

Le gaz dans les galaxies et la formation des étoiles à travers les âges



Le gaz dans les galaxies et la formation des étoiles à travers les âges

Cours 1 (14/01/25) : Le milieu interstellaire et la formation des étoiles

- les différentes phases du milieu interstellaire
- les régions de photo-dissociation

Cours 2 (21/01/25) : La formation des étoiles et les phénomènes de feedback

- la formation des étoiles
- vents stellaires, explosions de supernovae, radiation
- noyaux actifs de galaxies

Cours 3 (28/01/25) : Le gaz et la formation des étoiles à travers les âges

- des galaxies qui forment des étoiles, d'autres pas
- évolution du taux de formation d'étoiles au cours de l'histoire de l'Univers
- efficacité de la formation des étoiles à différentes époques

Cours 4 (28/01/25) : Enjeux actuels et perspectives

- défis posés par les observations
- simuler la formation des étoiles et les phénomènes de feedback
- futurs observatoires

Le gaz dans les galaxies et la formation des étoiles à travers les âges

Cours 1 (14/01/25) : Le milieu interstellaire et la formation des étoiles

- les différentes phases du milieu interstellaire
- les régions de photo-dissociation

Cours 2 (21/01/25) : La formation des étoiles et les phénomènes de feedback

- la formation des étoiles
- vents stellaires, explosions de supernovae, radiation
- noyaux actifs de galaxies

Cours 3 (28/01/25) : Le gaz et la formation des étoiles à travers les âges

- des galaxies qui forment des étoiles, d'autres pas
- évolution du taux de formation d'étoiles au cours de l'histoire de l'Univers
- efficacité de la formation des étoiles à différentes époques

Cours 4 (28/01/25) : Enjeux actuels et perspectives

- défis posés par les observations
- simuler la formation des étoiles et les phénomènes de feedback
- futurs observatoires

La Voie Lactée, notre Galaxie



Centre de la Voie Lactée

La Voie Lactée, notre Galaxie

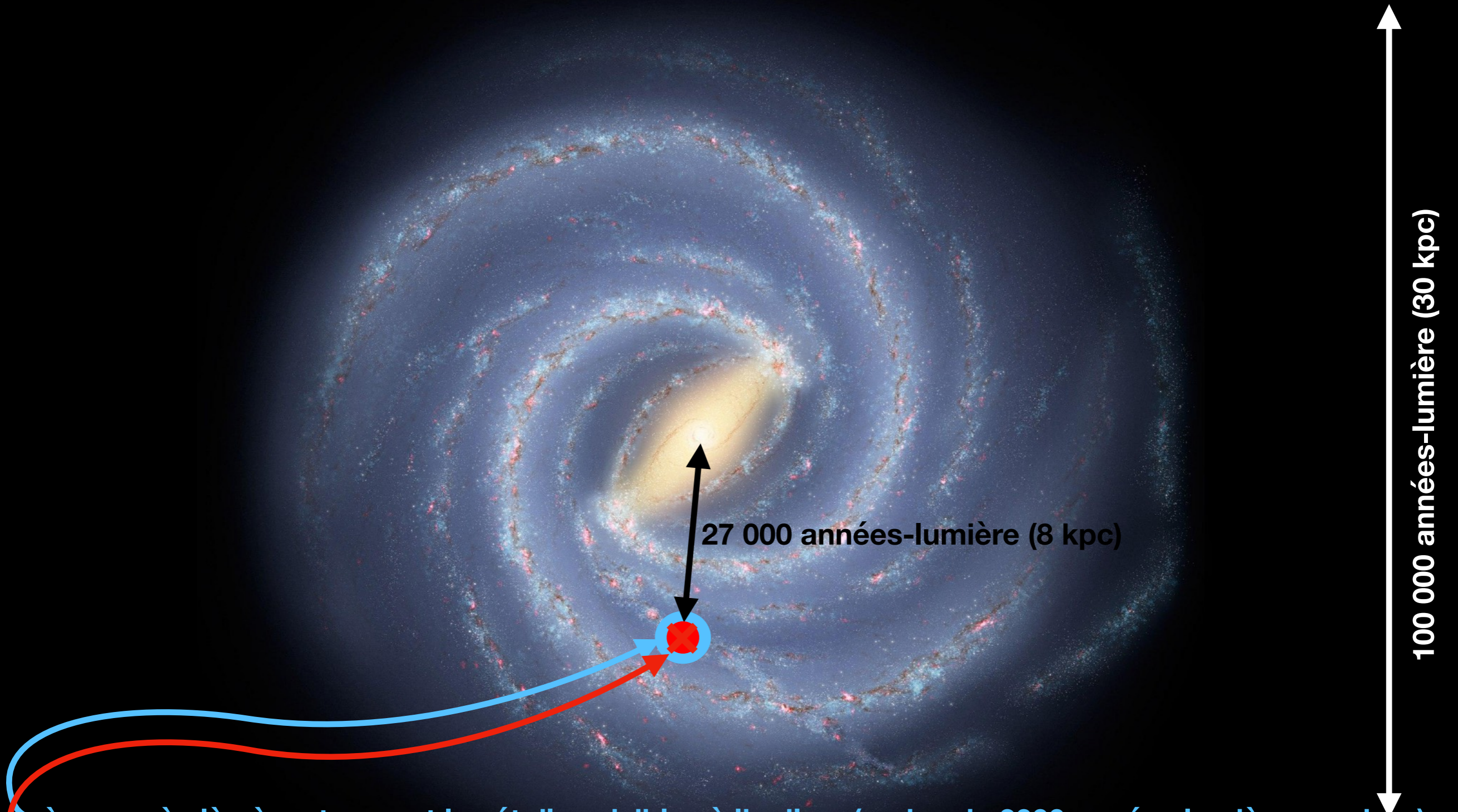
(vue d'artiste)





La Voie Lactée, notre Galaxie

(vue d'artiste)



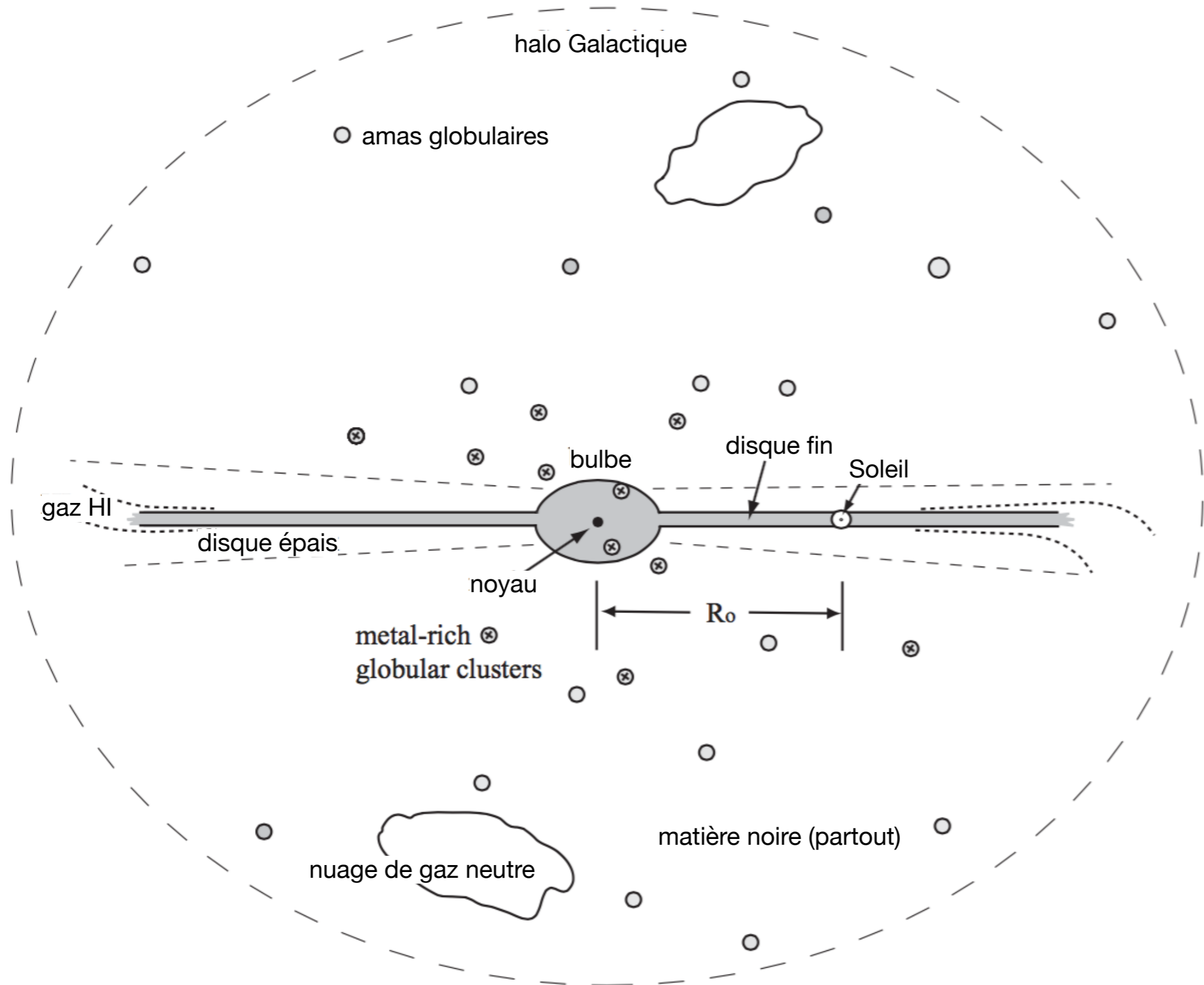
à peu près là où se trouvent les étoiles visibles à l'oeil nu (moins de 3000 années lumières environ)

seule la lumière de cette petite région nous est parvenue depuis l'Antiquité (2000 années-lumière)...

l'étoile la plus proche, Proxima Centauri, est à 4.3 années-lumière

(1 kiloparsec [kpc] = $3.09 \cdot 10^{21}$ m)

Une vue schématique de la Voie lactée



Le milieu interstellaire (MIS)

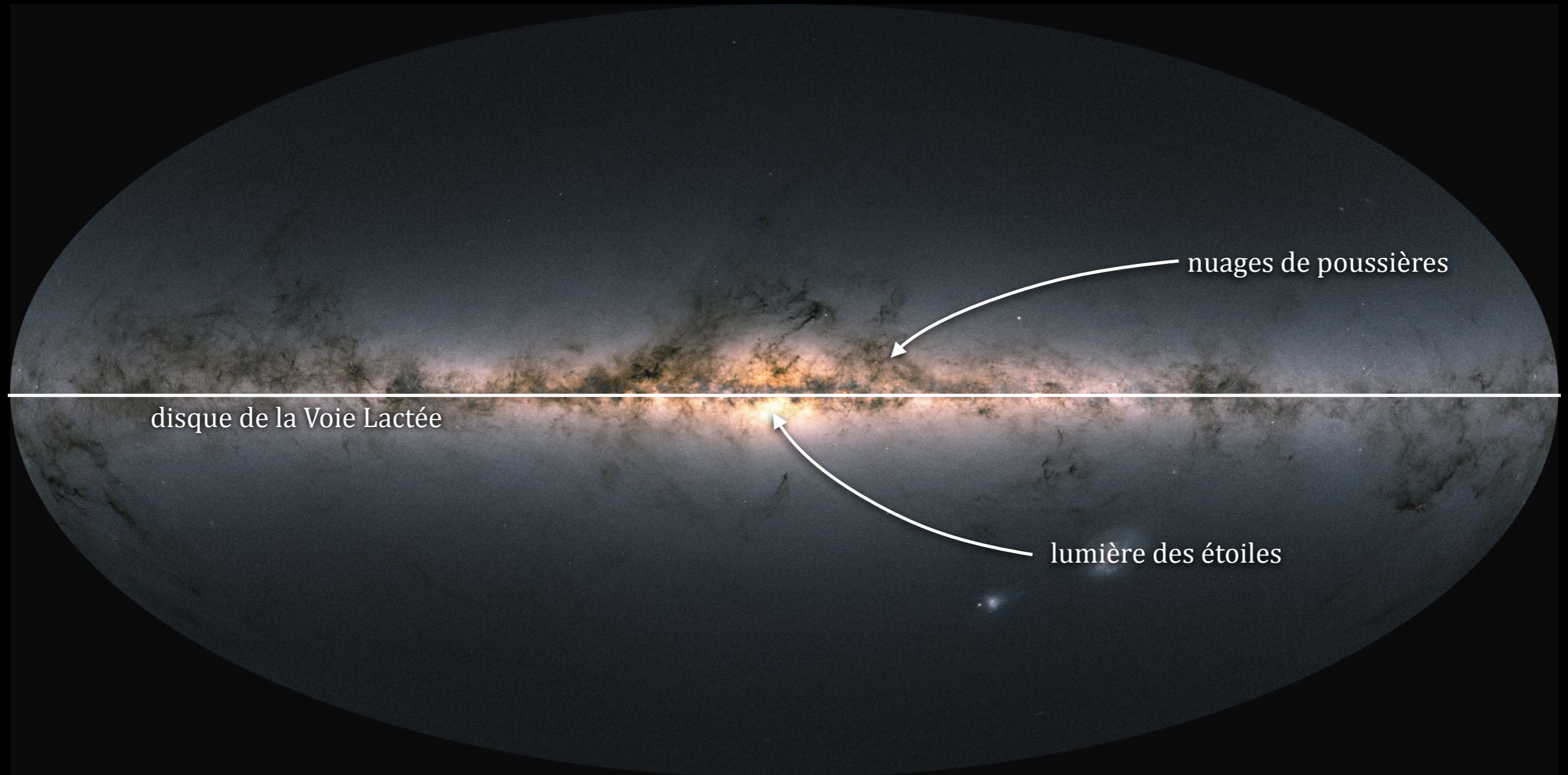
Barnard 68, un nuage sombre. L'espace entre les étoiles — ou **milieu interstellaire** — n'est pas vide ! Il contient du gaz, des grains de poussière, et des rayons cosmiques. Ici, les étoiles d'arrière plan peuvent être vues dans l'infrarouge.

Le milieu interstellaire (MIS)



Barnard 68, un nuage sombre. L'espace entre les étoiles — ou **milieu interstellaire** — n'est pas vide ! Il contient du gaz, des grains de poussière, et des rayons cosmiques. Ici, les étoiles d'arrière plan peuvent être vues dans l'infrarouge.

La Voie Lactée, notre Galaxie

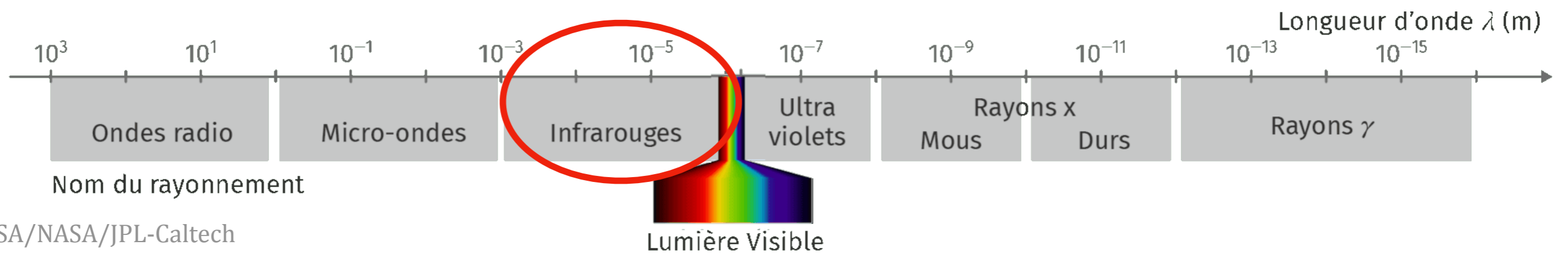
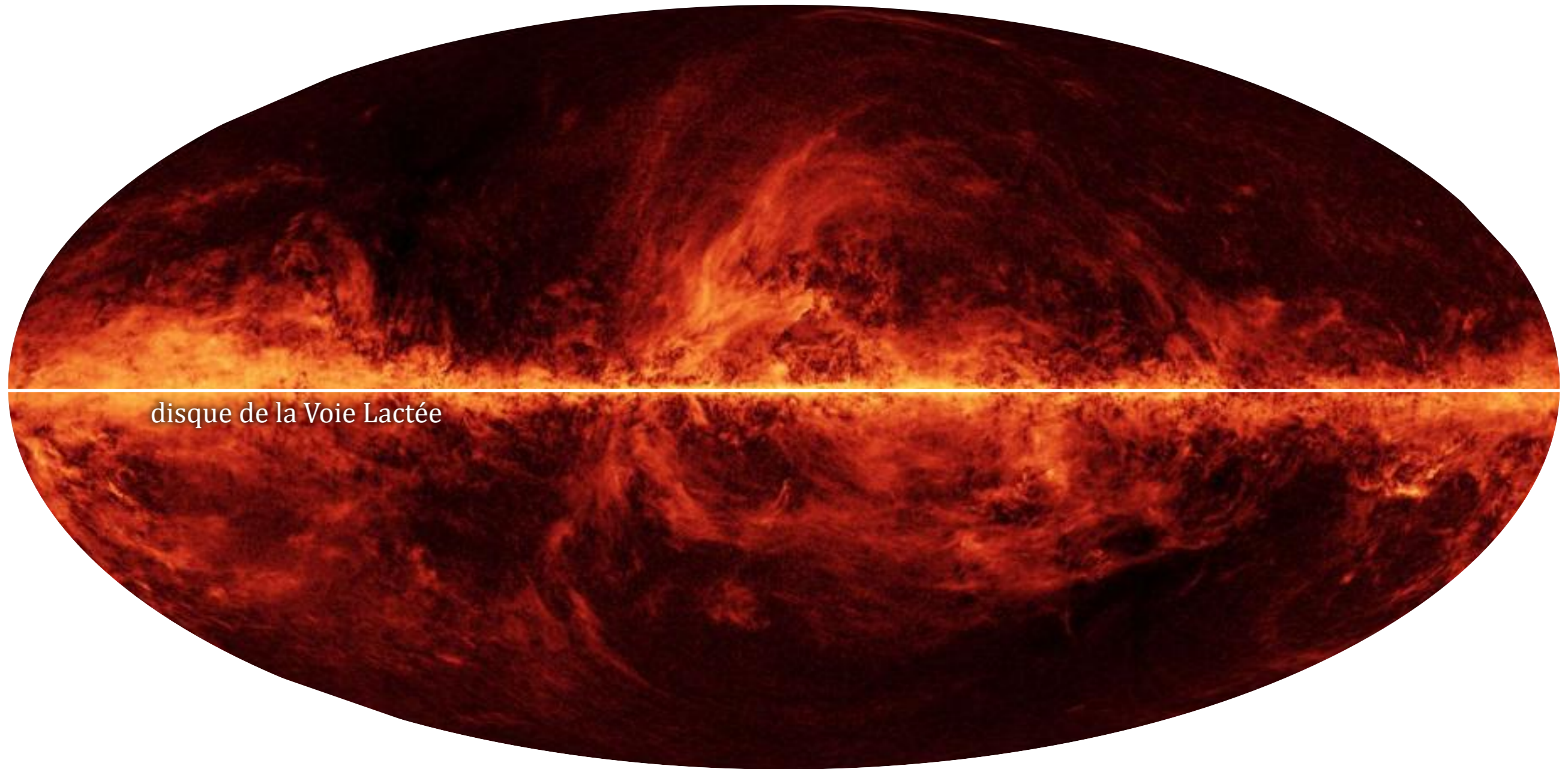


Mais il n'y a pas que les étoiles ! Le milieu interstellaire (MIS) désigne toute la matière dans les galaxies à l'exception des étoiles, des planètes et des autres corps solides (et de la matière noire, si elle existe) :

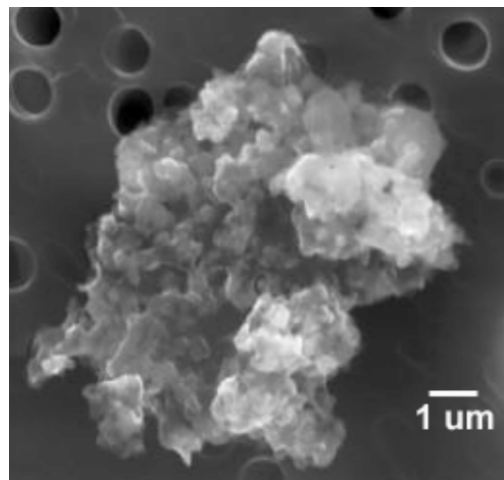
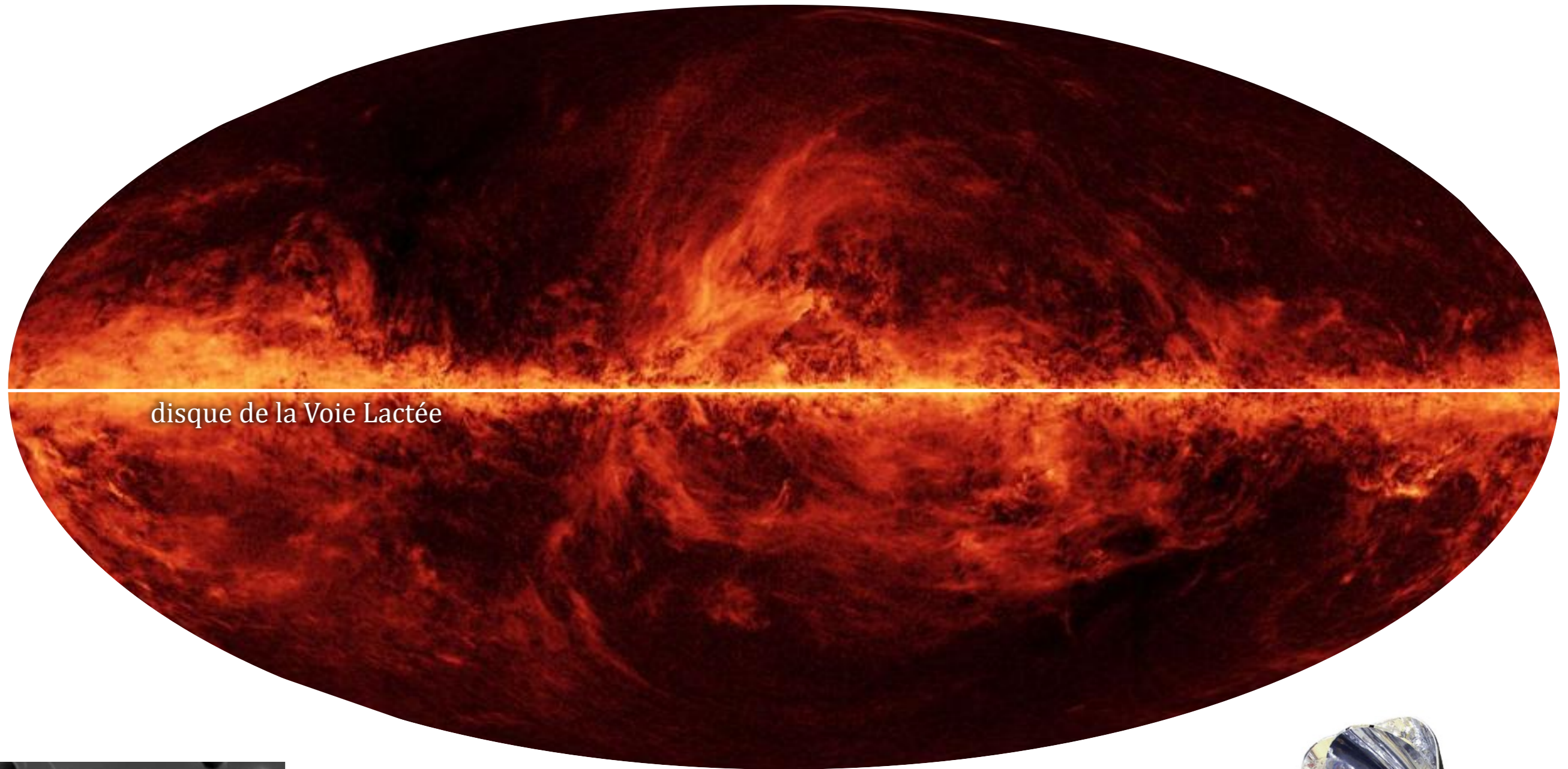
- ◆ 10-15% de la masse visible
- ◆ 99% (en masse) de gaz, 1% de poussières
- ◆ différent éléments: H, He, C, N, O, etc.
- ◆ différentes phases: ionisée, neutre, moléculaire, grains de poussières, rayons cosmiques



Phases du milieu interstellaire : les poussières



Phases du milieu interstellaire : les poussières

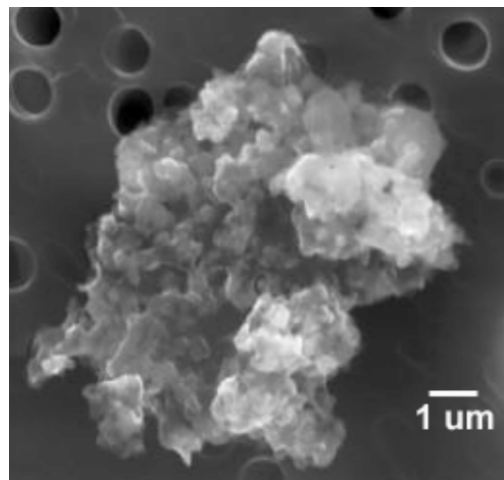


- ◆ 1% de la masse du MIS
- ◆ Différents éléments : C, Si, Mg, Fe, Al, Ti, Ca, ...
- ◆ Coeurs de taille $\sim 0.01\mu\text{m}$ faits de silicates, de fer, de carbone
- ◆ Manteaux fait de glaces d'eau, d'ammoniaque, de dioxyde de carbone, de méthane formés en acceptant des atomes (H,O, C, N)
- ◆ Catalyse certaines réactions chimiques comme la formation de H_2

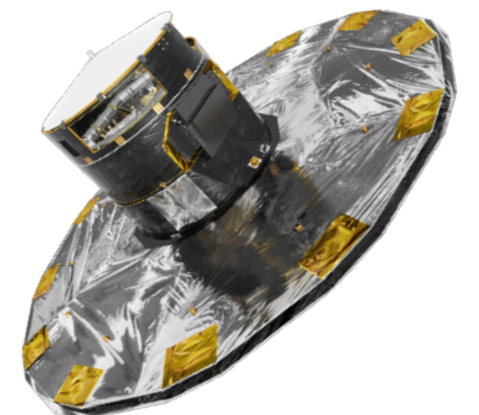


Planck telescope (ESA)

Phases du milieu interstellaire : les poussières



- ◆ 1% de la masse du MIS
- ◆ Différents éléments : C, Si, Mg, Fe, Al, Ti, Ca, ...
- ◆ Coeurs de taille $\sim 0.01\mu\text{m}$ faits de silicates, de fer, de carbone
- ◆ Manteaux fait de glaces d'eau, d'ammoniaque, de dioxyde de carbone, de méthane formés en acceptant des atomes (H,O, C, N)
- ◆ Catalyse certaines réactions chimiques comme la formation de H_2



Gaia Space Telescope (ESA)

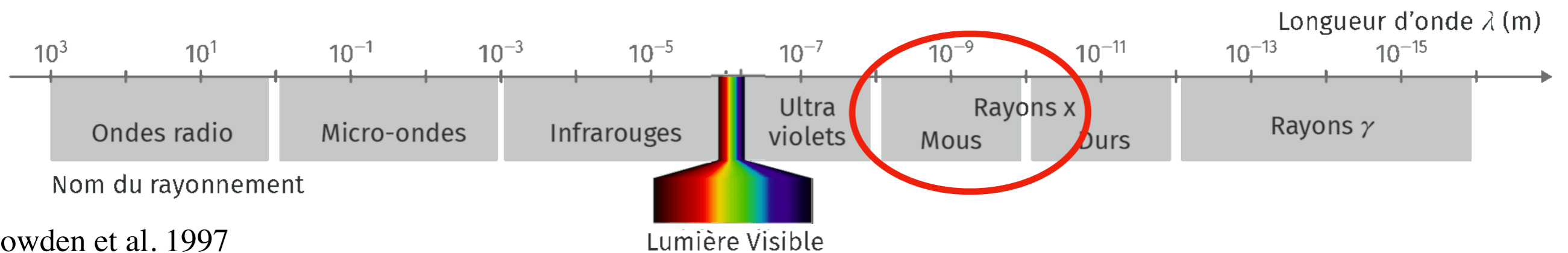
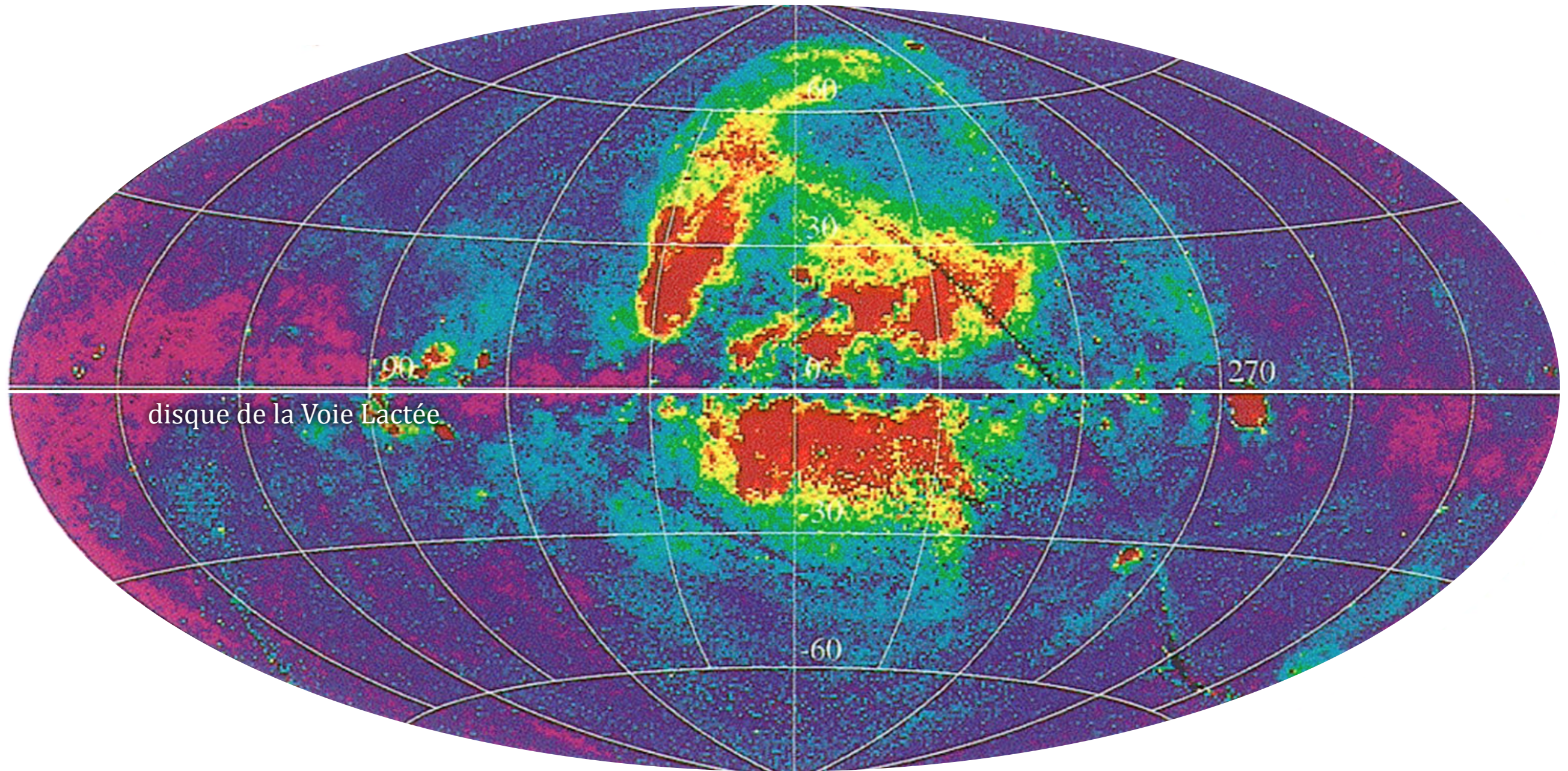
La Nébuleuse de l'Aigle, d'immenses nuages de gaz et de poussières



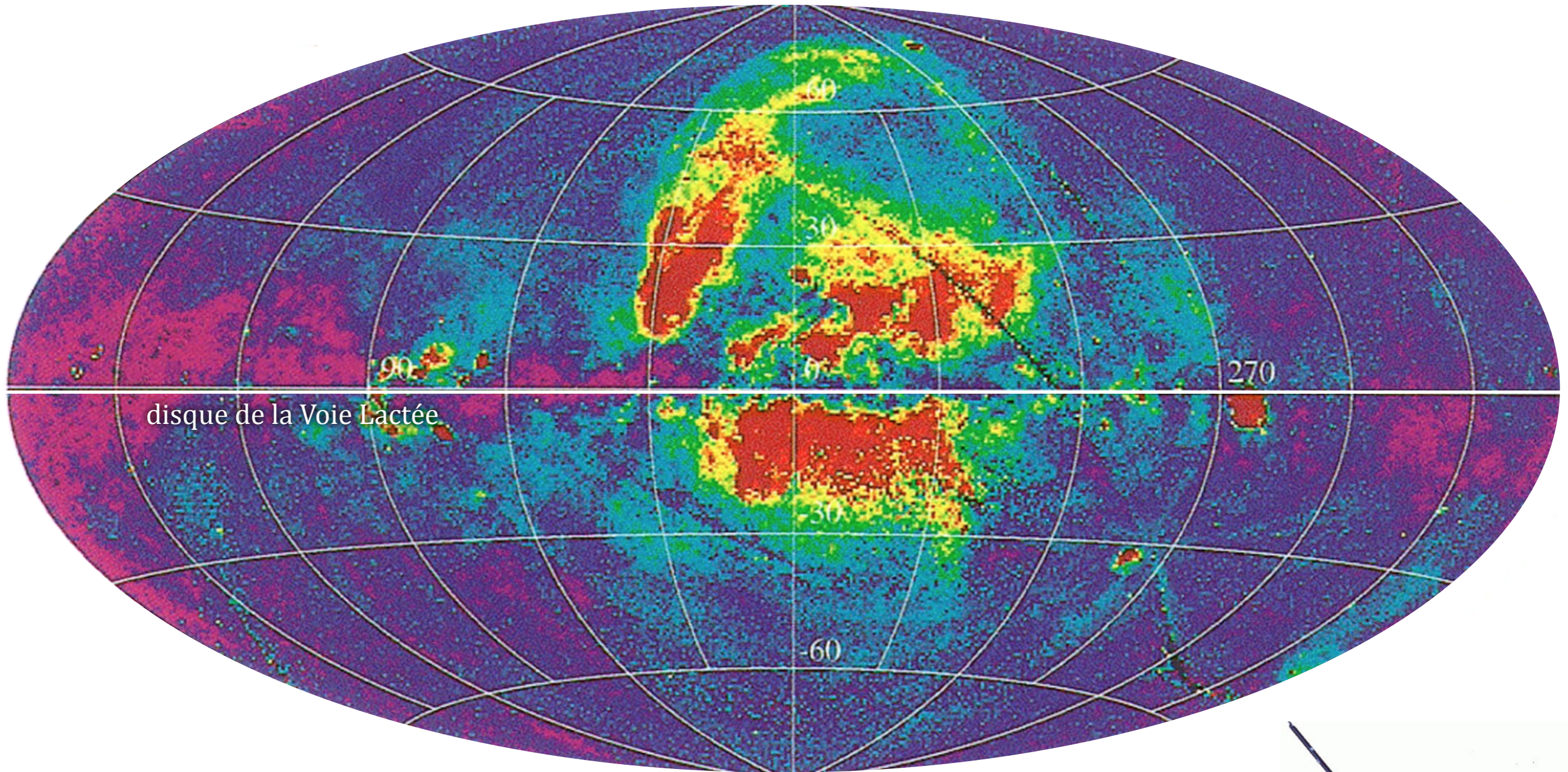
La Nébuleuse de l'Aigle, d'immenses nuages de gaz et de poussières



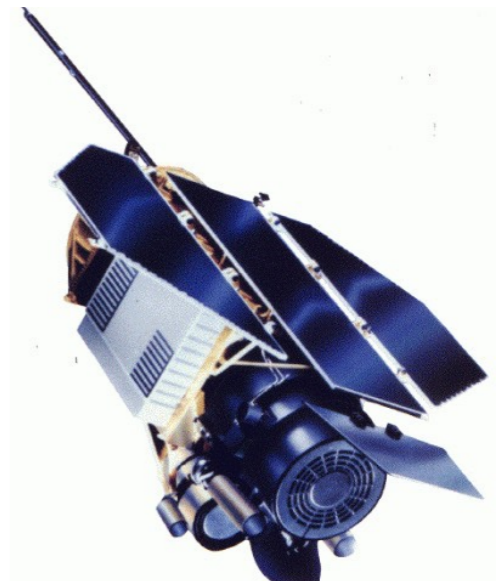
Phases du milieu interstellaire : le gaz chaud ionisé



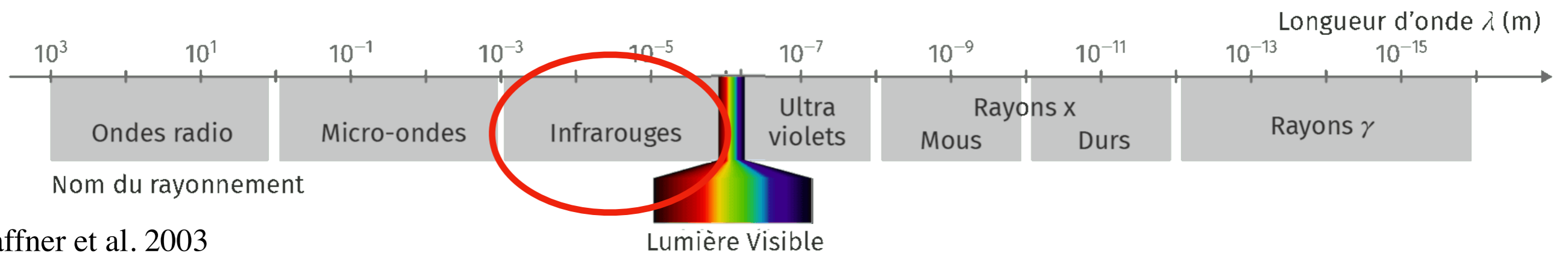
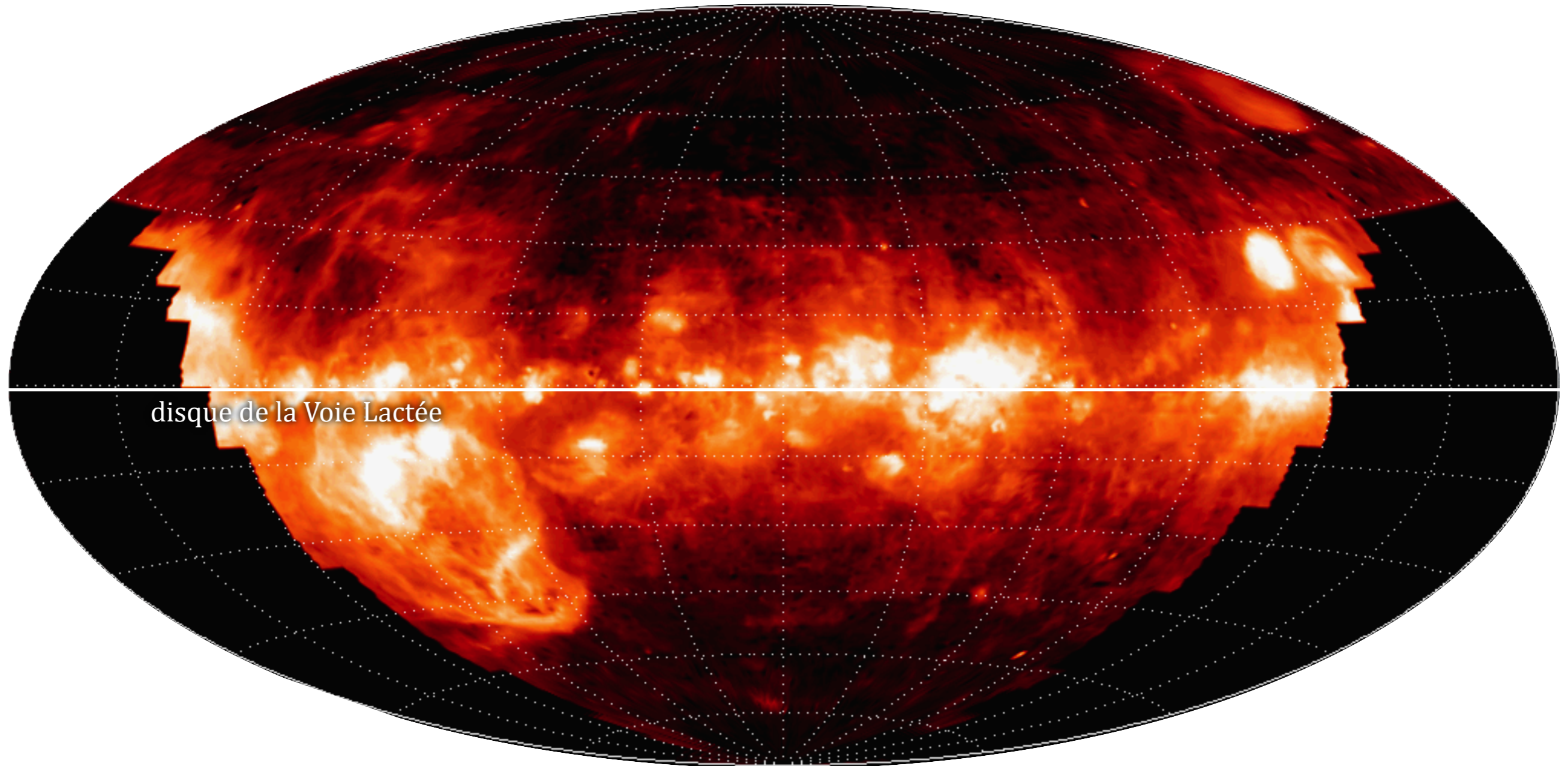
Phases du milieu interstellaire : le gaz chaud ionisé



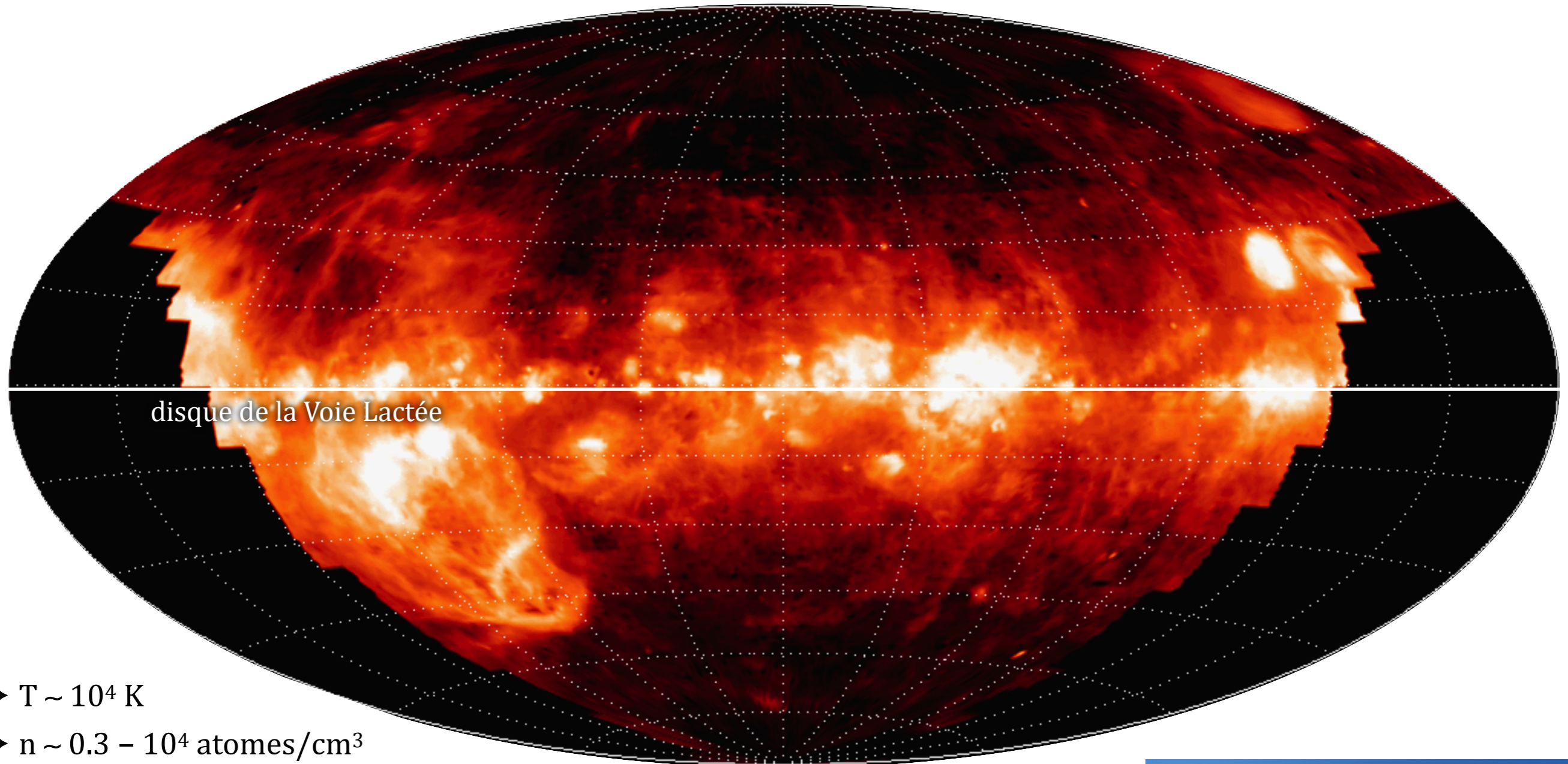
- ◆ Très chaud ($T > 5 \cdot 10^5$ K)
- ◆ Très faible densité ($n < 0.01$ atomes/cm³)
- ◆ Occupe l'essentiel du volume au dessus et en dessous du disque galactique
- ◆ Tracé par son émission rayons-X
- ◆ Presque entièrement ionisé par des chocs de supernovas, avec des degrés d'ionisation élevés (OVI, NV, CIV,...)



Phases du milieu interstellaire : l'hydrogène ionisé (H^+ , ou HII)



Phases du milieu interstellaire : l'hydrogène ionisé (H^+ , ou HII)



- ◆ $T \sim 10^4$ K
- ◆ $n \sim 0.3 - 10^4$ atomes/cm³
- ◆ Gaz photo-ionisé par les rayonnements UV des étoiles chaudes
- ◆ Tracé par la raie d'émission $H\alpha$ et des raies d'absorption UV
- ◆ Localisation :
 - Nuages denses autour des étoiles jeunes (*régions HII*)
 - Restes de supernova (*nébuleuses planétaires*)
 - Milieu plus diffus entre les nuages (*HII diffus* ou *WIM: warm ionized medium*)



CTIO/NOIRLab/NSF/AURA

Wisconsin H-Alpha Mapper

La Nébuleuse d'Orion, une zone de formation d'étoiles

reflexion du rayonnement UV

jeunes étoiles
(Amas du Trapèze)

hydrogène ionisé

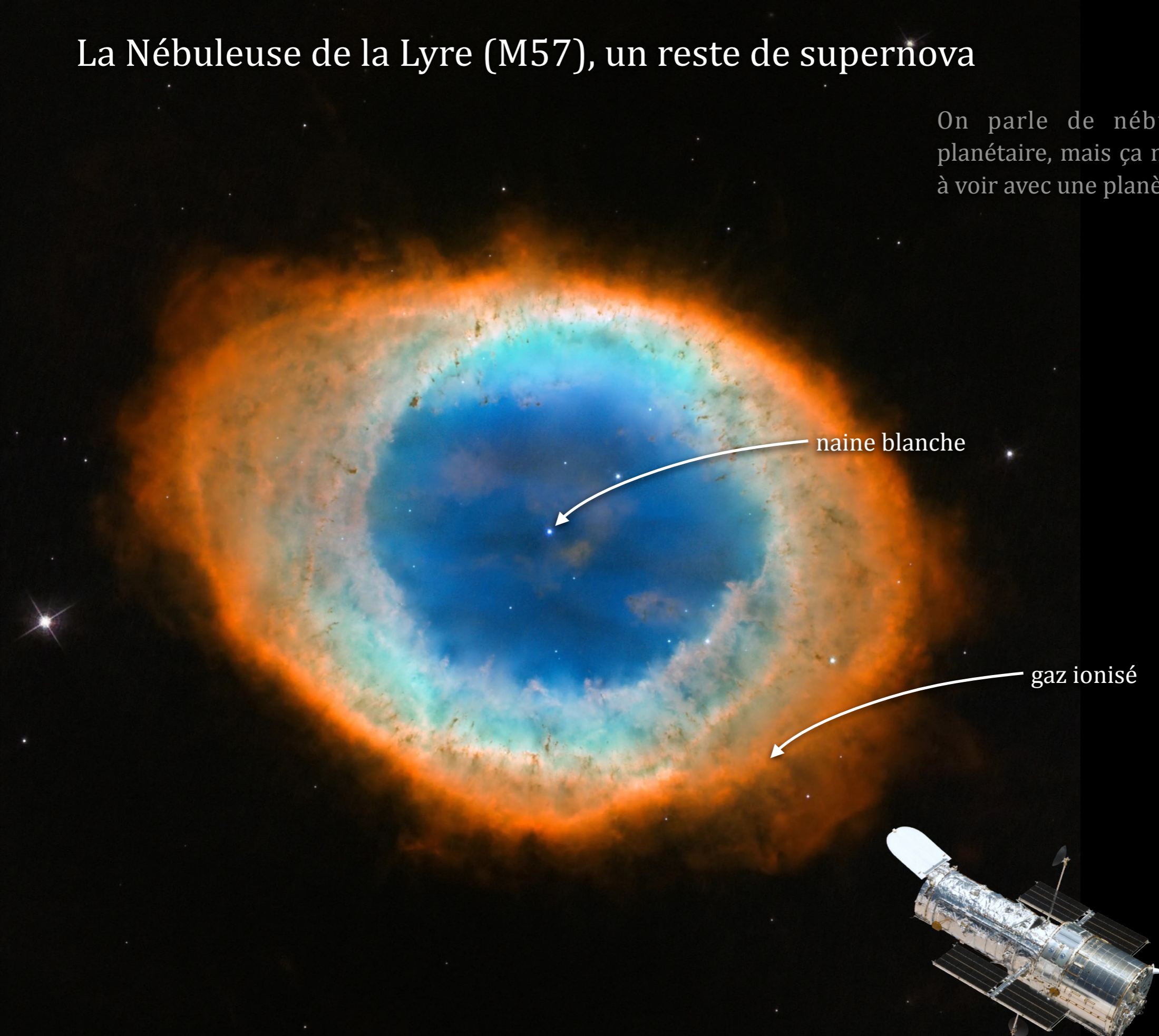
rayonnement UV ionisant

cavité



La Nébuleuse de la Lyre (M57), un reste de supernova

On parle de nébuleuse planétaire, mais ça n'a rien à voir avec une planète !



naine blanche

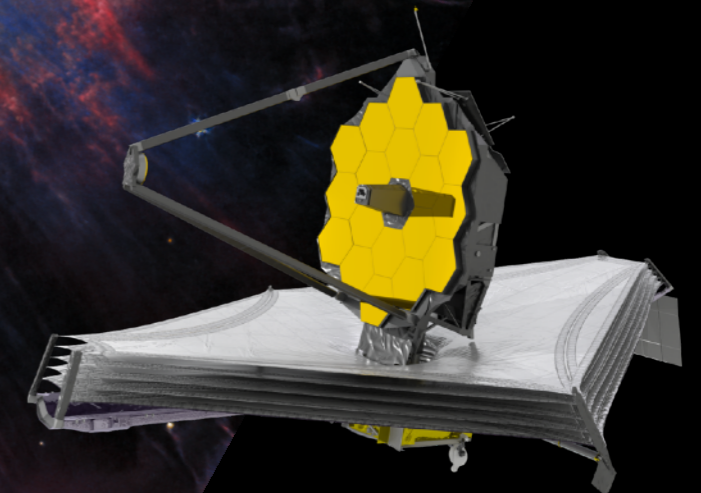
gaz ionisé

La Nébuleuse de la Lyre (M57), un reste de supernova

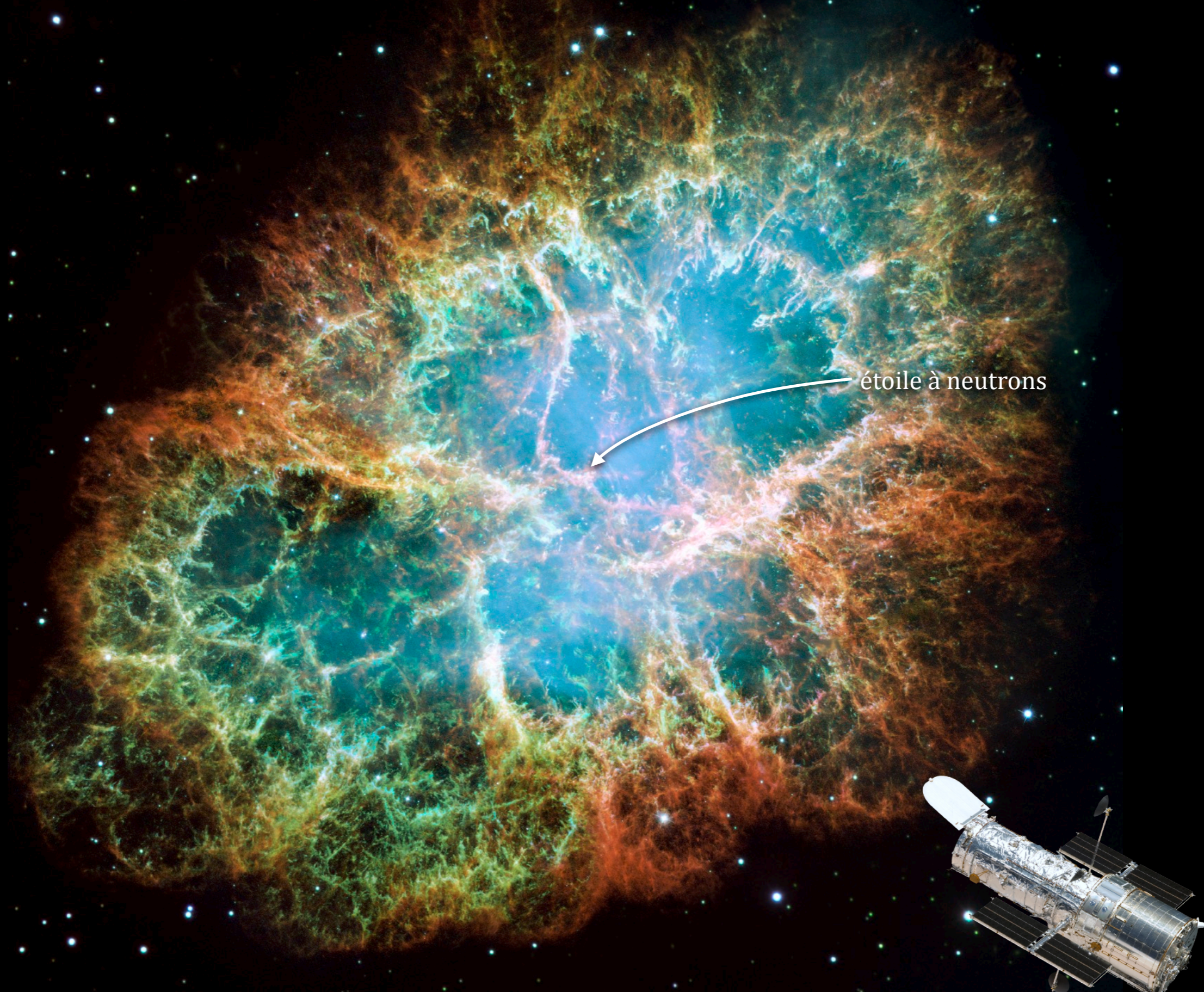
On parle de nébuleuse planétaire, mais ça n'a rien à voir avec une planète !

naine blanche

gaz ionisé

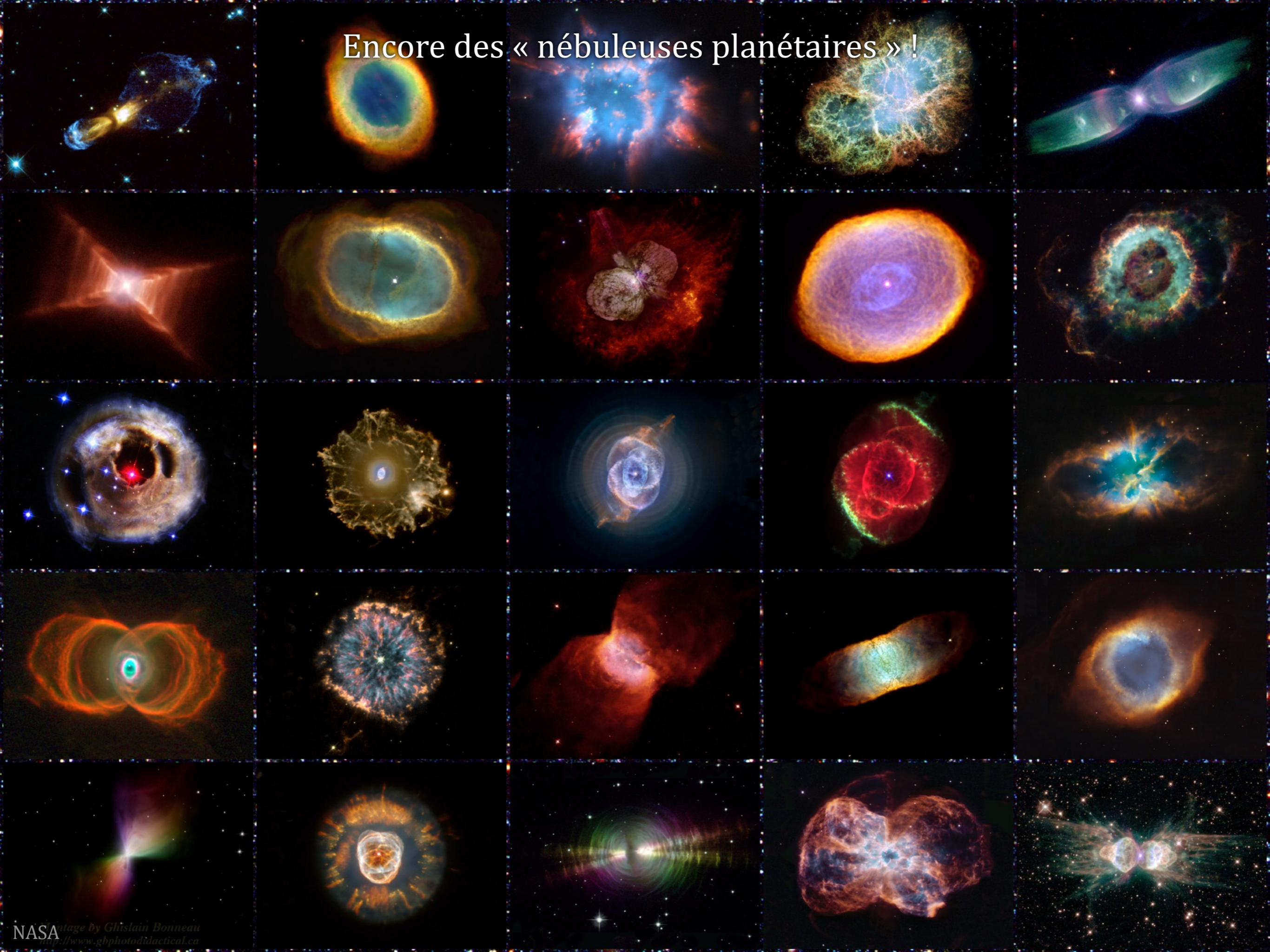


La nébuleuse du Crabe, un reste de supernova

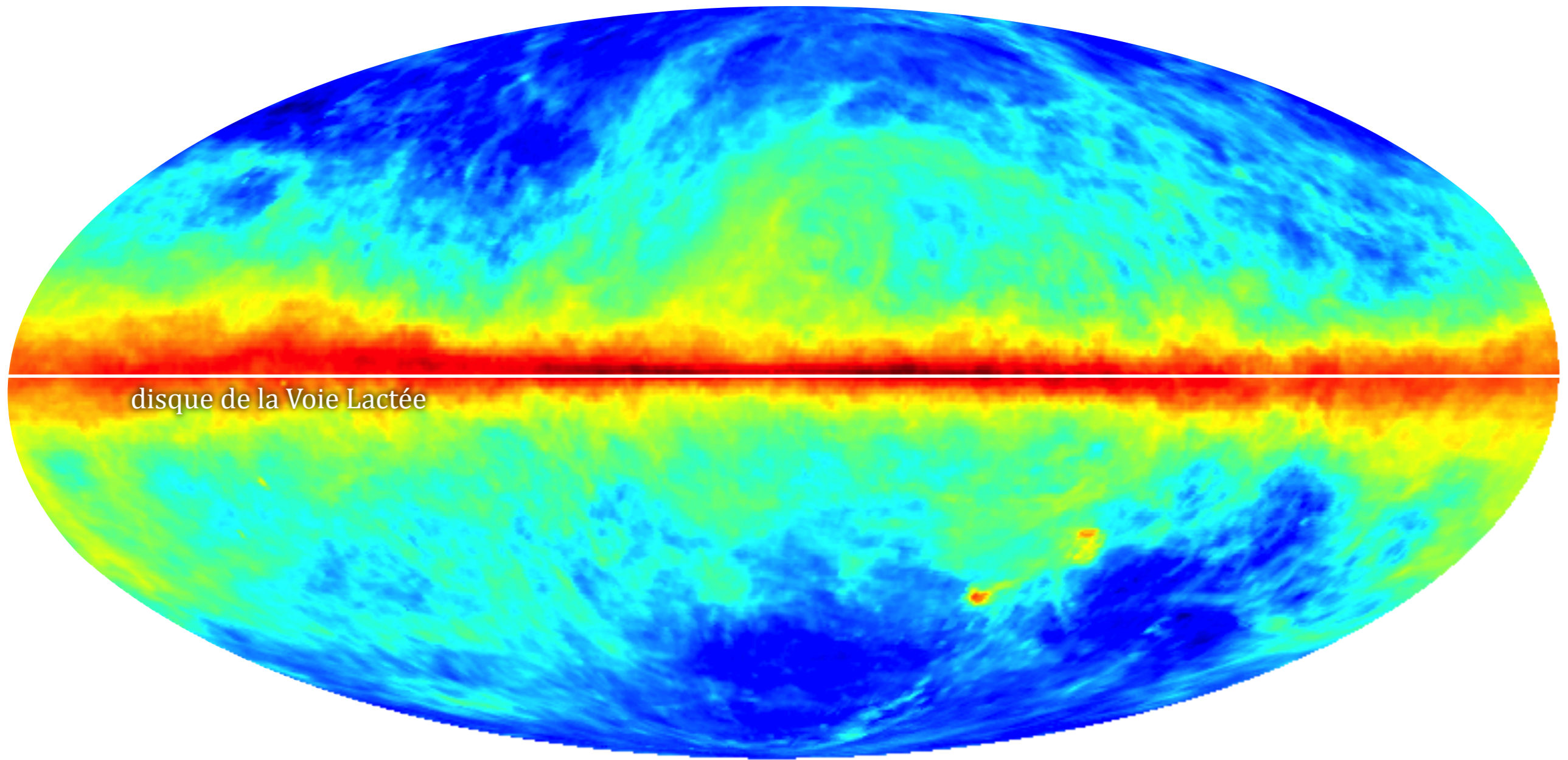


étoile à neutrons

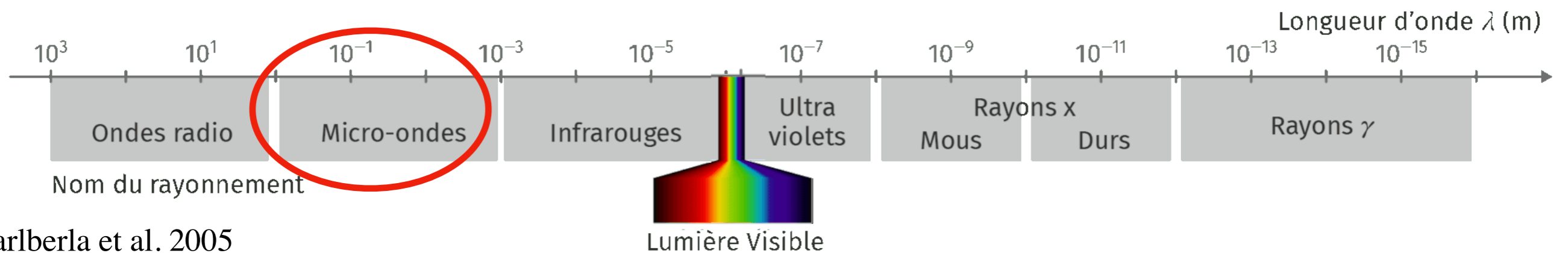
Encore des « nébuleuses planétaires » !



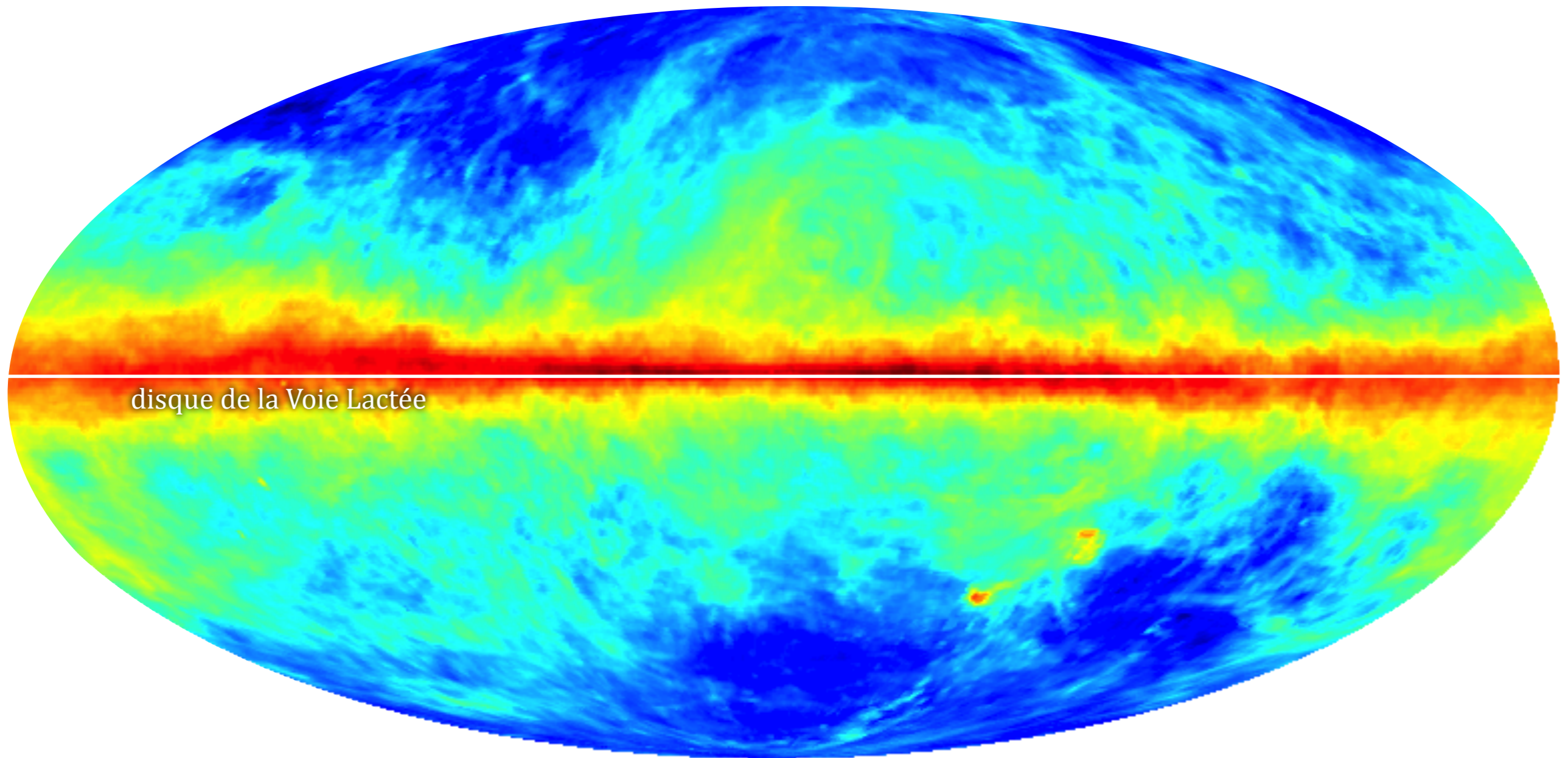
Phases du milieu interstellaire : le gaz atomique (*HI*)



disque de la Voie Lactée



Phases du milieu interstellaire : le gaz atomique (*HI*)



Gaz atomique chaud

- ◆ $T \sim 5000\text{K}$
- ◆ $n \sim 0.6 \text{ atomes/cm}^3$
- ◆ Couvre une grande partie du volume du disque ($\sim 40\%$)

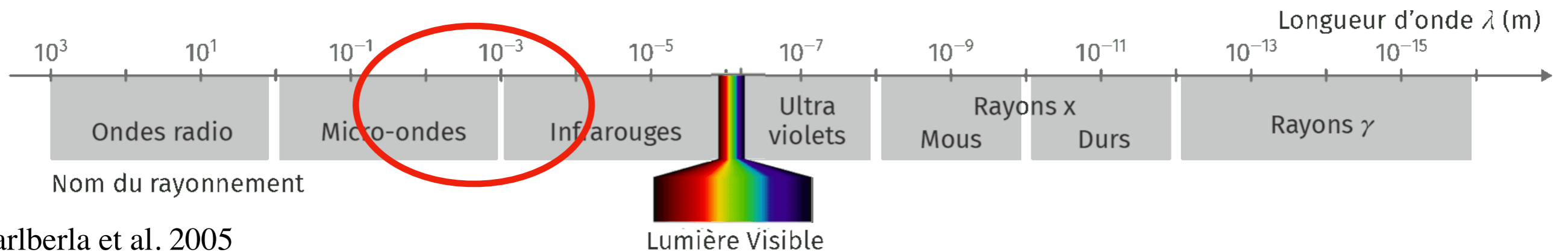
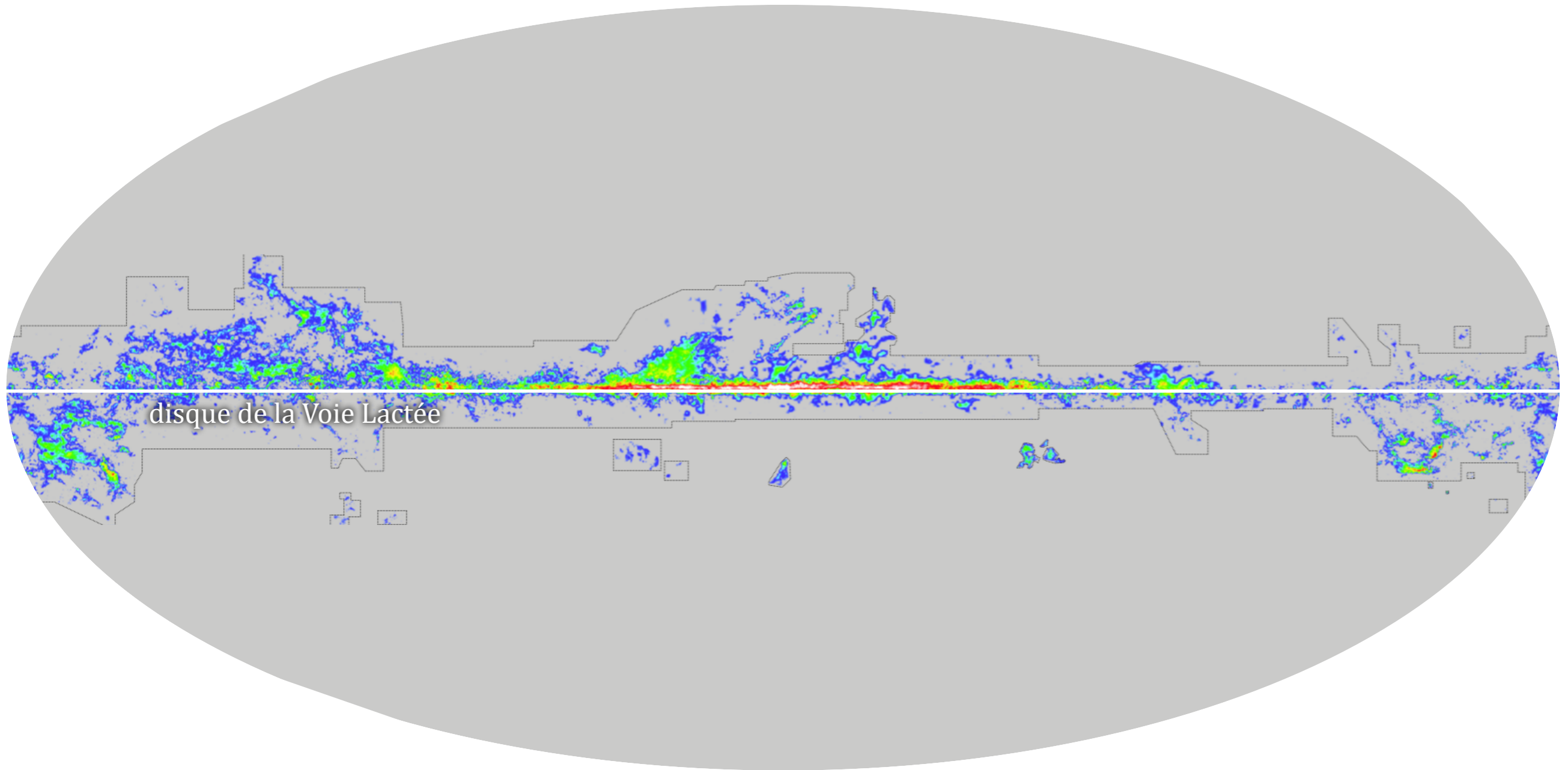
Gaz atomique froid

- ◆ $T \sim 100\text{K}$
- ◆ $n \sim 30 \text{ atoms/cm}^3$
- ◆ Couvre $\sim 1\%$ du volume du MIS local

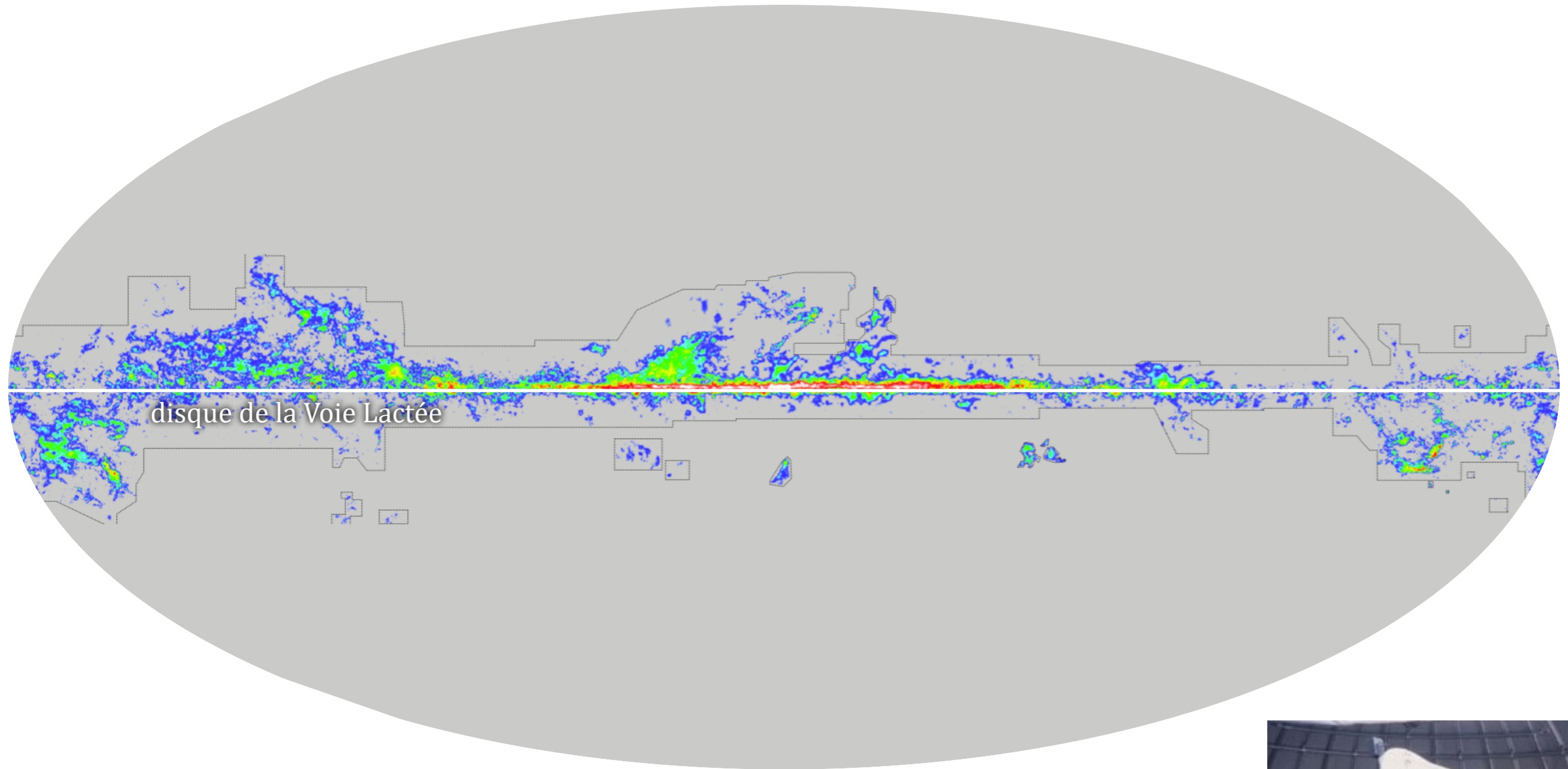


Dwingeloo telescope (25m)

Phases du milieu interstellaire : le gaz moléculaire



Phases du milieu interstellaire : le gaz moléculaire



Gaz moléculaire diffus

- ◆ $T \sim 50$ K
- ◆ $n \sim 100$ atomes/cm³

Gaz moléculaire dense

- ◆ $T \sim 10-50$ K
- ◆ $n \sim 10^3 - 10^6$ atomes/cm³
- ◆ Tracé par la molécule CO (molécule la plus abondantes après H₂)
- ◆ De nombreuses espèces moléculaires : CO, OH, NH₃, HCN, N₂H⁺, HCO⁺, CO₂, ...

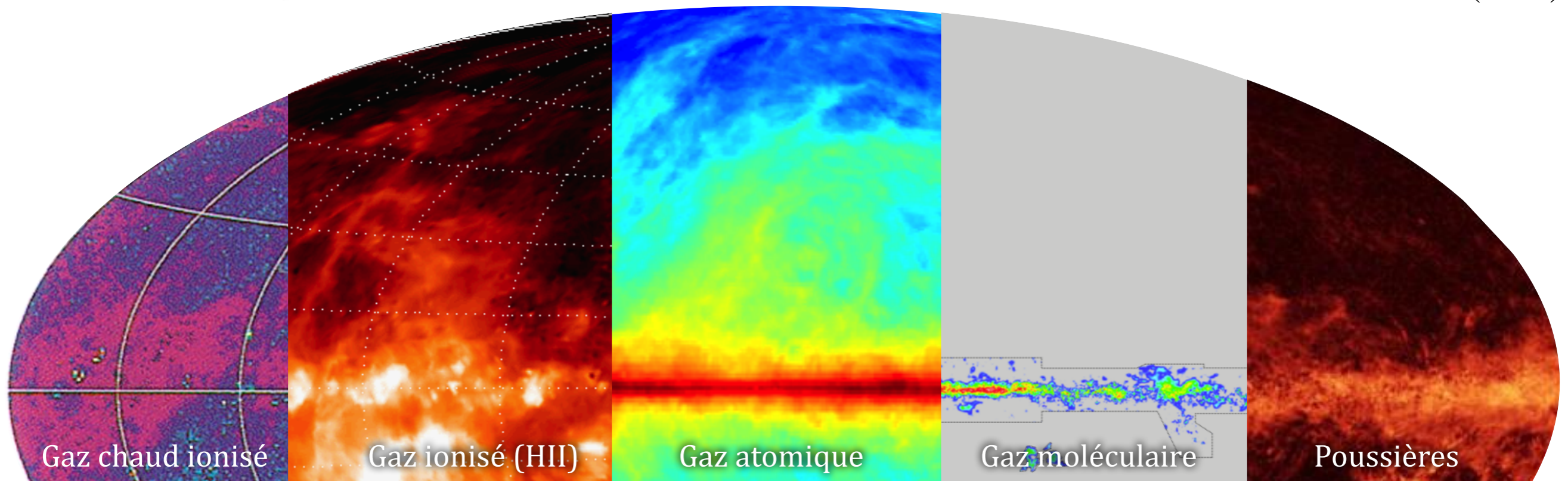


CfA 1.2m telescope

Phases du milieu interstellaire : résumé

Phase	Température (K)	Densité (atomes/cm-3)	Fraction du volume (%)	Fraction de la masse des phases de l'hydrogène (%)
Gaz chaud ionisé	$\geq 5 \cdot 10^5$	≤ 0.01	$\sim 50\%$?	
Gaz ionisé (HII)	10^4	$0.3 - 10^4$	$\sim 10\%$	23%
Gaz atomique chaud	~ 5000	~ 0.6	$\sim 40\%$	60 %
Gaz atomique froid	~ 100	~ 30	$\sim 1\%$	
Gaz moléculaire diffus	~ 50	~ 100		17 %
Gaz moléculaire dense	$10 - 50$	$10^3 - 10^6$		
Vents stellaires	$50 - 10^3$	$1 - 10^6$		
Poussières				

Draine (2011)



La barre d'Orion, à l'interface entre plusieurs phases du MIS

reflexion du rayonnement UV

jeunes étoiles
(Amas du Trapèze)

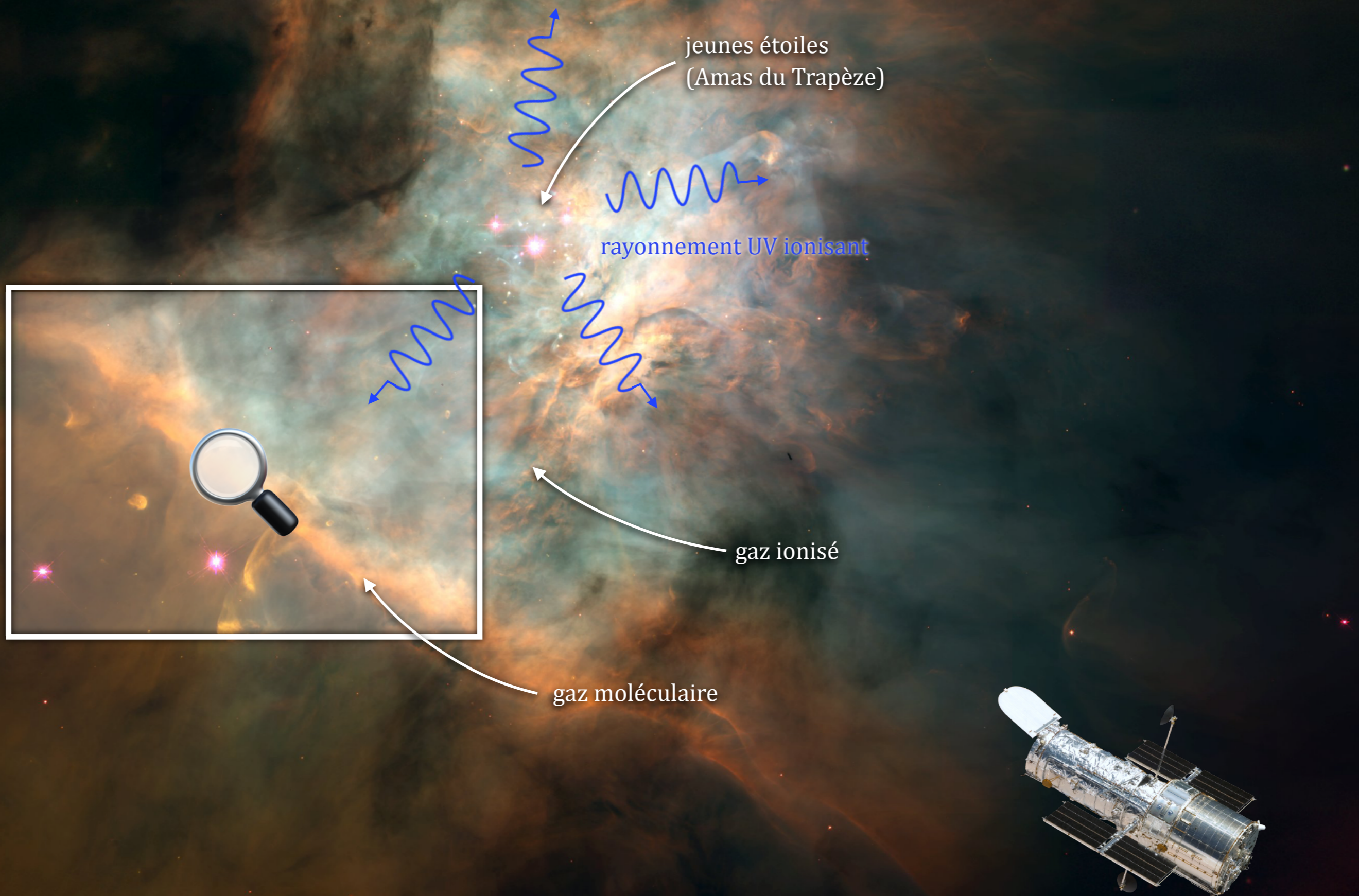
hydrogène ionisé

rayonnement UV ionisant

cavité



La barre d'Orion, à l'interface entre plusieurs phases du MIS



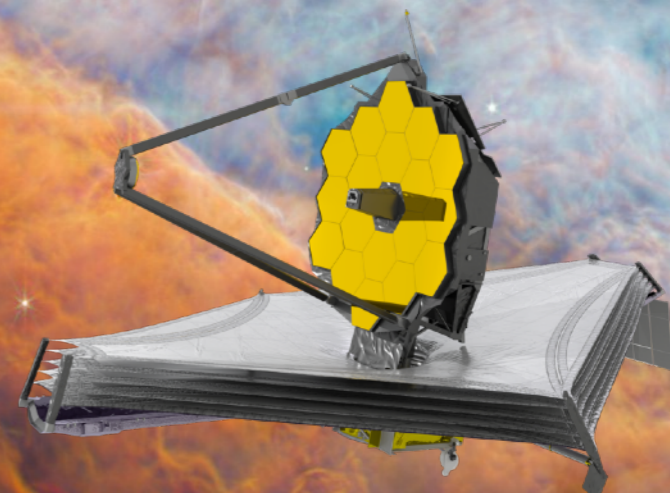
La barre d'Orion, à l'interface entre plusieurs phases du MIS



gaz ionisé

rayonnement UV ionisant

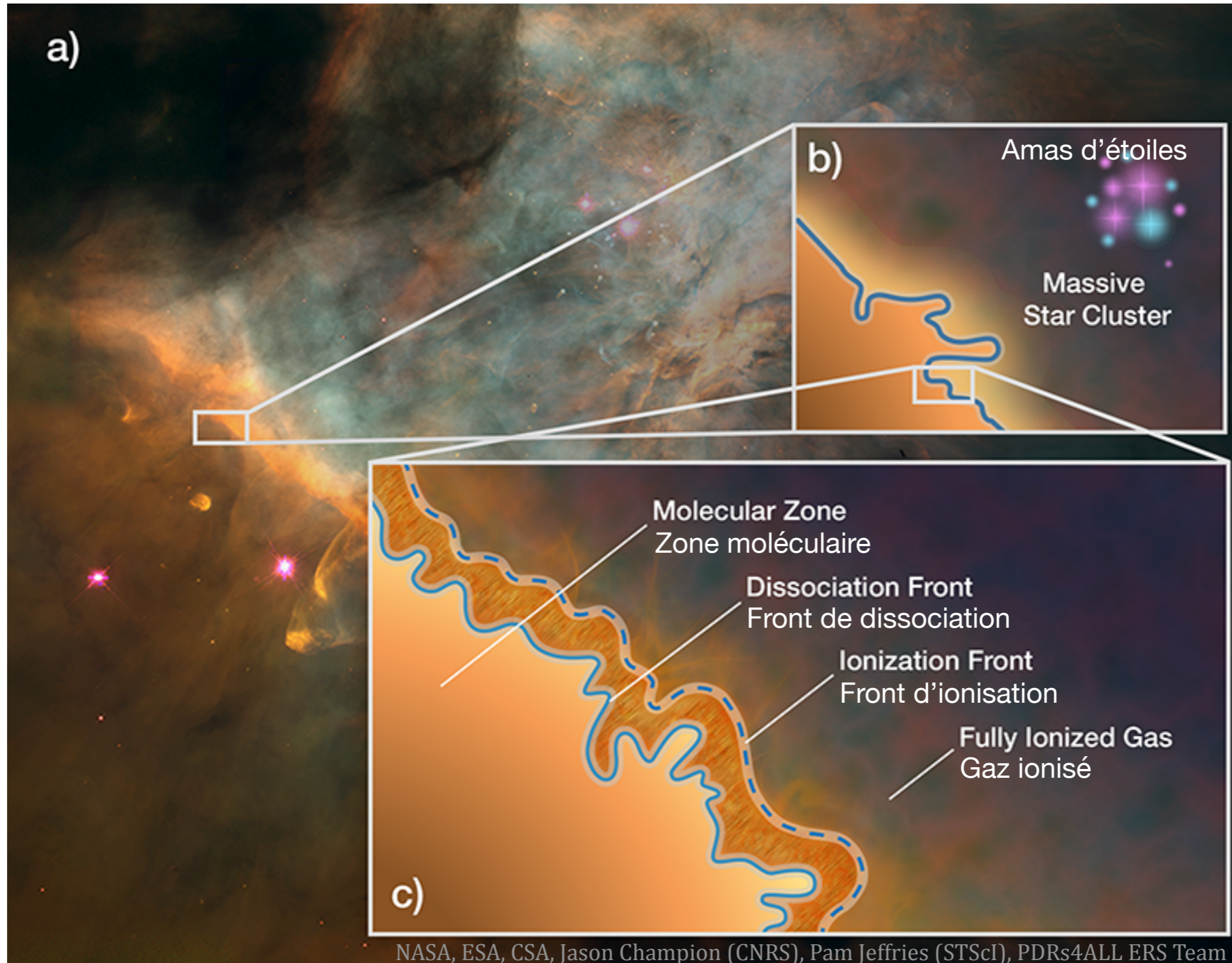
gaz moléculaire



James Webb Space Telescope (NASA/ESA)

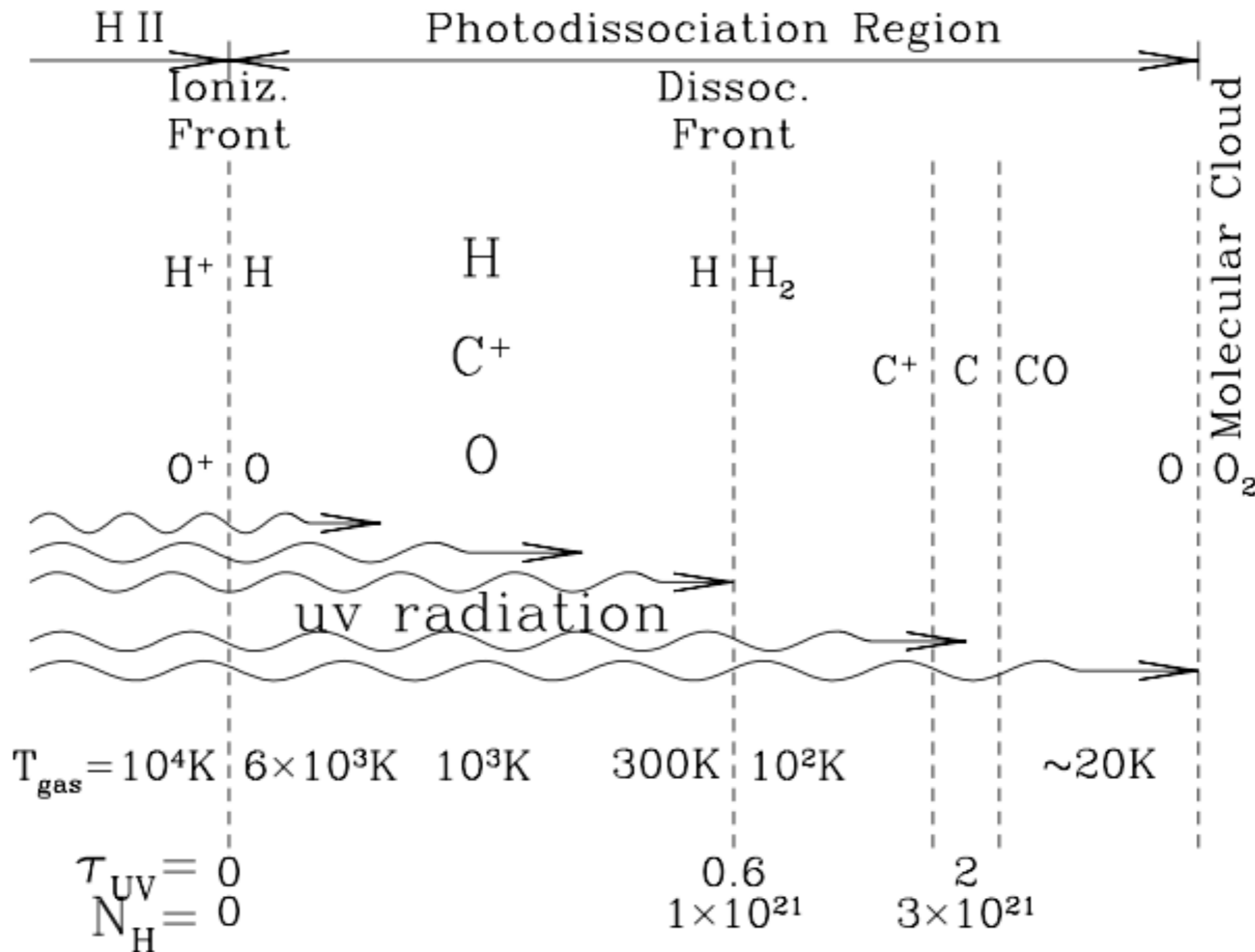
Les régions de photo-dissociation

Régions de photo-dissociation (*photo-dissociation regions, PDR*): interface entre les régions HII ionisées, irradiées par le rayonnement UV des étoiles massives, et les nuages moléculaires denses



Les régions de photo-dissociation

Régions de photo-dissociation (*photo-dissociation regions, PDR*): interface entre les régions HII ionisées, irradiées par le rayonnement UV des étoiles massives, et les nuages moléculaires denses



NGC 3324 (Nébuleuse de la Carène), une autre zone de formation d'étoiles



jeunes étoiles

rayonnement UV
ionisant et vents

gaz ionisé

cavité

gaz moléculaire
et poussières



MPG/ESO 2.2m telescope

NGC 3324 (Nébuleuse de la Carène), une autre zone de formation d'étoiles



Le Rift de l'Aigle (*Aquila Rift*), encore une zone de formation d'étoiles

proto-étoiles

jeunes étoiles

filaments de gaz froid et de poussières



Le gaz dans les galaxies et la formation des étoiles à travers les âges

Cours 1 (14/01/25) : Le milieu interstellaire et la formation des étoiles

- les différentes phases du milieu interstellaire
- les régions de photo-dissociation

Cours 2 (21/01/25) : La formation des étoiles et les phénomènes de feedback

- la formation des étoiles
- vents stellaires, explosions de supernovae, radiation
- noyaux actifs de galaxies

Cours 3 (28/01/25) : Le gaz et la formation des étoiles à travers les âges

- des galaxies qui forment des étoiles, d'autres pas
- évolution du taux de formation d'étoiles au cours de l'histoire de l'Univers
- efficacité de la formation des étoiles à différentes époques

Cours 4 (28/01/25) : Enjeux actuels et perspectives

- défis posés par les observations
- simuler la formation des étoiles et les phénomènes de feedback
- futurs observatoires