

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

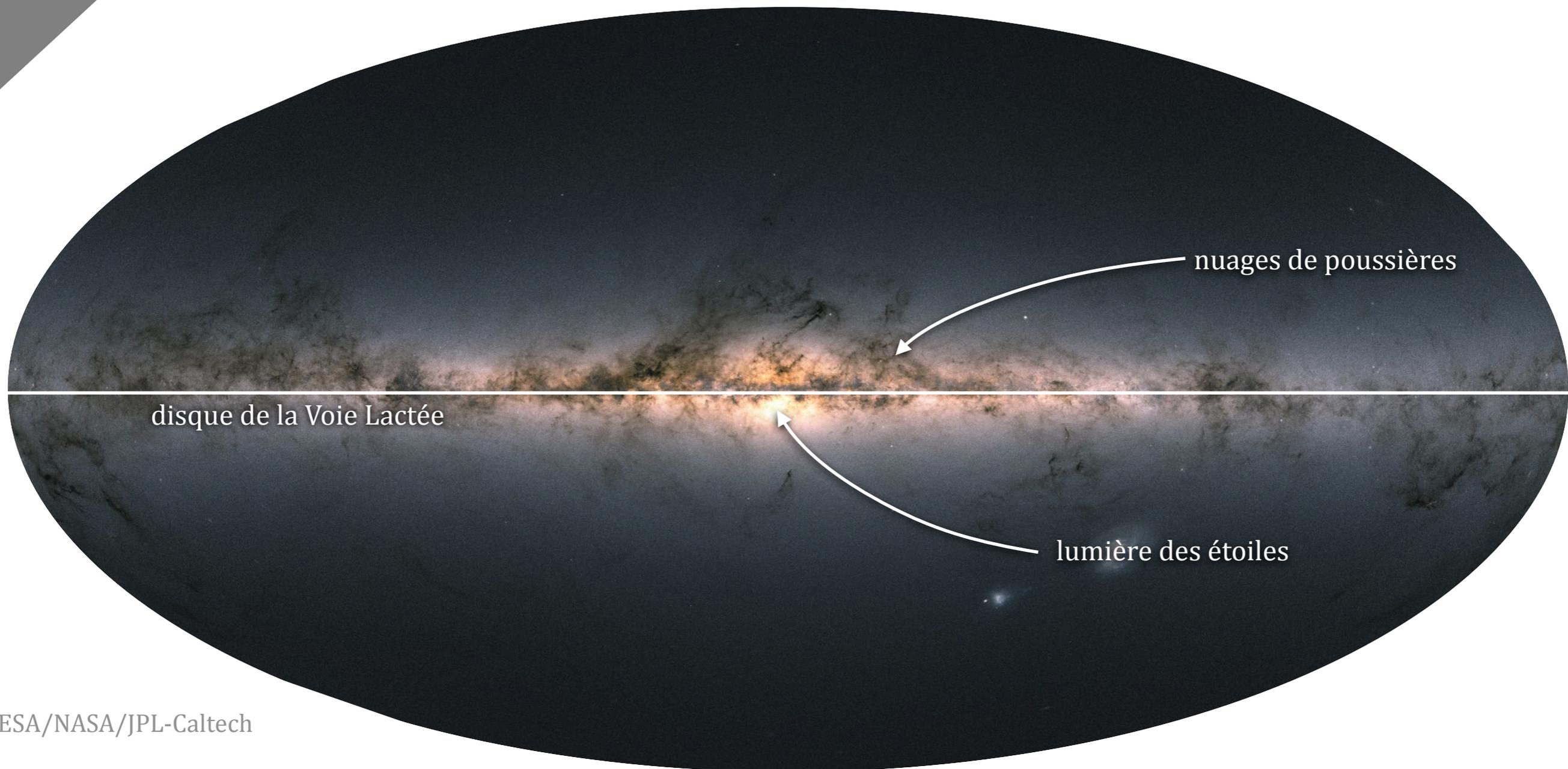
Cours 3 (28/01/25) : Le gaz et la formation des étoiles à travers les âges

- 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

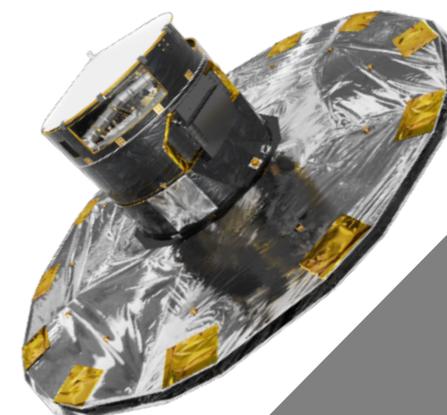
La Voie Lactée, notre Galaxie



ESA/NASA/JPL-Caltech

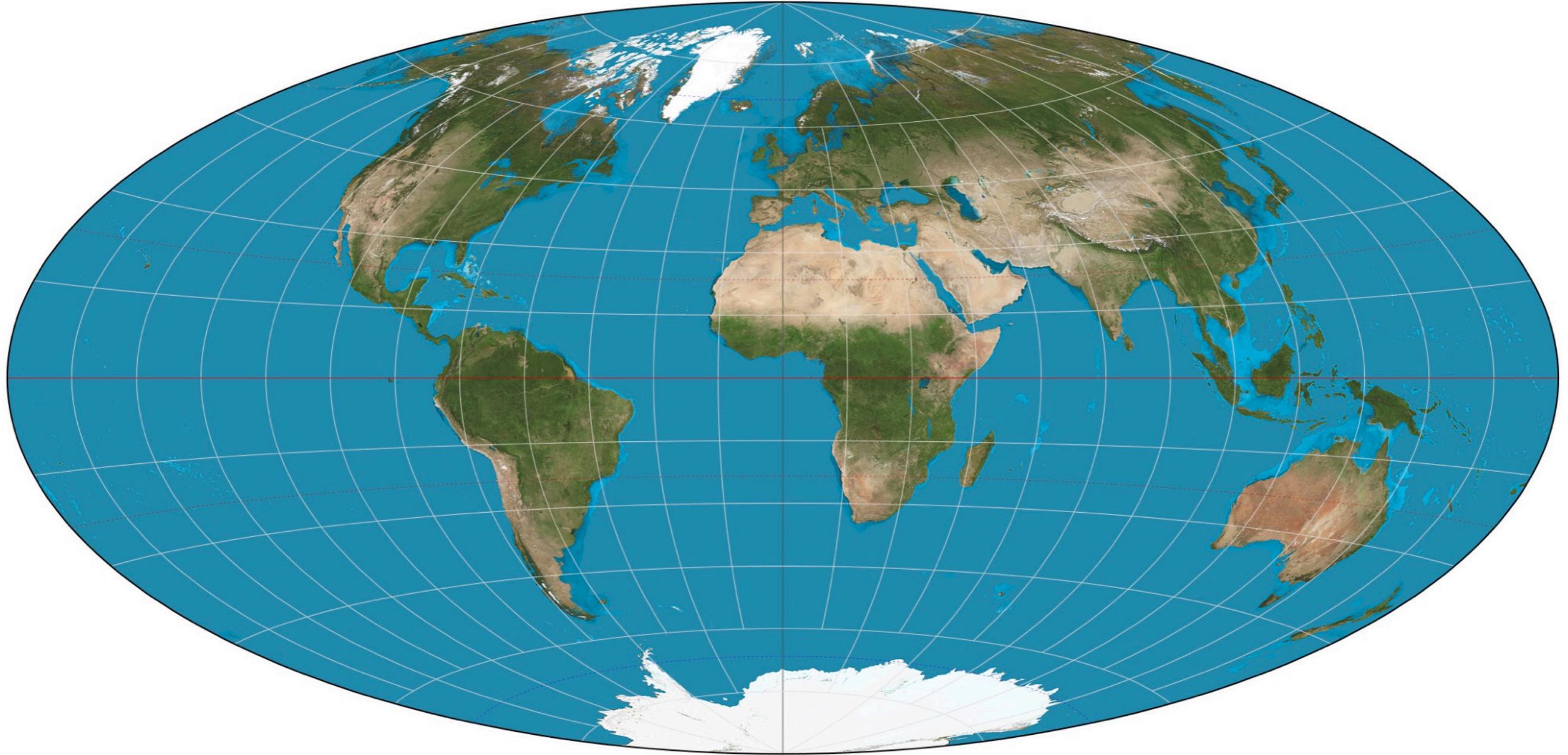
Il n’y a pas que les étoiles ! Le milieu interstellaire (MIS) désigne toute la matière dans les galaxies à l’exception des étoiles, des planètes et des autres corps solides (et de la matière noire, si elle existe) :

- ◆ 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



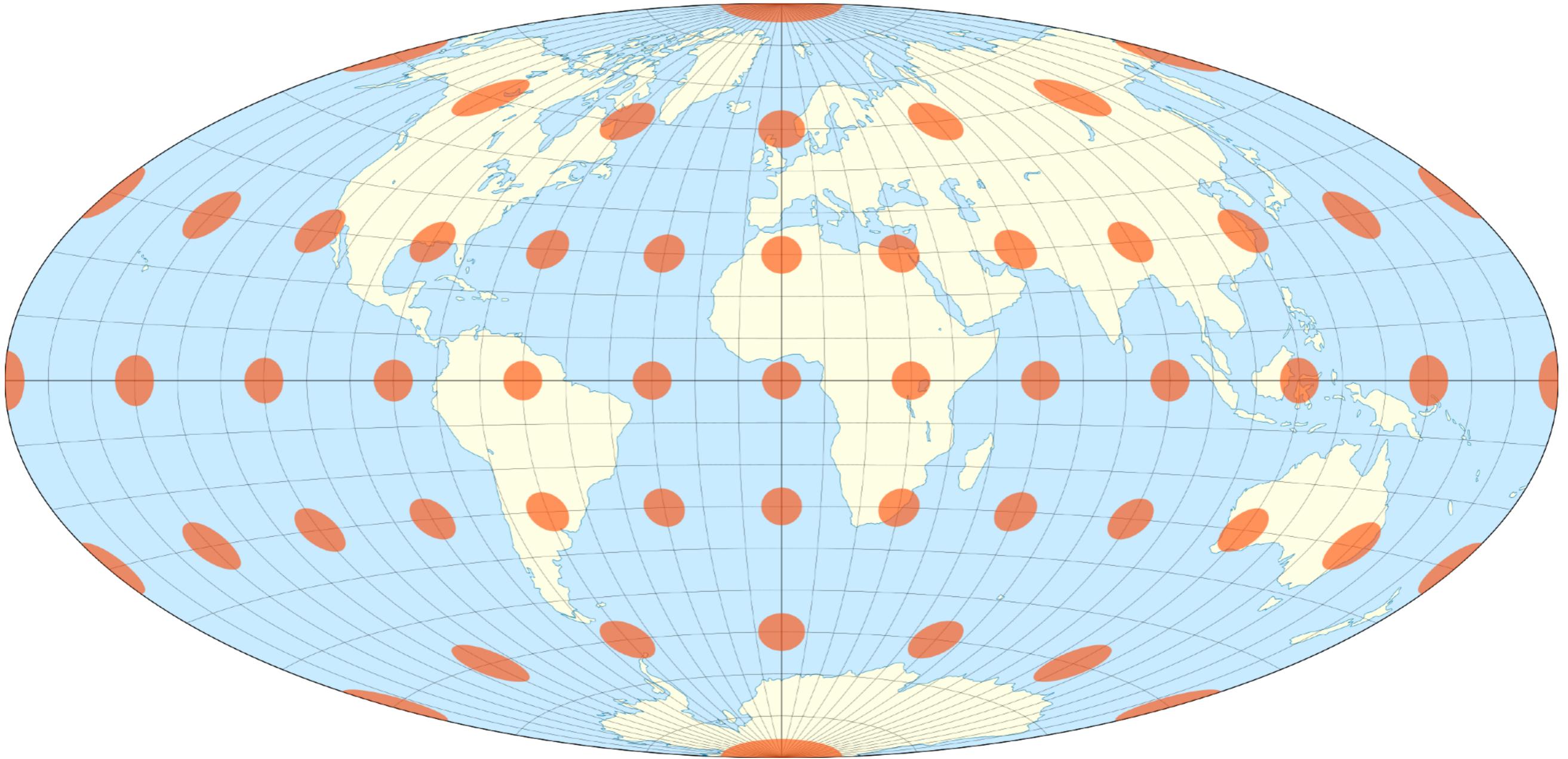
Gaia Space Telescope (ESA)

Projection d'Aïtoff



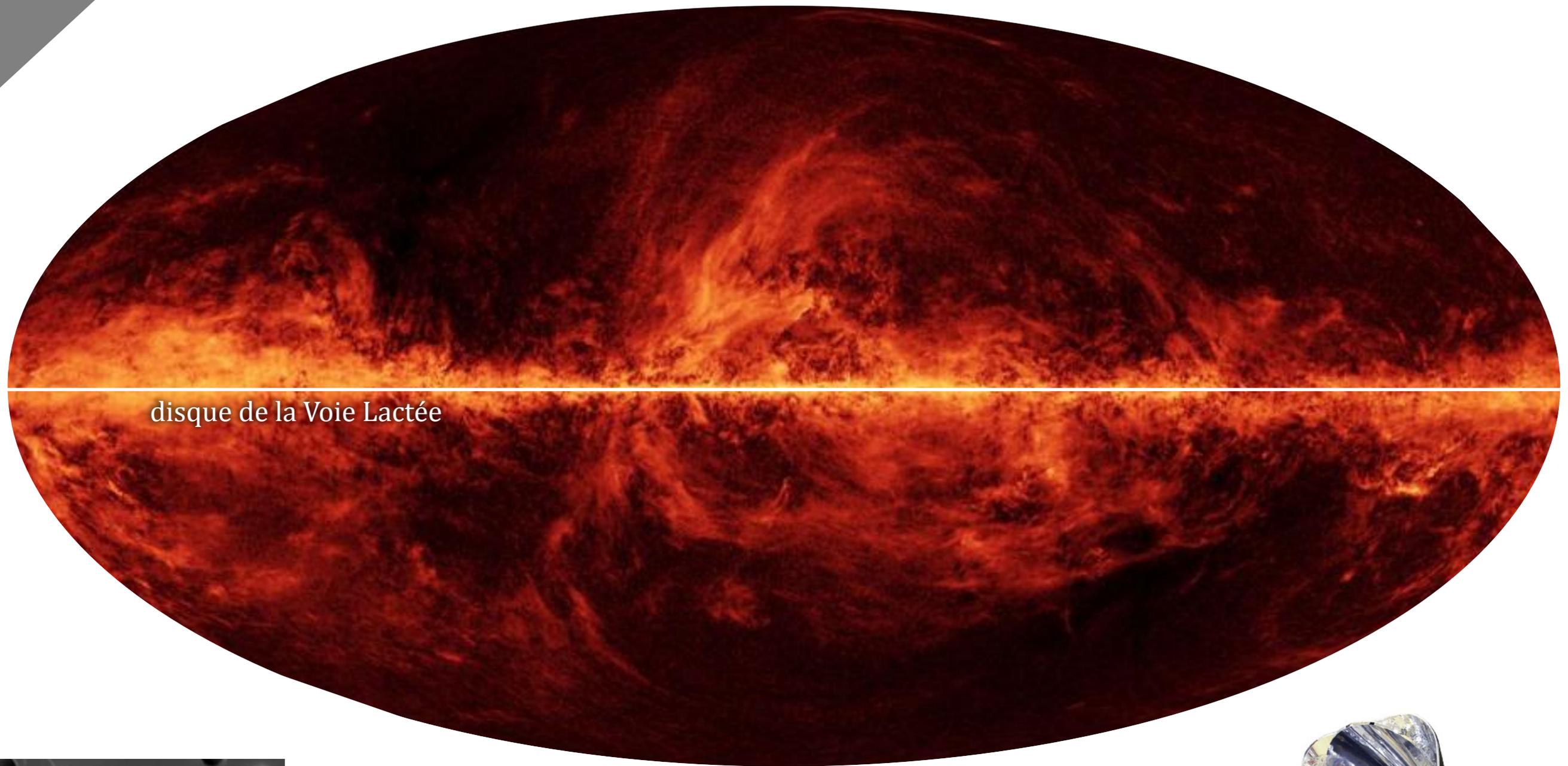
- ◆ **Avantage** : conserve les surfaces
- ◆ **Désavantage** : déformations en s'éloignant du centre de la carte

Projection d'Aïtoff

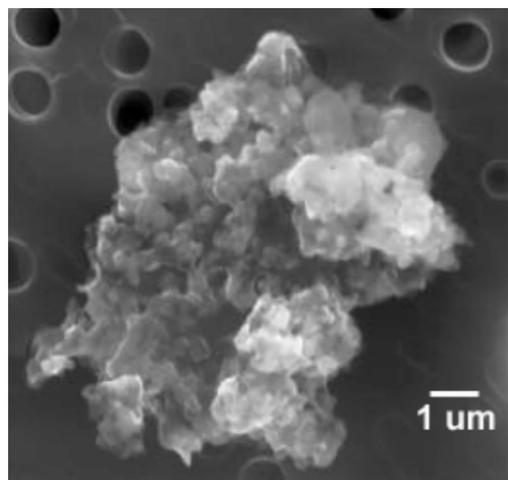


- ◆ **Avantage** : conserve les surfaces
- ◆ **Désavantage** : déformations en s'éloignant du centre de la carte

Phases du milieu interstellaire : les poussières



disque de la Voie Lactée

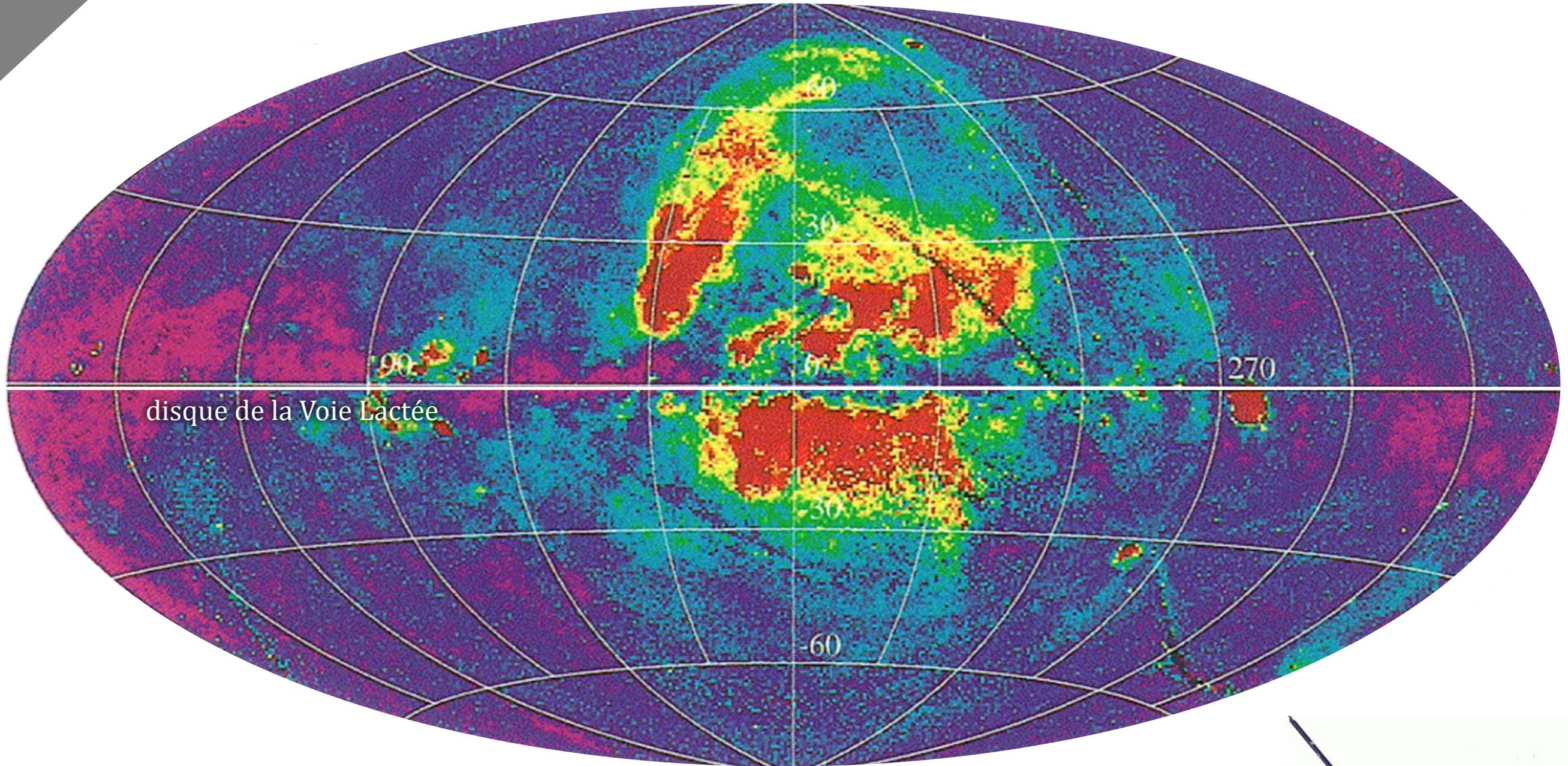


- ◆ 1% de la masse du MIS
- ◆ Différents éléments : C, Si, Mg, Fe, Al, Ti, Ca, ...
- ◆ Coeurs de taille $\sim 0.01\mu\text{m}$ faits de silicates, de fer, de carbone
- ◆ Manteaux fait de glaces d'eau, d'ammoniaque, de dioxyde de carbone, de méthane formés en acceptant des atomes (H,O, C, N)
- ◆ Catalyse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



Planck telescope (ESA)

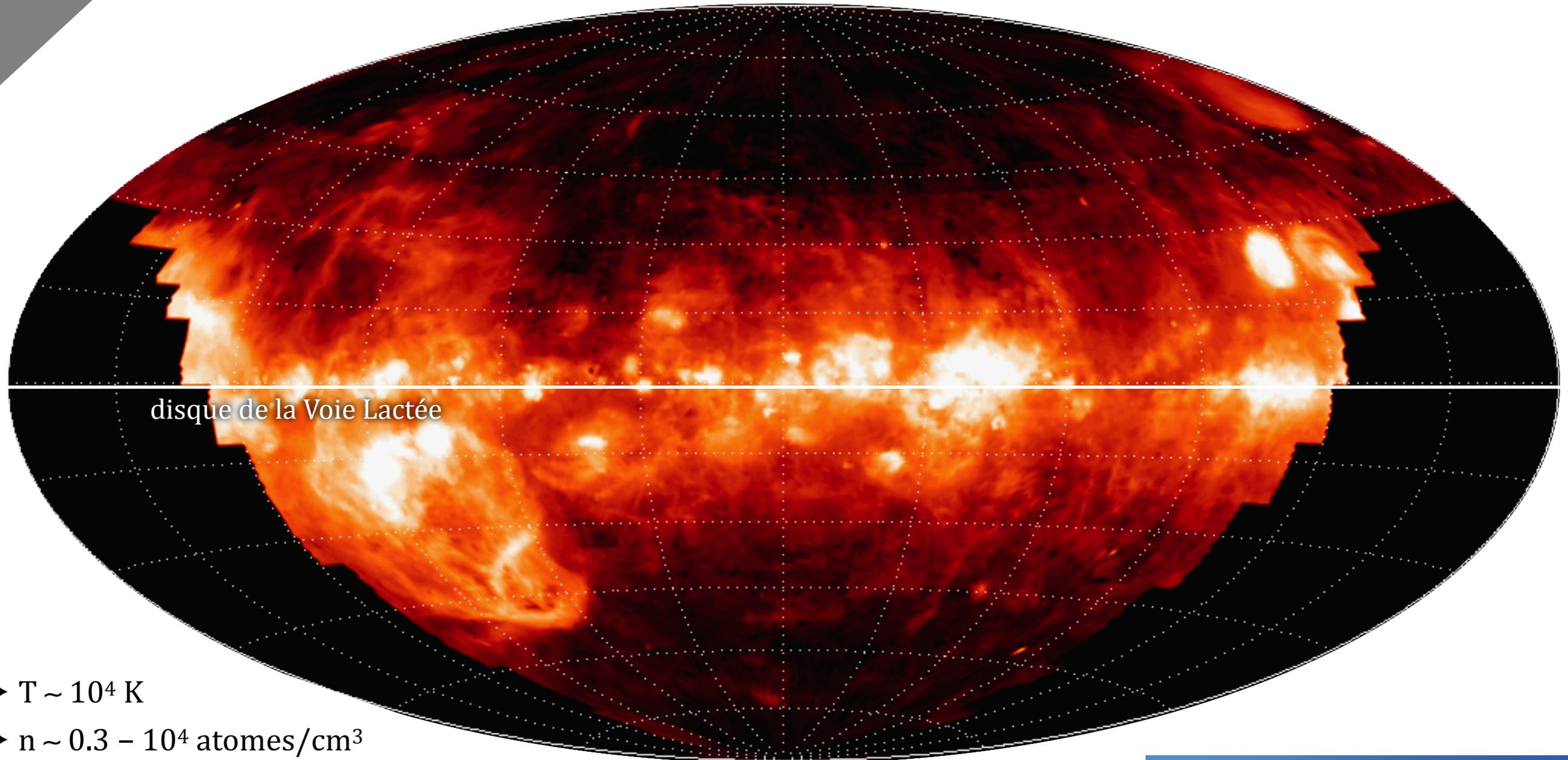
Phases du milieu interstellaire : le gaz chaud ionisé



- ◆ 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)



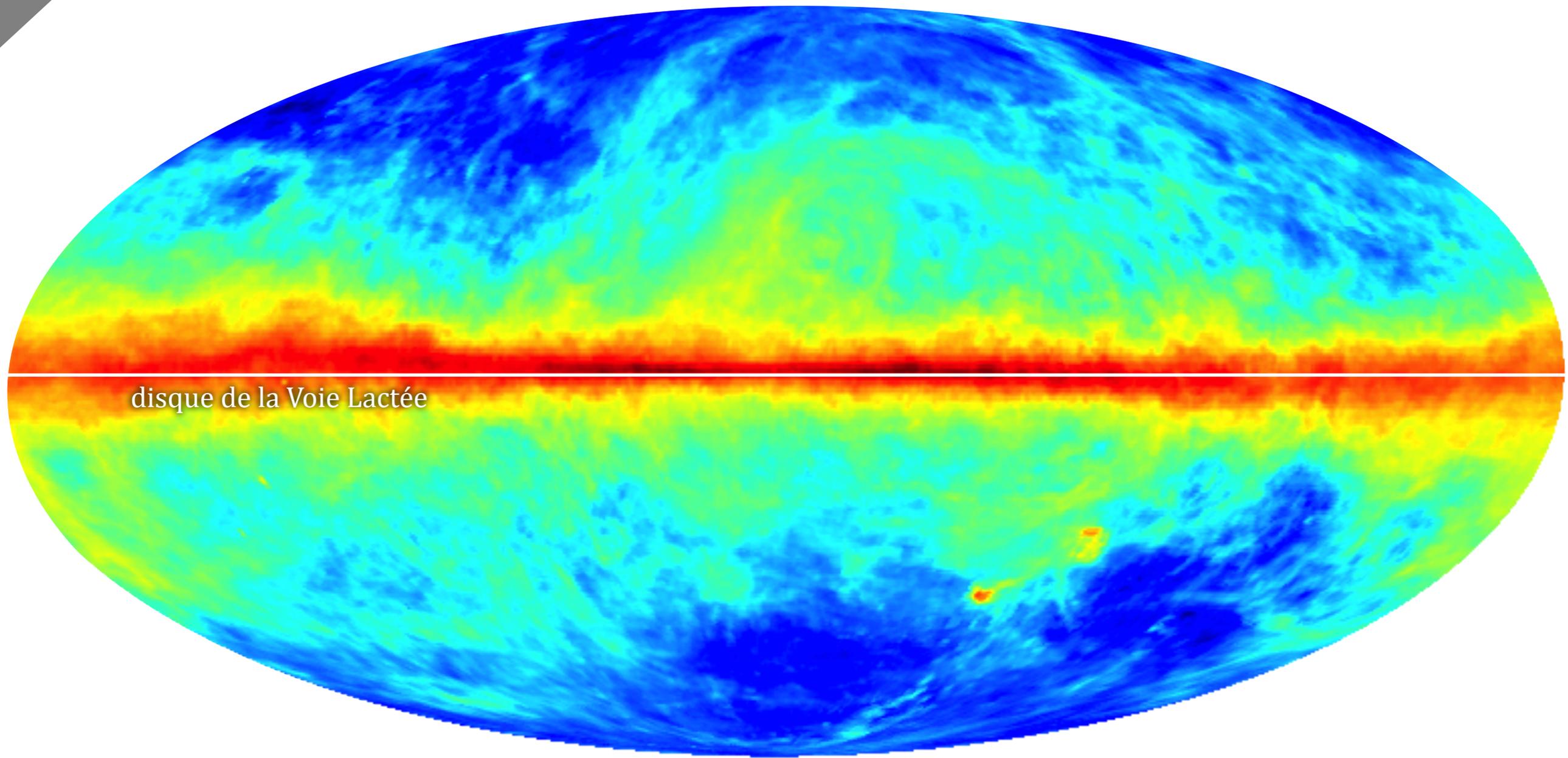
- ◆ $T \sim 10^4$ K
- ◆ $n \sim 0.3 - 10^4$ atomes/cm³
- ◆ Gaz photo-ionisé par les rayonnements UV des étoiles chaudes
- ◆ Tracé par la raie d'émission $H\alpha$ et des raies d'absorption UV
- ◆ Localisation :
 - Nuages denses autour des étoiles jeunes (*régions HII*)
 - Restes de supernova (*nébuleuses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



CTIO/NOIRLab/NSF/AURA

Wisconsin H-Alpha Mapper

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



disque de la Voie Lactée

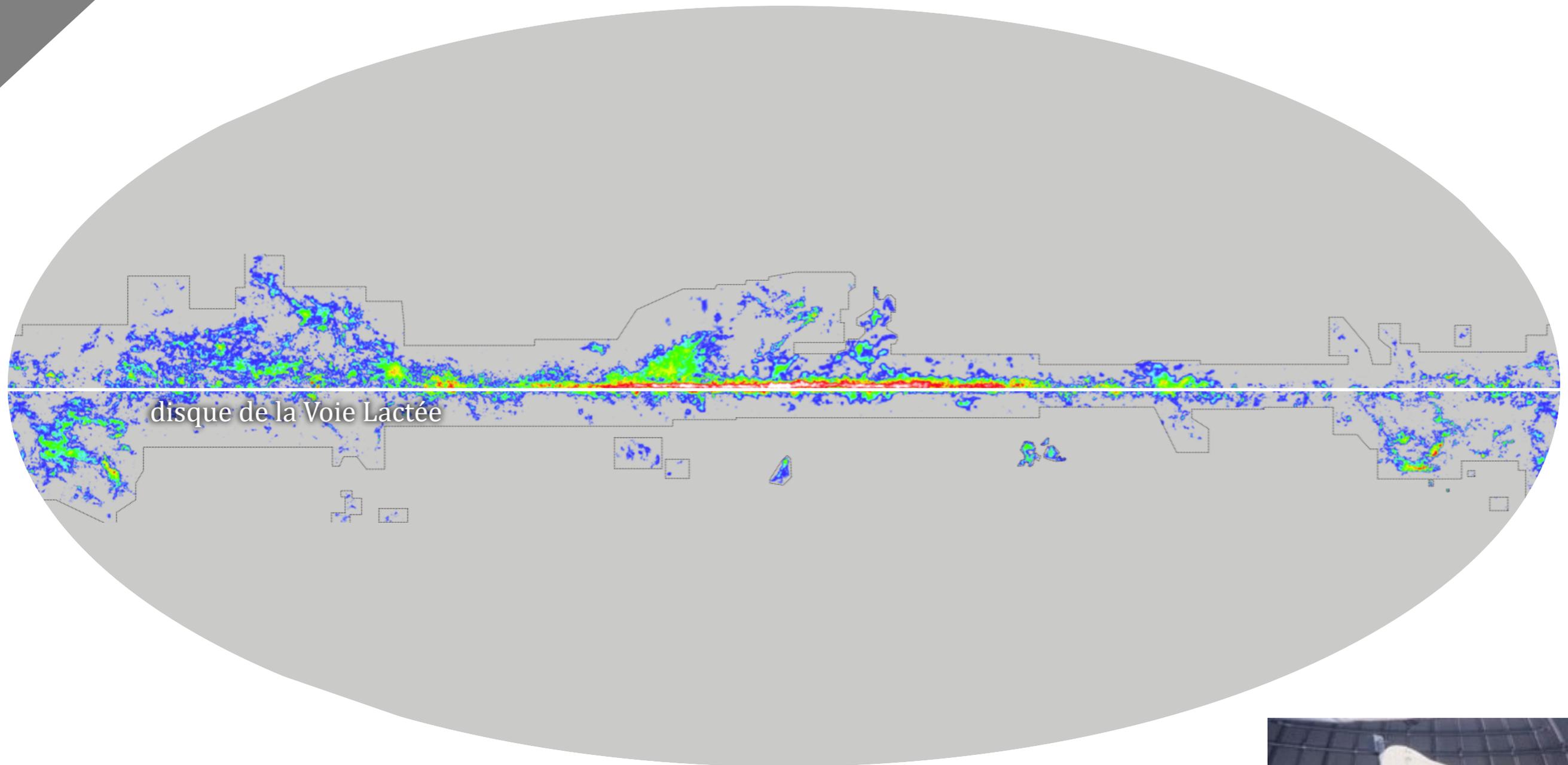
- Gaz atomique chaud**
- ◆ $T \sim 5000\text{K}$
 - ◆ $n \sim 0.6 \text{ atomes/cm}^3$
 - ◆ Couvre une grande partie du volume du disque ($\sim 40\%$)

- 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



Gaz moléculaire diffus

- ◆ $T \sim 50 \text{ K}$
- ◆ $n \sim 100 \text{ atomes/cm}^3$

Gaz moléculaire dense

- ◆ $T \sim 10 - 50 \text{ K}$
- ◆ $n \sim 10^3 - 10^6 \text{ atomes/cm}^3$
- ◆ Tracé par la molécule CO (molécule la plus abondantes après H_2)
- ◆ De nombreuses espèces moléculaires : CO, OH, NH_3 , HCN, N_2H^+ , HCO^+ , CO_2 , ...

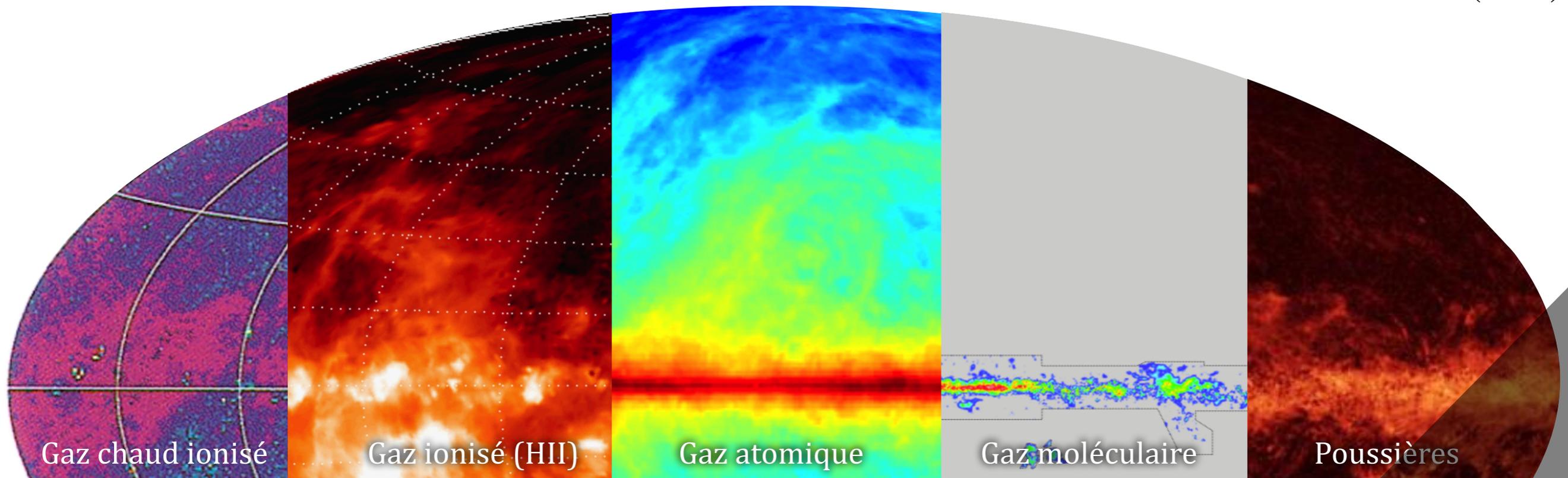


CfA 1.2m telescope

Phases du milieu interstellaire : résumé

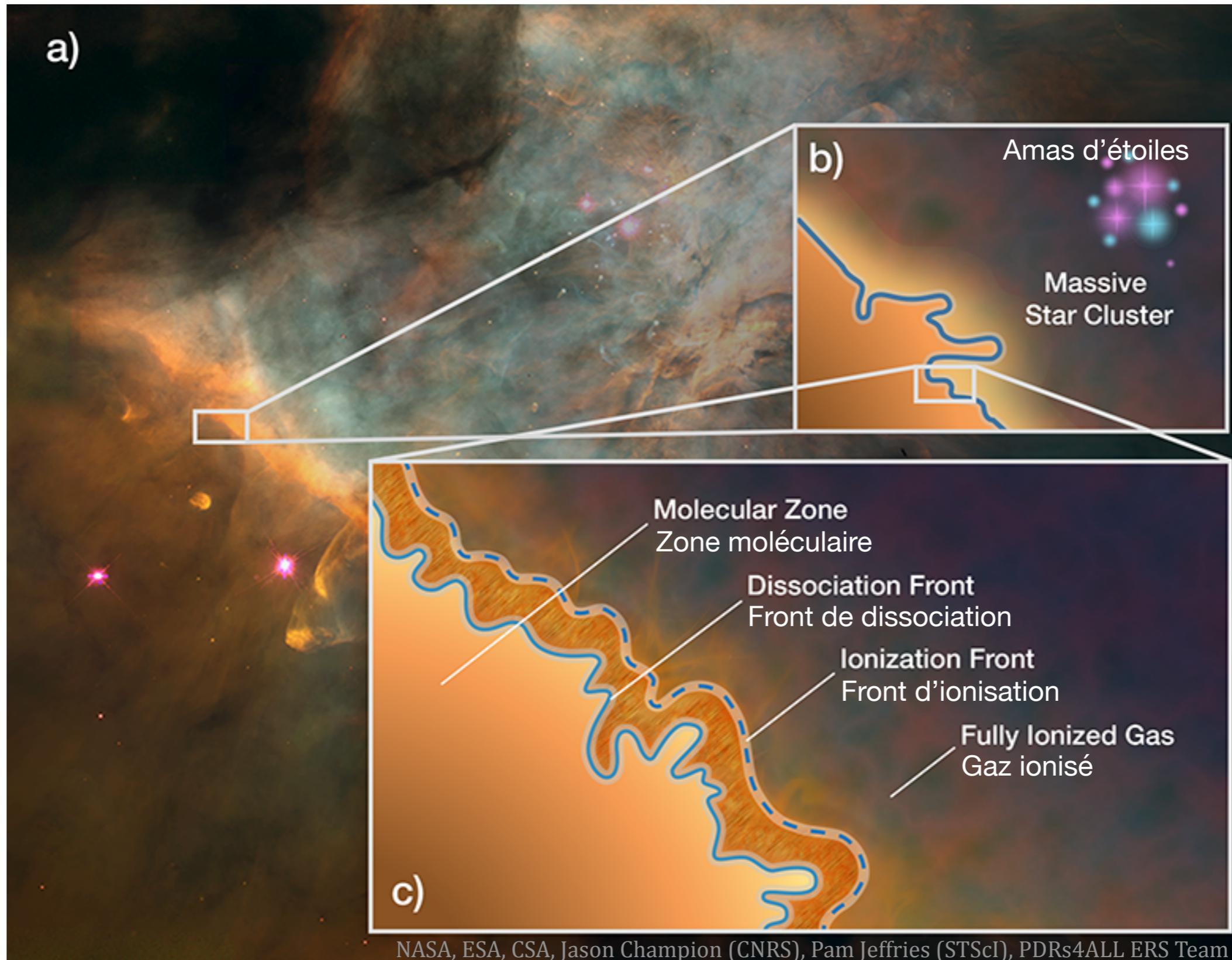
Phase	Température (K)	Densité (atomes/cm-3)	Fraction du volume (%)	Fraction de la masse des phases de l'hydrogène (%)
Gaz chaud ionisé	$\geq 5 \cdot 10^5$	≤ 0.01	$\sim 50\%$?	
Gaz ionisé (HII)	10^4	$0.3 - 10^4$	$\sim 10\%$	23%
Gaz atomique chaud	~ 5000	~ 0.6	$\sim 40\%$	60 %
Gaz atomique froid	~ 100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



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



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

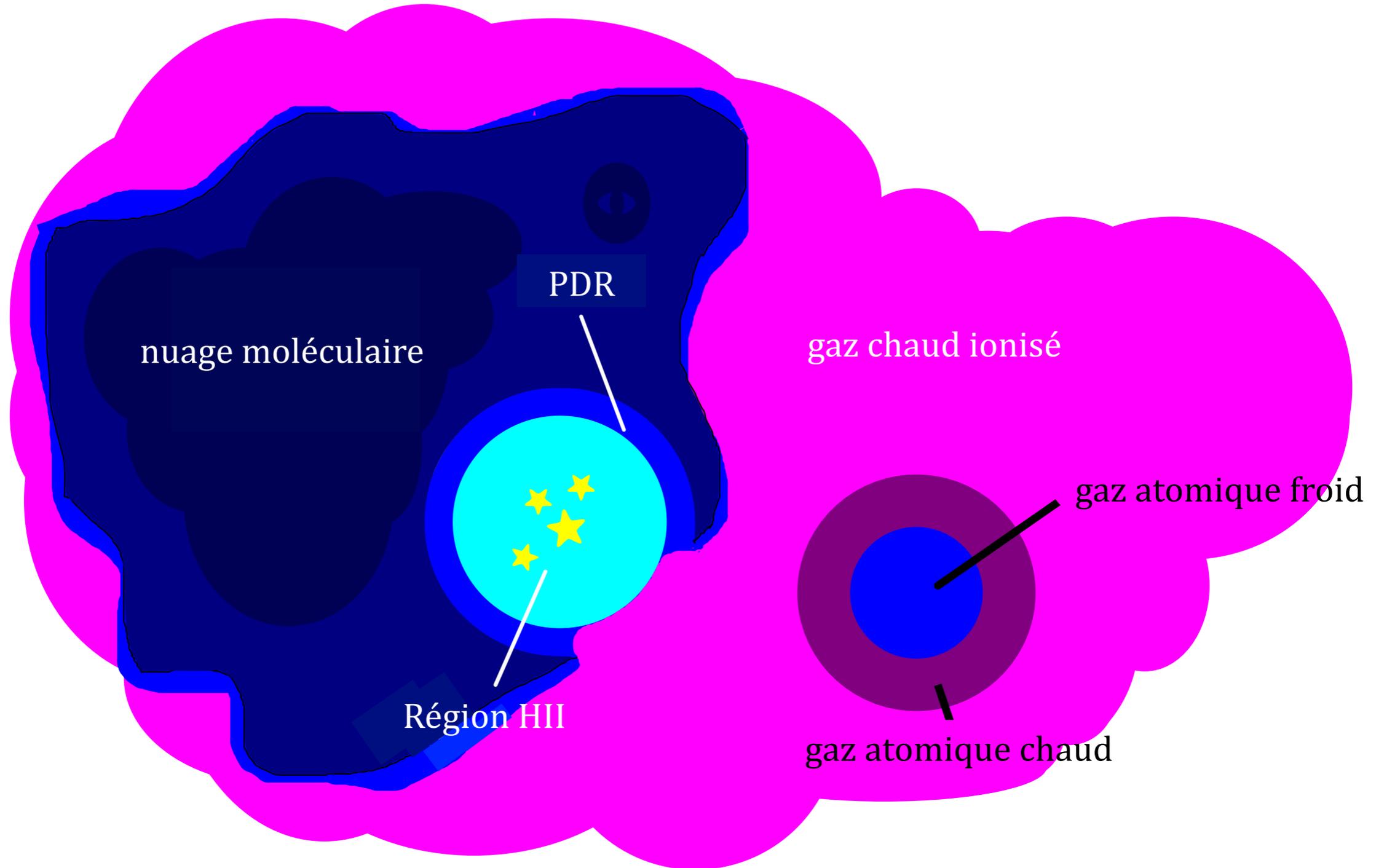
proto-étoiles

jeunes étoiles

filaments de gaz froid et de poussières

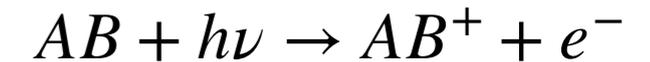


Vue schématique du MIS de la Voie Lactée



Chimie gazeuse du milieu interstellaire

◆ **Photo-ionisation** : ionisation par des photons (émission photo-électrique).



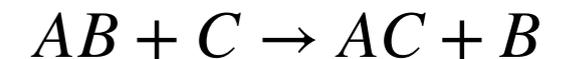
Note : l'énergie nécessaire pour photo-ioniser H₂ est supérieure à l'énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène donc H₂ n'est pas photo-ionisé.

◆ **Photo-dissociation** : photo-excitation suivie d'une dissociation.



Cette réaction permet notamment l'auto-écrantage (*self-shielding*) de H₂ et CO dans les régions de photo-dissociation.

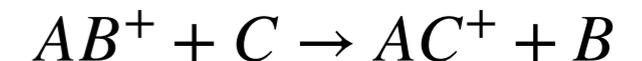
◆ **Réactions d'échange entre espèces neutres** lors de collisions.



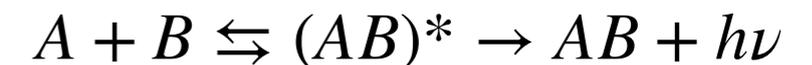
Par exemple, la formation de CO peut avoir lieu même à faible température : $C + OH \rightarrow CO + H$

Note : le passage par un « complexe » *ABC* intermédiaire implique une barrière énergétique pour certaines réactions même si la réaction est exothermique.

◆ **Réactions d'échange ion-neutre.**

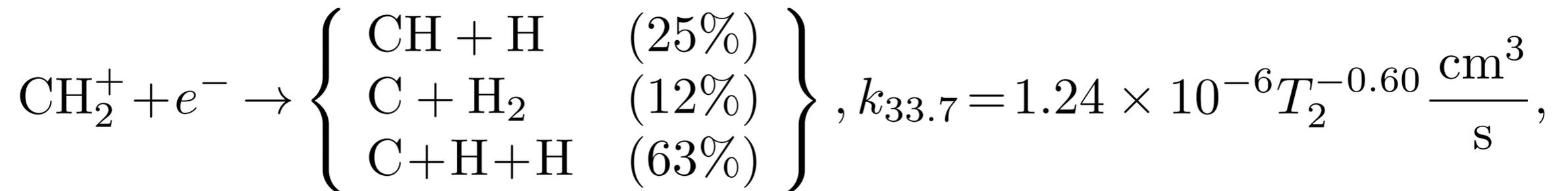
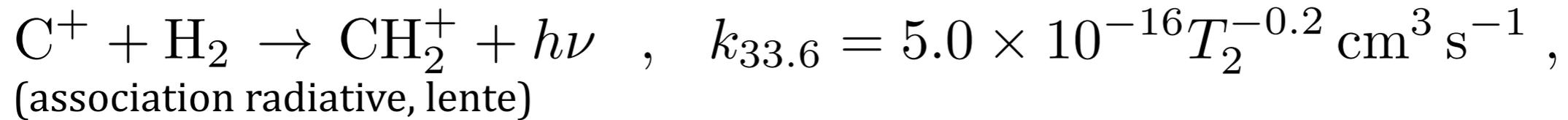


◆ **Réactions d'association radiative** : formation d'un complexe excité qui peut se stabiliser par émission d'un photon.

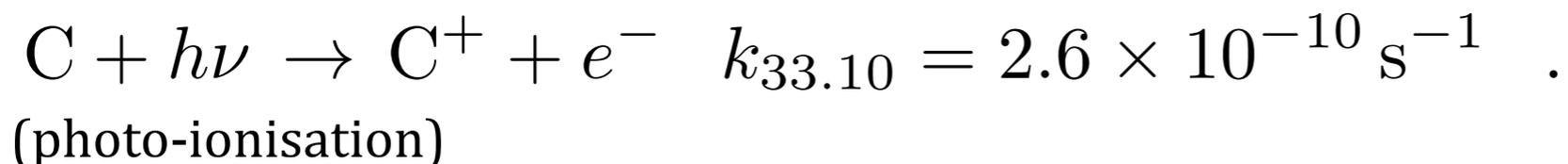
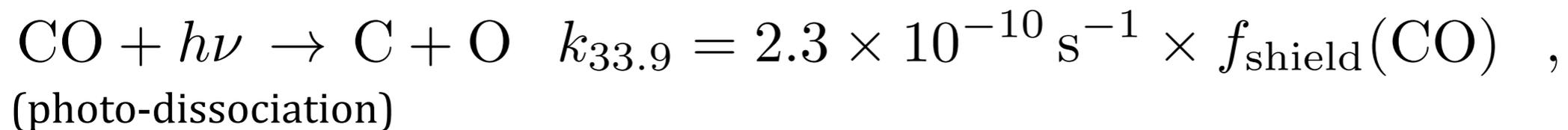
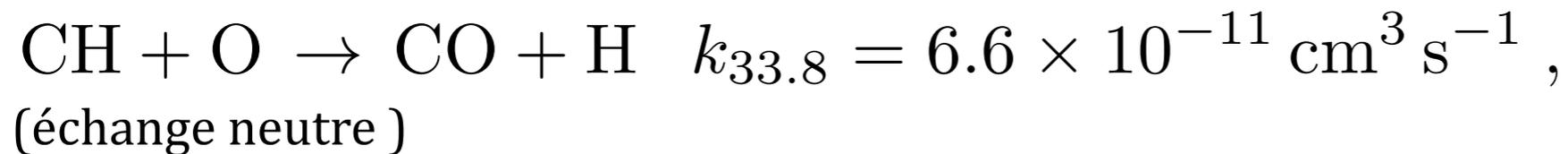


Par exemple : $C^+ + H \rightarrow CH^+ + h\nu$

Exemple : la formation du CO

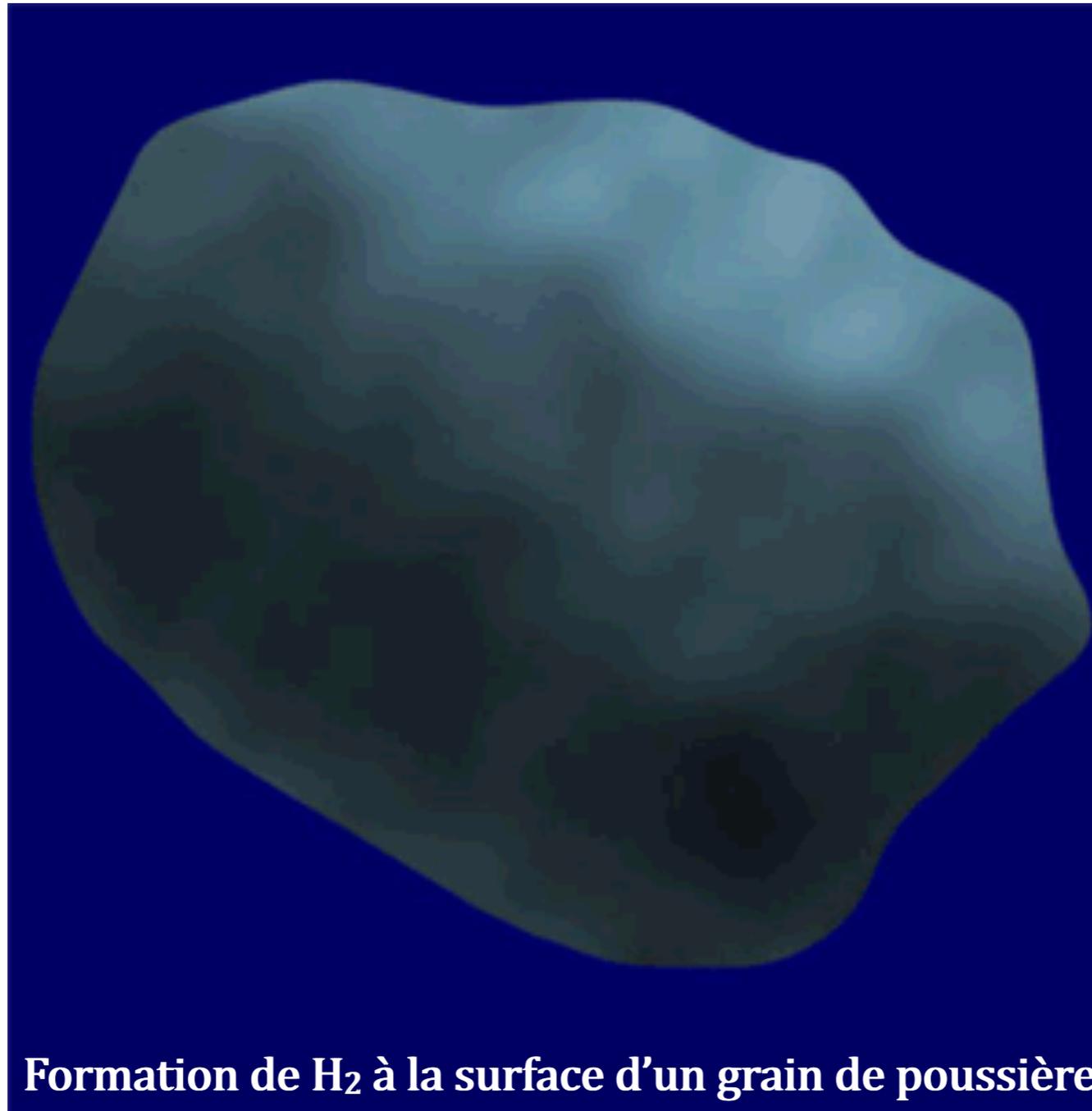


(recombinaison dissociative, rapide)



Chimie sur les grains de poussière

- ◆ Les atomes ou les molécules qui se déplacent dans le MIS peuvent entrer en collision avec un grain de poussière et se coller à sa surface (adsorption).
- ◆ Ils se déplacent sur la surface, et peuvent s'associer quand ils se rencontrent.
- ◆ La molécule formée peut être ré-injectée dans le MIS (désorption).



Exemples de molécules du MIS

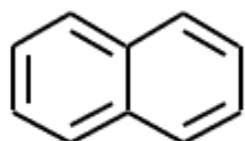
Simple	H ₂	CO	H ₂ O	H ₃ ⁺ (H ₂ D ⁺)	HCN	HNC	NH ₃
Carbon-chains	CCCCS	HNCCC	CCCCCCCH	CCCCCCCH-	HC ₁₁ N		
COMs	CH ₃ OH	CH ₃ OCH ₃	HCOOCH ₃	C ₂ H ₅ CN	CH ₃ NH ₂	n-C ₃ H ₇ CN	i-C ₃ H ₇ CN
Inorganic	PN	MgNC	HCP	NaCN	TiO ₂	NaCl	PH ₃
Fullerenes	C ₆₀	C ₆₀ ⁺	C ₇₀				
PAH's	C ₆ H ₅ CN	C ₁₀ H ₇ CN	c-C ₉ H ₈	c-C ₅ H ₅ CN	o-C ₆ H ₄		
Ices	H ₂ O	CO ₂	CO	CH ₄	CH ₃ OH	NH ₃	OCN-

COM: Complex organic molecules (molécules organiques complexes)

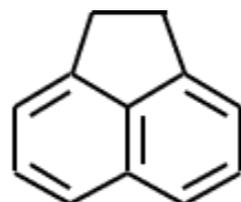
Herbst 2021

PAH: polycyclic aromatic hydrocarbons (Hydrocarbures aromatiques polycycliques)

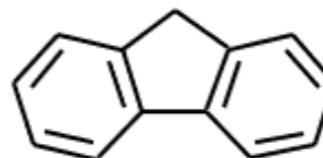
Exemples de PAHs :



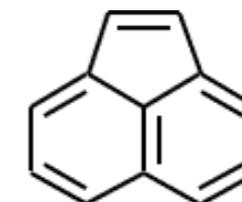
1. Naphthalene



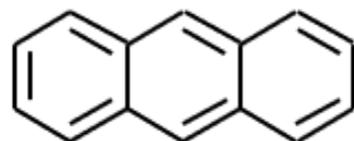
2. Acenaphthene



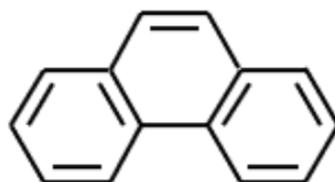
3. Fluorene



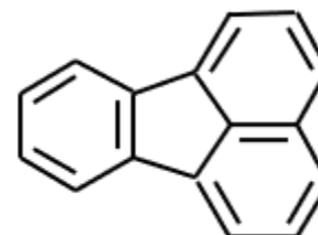
4. Acenaphthylene
(non-fluorescent)



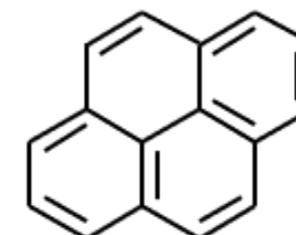
5. Anthracene



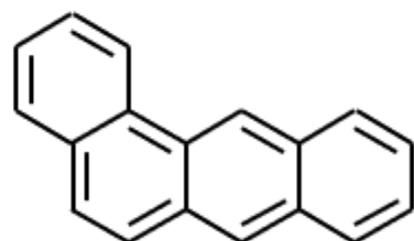
6. Phenanthrene



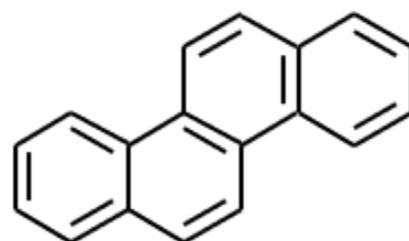
7. Fluoranthene



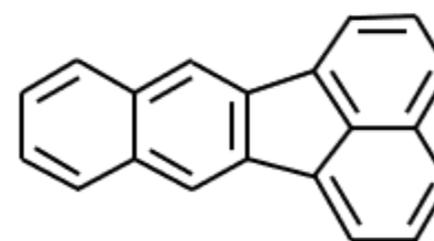
8. Pyrene



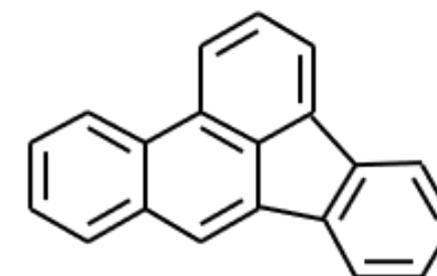
9. Benzo[a]anthracene



10. Chrysene



11. Benzo[k]fluoranthene



12. Benzo[b]fluoranthene

Chauffage et refroidissement du gaz interstellaire

◆ Gaz chaud ionisé :

- chauffé par les chocs
- refroidi par expansion adiabatique et émission de rayons X

◆ Gaz ionisé (HII) :

- chauffé par les électrons libérés par photo-ionisation (chauffage photoélectrique)
- refroidi par émission de photons

◆ Gaz atomique (HI) :

- chauffé par les électrons libérés par les poussières ionisées (chauffage photoélectrique)
- refroidi par émission de photons

◆ Gaz moléculaire (H₂) :

- chauffé par les électrons libérés par les poussières ionisées (chauffage photoélectrique)
- refroidi par émission de photons

◆ Poussières :

- chauffé par absorption de photons (UV notamment, l'énergie allant par ex. dans des modes vibratoires) et collisions (en milieu dense)
- refroidi par émission de photons

Chauffage photoélectrique

Le rayonnement UV arrache un électron (effet photoélectrique) qui communique ensuite son énergie au gaz par collisions.



Refroidissement radiatif

Les collisions (notamment avec des électrons libres dans le gaz ionisé) excitent les atomes, qui émettent ensuite un photon en se désexcitant. Ce qui diminue l'énergie des particules.

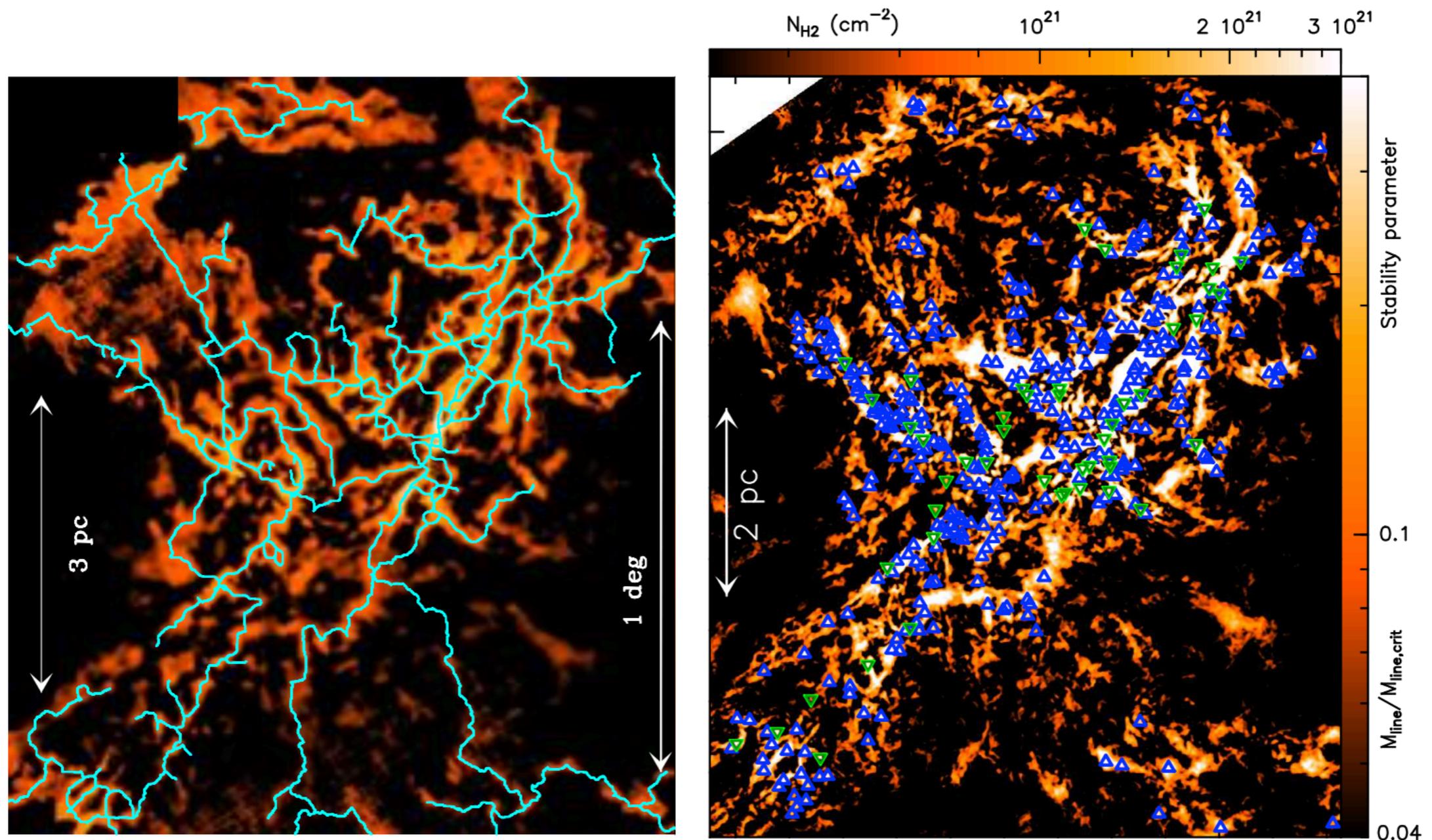
La formation des étoiles

Les étoiles se forment dans des nuages moléculaires géants essentiellement composés d'hydrogène qui s'effondrent et se fragmentent en **coeurs pré-stellaires** du fait de la gravité. La température et la pression à l'intérieur de ces coeurs pré-stellaires augmente, jusqu'à déclencher des réactions de **fusion nucléaire**.

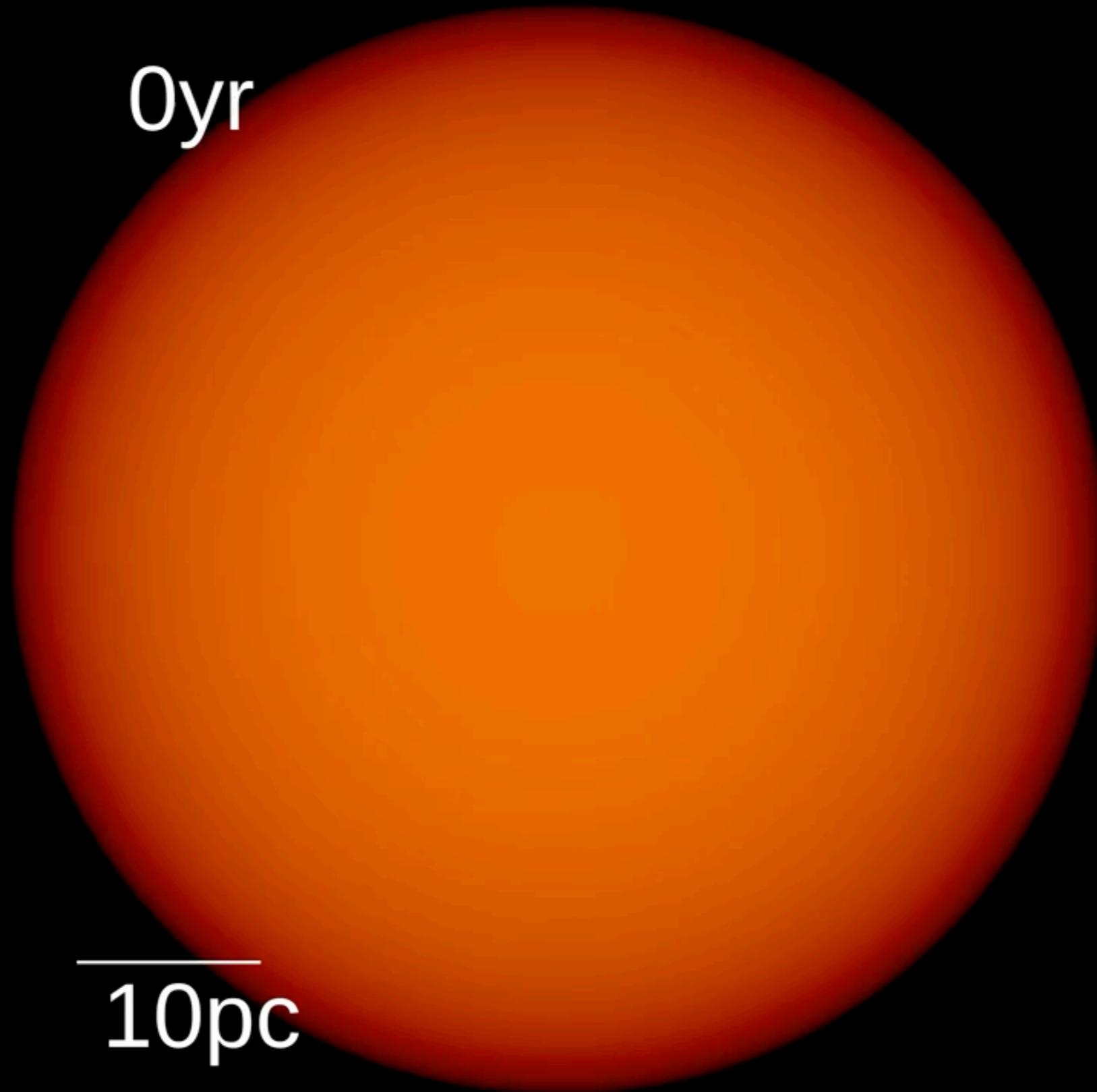


Formation des étoiles et filaments du MIS

- ◆ Les nuages moléculaires géants abritent des **réseaux filamenteux** complexes
- ◆ Liés à de la **turbulence** à grande échelle, aux **champs magnétiques**, et aux **instabilités gravitationnelles**
- ◆ Ils semblent précéder la formation des étoiles, avec $\sim 75\%$ des coeurs pré-stellaires dans de tels filaments (Konyves et al. 2015)



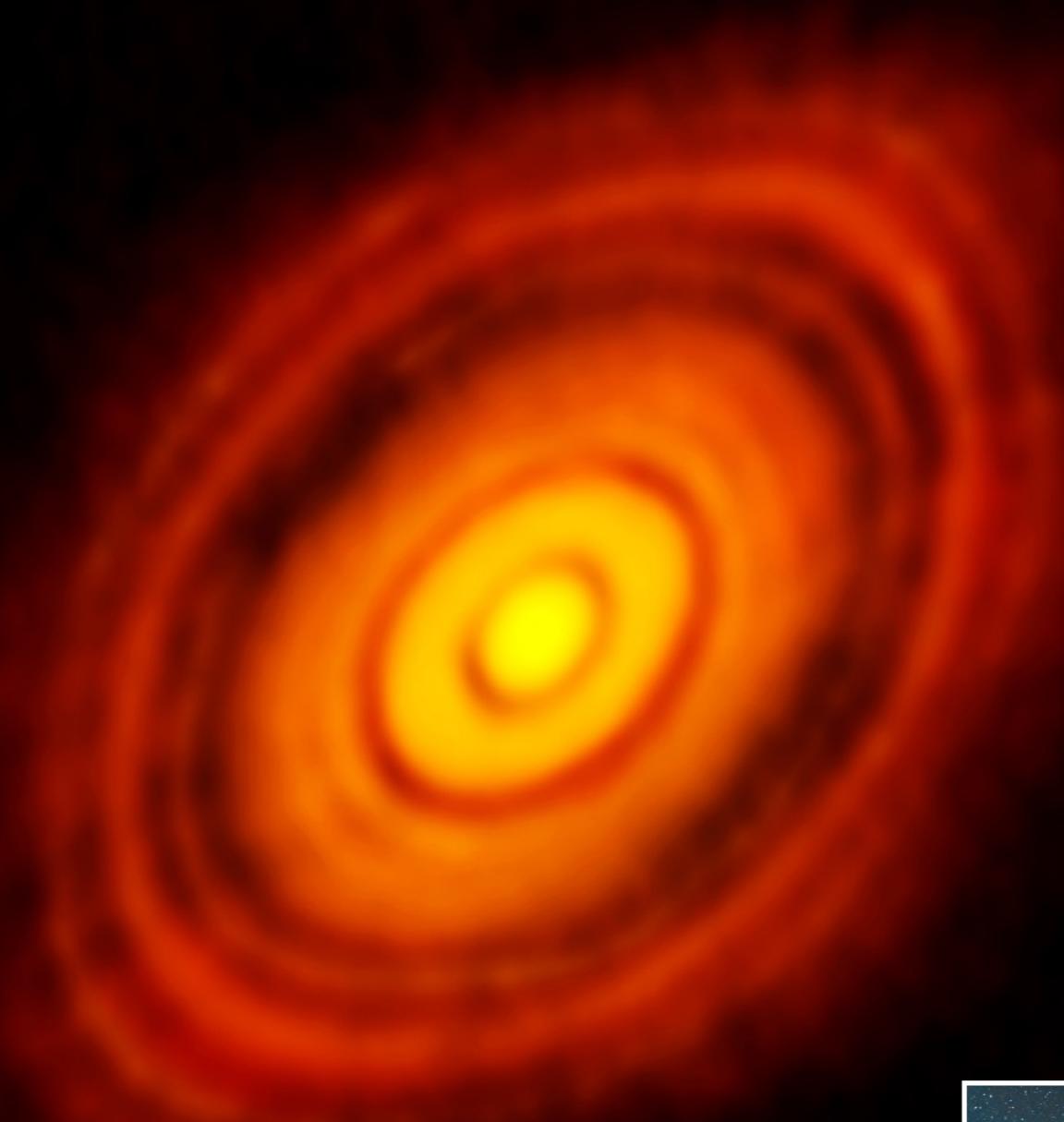
Simulation : fragmentation d'un nuage moléculaire et formation d'étoiles



0yr

10pc

HL Tauri, un disque protoplanétaire

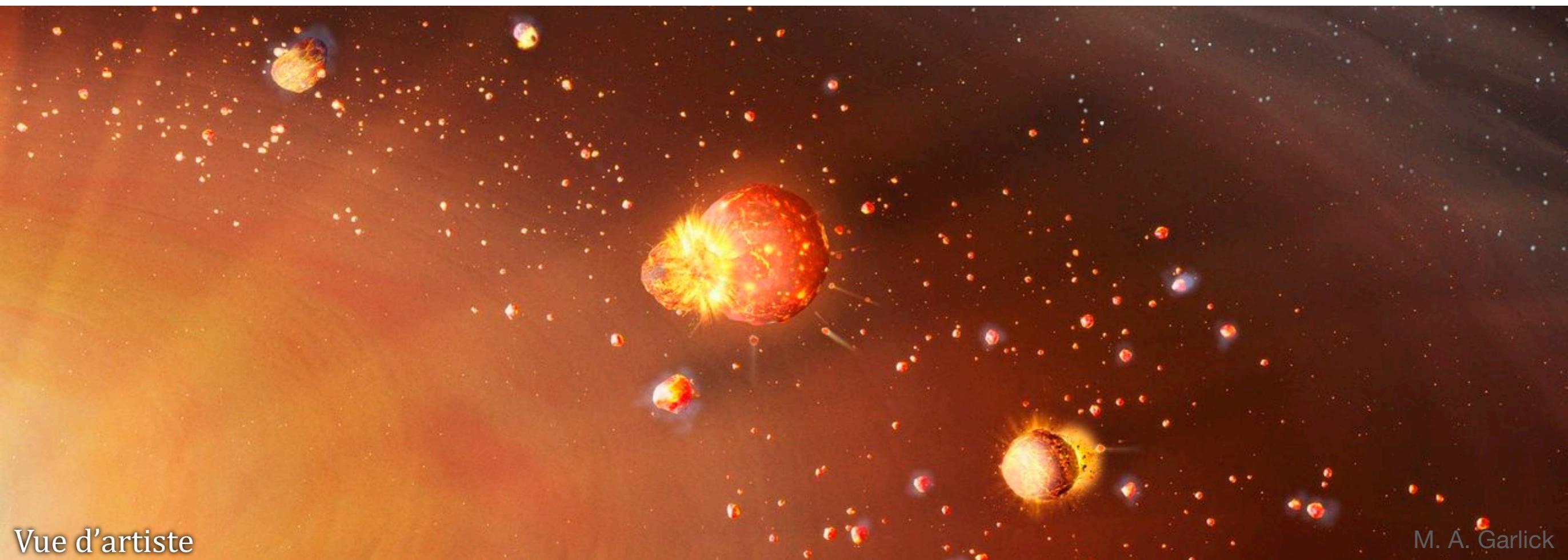
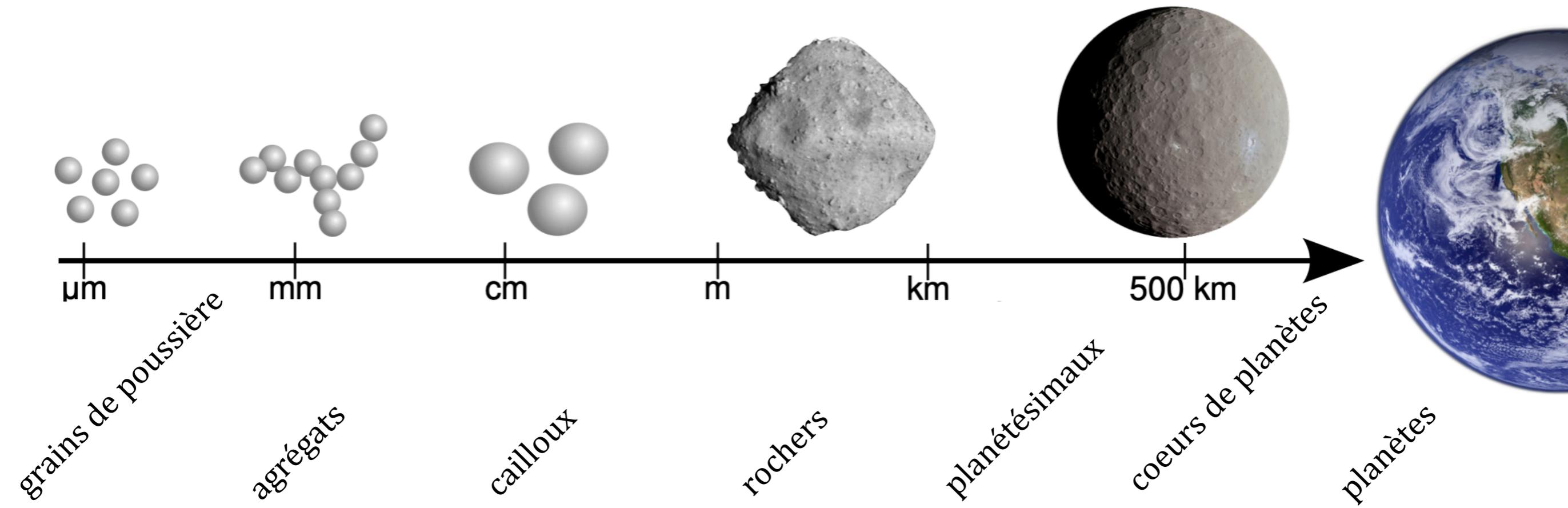


Disque proto-planétaire: disque en rotation de gaz dense et de poussières autour d'une très jeune étoile

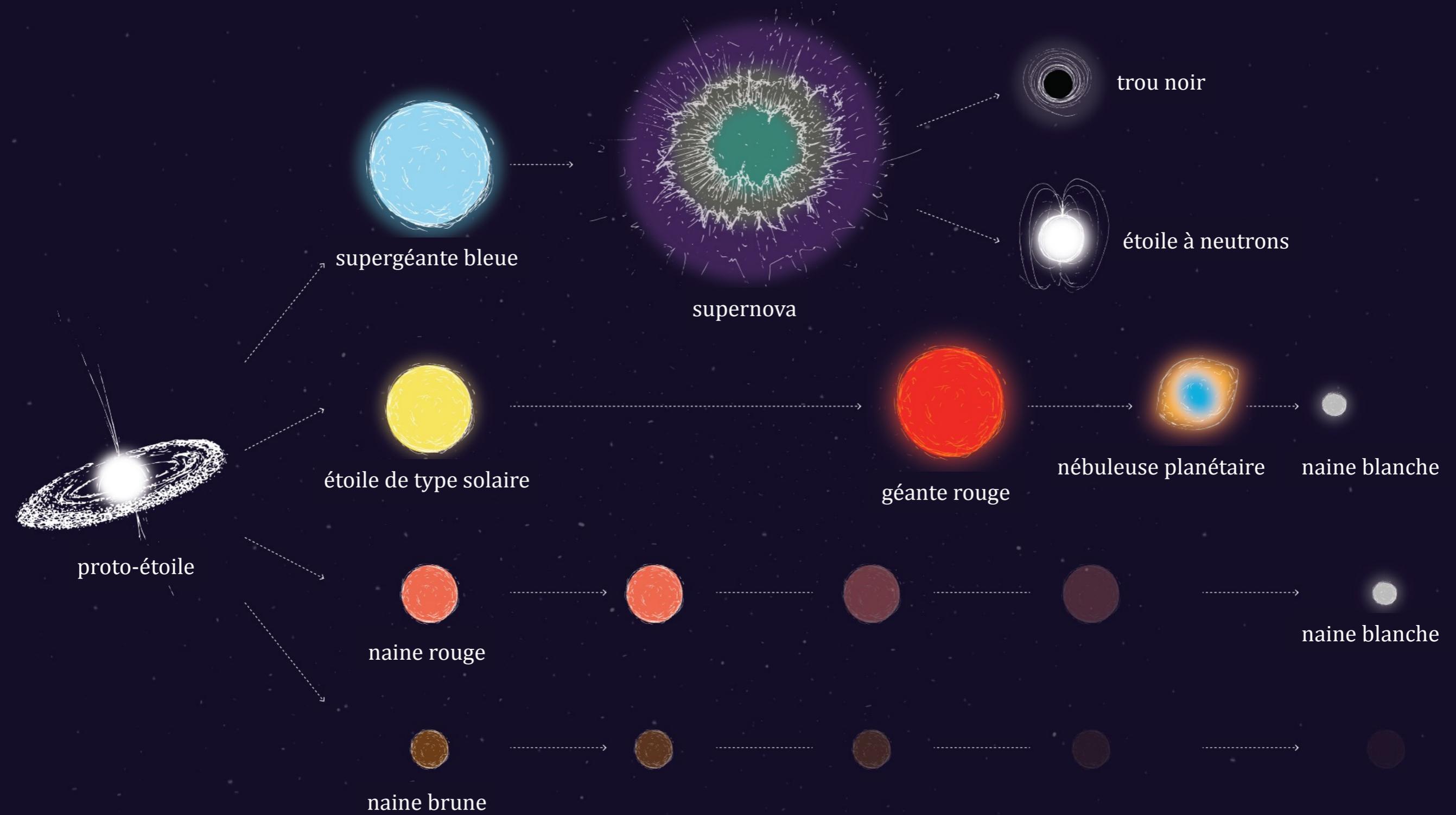


Atacama Large Millimeter/ submillimeter Array (ALMA), ESO/NAOJ/NRAO, Chili

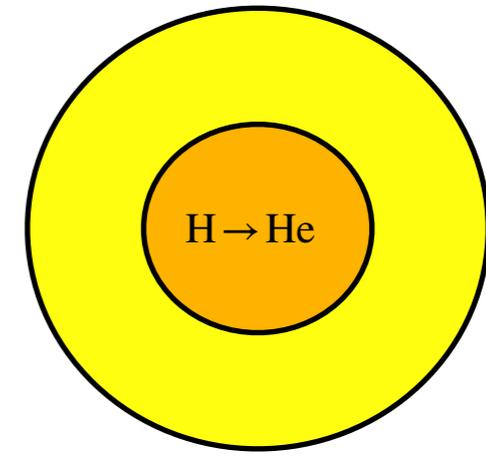
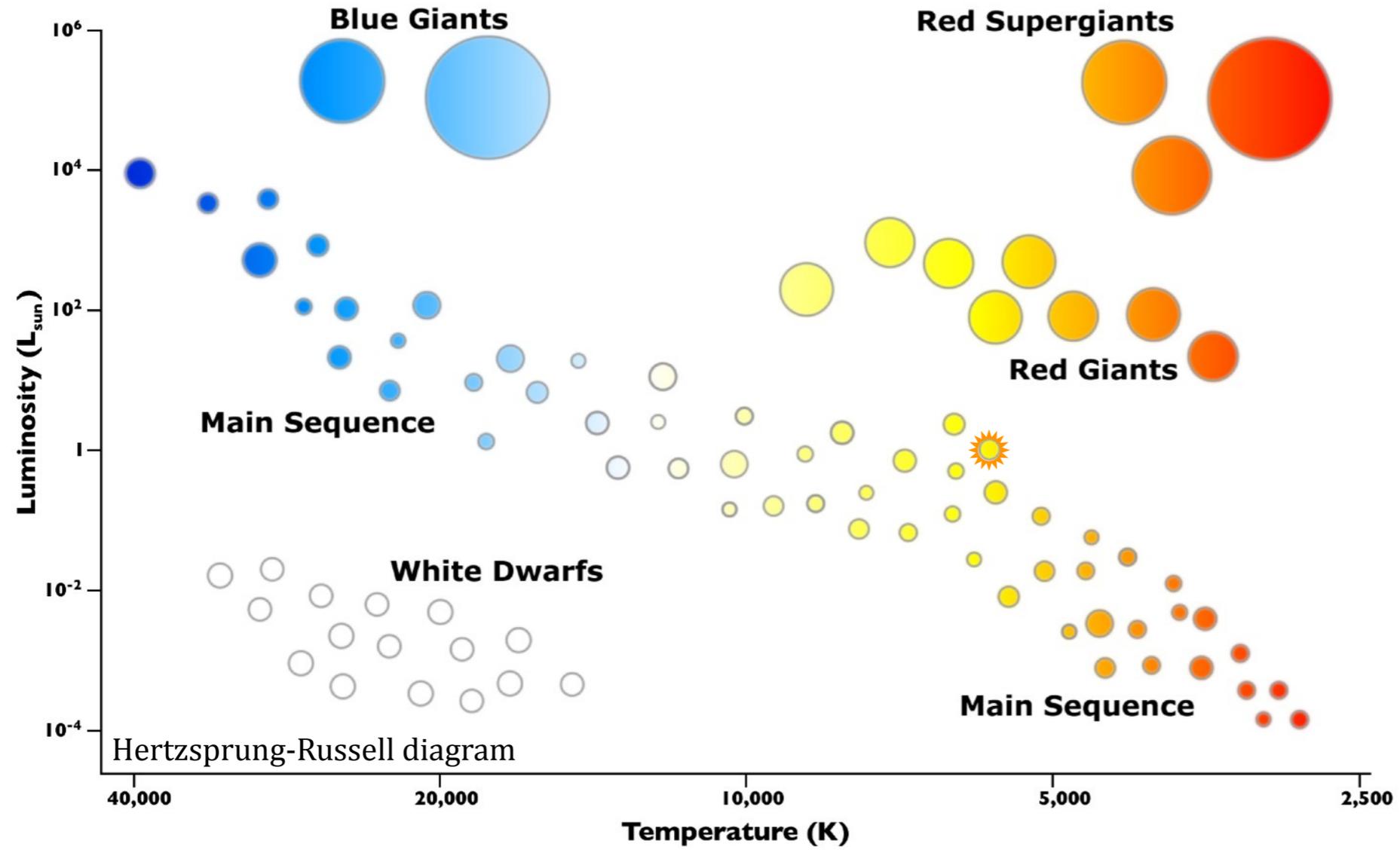
De la poussière aux planètes



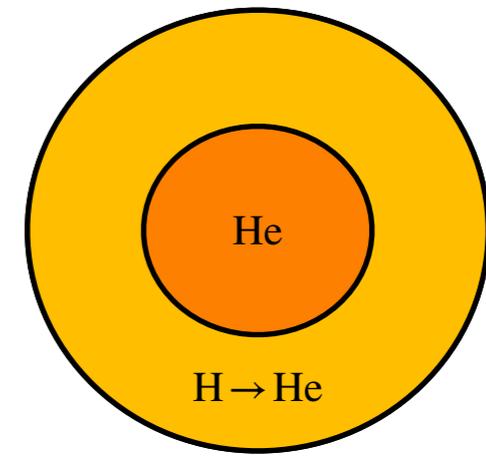
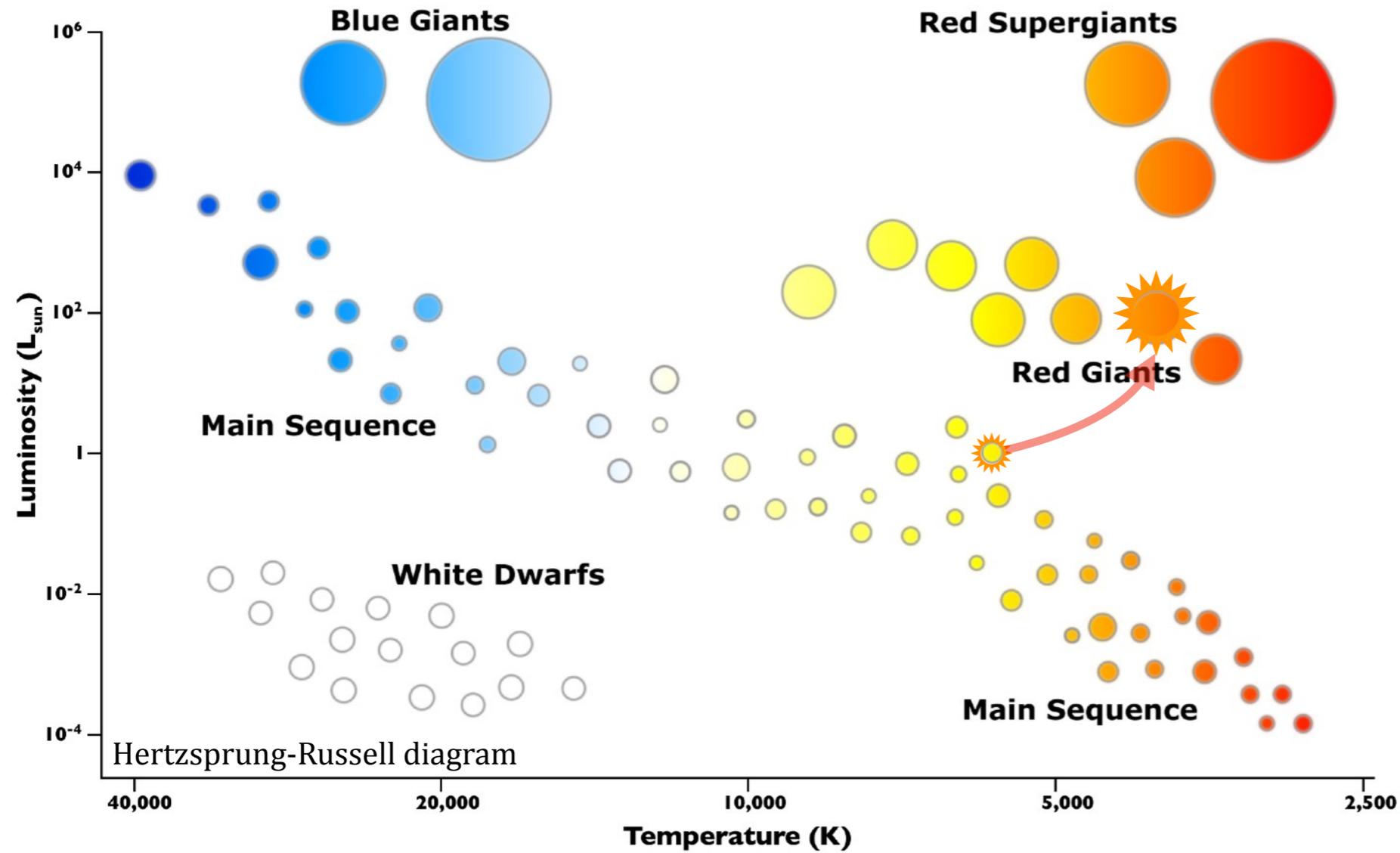
L'évolution stellaire



L'évolution stellaire

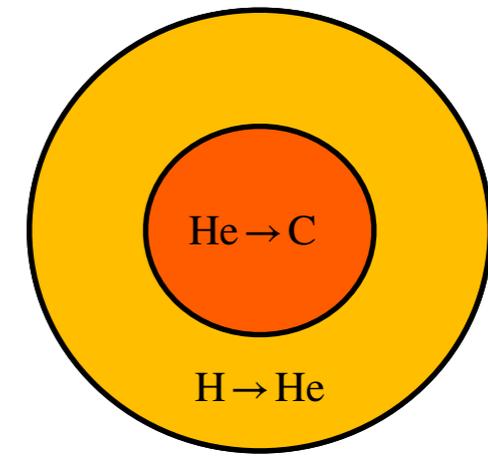
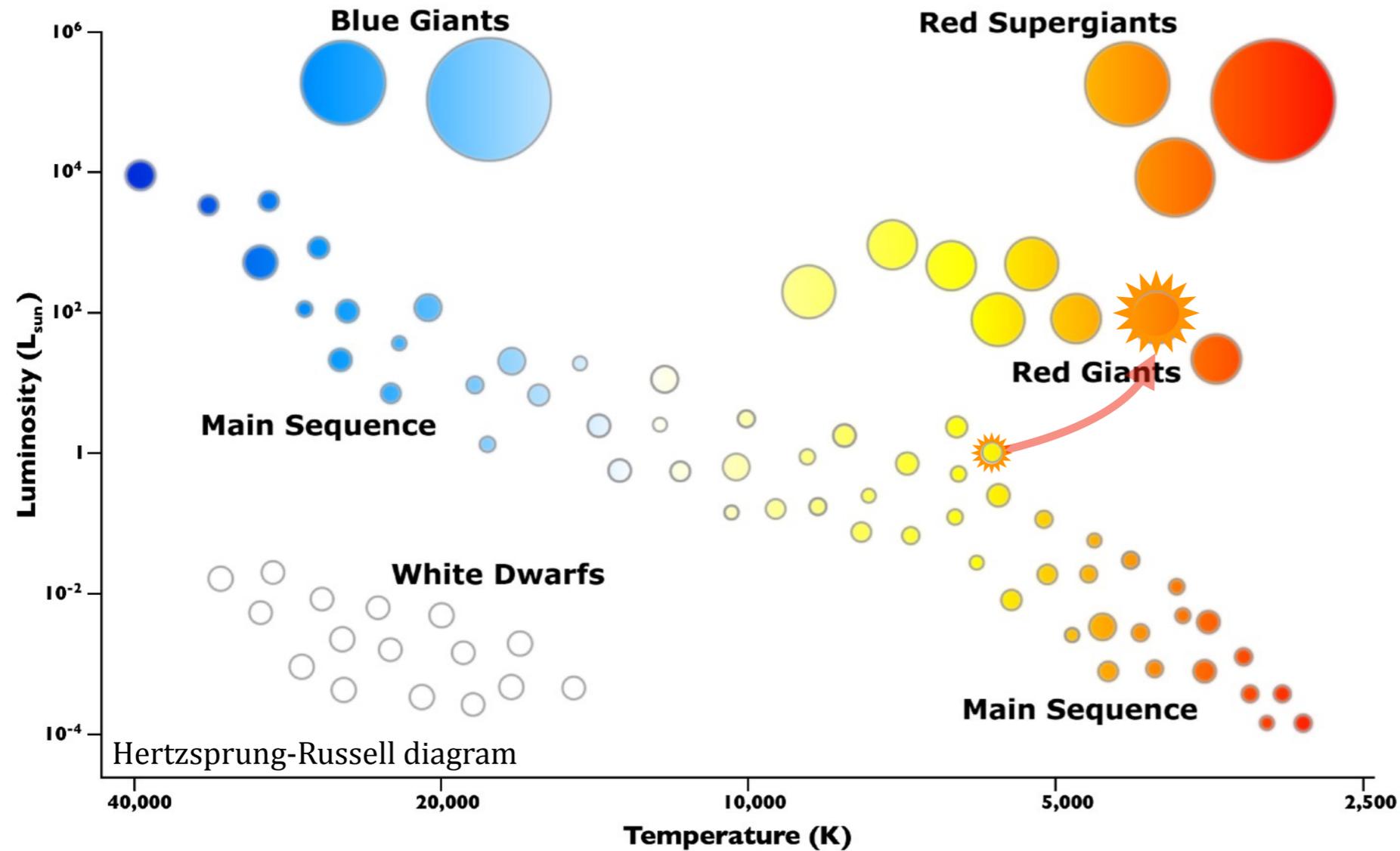


L'évolution stellaire



◆ Lorsque les réactions de fusion de l'hydrogène s'arrêtent au centre d'une étoile, la pression diminue et le noyau commence à se contracter. L'énergie dissipée par rayonnement expulse les couches externes et les réactions de fusion de l'hydrogène se poursuivent dans une couche entourant le noyau : l'étoile devient une **géante rouge** (Arcturus, Bételgeuse).

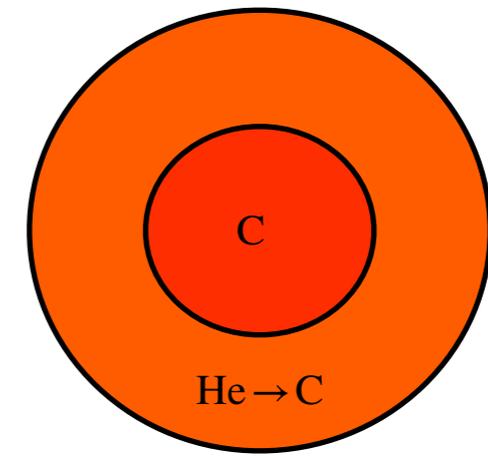
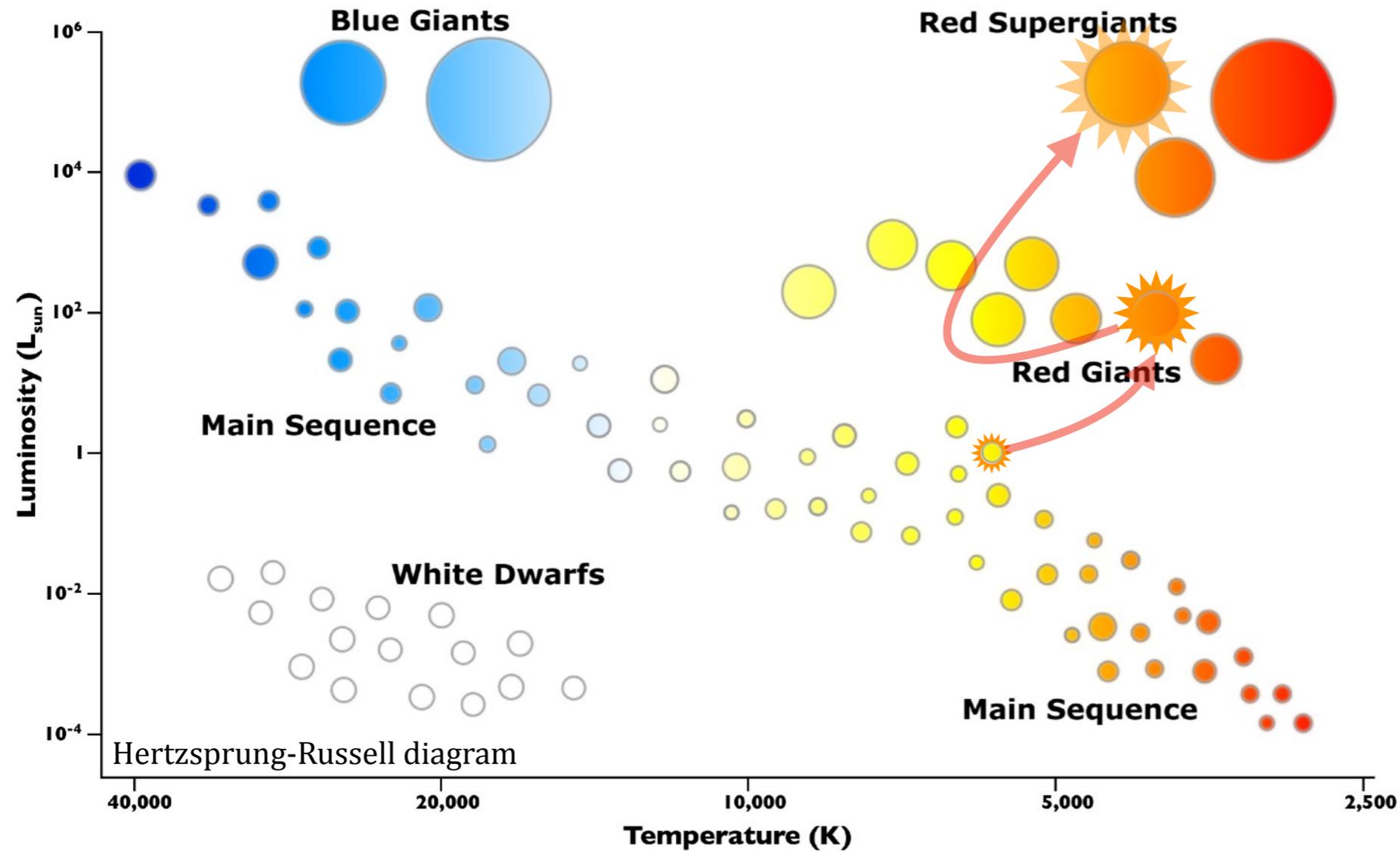
L'évolution stellaire



◆ Lorsque les réactions de fusion de l'hydrogène s'arrêtent au centre d'une étoile, la pression diminue et le noyau commence à se contracter. L'énergie dissipée par rayonnement expulse les couches externes et les réactions de fusion de l'hydrogène se poursuivent dans une couche entourant le noyau : l'étoile devient une **géante rouge** (Arcturus, Bételgeuse).

◆ Dans une géante rouge, le noyau se contracte et devient plus chaud, jusqu'à la fusion des atomes d'hélium pour former du carbone (flash d'hélium).

L'évolution stellaire



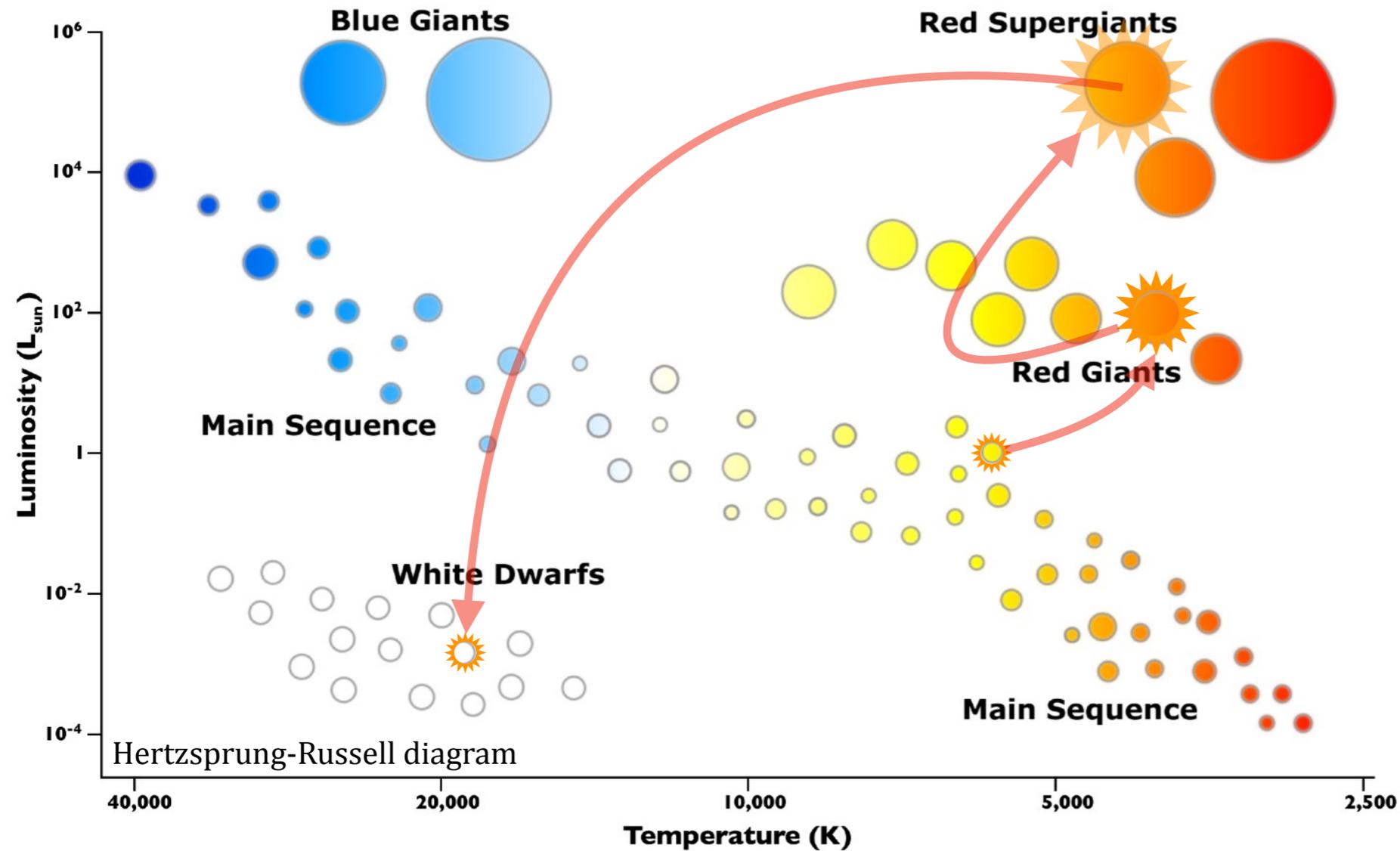
◆ Lorsque les réactions de fusion de l'hydrogène s'arrêtent au centre d'une étoile, la pression diminue et le noyau commence à se contracter. L'énergie dissipée par rayonnement expulse les couches externes et les réactions de fusion de l'hydrogène se poursuivent dans une couche entourant le noyau : l'étoile devient une **géante rouge** (Arcturus, Bételgeuse).

◆ Dans une géante rouge, le noyau se contracte et devient plus chaud, jusqu'à la fusion des atomes d'hélium pour former du carbone (flash d'hélium).

◆ Lorsque l'hélium s'épuise dans le noyau, celui-ci se contracte, devient plus chaud. Les réactions de fusion de l'hélium se poursuivent dans une couche entourant le noyau : l'étoile devient une **supergéante rouge**.

◆ Cette combustion est instable et les couches externes sont éjectées pour former une **nébuleuse planétaire**.

L'évolution stellaire



◆ Lorsque les réactions de fusion de l'hydrogène s'arrêtent au centre d'une étoile, la pression diminue et le noyau commence à se contracter. L'énergie dissipée par rayonnement expulse les couches externes et les réactions de fusion de l'hydrogène se poursuivent dans une couche entourant le noyau : l'étoile devient une **géante rouge** (Arcturus, Bételgeuse).

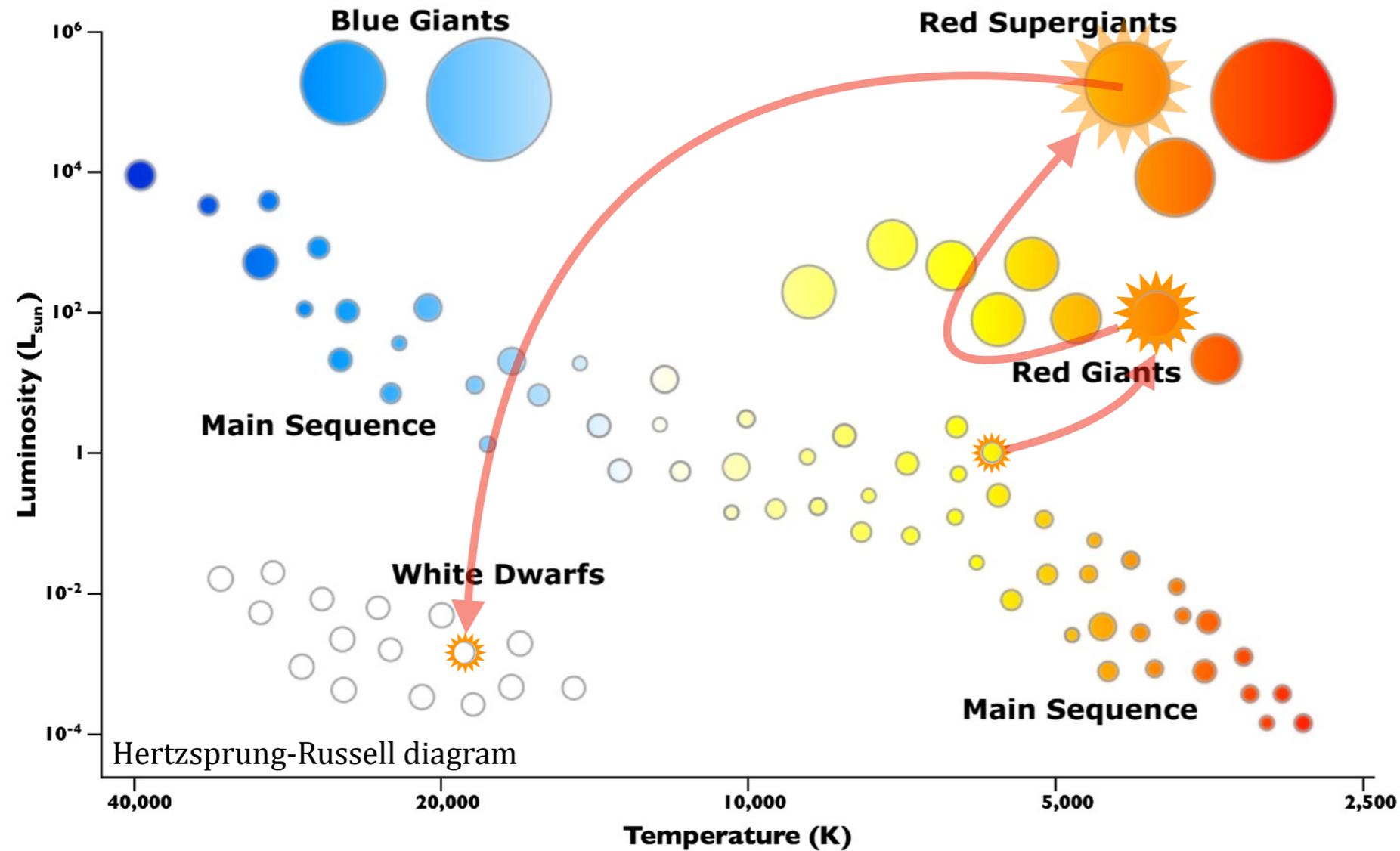
◆ Dans une géante rouge, le noyau se contracte et devient plus chaud, jusqu'à la fusion des atomes d'hélium pour former du carbone (flash d'hélium).

◆ Lorsque l'hélium s'épuise dans le noyau, celui-ci se contracte, devient plus chaud. Les réactions de fusion de l'hélium se poursuivent dans une couche entourant le noyau : l'étoile devient une **supergéante rouge**.

◆ Cette combustion est instable et les couches externes sont éjectées pour former une **nébuleuse planétaire**.

◆ Lorsque la pression est trop faible, les réactions nucléaires s'arrêtent et la luminosité diminue. L'étoile devient une **naine blanche**.

L'évolution stellaire



◆ Lorsque les réactions de fusion de l'hydrogène s'arrêtent au centre d'une étoile, la pression diminue et le noyau commence à se contracter. L'énergie dissipée par rayonnement expulse les couches externes et les réactions de fusion de l'hydrogène se poursuivent dans une couche entourant le noyau : l'étoile devient une **géante rouge** (Arcturus, Bételgeuse).

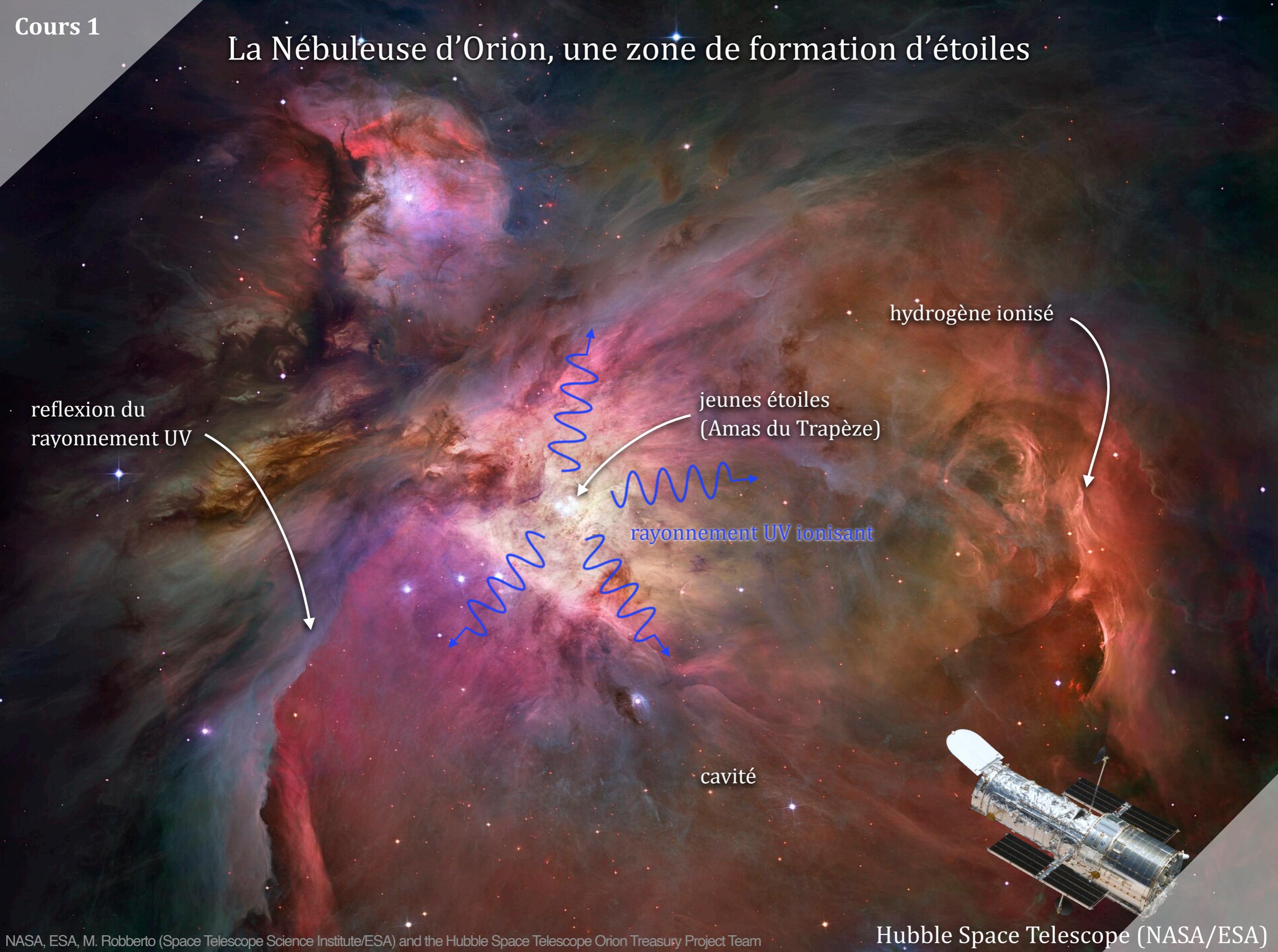
◆ Dans une géante rouge, le noyau se contracte et devient plus chaud, jusqu'à la fusion des atomes d'hélium pour former du carbone (flash d'hélium).

◆ Lorsque l'hélium s'épuise dans le noyau, celui-ci se contracte, devient plus chaud. Les réactions de fusion de l'hélium se poursuivent dans une couche entourant le noyau : l'étoile devient une **supergéante rouge**.

◆ Cette combustion est instable et les couches externes sont éjectées pour former une **nébuleuse planétaire**.

◆ Lorsque la pression est trop faible, les réactions nucléaires s'arrêtent et la luminosité diminue. L'étoile devient une **naine blanche**.

◆ Pour les étoiles massives : fusion jusqu'au **fer**, explosion de **supernova** lorsque les couches externes sont éjectées, formation d'une **étoile à neutrons** ou d'un **trou noir**.



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

reflexion du rayonnement UV

jeunes étoiles (Amas du Trapèze)

rayonnement UV ionisant

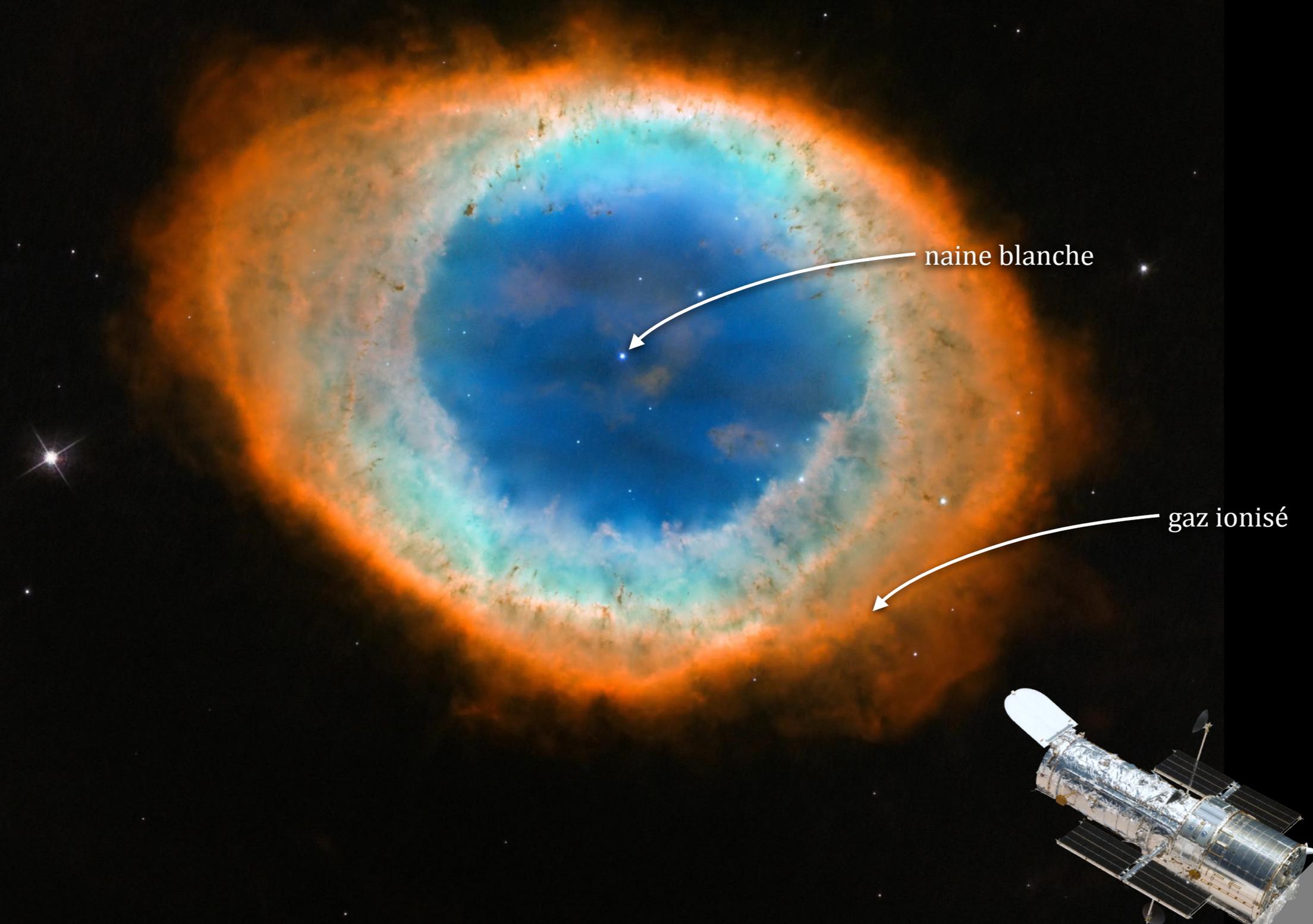
cavité

hydrogène ionisé

Hubble Space Telescope (NASA/ESA)

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

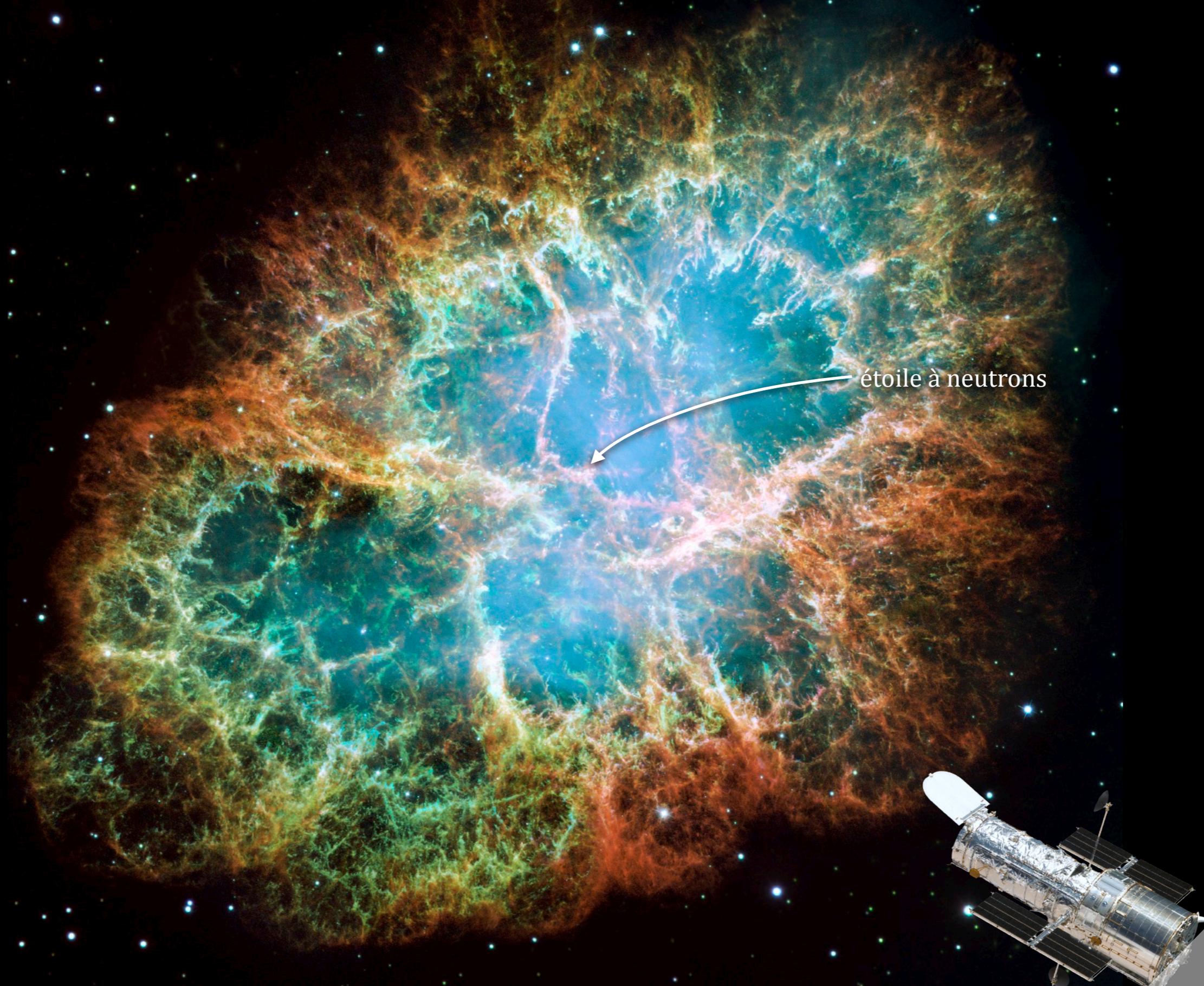
On parle de nébuleuse planétaire, mais ça n'a rien à voir avec une planète !



naine blanche

gaz ionisé

La nébuleuse du Crabe, un reste de supernova



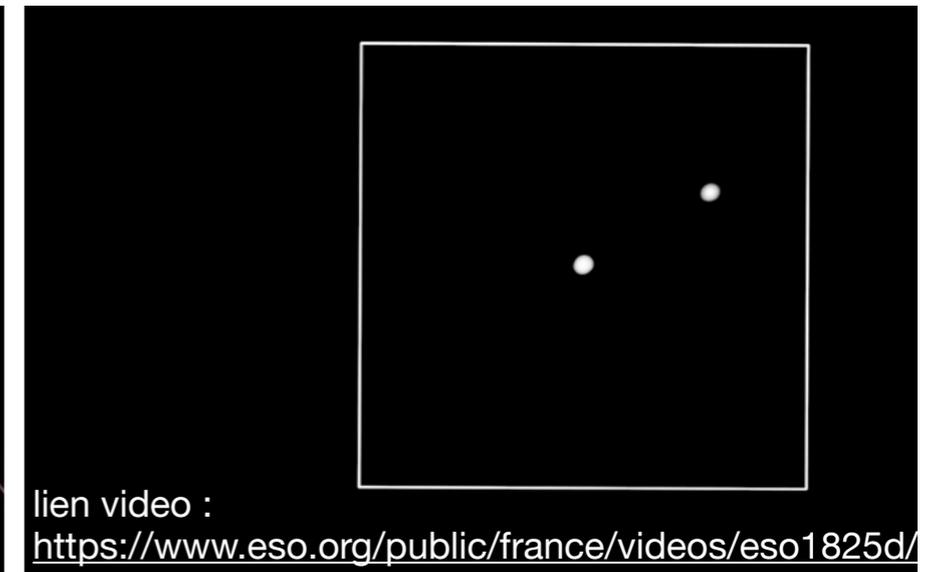
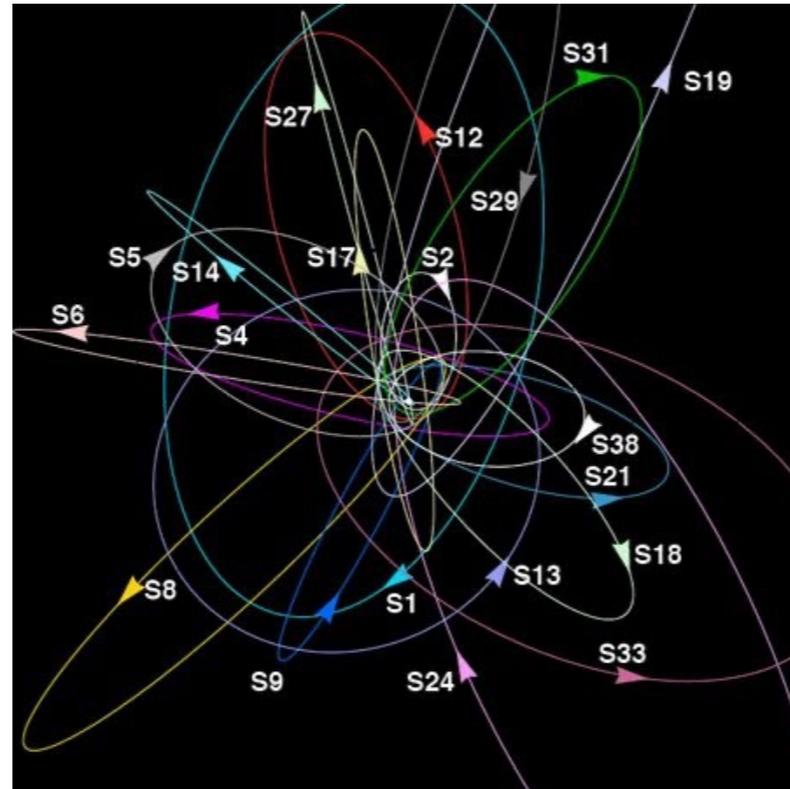
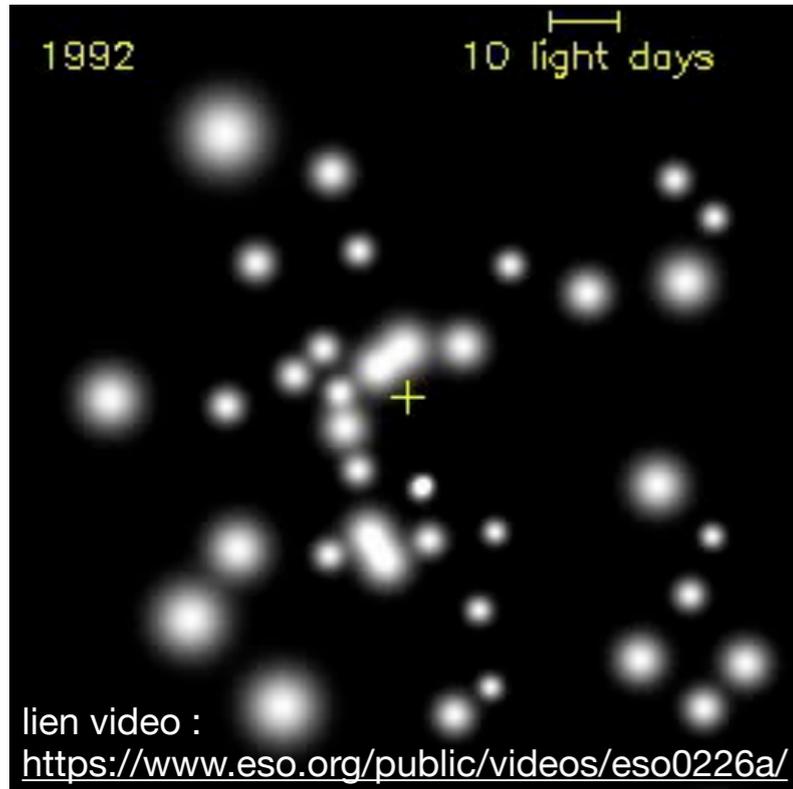
étoile à neutrons

La Voie Lactée, notre Galaxie



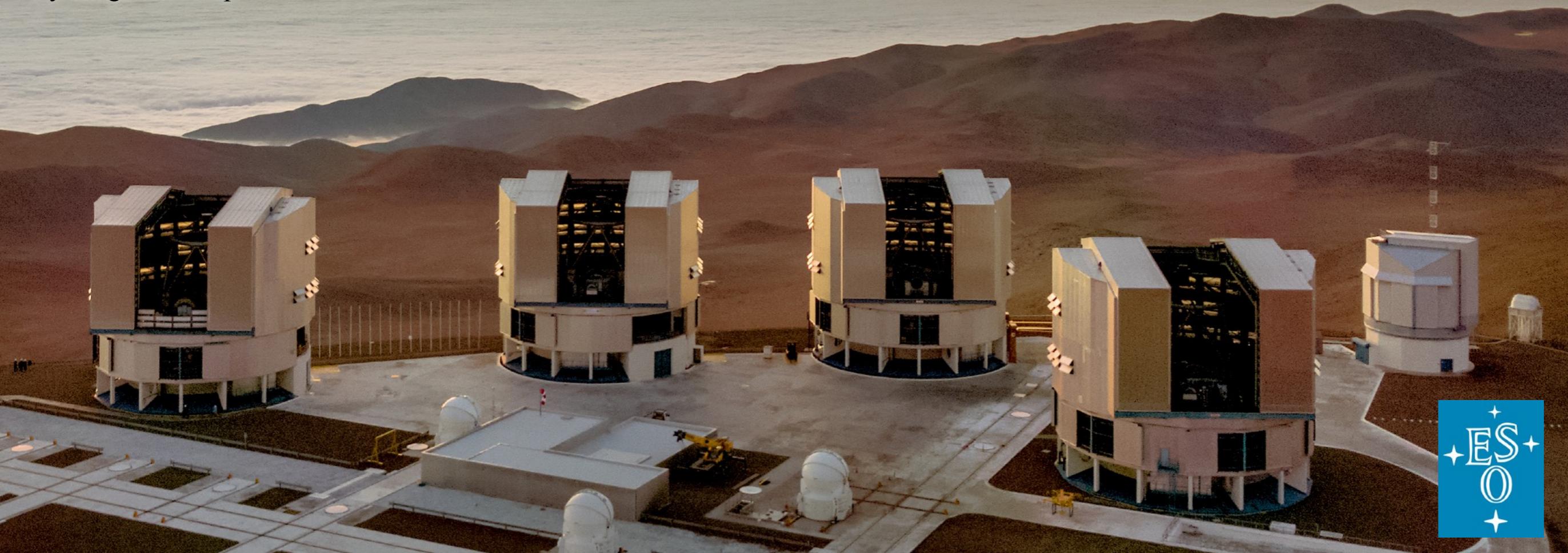
Centre de la Voie Lactée

Sagittarius A*, le trou noir central de notre Galaxie

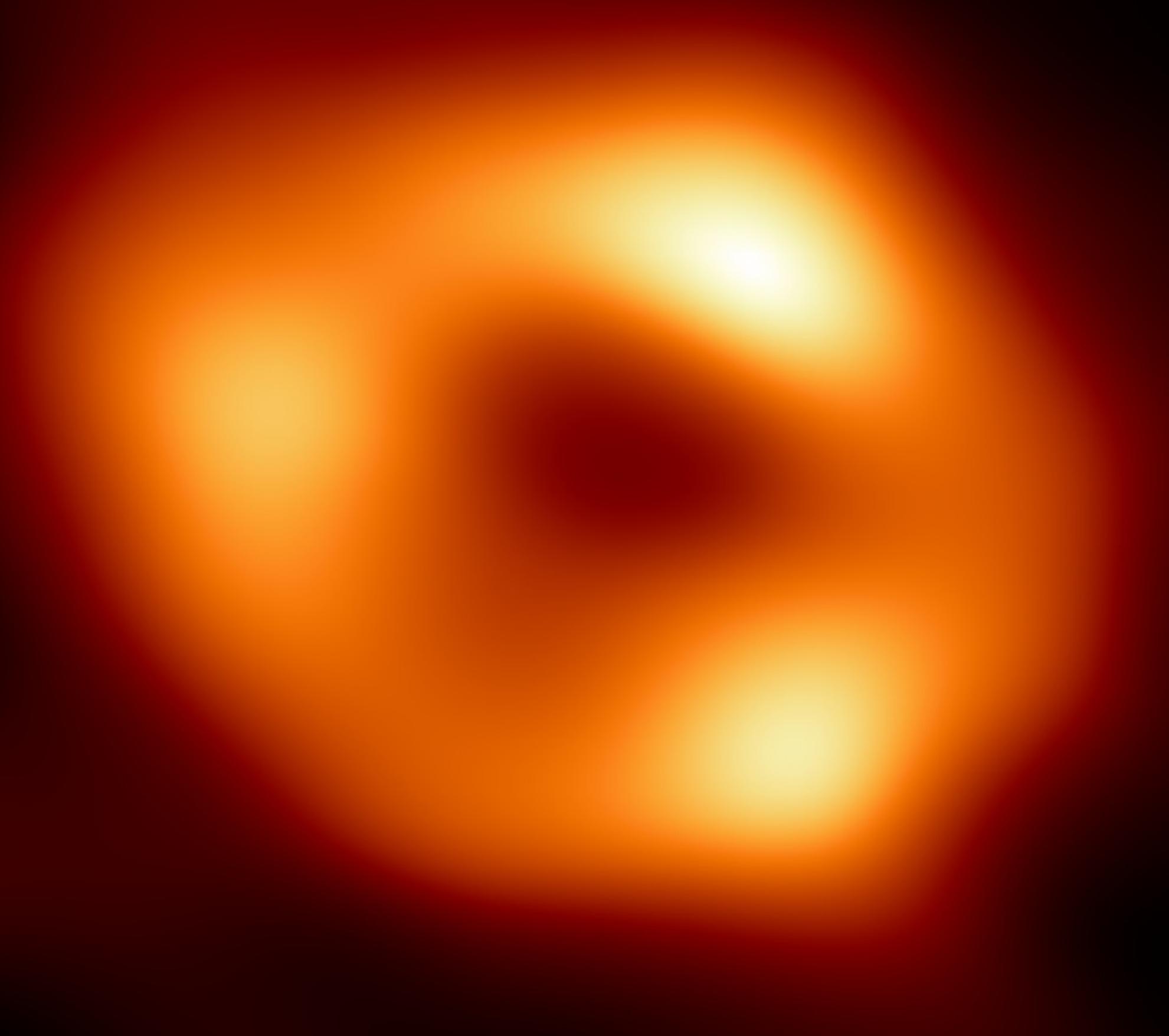


Son nom : Sagittarius A*
Sa masse : $M_{\bullet} = 4.152 \times 10^6 M_{\odot}$
(8.25×10^{36} kg !)

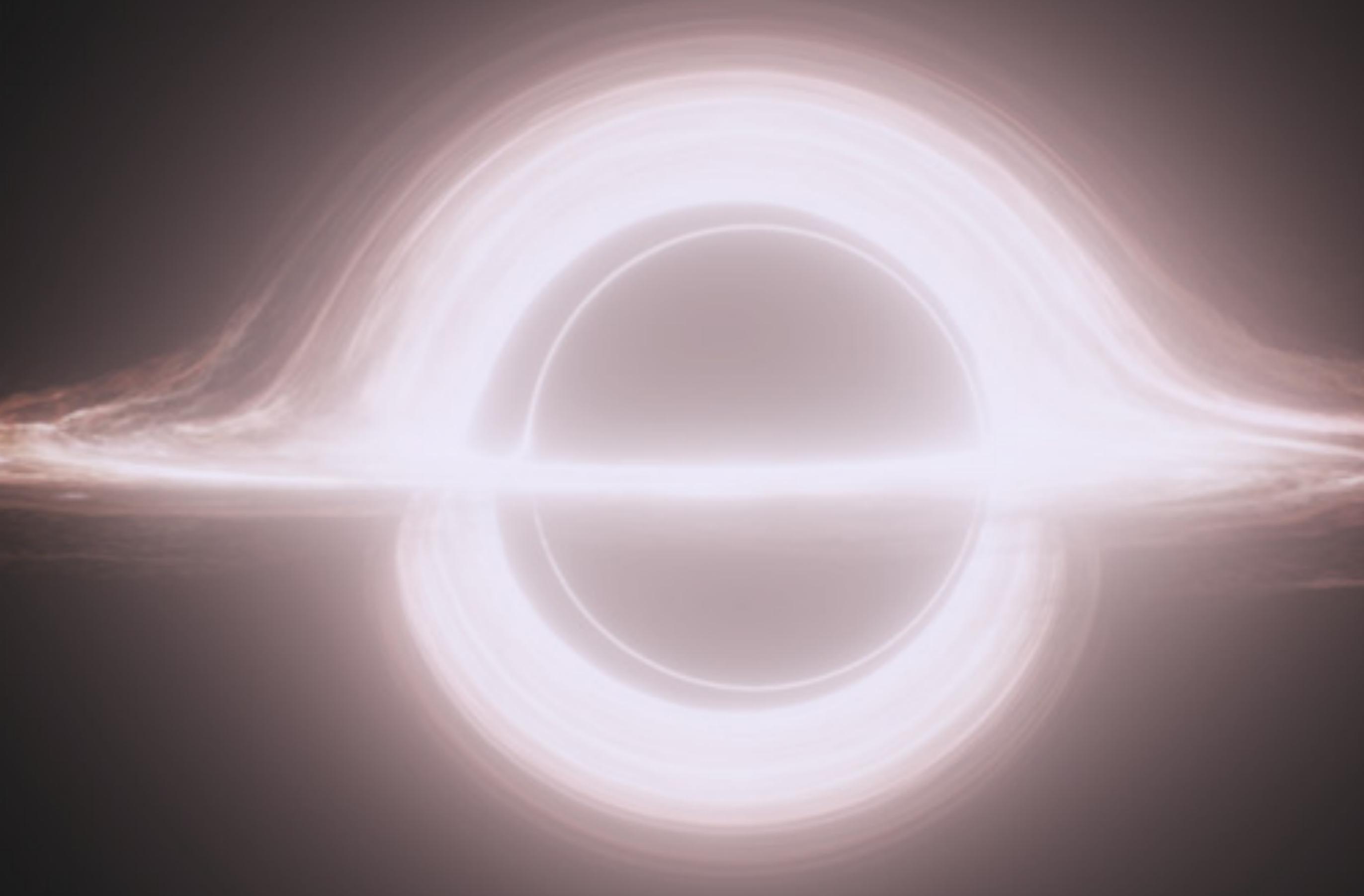
Very Large Telescope



Sagittarius A*, le trou noir central de notre Galaxie



Vue d'artiste du disque d'accrétion autour d'un trou noir



Centaurus A, une galaxie active



Un **noyau actif de galaxie (AGN)** est une région compacte située au centre d'une galaxie qui émet une quantité importante d'énergie, issue du disque d'accrétion autour du trou noir supermassif qui s'y trouve. Cette région peut lancer des jets relativistes.

Vue d'artiste d'un noyau actif



Les phénomènes de *feedback*

Le gaz du milieu interstellaire est sans cesse renouvelé, recyclé, réchauffé ou mis en mouvement par le rayonnement, les vents stellaires, les explosions de supernovas ou les **noyaux actifs de galaxies**. Ces **phénomènes de *feedback*** (rétroaction) **inhibent** généralement la formation des étoiles.

◆ Effets du rayonnement

- Rayonnement UV ionisant des jeunes étoiles : chauffe le gaz jusqu'à 10^4 K, photo-dissocie H_2
- Photo-évaporation : la surface d'un nuage chauffé peut s'étendre et se disperser dans le milieu environnant
- Pression de radiation : peut éjecter le gaz et ralentir l'accrétion

◆ Vents stellaires

Au cours de leur vie, les étoiles émettent des neutrinos et des vents stellaires, ce qui injecte de la masse, du moment cinétique et de l'énergie dans le milieu interstellaire.

◆ Explosions de supernovas

Vents stellaires et supernovas génèrent des **ondes de choc** et des **mouvements de gaz** qui non seulement chauffent le gaz mais peuvent en éjecter une grande partie (vitesses pouvant aller jusqu'à 2000 km/s). Enrichissement du milieu interstellaire en « métaux ». Turbulence.

◆ Noyaux actifs de galaxies

Les disques d'accrétion autour des trous noirs supermassifs sont très énergétiques : rayonnement important, vents stellaires, mais aussi **jets relativistes** collimatés.

Note : ces phénomènes peuvent localement avoir un effet positif sur la formation des étoiles (les métaux favorisent le refroidissement, compression du gaz).

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
- la formation des étoiles

Cours 2 (21/01/25) : L'évolution des étoiles et les phénomènes de feedback

- cycles de vie 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