



Introduction à l'astrophysique des particules

(Quelques notes et figures en marge du cours...)

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 !)



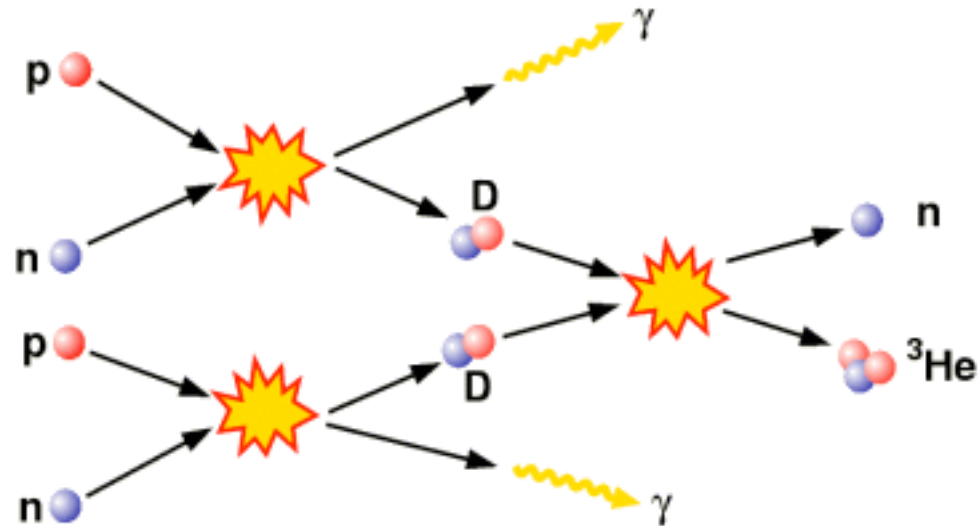
La nucléosynthèse primordiale

(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

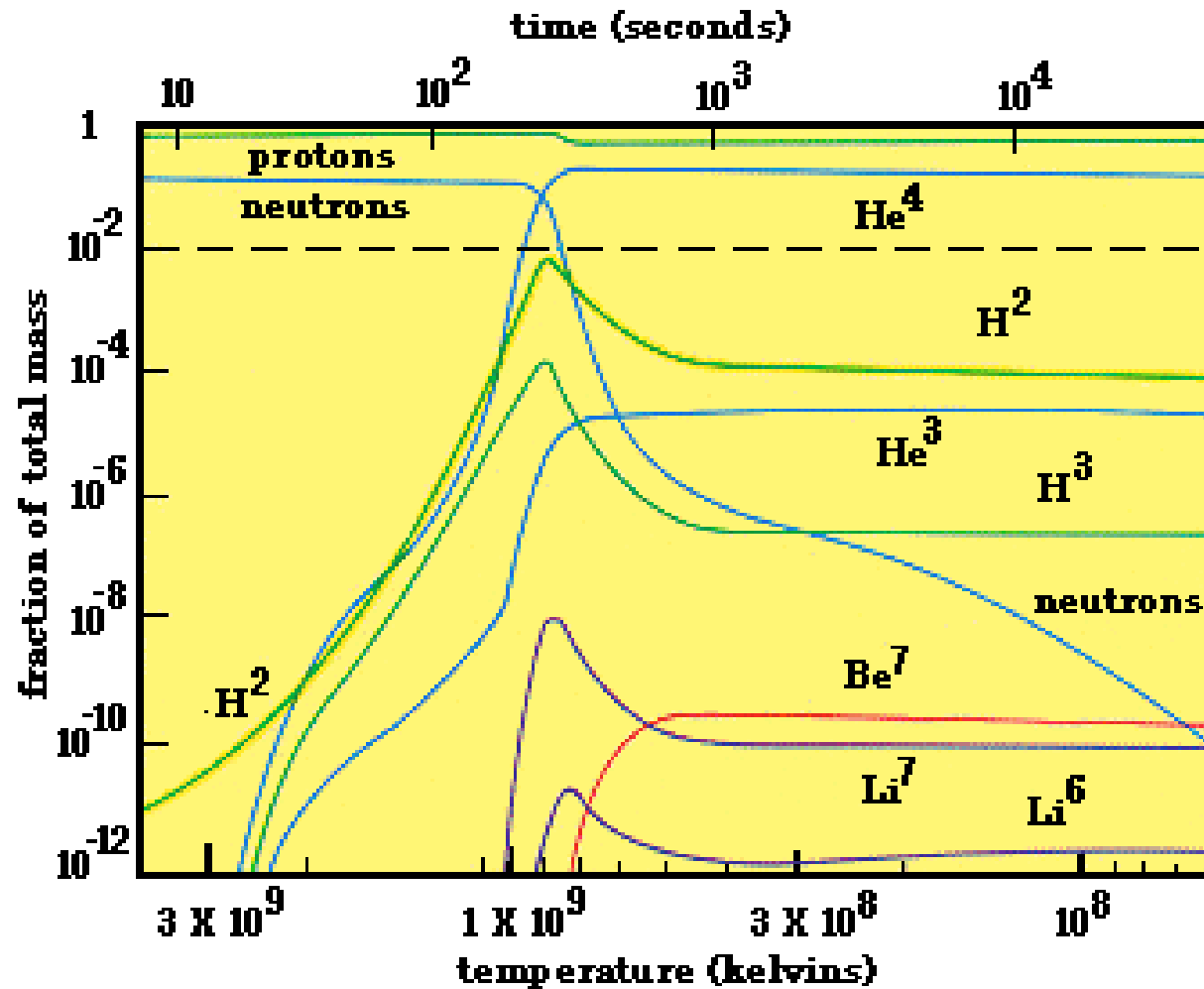
- Exemple de réactions, conduisant à ^3He ...



Évolution des abondances

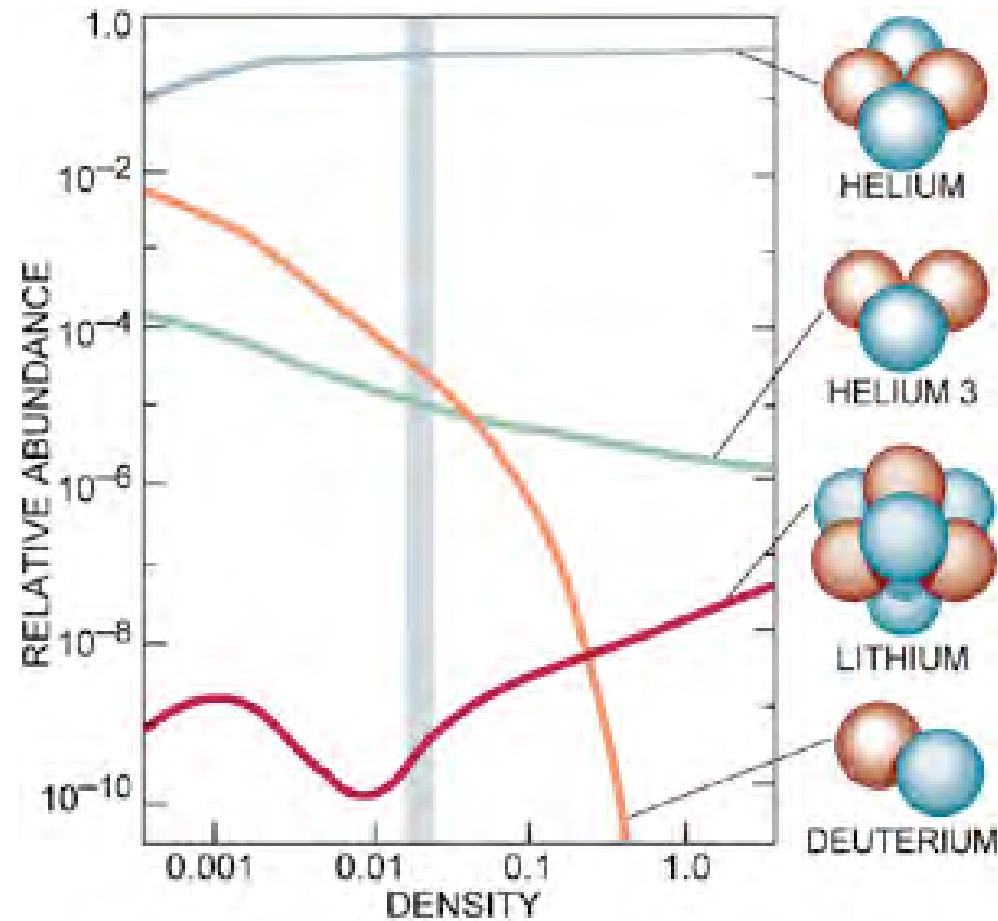
- Valeurs primordiales mesurées :

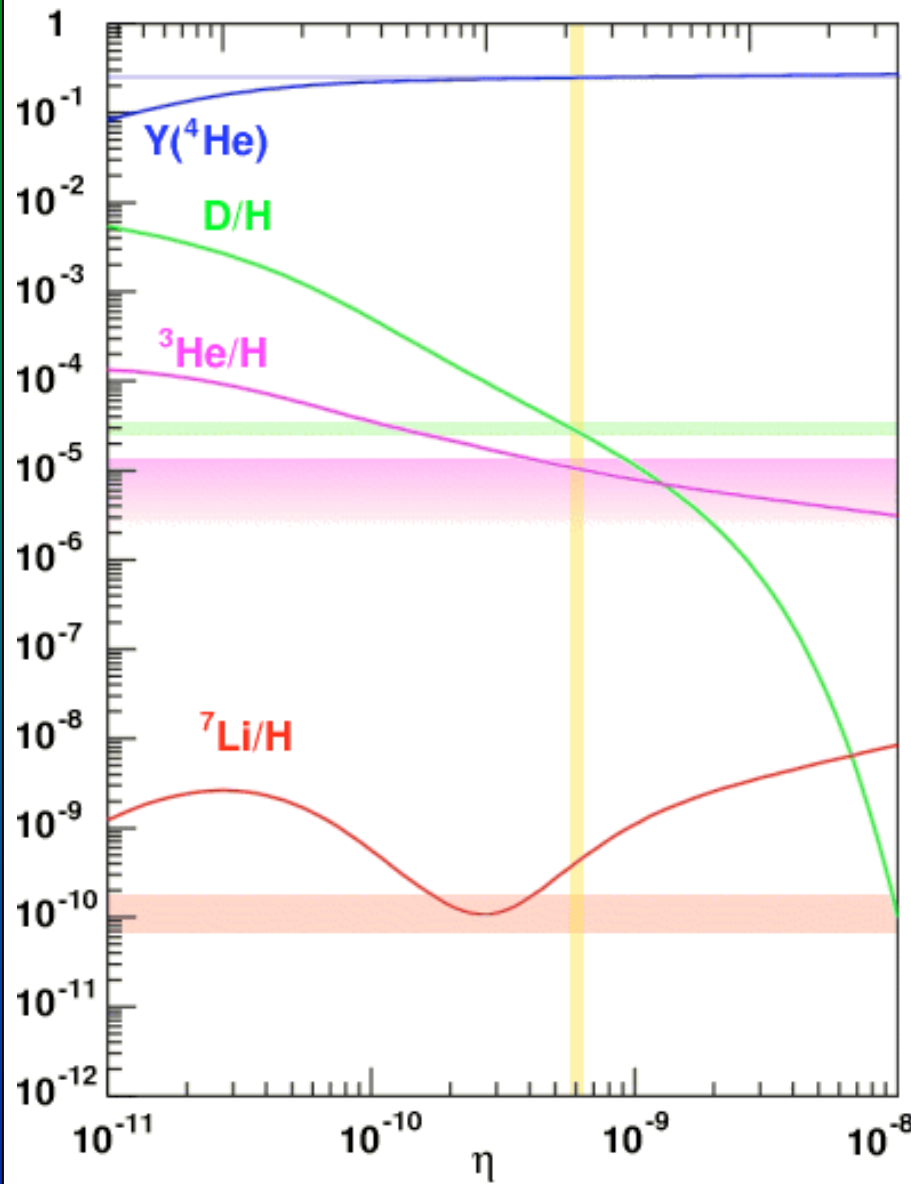
$$Y_{\text{He}} = 0.238 \pm 0.002 \pm 0.005 \quad D/H \sim (3.40 \pm 0.25) \times 10^{-5} \quad {}^7\text{Li}/H \sim 1\text{--}2 \times 10^{-10}$$



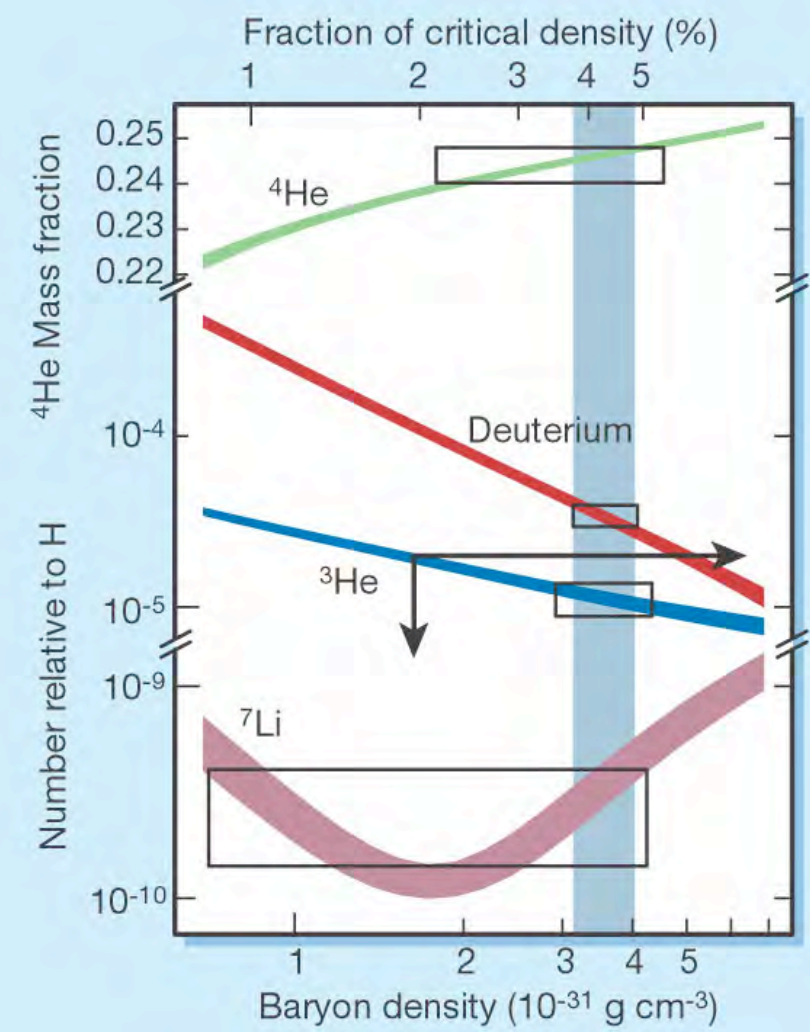
Nucléosynthèse primordiale

- Abondances en fonction de la densité baryonique





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



Nécessité de matière non baryonique !

BBN

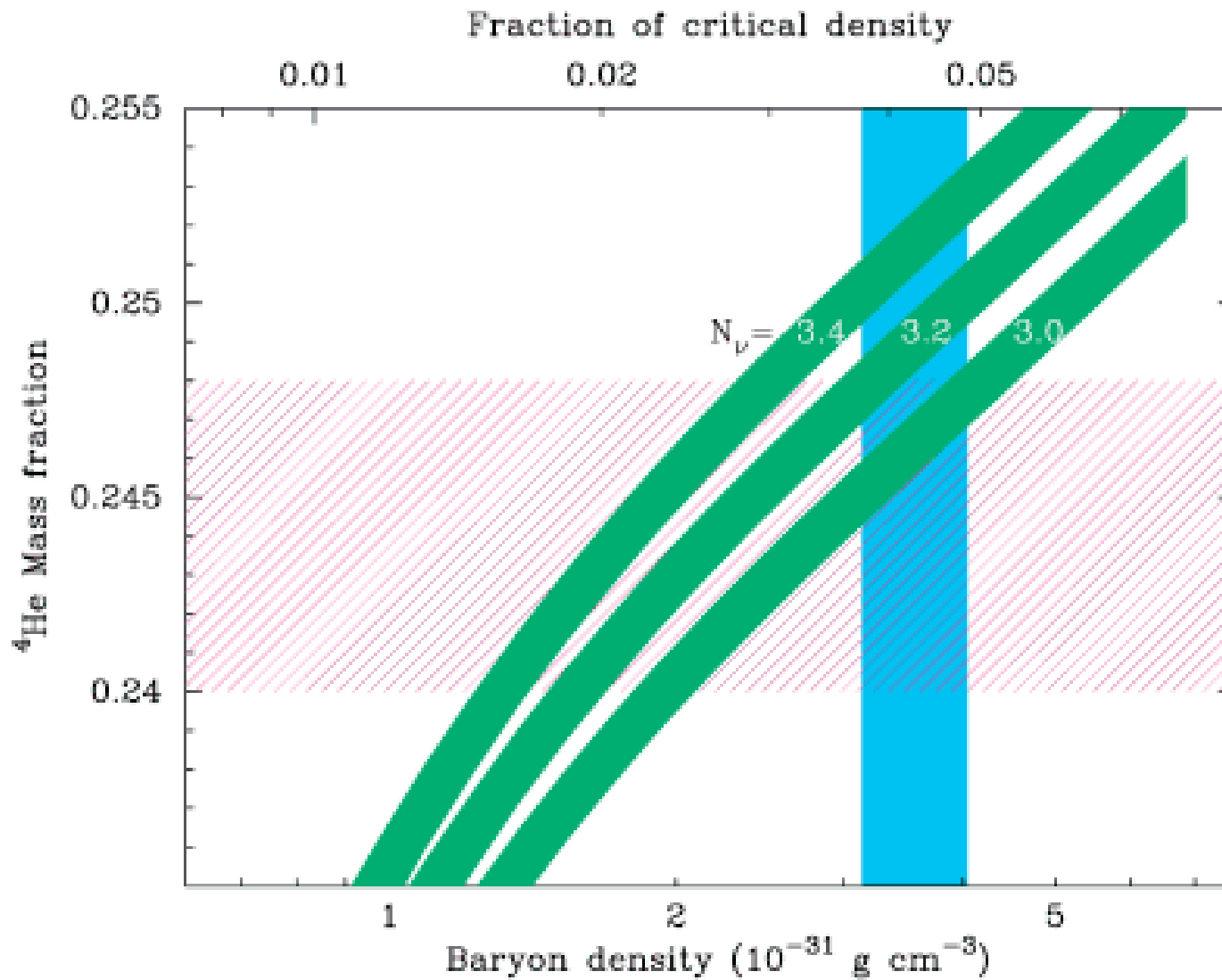
$$D/H = (3.40 \pm 0.25) \times 10^{-5} \quad \longrightarrow \quad \eta = (5.1 \pm 0.5) \times 10^{-10}$$

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

$$\underline{\Omega_b = 0.038 \pm 0.005}$$

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

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





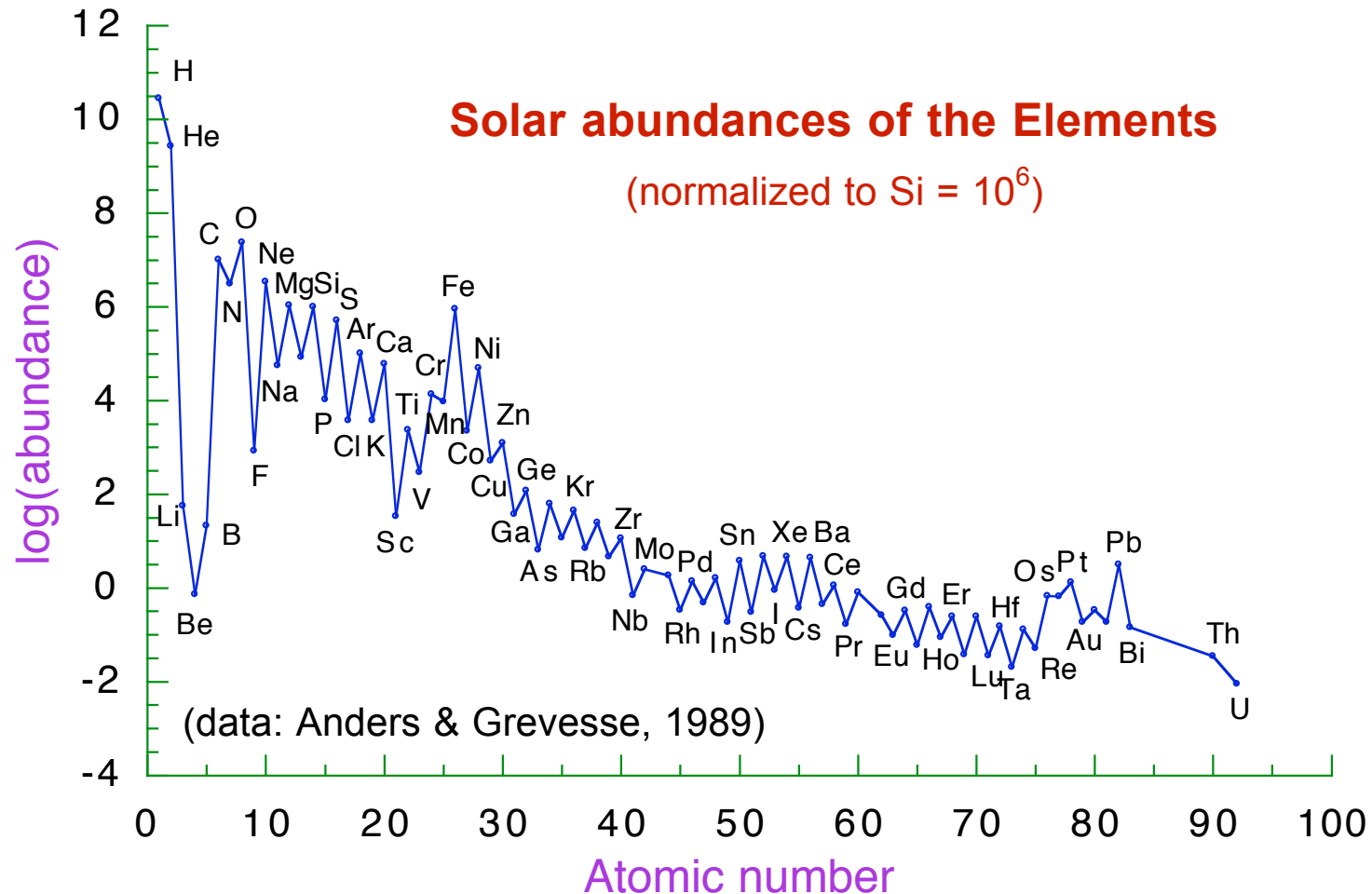
Nucléosynthèse stellaire et évolution chimique

Abondances atomiques

- Ag, Pt, Au...
 - Très rare (et très cher !)
- Mg, Al, Fe...
(métaux usuels)
 - Plus abondants
- H, C, N, O...
(éléments vitaux)
 - Très abondants!

Pourquoi ???
}
!!!

Abondances solaires



Pourquoi si peu de LiBeB... ou pourquoi autant ?!

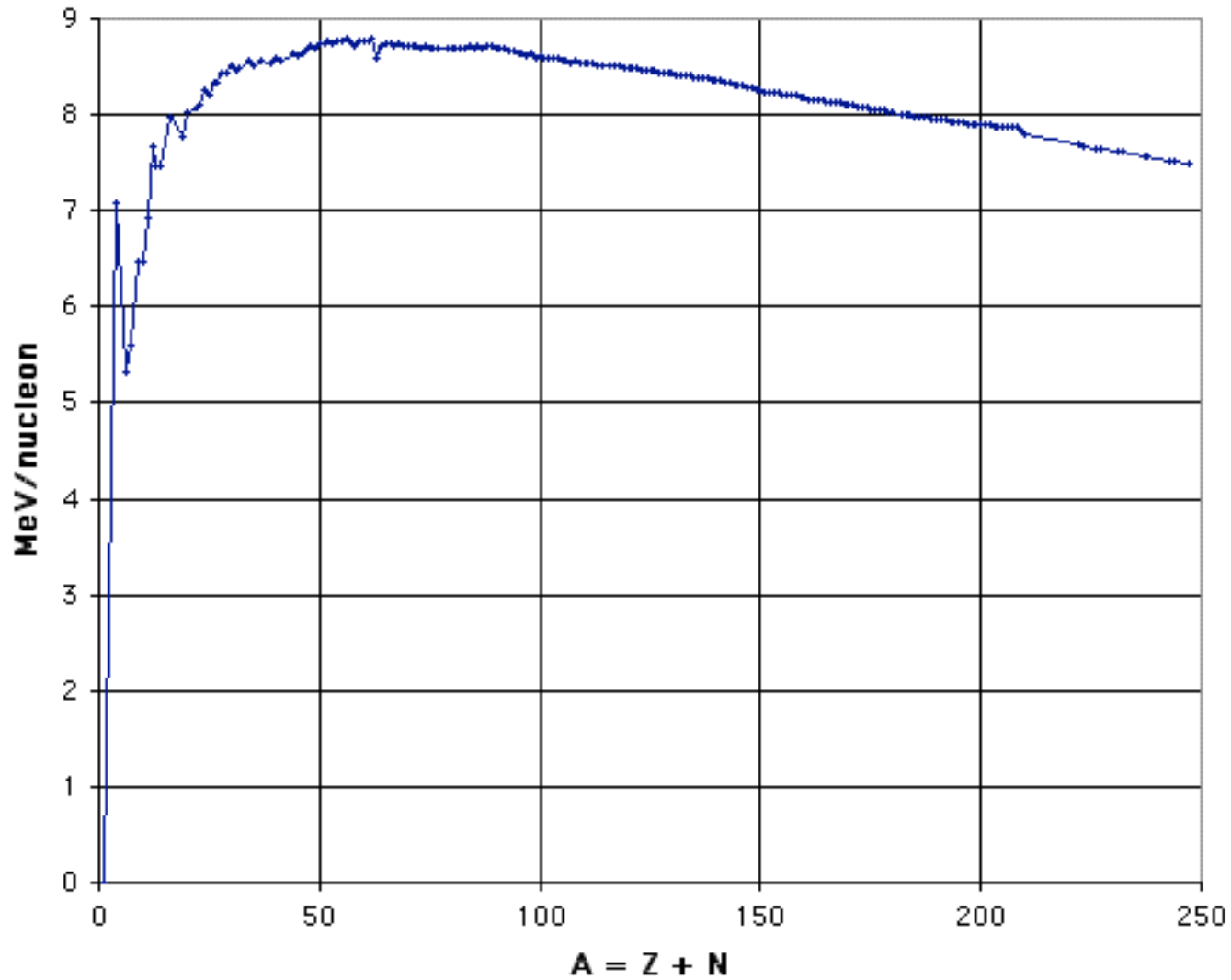
Les étoiles

« Réacteurs nucléaires à confinement gravitationnel »

- Environ 10^{11} étoiles dans la Voie Lactée...
- Source d'énergie : réactions nucléaires
- Prolongement de l'œuvre nucléosynthétique universelle...
- Enrichissement progressif de la galaxie, génération d'étoiles après génération d'étoiles

NB: \exists étoiles de masses, températures et durées de vie très variées...

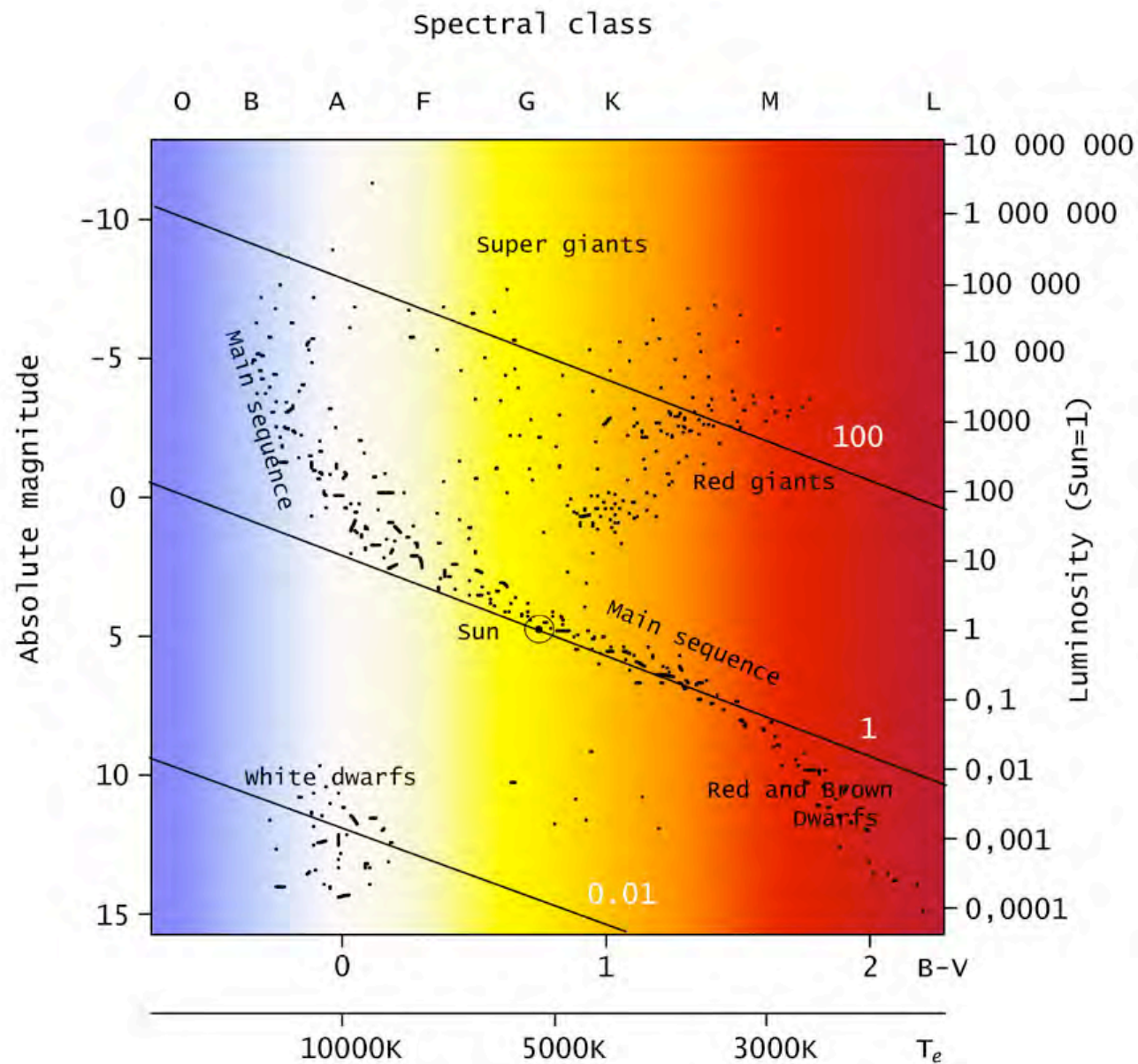
Énergie de liaison des noyaux



Un modèle du Soleil...

% radius	Radius (10^9 m)	Temperature (10^6 K)	% Luminosity	Fusion Rate (joules/kg-sec)	Fusion Power Density (joules/sec- m^3)
0	0.00	15.7	0	0.0175	276.5
9	0.06	13.8	33	0.010	103.0
12	0.08	12.8	55	.0068	56.4
14	0.10	11.3	79	.0033	19.5
19	0.13	10.1	91	.0016	6.9
22	0.15	9.0	97	0.0007	2.2
24	0.17	8.1	99	0.0003	0.67
29	0.20	7.1	100	0.00006	.09
46	0.32	3.9	100	0	0
69	0.48	1.73	100	0	0
89	0.62	0.66	100	0	0

Diagramme de Hertzsprung-Russell



Nucléosynthèse

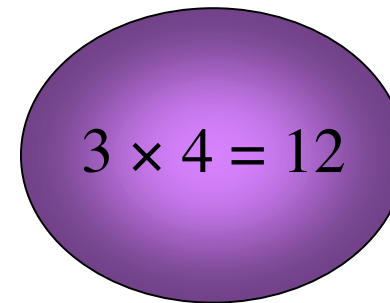
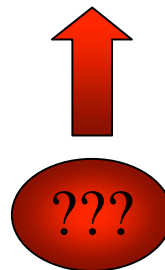
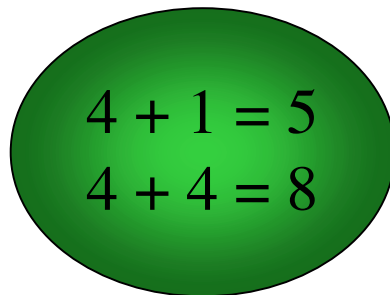
- Arithmétique nucléaire...

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16...	238
H	D	³ He	⁴ He		⁶ Li	⁷ Li		⁹ Be	¹⁰ B	¹¹ B	¹² C	¹³ C	¹⁴ N	¹⁵ N	¹⁶ O...	²³⁸ U
}				}							}					

Big Bang

LiBeB

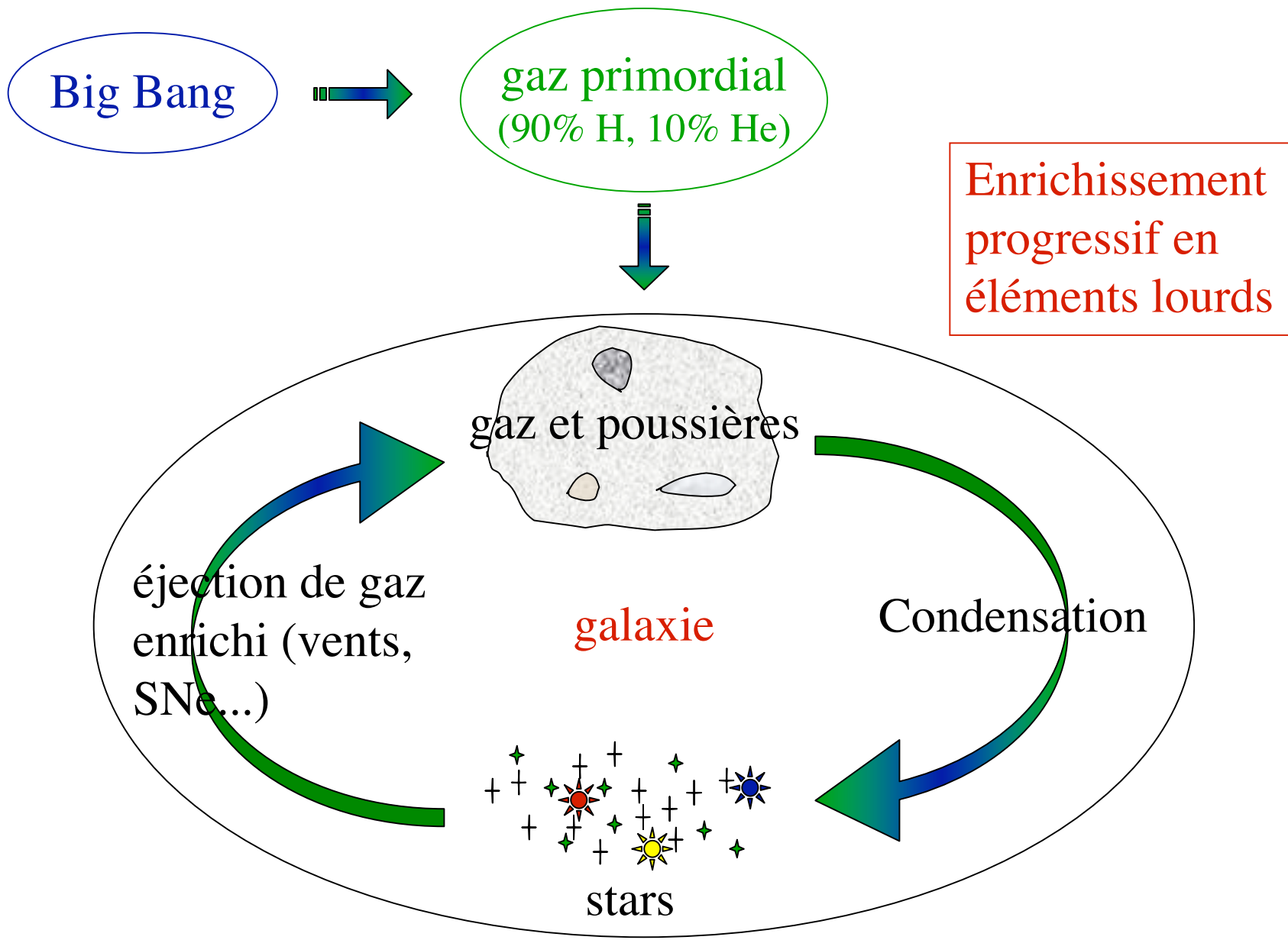
Stars, SNe...



H, He
+ 10% du ⁷Li actuel

réactions 3 α
C, N, O... Fe
... jusqu'à U (SNe...)

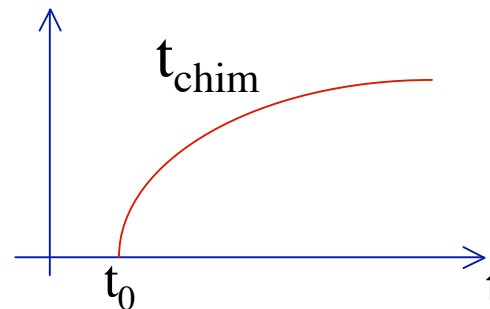




→ Terre, roches, plantes, êtres humains...

Le “temps chimique”

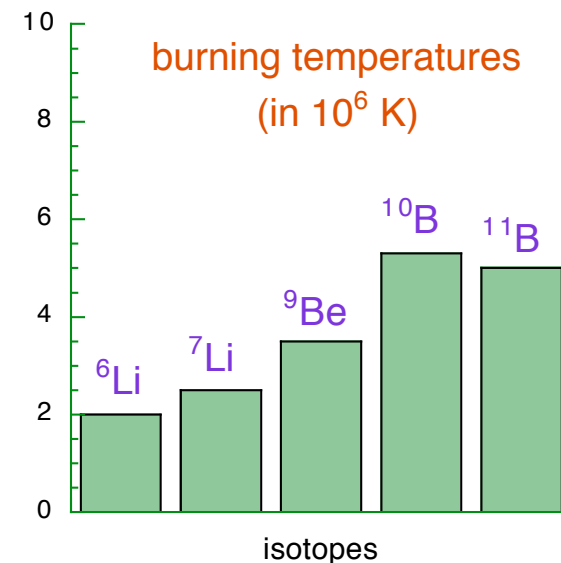
- Du point de vue de la nucléosynthèse, l'évolution Galactique consiste à transformer le H et le He primordiaux en noyaux lourds (C, O, Fe, etc.).
- $X \equiv$ abondance de H.
 $Y \equiv$ abondance de He.
 $Z \equiv$ abondance de tous les éléments plus lourds, appelés “métaux”.
- Z est aussi appelé “métallicité”. C'est une fonction croissante du temps, pouvant servir à définir un “temps chimique”:
 - ◆ au début de l'évolution Galactique, $Z = 0$,
 - ◆ à la naissance du soleil, $Z \equiv Z_{\odot} = 0.020$,
 - ◆ aujourd'hui, $Z \approx Z_{\odot}$.
- L'univers est jeune !



Nucléosynthèse des éléments légers (LiBeB)

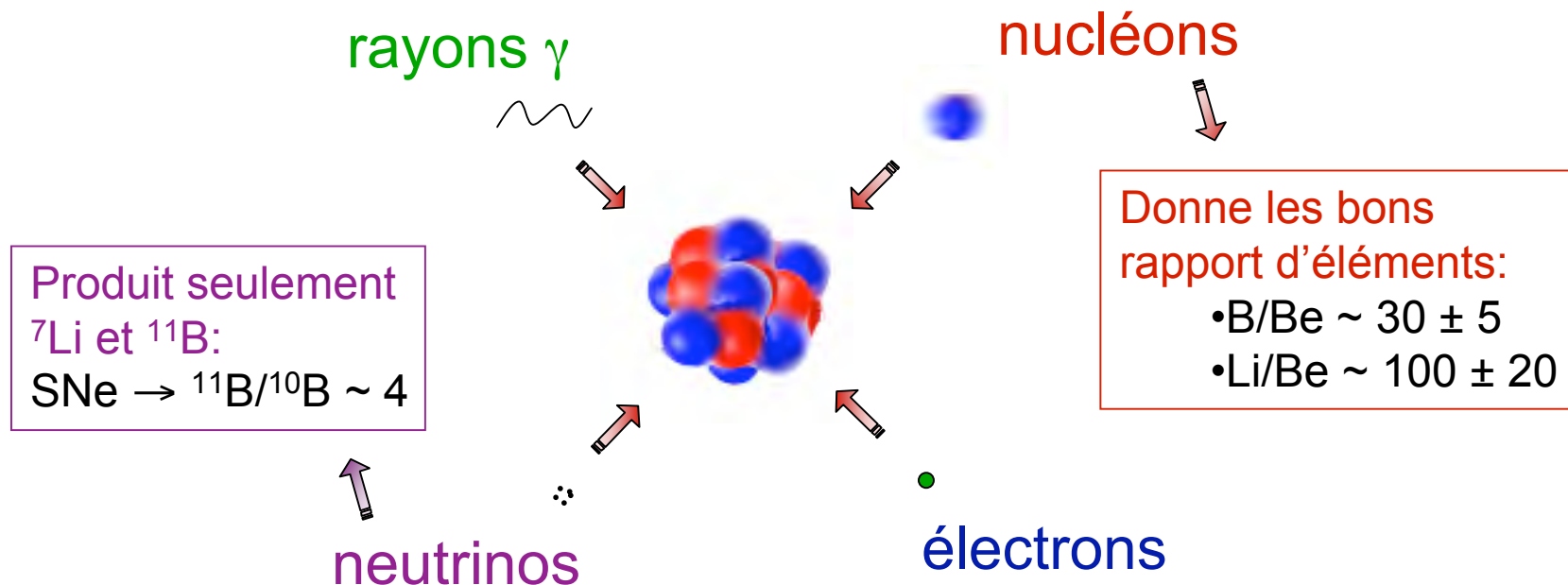
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16...	238
H	D	³ He	⁴ He		⁶ Li	⁷ Li		⁹ Be	¹⁰ B	¹¹ B	¹² C	¹³ C	¹⁴ N	¹⁵ N	¹⁶ O...	²³⁸ U

- La nucléosynthèse primordiale, la nucléosynthèse stellaire, la nucléosynthèse explosive... sont toutes des processus thermiques.
- Mais les processus thermiques détruisent le LiBeB, plutôt qu'ils ne le produisent.
 - processus non thermiques
 - particules non thermiques
- Fusion de noyaux plus légers ne fonctionne pas
⇒ procéder de façon inverse :
spallation de noyaux plus lourds (C,N,O).
 - les éléments légers sont des noyaux secondaires



Origine du LiBeB

- Le LiBeB est synthétisé par spallation du CNO, mais
 - ◆ Quel est l'agent de spallation ?





Les rayons cosmiques

(Au cœur de l'écologie Galactique)

L'astronomie multilongueur d'onde

(Ô vaste spectre électromagnétique !)

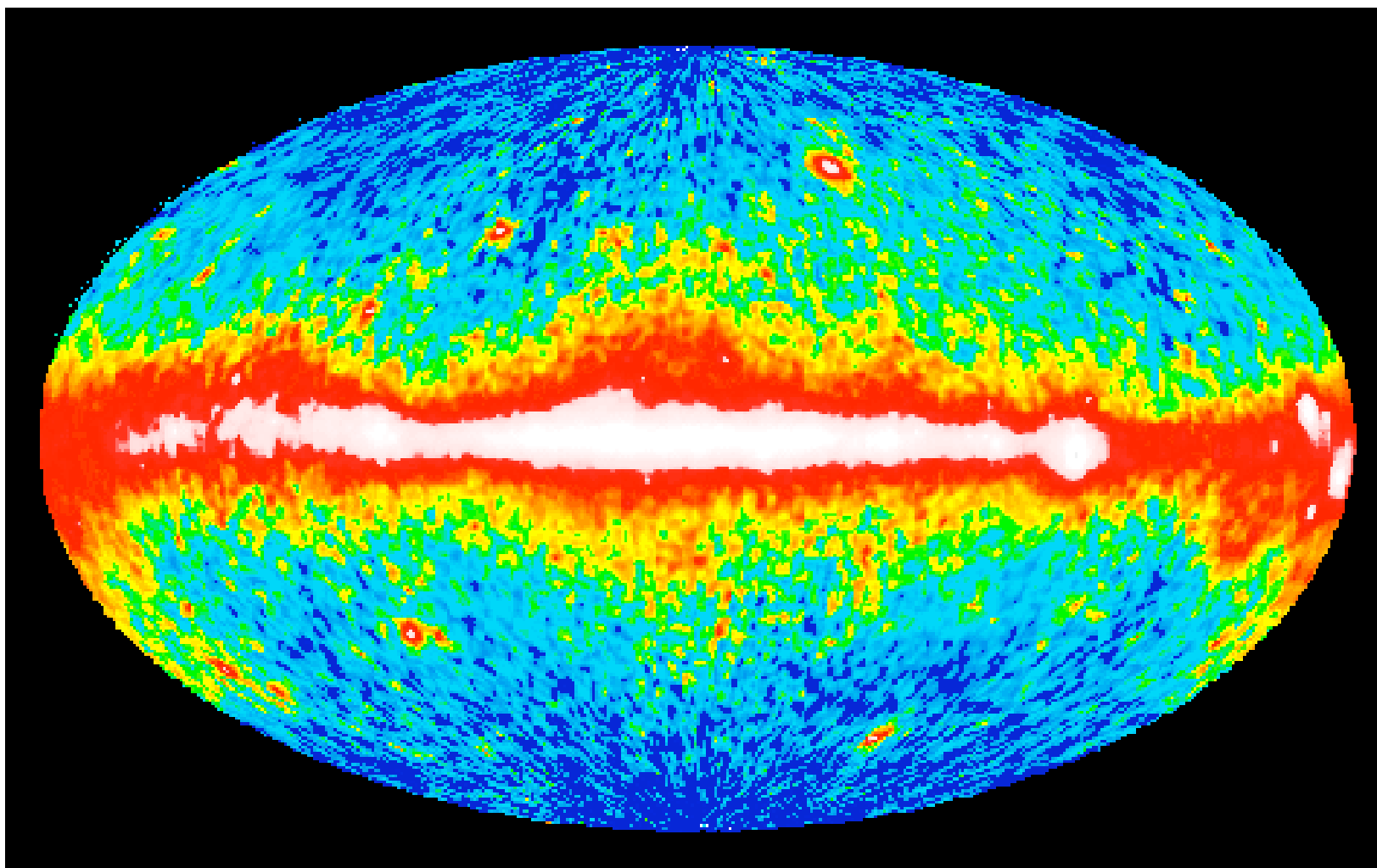
L'univers « visible »...

M31 (Andromède)



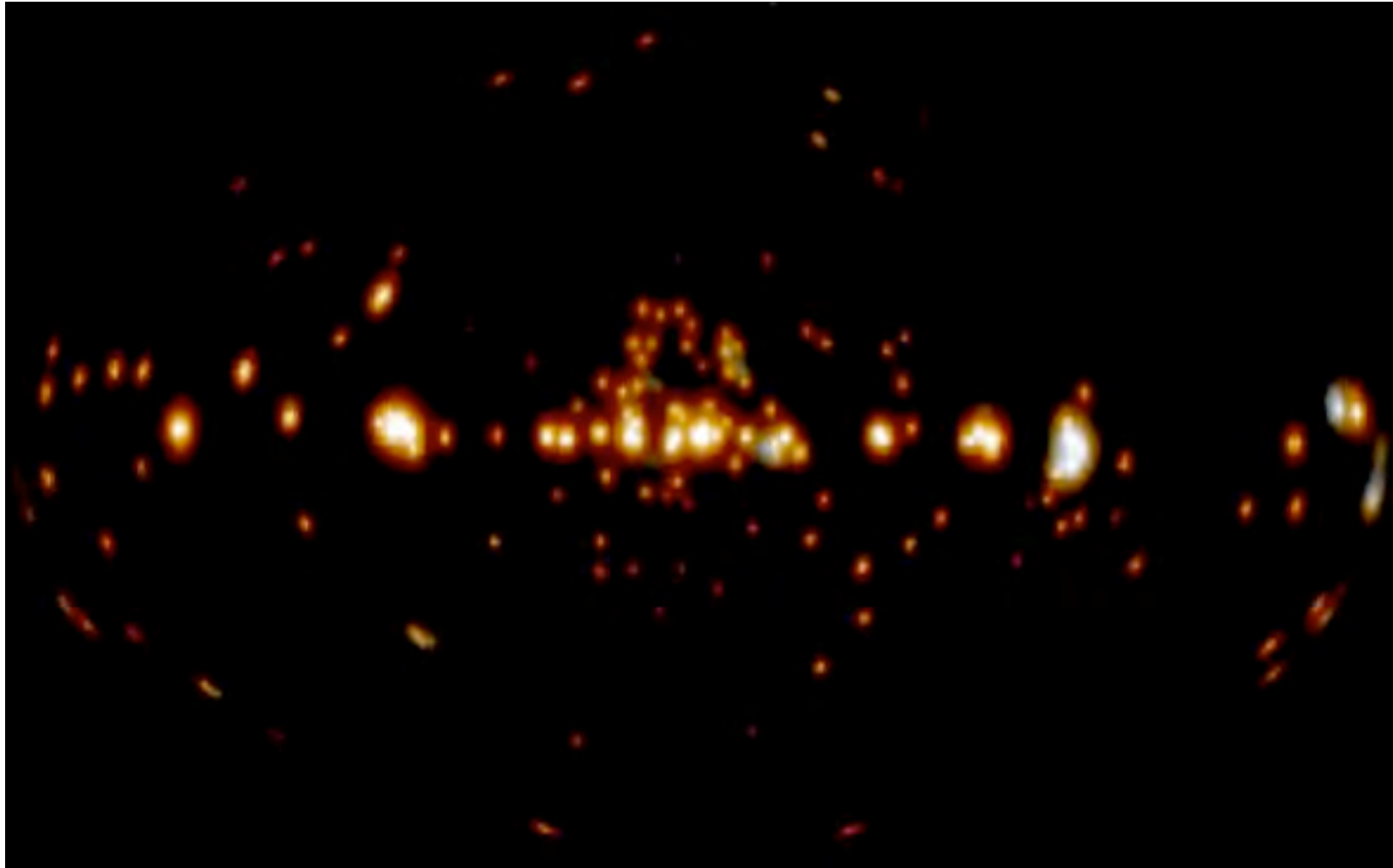
La Galaxie en rayons gamma

EGRET (> 100 MeV)



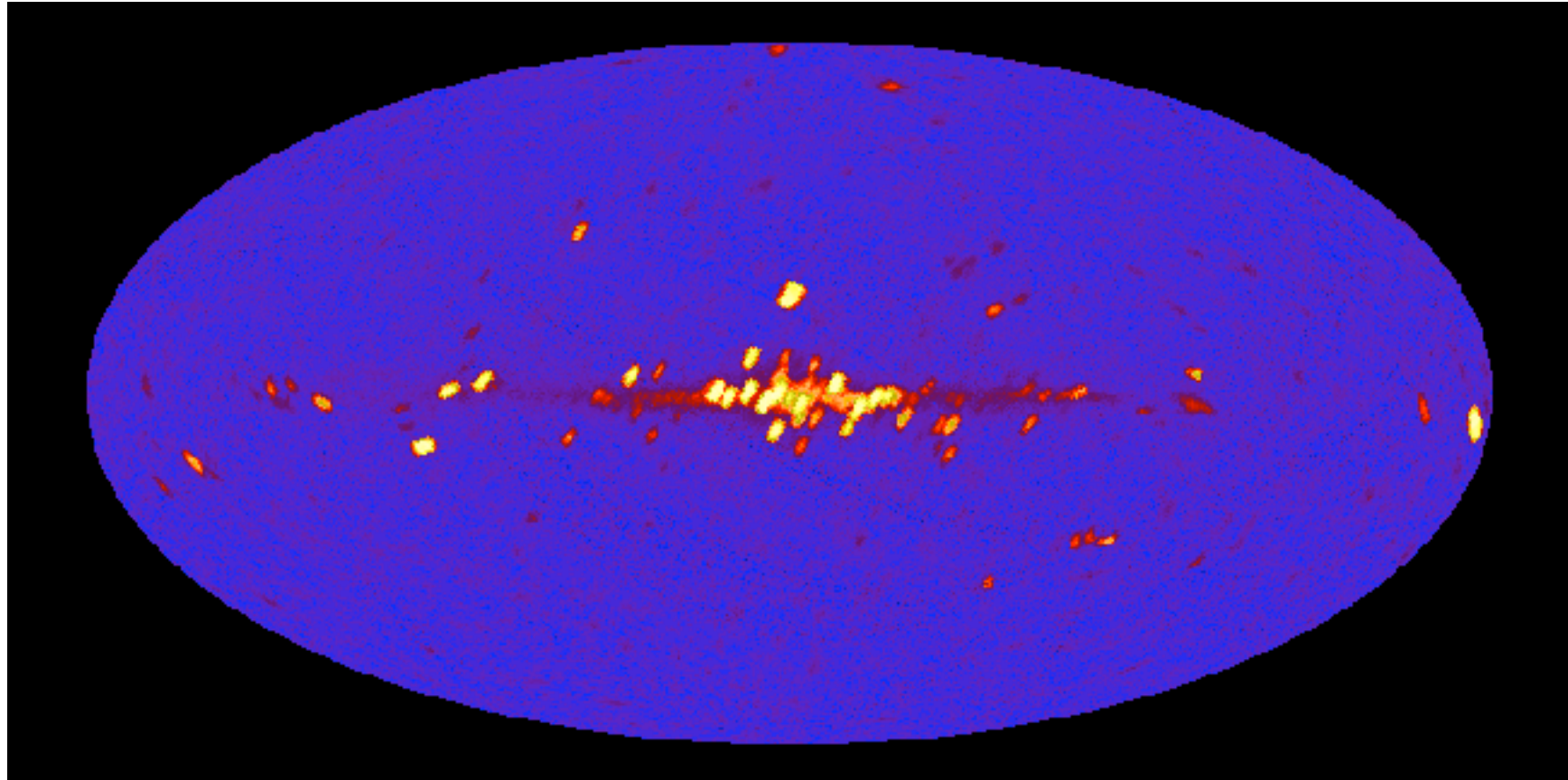
La Galaxie en rayons gamma

sources EGRET



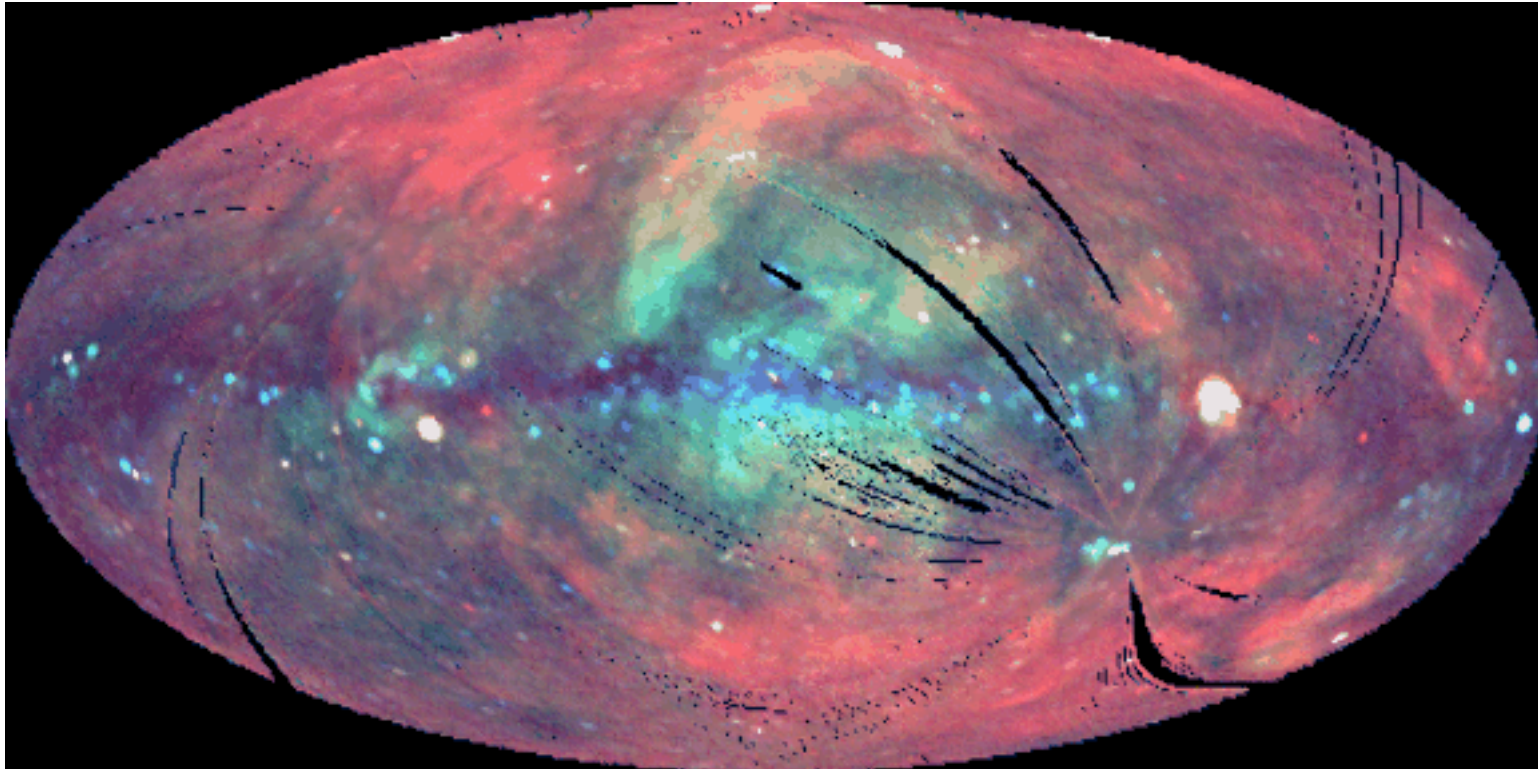
La Galaxie en rayons X

sources X (HEAO-1)



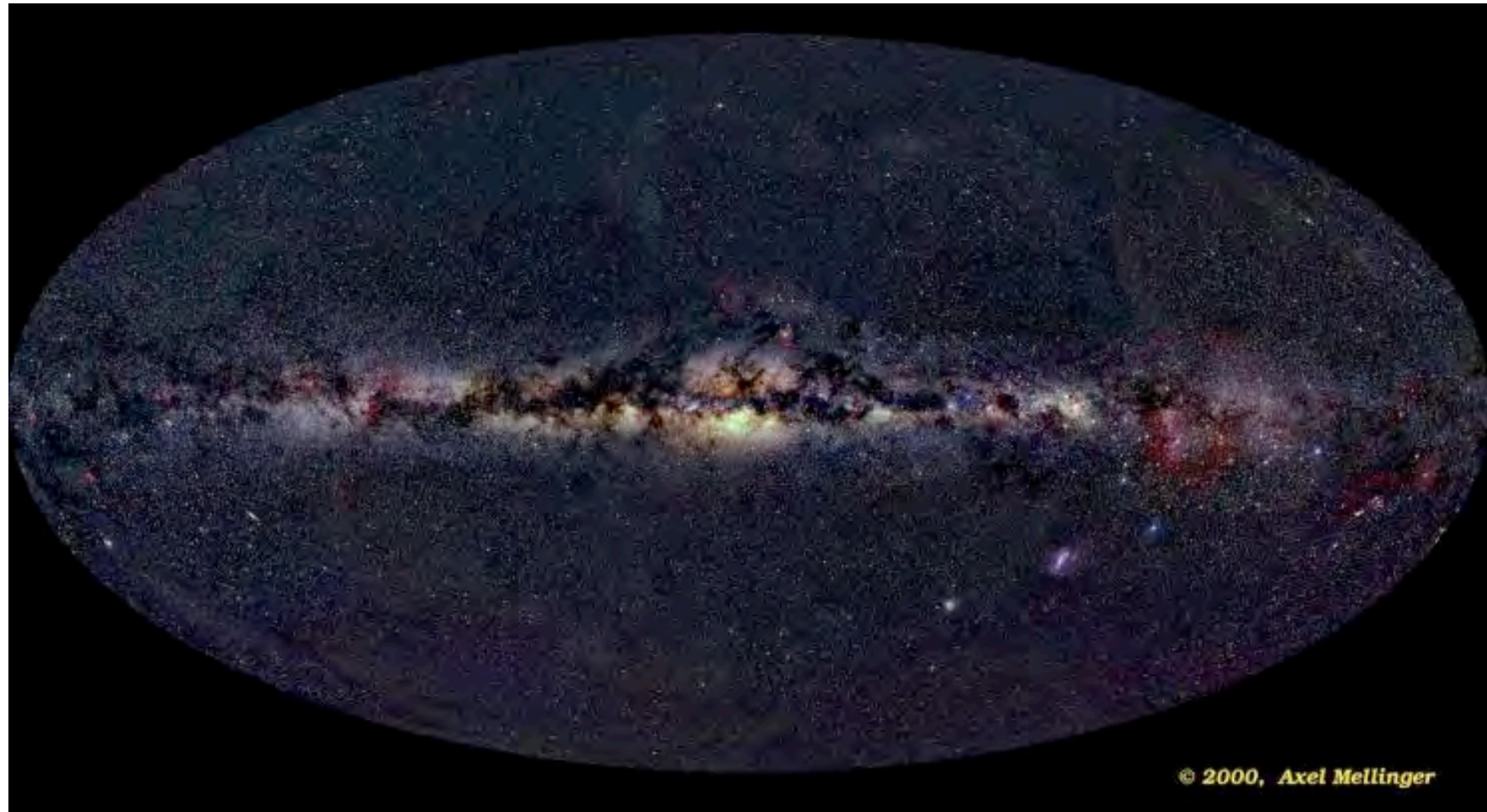
La Galaxie en rayons X

ROSAT (0.1–2.0 keV)



La Galaxie dans le visible

La Voie Lactée !



étoiles, amas, lumière absorbée...

La Galaxie en infrarouge

COBE/DIRBE

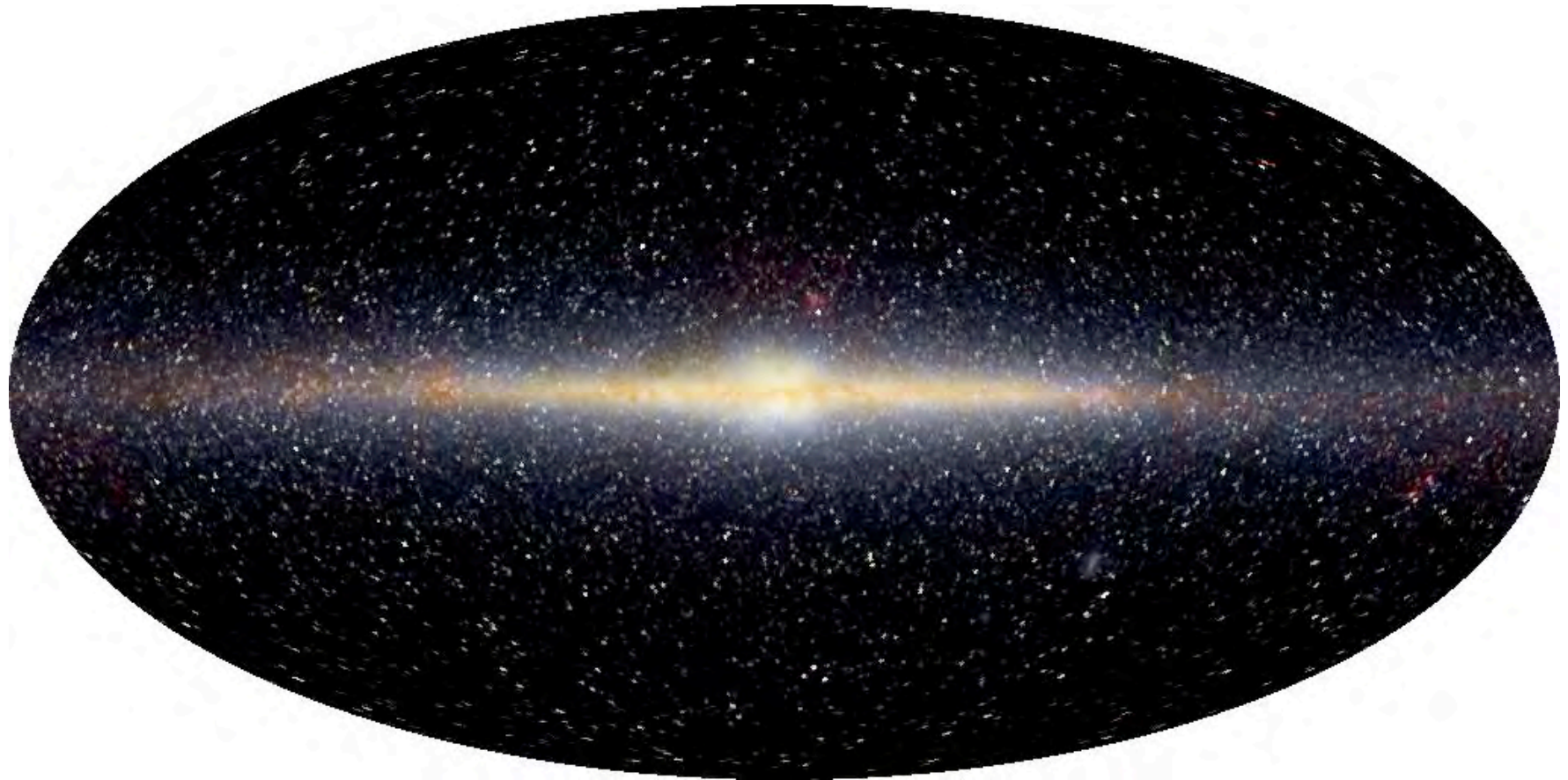


60 μm , 100 μm , 240 μm

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

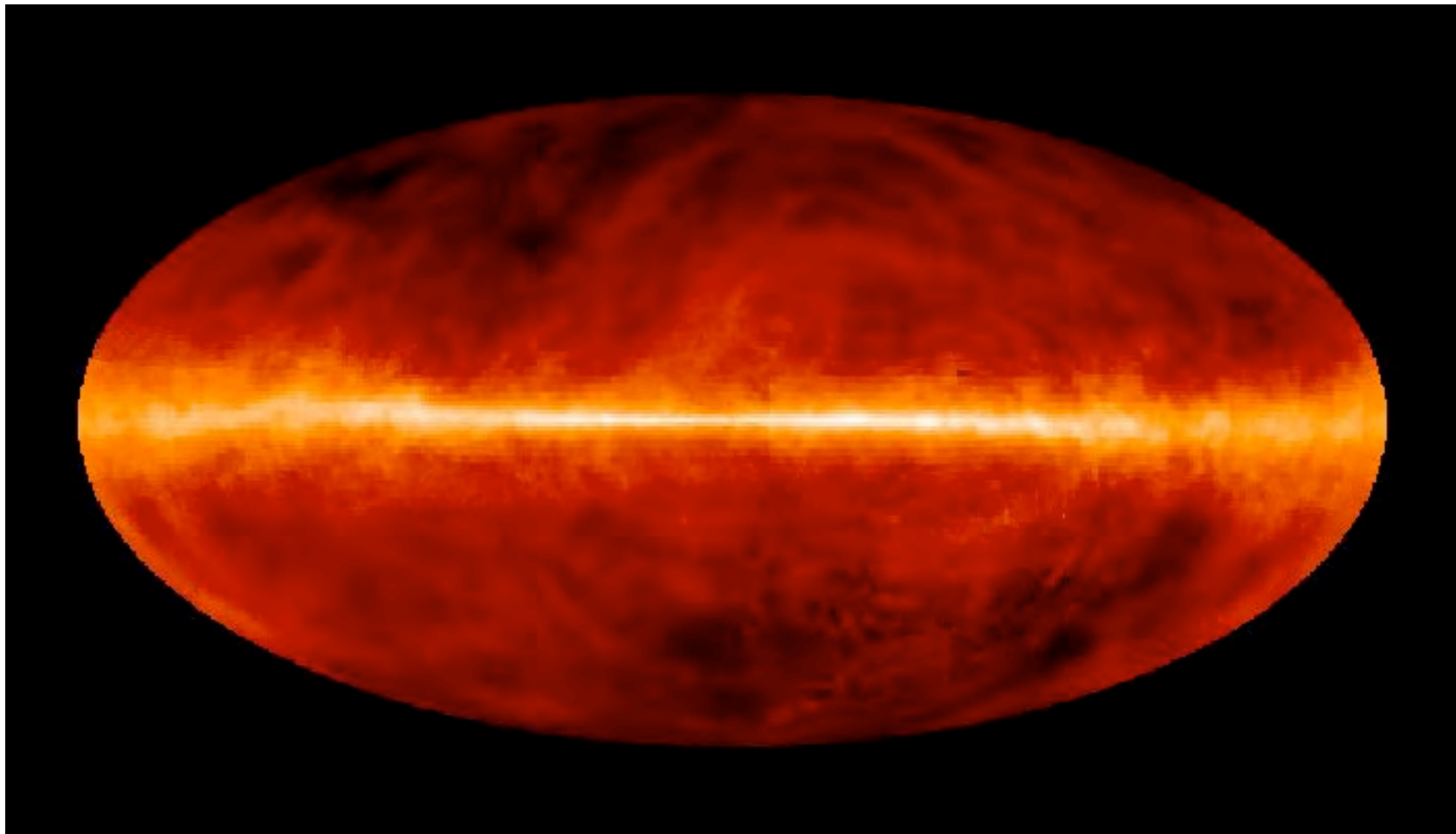
La Galaxie en infrarouge proche

COBE/DIRBE



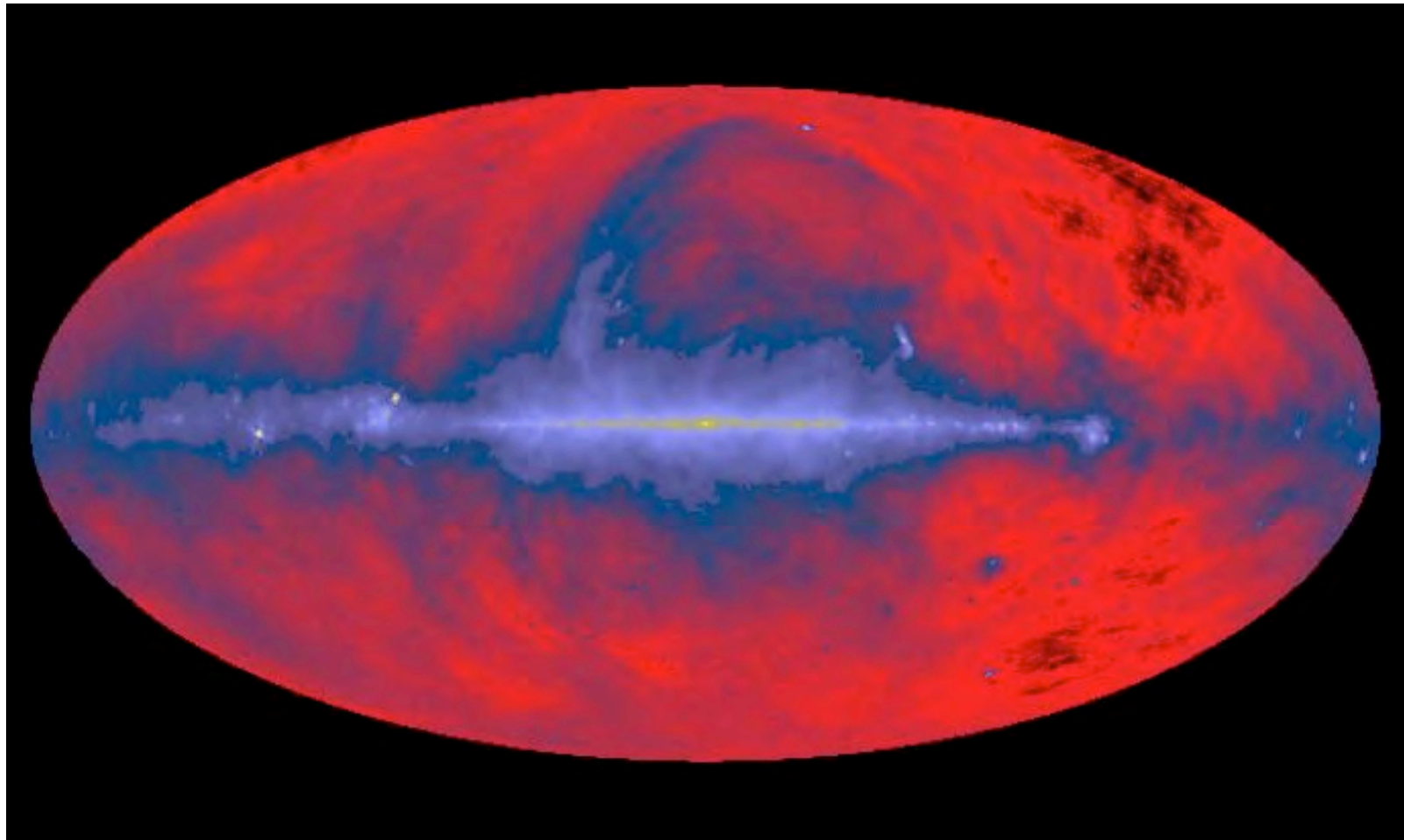
La Galaxie dans la raie de l'hydrogène à 21 cm (1420 MHz)

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

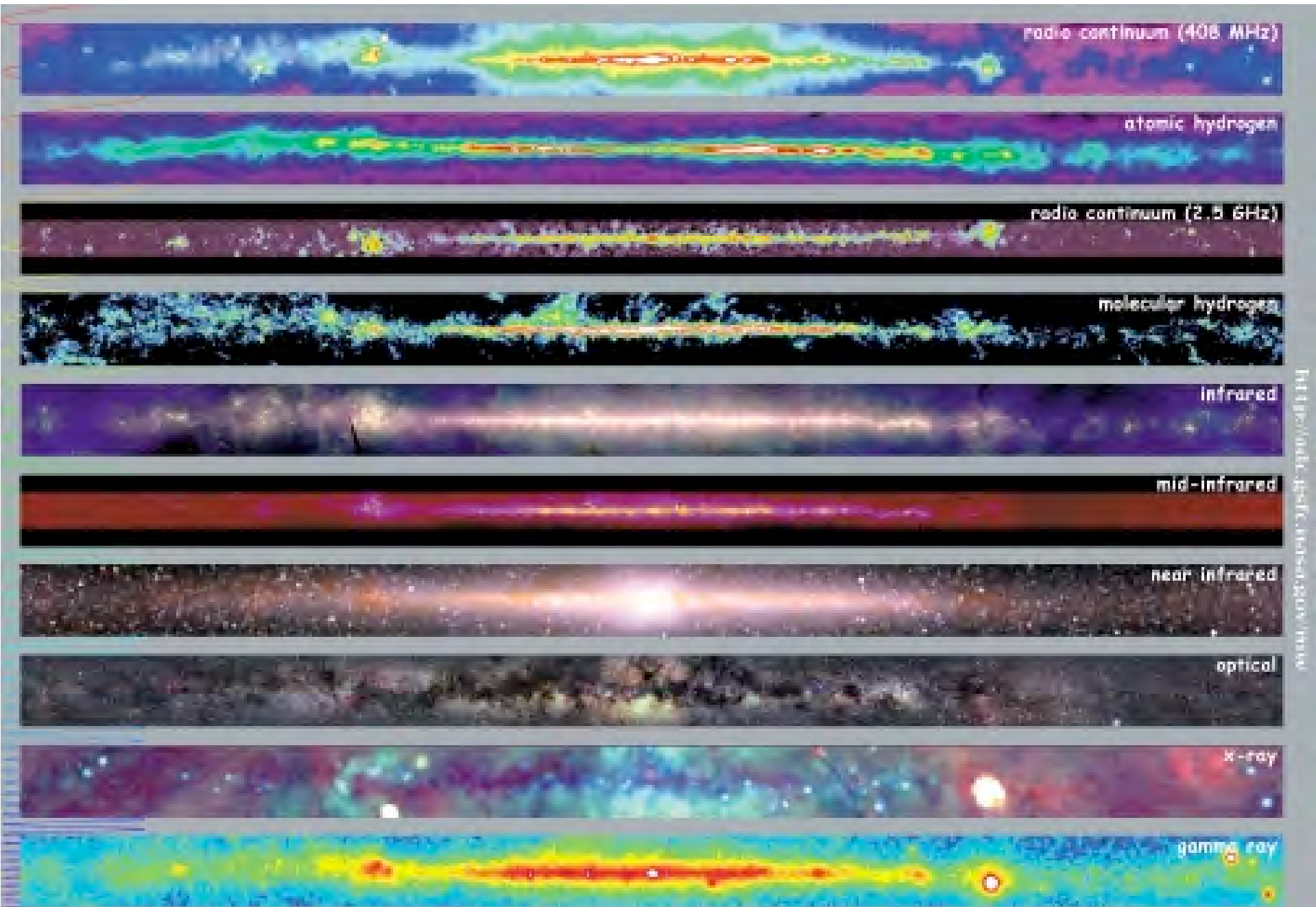


La Galaxie en radio, à 480 MHz

Synchrotron des électrons dans le champ magnétique...



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



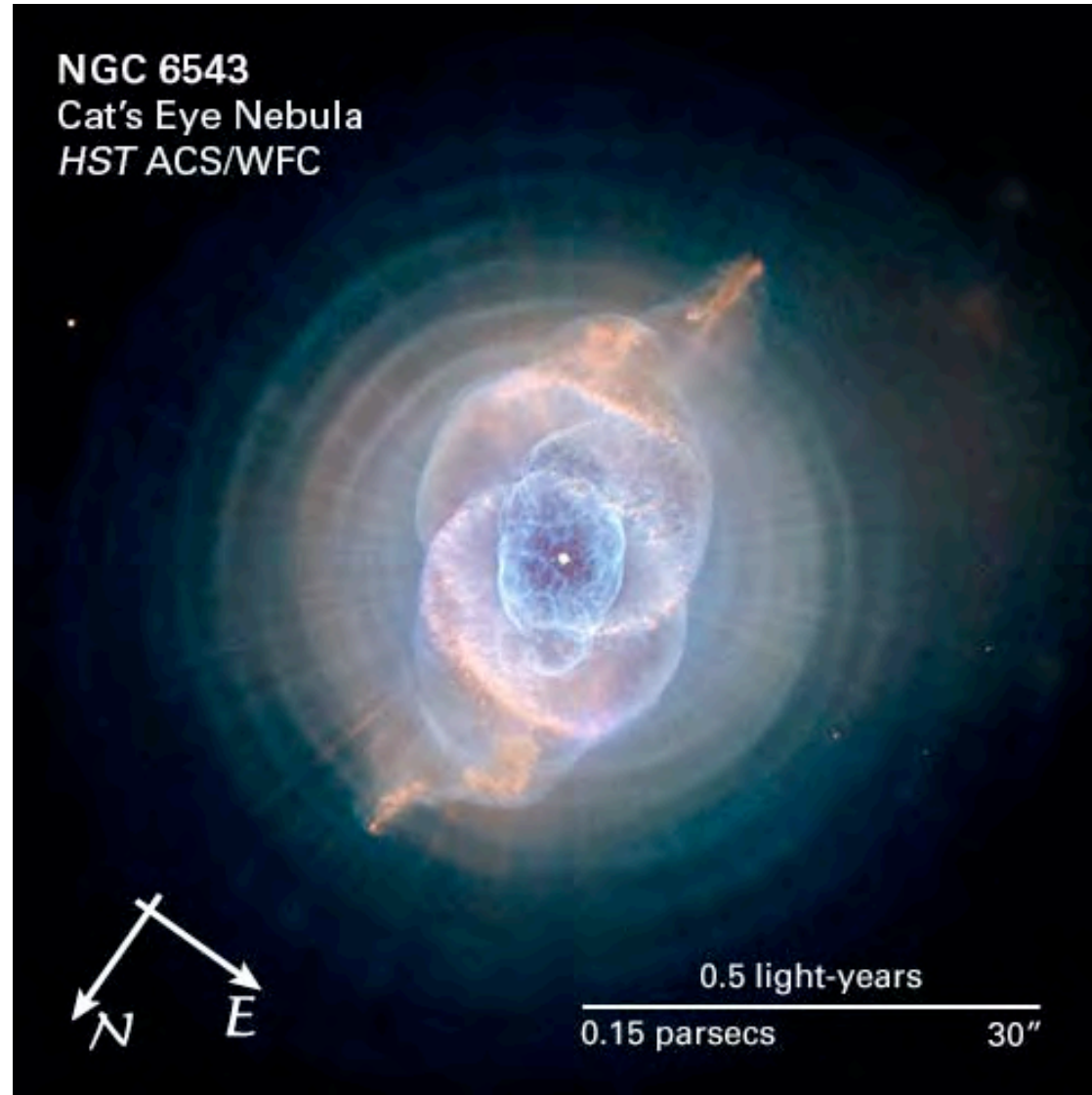
http://hubble.nasa.gov/milkyway



Multiwavelength Milky Way

Nébuleuse de l'œil de chat

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



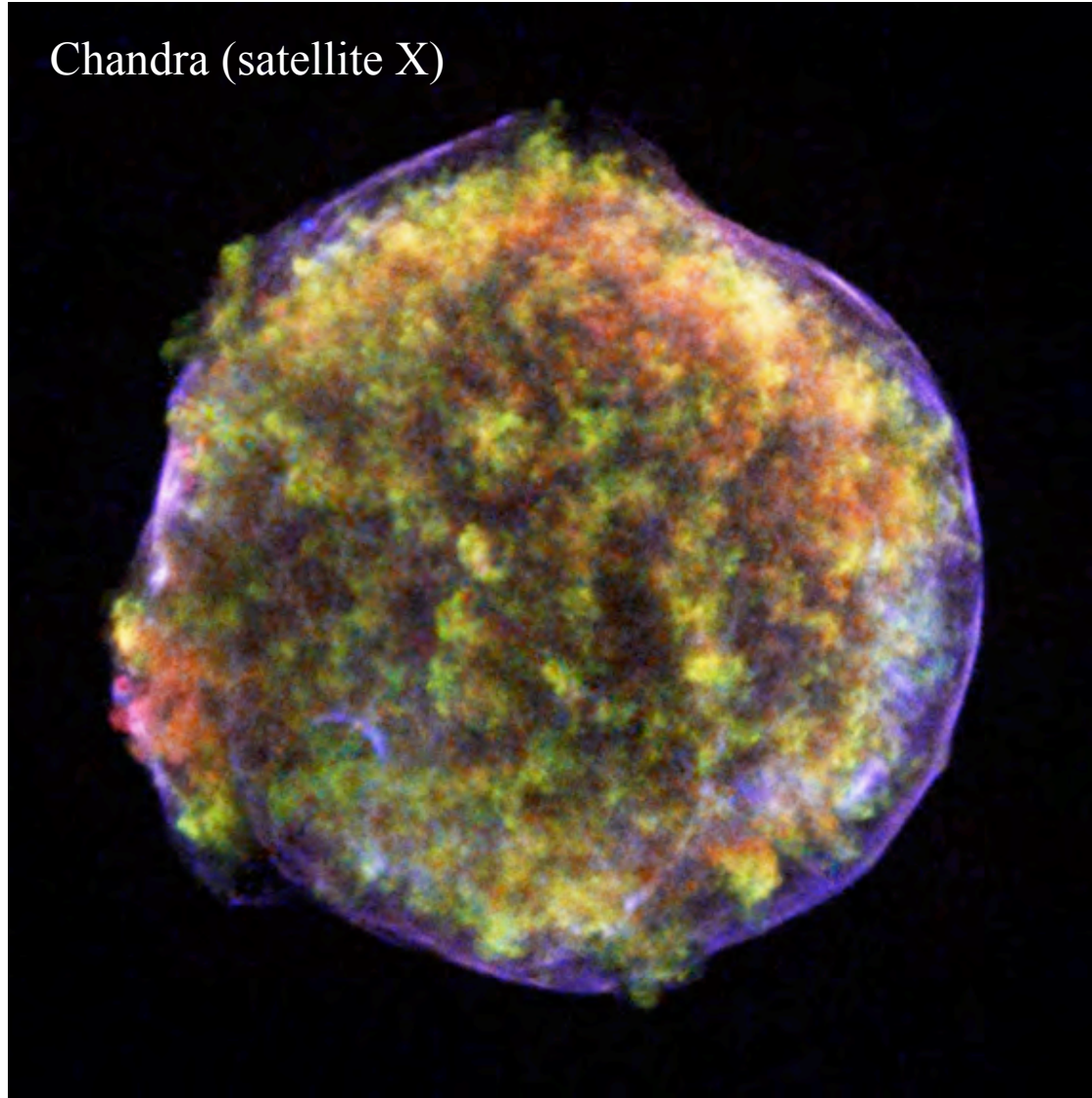
L'« œil de chat » : "Nébuleuse planétaire" (HST)



(~1000 ans)

Vestige de supernova : Tycho (1572)

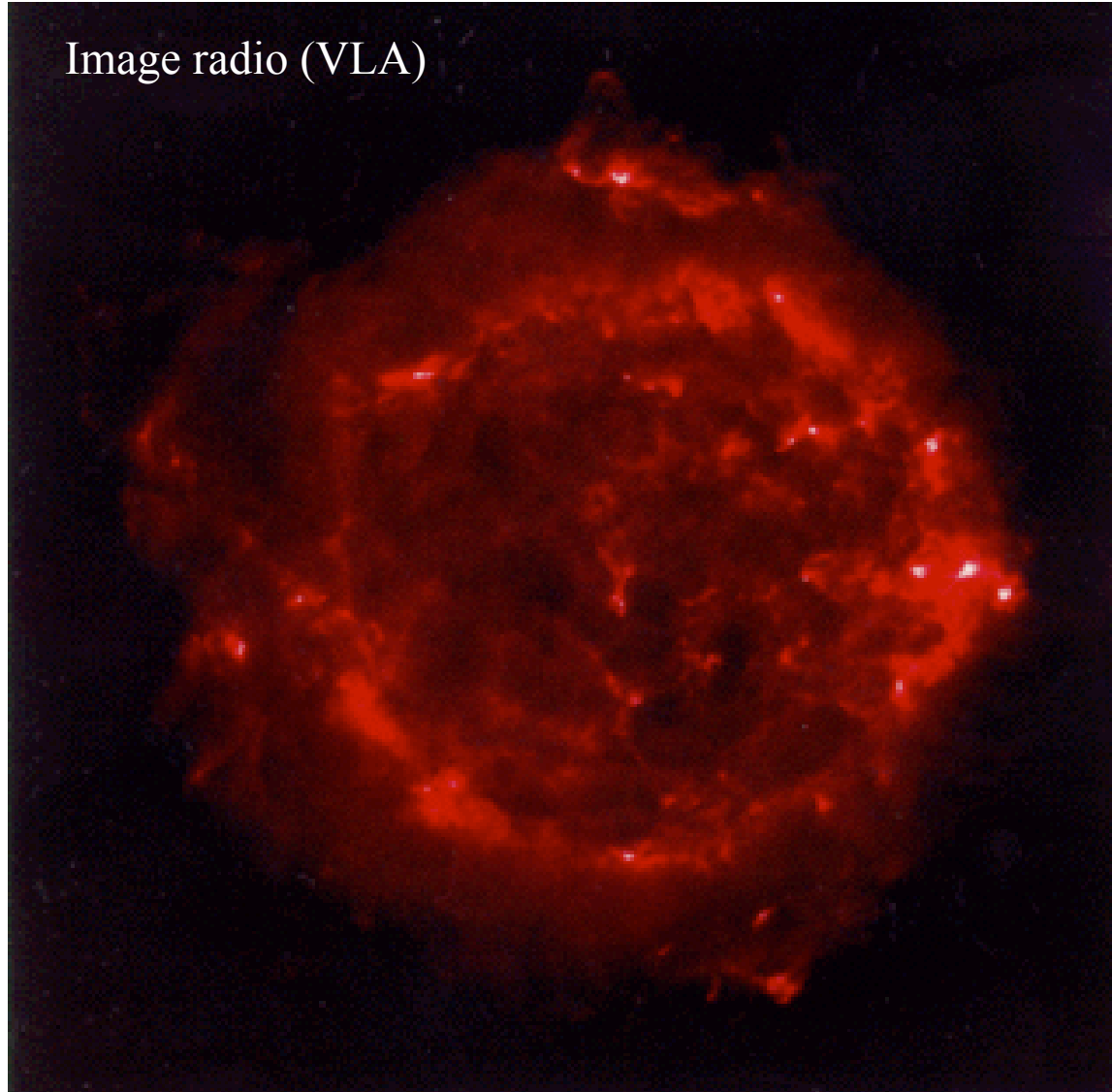
Chandra (satellite X)



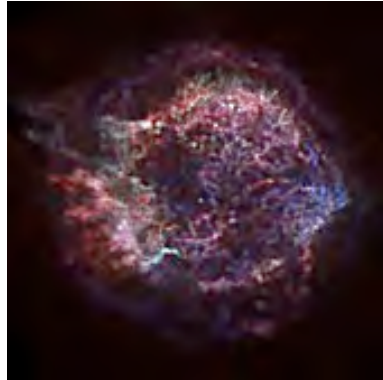
Red 0.95-1.26 keV, Green 1.63-2.26 keV, Blue 4.1-6.1 keV

Vestige de supernova : Cas A (~ 300 ans)

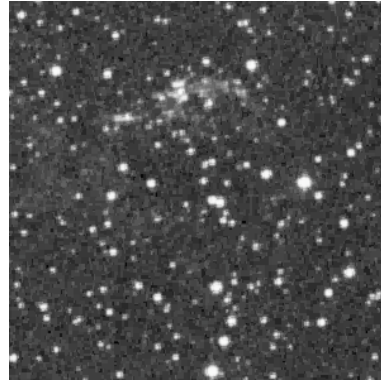
Image radio (VLA)



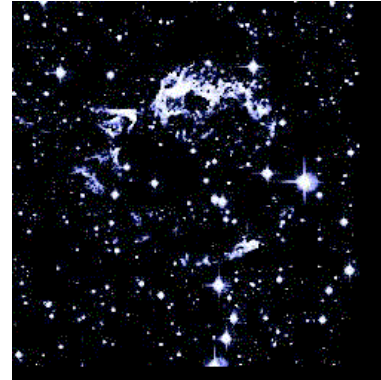
Vestige de supernova : Cas A (~300 ans)



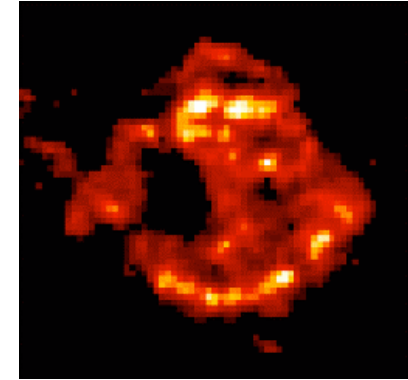
X (Chandra)



visible (DSS)



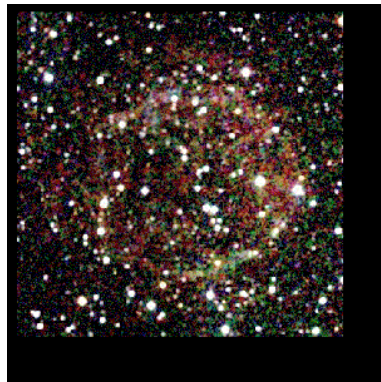
visible (couleurs)



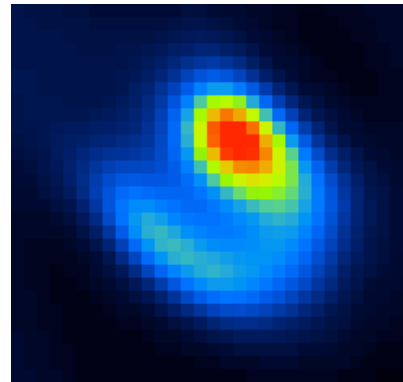
IR 10.7-12.0 μm (ISO)



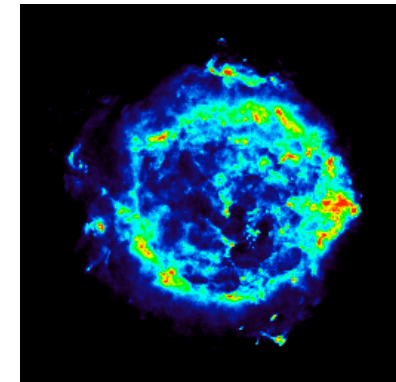
IR proche (2MASS)



IR moyen (Spitzer)



IR lointain (IRAS)



radio (VLA)

La nébuleuse du Crabe

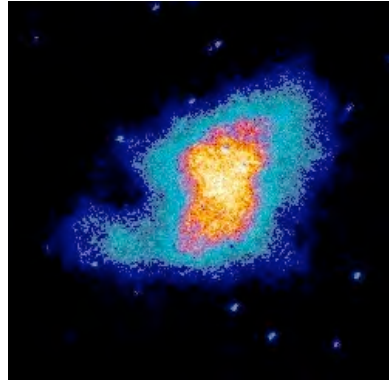
Image dans le visible (VLT, ESO)



La nébuleuse du Crabe (Supernova en 1054)



X (Chandra)



UV (Astro-1)



visible (DSS)



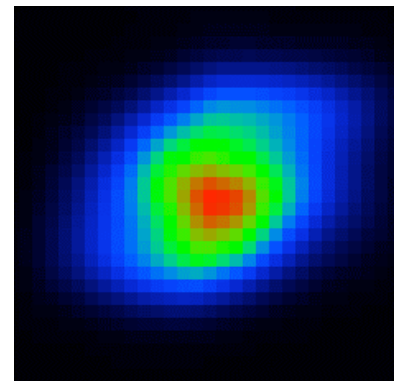
visible (VLT)



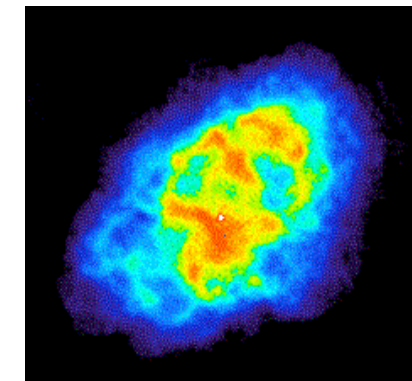
IR proche (2MASS)



IR moyen (Spitzer)



IR lointain (IRAS)



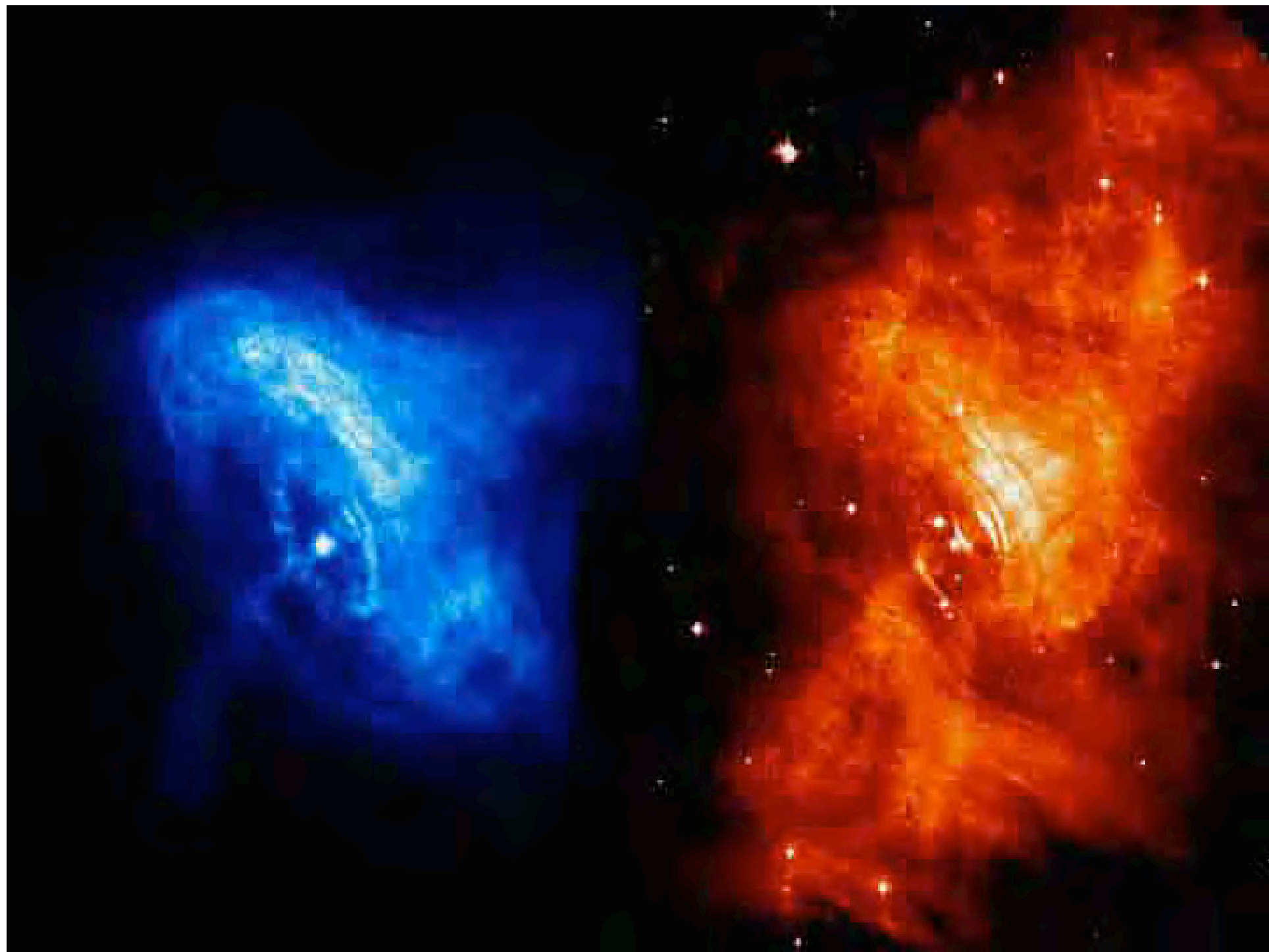
radio (VLA)

La nébuleuse du Crabe (Chandra)



rayons X (Chandra)

Hubble Space Telescope

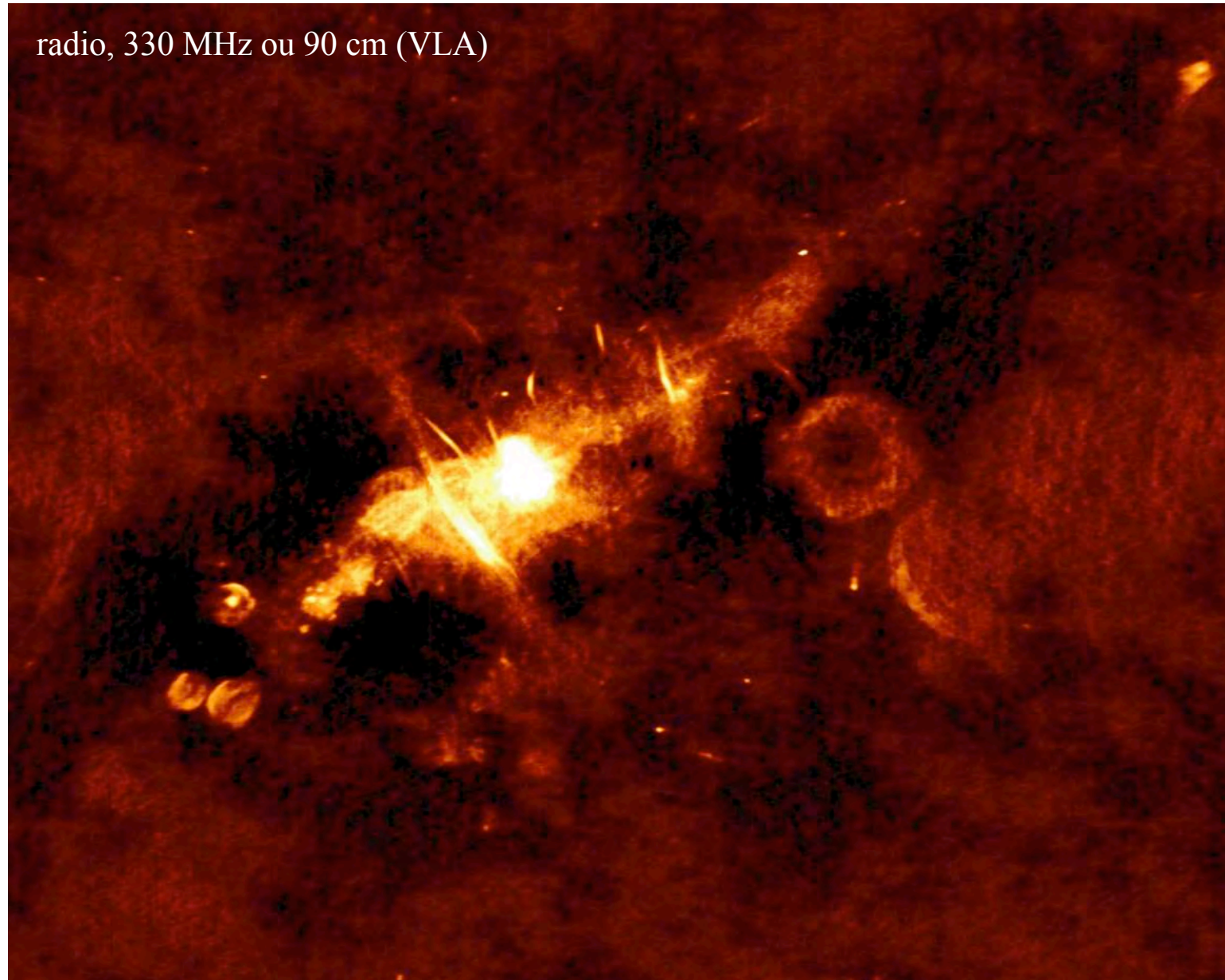


La nébuleuse du Crabe

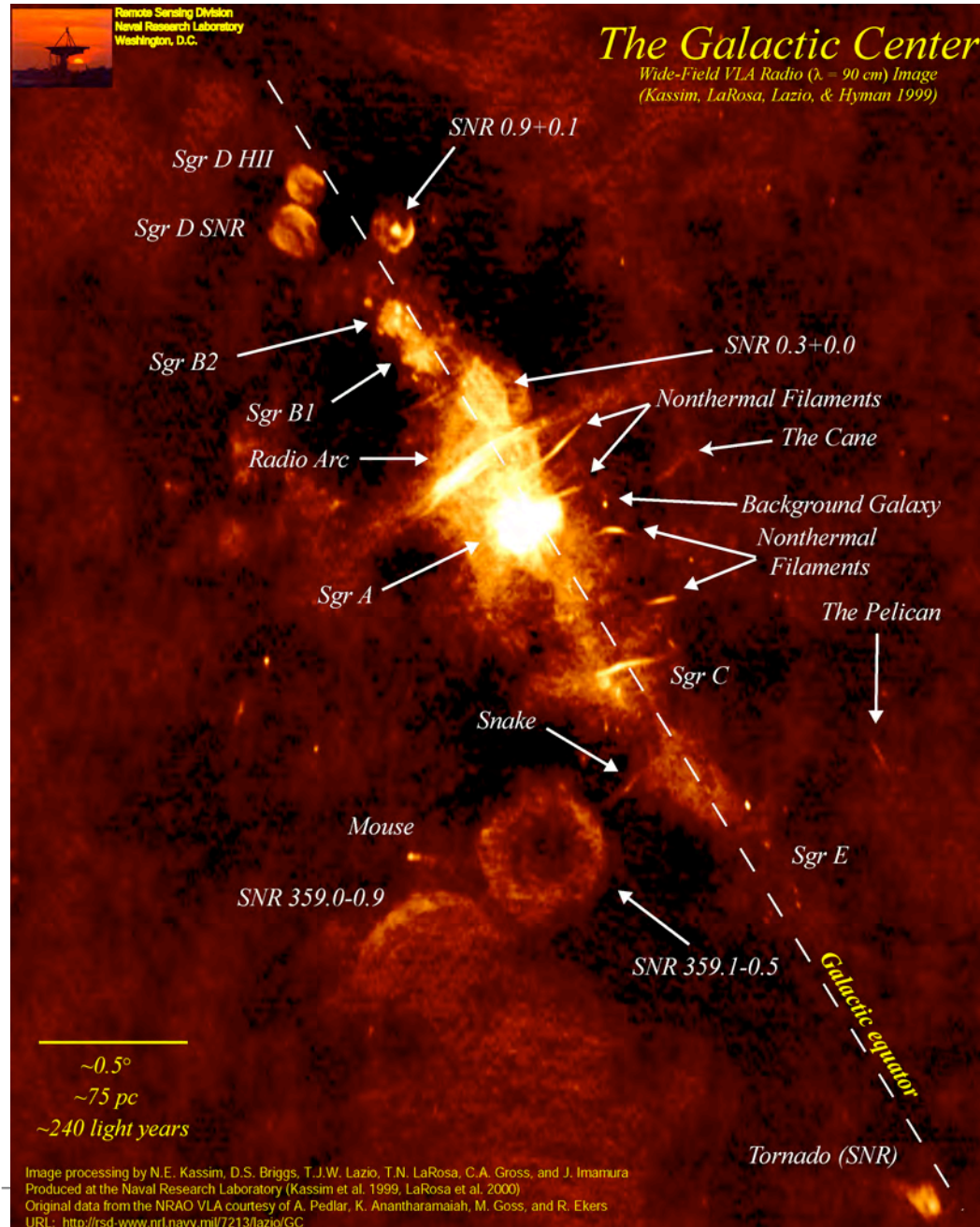
Image composite



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

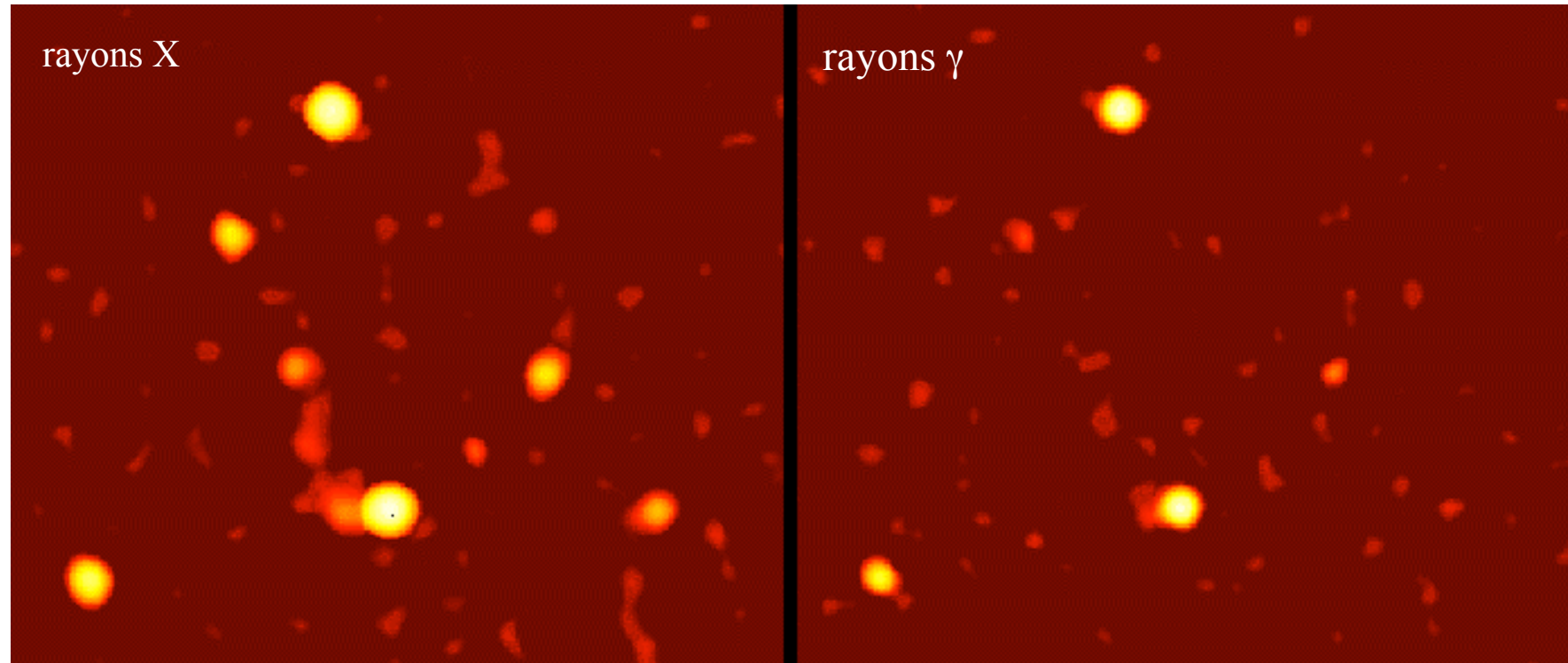


Région du centre Galactique en radio ($4^\circ \times 4^\circ$)



Région du centre Galactique

Image SIGMA (3000 h, de 1990-1997)

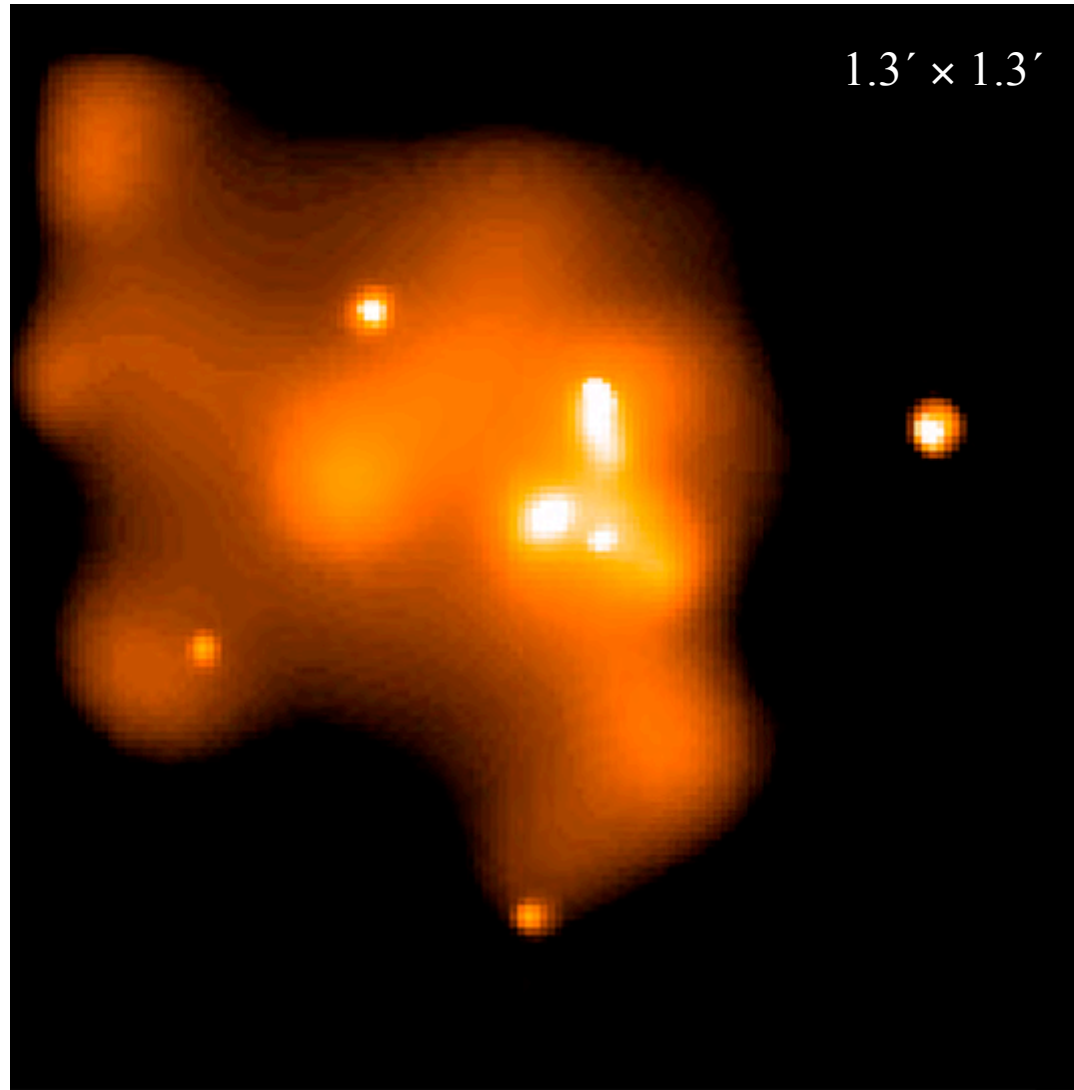


$14^\circ \times 14^\circ$

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

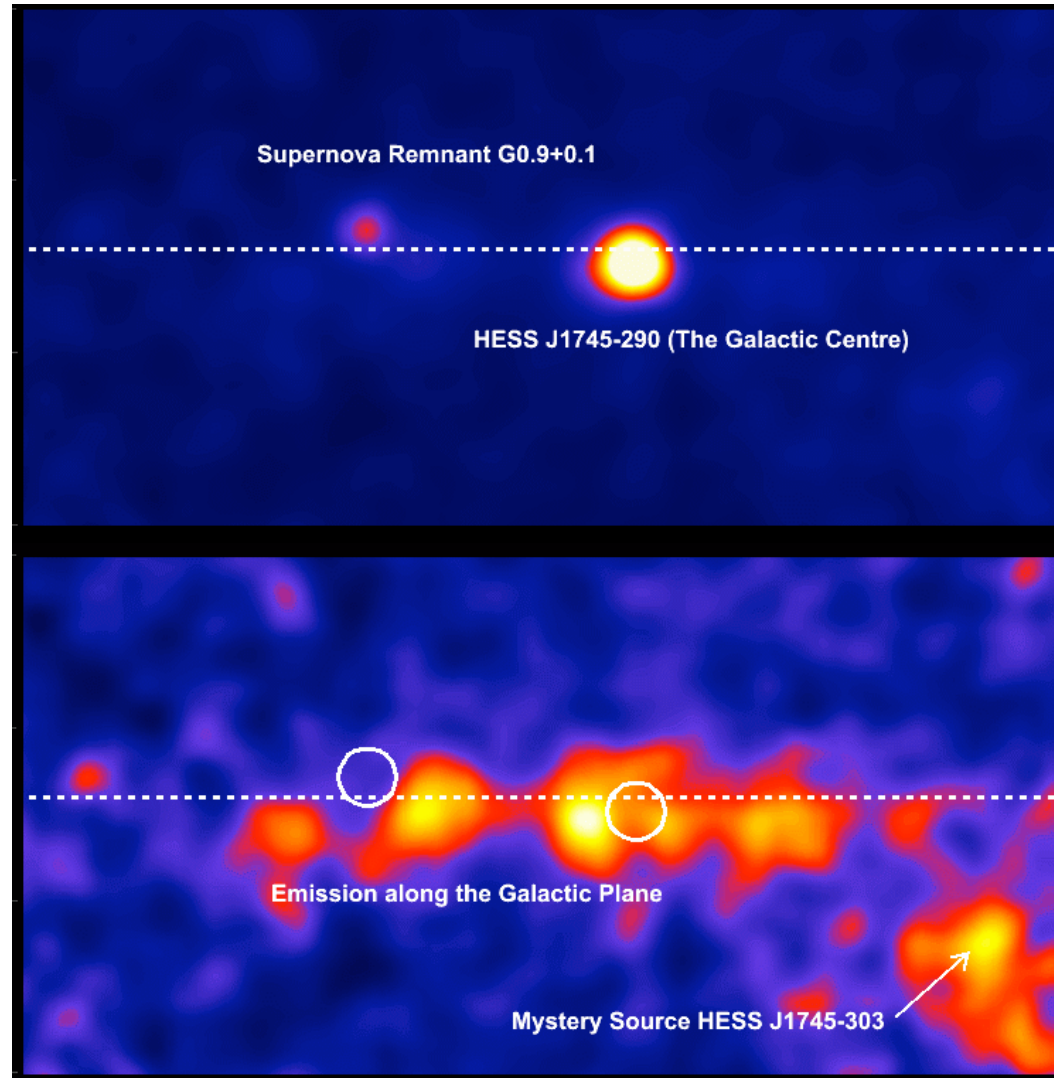
Région du centre Galactique (Sgr A*)

Image Chandra (rayons X)



Région du centre Galactique "au TeV"

Images HESS



(après
soustraction
des 2 sources
principales)