



# Introduction à l'astrophysique des particules + quelques figures et infos pour mémoire...

# Physique / Astrophysique

- Astrophysique  $\subset$  Physique et Physique  $\subset$  Astrophysique  
astroparticules...
- Que peut-on apprendre du monde physique en observant le cosmos ?  
Terre  $\subset$  cosmos Mais en pratique, science mise en œuvre et développée sur Terre  $\neq$  science tournée vers le cosmos, avec cosmos comme objet  
expérience  $\neq$  observation
- Que peut-on apprendre sur le cosmos en observant le cosmos ?  
« **astrophysique générale** » (connaissance des lois requise !)
- Que peut-on apprendre sur la Nature, son contenu, ses lois, en observant le cosmos ?  
« **astrophysique fondamentale** » (connaissance de l'astro. requise !)

# Astrophysique

- Astronomie  $\neq$  Astrophysique

- Étapes clés...



- Immuabilité  $\rightarrow$  événements  $\rightarrow$  phénomènes  
 $\rightarrow$  processus physiques
- « La Lune est Terreuse ! »  $\rightarrow$  La physique concerne aussi le cosmos !
- Spectroscopie  $\rightarrow$  découverte de l'hélium !  
 $\rightarrow$  physique du cosmos (astrophysique)
- Astronomie non visible  $\rightarrow$  multi-longueur d'onde
- Astronomie non photonique  $\rightarrow$  multi-messenger

« astroparticules »

# L'univers a une histoire !

- Fait majeur, extrêmement profond, difficile à appréhender...
- Plusieurs types d'histoire, en parallèle
  - Cosmologie, histoire de l'évolution des structures...
  - Évolution chimique, histoire des noyaux, atomes, molécules... Vie !
  - etc.
- « Écologie galactique », dans un monde en évolution...
- Objets clés : supernovæ... Composante clé : RC...
  - + AGN + événements locaux : sources HE (GRB, pulsars...), collisions, merging...

**(contingence !)**



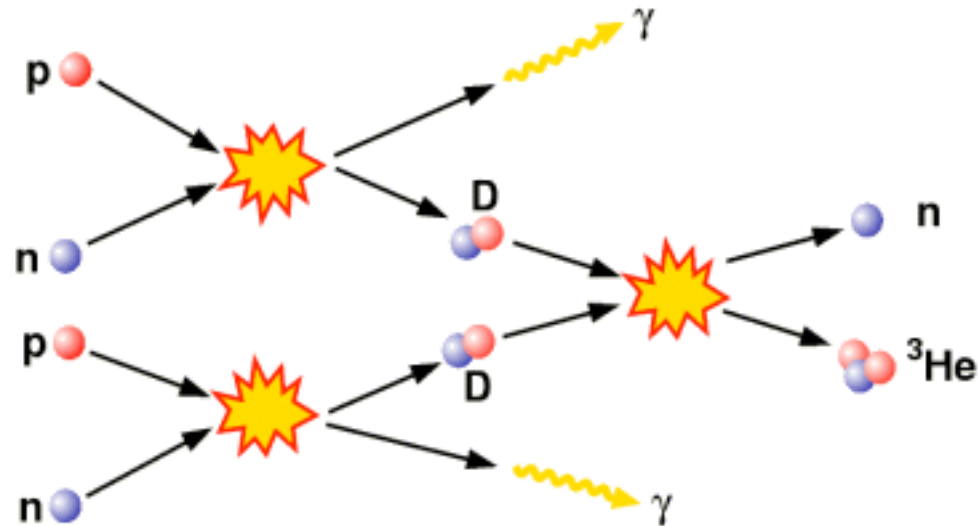
# La nucléosynthèse primordiale

( BBN: Big Bang Nucleosynthesis )

- Rappel : thermodynamique
  - ◆ Fonction de distribution des particules
  - ◆ Densité numérique des particules et densité d'énergie
  - ◆ Équation d'état
  - ◆ Entropie
- Univers primordial
  - ◆ Équation de Friedmann-Lemaître
  - ◆ Expansion de l'univers
  - ◆ Expansion et histoire thermique
    - ◆ Densité d'énergie totale
    - ◆ Particules et degrés de liberté dans le Modèle Standard
- Nucléosynthèse
  - ◆ Asymétrie baryonique et rapport baryons/photons
  - ◆ Principe de la BBN
  - ◆ Rapport neutrons/protons
  - ◆ Fraction d'hélium
  - ◆ Accord avec les observations, et implications !!!

# Nucléosynthèse primordiale

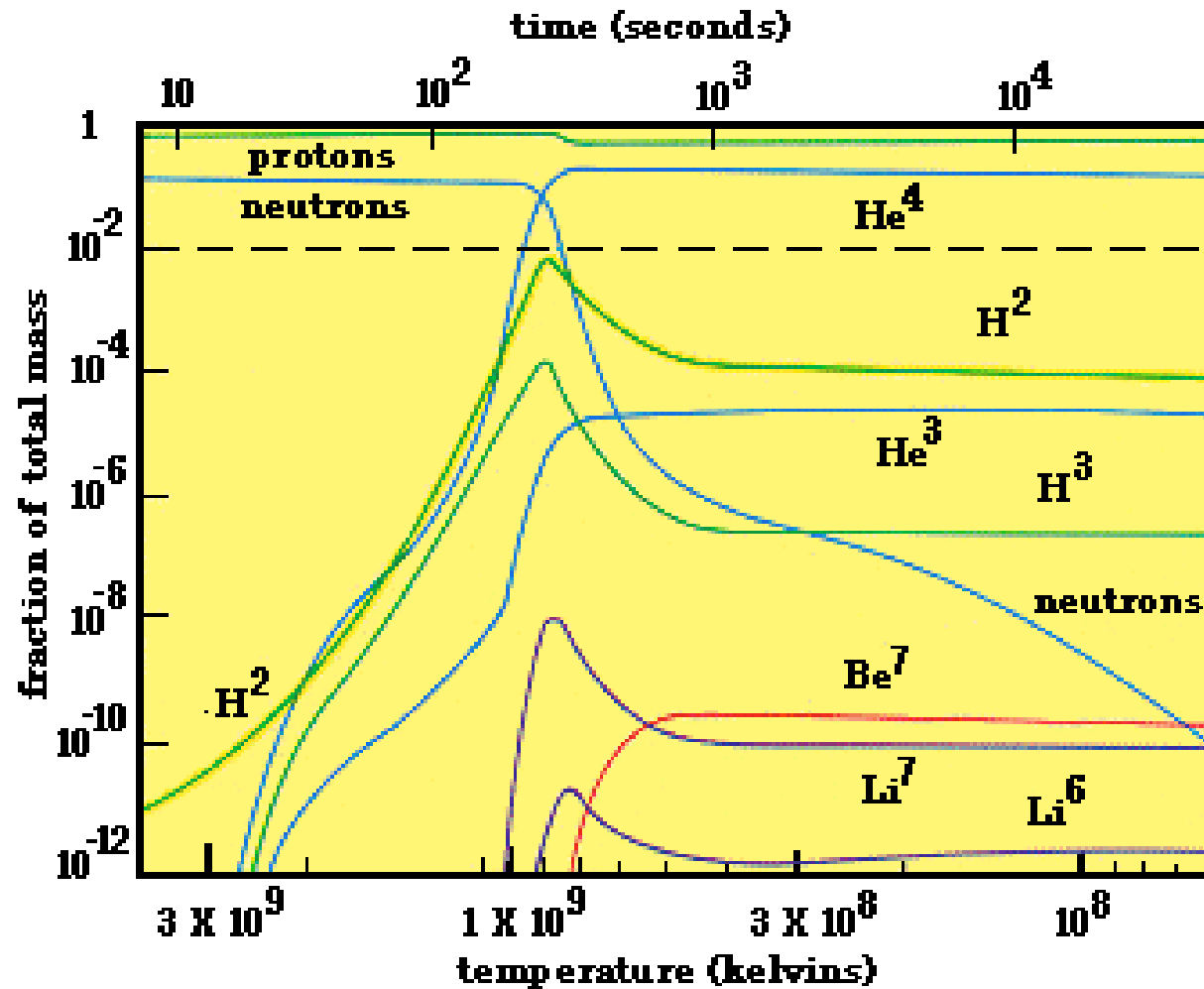
- Exemple de réactions, conduisant à  $^3\text{He}$ ...



# Évolution des abondances

- Valeurs primordiales mesurées:

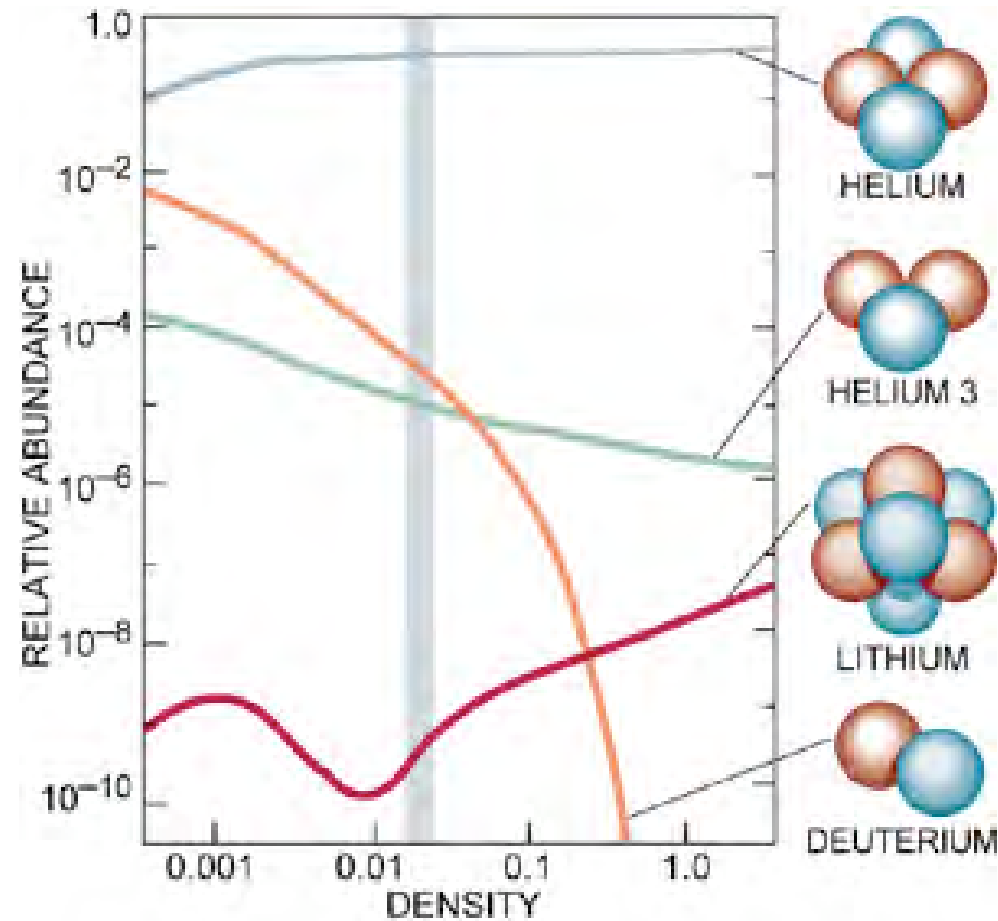
$$Y_{\text{He}} = 0.238 \pm 0.002 \pm 0.005 \quad D/H \sim (3.40 \pm 0.25) \times 10^{-5} \quad {}^7\text{Li}/H \sim 1\text{--}2 \times 10^{-10}$$

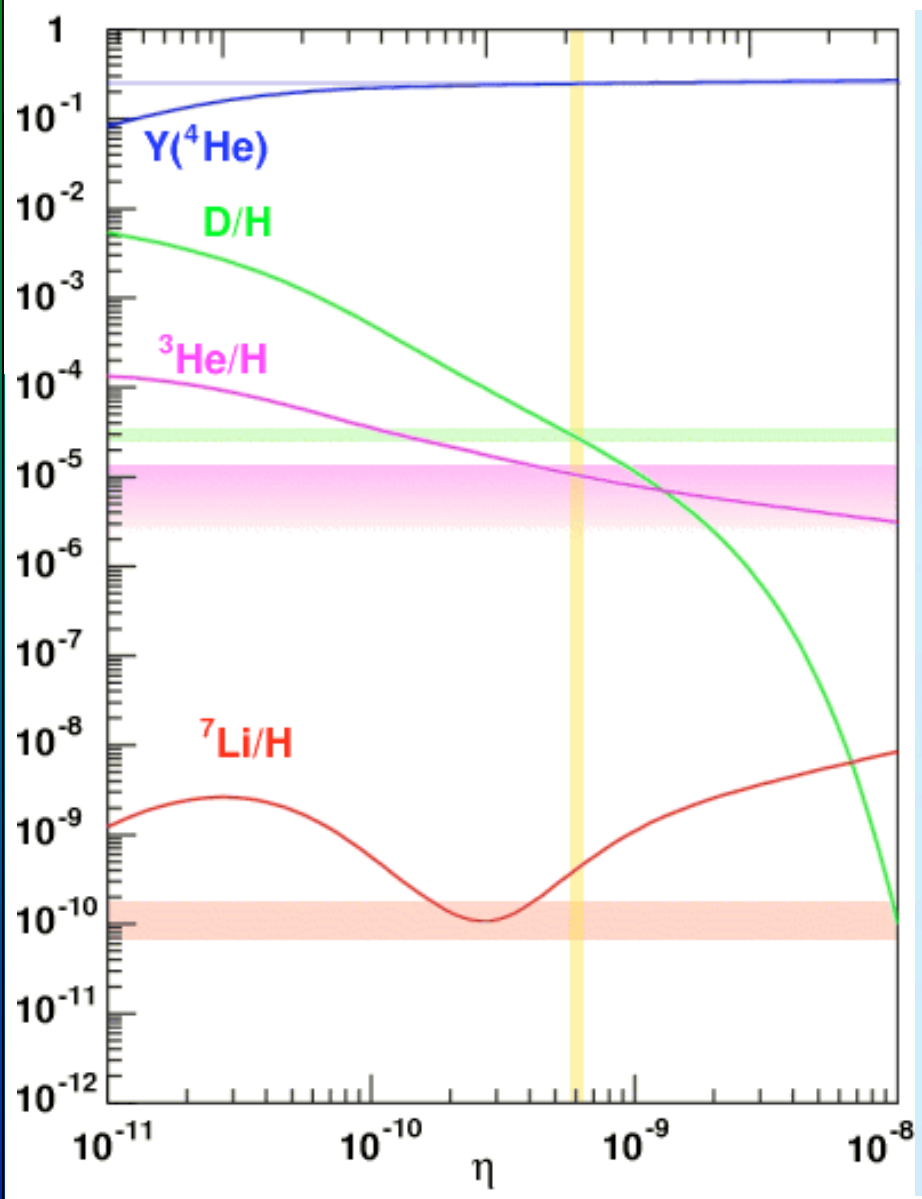




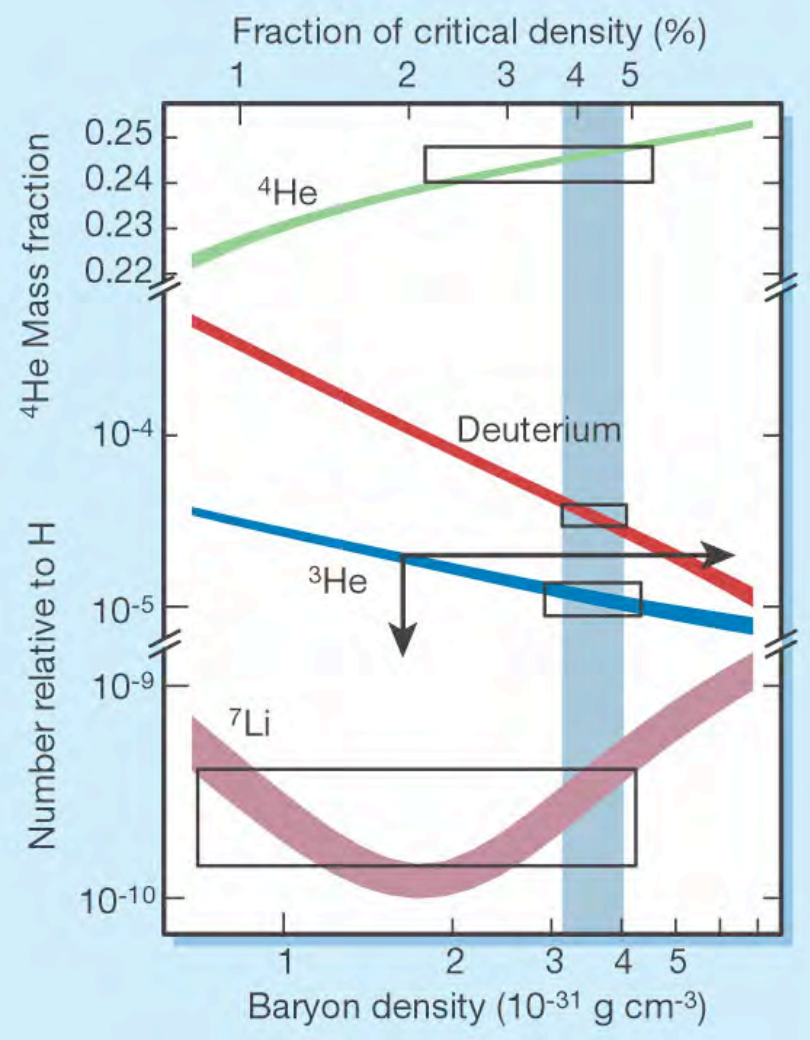
# Nucléosynthèse primordiale

- Abondances en fonction de la densité baryonique





Corinne Charbonnel, Nature 415, 27-29 (2002)



# Nécessité de matière non baryonique !

BBN

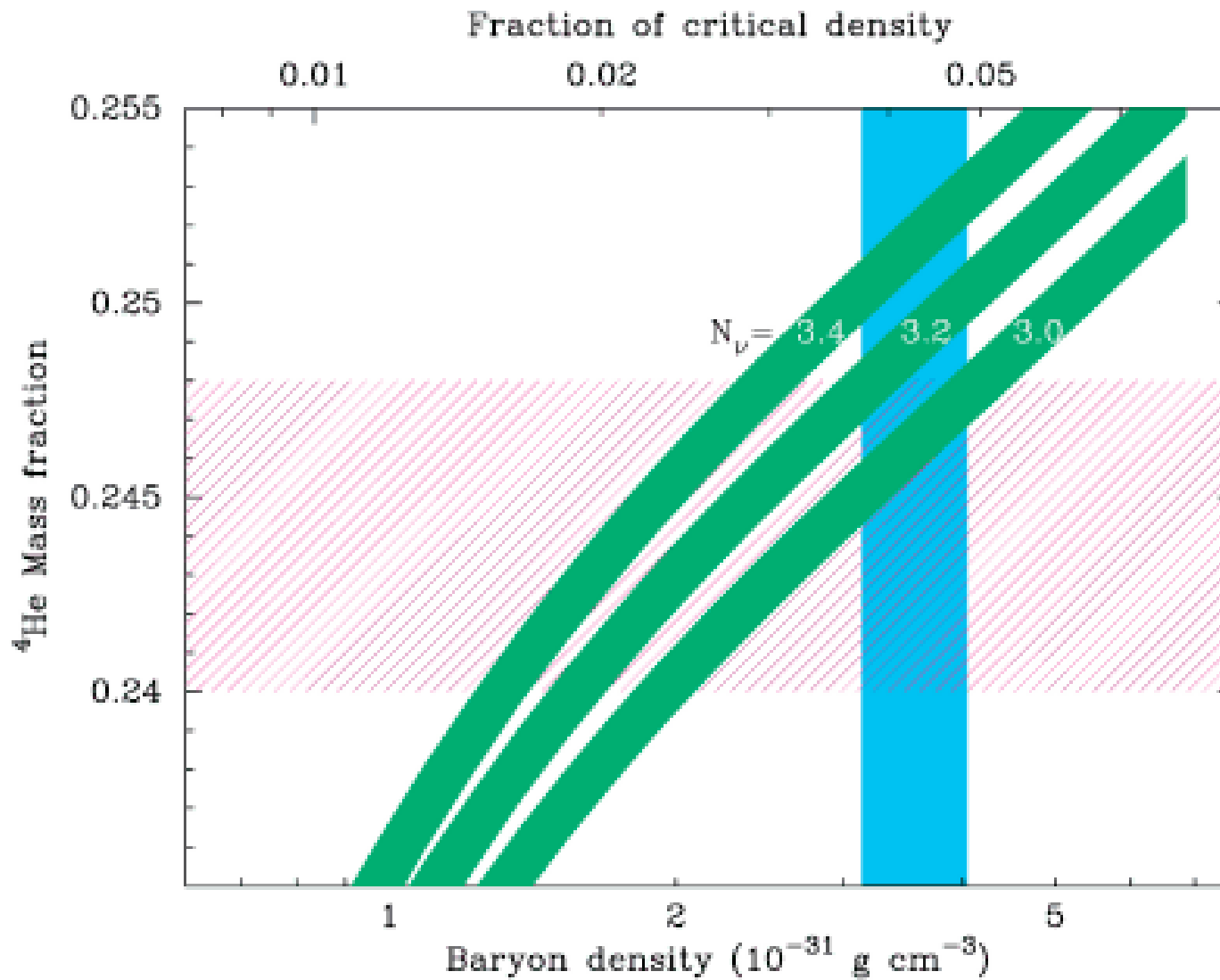
$$D/H = (3.40 \pm 0.25) \times 10^{-5} \longrightarrow \eta = (5.1 \pm 0.5) \times 10^{-10}$$

$$\longrightarrow \Omega_b = 3.67 \cdot 10^7 \eta h^{-2}$$

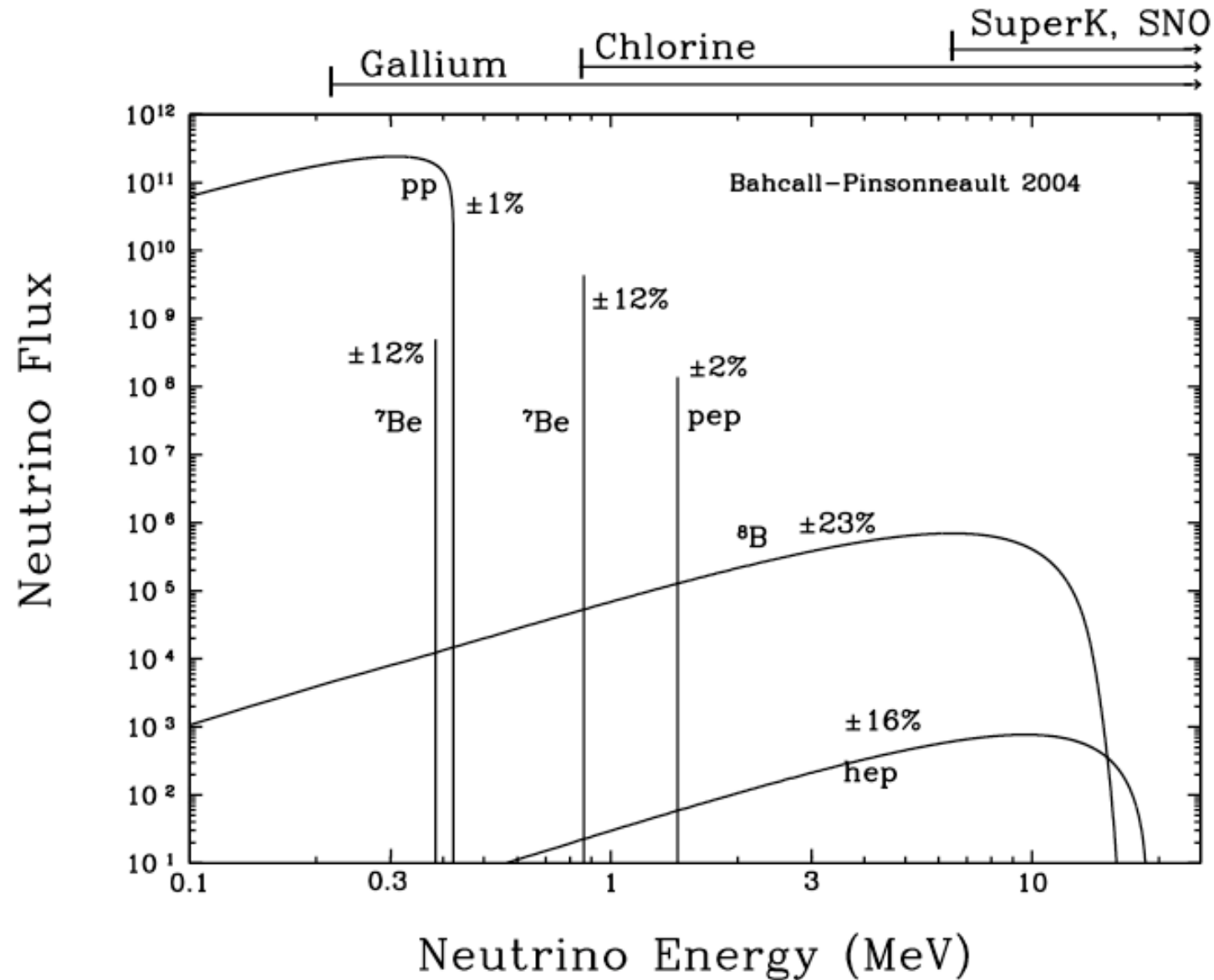
$$\Omega_b = 0.038 \pm 0.005$$

- NB: à partir de l'étude du CMB (WMAP) :  $\Omega_b = 0.044 \pm 0.004$

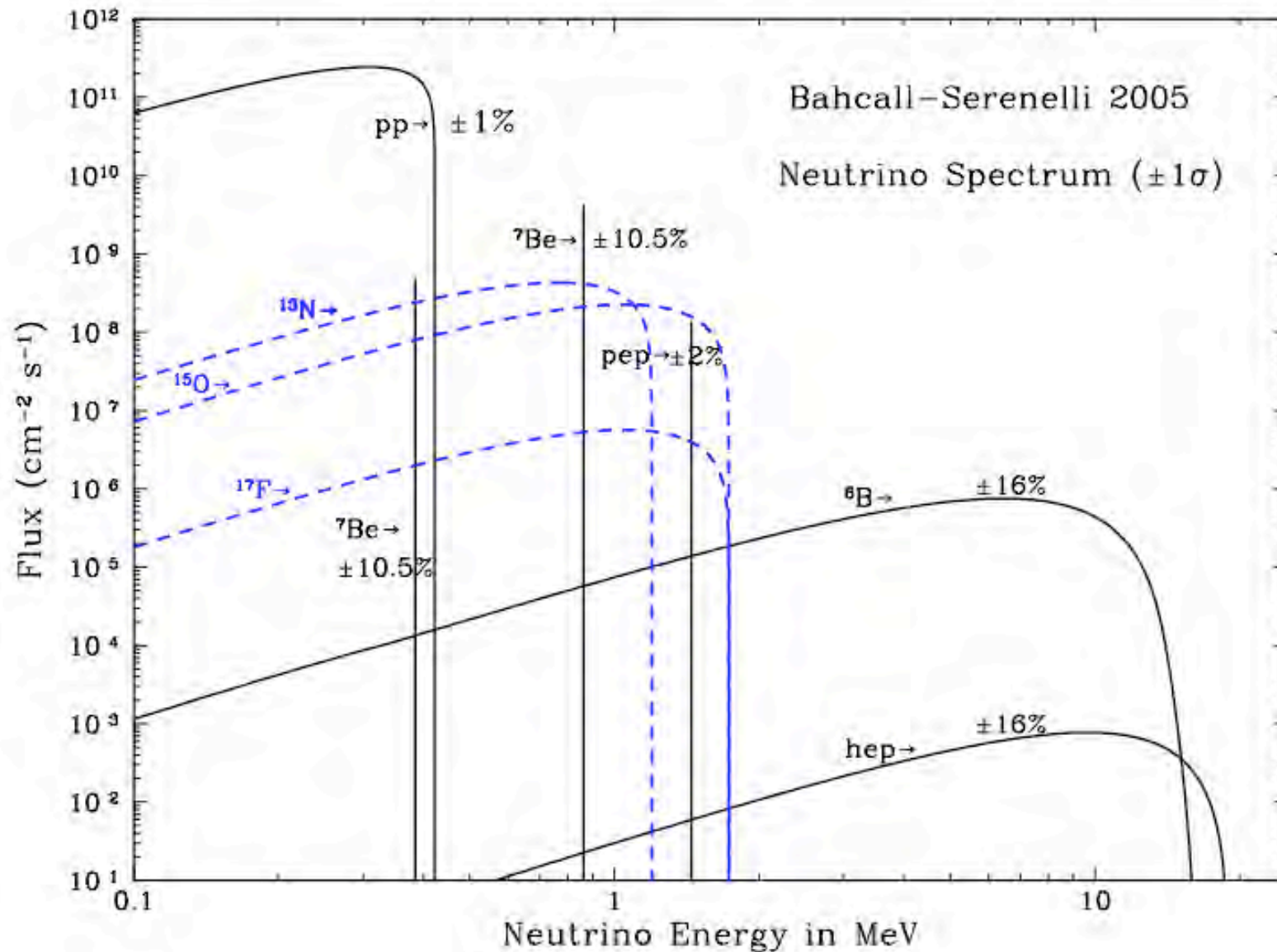
# Nombre de familles de neutrinos : $N_\nu = 3$



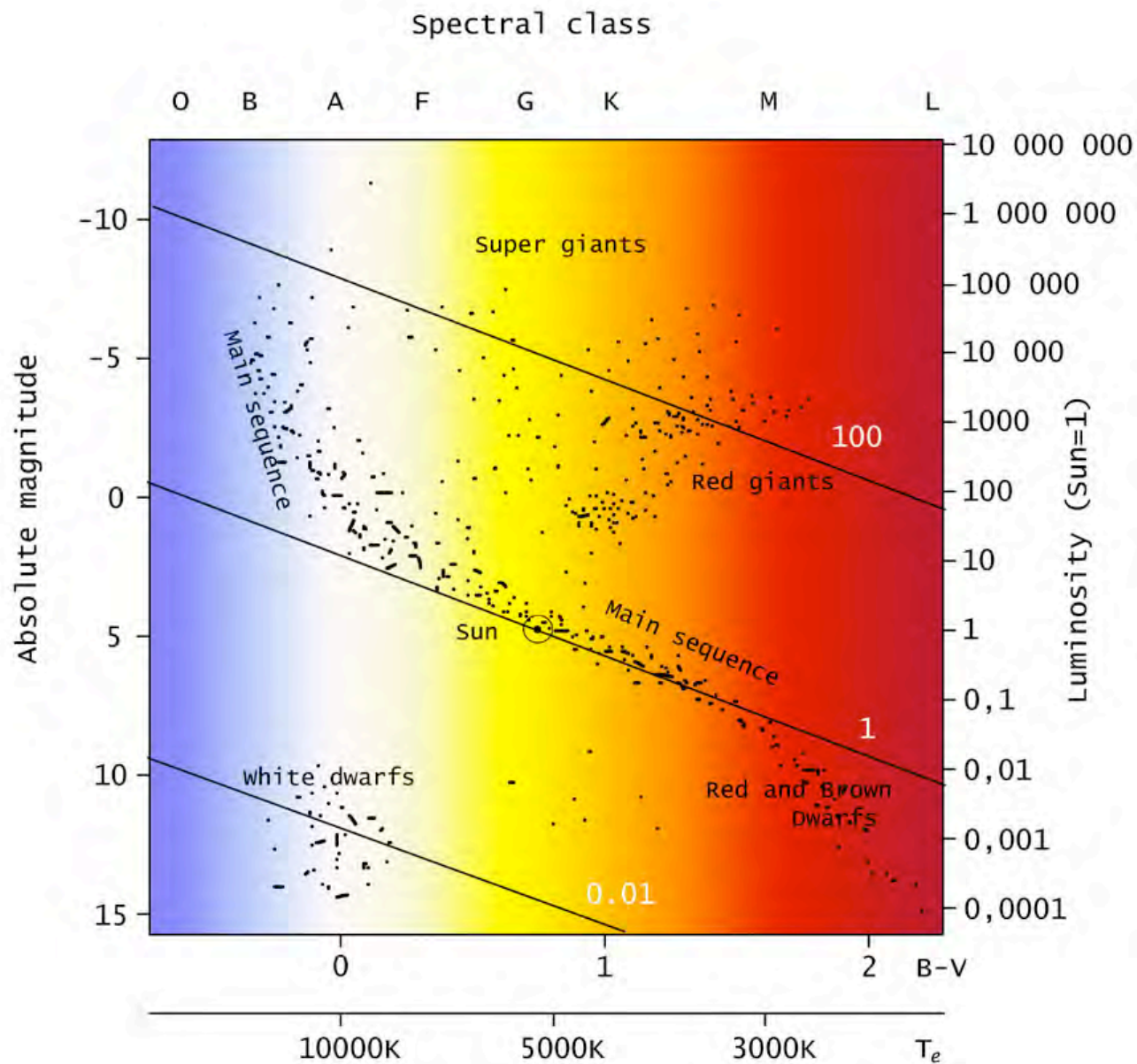
# Spectre des neutrinos solaires



# Spectre des neutrinos solaires



# Étoiles (diagramme de Hertzsprung-Russell)



# Processus d'émission de lumière

- Émission thermique
  - ◆ Étoiles (visible, + UV pour les plus massives)
  - ◆ Poussières interstellaires (IR)
  - ◆ Régions de formation d'étoiles : IR
  - ◆ Gaz chaud, ou très chaud: UV et rayons X
  - ◆ CMB ! (2.7 K)
- Émission non thermique: raies
  - ◆ Raies gamma-nucléaires
  - ◆ Raies X (atomiques et parfois nucléaires)
  - ◆ Raie d'annihilation à 511 keV
- Émission non thermique: continuum
  - ◆ Bremsstrahlung
  - ◆ Synchrotron (radio, X)
  - ◆ Compton inverse (IC)
  - ◆ Processus hadroniques: pions neutres



# Astrophysique multi-messenger

## ■ Rayons cosmiques

+ photons bien sûr !

- ◆ Accélération dans les sources
  - ✦ Objets compacts, disques d'accrétion, jets...
  - ✦ Ondes de choc: restes de supernova, accrétion...
  - ✦ Éruptions solaires ou stellaires
  - ✦ Noyaux actifs de galaxie
  - ✦ Machines (pulsars, vents, etc.)
- ◆ Réaccélération dans le milieu interstellaire

## ■ Neutrinos

- ◆  $p + p \rightarrow$  pions chargés  $\rightarrow$  neutrinos
- ◆ décroissance des neutrons

## ■ Cascades électromagnétiques

- ◆  $e^+e^-$ , neutrinos, photons gamma...

## ■ Ondes gravitationnelles

- ◆ Objets compacts doubles en orbite serrée, merging...
- ◆ Explosions asymétriques...

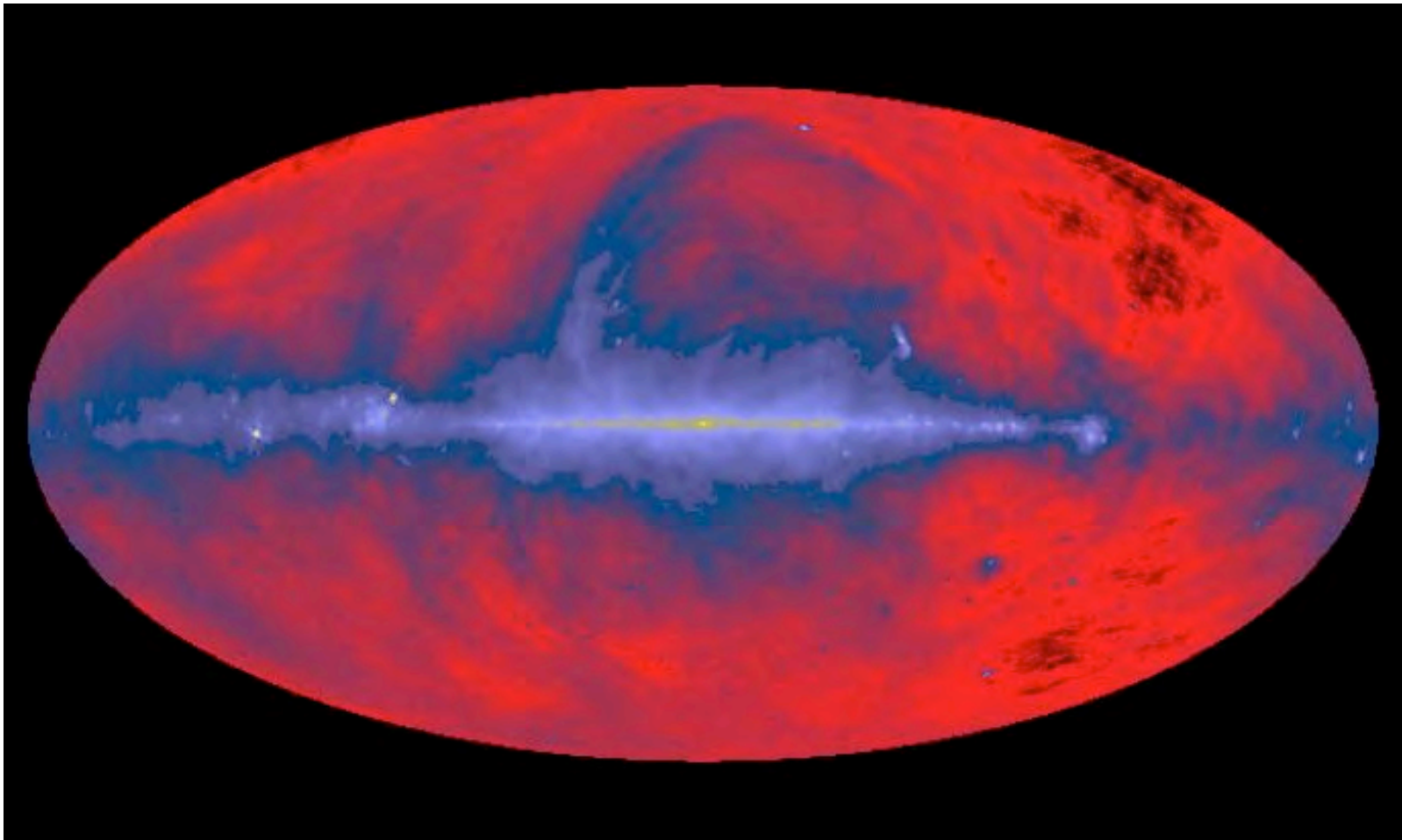
# L'univers « visible »...

M31 (Andromède)



# La Galaxie en radio, à 480 MHz

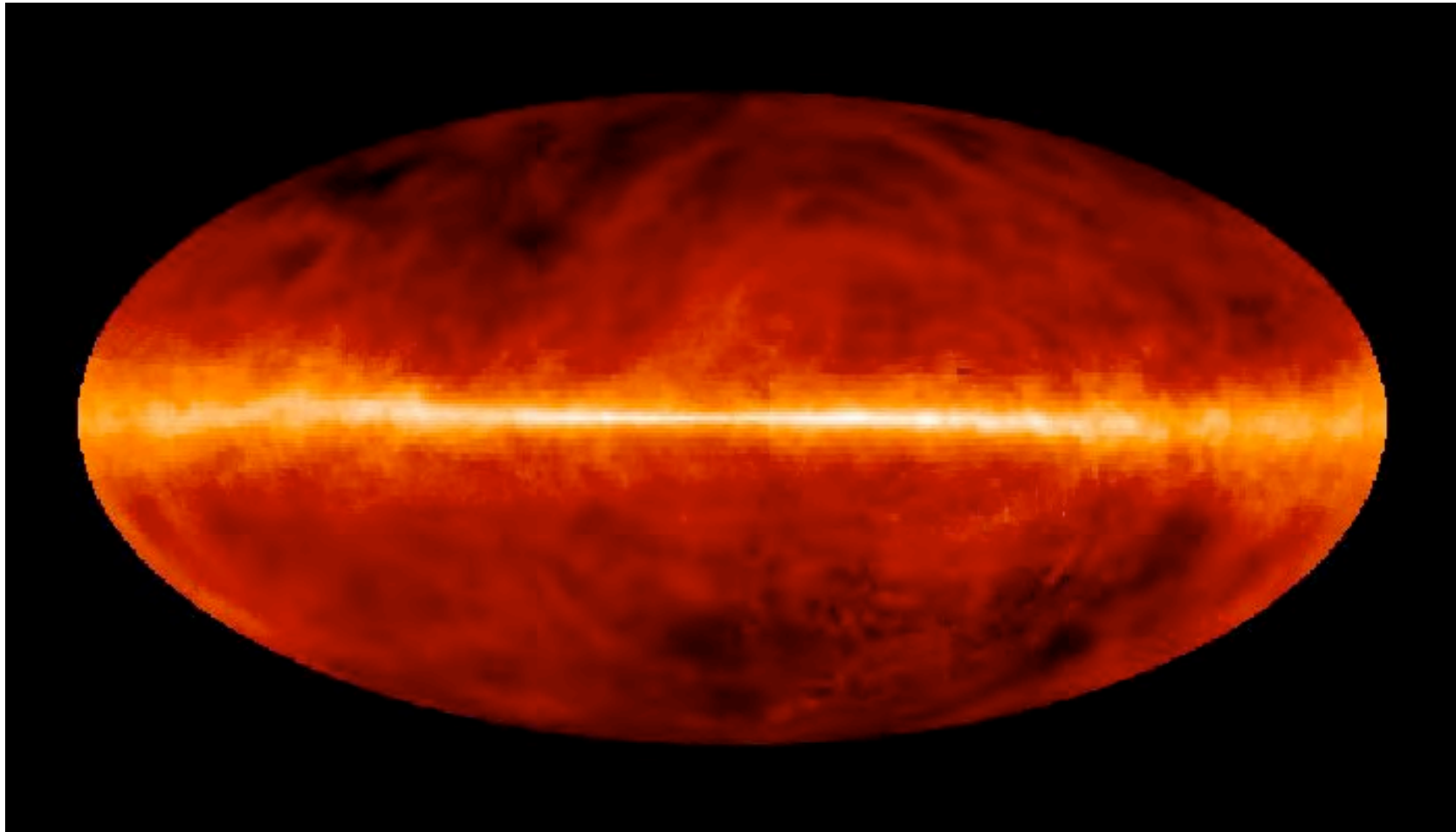
Synchrotron des électrons dans le champ magnétique...



SNRs, bulles, superbulles, radio galaxies, LMC...

# La Galaxie dans la raie de l'hydrogène à 21 cm (1420 MHz)

Transition parallèle/antiparallèle des spins de p et e dans H neutre



# La Galaxie en infrarouge

COBE/DIRBE



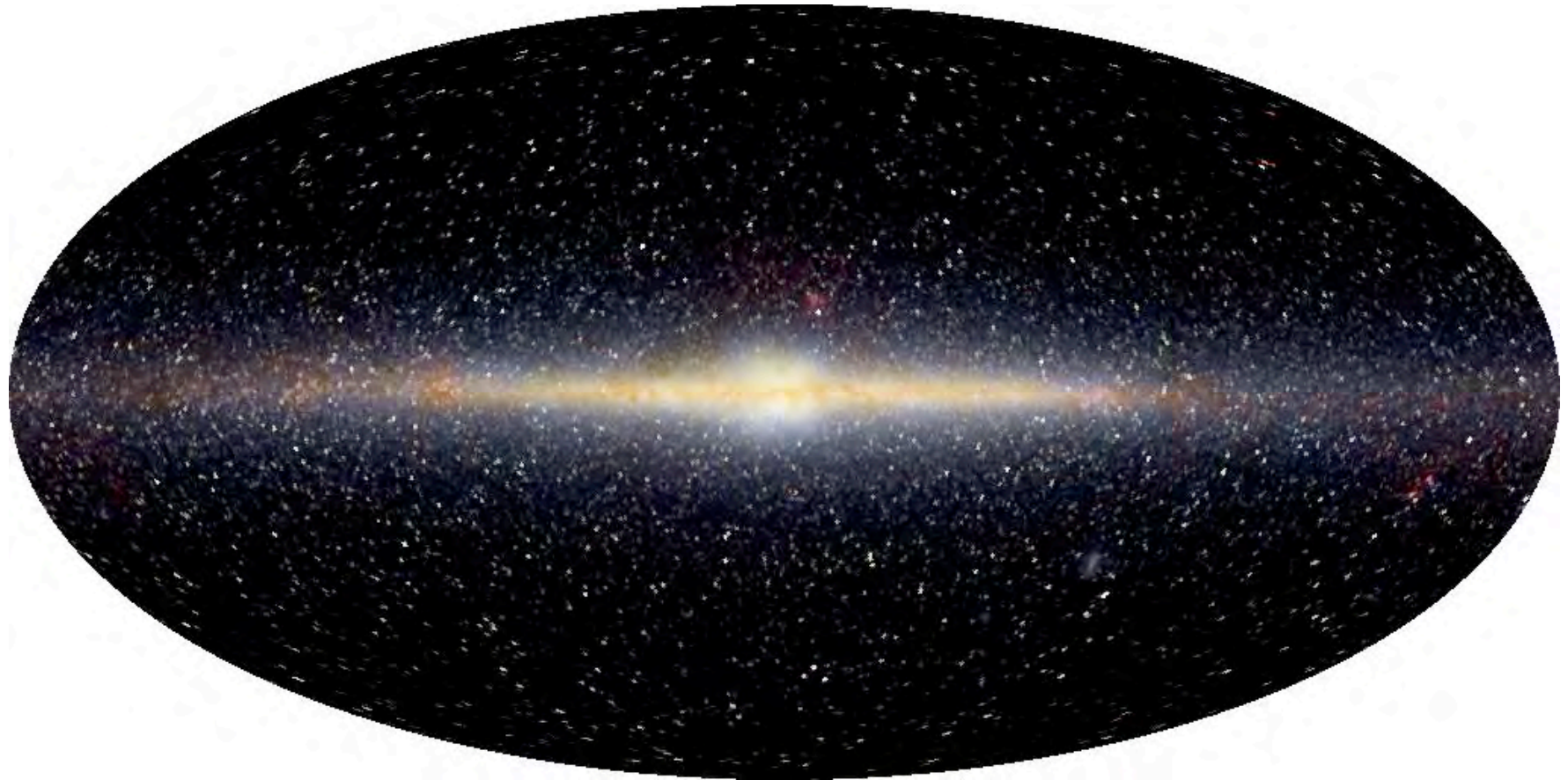
60  $\mu\text{m}$ , 100 $\mu\text{m}$ , 240 $\mu\text{m}$

poussière interstellaire, nuages en volutes, lumière zodiacale...



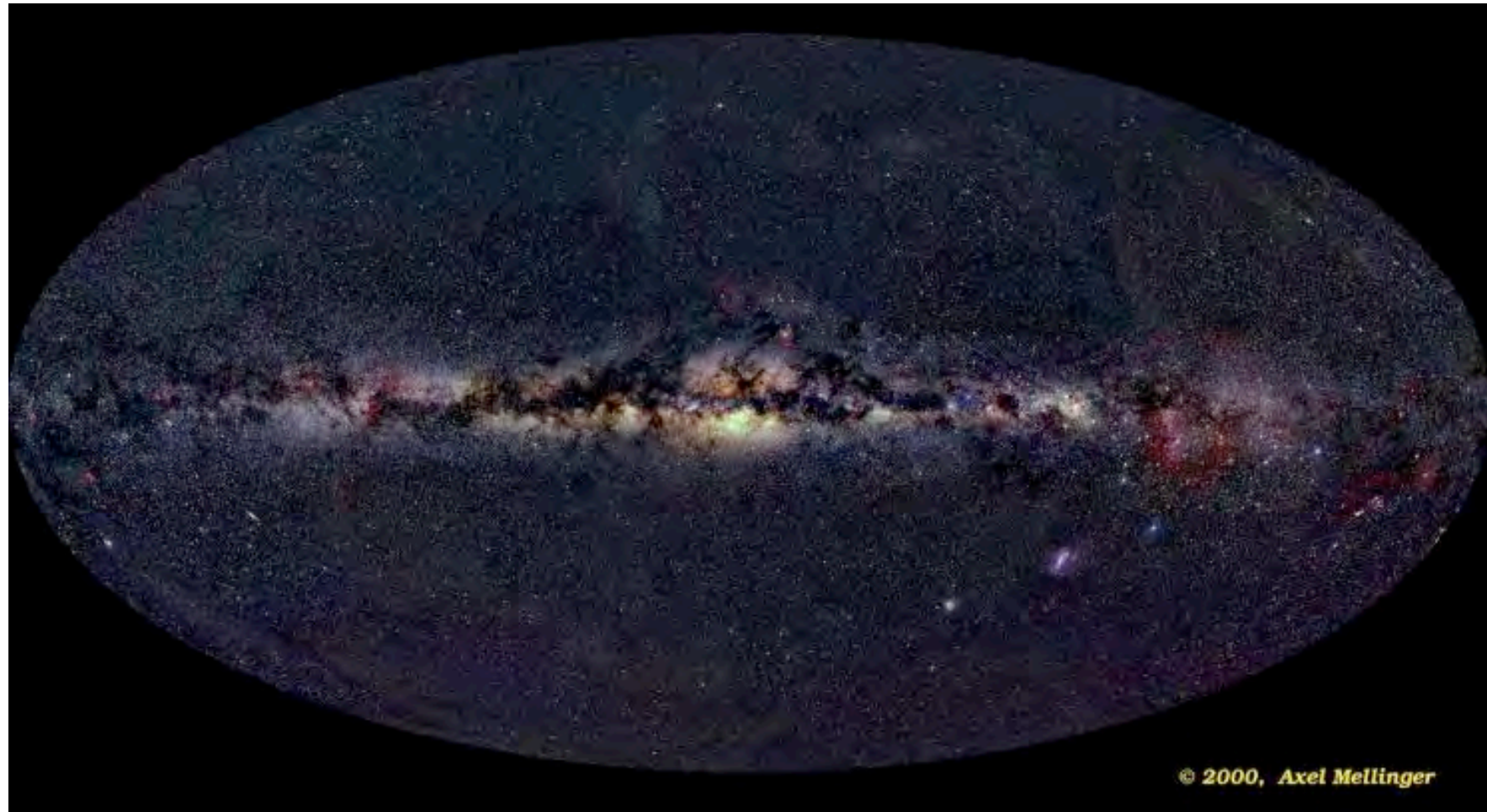
# La Galaxie en infrarouge proche

COBE/DIRBE



# La Galaxie dans le visible

La Voie Lactée !

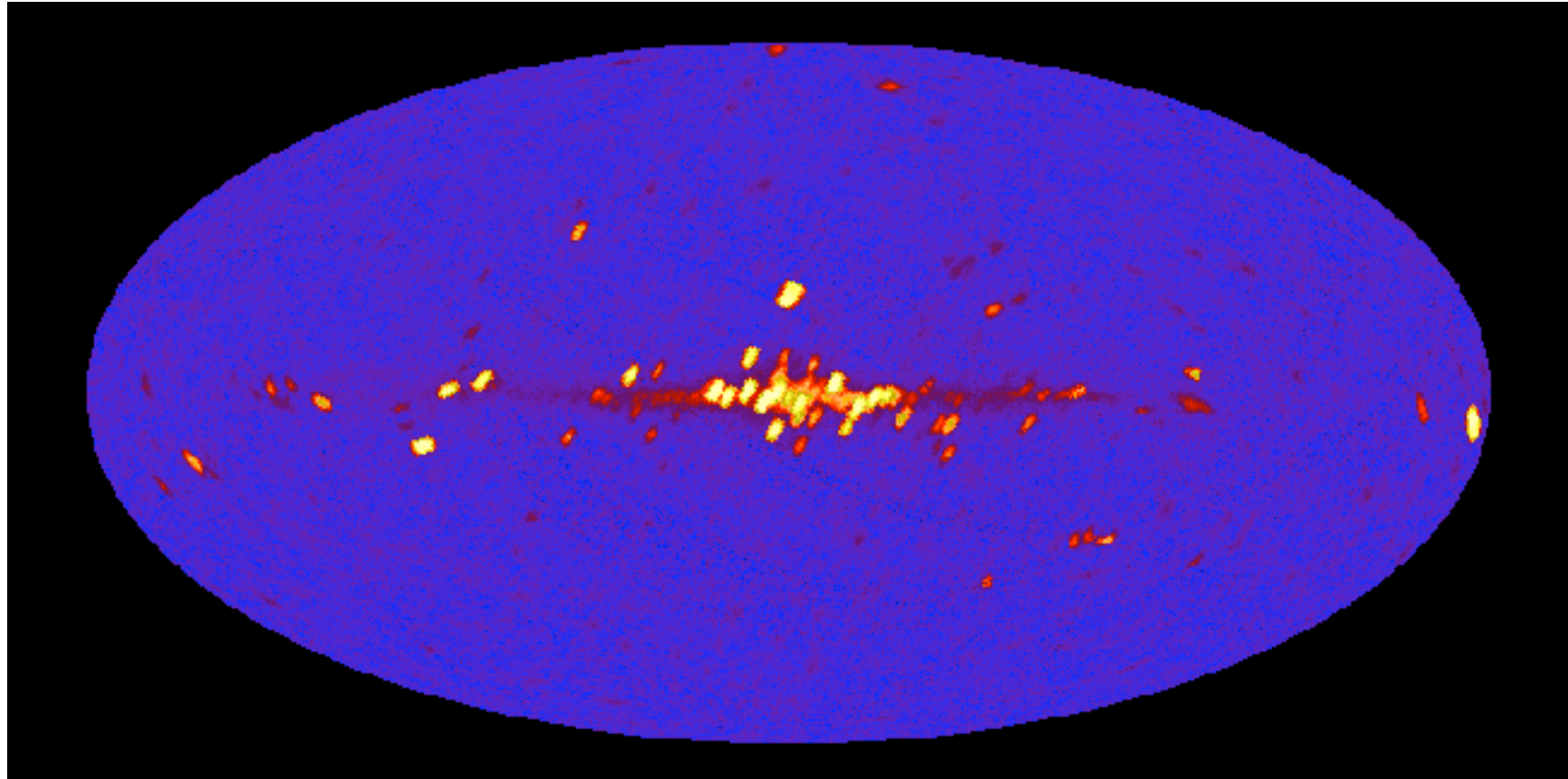


étoiles, amas, lumière absorbée...



# La Galaxie en rayons X

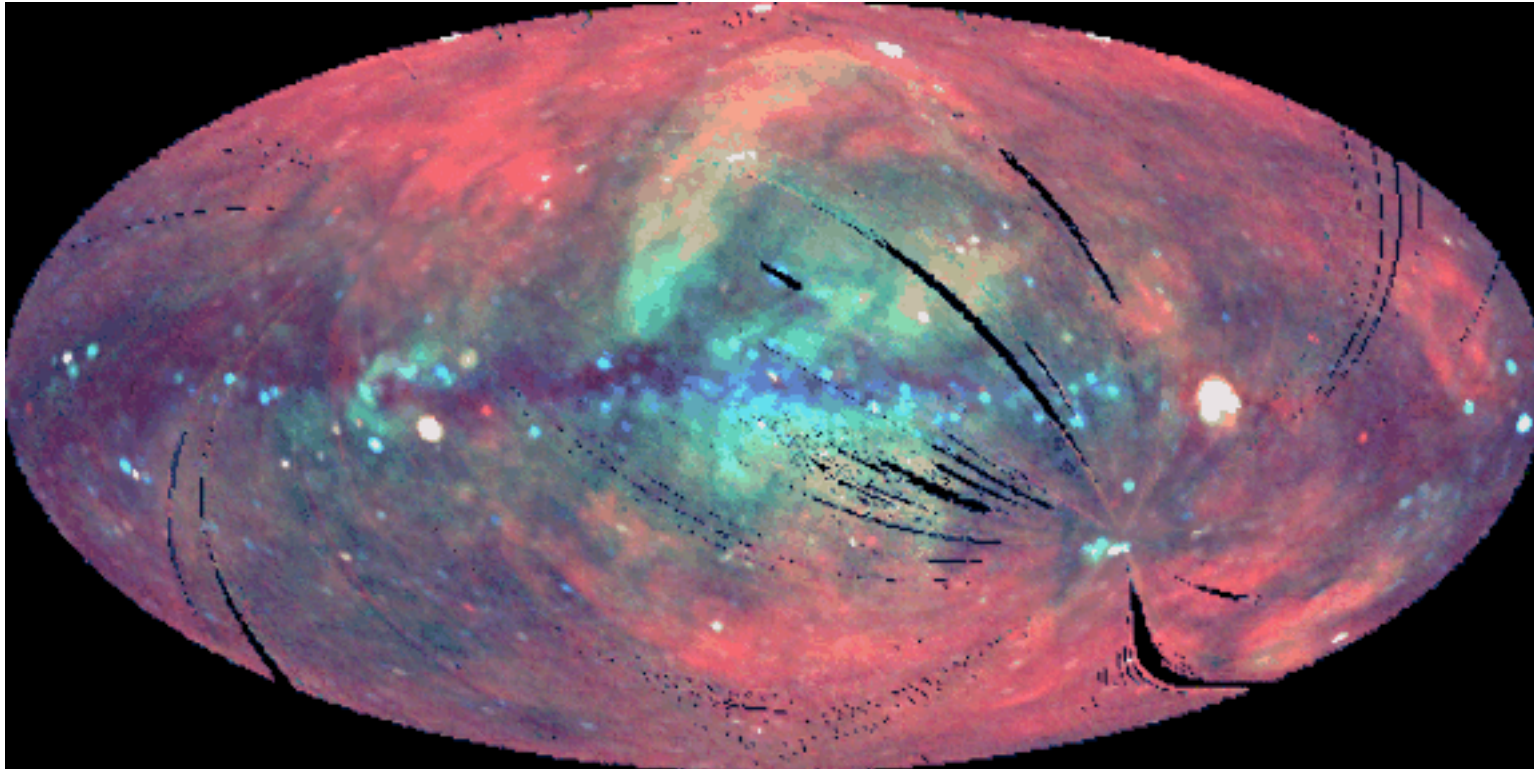
sources X (HEAO-1)





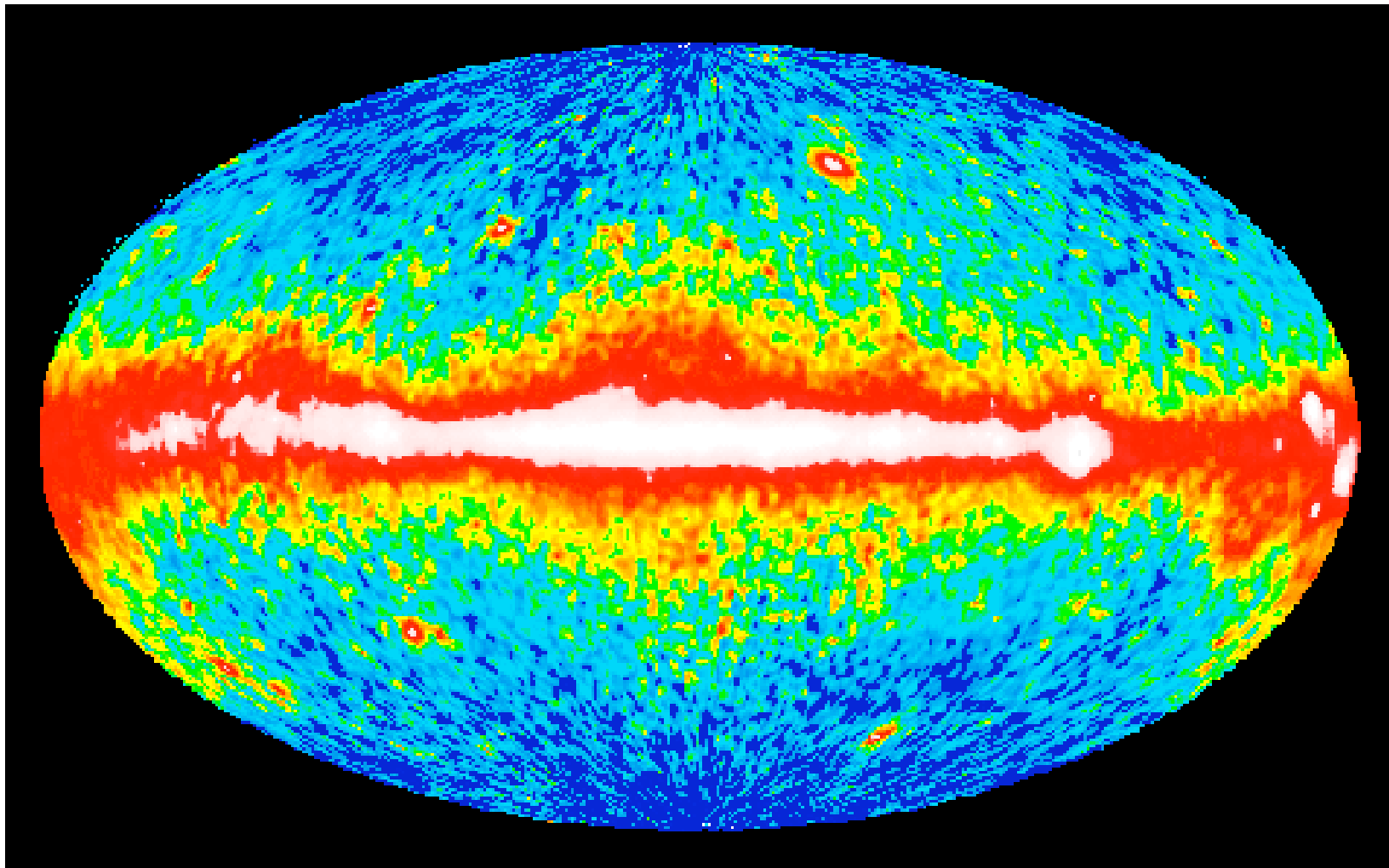
# La Galaxie en rayons X

ROSAT (0.1–2.0 keV)



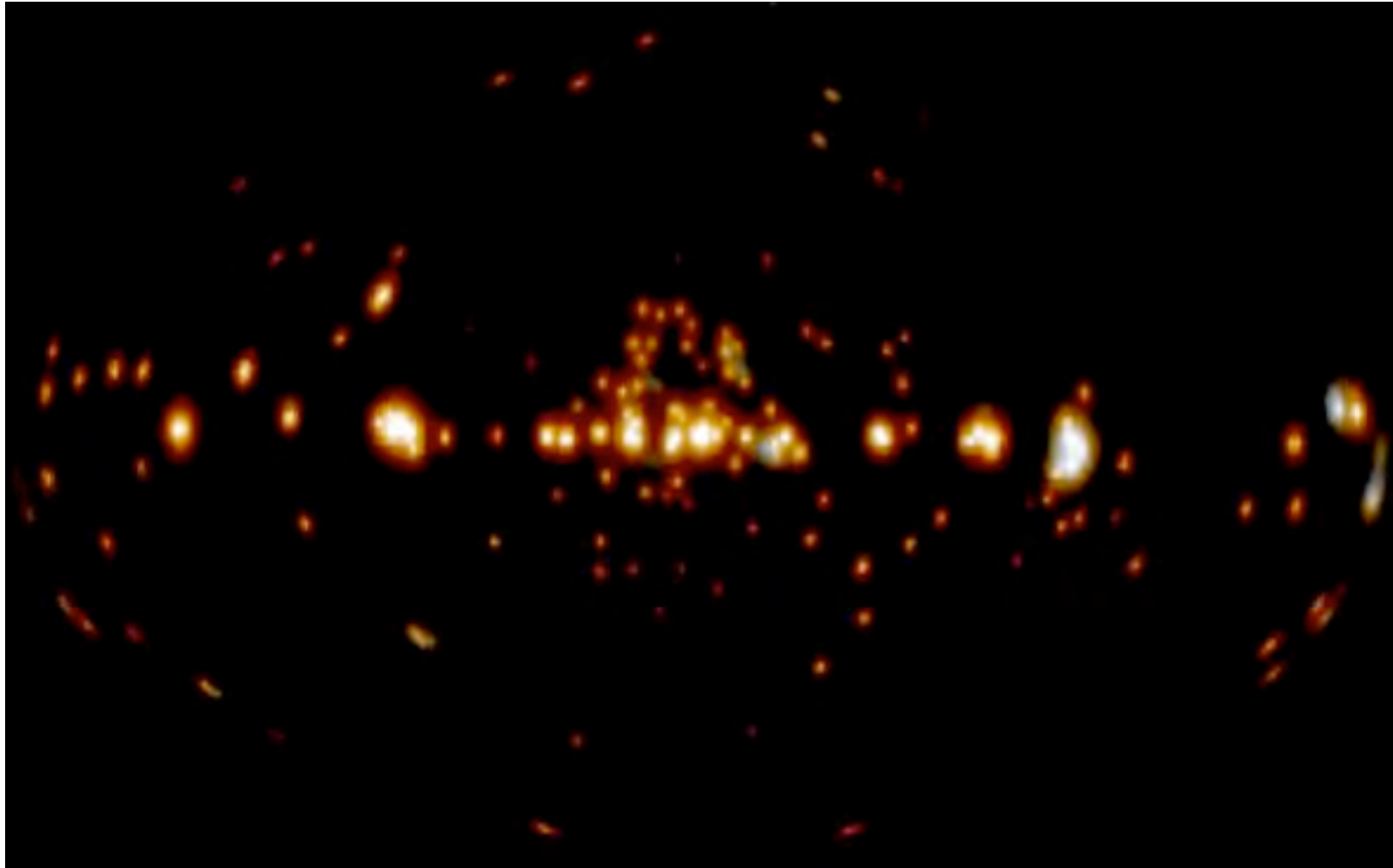
# La Galaxie en rayons gamma

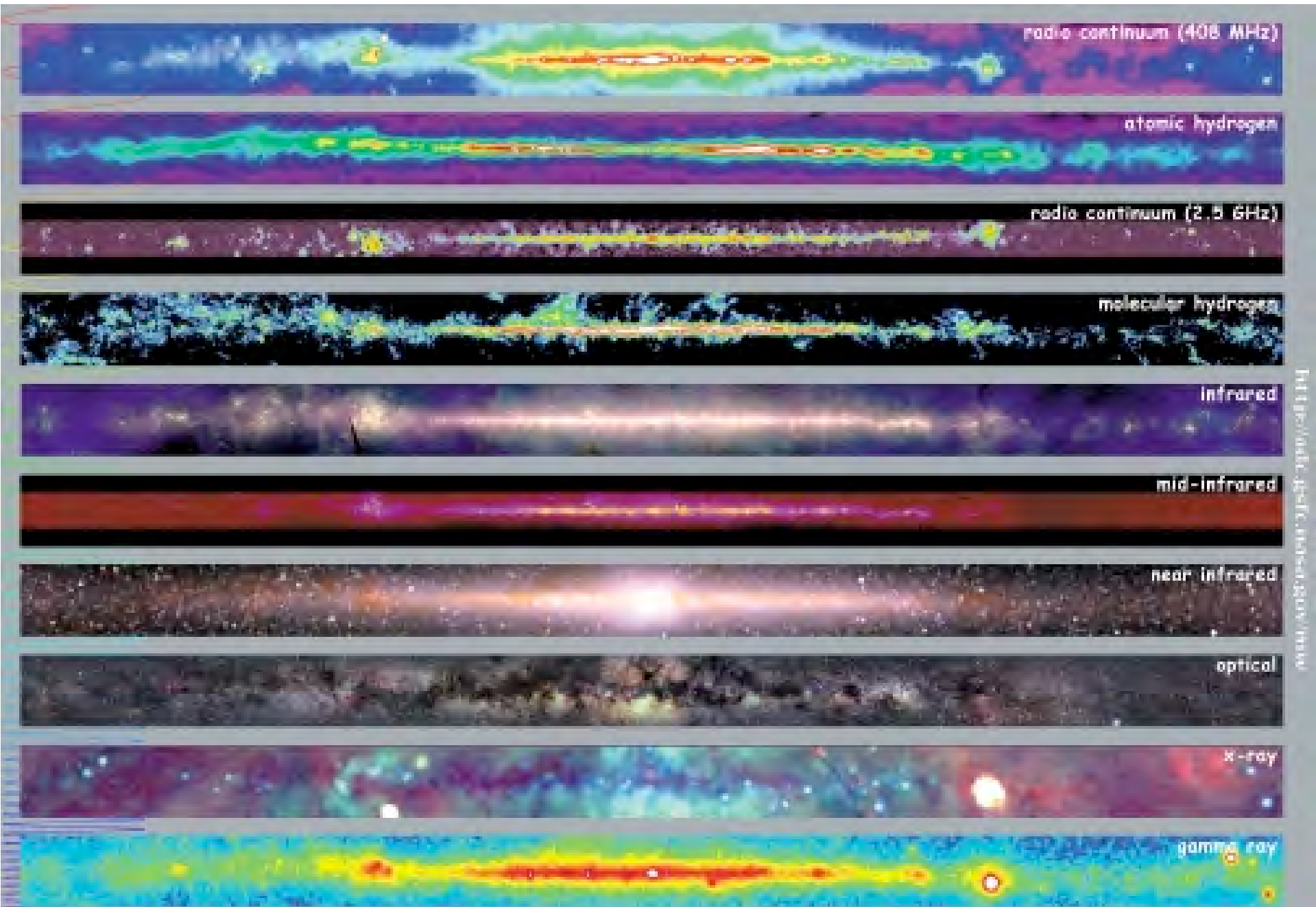
EGRET ( $> 100$  MeV)



# La Galaxie en rayons gamma

sources EGRET





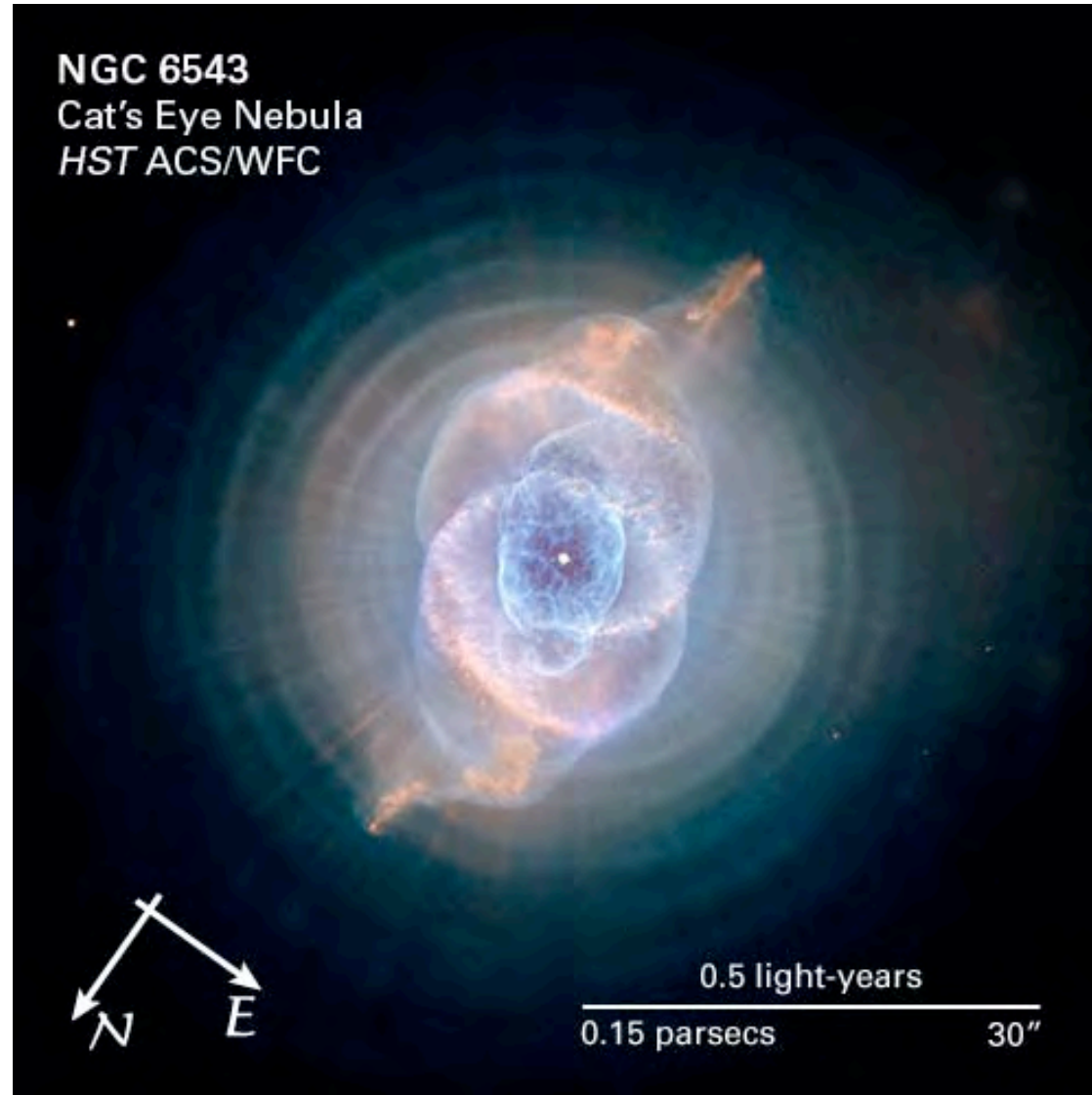
<http://hubble.nasa.gov/milkyway>



# Multiwavelength Milky Way

# Nébuleuse de l'œil de chat

« nébuleuse planétaire » (éjections d'une étoile de type solaire en fin de vie)



L'« œil de chat » : "Nébuleuse planétaire" (HST)

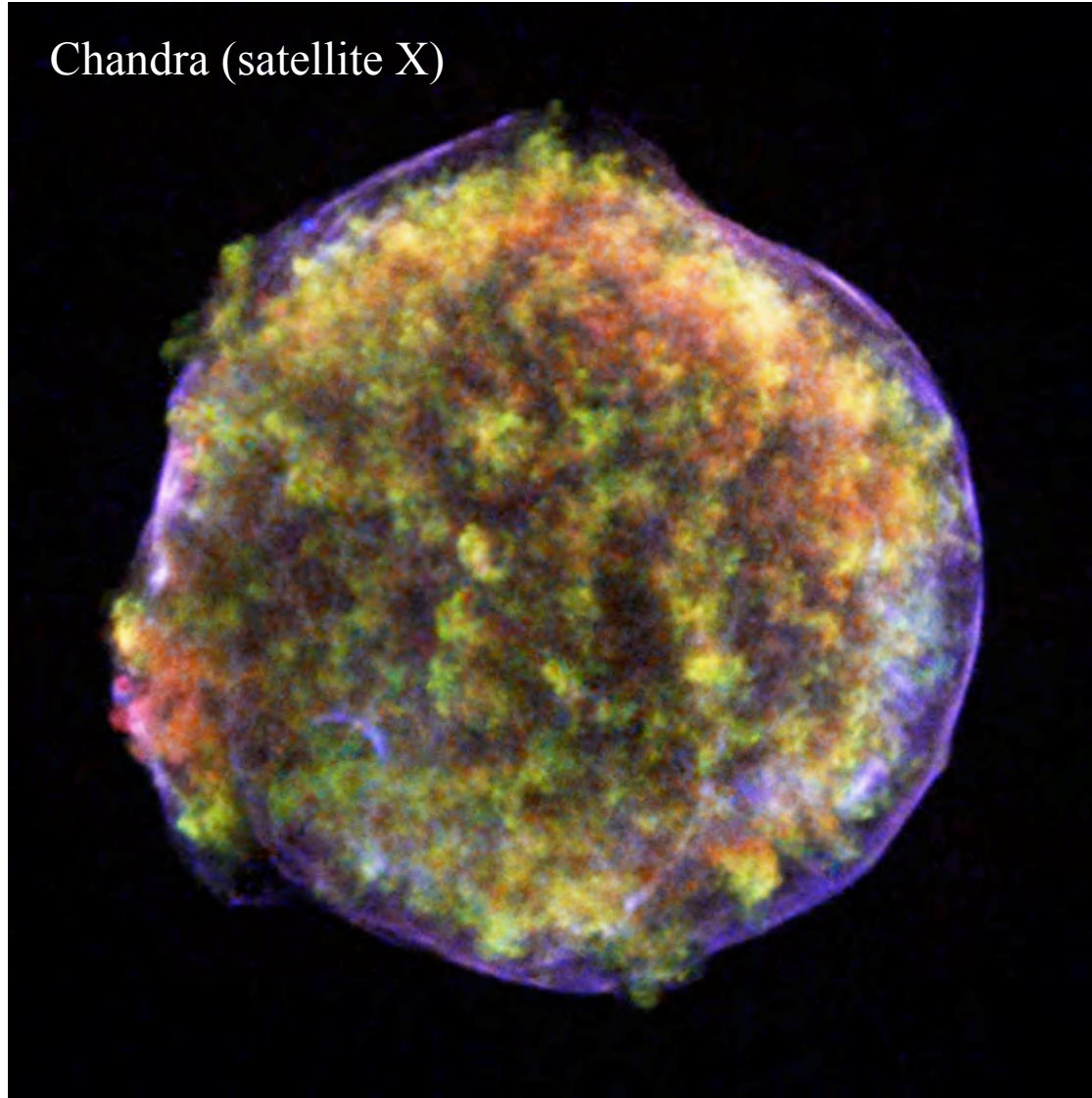


(~1000 ans)



## Vestige de supernova : Tycho (1572)

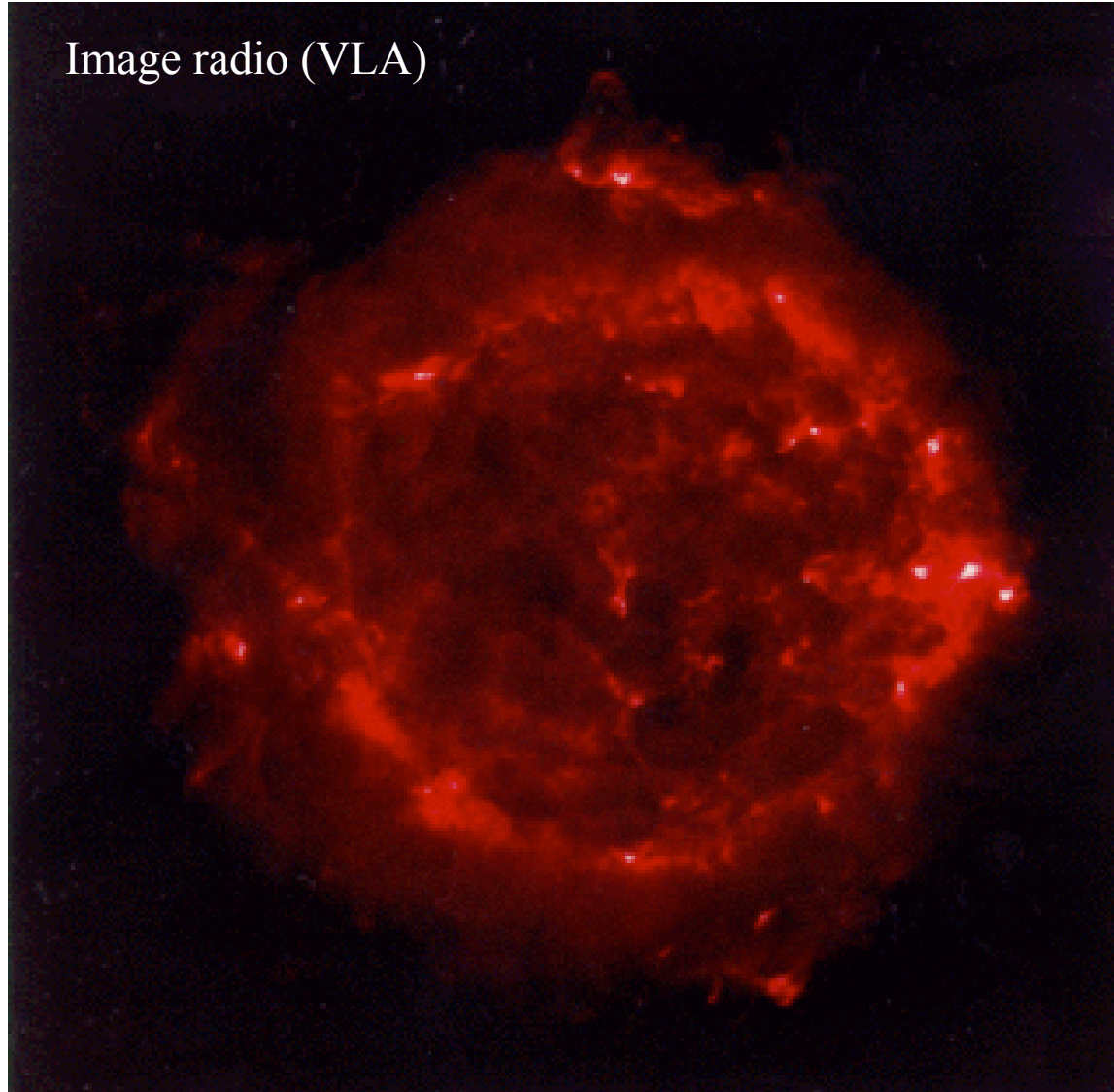
Chandra (satellite X)



Red 0.95-1.26 keV, Green 1.63-2.26 keV, Blue 4.1-6.1 keV

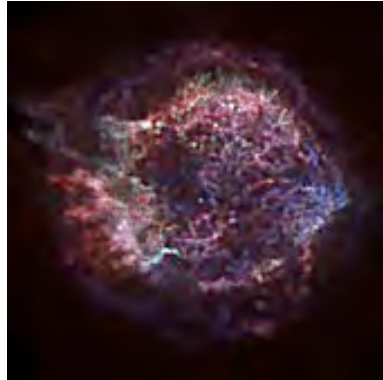
## Vestige de supernova : Cas A ( $\sim 300$ ans)

Image radio (VLA)

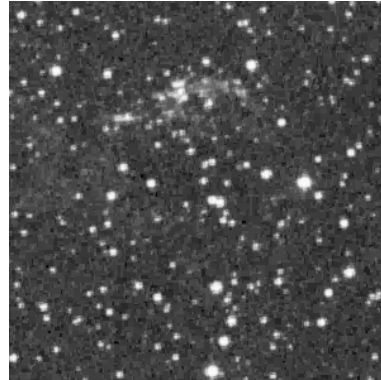




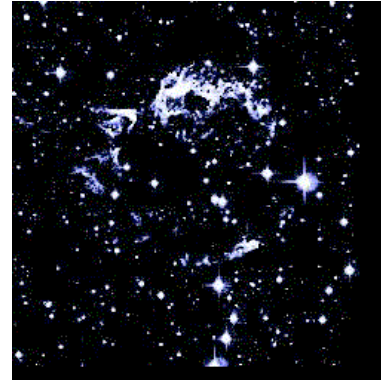
## Vestige de supernova : Cas A (~300 ans)



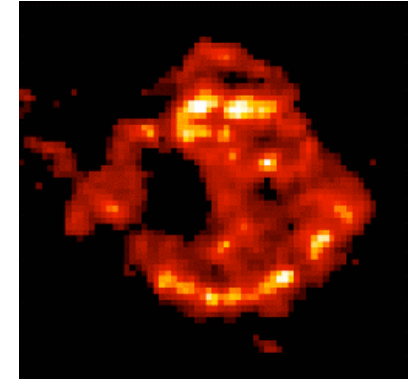
X (Chandra)



visible (DSS)



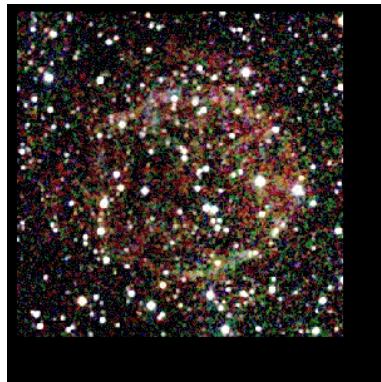
visible (couleurs)



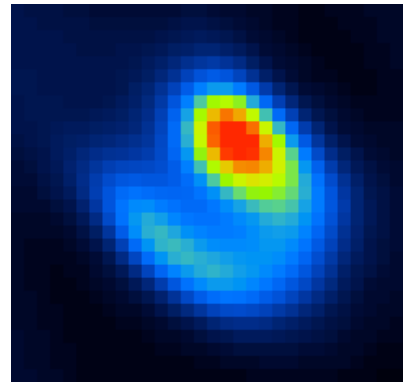
IR 10.7-12.0  $\mu\text{m}$  (ISO)



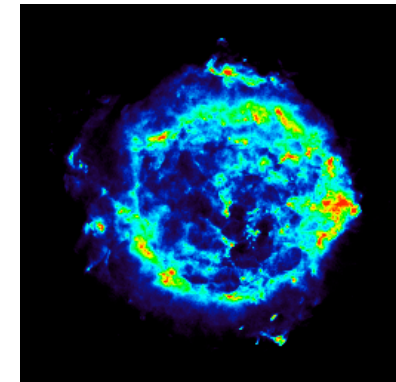
IR proche (2MASS)



IR moyen (Spitzer)



IR lointain (IRAS)



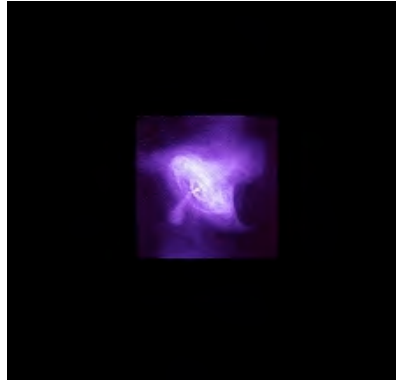
radio (VLA)

# La nébuleuse du Crabe

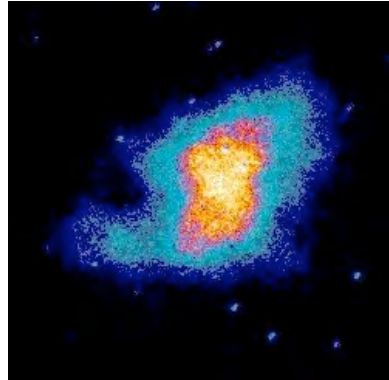
Image dans le visible (VLT, ESO)



# La nébuleuse du Crabe (Supernova en 1054)



X (Chandra)



UV (Astro-1)



visible (DSS)



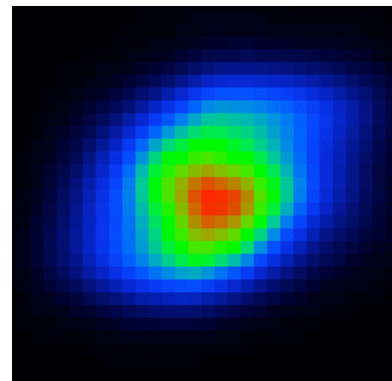
visible (VLT)



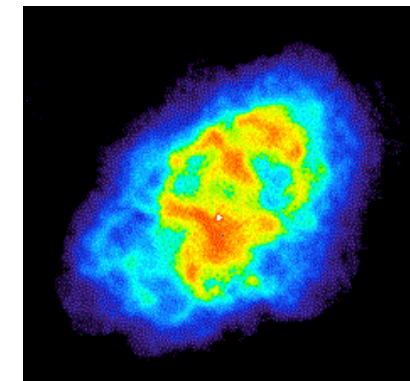
IR proche (2MASS)



IR moyen (Spitzer)



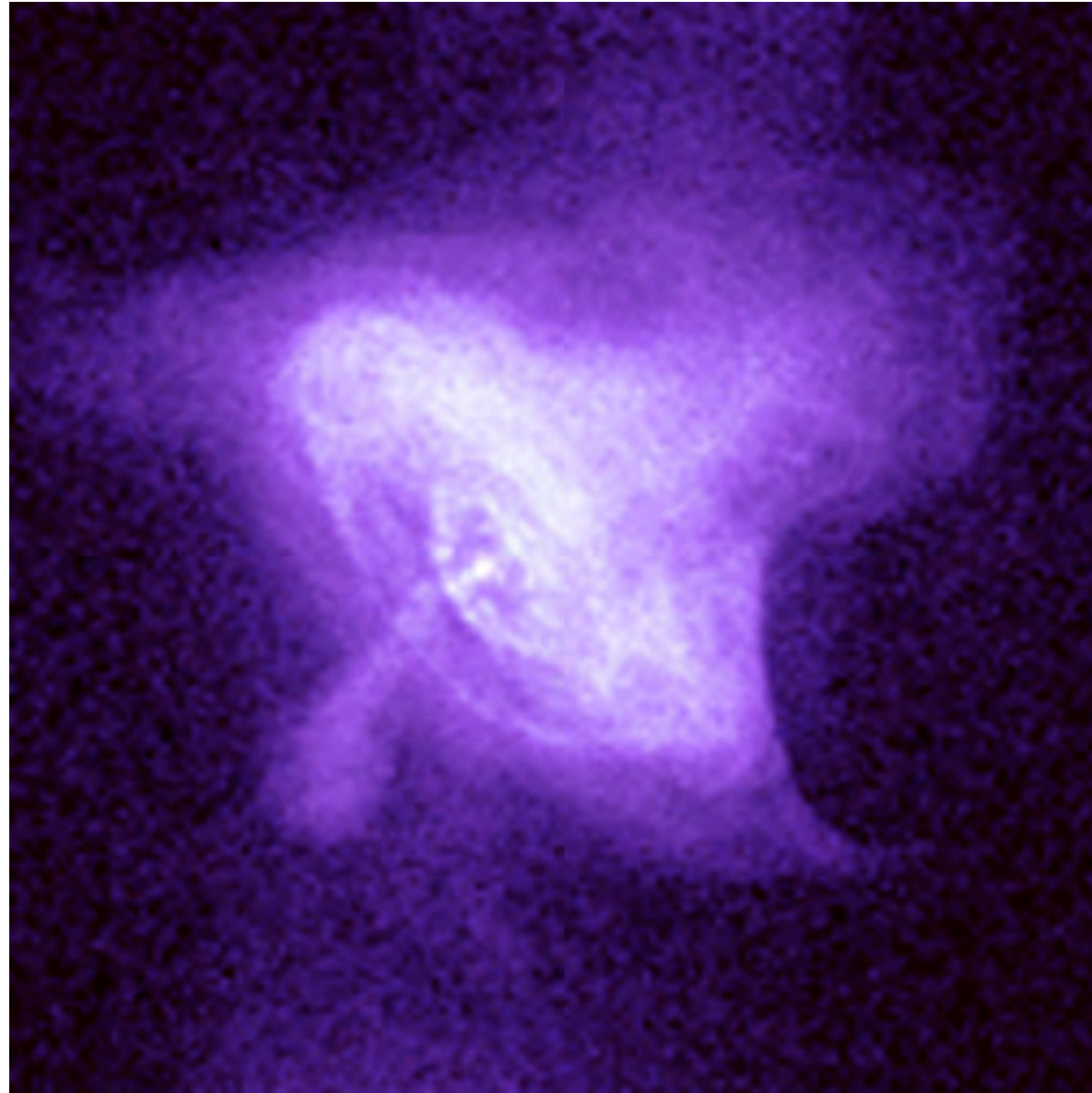
IR lointain (IRAS)



radio (VLA)

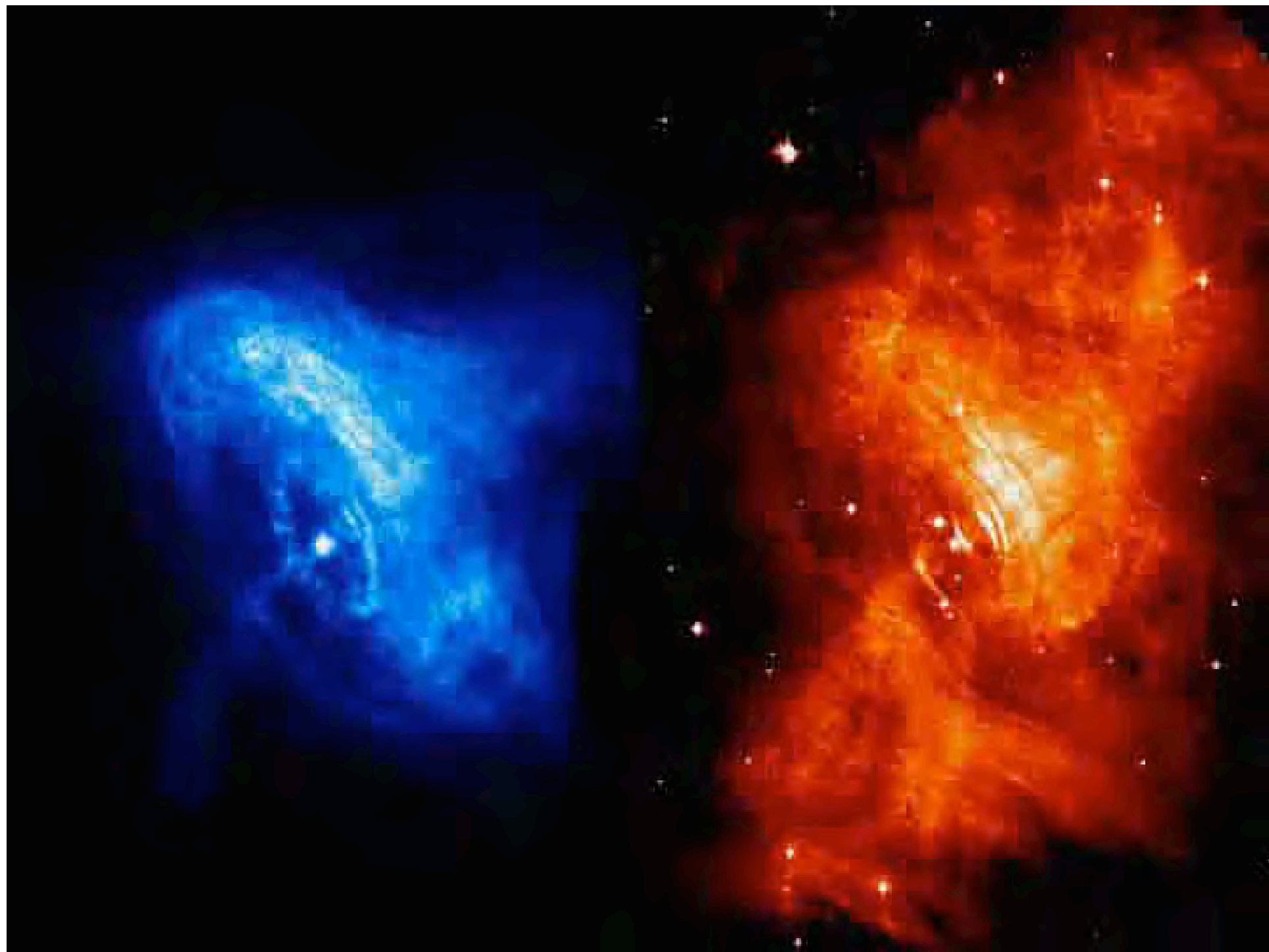


# La nébuleuse du Crabe (Chandra)



rayons X (Chandra)

# Hubble Space Telescope



# La nébuleuse du Crabe

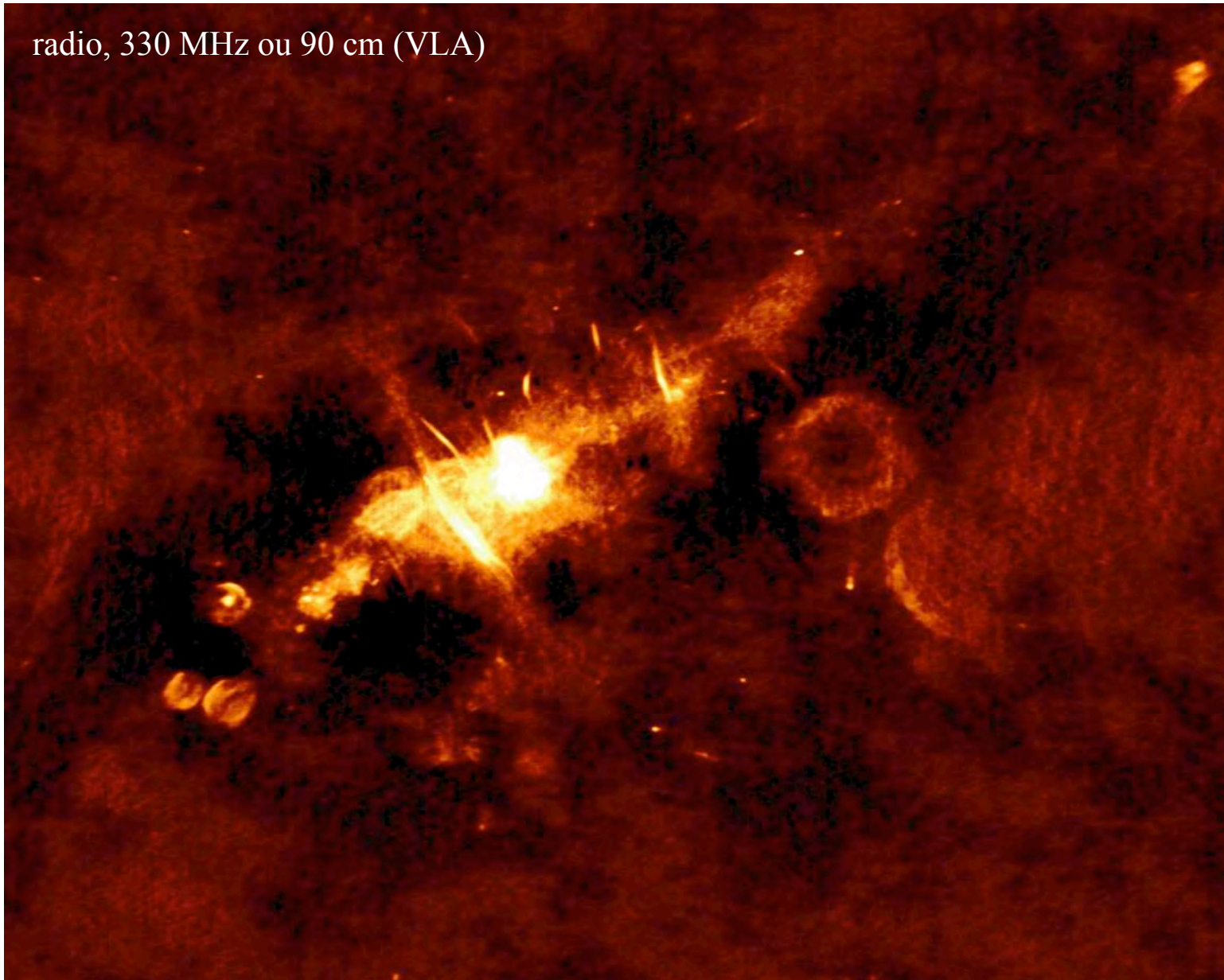
Image composite



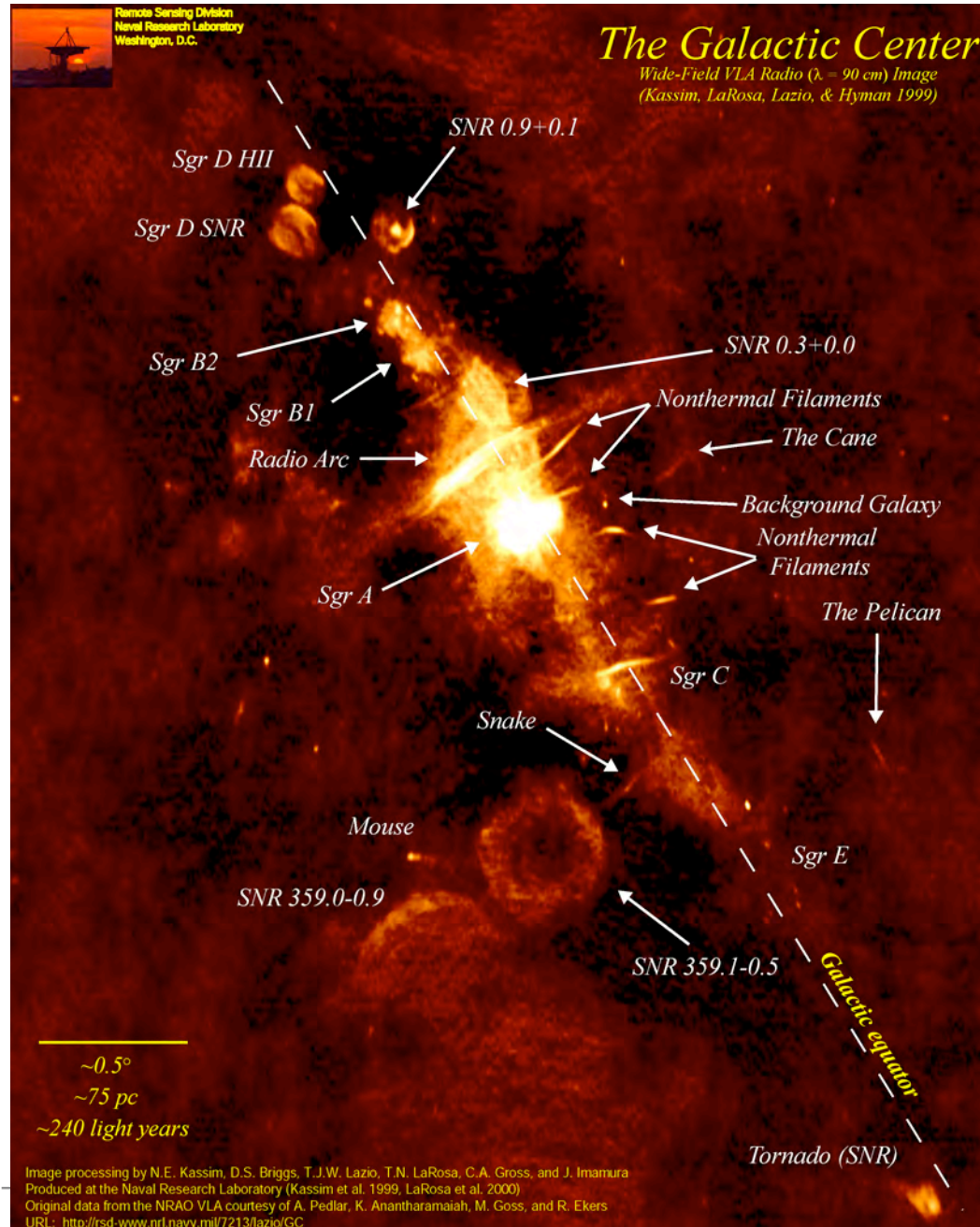


## Région du centre Galactique ( $4^\circ \times 4^\circ$ )

radio, 330 MHz ou 90 cm (VLA)

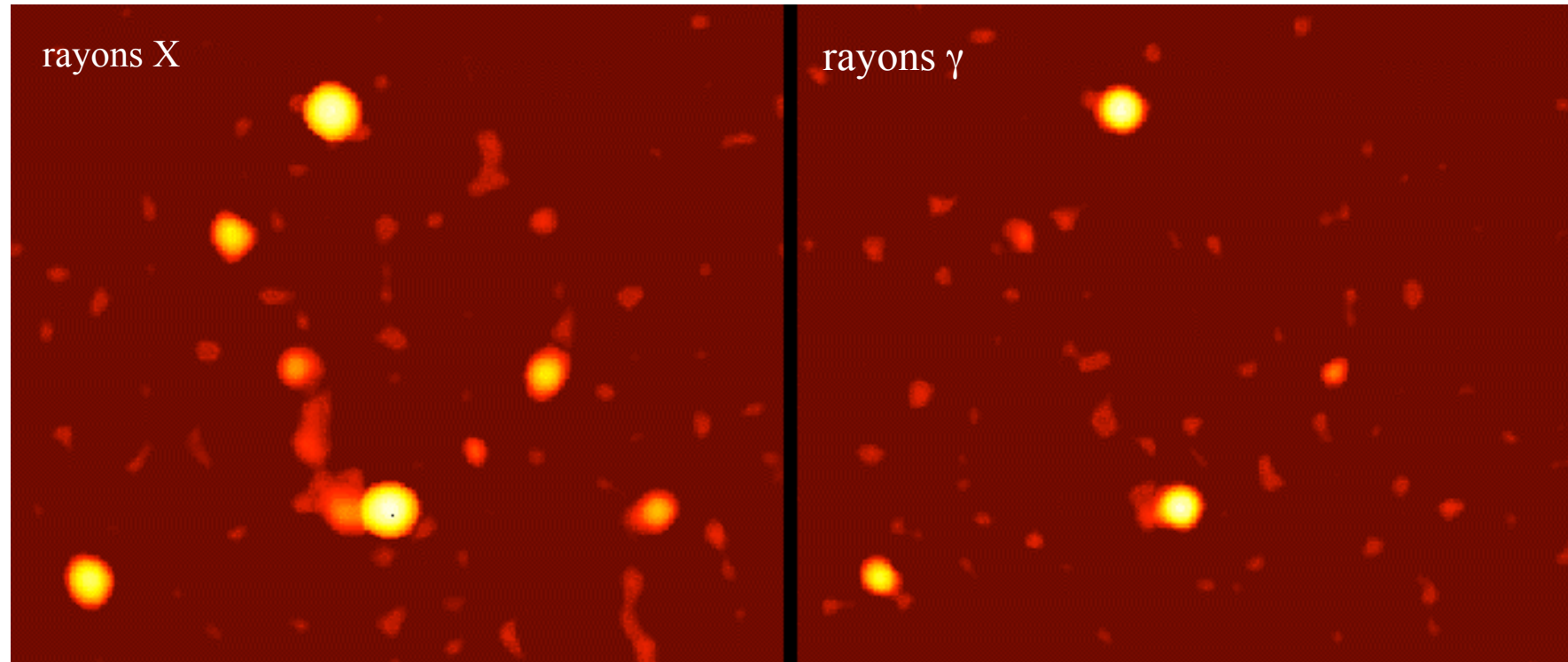


# Région du centre Galactique en radio ( $4^\circ \times 4^\circ$ )



# Région du centre Galactique

Image SIGMA (3000 h, de 1990-1997)

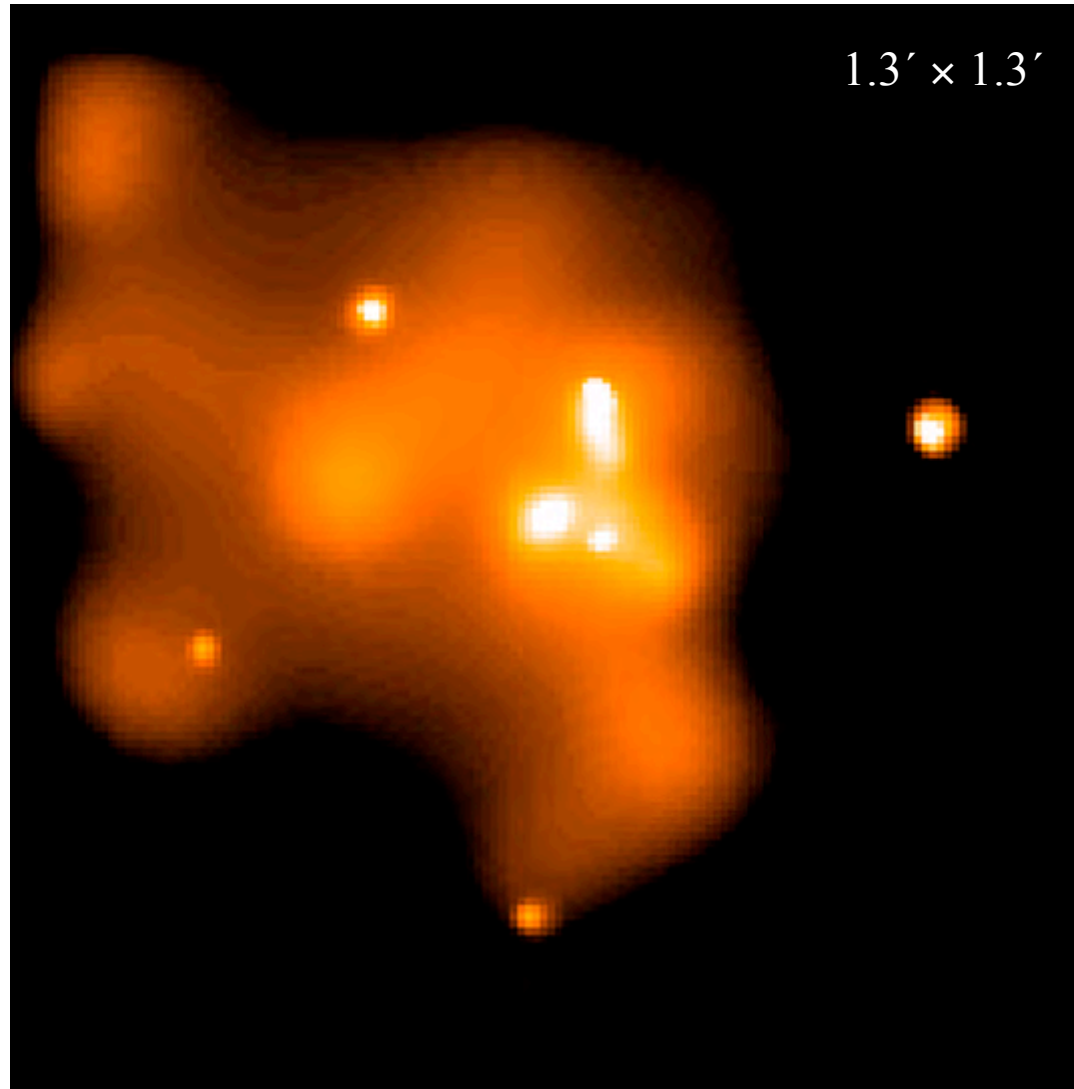


$14^\circ \times 14^\circ$

$14^\circ \times 14^\circ$

# Région du centre Galactique (Sgr A\*)

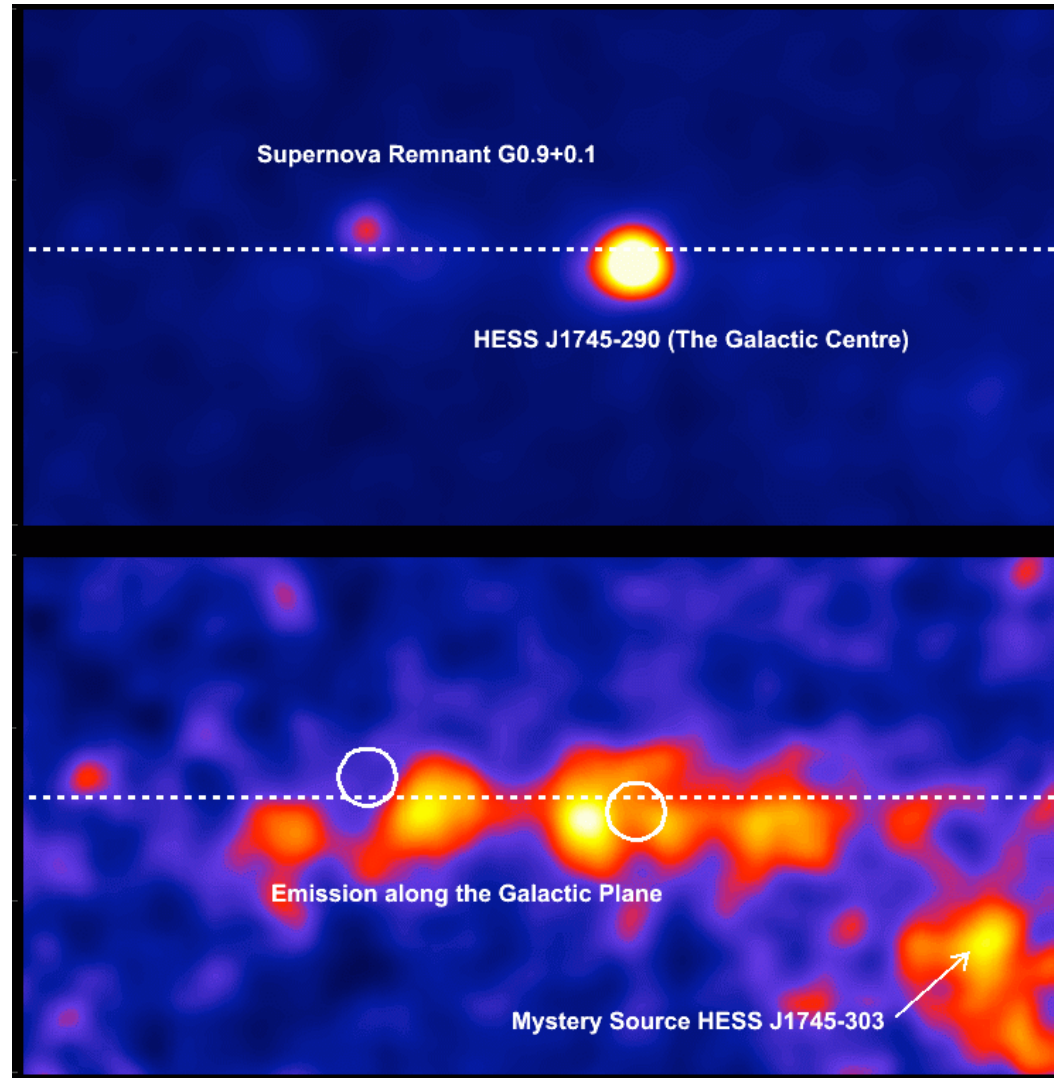
Image Chandra (rayons X)





# Région du centre Galactique "au TeV"

Images HESS



(après  
soustraction  
des 2 sources  
principales)

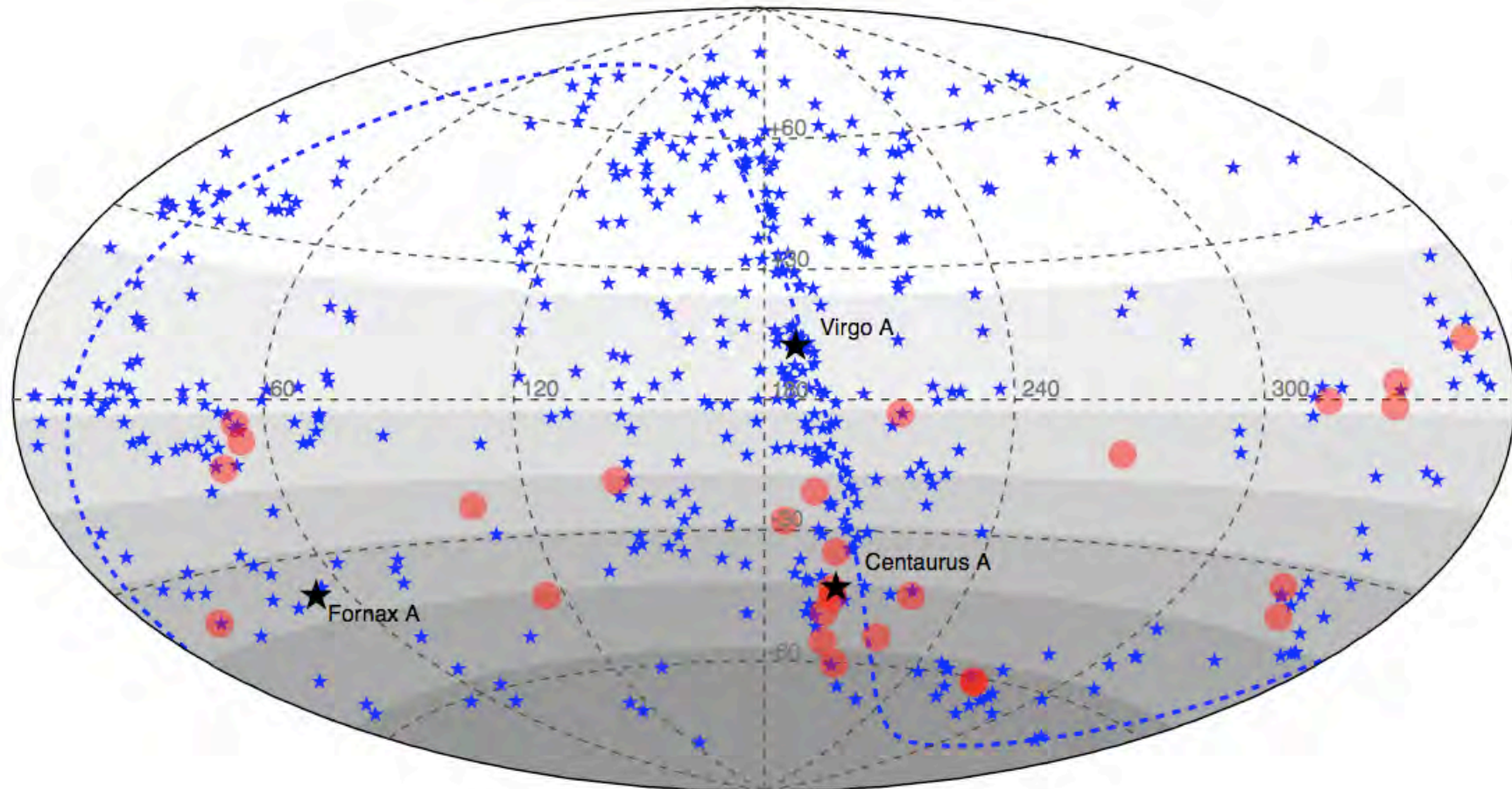
# Ciel observé par les rayons cosmiques...

Isotropie !



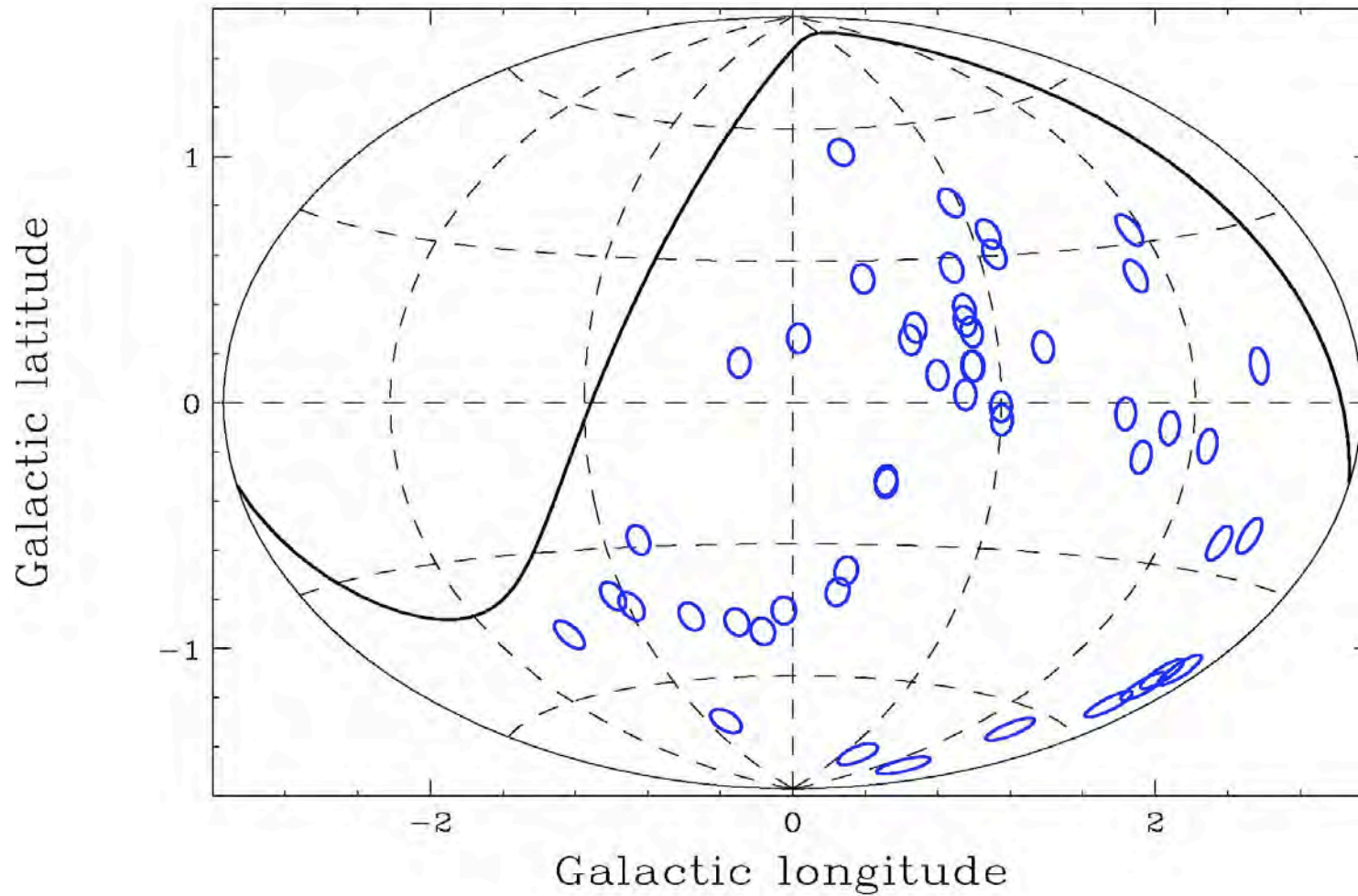
# Ciel observé par les rayons cosmiques...

Anisotropie à ultra-haute énergie !



# Ciel observé par les rayons cosmiques...

High Energy Sky (Observer  $E > 52$  EeV) 49 events to Aug 1, 2008



# Energy losses and nuclear interactions

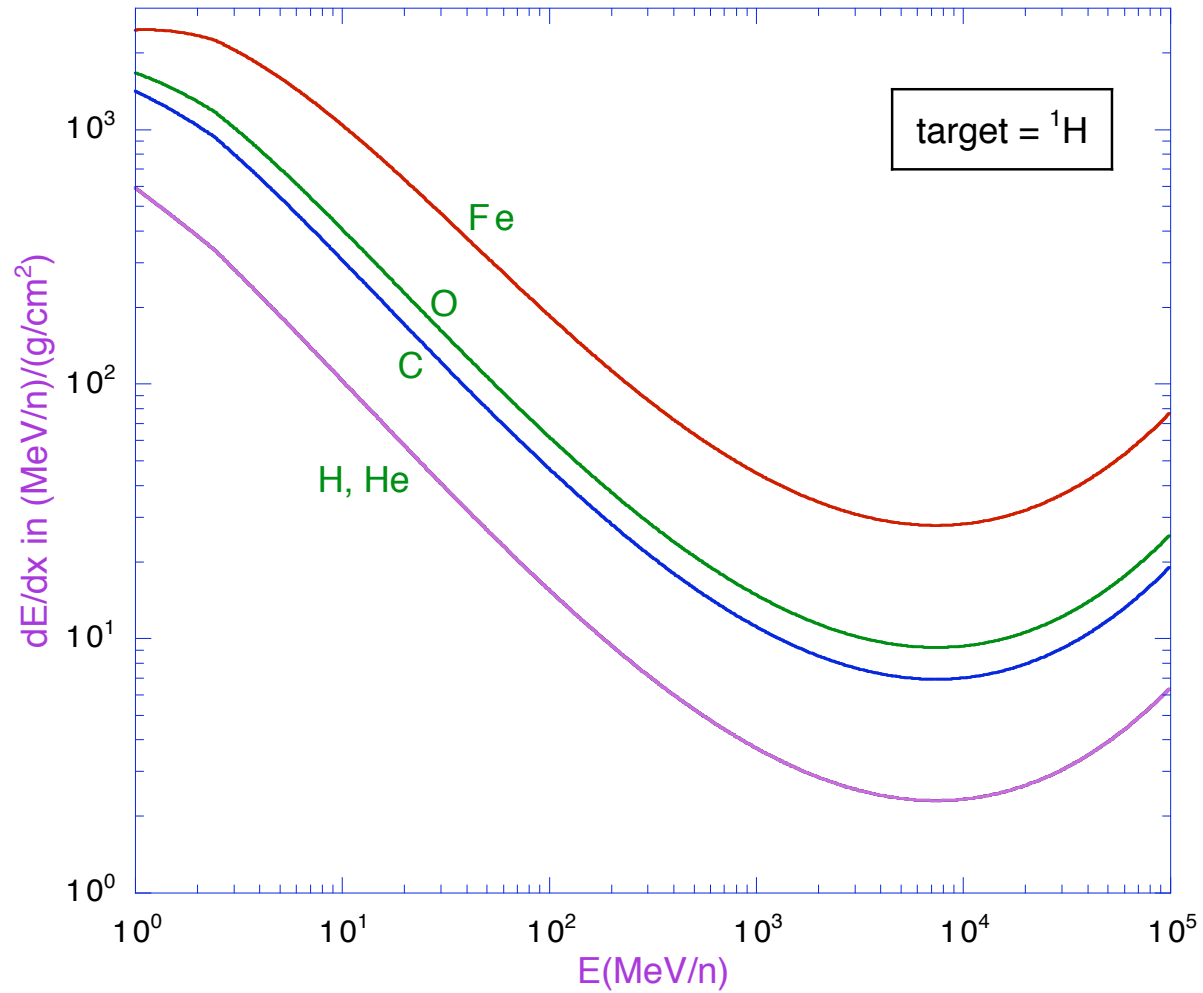
- CRs interact with the ambient medium: matter + radiation fields  
    ➔ energy losses + transmutation

At low-energy: GCR interactions with interstellar medium dominate

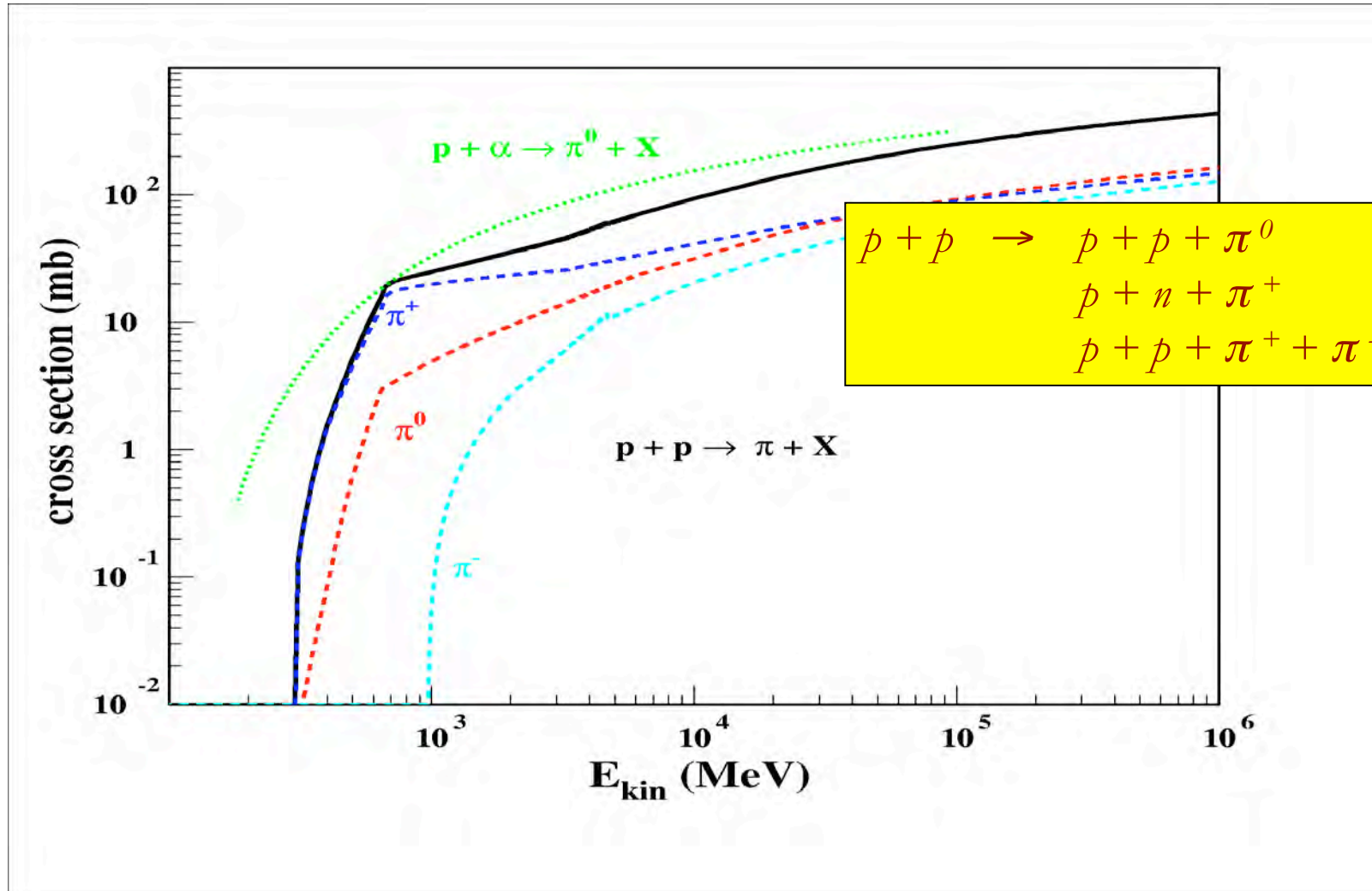
At high-energy: EGCR interactions with photon background dominate

- These interactions affect the cosmic rays themselves (both E spectrum and mass spectrum)
  - + produce secondary particles that can be observed!  
    photons                      light nuclei                      neutrinos
  - connections with X-ray and gamma ray astronomy,  
Galactic chemical evolution, multi-messenger astronomy...

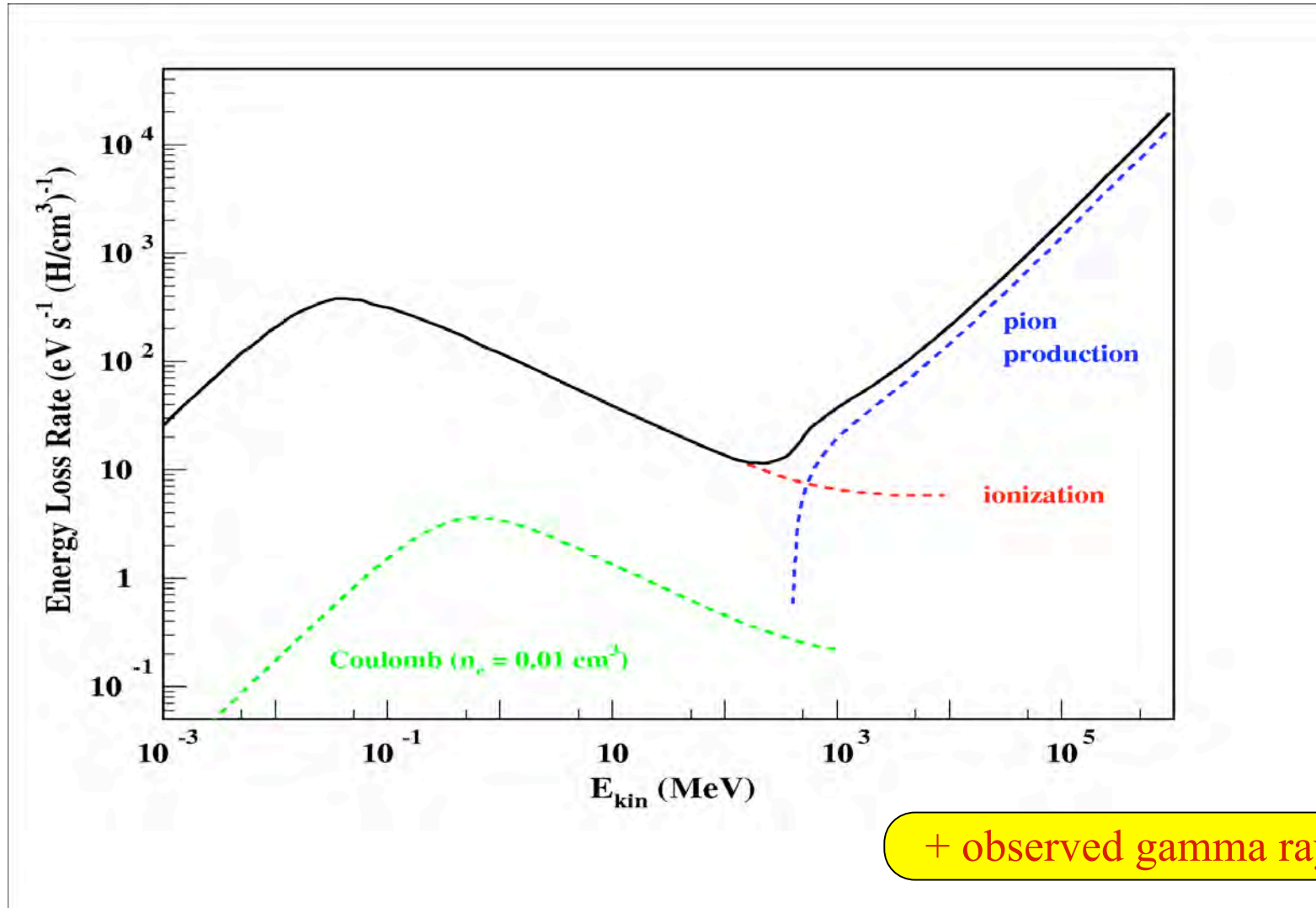
# GCR Coulombian energy losses



# Pion production in interstellar medium

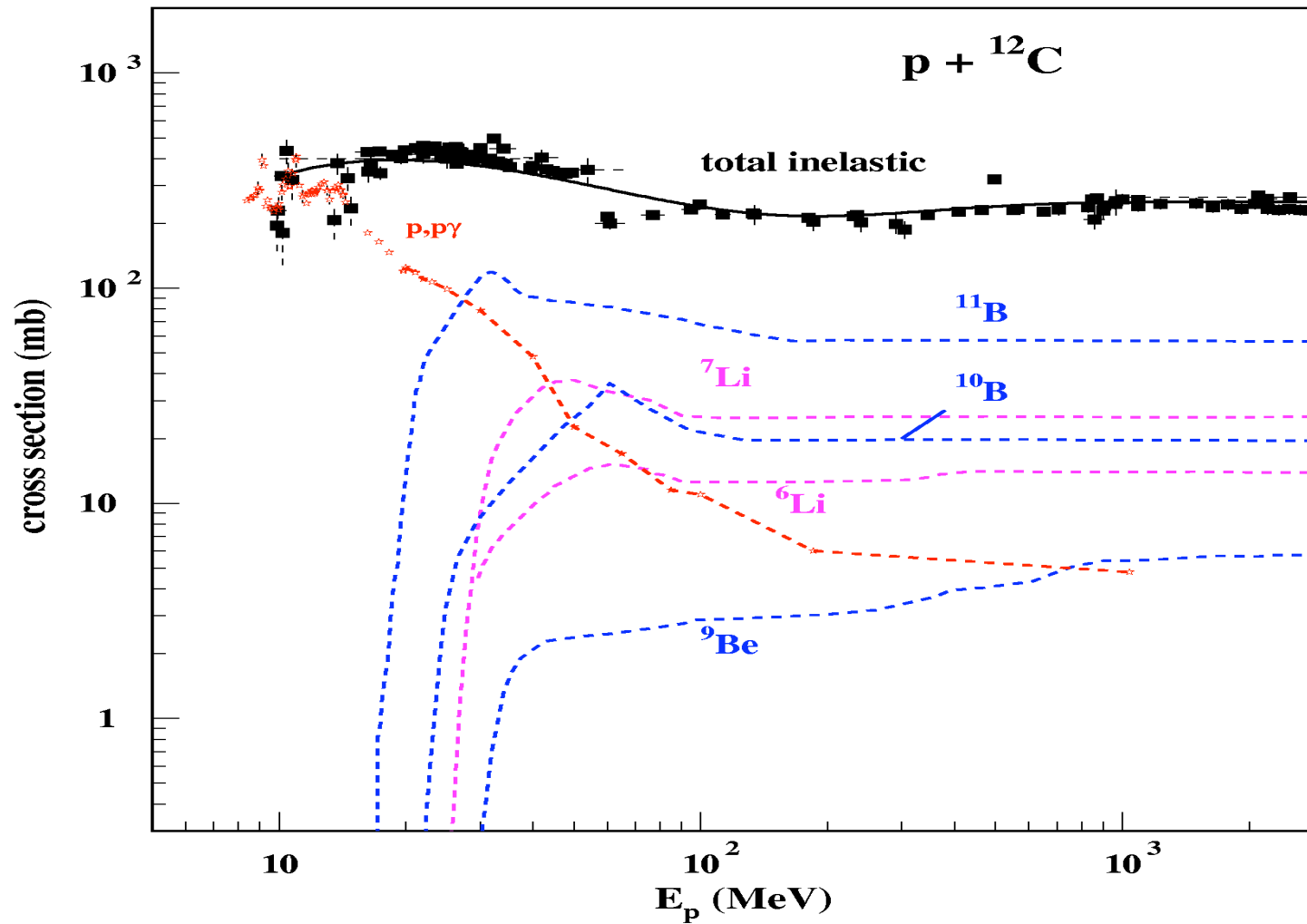


# GCR energy losses



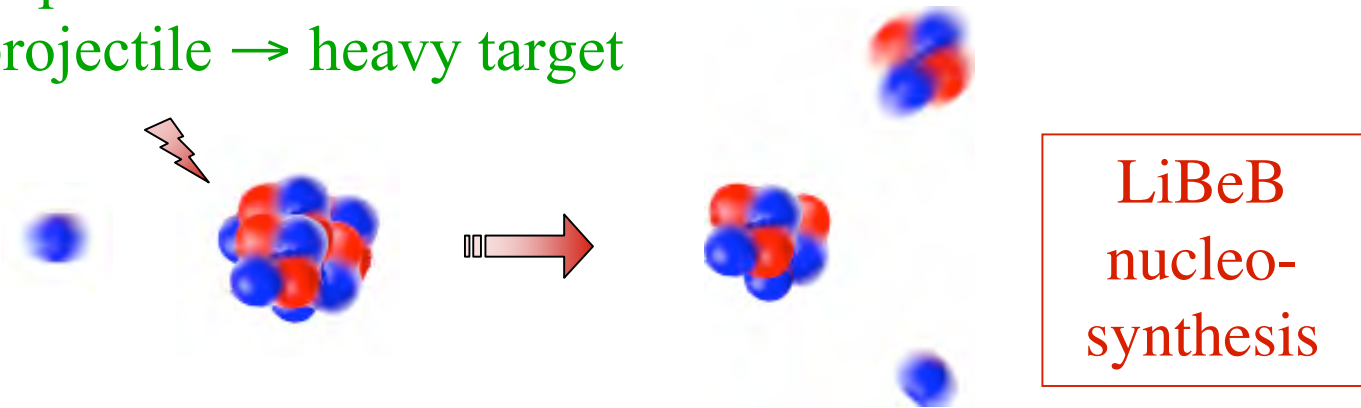


# Nuclear interactions in ISM

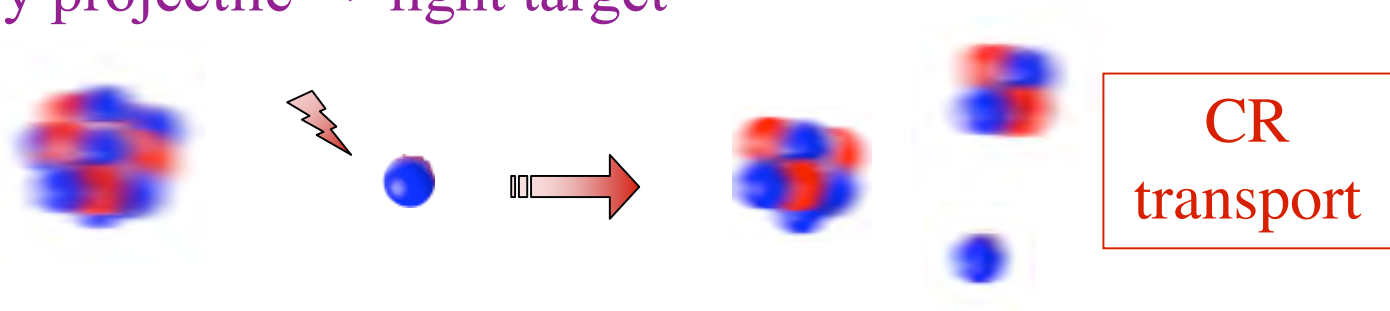


# CR-induced spallation

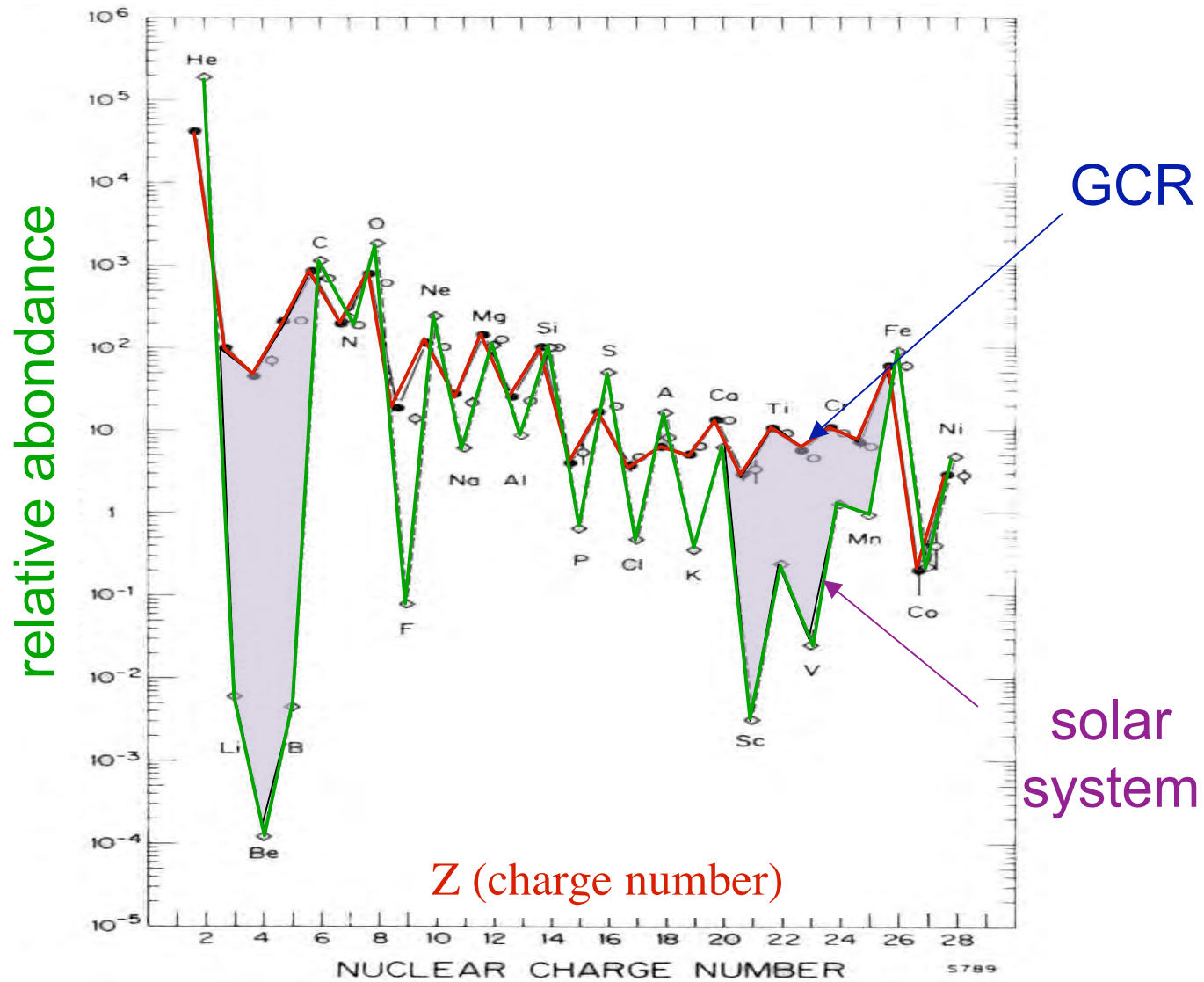
- Direct spallation:  
light projectile  $\rightarrow$  heavy target



- Inverse spallation:  
heavy projectile  $\rightarrow$  light target



# Composition: CR vs solar system

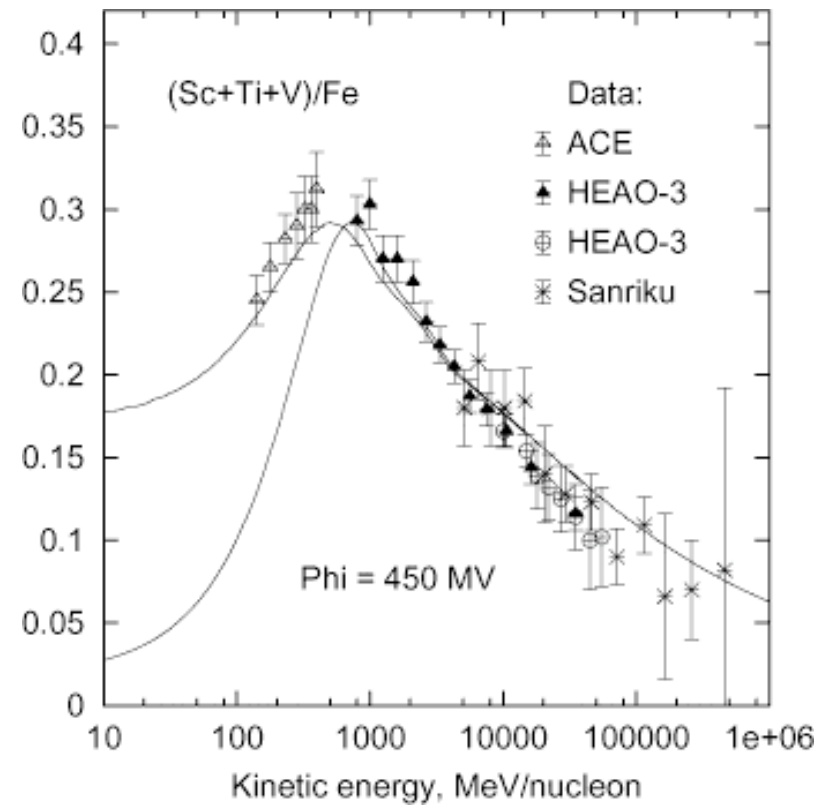
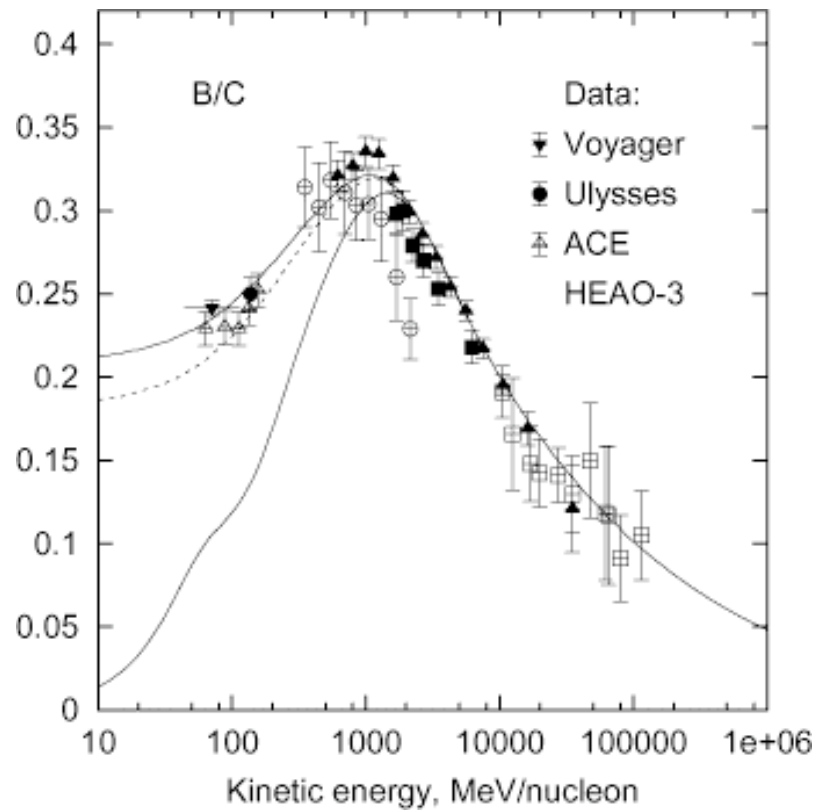


# Cosmic rays are not immutable!

- The composition of CRs records part of their history!
- Nuclear reactions in space: information about the matter gone through!
- In addition, secondary nuclei can be radioactive: cosmic-ray clocks!

# Secondary/primary ratios

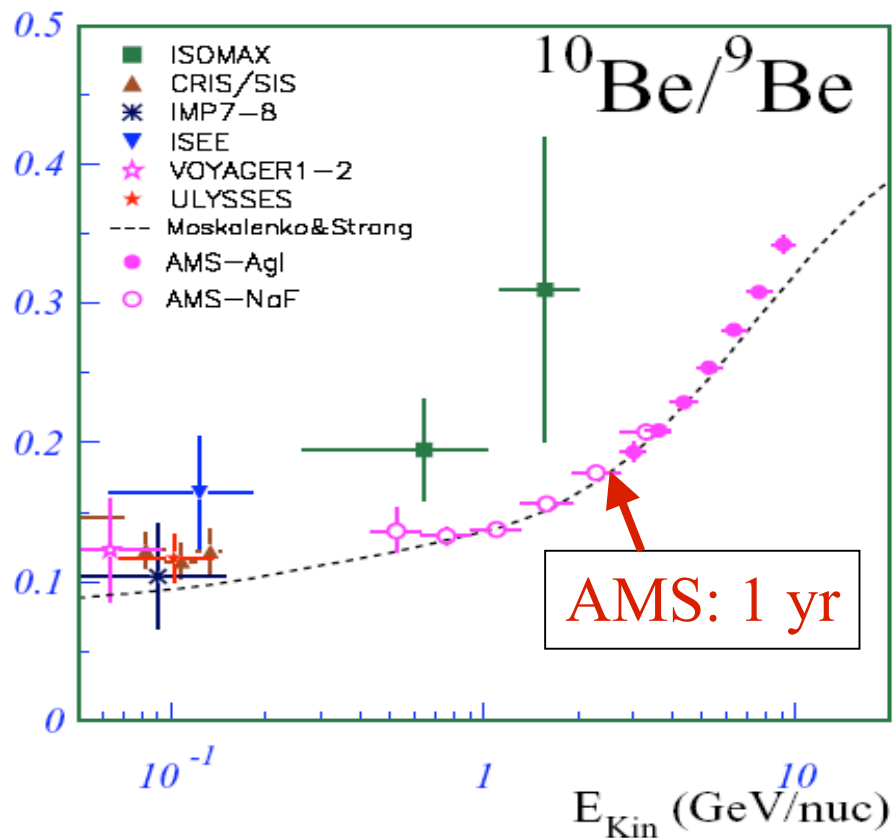
Strong & Moskalenko (2001)



- NB: use a complete CR transport model, including diffusion, re-acceleration, etc.

# Cosmic-ray clocks

- $^{12}\text{C} + \text{H} \rightarrow ^9\text{Be}$  (stable secondary nucleus)
- $^{12}\text{C} + \text{H} \rightarrow ^{10}\text{Be}$  (unstable secondary nucleus:  $\sim 4$  Myr)



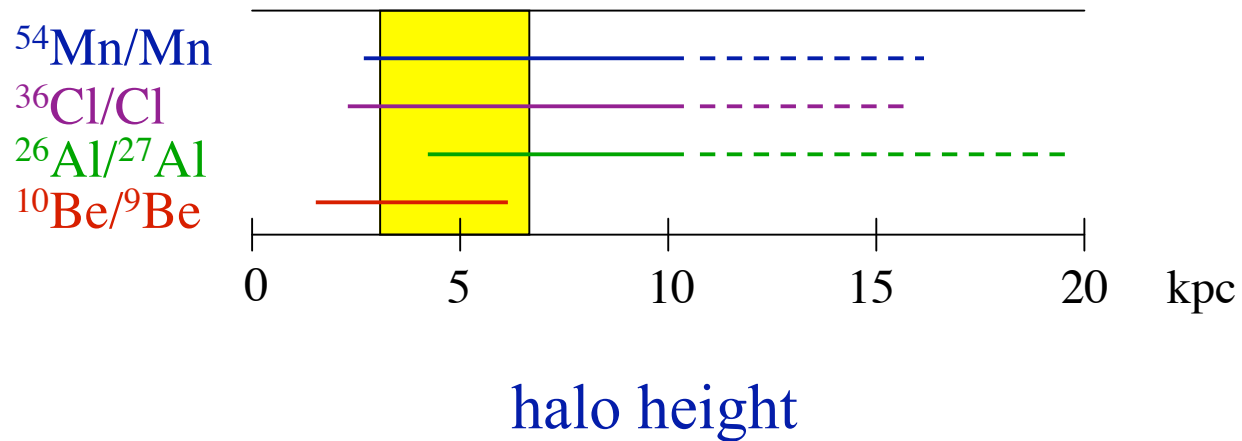
- The  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  ratio depends on the history of secondary nuclei production (on cross sections)
- Link between time and the quantity of matter gone through



# Some results

- Secondary/primary ratios  $\Rightarrow$  CRs have gone through a grammage of  $X_{\text{RC}} = 6\text{--}10 \text{ g/cm}^2$  on average, from their sources to the Earth
- Cosmic-ray clocks  $\Rightarrow$  CRs have spent typically  $t_{\text{RC}} \sim 2 \cdot 10^7$  years on their way
- Thus, they propagated in a medium of average density  $n = X_{\text{RC}}/ct_{\text{RC}} \sim 0.2 \text{ part. cm}^{-3}$
- Thus, they must have spent most of their time in the halo!

# Cosmic-ray clocks



# Cosmic-ray energetics

- 1.8 eV/cm<sup>3</sup> in (15 kpc × 15 kpc × 10 kpc),  
renewed every 2 × 10<sup>7</sup> years

$$\Rightarrow 2.8 \times 10^{41} \text{ erg/s}$$

- 1 SN of 10<sup>51</sup> erg every 30 years

$$\Rightarrow 10^{42} \text{ erg/s}$$

⇒ 25–30% of the SN power goes to cosmic-rays