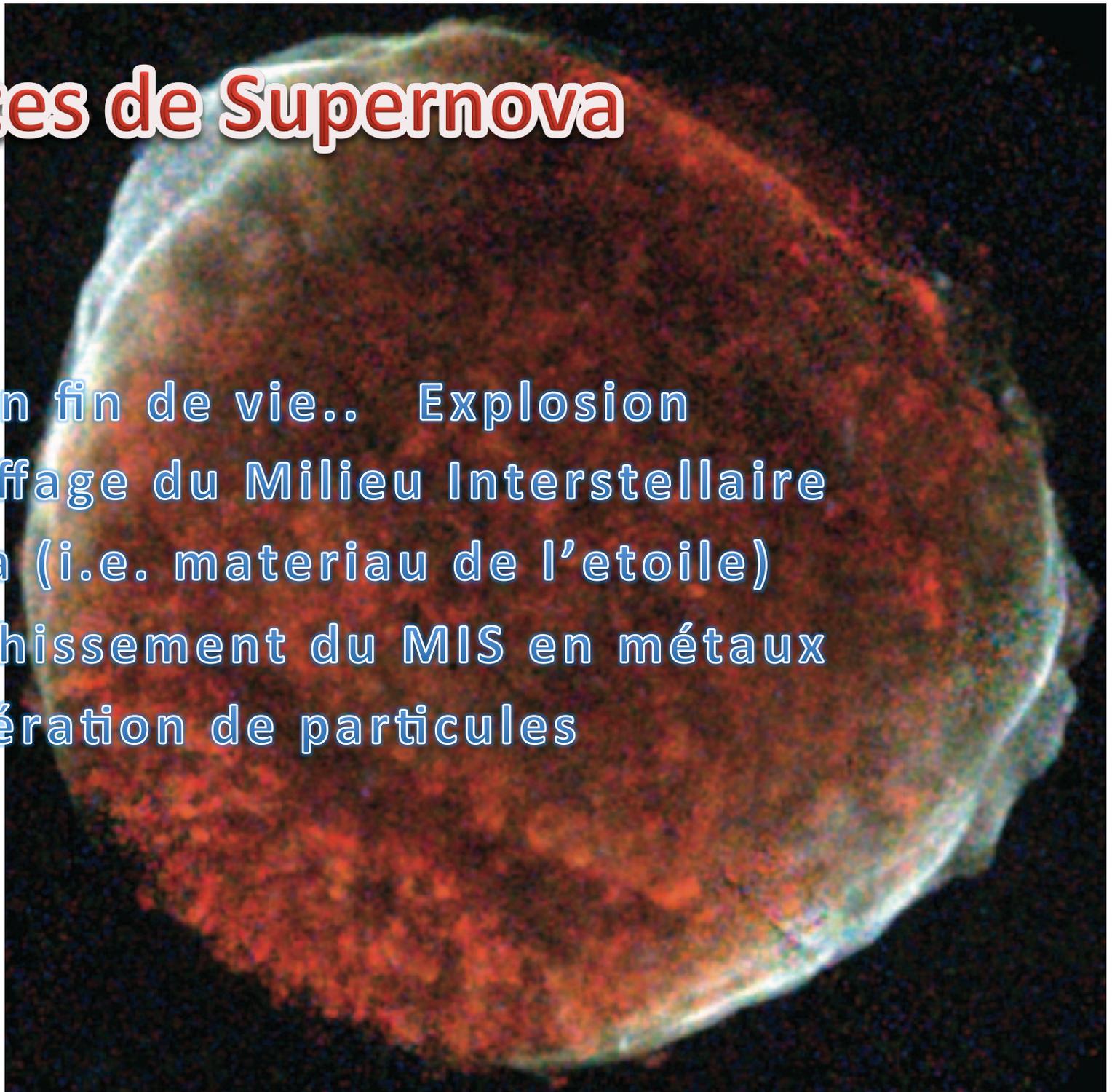
Emission Thermique (Bremsstrahlung+Raies)	Emission Synchrotron
Plasma minces (faible épaisseur optique « chaque photon X émis s'échappe de la source... ») Objets diffus: Restes de Supernovae, Amas de galaxies	Plasma denses (BCP d'interaction photon-matière, Absorption-ré-émission) Objets compacts: Binaires, AGN, ...
Gaz Chaud à 10 à 100 Millions de K	Matière très accélérée tombant sur l'objet compact

Pas si simple ... Il y a aussi :

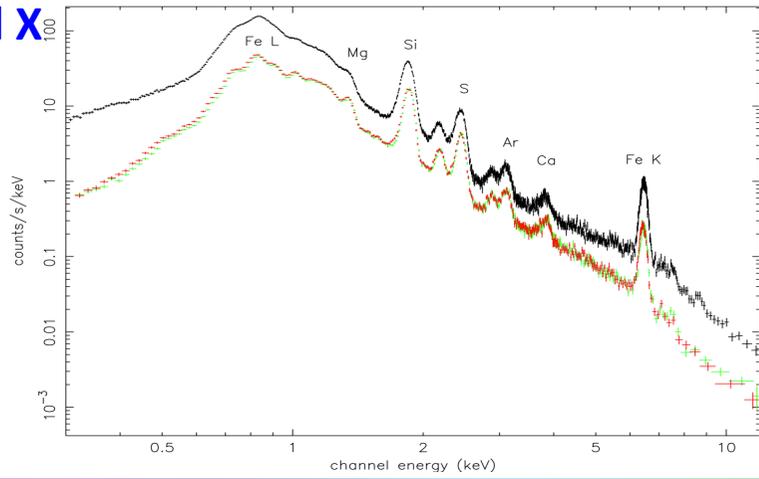
- la vraie émission thermique (type «corps noir») des étoiles à neutrons..
- les RSN ont aussi une composante NON thermique (accélération de particules)
- Les étoiles (émission coronale)
- Les planètes (émission aurorale)
- Les comètes (interaction particules vent solaire- gaz cométaire)
- La Lune (réflexion des X solaires)
- ...**En fait, tout ou presque émet des rayons X !**

Les Restes de Supernova

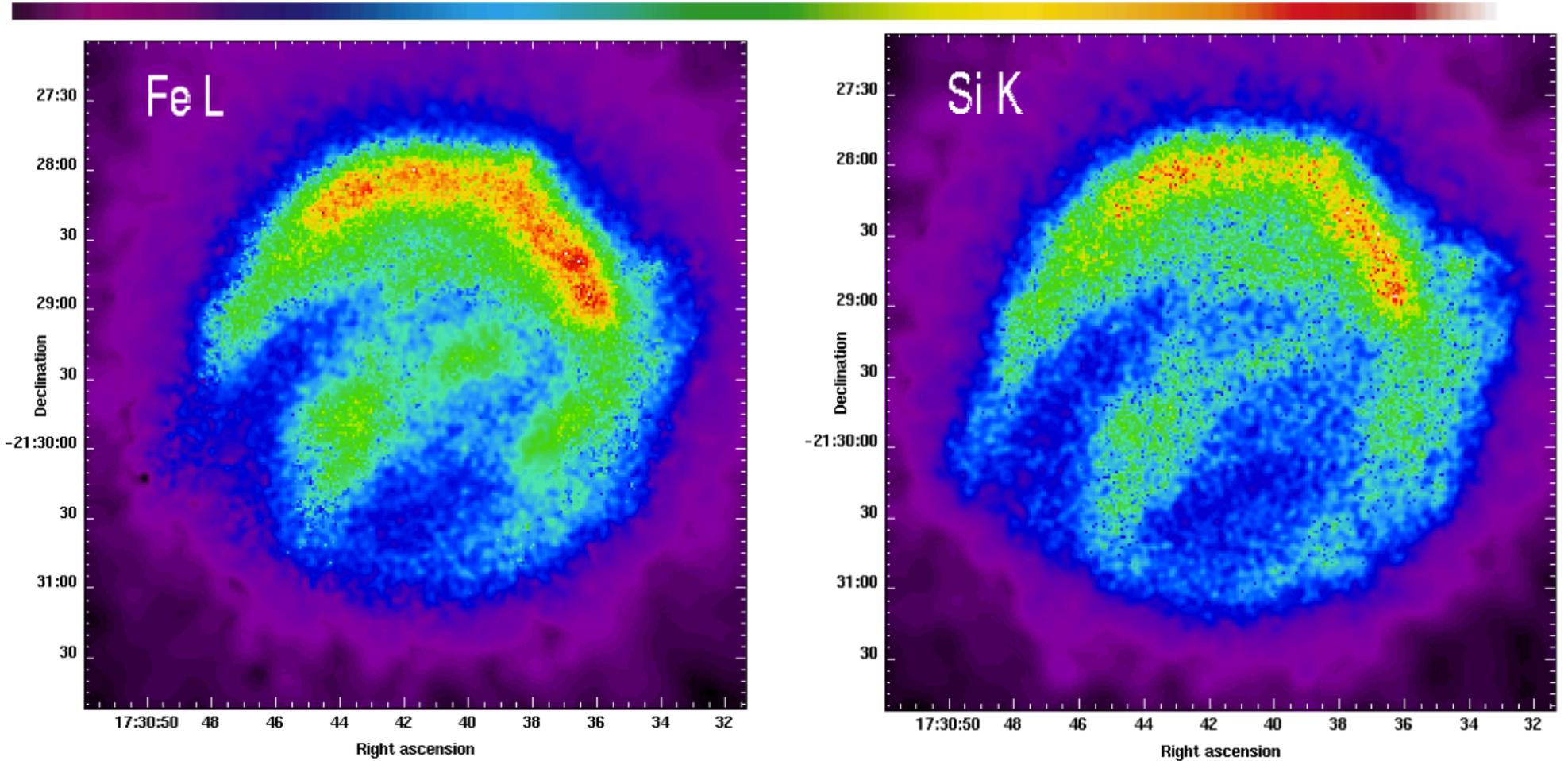
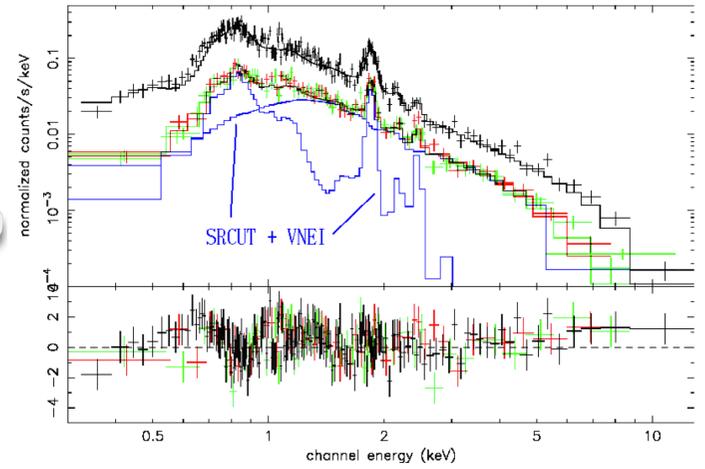
- Etoiles en fin de vie.. Explosion
 - Chauffage du Milieu Interstellaire
 - Ejecta (i.e. materiau de l'étoile)
 - Enrichissement du MIS en métaux
 - Accélération de particules



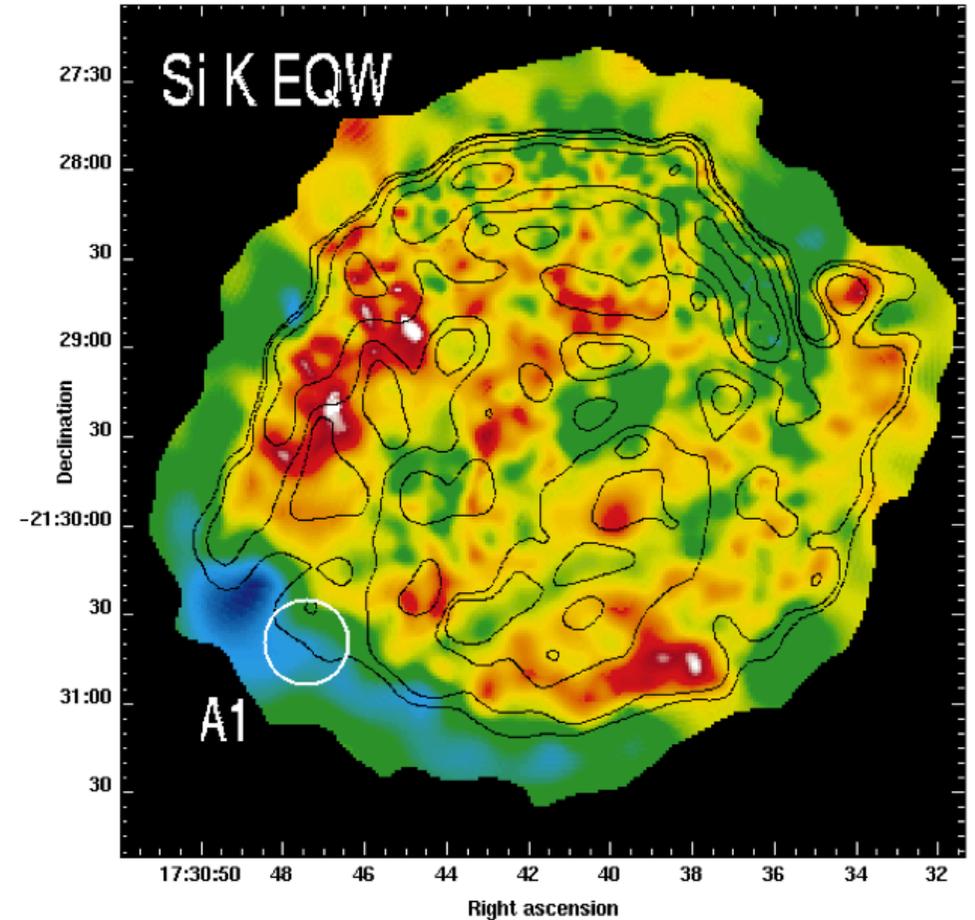
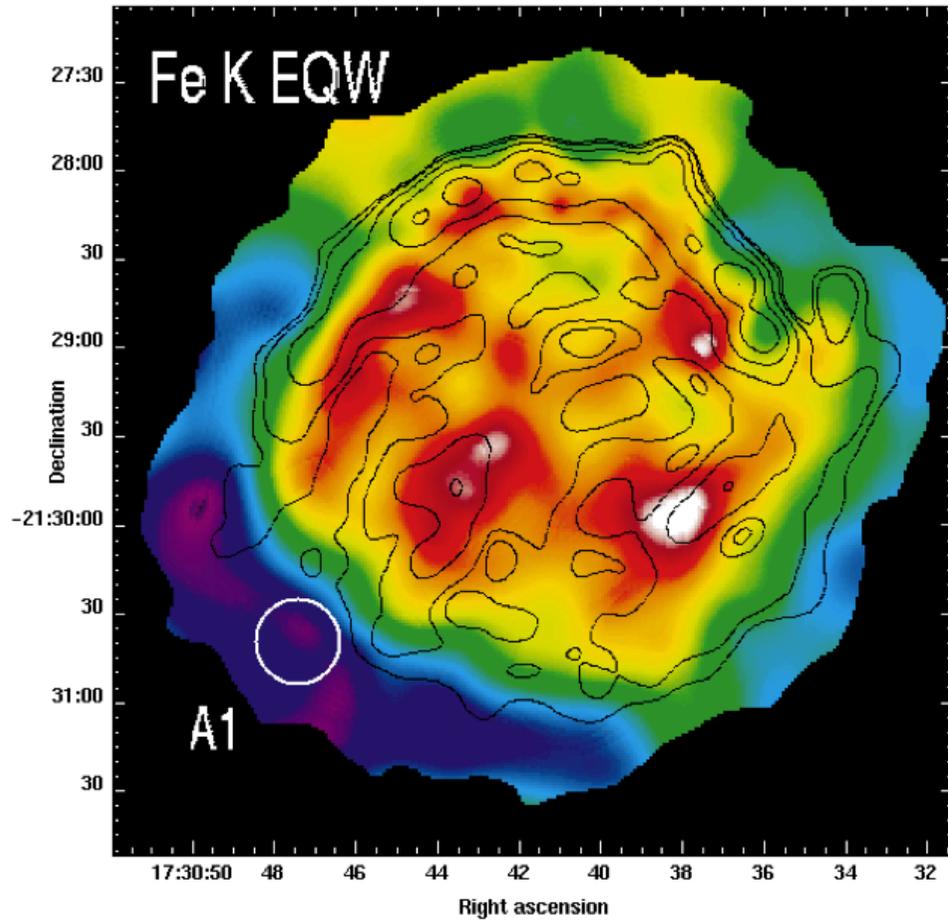
II. Ciel X



RSN Kepler



Reste de Kepler



II. Ciel X

Les Amas de Galaxies

Les Amas de galaxies sont les plus grandes structures de l'Univers gravitationnellement liées

Equilibre Hydrostatique
La Gravité en équilibre contre le gradient de pression

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g$$

Image Visible des galaxies

En bleu: Synthèse de la masse responsable de l'effet de « Lensing »



II. Ciel X

Ultra Brève « Histoire » de la Masse des Amas



✓ 1935 Hubble et son spectromètre :

Galaxies dans les amas : $\sigma_v \approx 800$ à $1\ 000$ km/s !!!

Si $F_{\text{grav}} = GMm/R^2$ alors Théorème d'Ampère & Loi de Kepler

→ La masse de toutes les galaxies ne peut pas lier les galaxies entre elles !!!

✓ 1970-75: Astro X (compteur à gaz) le Gaz des amas: mesure de $\rho_{\text{cen}} = 10^{-2}$ - 10^{-3} p/cm³

→ La masse du gaz est au moins 3 fois la masse des galaxies

Arrange un peu la situation, mais toujours pas suffisant ...

✓ 1975-85 : Mesure de T_{gaz} : $T_{\text{gaz}} = 10^7 - 10^8$ K

→ Le gaz ne peut pas être lié à cette température par la gravité si $M_{\text{amas}} = M_{\text{gaz}} + M_{\text{Gal}}$!

→ Matière Noire non collisionnelle « Froide »
A l'équilibre Hydrostatique avec ces mesures et F_{grav} de Newton, on obtient la recette adhoc suivante: $M_{\text{gal}} = 5\%$, $M_{\text{gaz}} = 20\%$ et $M_{\text{DM}} = 75\%$

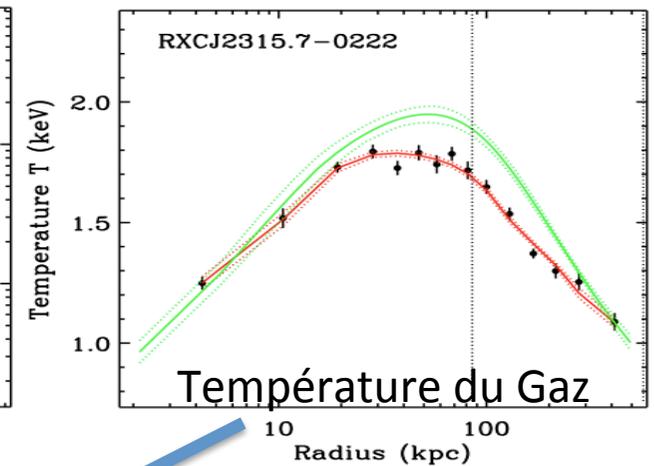
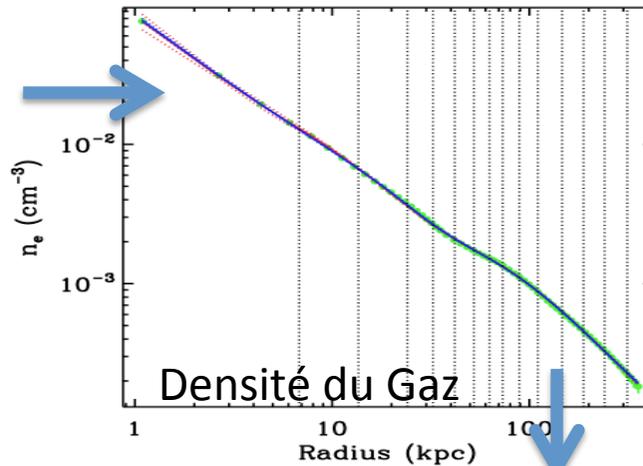
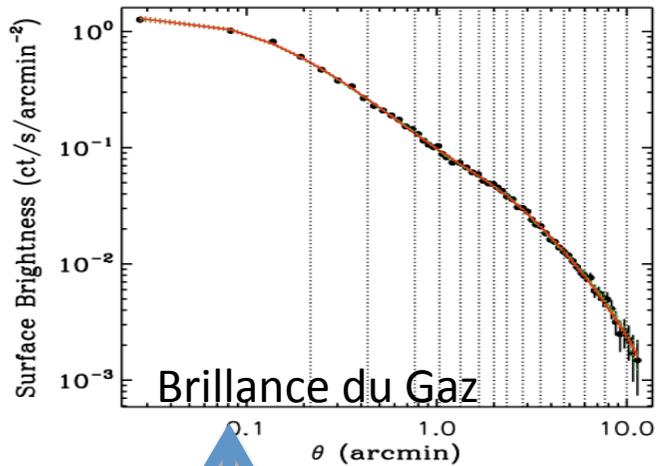
$n_{\text{Gal}} = 50$ et $1\ 000$
 $T_{\text{Gaz}} = 10^7 - 10^8$ K
Taille: 2 à 10 Mpc.
Masse 10^{14} et 10^{15} masses solaires.

II. Ciel X

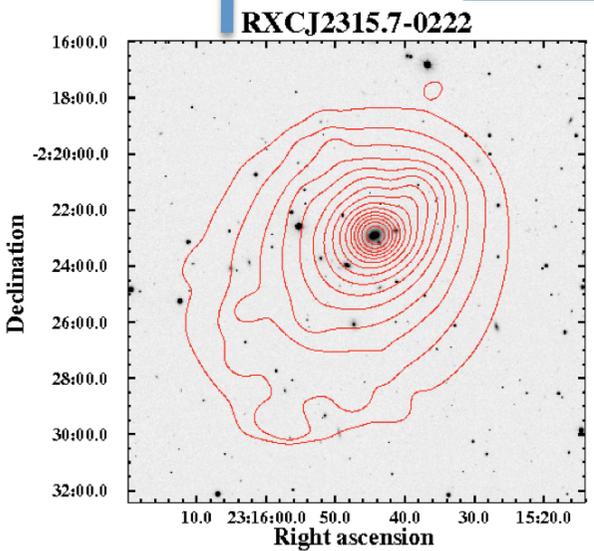
Mesure de la Masse à l'Equilibre Hydrostatique

Imagerie du Gaz en X

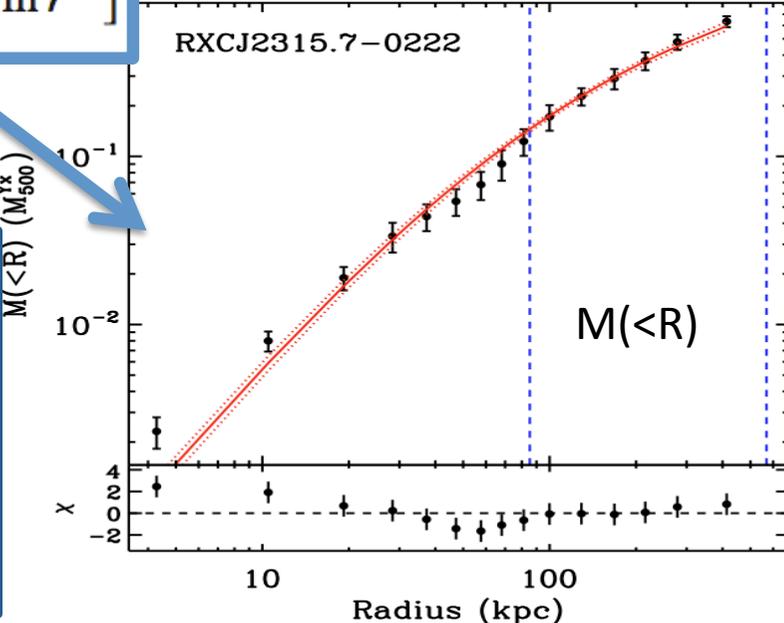
Spectroscopie du Gaz X



$$M(<R) = -\frac{kT(r)r}{G\mu m_p} \left[\frac{d \ln n_e(r)}{d \ln r} + \frac{d \ln T(r)}{d \ln r} \right]$$

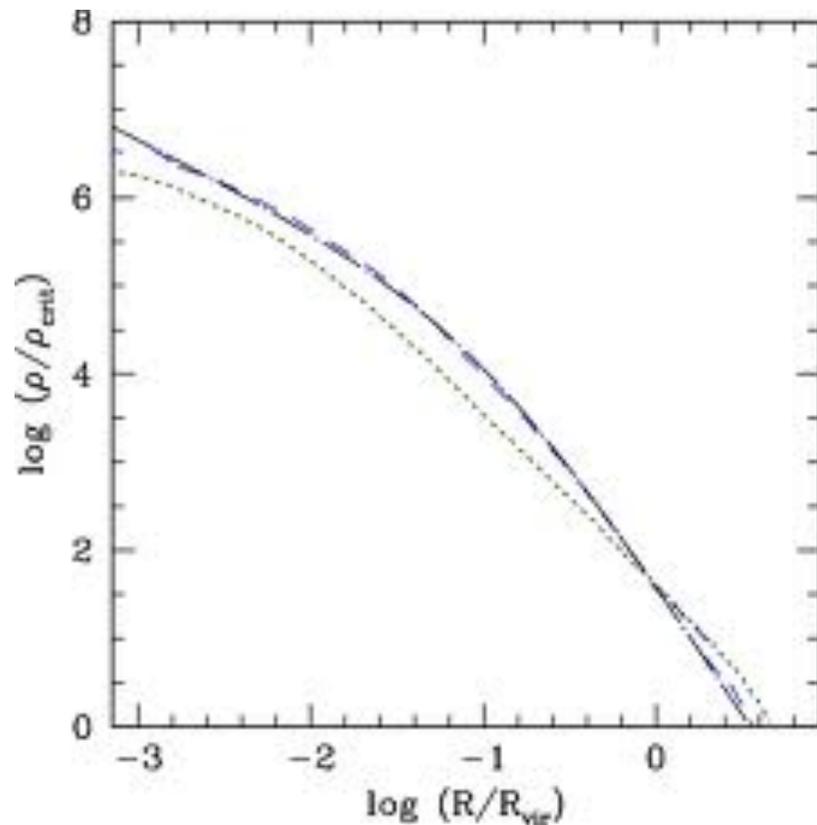


<i>Model</i>	NFW
C_{500}	8.01 ± 0.82
M_{500}	$497 \pm 14 \cdot 10^{13} M_{\odot}$
R_{500}	3.58 ± 0.29 kpc
$f_{\text{gas},500}$	0.093 ± 0.013
χ^2/dof	17.9/13

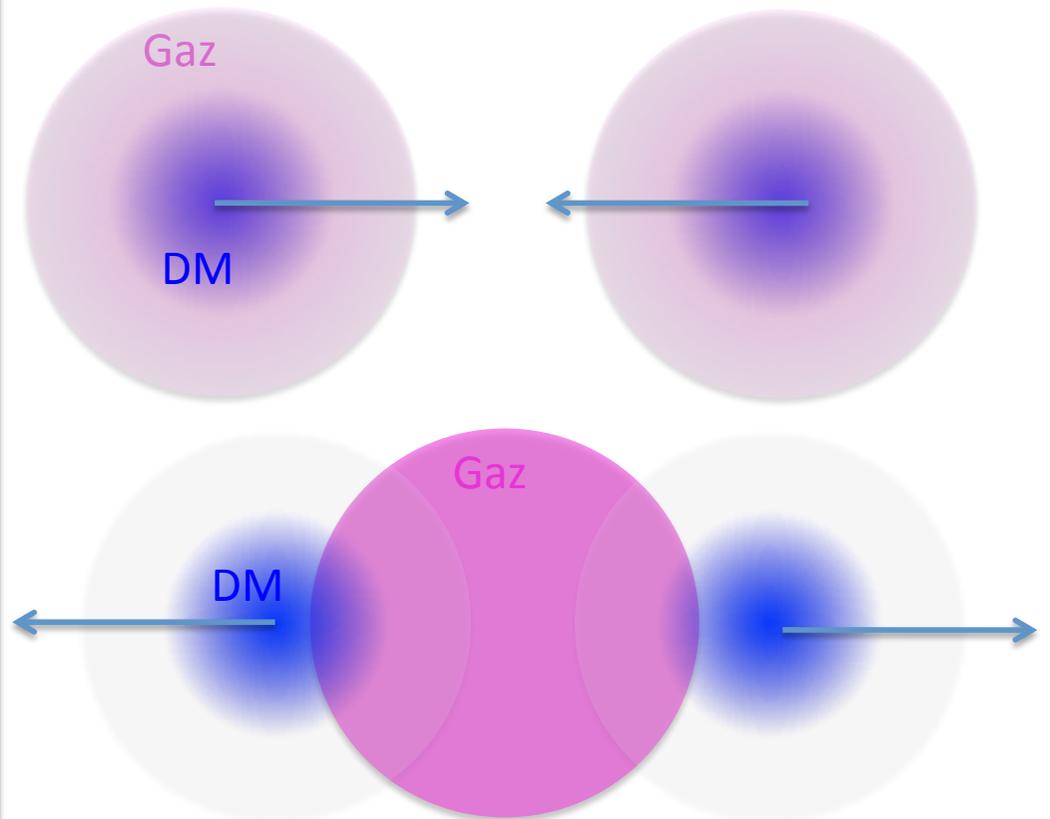


Le profile NFW

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\frac{r}{R_s} \left(1 + \frac{r}{R_s}\right)^2}$$



Collision d'amas relaxés



Gaz (collisionnel) → Relaxation Violente
DM (Non collisionnel) → Très peu de relaxation

Les Amas de Galaxies .. en «X»

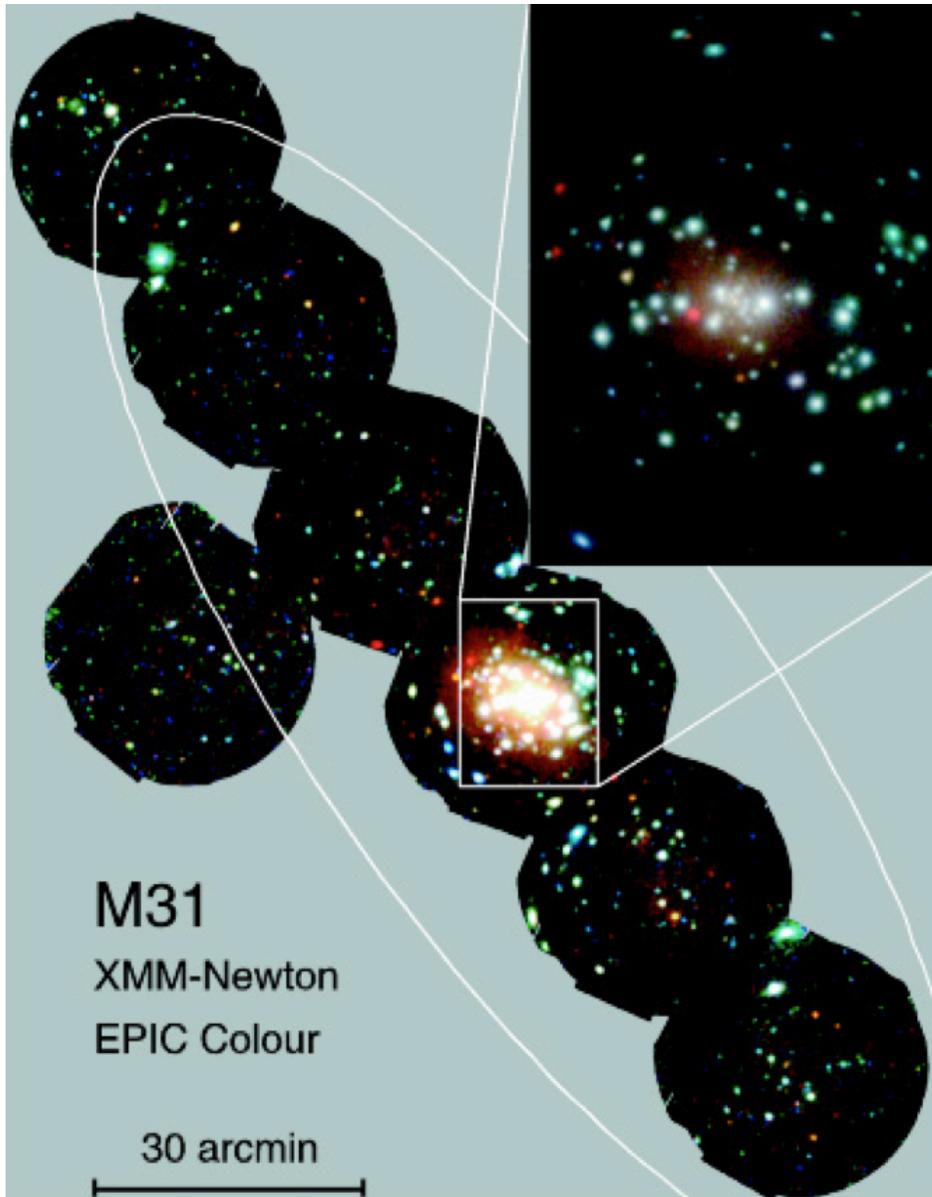


Collision d'Amas: En Bleu la DM (Weak lensing) en Rose le gaz(en X)...

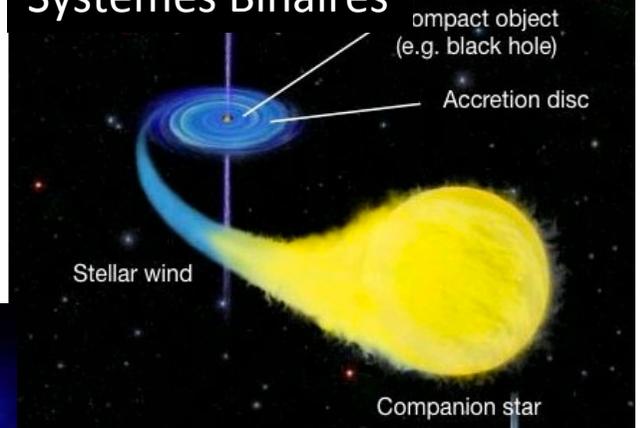
II. Ciel X

Les Objets Compacts

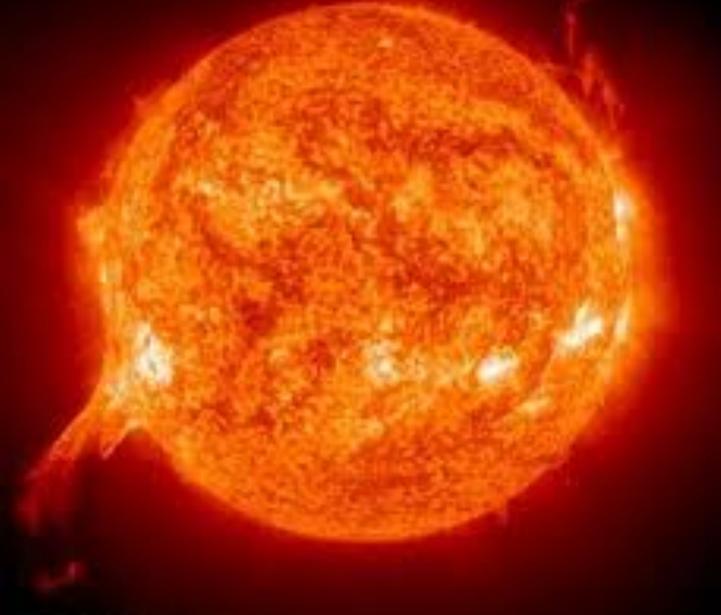
Matière dans champ de gravité TRES intense



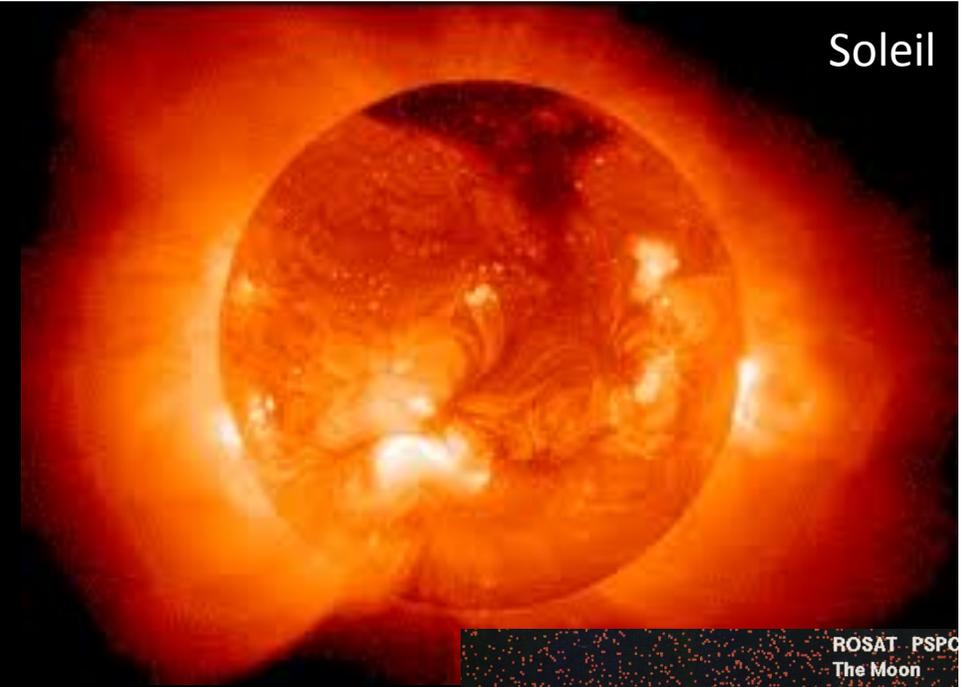
Systèmes Binaires



Soleil

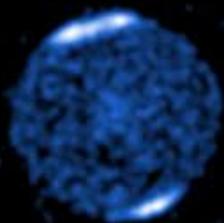
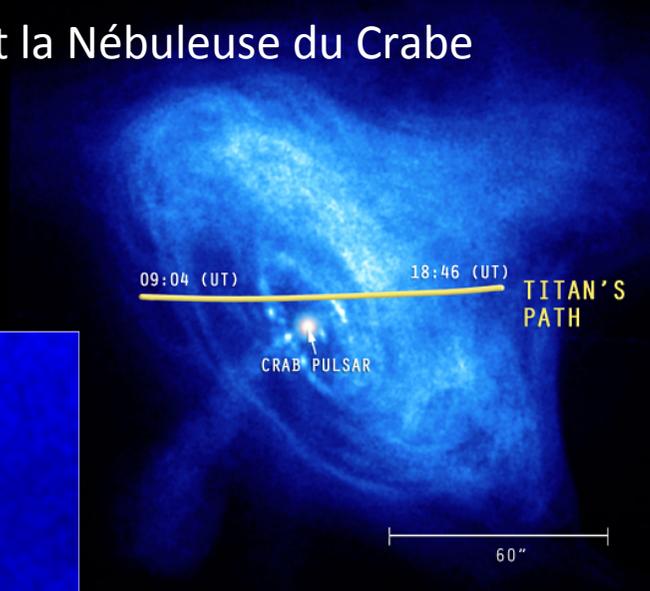


Soleil

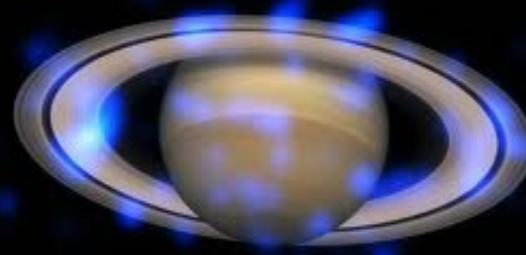


Systeme Solaire en X

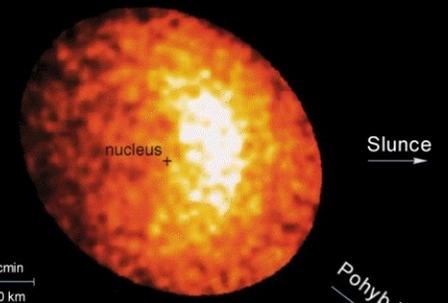
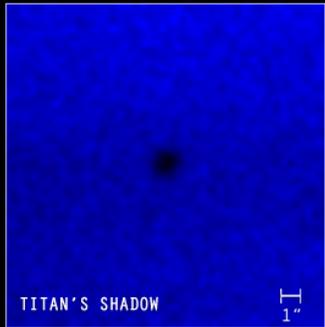
Titan devant la Nébuleuse du Crabe



Jupiter Chandra



Saturne XMM



Comète Hyakutake

A propos d'échelles des objets et des distances dans l'Univers ...

Objet Typique	Dans	Taille Typique	Espacement Typique	Espacement / Taille
Planète	Système Solaire	50 000 km	10^8 km	2000
Etoile	Galaxie	10^6 km	10 al	10^8
Galaxie	Amas	100 000 al	10^6 al	10

III. Demain?

L'Univers X en une planche « Cycle de la matière »

Black holes, compact objects
and accretion physics

Large-scale structure
of the Universe



Astronomie X:

L'Astrophysique des plasmas Chauds

Trous Noirs &
Physique de
l'Accrétion



Feedback Cosmique



Grandes Structures
de l'Univers

Test de l'accrétion
dans les conditions
de champ Limite
près des trous Noirs.
Mesure de leur
Spins.
Détermination des
conditions
physiques dans la
matière la plus
dense observable

Révèle la physique
de Feedback
Cosmique à toutes
les échelles.
Quantification des
relations entre la
croissance des trous
Noirs et les
évolutions
galactiques

Suivre la formation
et l'évolution des
grandes structures
via les Baryons
Chauds dans les
amas les groupes et
le milieu
intergalactique

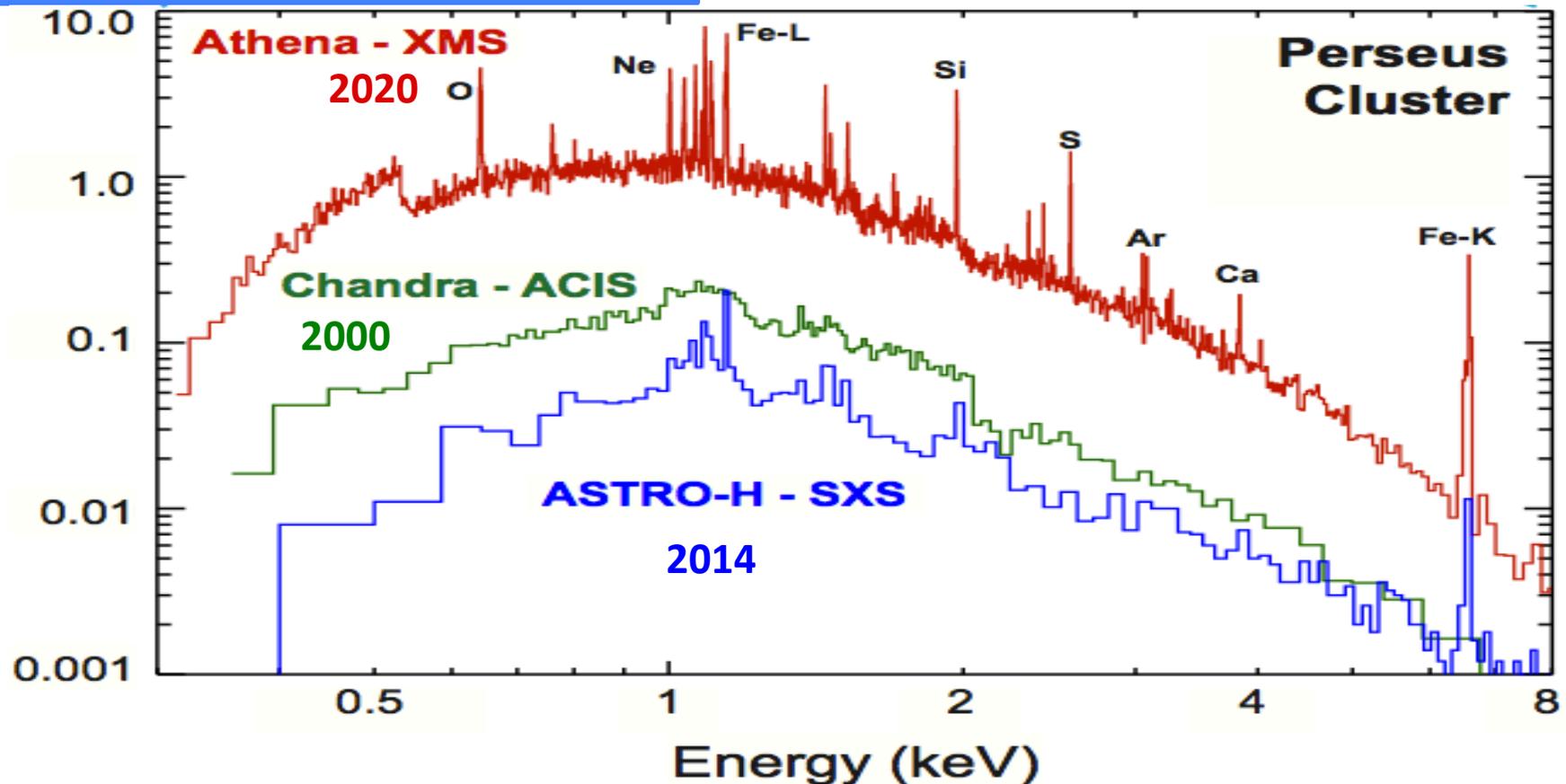
Diagnostique les plasmas chauds dans tous les environnements Astrophysiques par la spectro-imagerie à haute résolution spectrale

III. Demain?

Demain: De quoi rêve-t-on ?

- ✓ μ -calorimètres à 50mK
- ✓ Thermomètres MIS ou TES,
- ✓ Absorbeur Supra
- ✓ Electronique froide

→ Résolution spectrale
2ev@6keV
(50 fois mieux que les CCDs !!!)



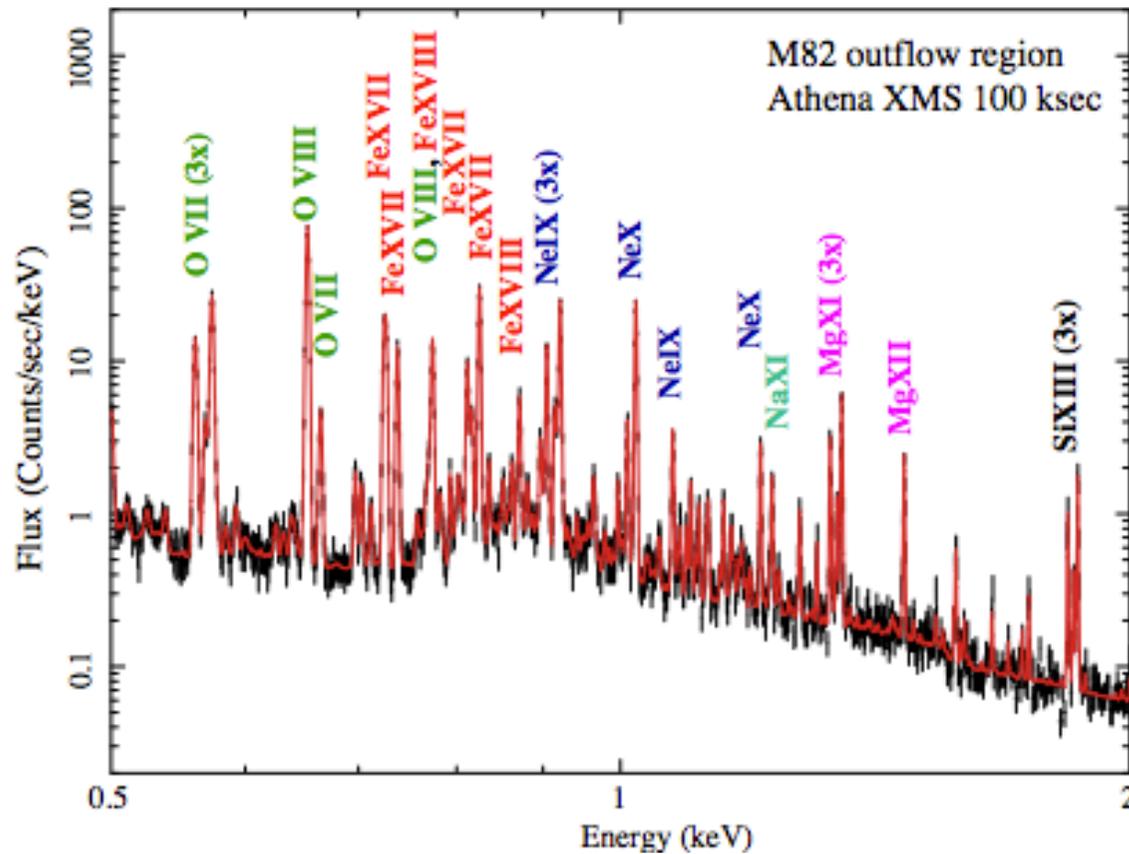
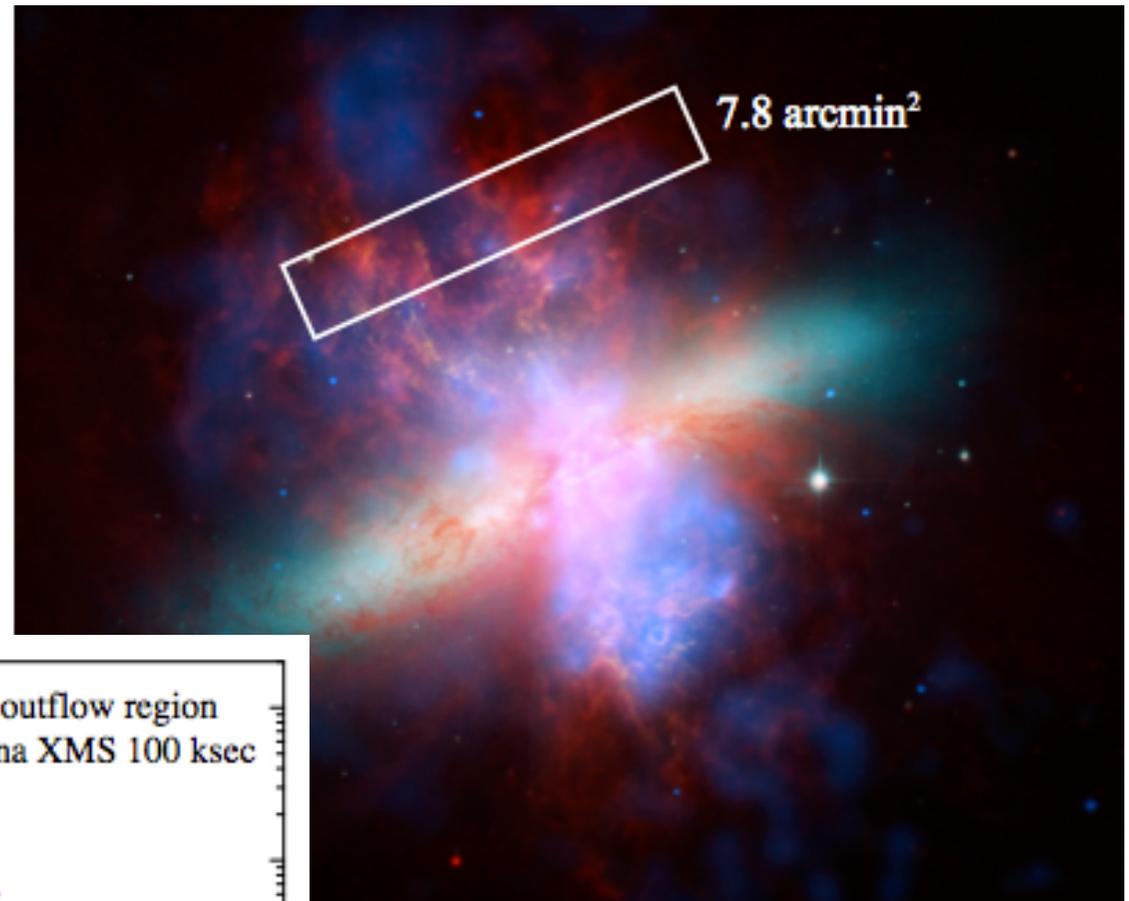
μ -Calorimètres X: La Spectro-Imagerie à 2eV de Résolution spectrale

- -1- ASCA, XMM, Chandra Spectro-Imageurs CCD
 - ➔ Cartes de Températures, Abondances des éléments, rapports de raies et vitesses Doppler impossibles
 - ➔ Raie/Continu très faible
- -2- à 2eV, les conditions d'émission des plasmas pourront être déterminées précisément

Vitesses, Turbulence,
Etats d'ionisation, Rapport de raies...
Presque aussi bien qu'en optique ! ($R \sim 3000$)

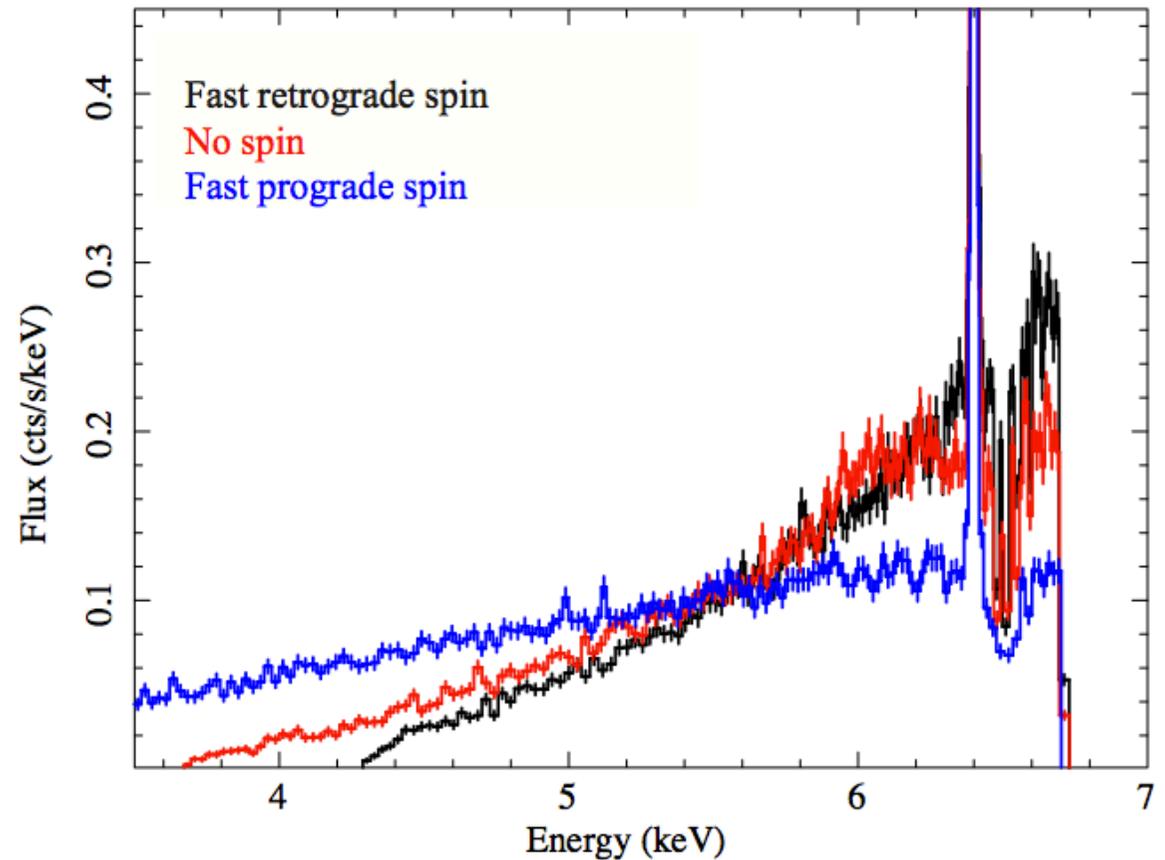
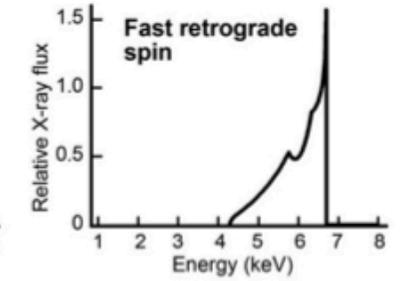
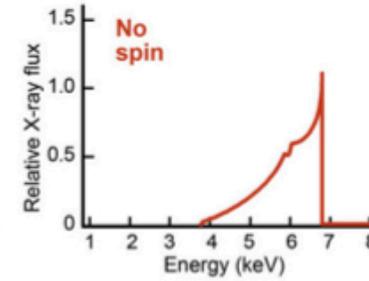
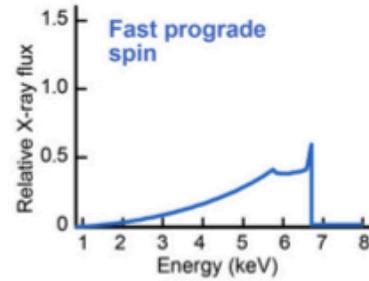
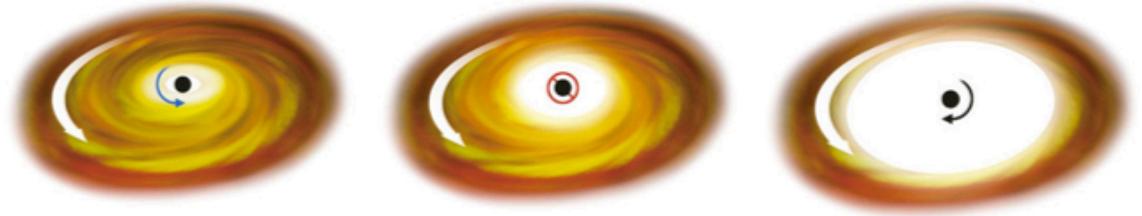
III. Demain?

Messier 82, which exhibits a starburst-driven superwind. Diffuse thermal X-ray emission as seen by Chandra is shown in blue

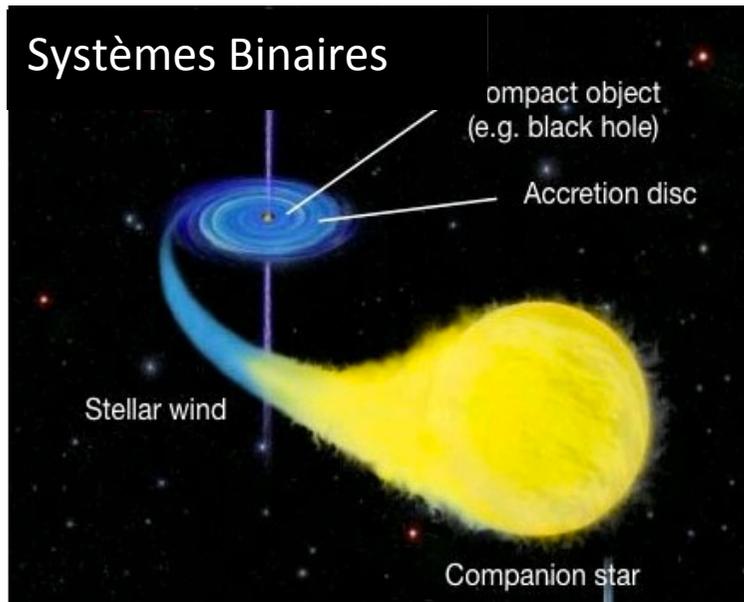


III. Demain?

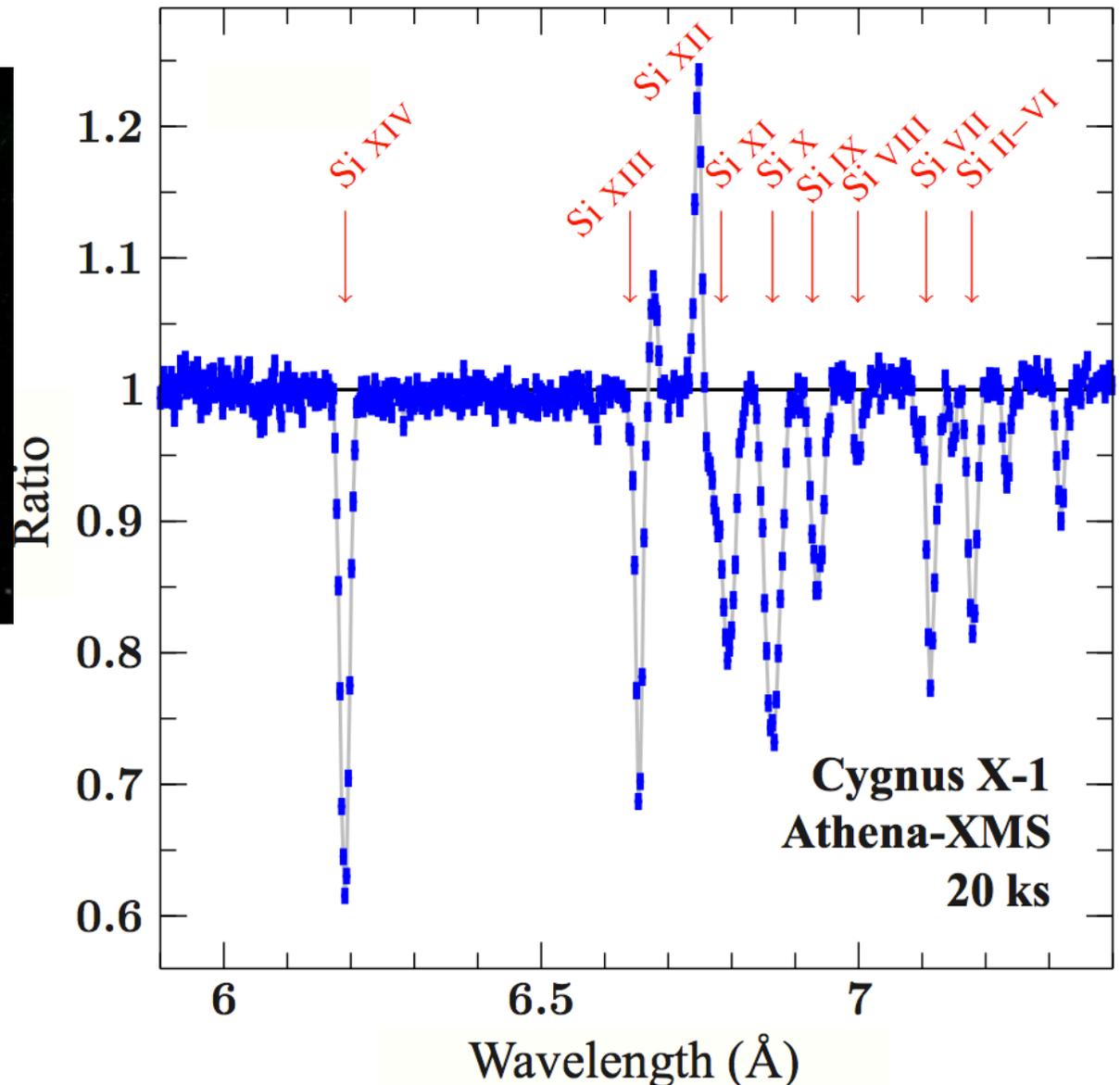
Mesurer le spin des Trous Noirs



Systemes Binaires avec Objet compact (Large Mass X-ray Binaries)

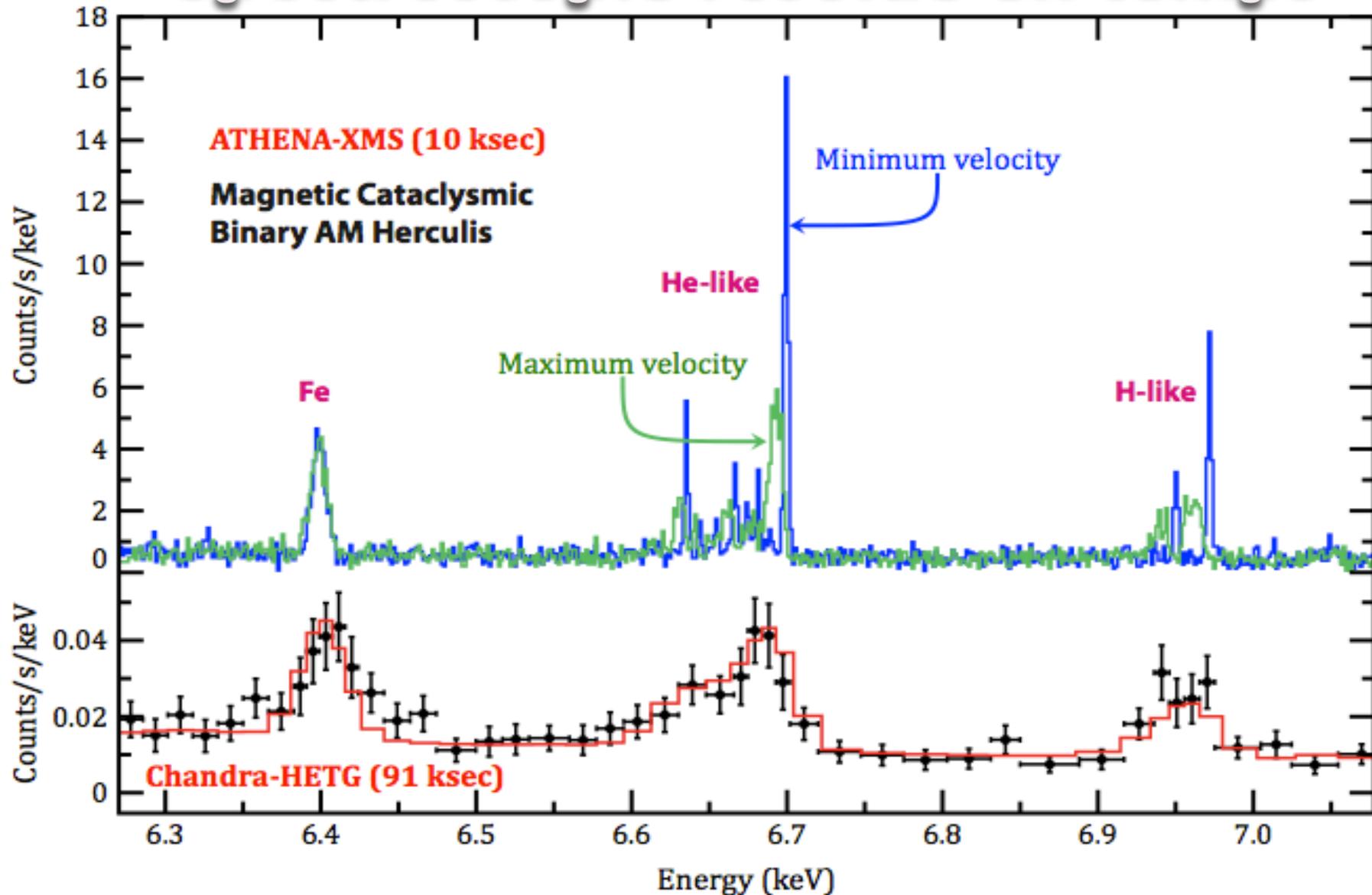


Spectre en émission & en absorption des raies du Silicium attendu de la matière du «vent stellaire» tombant sur l'objet compact



III. Demain?

Spectroscopie résolue en temps



- *prototypical cataclysmic binary star AM Herculis. Time resolved spectroscopy along the orbit*

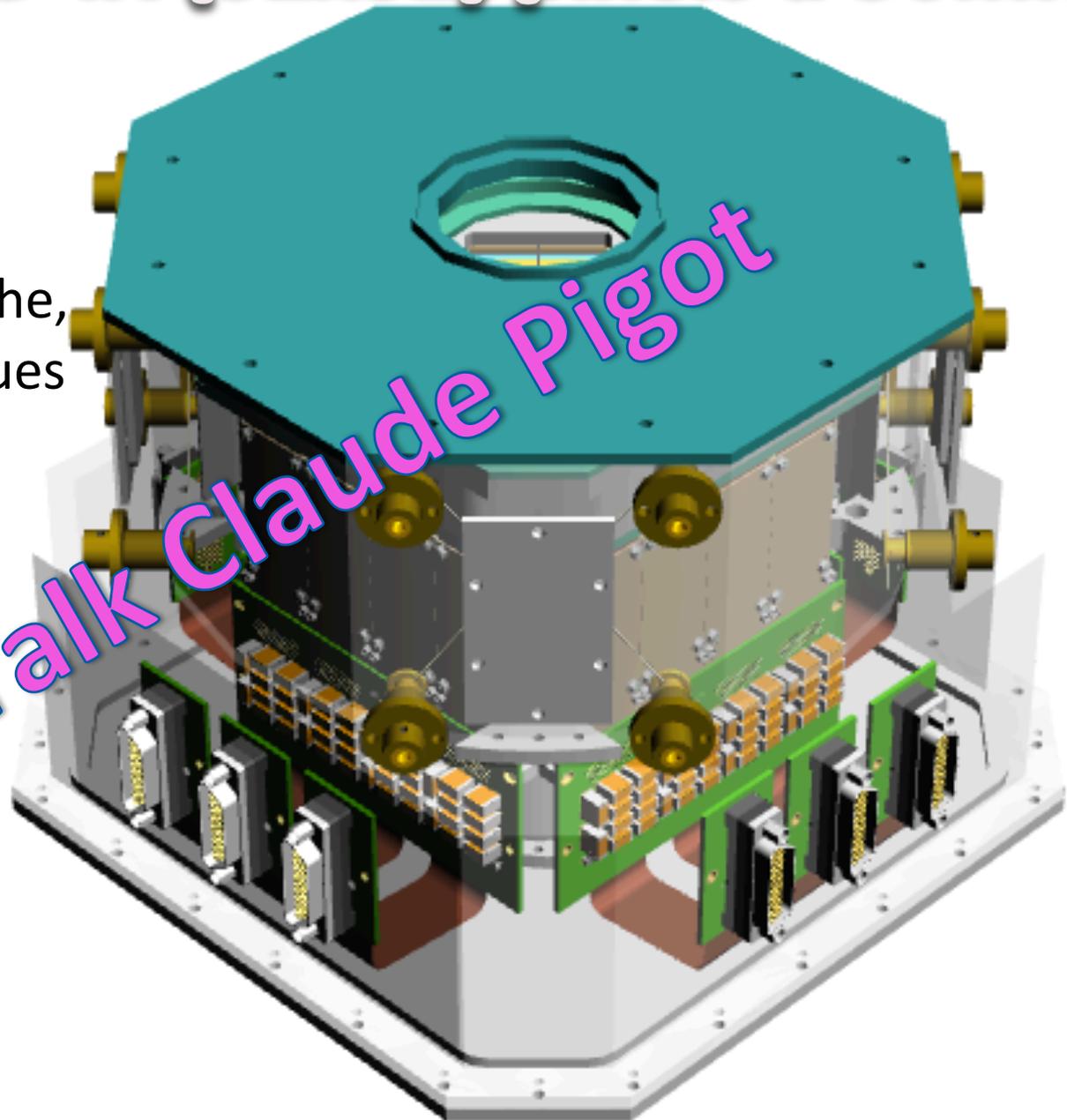
III. Demain?

Plan Focal de 4X (32x32) pixels à 50mK!

CAO intégrant :

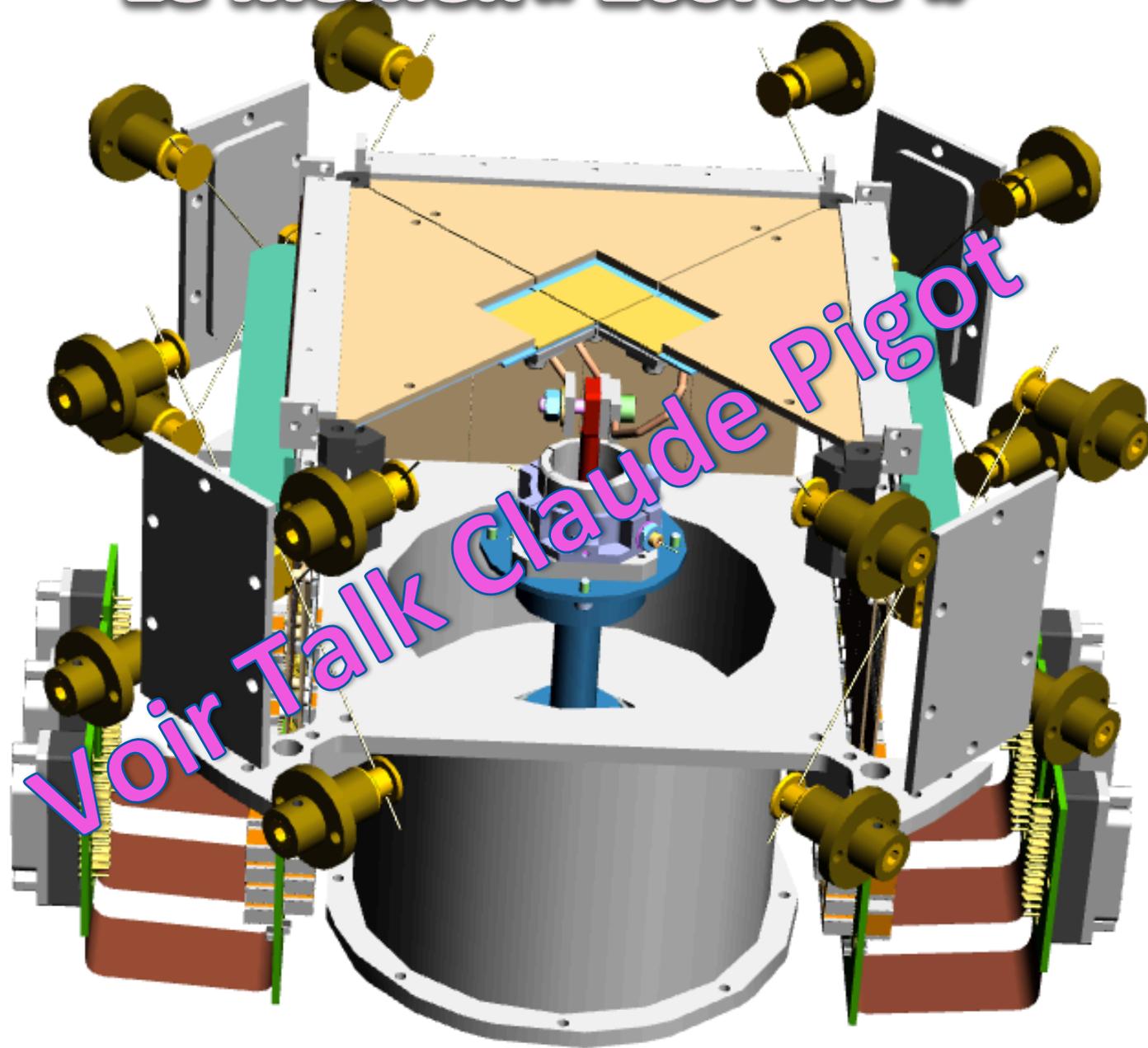
- 1- 4 matrices 32x32
- 2- l'électronique proche,
- 3- les écrans thermiques

Voir Talk Claude Pigot



III. Demain?

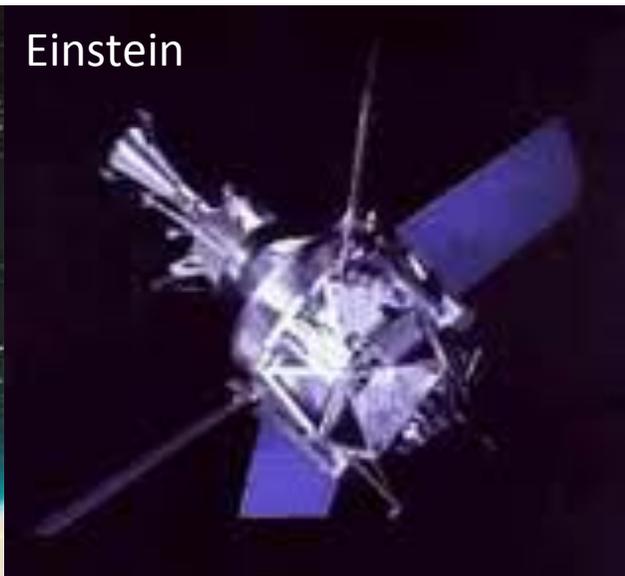
Le même..« Ecorché »



Voir Talk Claude Pigot



Uhuru



Einstein



EXOSAT



ASCA



Suzaku



Chandra



XMM-Newton



Athena ...

C'est Fini ...