

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) : Les galaxies et l'histoire de l'Univers

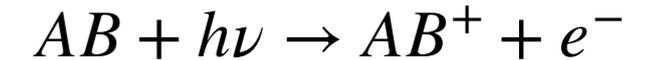
- les phénomènes de feedback
- une multitude de galaxies
- histoire de l'Univers

Cours 3 (04/02/25) : 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
- enjeux actuels et perspectives

Chimie gazeuse du milieu interstellaire

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



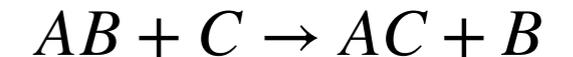
Note : l'énergie nécessaire pour photo-ioniser H₂ est supérieure à l'énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène donc H₂ n'est pas photo-ionisé.

◆ **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.

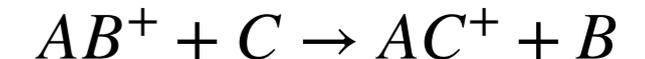
◆ **Réactions d'échange entre espèces neutres** lors de collisions.



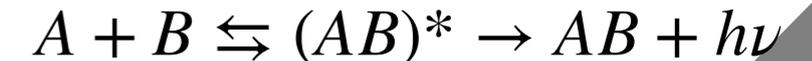
Par exemple, la formation de CO peut avoir lieu même à faible température : $C + OH \rightarrow CO + H$

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.**



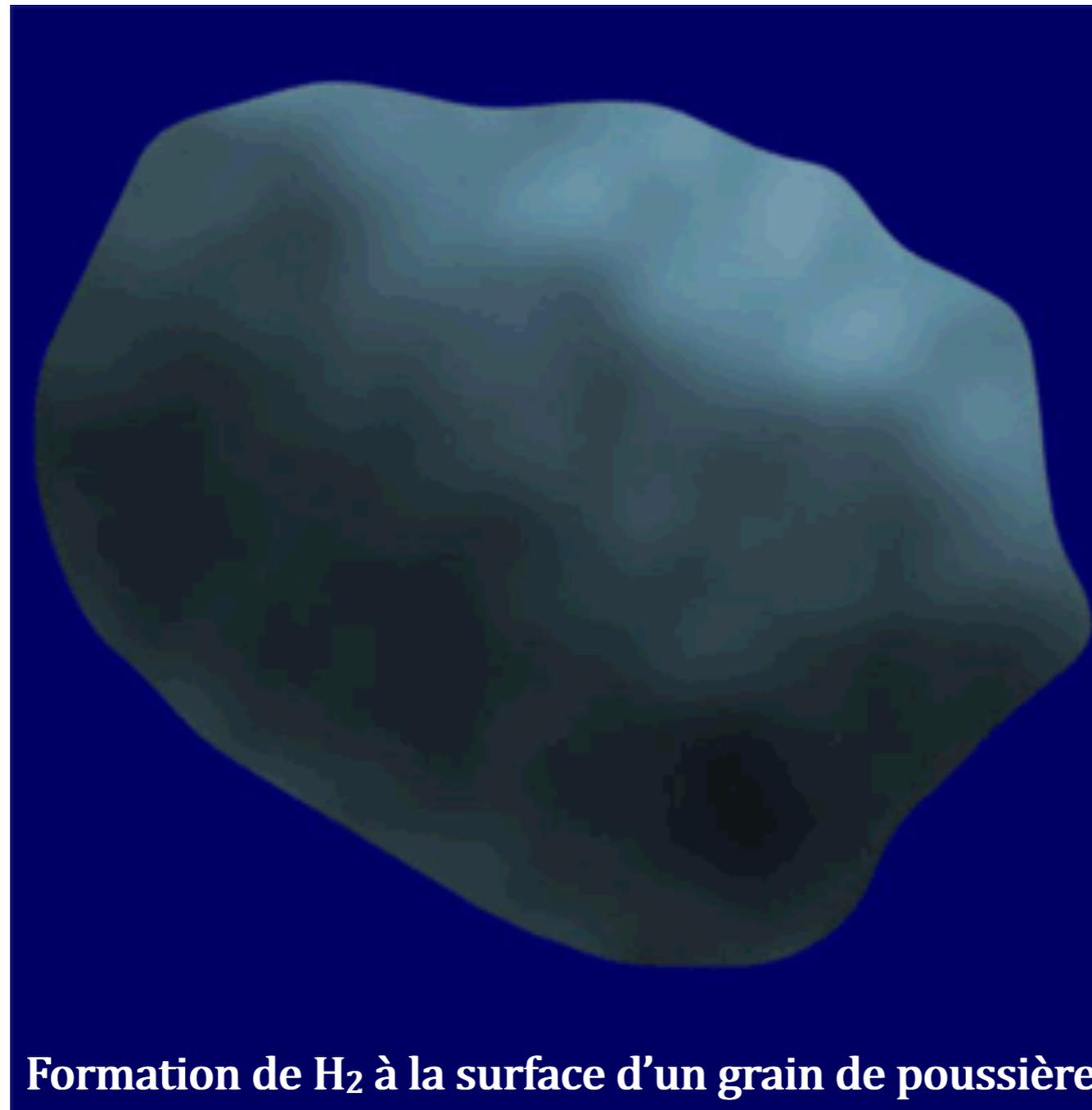
◆ **Réactions d'association radiative** : formation d'un complexe excité qui peut se stabiliser par émission d'un photon.



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

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).



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

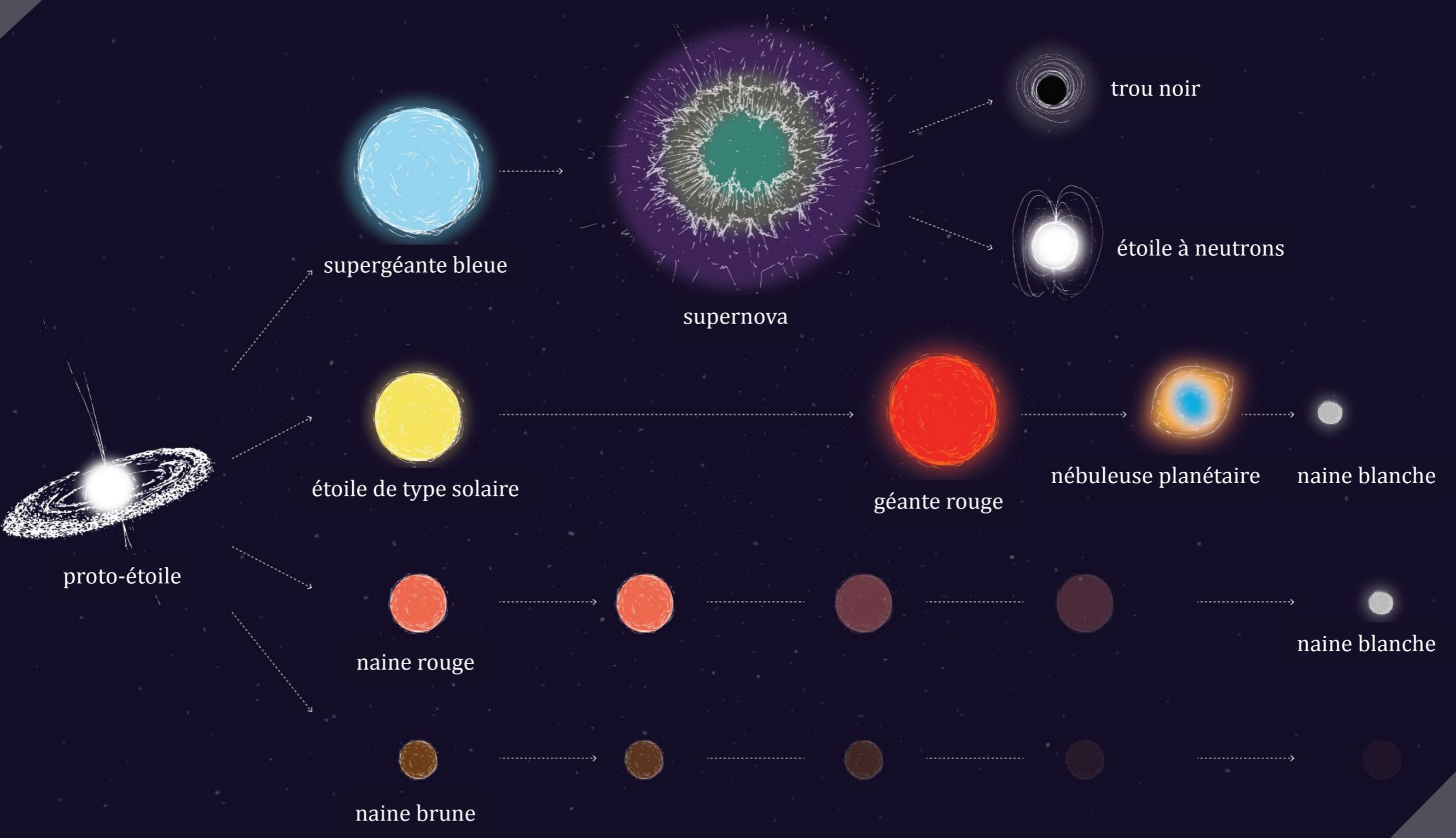
Les collisions (notamment avec des électrons libres dans le gaz ionisé) excitent les atomes, qui émettent ensuite un photon en se désexcitant. Ce qui diminue l'énergie des particules.

La formation des étoiles

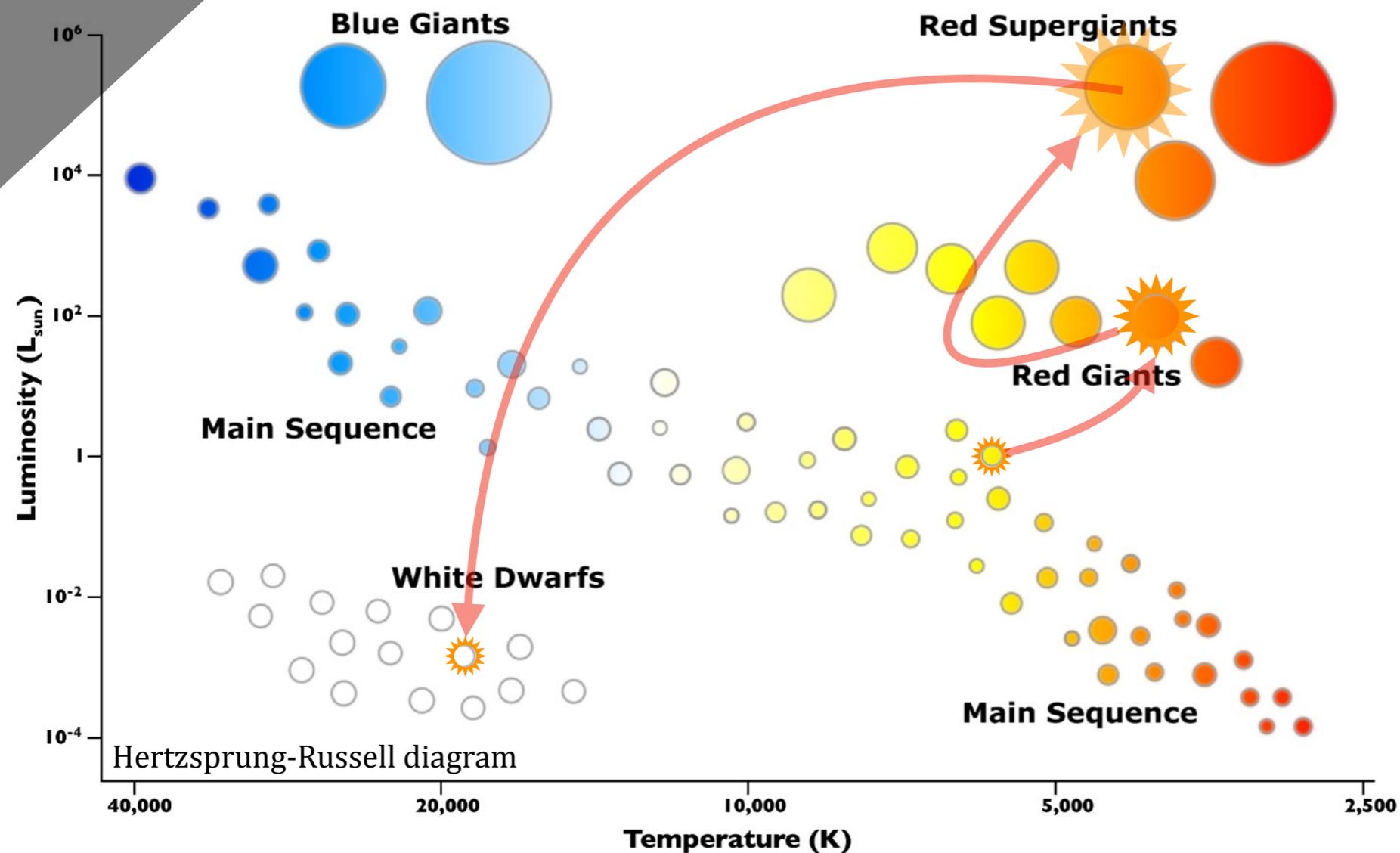
Les étoiles se forment dans des nuages moléculaires géants essentiellement composés d'hydrogène qui s'effondrent et se fragmentent en **coeurs pré-stellaires** du fait de la gravité. La température et la pression à l'intérieur de ces coeurs pré-stellaires augmente, jusqu'à déclencher des réactions de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



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).

- ◆ 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**.

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.

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

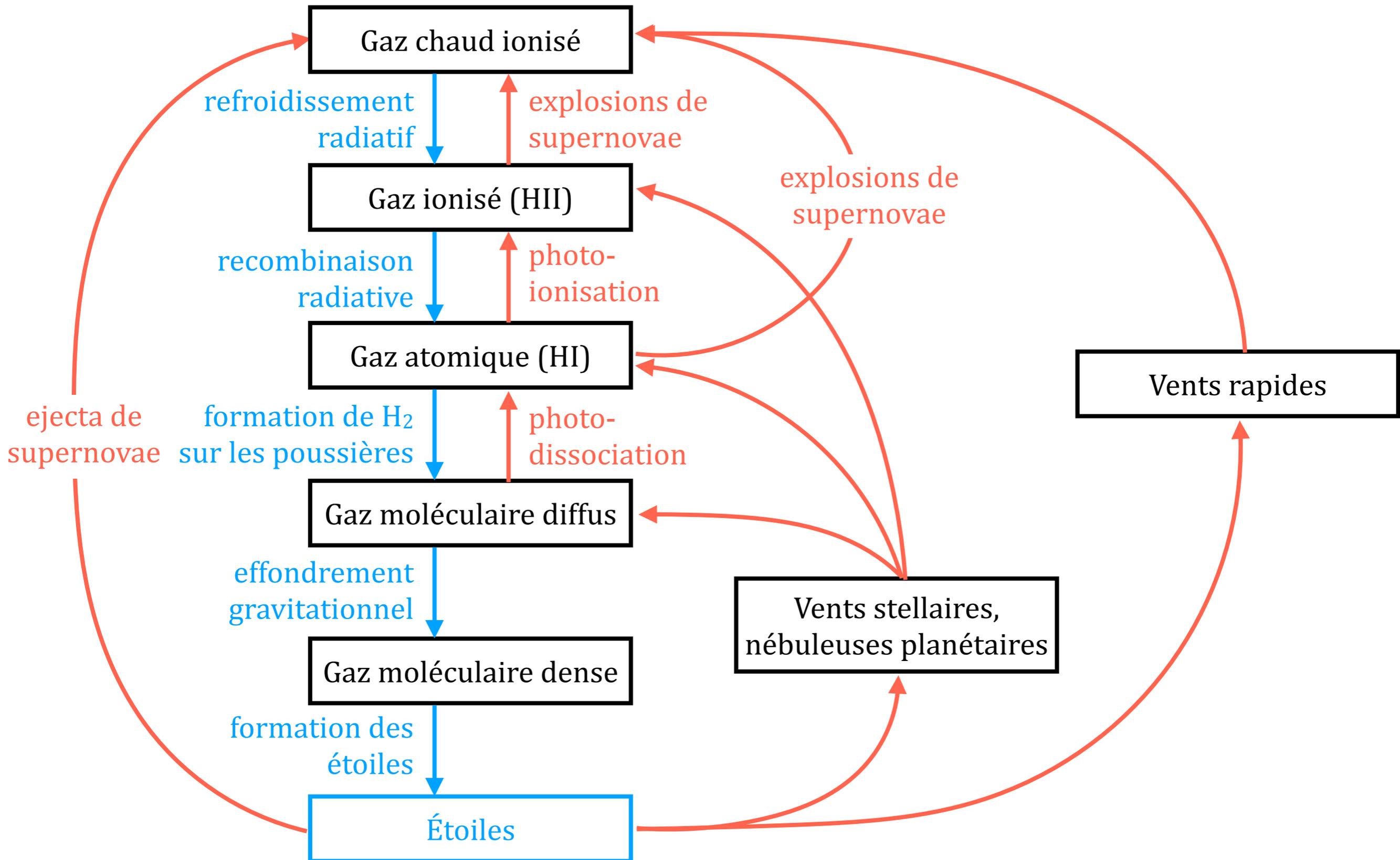
Vents stellaires et supernovas génèrent des **ondes de choc** et des **mouvements de gaz** qui non seulement chauffent le gaz mais peuvent en éjecter une grande partie (vitesses pouvant aller jusqu'à 2000 km/s). Enrichissement du milieu interstellaire en « métaux ». Turbulence.

◆ 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.

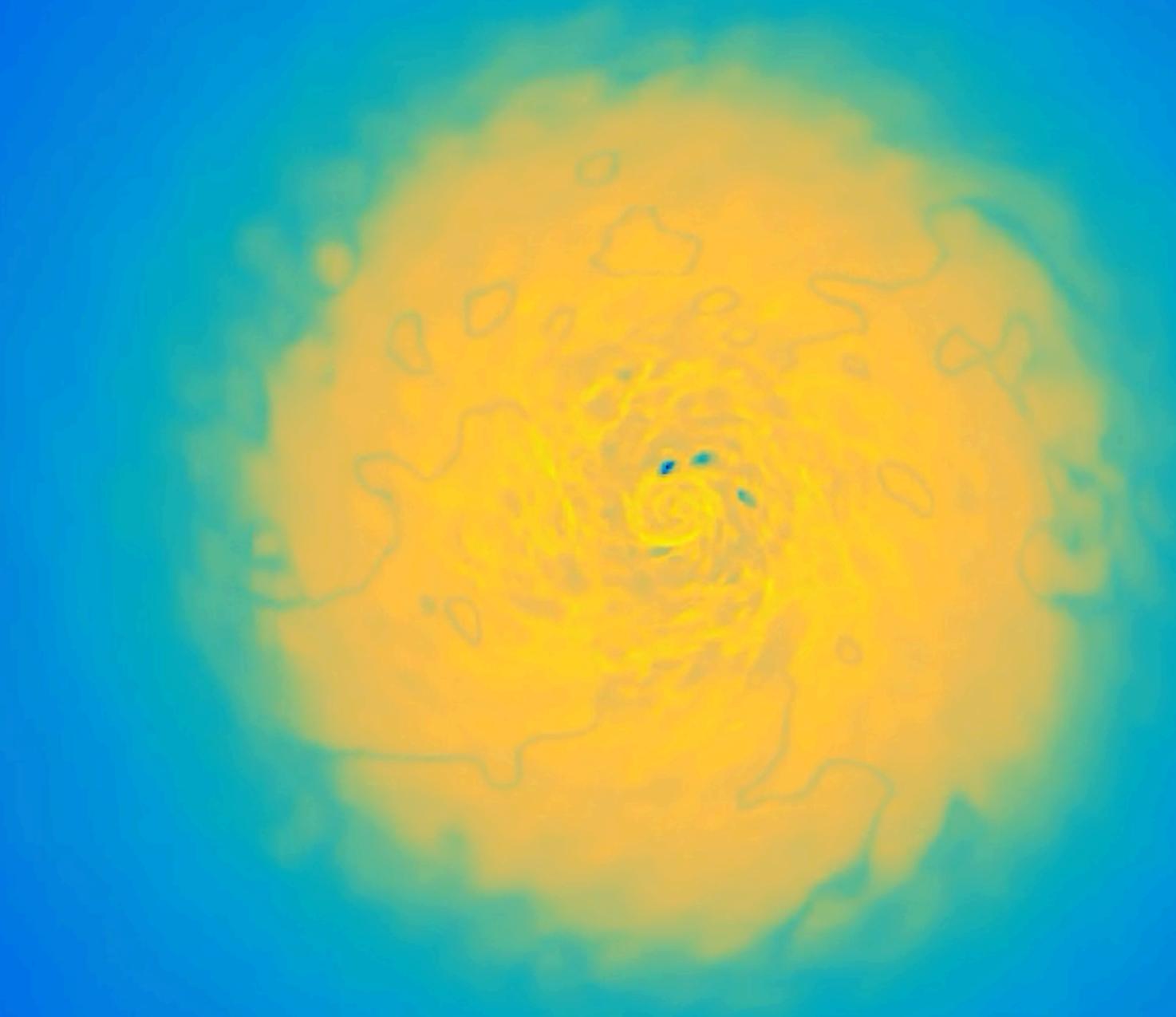
Note : ces phénomènes peuvent localement avoir un effet positif sur la formation des étoiles (les métaux favorisent le refroidissement, compression du gaz).

Cycles entre phases du MIS



Time = 20.07 Myr

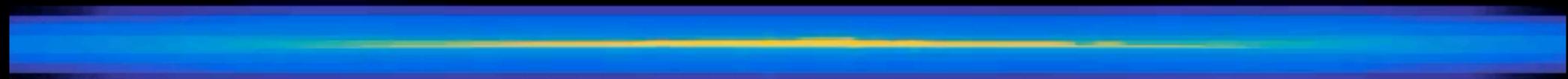
Andersson et al. (2019)



Effet du feedback sur une galaxie (simulation)

Time = 20.07 Myr

Andersson et al. (2019)



Effet du feedback sur une galaxie (simulation)

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) : Les galaxies et l'histoire de l'Univers

- les phénomènes de feedback
- une multitude de galaxies
- histoire de l'Univers

Cours 3 (04/02/25) : 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
- enjeux actuels et perspectives

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) : Les galaxies et l'histoire de l'Univers

- les phénomènes de feedback
- une multitude de galaxies
- histoire de l'Univers

Cours 3 (04/02/25) : 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
- enjeux actuels et perspectives

Une multitude d'autres galaxies



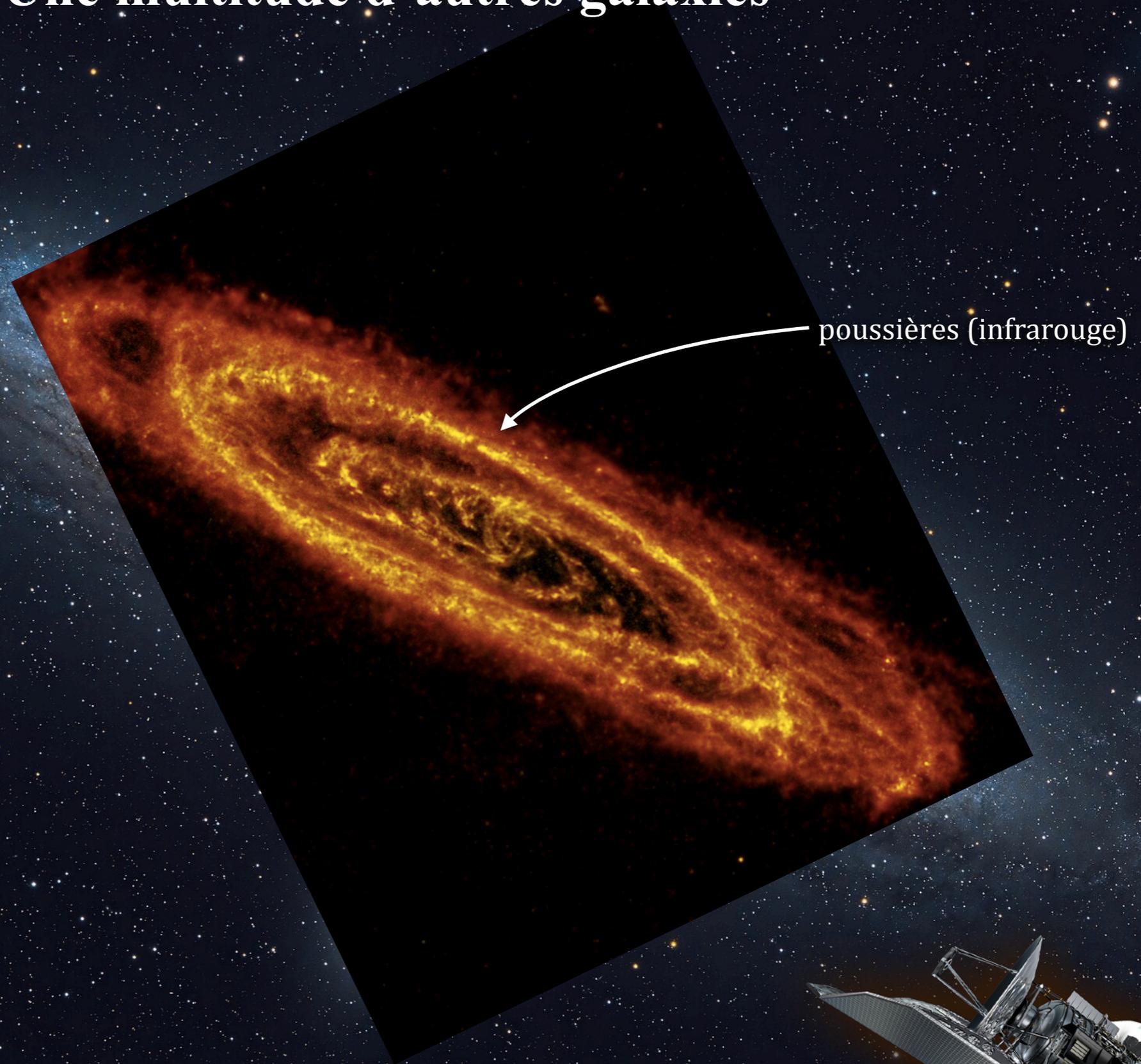
La galaxie d'Andromède (M31), notre voisine

Une multitude d'autres galaxies



La galaxie d'Andromède (M31)

Une multitude d'autres galaxies



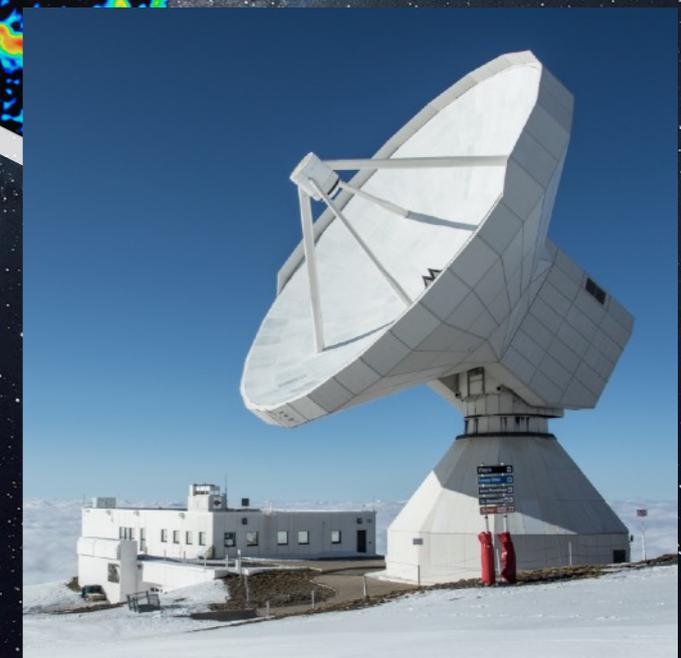
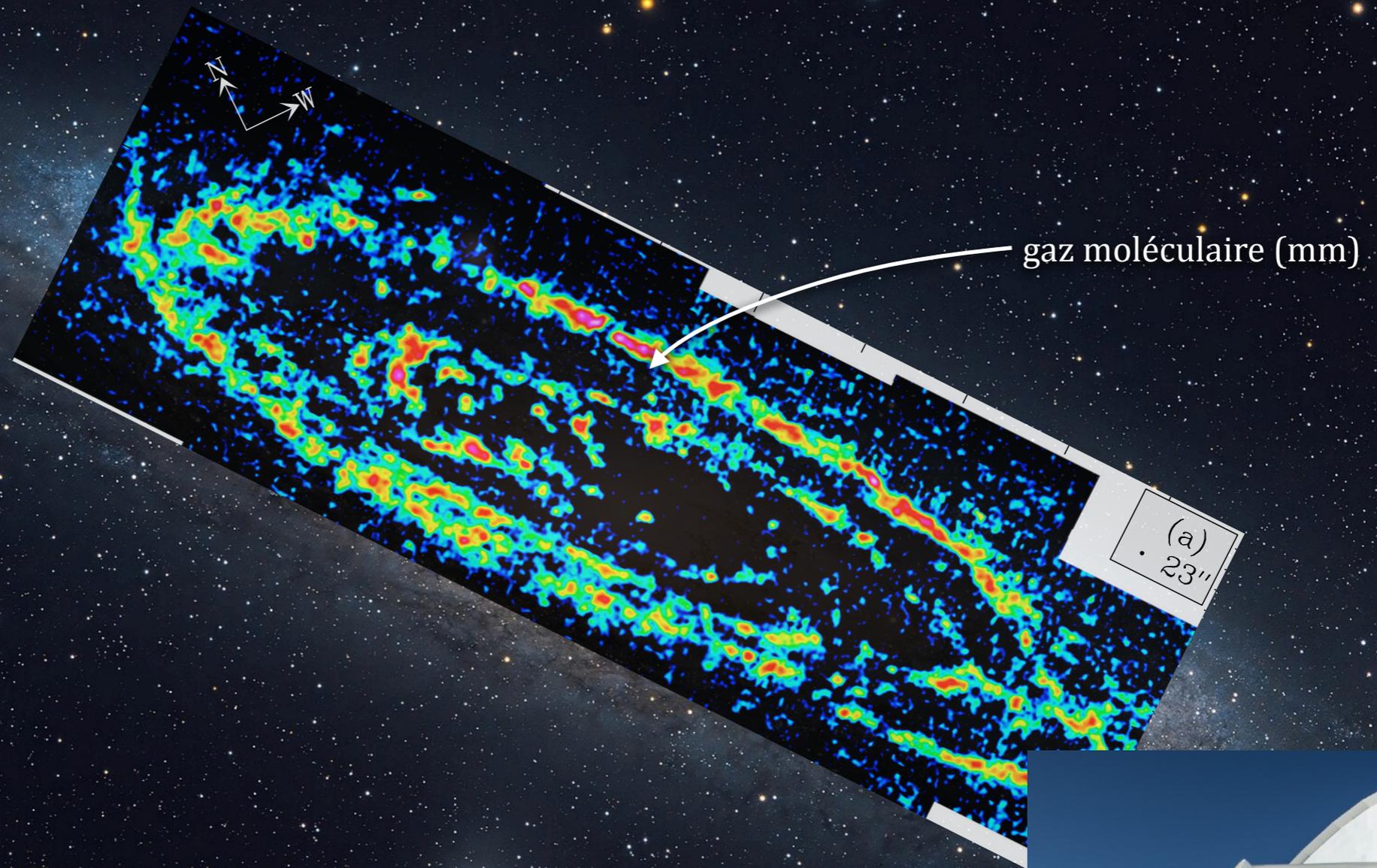
poussières (infrarouge)

La galaxie d'Andromède (M31)



Herschel Space Telescope (ESA)

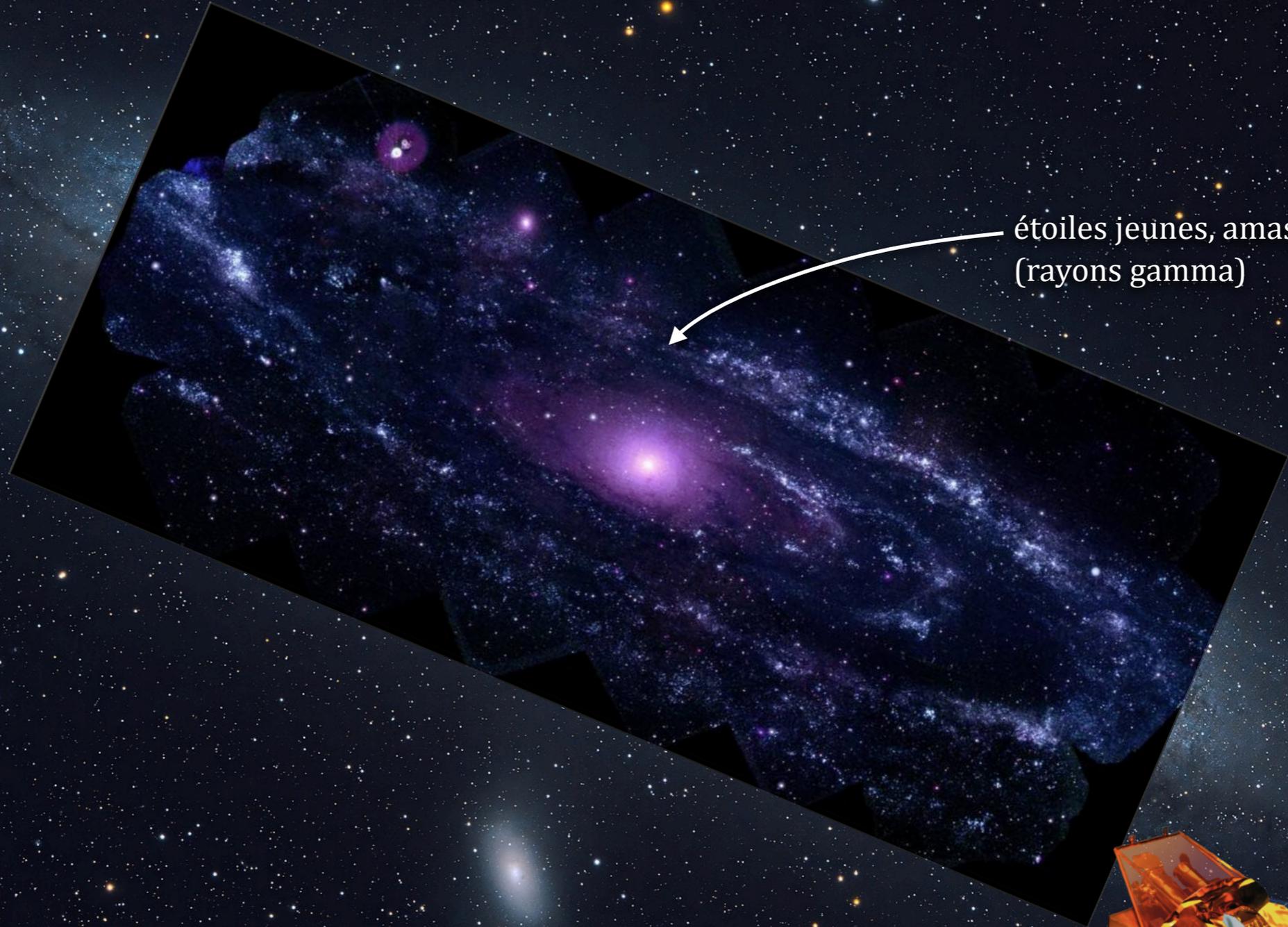
Une multitude d'autres galaxies



La galaxie d'Andromède (M31)

Radiotélescope de 30m (IRAM)

Une multitude d'autres galaxies



étoiles jeunes, amas d'étoiles
(rayons gamma)



La galaxie d'Andromède (M31)

Swift Space Observatory (NASA)

Une multitude d'autres galaxies

Small Magellanic Cloud (SMC)

Large Magellanic Cloud (LMC)

Les nuages de Magellan

Une multitude d'autres galaxies

Galaxie du Triangle (M33)

Une multitude d'autres galaxies



M51, une autre galaxie spirale

Une multitude d'autres galaxies

M87, une galaxie elliptique

Une multitude d'autres galaxies

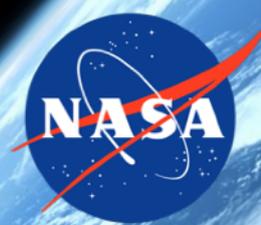
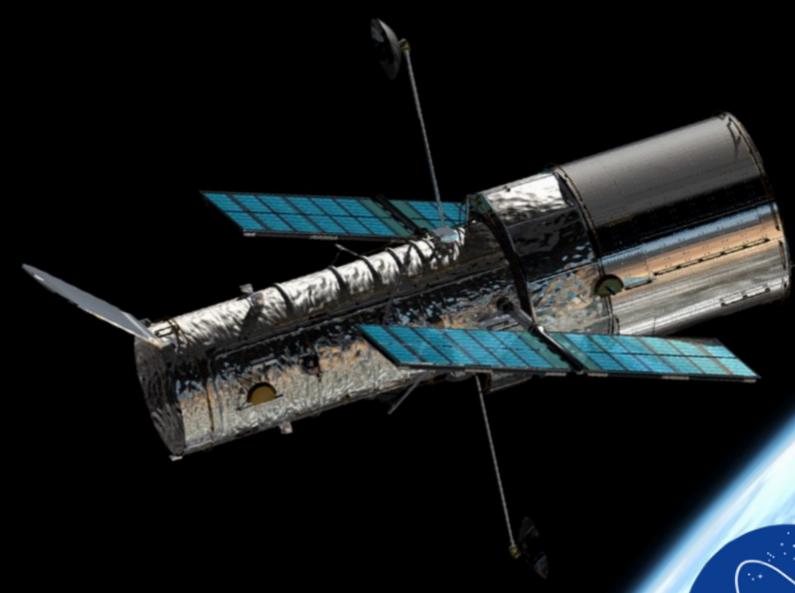


Le Quintet de Stephan, un groupe de galaxies

Une multitude d'autres galaxies

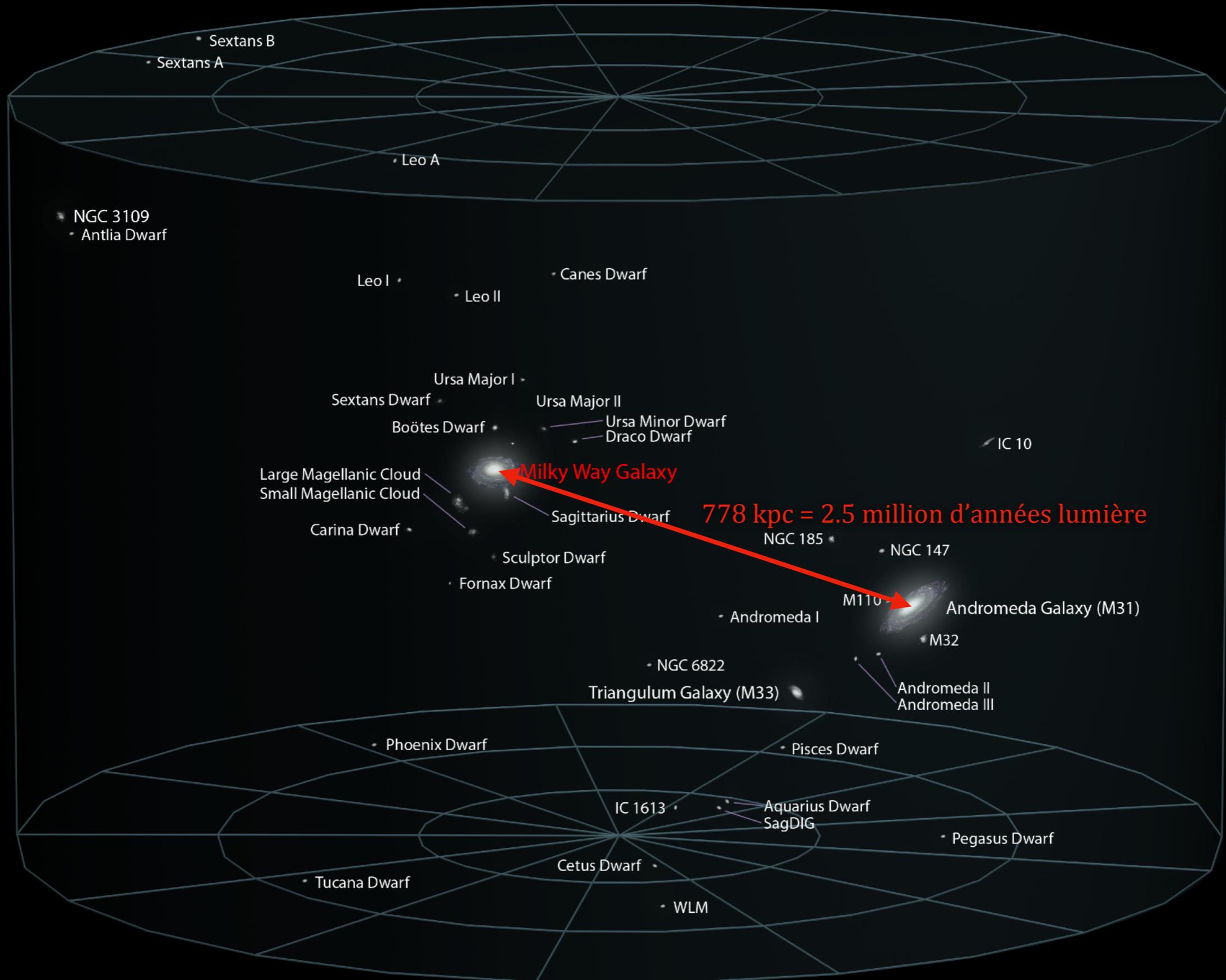
Un amas de galaxies

Une multitude d'autres galaxies



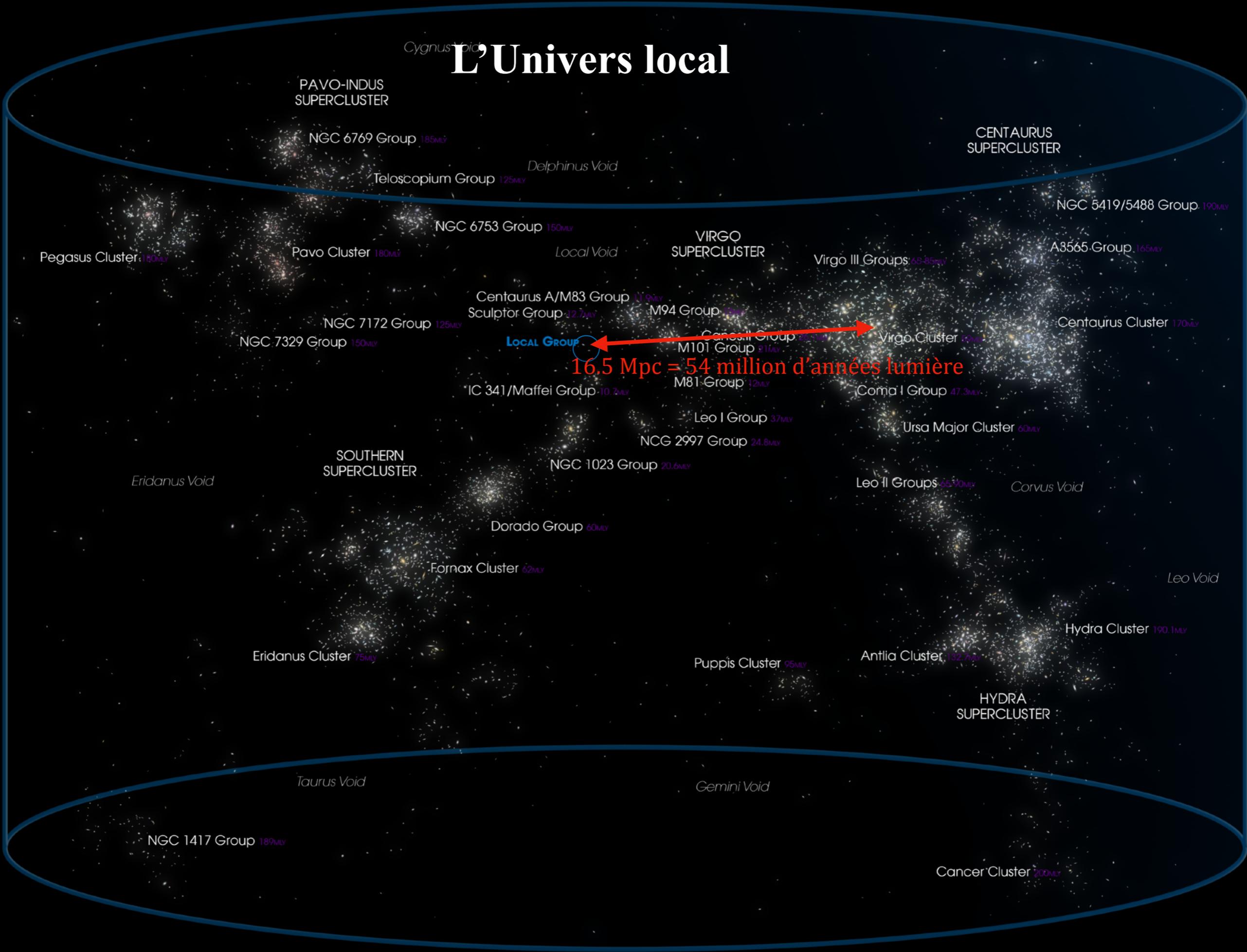
Hubble Space Telescope

Le Groupe Local



L'Univers local

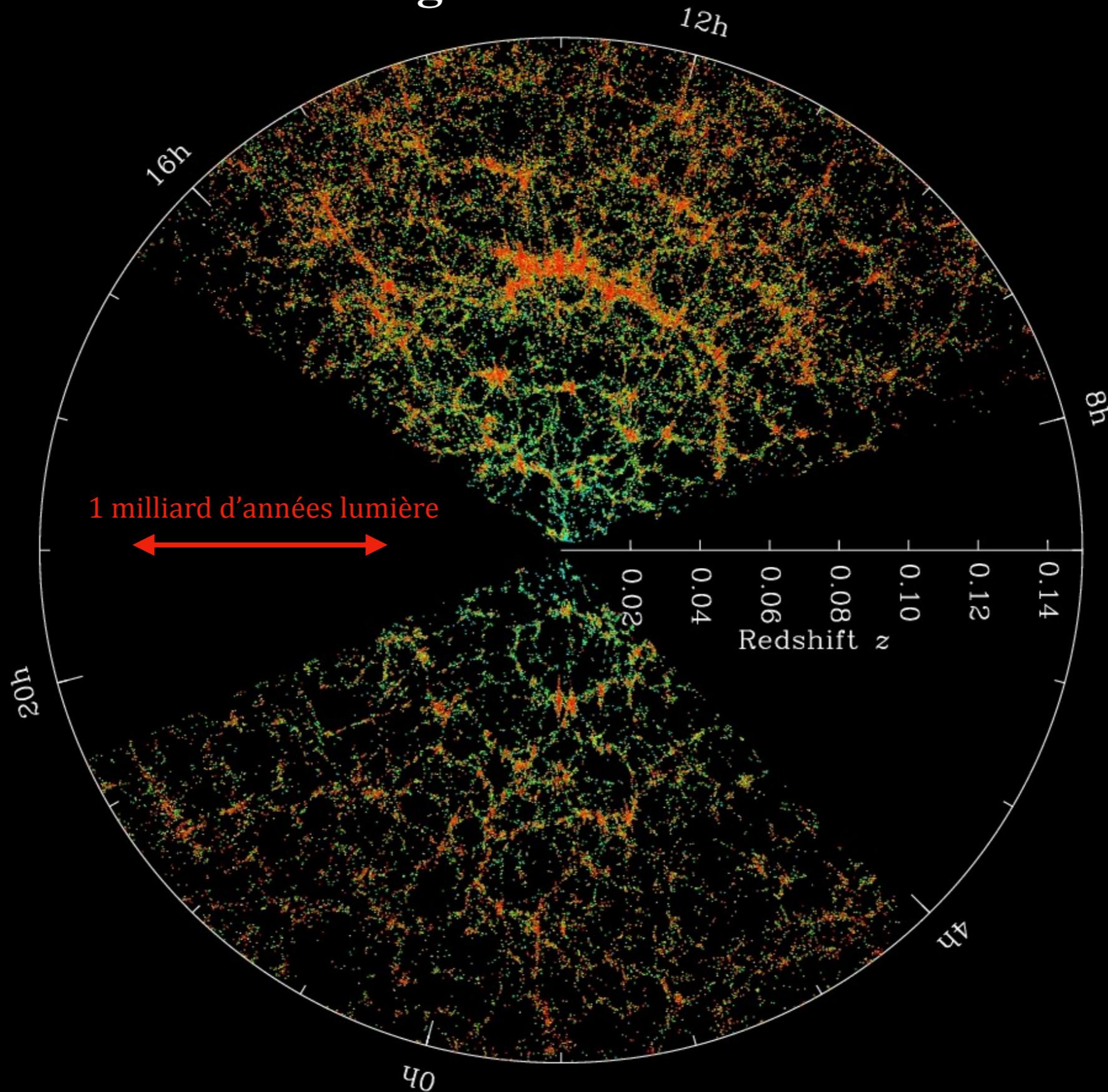
L'ANIAKEA



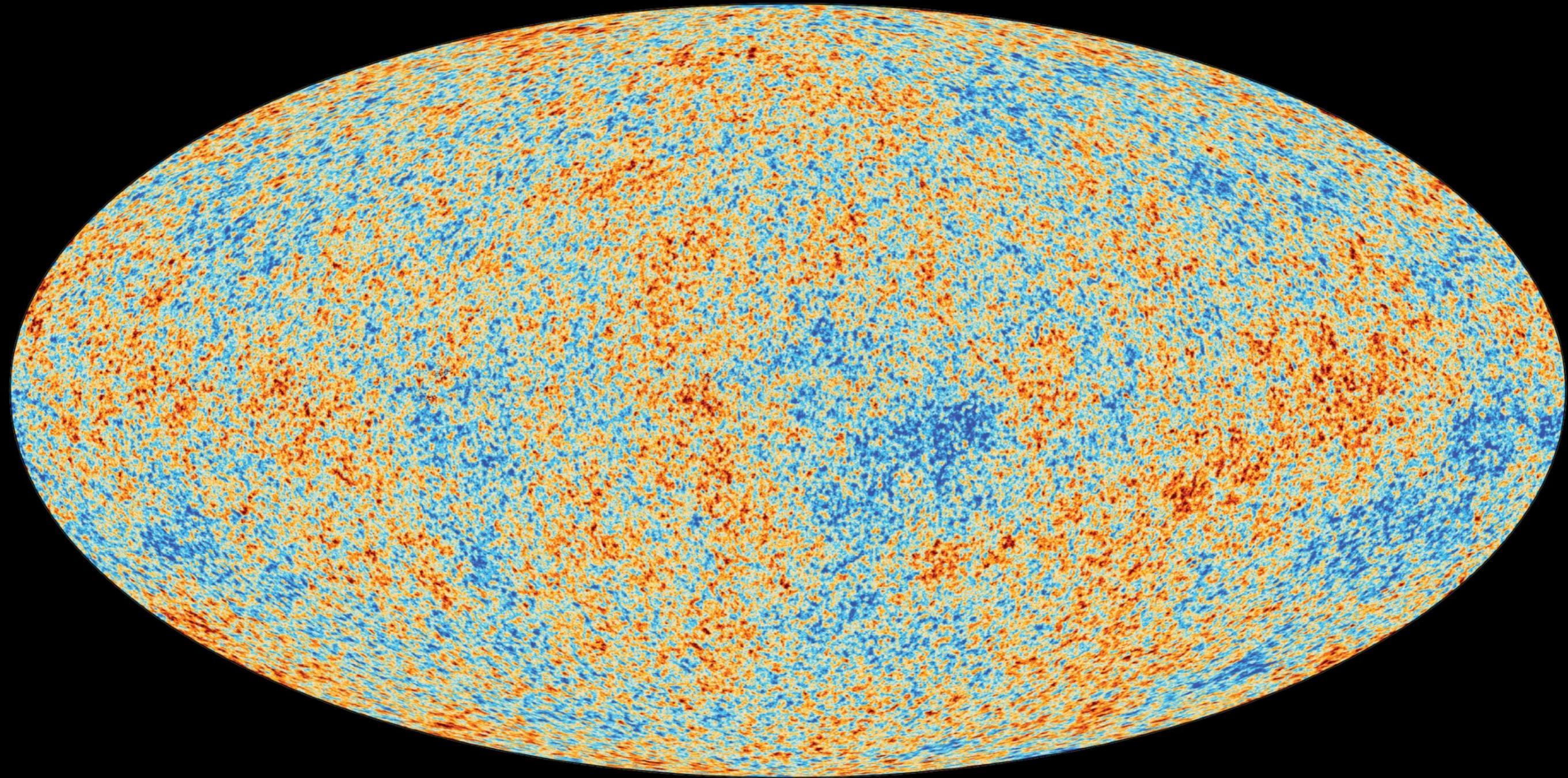
16.5 Mpc = 54 million d'années lumière

LOCAL GROUP

La structure à grande échelle de l'Univers

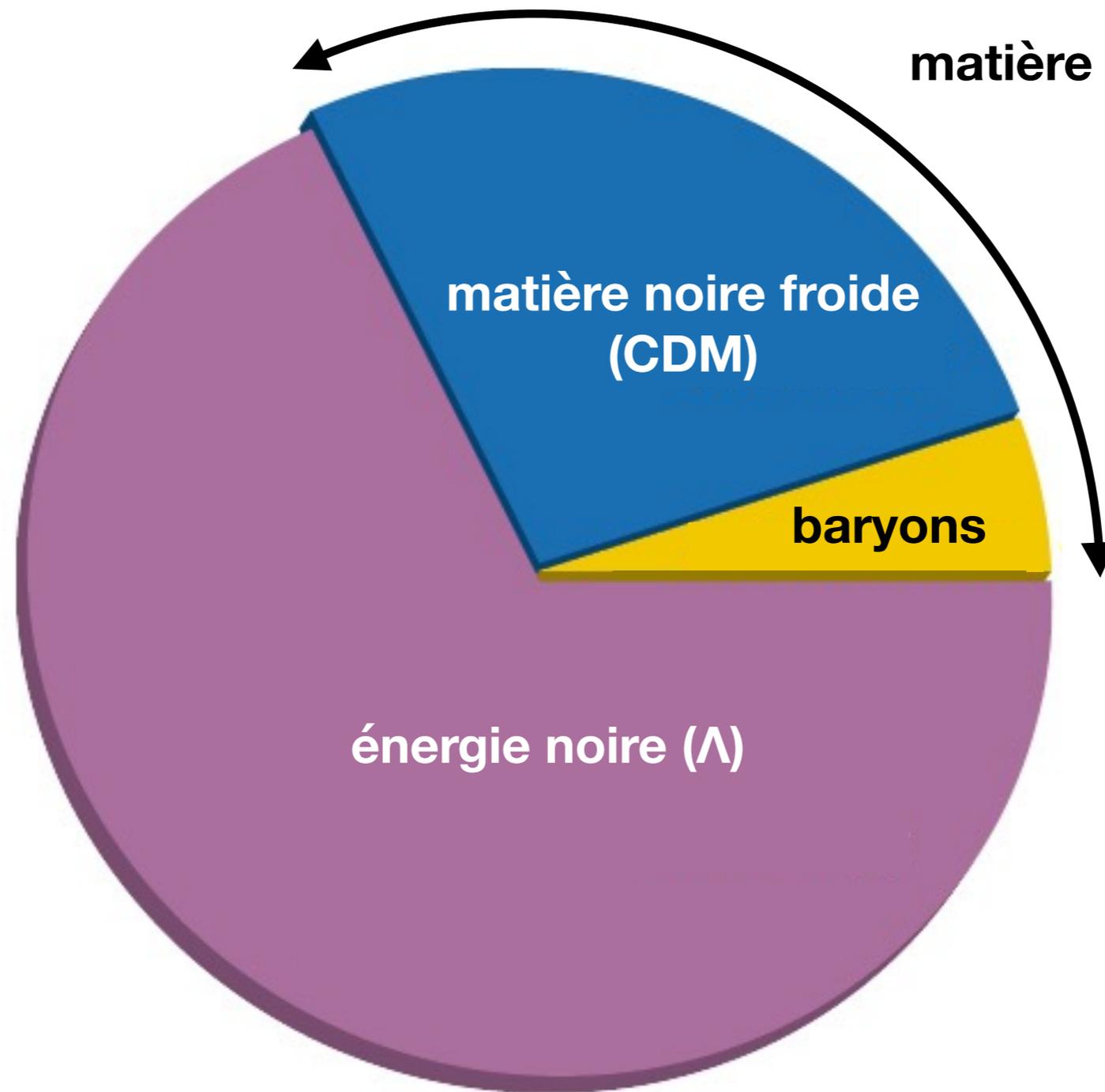


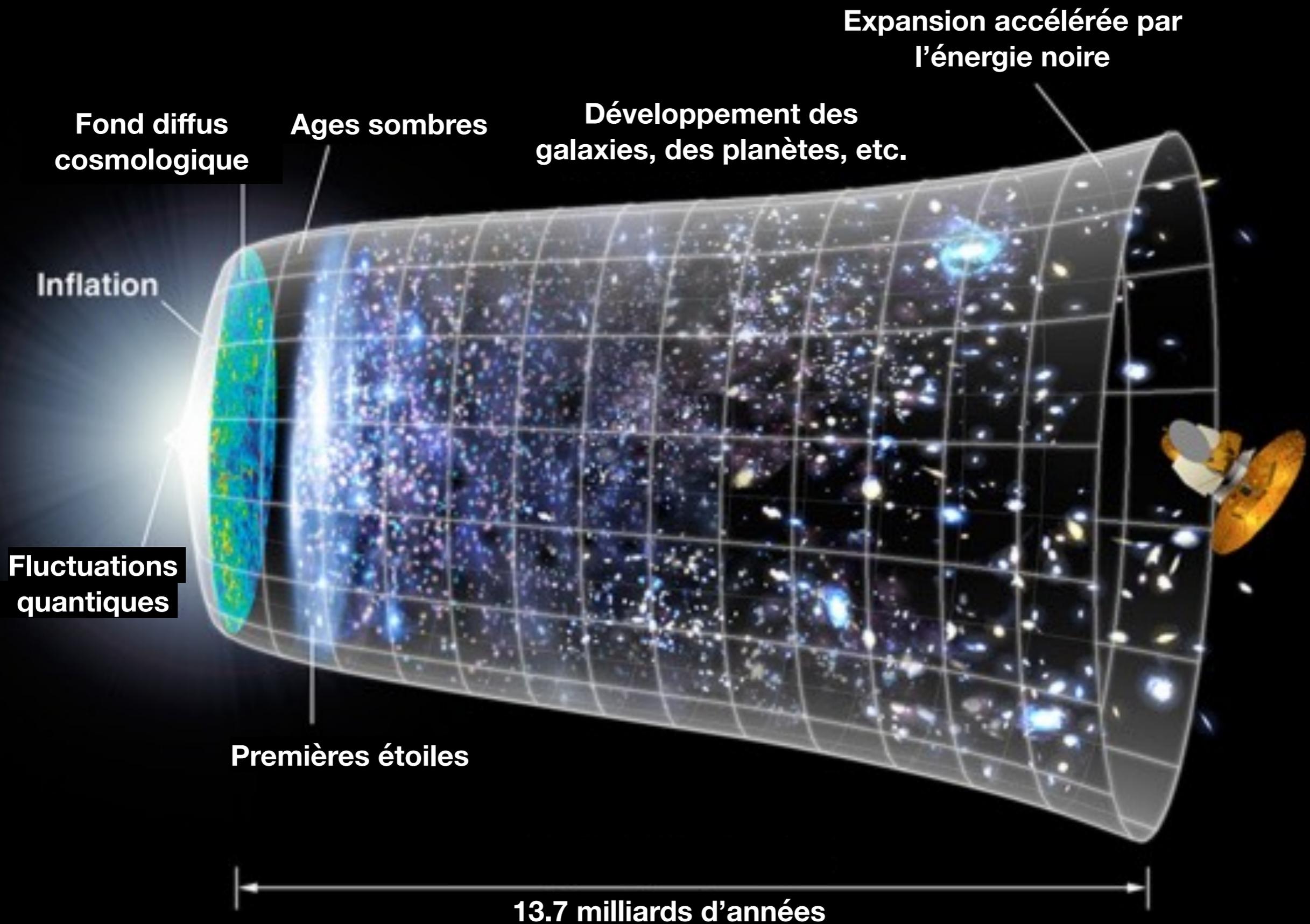
Le fond diffus cosmologique



Le CMB (fond diffus cosmologique) est une image du plus ancien rayonnement émis dans l'Univers, imprimé sur le ciel lorsque l'Univers avait 380 000 ans (il y a 13,7 milliards d'années). Les infimes fluctuations de température ont des amplitudes d'environ 10^{-5} et correspondent à des régions de densité légèrement différente, qui donneront naissance aux structures de l'Univers actuel.

La composition de l'Univers dans le modèle Λ CDM





$z = 48.4$

$T = 0.05 \text{ Gyr}$

Aquarius simulation (matière noire)

(1 kpc $\simeq 3 \times 10^{16}$ km $\simeq 3000$ A.L.)

lien video : <https://www.youtube.com/watch?v=2qeT4DkEX-w>

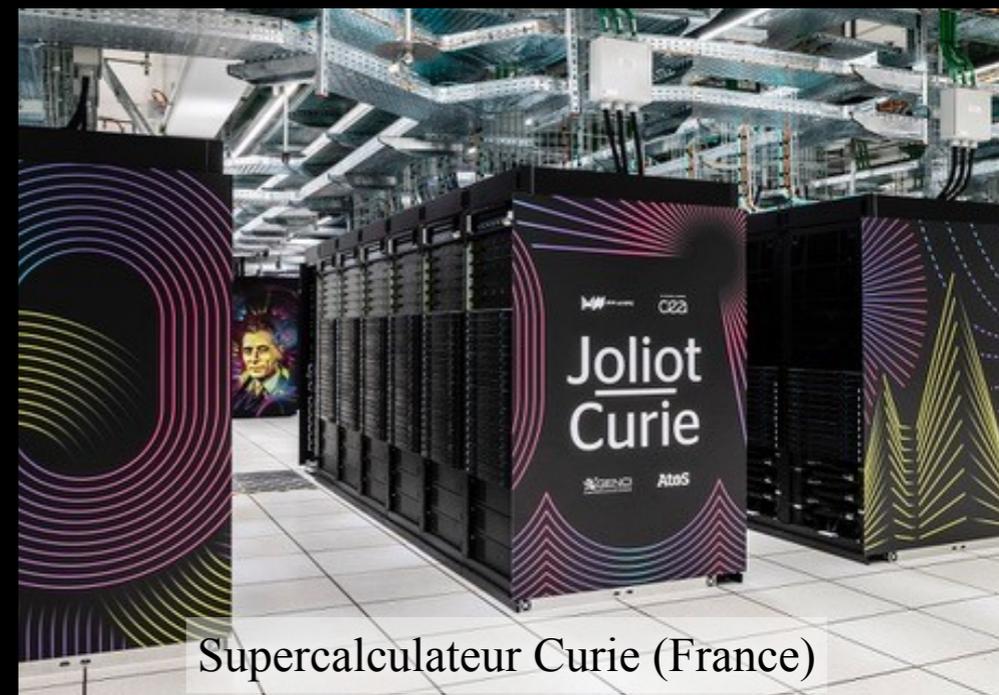
500 kpc



Supercalculateur COBRA (Allemagne)

Illustris simulation

lien video : https://www.illustris-project.org/movies/illustris_movie_rot_sub_frame.mp4



Supercalculateur Curie (France)

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) : Les galaxies et l'histoire de l'Univers

- les phénomènes de feedback
- une multitude de galaxies
- histoire de l'Univers

Cours 3 (04/02/25) : 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
- enjeux actuels et perspectives