

Linear 1500 34 radius

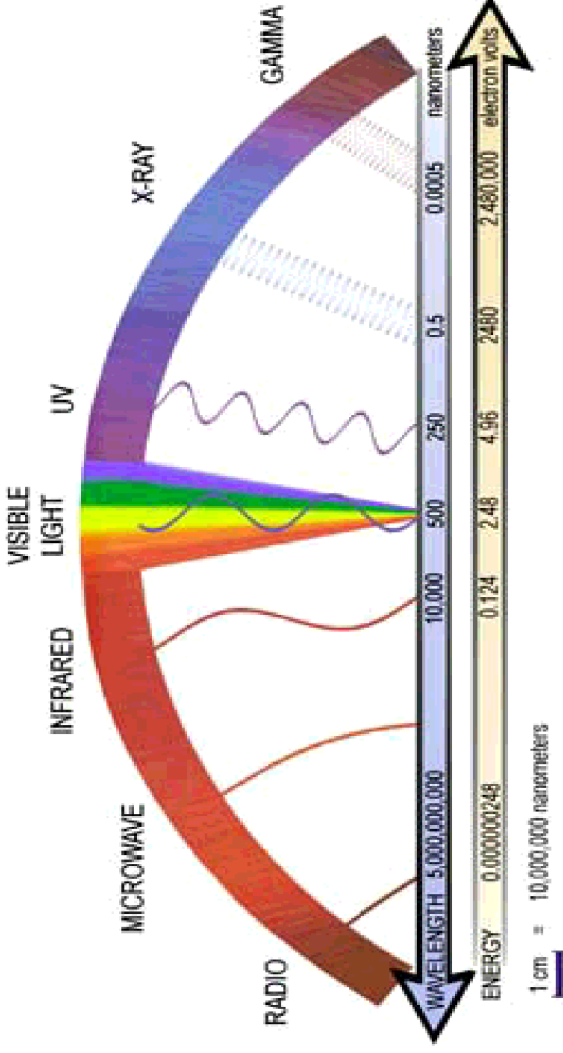
# LE CIEL EN RAYONS X : UNE NOUVELLE FENETRE SUR L'UNIVERS

ANNE DECOURCHELLE

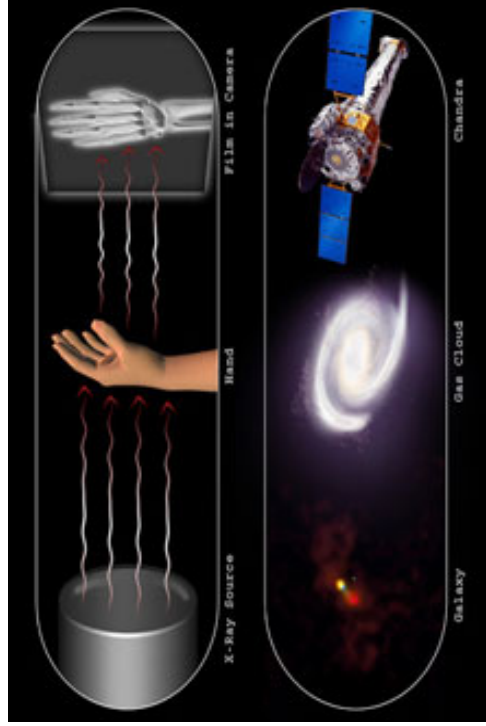
SERVICE D'ASTROPHYSIQUE  
CEA-SACLAY

CFRBO10222

# Spectre électromagnétique



W. C. Roentgen, physicien allemand découvre les rayons X en 1895



## Rayons X:

Gamme d'énergie :  $E = 0.1-15 \text{ keV}$

Gamme de longueur d'onde :  $\lambda = 12.4- 0.08 \text{ nm}$

Gamme de fréquence :  $\nu = 2.4 \cdot 10^{16}-3.6 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$

1000 fois plus énergétiques que les photons visibles

-> **matériel à des températures de millions de degrés**

Rayons X facilement arrêtés par une petite quantité de matière : 90 % des rayons X de 3 keV sont arrêtés par 10 cm d'air (à une pression de une atmosphère) ou par 3 feuilles de papier

# Barrage de l'atmosphère terrestre

Gamme d'énergie : 0.1 - 20 keV

**Atmosphère terrestre opaque aux rayons X**

Nécessité d'être au dessus de 99 % de l'atmosphère pour observer.

Rayons X d'autant plus pénétrants que leur énergie est grande

- > Fusées, satellites
- > Science relativement jeune (1970)

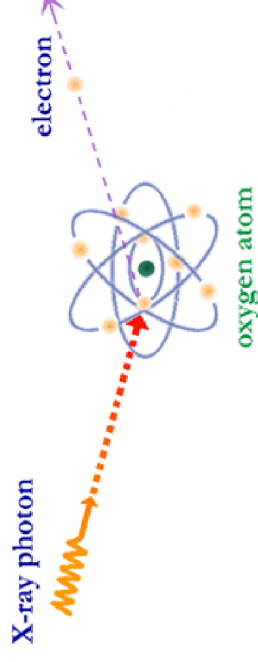
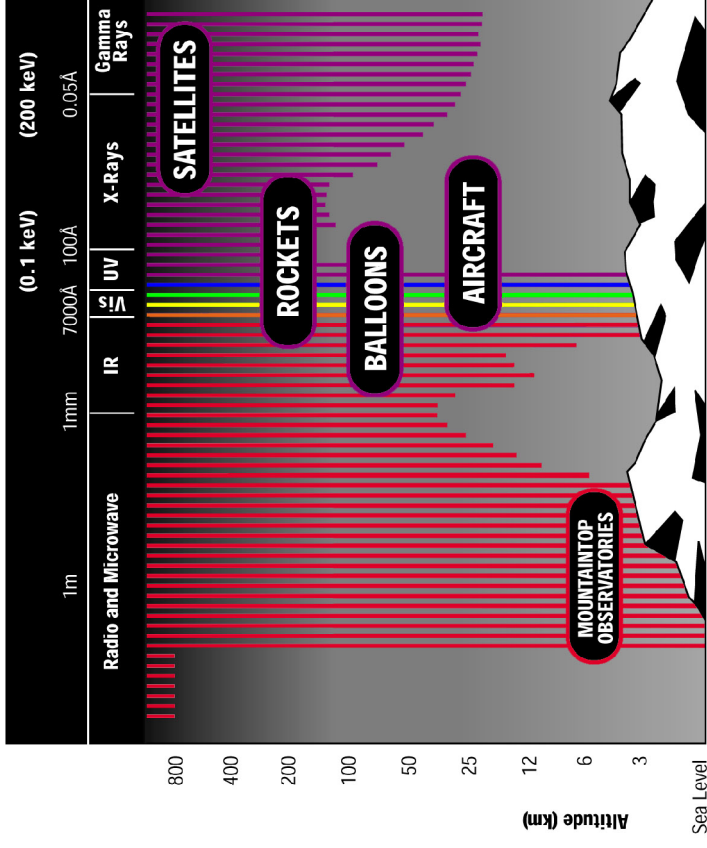


PHOTO-ELECTRIC ABSORPTION

# Prémices de l'astronomie X

1946 : Premières fusées (Naval Research Laboratory, USA)

=> **Emission UV et X du soleil**

Cependant sensibilité instrumentale 100000 fois trop faible pour les étoiles les plus proches

Proxima du Centaure :  $d = 4.2 \text{ a.l.} = 1.3 \text{ pc}$

Soleil :  $d = 1.6 \cdot 10^{-5} \text{ a.l.}$

( $1 \text{ a.l.} = 9.46 \cdot 10^{15} \text{ m} = 0.3 \text{ parsec}$ )

=> **Perte d'intérêt de la communauté scientifique**

Dans les années 1950 : étude du Soleil et essais infructueux de NRL pour détecter des sources X cosmiques...

**R. Giacconi** => recherche de l'inconnu: développement instrumentaux et amélioration de la sensibilité

- Objectif LUNE : émission X de la Lune
  - interaction particules énergétiques du vent solaire/ surface de la Lune
  - fluorescence des matériaux lunaires excités par le flux solaire

- SCAN d'une large region du ciel :

recherche de sources X extrasolaires

Premier vol en octobre 1961: Expérience AS&E (American Science and Engineering)

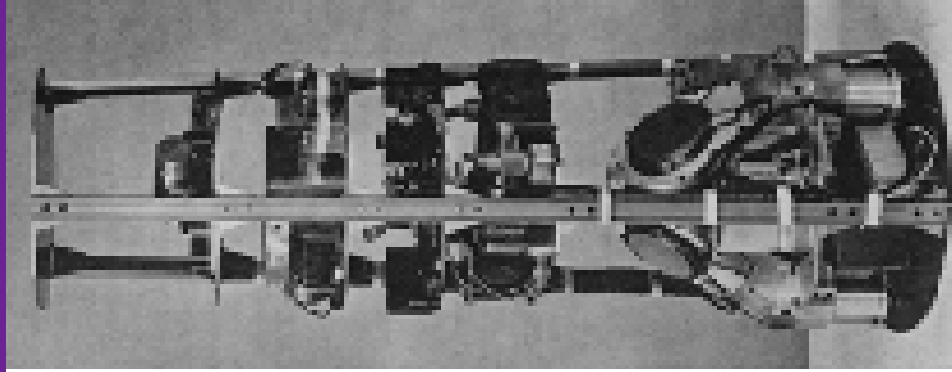
- Lancement nominal de la fusée
- Portes de protection des détecteurs X ne s'ouvrent pas !

-> **frustration des premiers temps, matériel souvent brut et non fiable**

2<sup>ème</sup> vol en Juin 1962 (350 secondes): nouvelle fusée

- les portes s'ouvrent !
- 2 compteurs Geiger sur 3 fonctionnent  
=> pas de détection de la Lune

=> **puissante source X extra-solaire dans la constellation de Scorpius : Sco X-1**



Dispositif expérimental à bord de la fusée Aerobée 150



## Prix Nobel de Physique 2002 Riccardo Giacconi

-> Récompense des efforts et de la persévérance de Giacconi

Prix Nobel de physique en 2002

Signal de 100 photons/cm<sup>2</sup>/s pour une source X extra-solaire

=> Source incroyablement forte de photons à haute énergie de nature totalement inconnue

=> **la communauté scientifique est captivée**

Marque le début de l'exploration du ciel X, et de ses nombreuses découvertes depuis 40 ans !

# Observations de Sco X-1

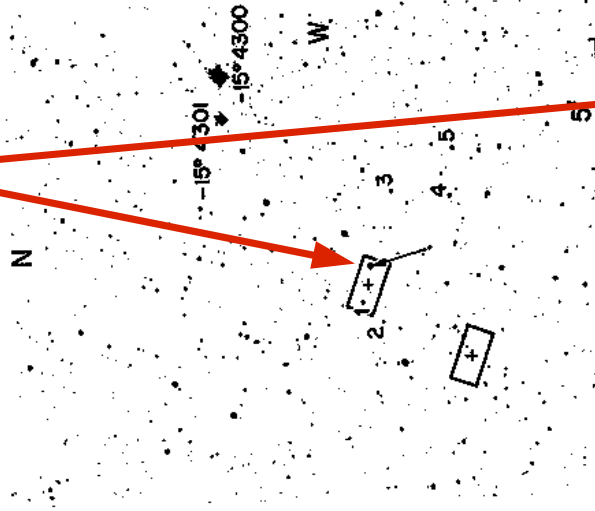
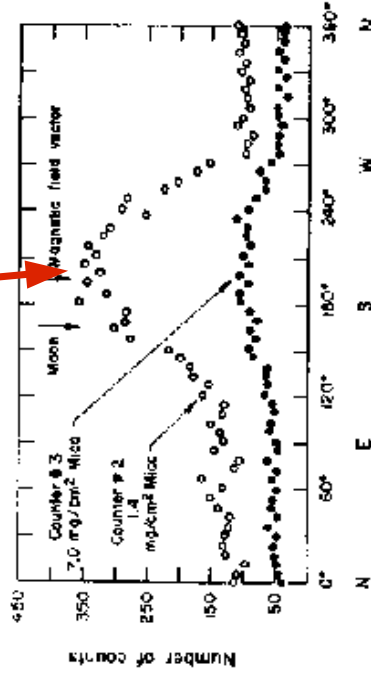


Image dans le visible



SCAN en rayons X sur 360° du ciel

12 Octobre 1962 : (équipe AS&E) découverte de 2 autres sources plus faibles à des distances stellaires

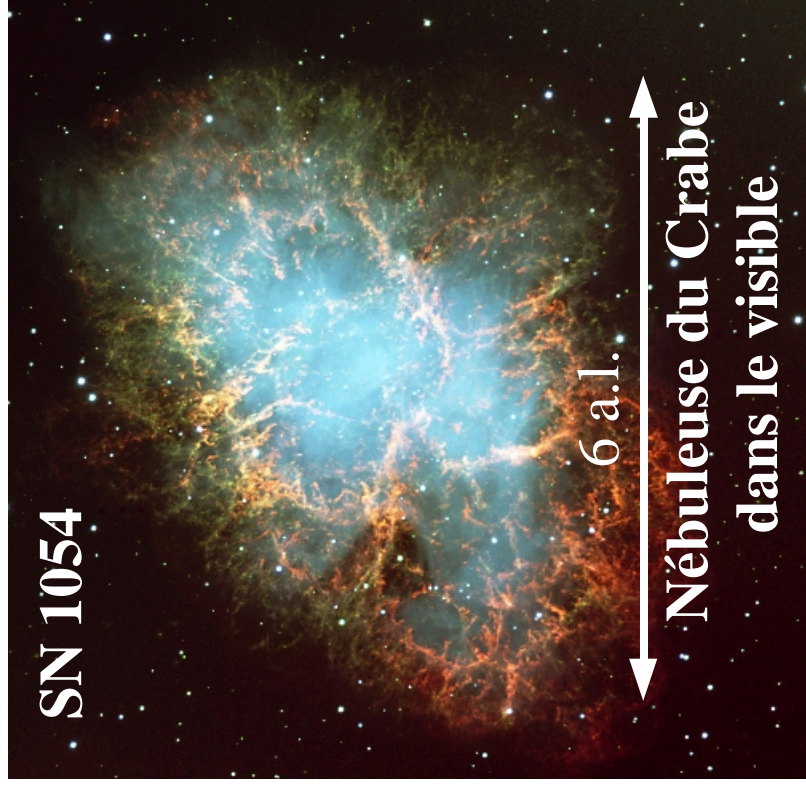
29 Avril 1963 : (NRL) découverte confirmée et identification de l'une des 2 sources -> **nébuleuse du Crabe: vestige de supernova (d = 2 kpc = 6500 a.l.)**

21 Juillet 1964 : (MIT) détection de photons X de haute énergie en provenance du Crabe (vol ballon)  
=> 1ère détection d'une source extrasolaire à haute énergie

**Sources incroyablement puissantes de photons à haute énergie**



Vol ballon HIREGS depuis l'Antarctique  
Altitude ~ 35 km  
 $E_{\text{photon}} > 35 \text{ keV}$



# Début de l'astronomie X

1964-1970 : fusées, ballons pour explorer le ciel X

12 Décembre 1970 : lancement du 1<sup>er</sup> satellite

d'observation en rayons X **Uhuru**

=> **premier balayage complet du ciel :**  
**plus de 300 sources découvertes !**

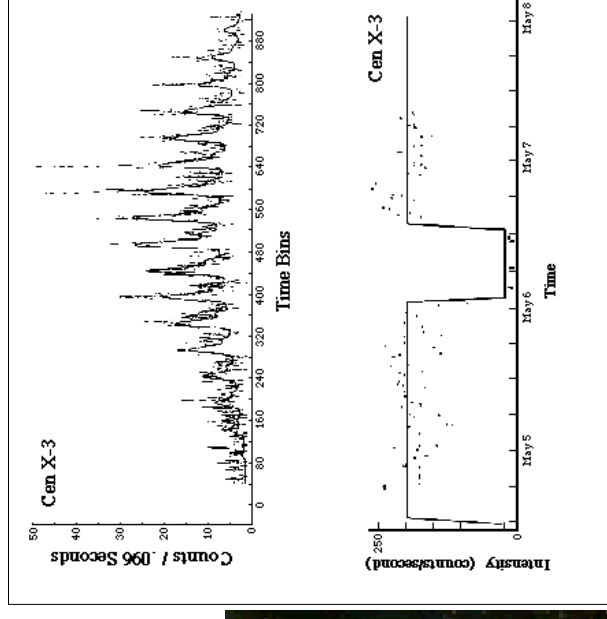
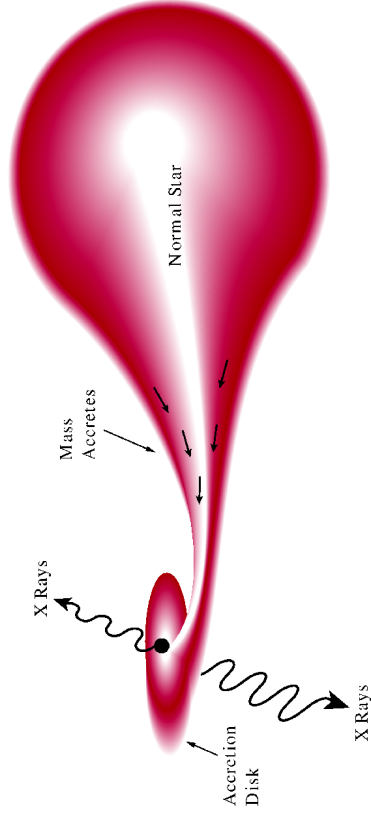
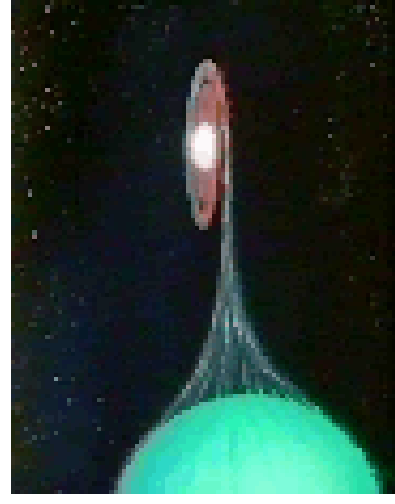
**Nature de ces sources ? Mécanismes d'émission ? Source d'énergie ?**

- Localisation précise en X  
=> identification optique et radio
- Spectres X et courbes de lumière  
=> déterminer les mécanismes d'émission
- Collecter un plus grand nombre de sources

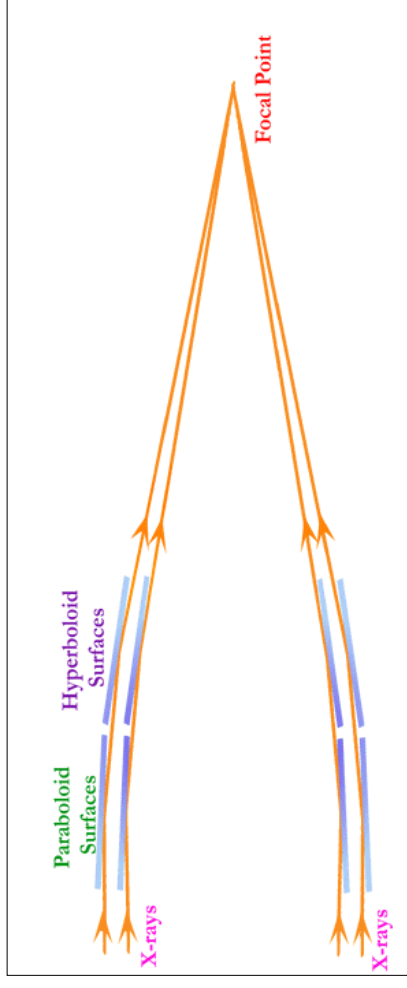
Observation spectaculaire de Cen X-3

=> **nature de la source**

- Variation régulière et rapide du flux X :  
période **P ~ 4.84 secondes -> étoile à neutron en rotation**
- Légères variations de P ( avec une période de 2.09 jours) -> **décalage Doppler**
- Extinction cyclique complète pendant 11 heures à intervalles réguliers de 2.09 jours -> **système binaire à éclipse avec une étoile à neutron en rotation**



# Instrumentes : principes et difficultés



- **Imagerie difficile**
  - >miroirs à incidence rasante
- **Détection des photons**
  - photon par photon
  - position (x,y) -> image
  - Energie -> spectre
  - Temps d'arrivée -> courbe de lumière

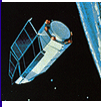
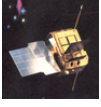

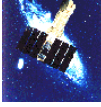
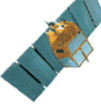
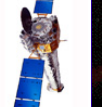





Depuis 1970, de nombreux satellites ont été lancés emportant des détecteurs de plus en plus perfectionnés  
Compteurs proportionnels, CCDs,...

Ce que l'on cherche à obtenir, ce sont les propriétés suivantes:

- une bonne résolution spatiale
- une bonne résolution spectrale
- une bonne sensibilité des détecteurs
- une bonne résolution temporelle

Année	Satellites	Détecteurs
1978	 Einstein (USA)	SSS
1983, 1987	 Exosat, Ginga (Europe, Japon)	CP
1990	 Rosat (Allemagne)	CP
1993	 Asca (Japon)	CCD
1995, 1996	 RXTE, SAX (USA, Italie)	CP
1999	 Chandra (USA)	CCD
2000	 XMM (Europe)	CCD

# Sources célestes d'émission en rayons X

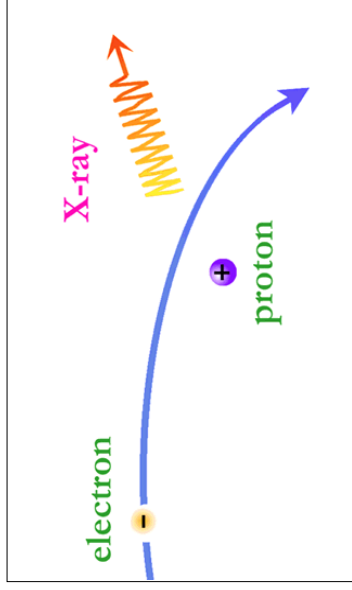
## Plus de 100000 sources X :

- Etoiles (35%)
- Systèmes d'étoiles binaires avec transfert de masse
- Restes de supernova
- Galaxies
- Groupe de galaxies
- Amas de galaxies (10 %)
- Noyaux actifs de galaxie (50 %)

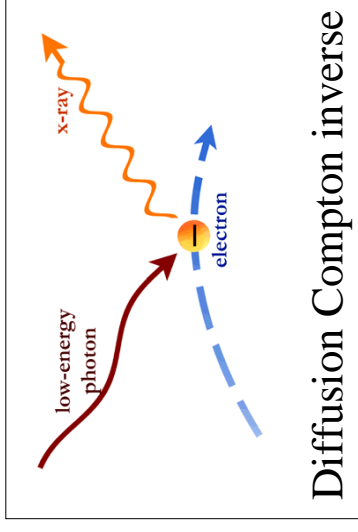
# Processus d'émission: thermique et non-thermique

Rayons X viennent de régions de particules de grande énergie ou de température très élevée: gigantesques explosions, champ de gravité intense

Collision électron/proton  
à grande vitesse : continu

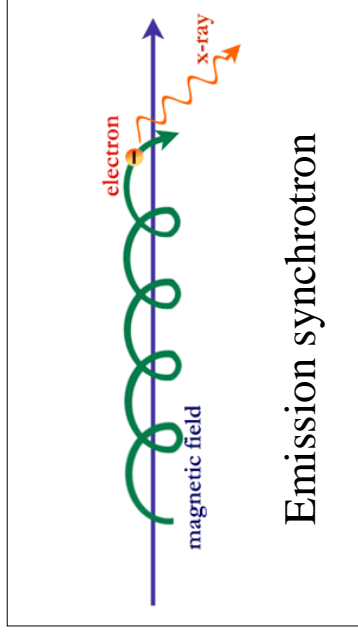
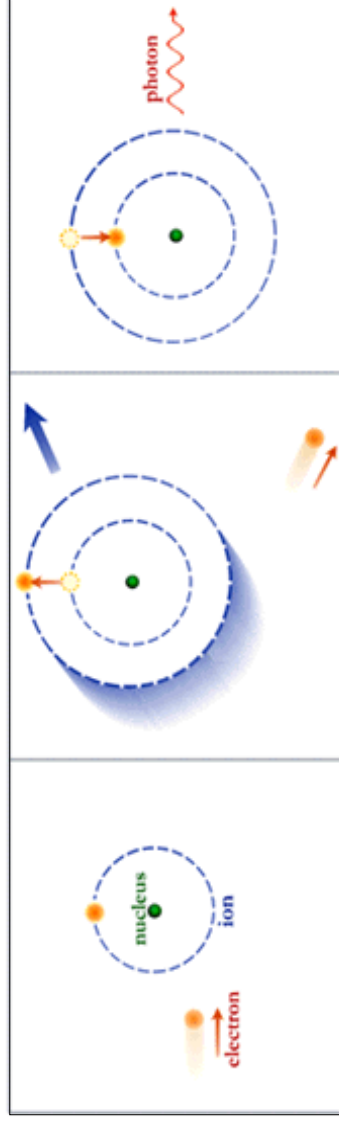


Collision d'un photon de basse énergie  
avec un électron de grande vitesse



Diffusion Compton inverse

Electrons qui spiralent autour des  
lignes de champ magnétique

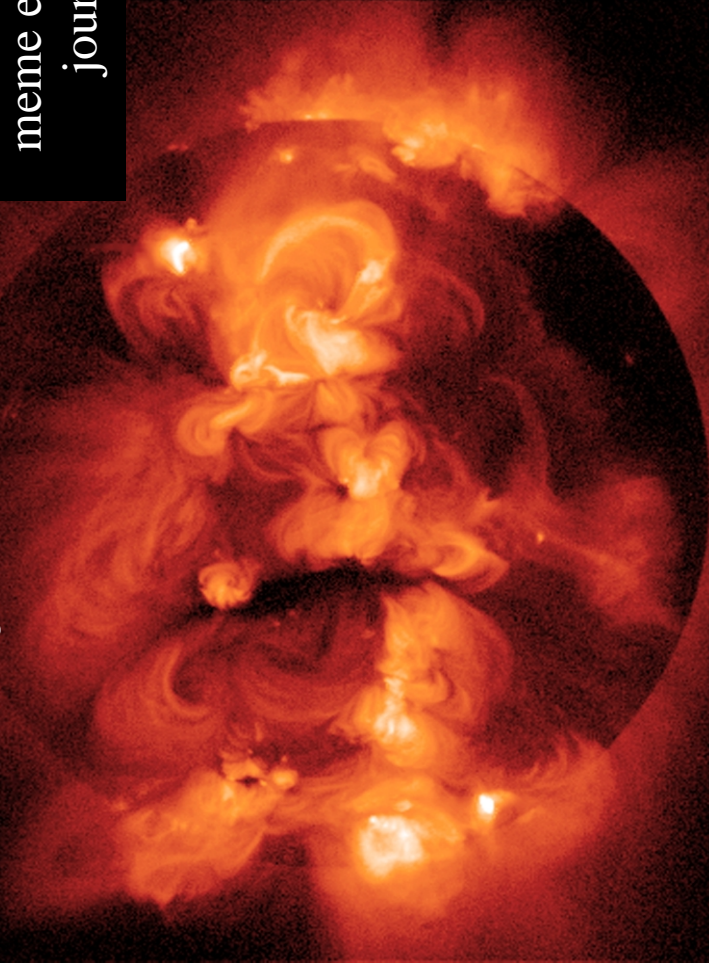


Emission synchrotron

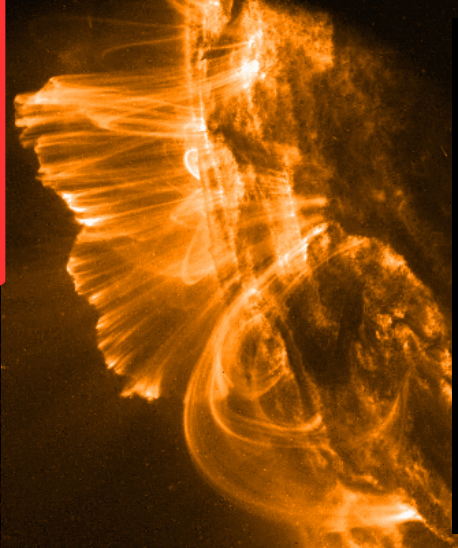
Collision électron/ion à grande vitesse : continu + raies d'émission

**En rayons X**

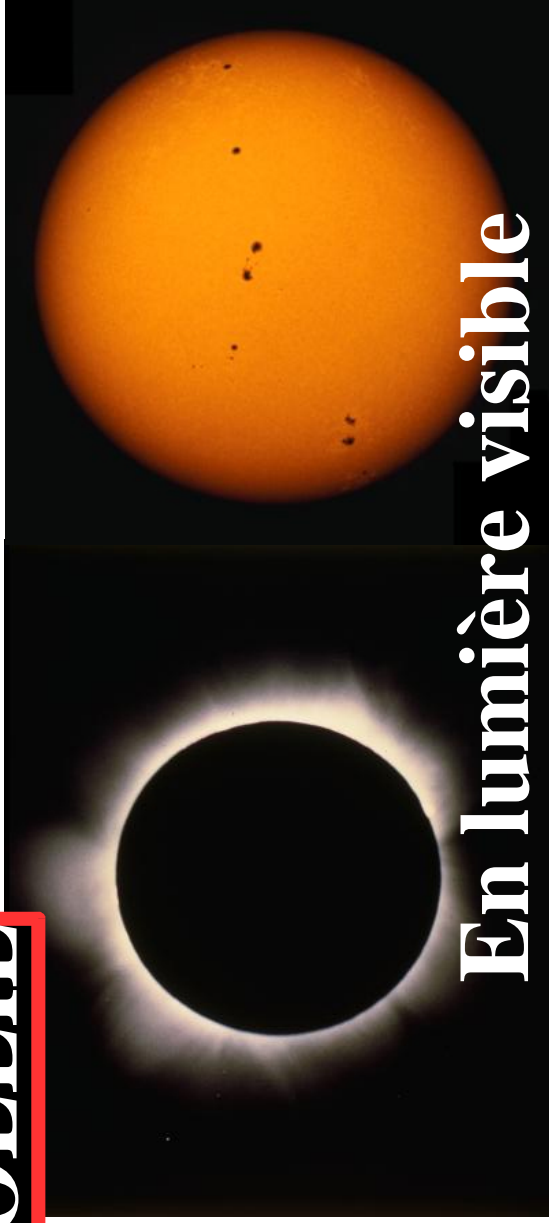
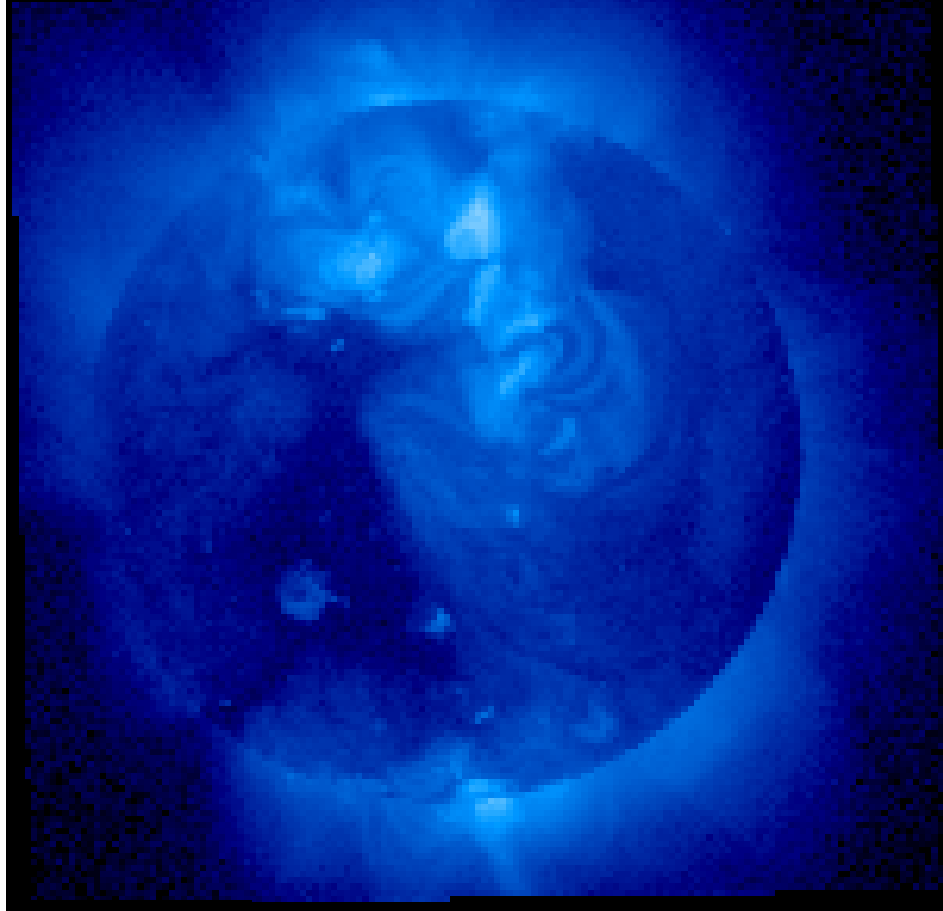
Rotation du  
Soleil sur lui  
meme en 27  
jours



# NOTRE SOLEIL

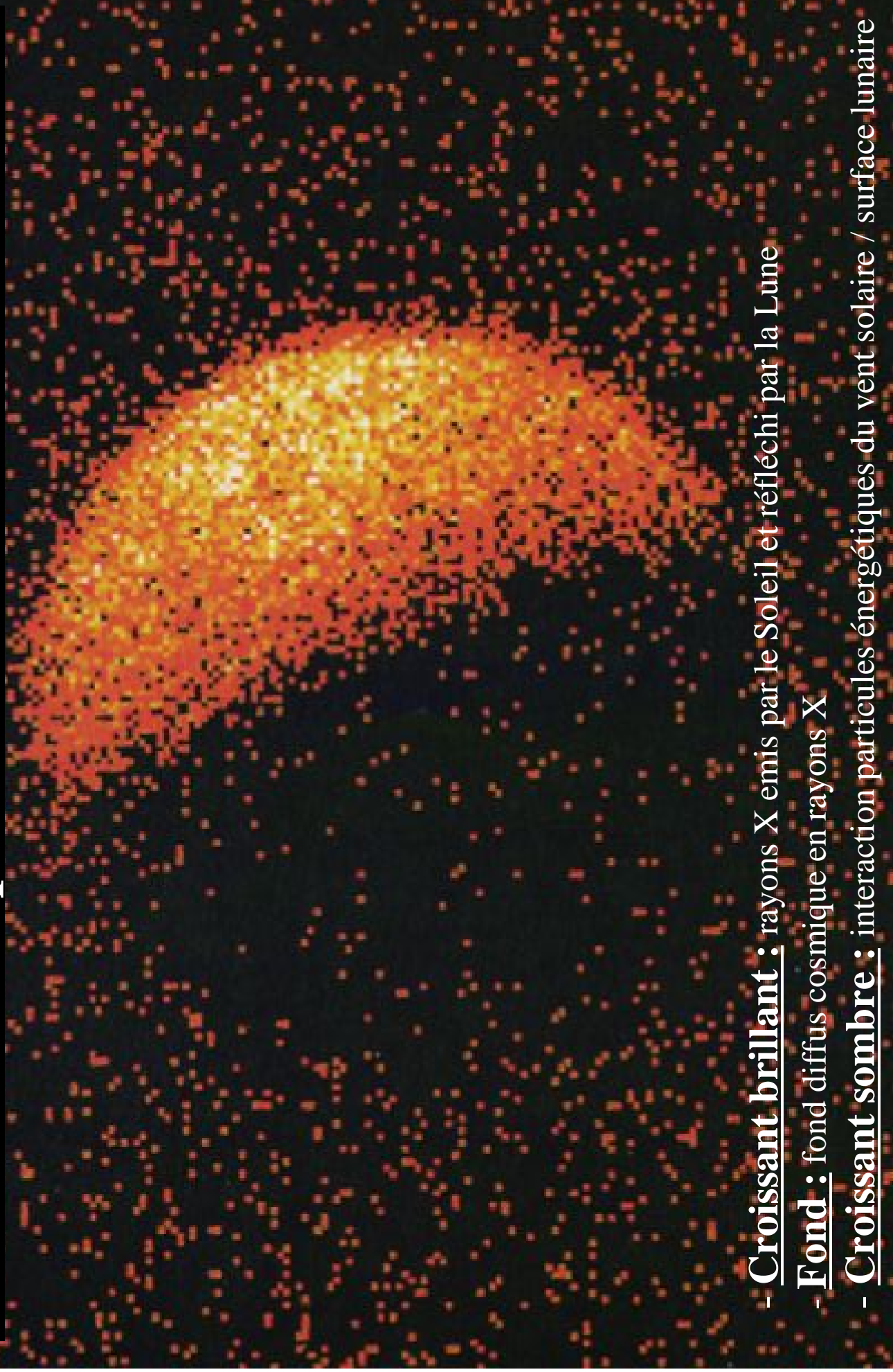


Régions actives en UV



En lumière visible

# Après 28 ans d'observations X, la LUNE est vue en X par le satellite ROSAT



- Croissant brillant : rayons X émis par le Soleil et réfléchi par la Lune

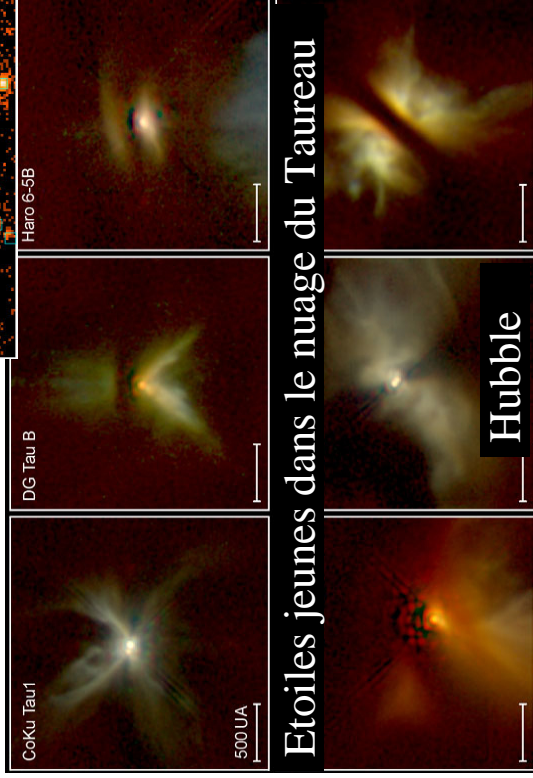
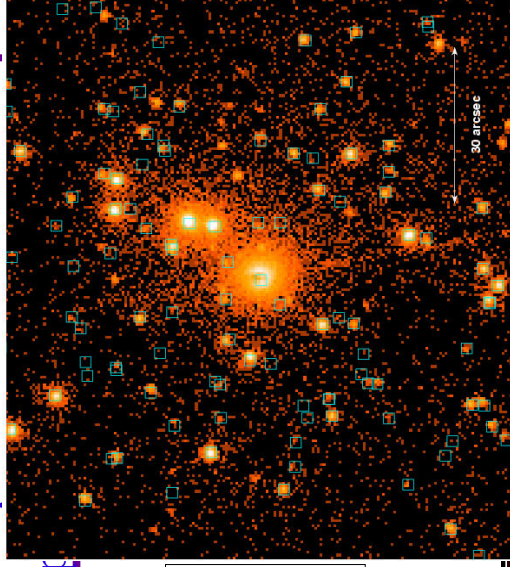
- Fond : fond diffus cosmique en rayons X

- Croissant sombre : interaction particules énergétiques du vent solaire / surface lunaire

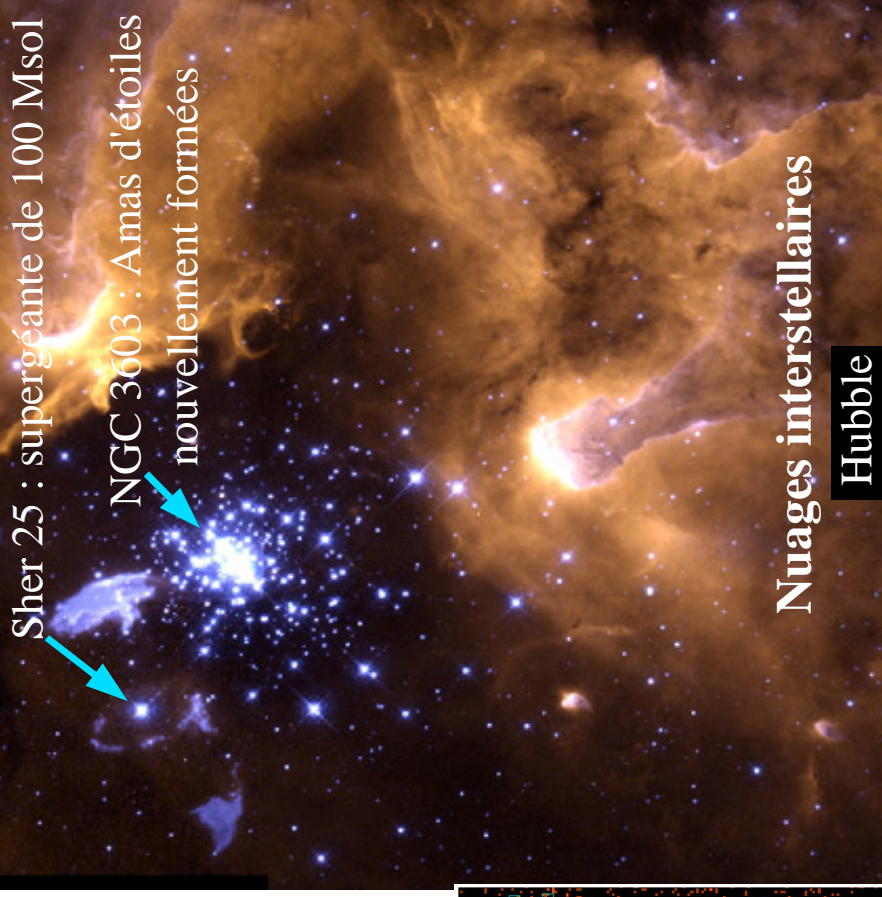
# Naissances des étoiles

**Naissance des étoiles : effondrement gravitationnel de nuages denses dans les bras galactiques déclenché par l'onde spirale ou par l'explosion d'une étoile à**

Amas d'étoiles jeunes dans la nébuleuse d'Orion observée en rayons X avec Chandra

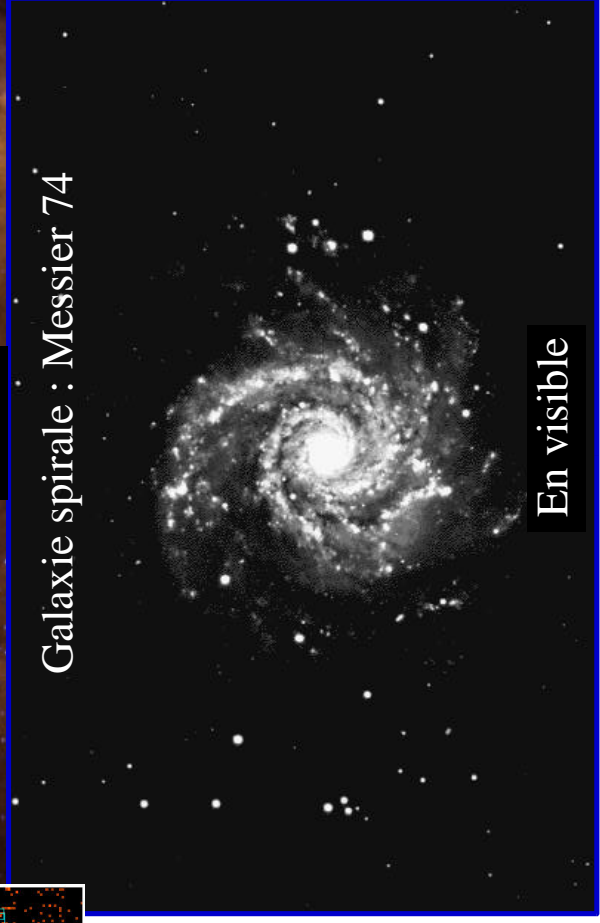


Etoiles jeunes dans le nuage du Taureau



Nuages interstellaires

Hubble



Galaxie spirale : Messier 74

En visible

# Viedes étoiles

Lutte permanente contre la gravité

**Outil** : fusion des éléments -> chauffe le gaz

**Pression thermique contre gravité**

- Etoiles de faible masse (< 8 Msol)

-> **naine blanche**

- Etoiles massives (> 8 Msol)

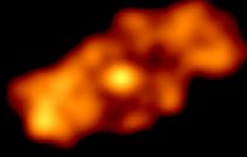
-> fusion nucléaire : production d'éléments jusqu'au fer

## MORT DES ETOILES

**Explosion** => éléments plus lourds et radioactifs

=> **Enrichissement du milieu interstellaire en éléments lourds**

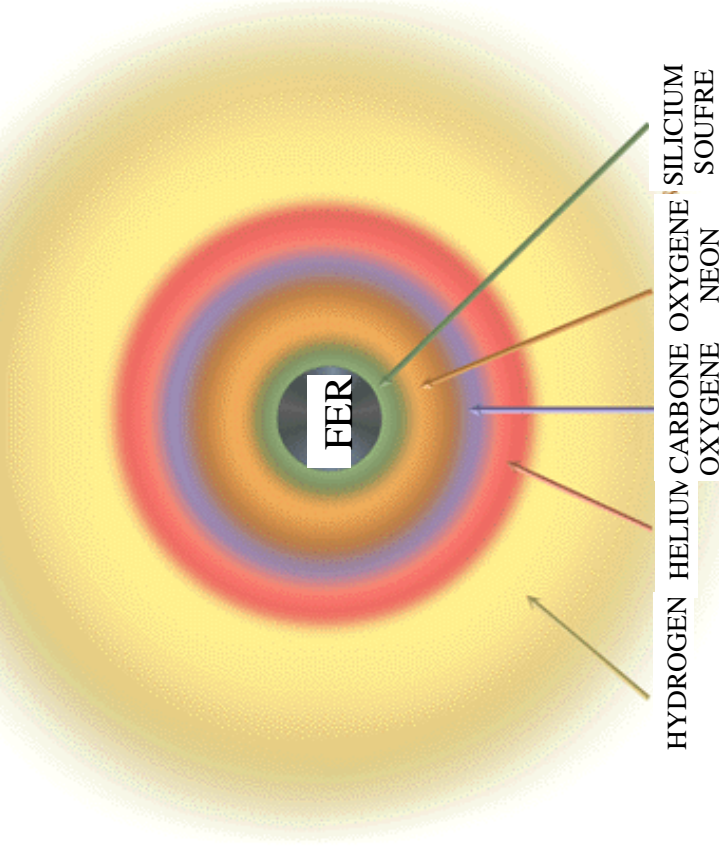
Nébuleuse de l'oeil de chat



Rayons X Chandra



Structure en oignon d'un progéniteur massif



# Mort des étoiles

## Supernovae :

Novæ : Étoiles qui apparaissent brusquement dans le ciel

Super : de brillance gigantesque

Énergie instantanée libérée :  $10^{51}$  ergs

Petite fraction sous la forme de lumière visible

Étoiles massives

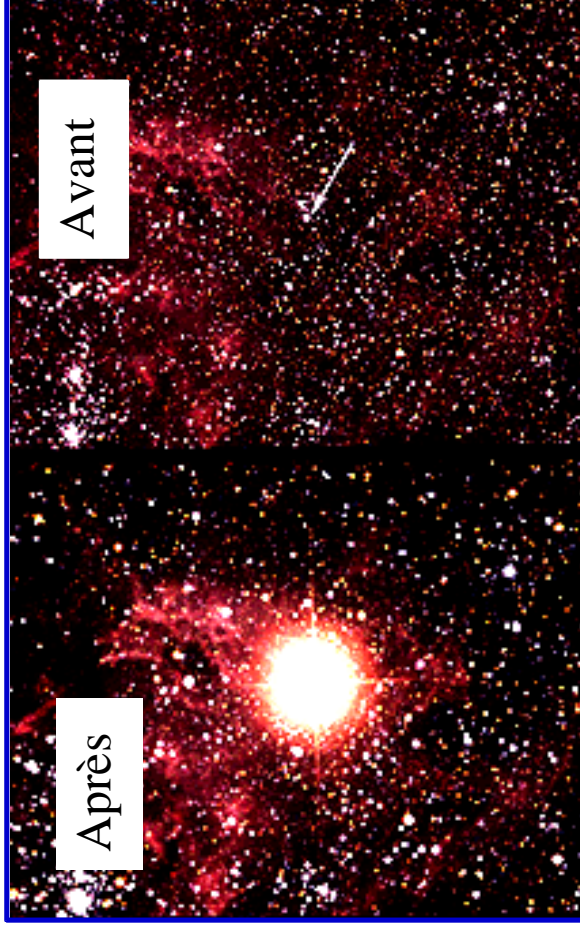
=> étoile à neutrons ou trou noir  
+ éjection violente des couches externes

Étoiles de faible masse

=> naine blanche

Au delà de  $1.4 M_{\text{soleil}}$  , fusion nucléaire  
=> éjection violente de toute la matière stellaire

SN1987A



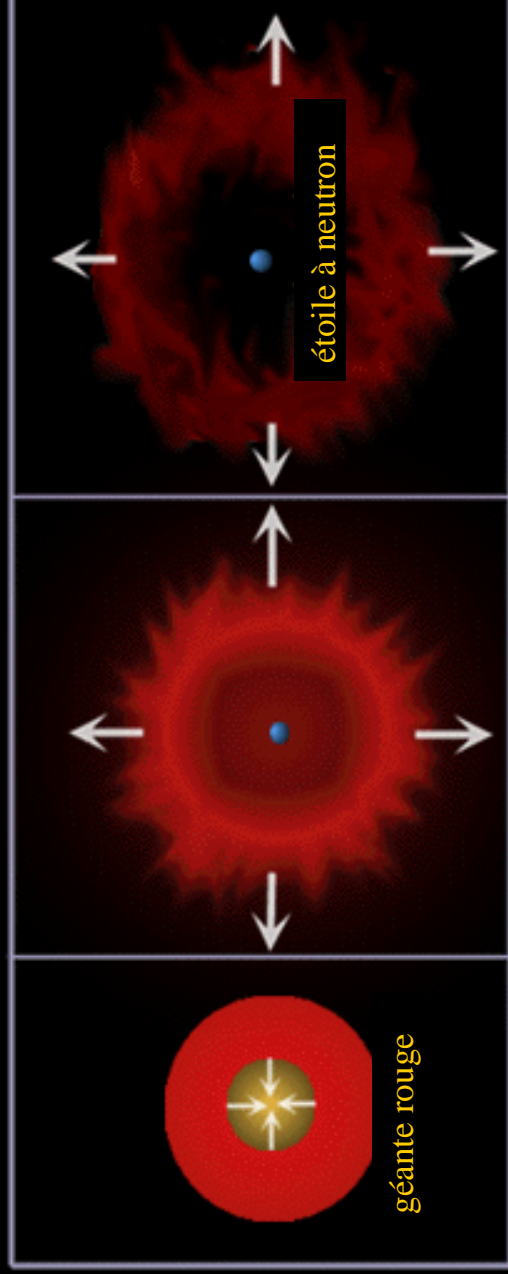
Grand Nuage de Magellan, groupe local  $d = 55$  kpc



© Anglo-Australian Observatory/Royal Observatory, Edinburgh.



Naissance d'une étoile à neutron et d'un reste de supernova



Implosion du Cœur

→ Supernova explosion

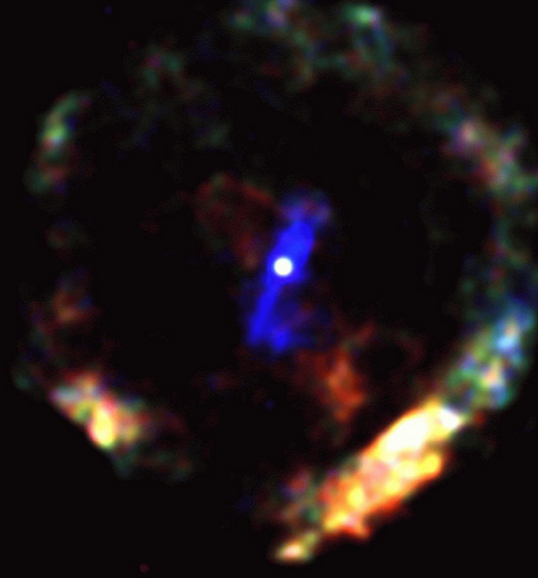
Reste de Supernova

Étoiles massives

=> étoile à neutrons ou trou noir

+ éjection violente des couches externes

G11.2-0.3 ~ AD 386



Rayons X Chandra

# Cycle de vie d'une étoile massive et recyclage de la matière interstellaire

## Cycle de Vie d'une Étoile massive

Super géante rouge

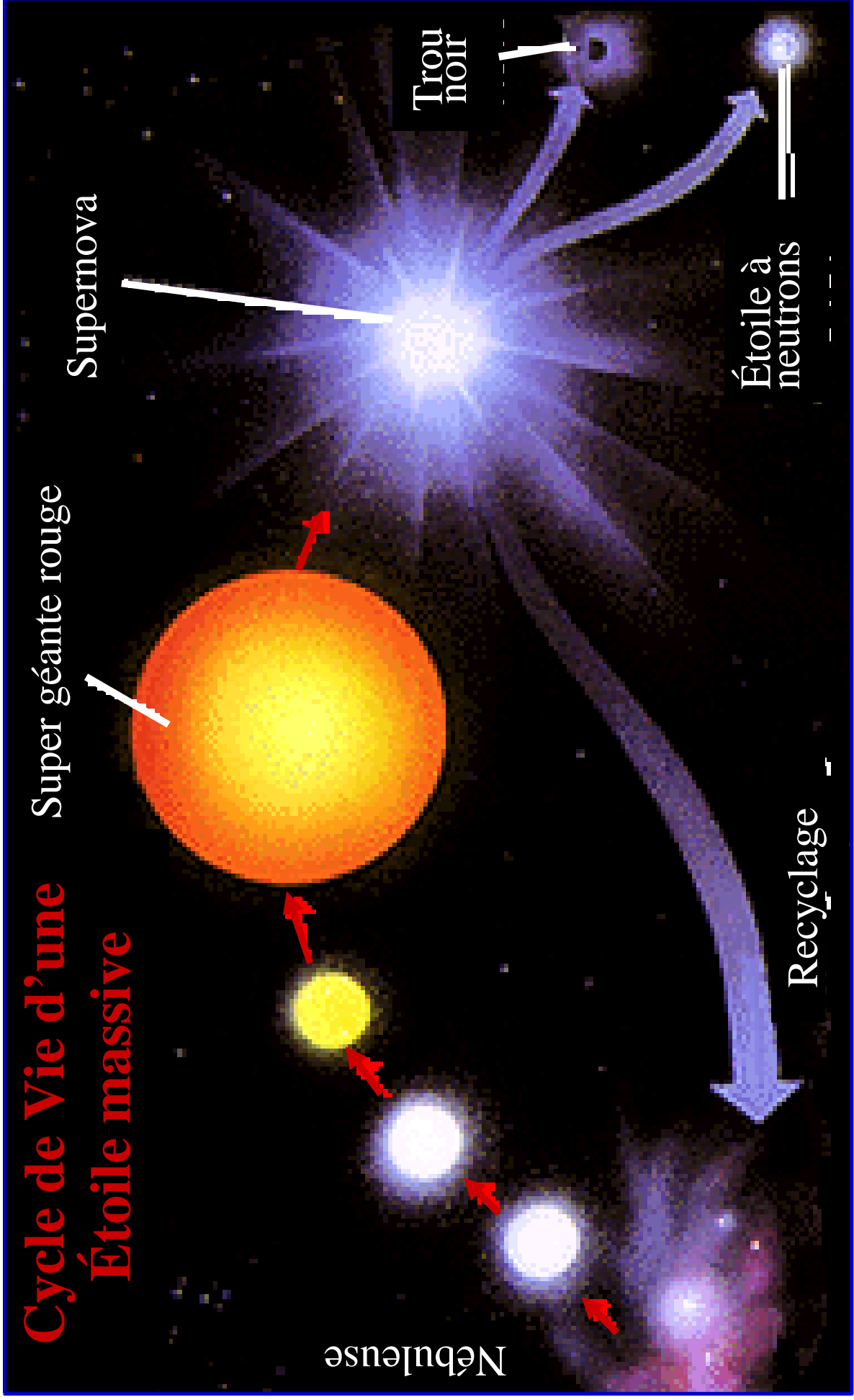
Supernova

Trou noir

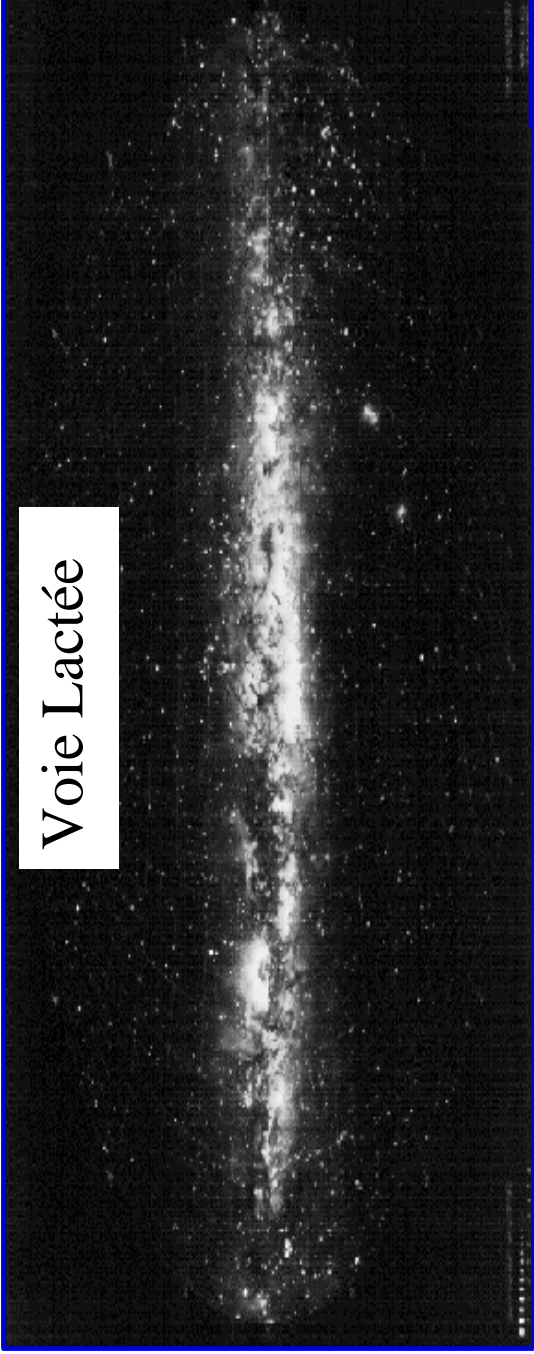
Étoile à neutrons

Recyclage

Nébuleuse

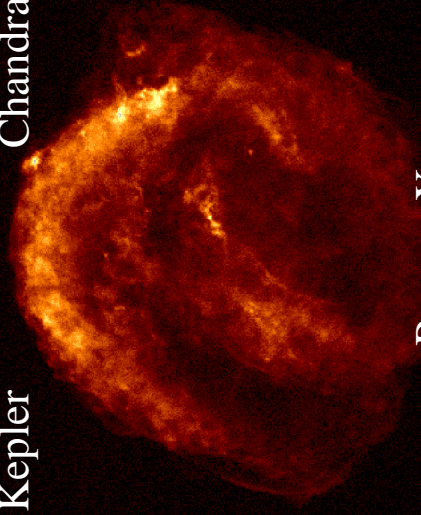


Voie Lactée



Kepler

Chandra



Rayons X

## Le mystère des supernovae de notre Galaxie

Dans notre galaxie : à peu près 3 supernovae par siècle

La dernière supernova dans notre Galaxie observée par

J. Kepler en 1604 : SN de Kepler

**En 400 ans, aucune supernova observée dans notre Galaxie!**

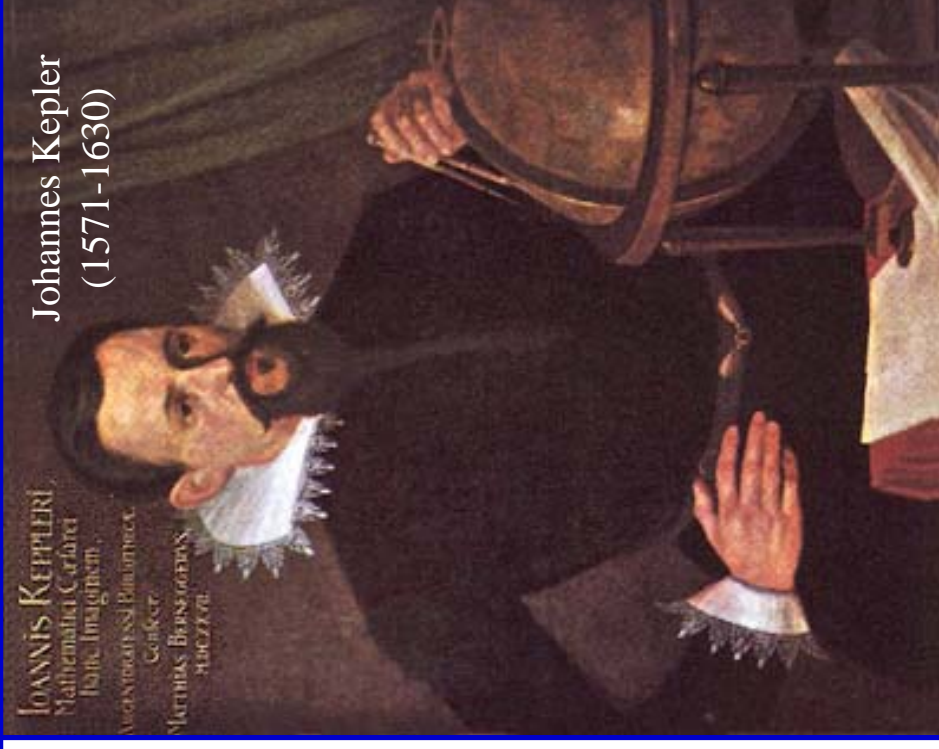
Où sont elles ? Pourquoi ne les voit-on pas ?

Absorption, nuages interstellaires ?

=> **Objectif INTEGRAL**

IOHANNIS KEPLERUS  
Mathematici Carolinae  
Habit. Imperialis  
Vindobonensis Praesidentice  
Consej. Aulice  
MARTINUS BRUNNENBERG  
PUBLICVS

Johannes Kepler  
(1571-1630)



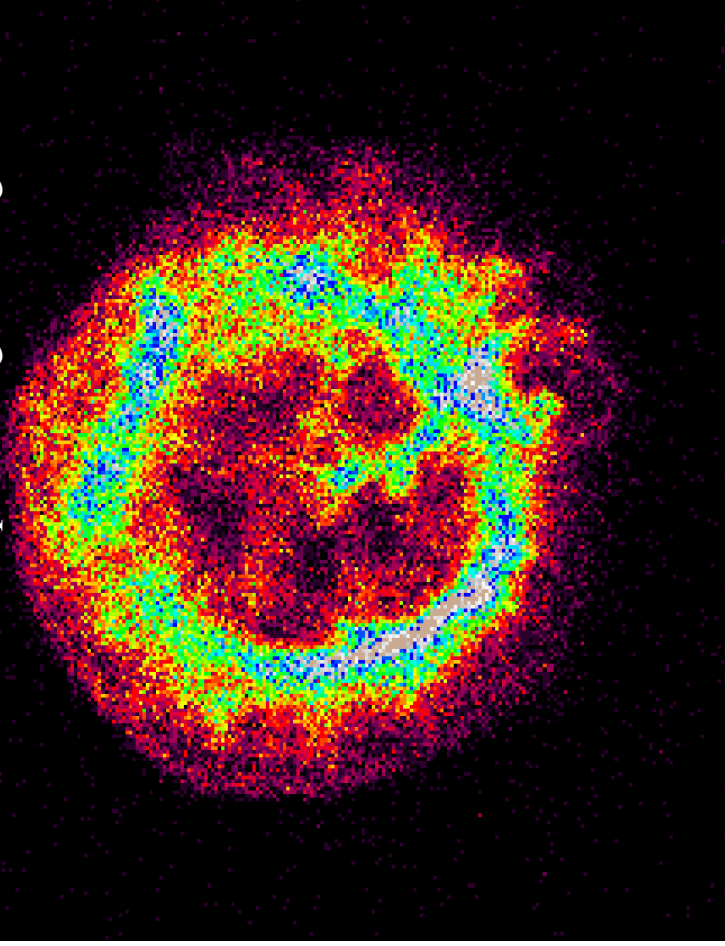
# Vestiges de supernova

**Violente collision** entre la matière éjectée et le milieu interstellaire ambiant  
à des vitesses de **quelques 10000 km/s**

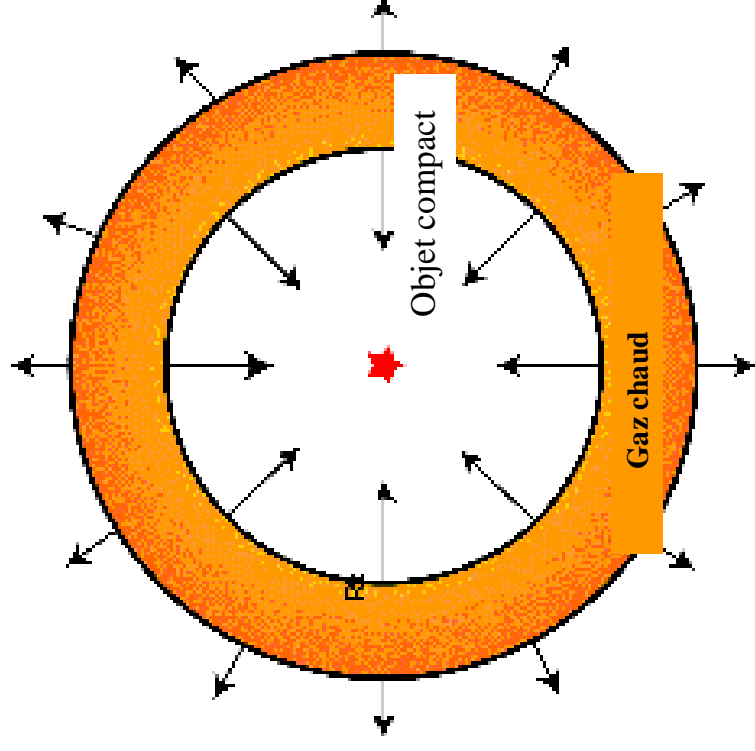
=> **Température extrêmement élevée de la région d'interaction ( $10^7$ - $10^8$  K)**

=> **Accélération de particules à très haute énergie ( $10^{14}$ - $10^{15}$  eV)**

1E 0102-72 dans le petit Nuage de Magellan

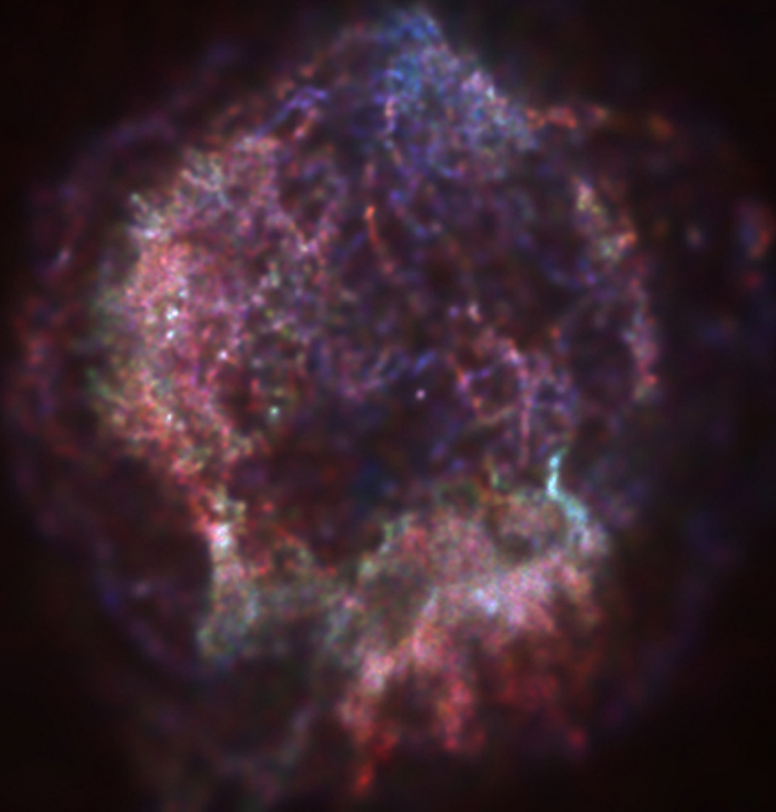


Milieu interstellaire ambiant



## Explosion d'étoiles massives

Cassiopeia A : 1670 ? Chandra

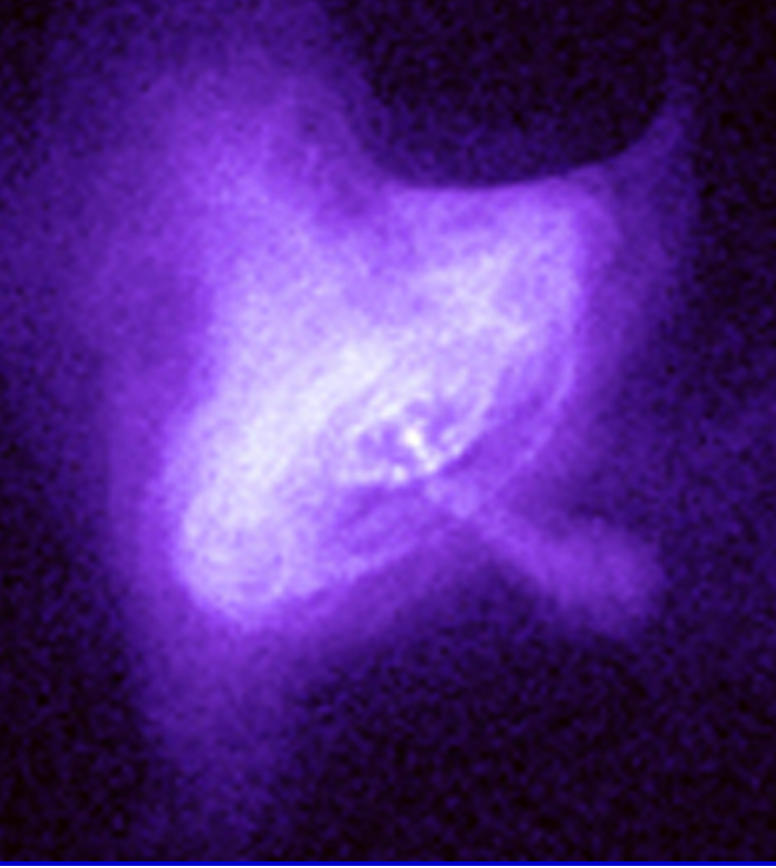


Chauffage du gaz et accélération de particules

Gaz à des millions de degrés  
+ objet compact ?

Crabe : 1054

Chandra

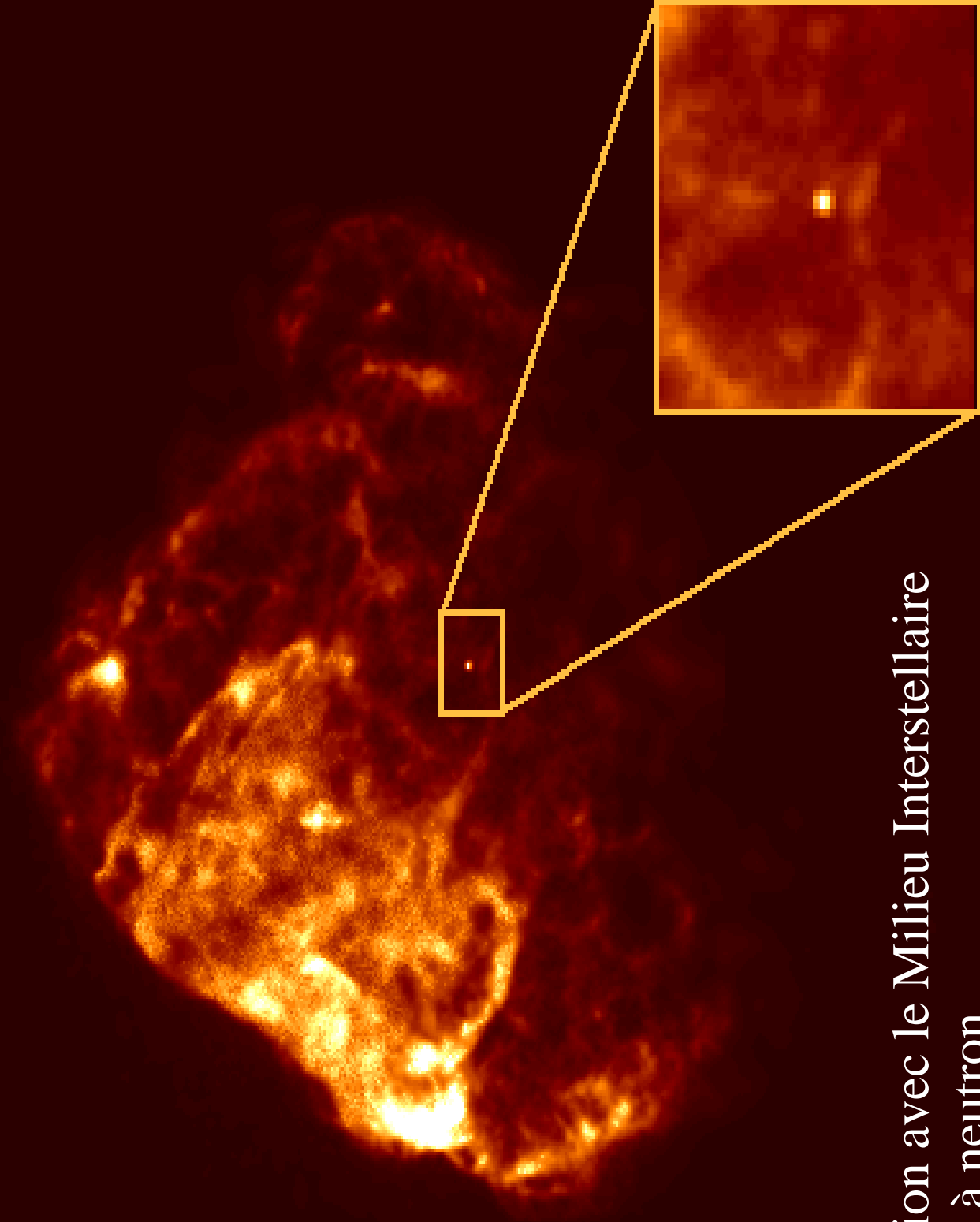


Accélération de particules

Fort champ magnétique  
+ étoile à neutron en rotation

Puppis A ~ 4000 ans

ROSAT



Interaction avec le Milieu Interstellaire  
et étoile à neutron

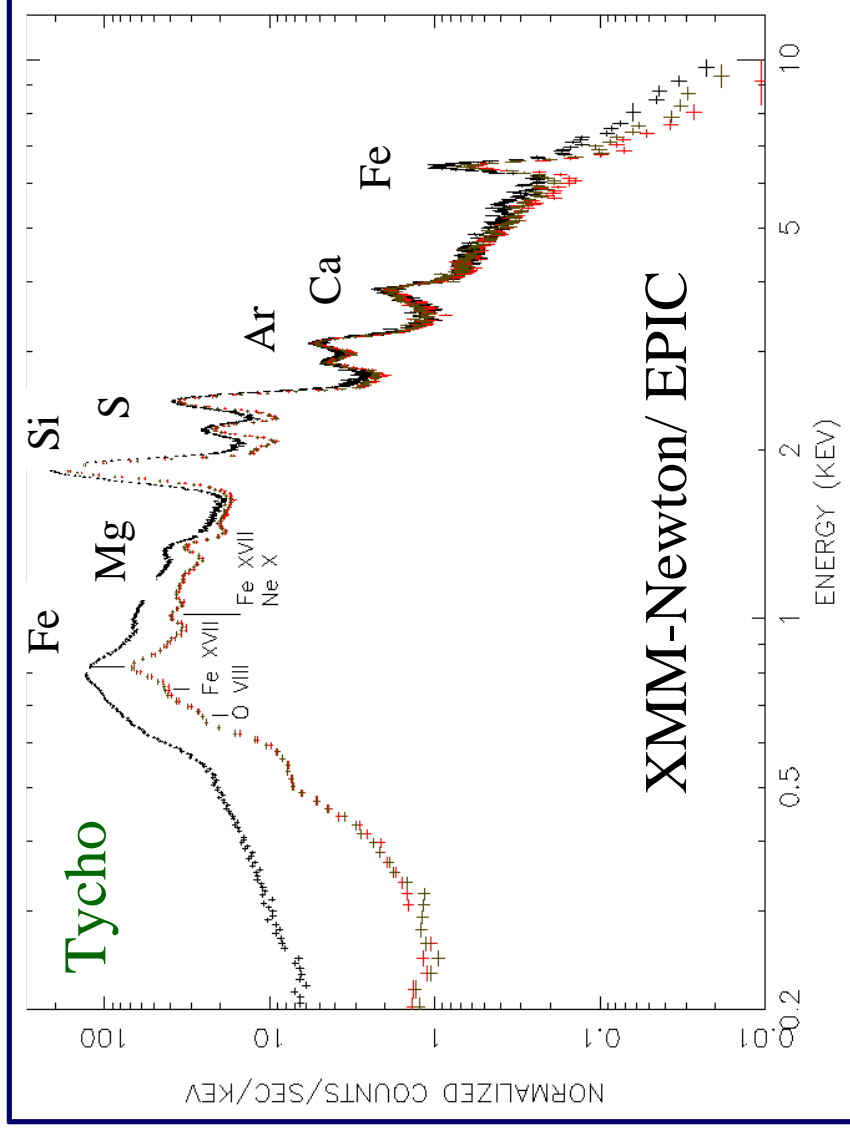
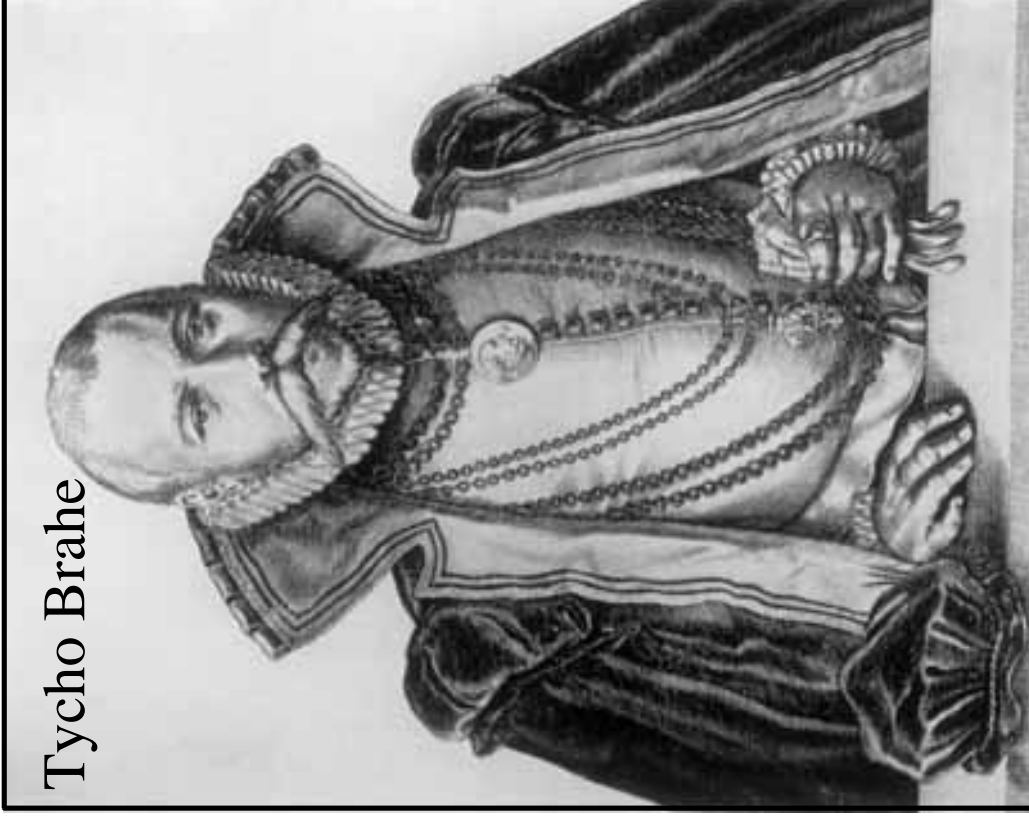
# Explosion d'étoiles de faible masse

**Tycho : 1572**

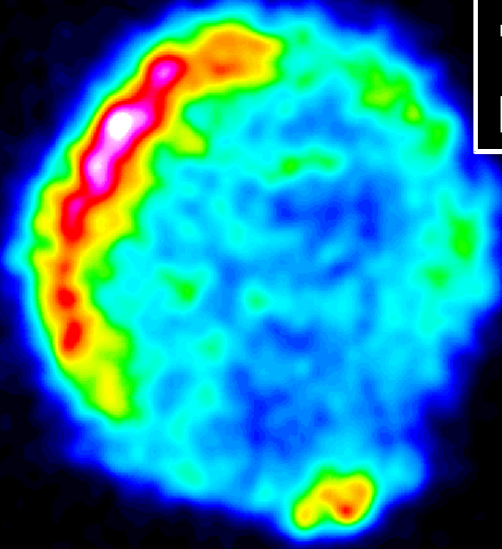
=> Éléments lourds de la matière éjectée :

**O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Fe**

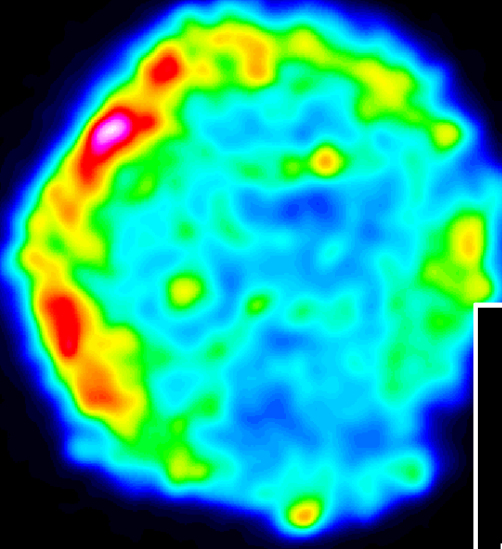
Tycho Brahe



Fer L

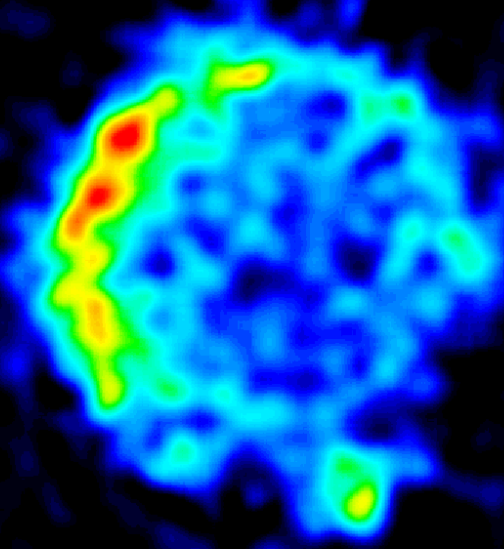


Si K

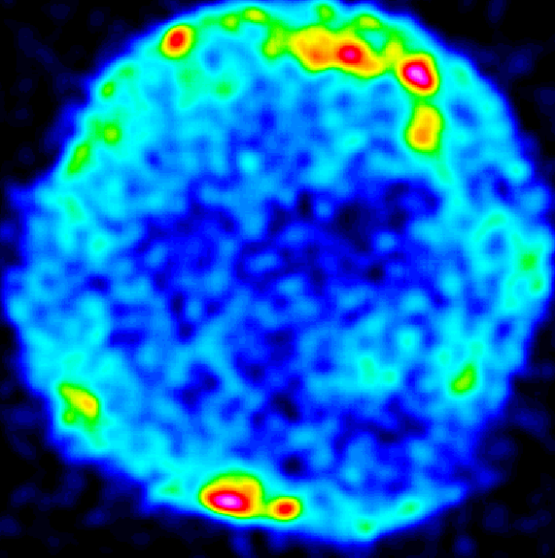


Tycho XMM-Newton

Fer K



Émission continue



- Distribution des éléments lourds

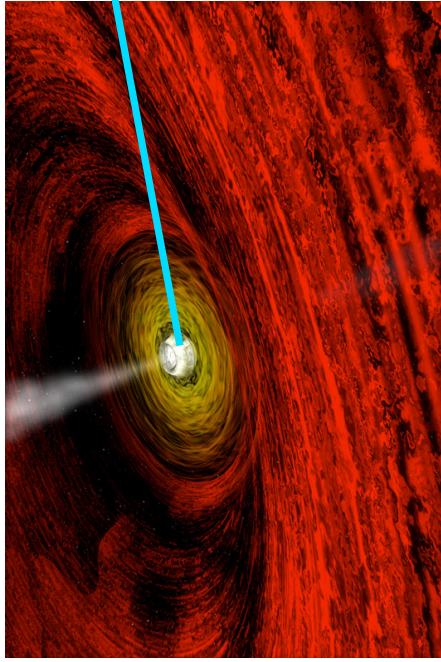
- Chauffage du gaz

- Accélération de particules

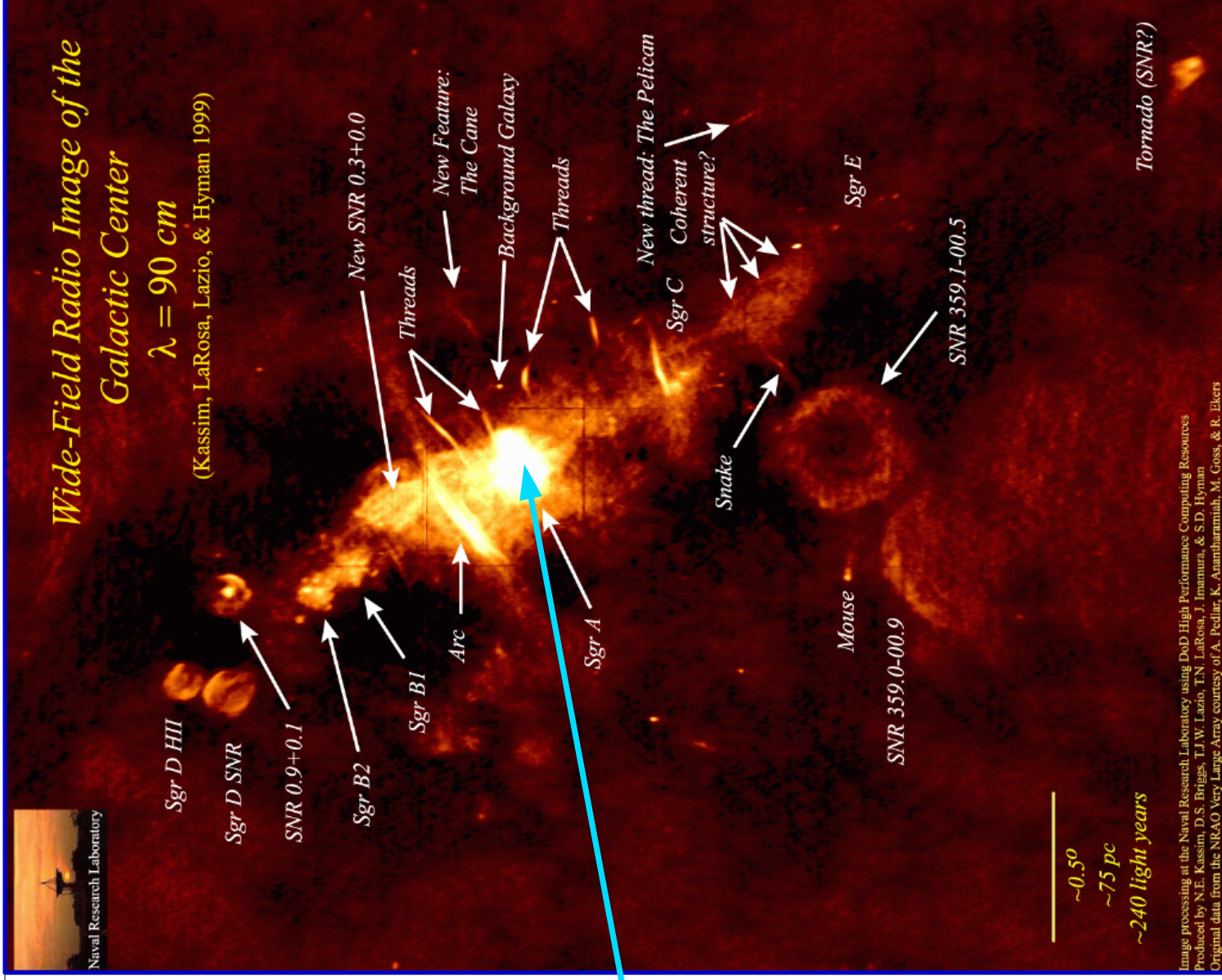
- Interaction avec le milieu interstellaire



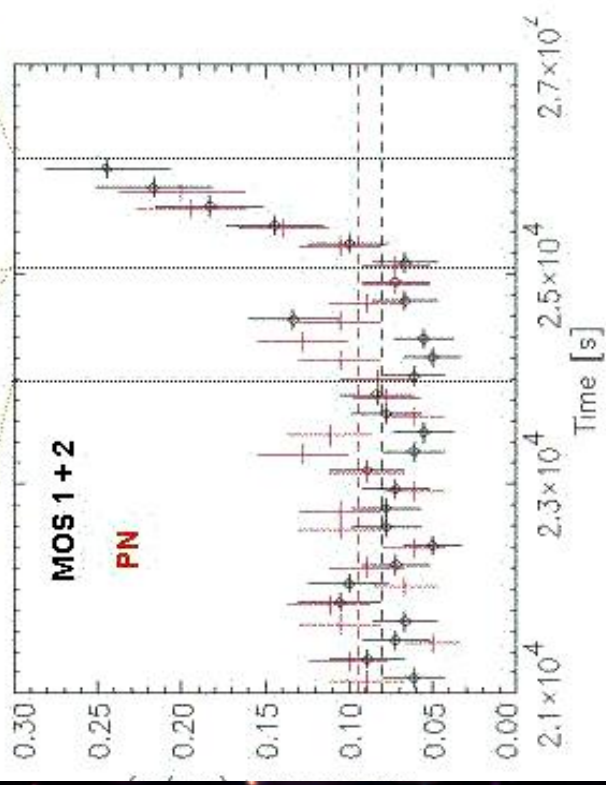
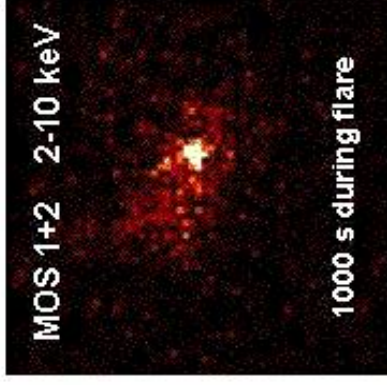
# Au coeur de notre Galaxie

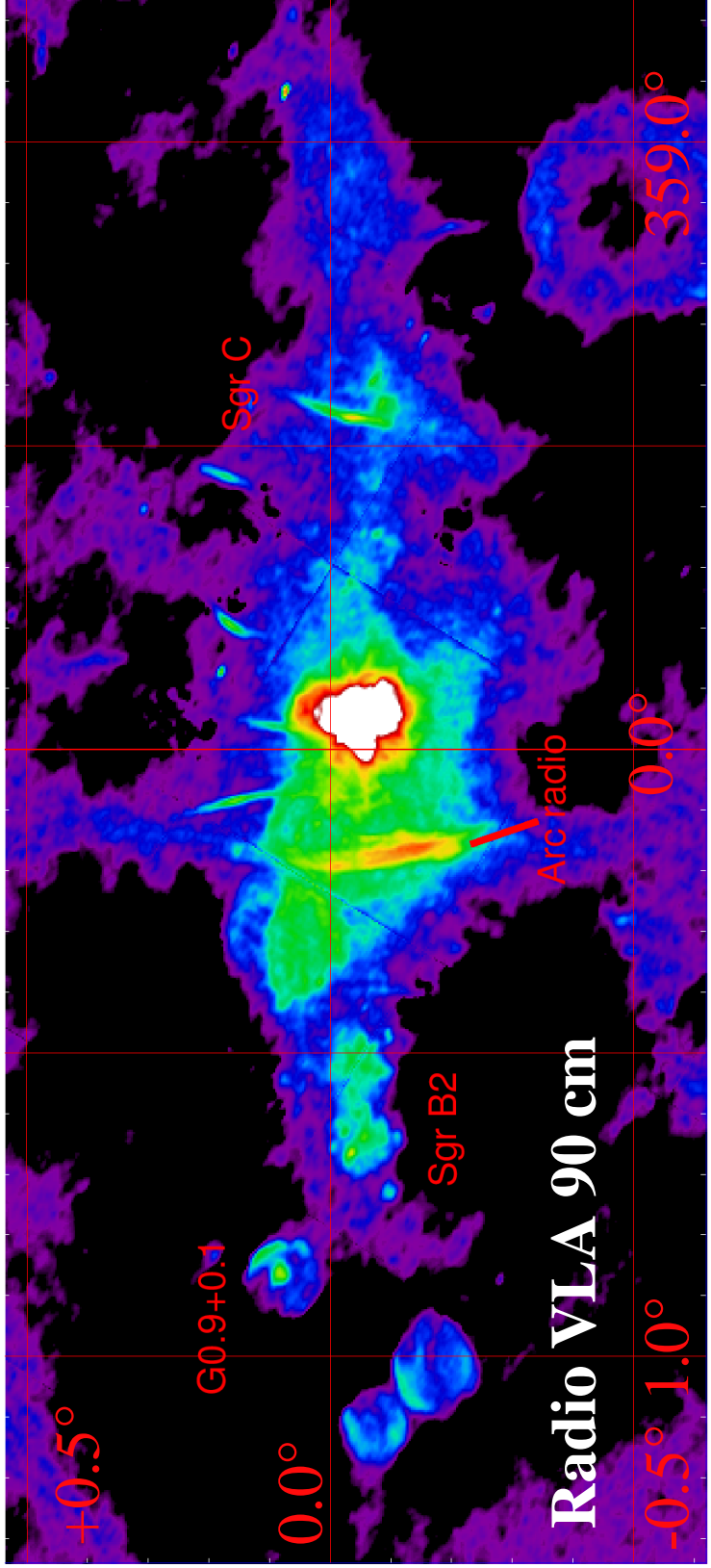
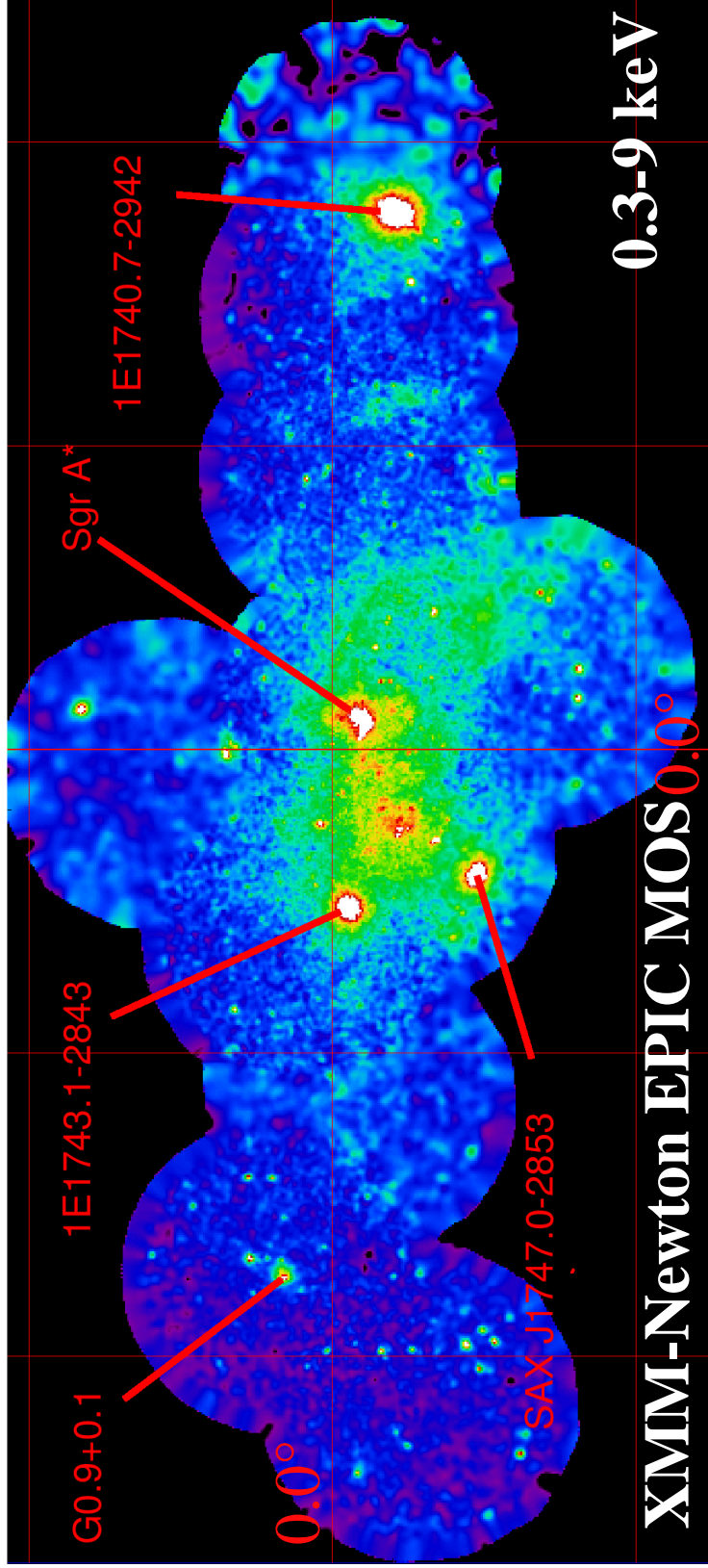


Trou noir supermassif de 2.6  
millions de masses solaires



# Activité en rayons X du trou noir supermassif au coeur de la Voie Lactée





Rayons X

Rayons X

XMM-Newton

Chandra

Galaxie d'Andromède M 31  
Spirale similaire à la notre  
d = 670 kpc, groupe local

Au coeur : **Trou noir  
supermassif de 30 Msol !**  
Sources brillantes : systèmes  
binaires accrétants

- systèmes binaires, vestiges de supernova
- gaz chaud à des millions de degrés au coeur

Optique

180 arcmin

30 arcmin

1 arcmin

Galaxies

NGC 4631

bleu : rayons X  
rouge : en visible

Découverte d'un halo de gaz chaud à des millions de degrés

Rayons X  
XMM-Newton

NGC 838

NGC 835

NGC 833

NGC 839

HCG 16

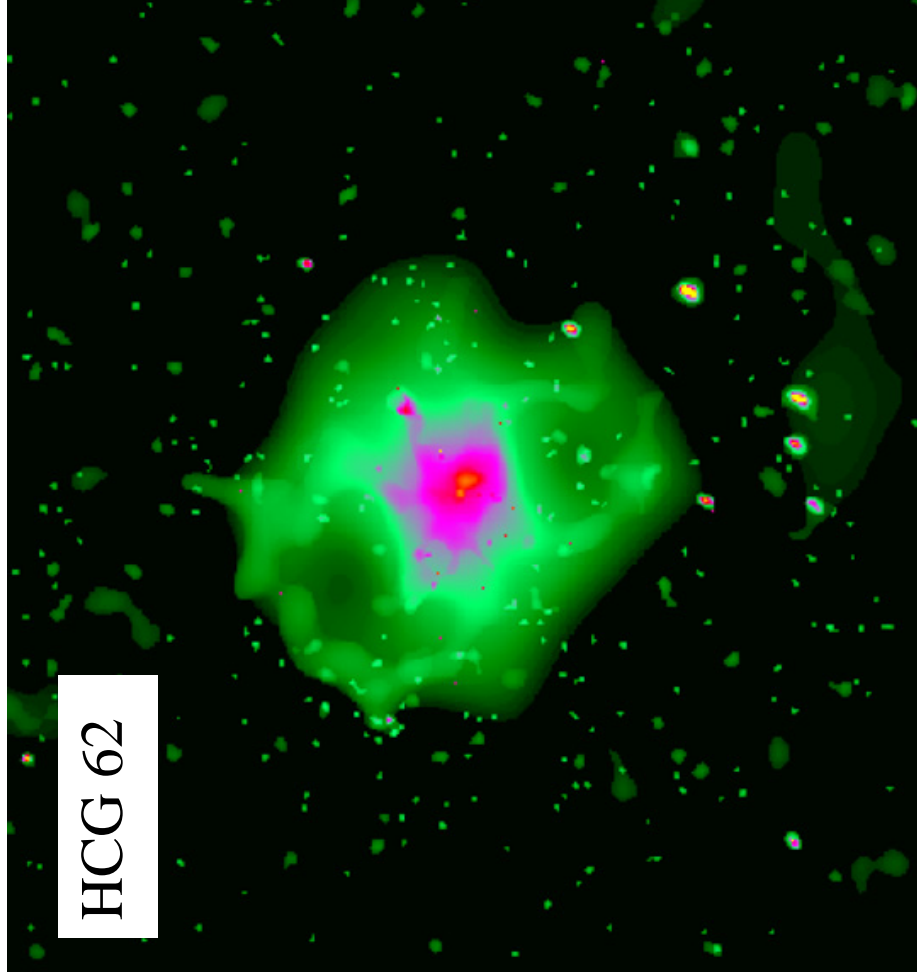
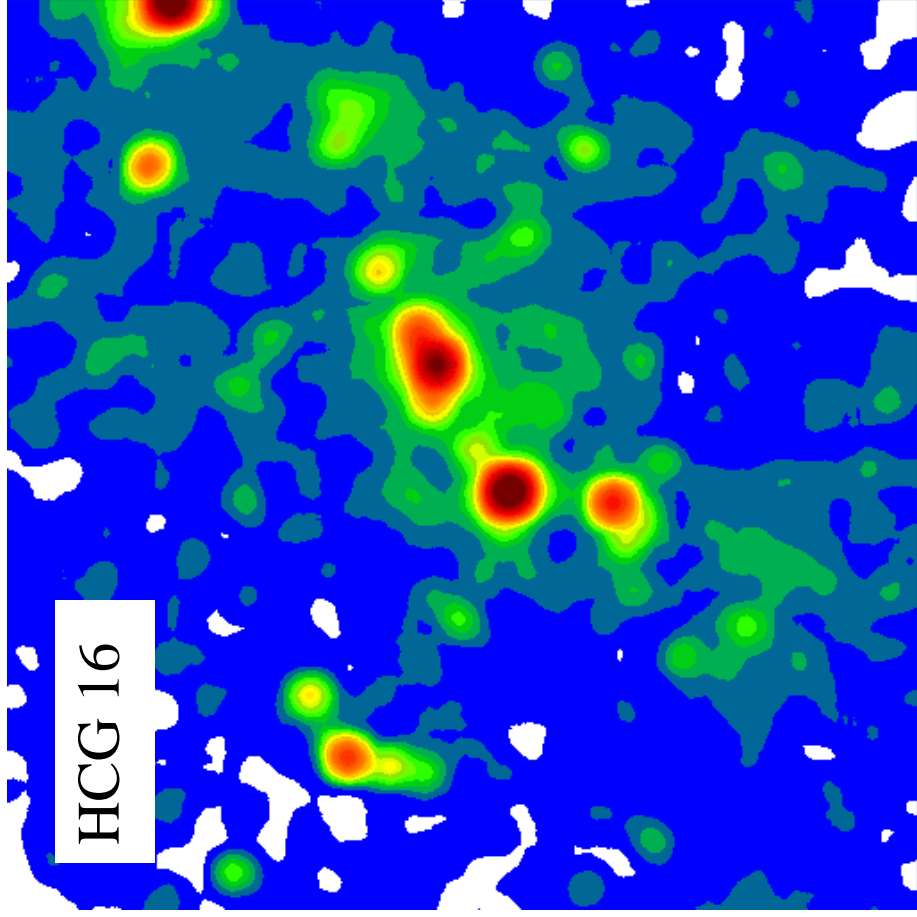
Optique  
XMM-Newton

## Groupe de Galaxies

La moitié des galaxies  
apparaissent en groupes :  
**Réalité ou alignement fortuit ?**

Si galaxies gravitationnellement  
liées (dans le puits de potentiel  
du groupe), présence d'un gaz  
chaud (millions de degrés) entre  
les galaxies uniquement  
**déTECTABLE en rayons X**

# Emission diffuse des groupes de galaxies

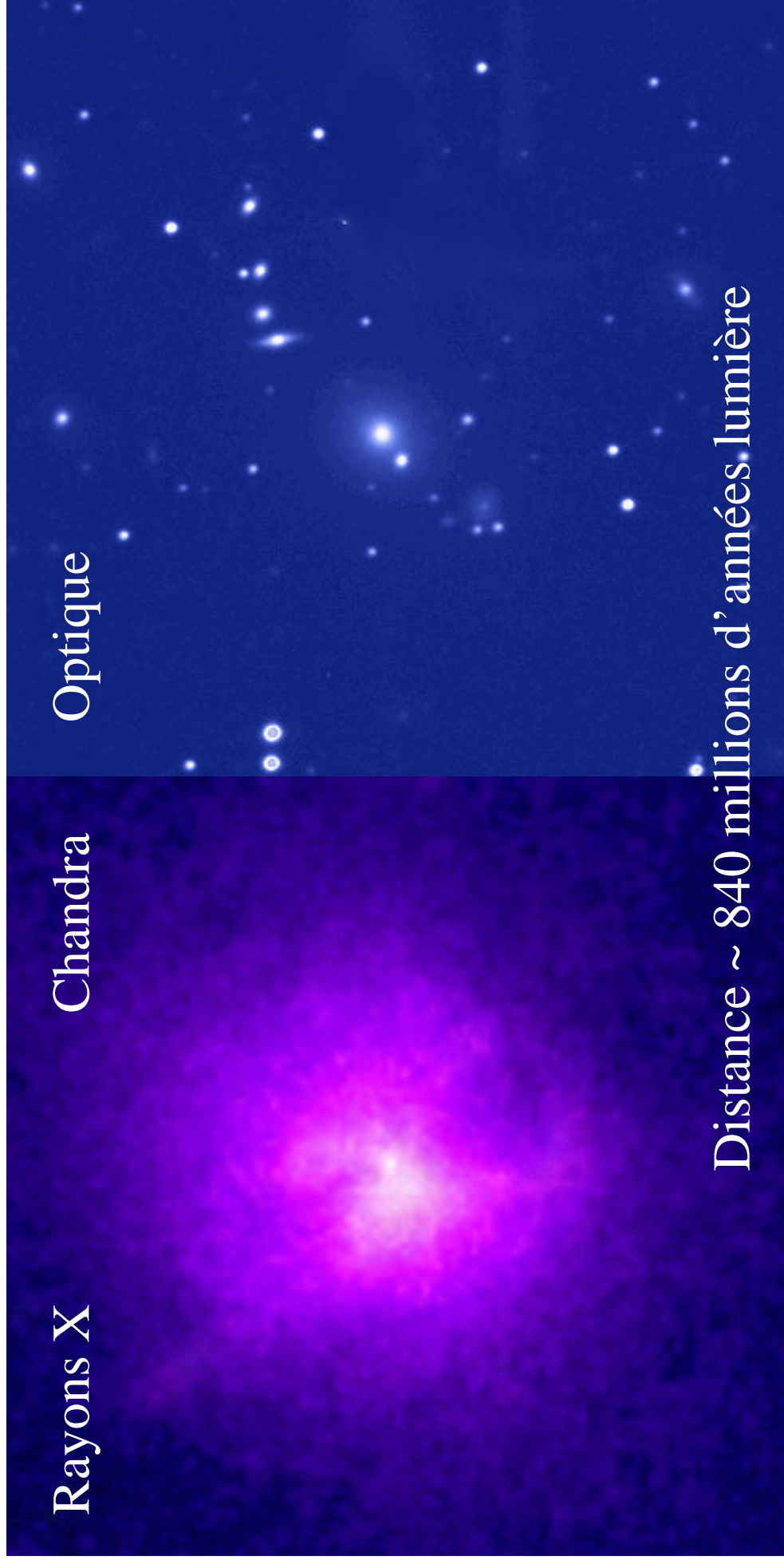


# Amas de Galaxies : Hydra A

Rayons X

Chandra

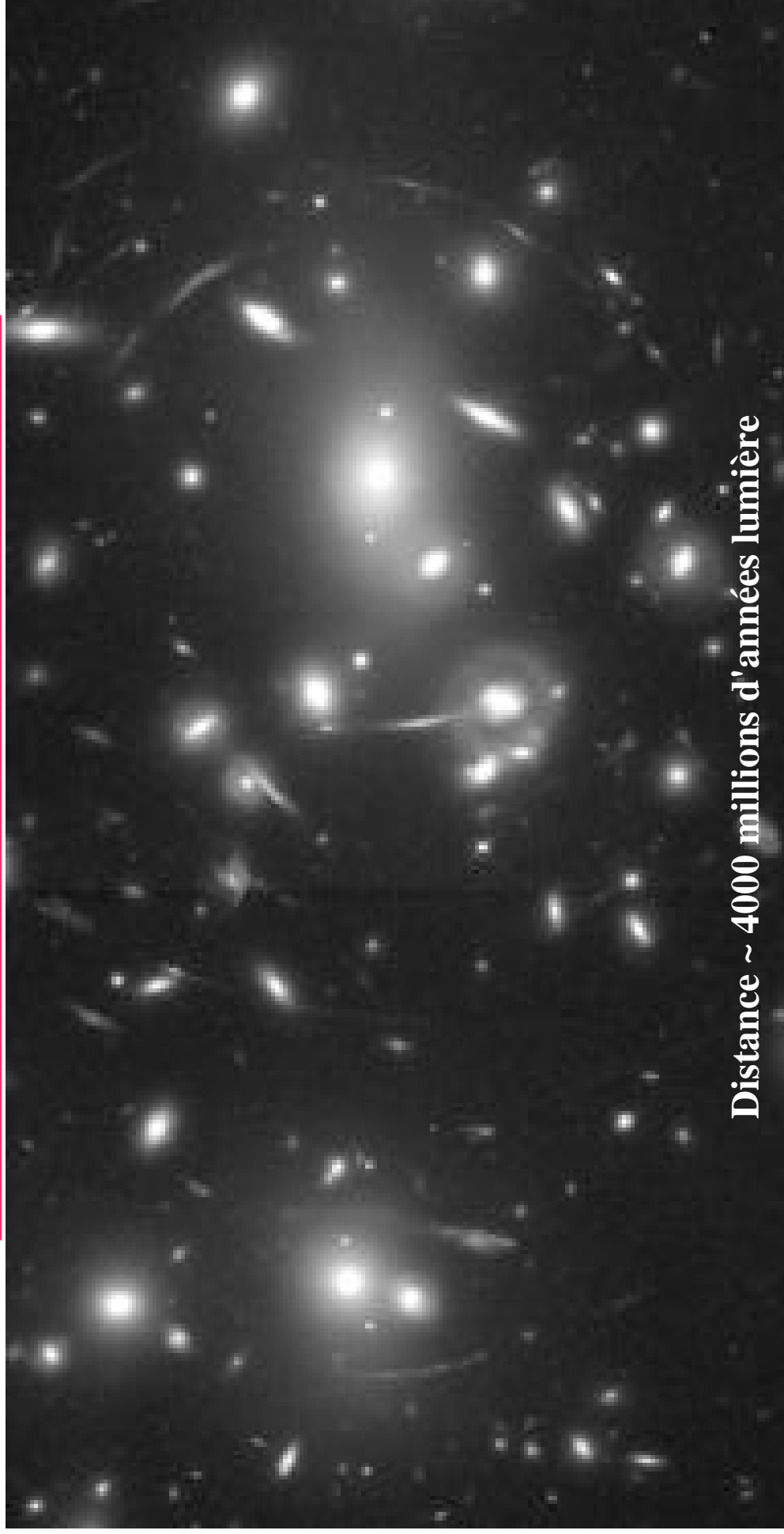
Optique



Distance ~ 840 millions d'années lumière

Détection de raies d'émission -> origine thermique du gaz intra-amas de 10-100 millions de degrés, tenu dans le potentiel gravitationnel de l'amas  
Masse du gaz = 2-10 fois la masse des galaxies  
Masse totale = 10-30 masse visible (c'est à dire gaz +galaxies) => **MATIERE NOIRE !**

# Amas de galaxies en visible



Distance ~ 4000 millions d'années lumière

Abell 2218

Optique

Hubble Space Telescope

Masse totale des amas de galaxies déterminée par différentes méthodes : distribution de vitesse des galaxies, température + profil de densité du gaz, lentille gravitationnelle



# Amas de galaxies en formation

