



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES
Département d'astronomie

Cosmologie

Corinne Charbonnel & Stéphane Paltani
Professeur.e.s au Département d'Astronomie UniGE

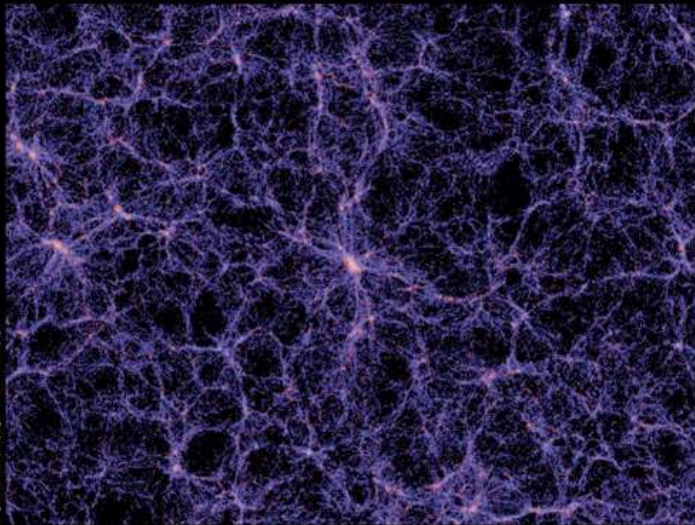


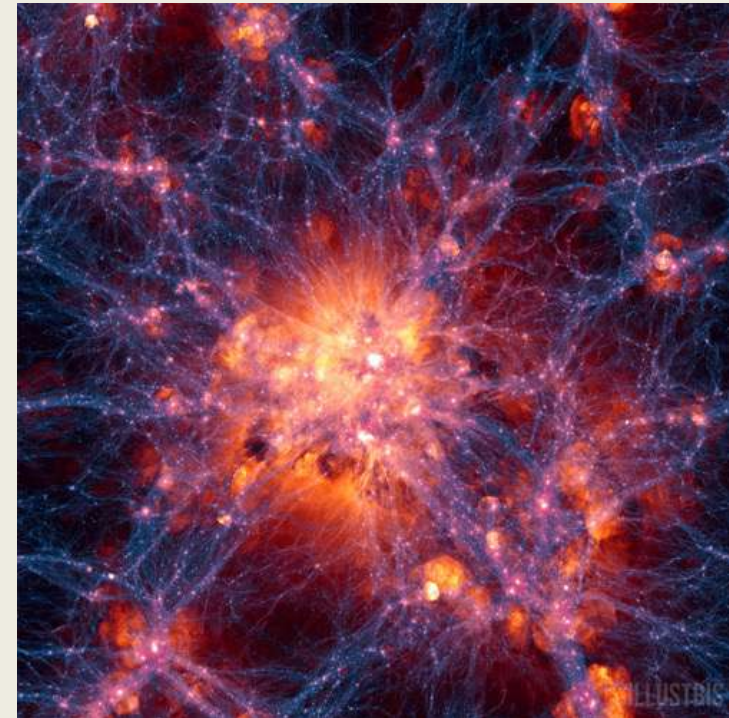
Image : Ochiu, MPA, V. Springel/Max Planck Institute for Astrophysics

le mardi, du 19 septembre au 19 décembre 2023
de 17h45 à 18h45
Auditoire A300 - Sciences II, 30 quai Ernest-Ansermet, Genève

Inscription au cours sur place le 19 septembre
Renseignements : <http://unige.ch/sciences/astro>

Cours 7 – 31 octobre 2023

Formation des grandes structures Galaxies, amas de galaxies et matière noire (I)



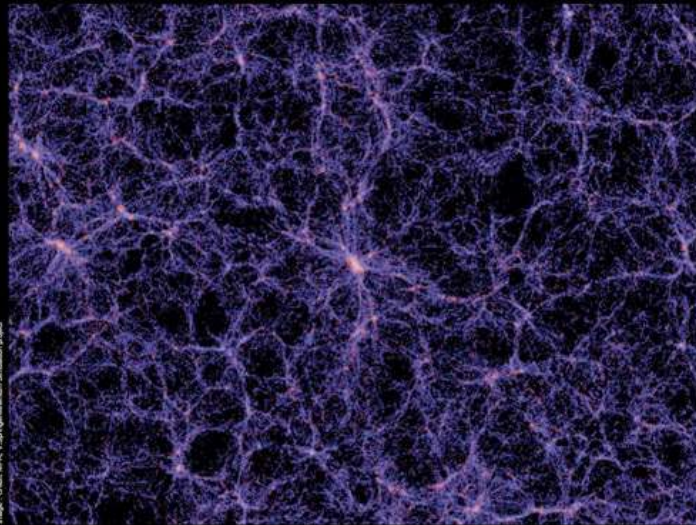
<https://www.illustris-project.org/media/>

De l'univers local aux grandes structures

<https://mediaserver.unige.ch/play/203811>

Cosmologie

Corinne Charbonnel & Stéphane Paltani
Professeur.e.s au Département d'Astronomie UniGE



le mardi, du 19 septembre au 19 décembre 2023
de 17h45 à 18h45
Auditoire A300 - Sciences II, 30 quai Ernest-Ansermet, Genève

Inscription au cours sur place le 19 septembre
Renseignements : <http://unige.ch/sciences/astro>

10A001 – Astronomie générale Cosmologie

 UNIVERSITÉ
DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES

16^{èmes} conférences publiques d'astronomie
UNIGE-EPFL année 2023



Par Marc Sauvage
Astrophysicien au CEA – Saclay
Vice-président du Conseil scientifique du consortium Euclid





euclid
EXPLORING THE DARK UNIVERSE

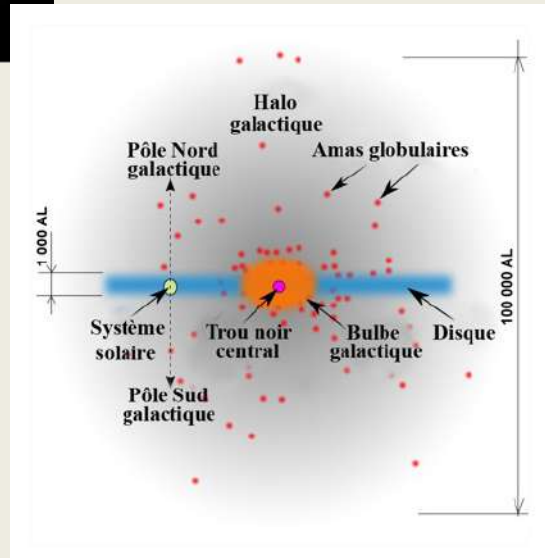
Credit image ESA

Mercredi 15 novembre 2023 à 19h00 Auditoire C01 EPFL Ecublens/Lausanne	Judi 16 novembre 2023 à 19h00 Salle U300 Auditoire Rouiller Uni-Dufour Genève
--	---

Entrée libre

De la Galaxie aux grandes structures, un peu de nomenclature et quelques exemples

La Voie Lactée

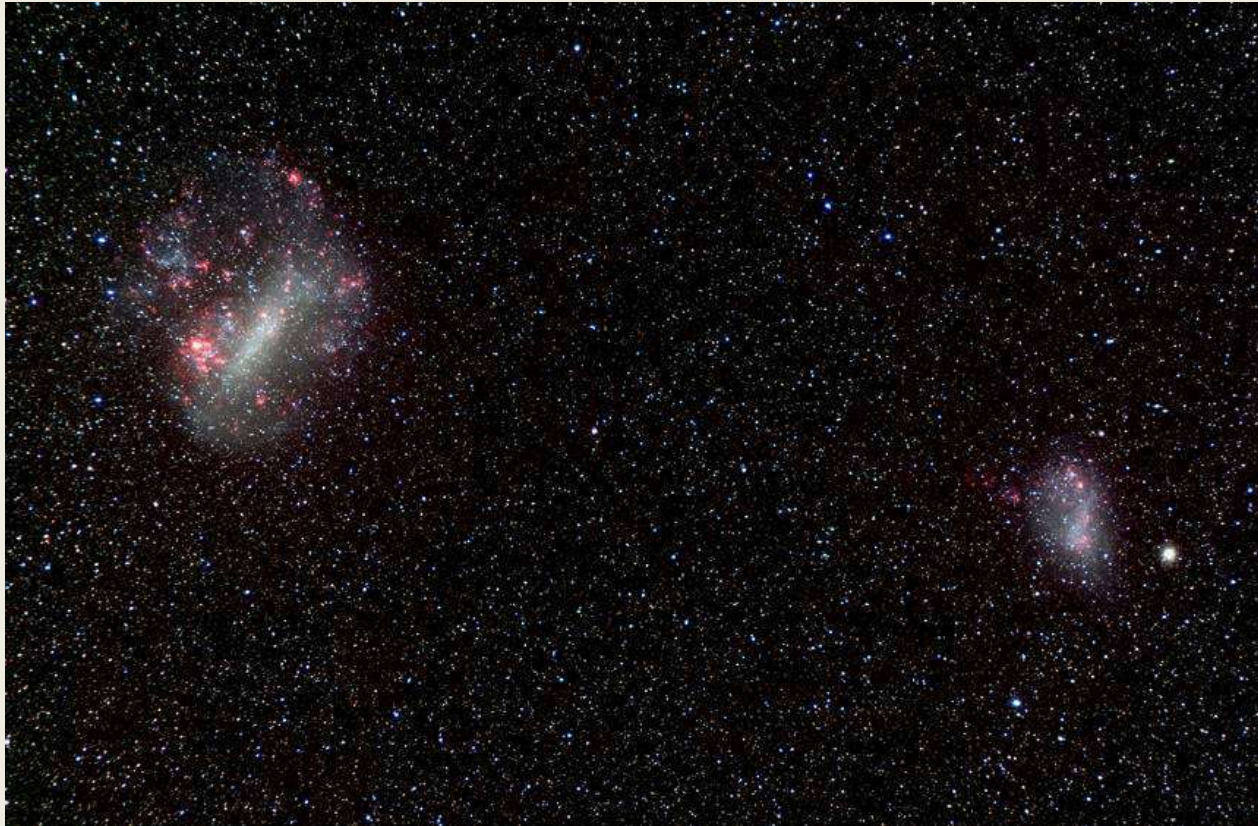


Nuages de Magellan

Galaxies naines irrégulières

Dominées par des populations d'étoiles jeunes

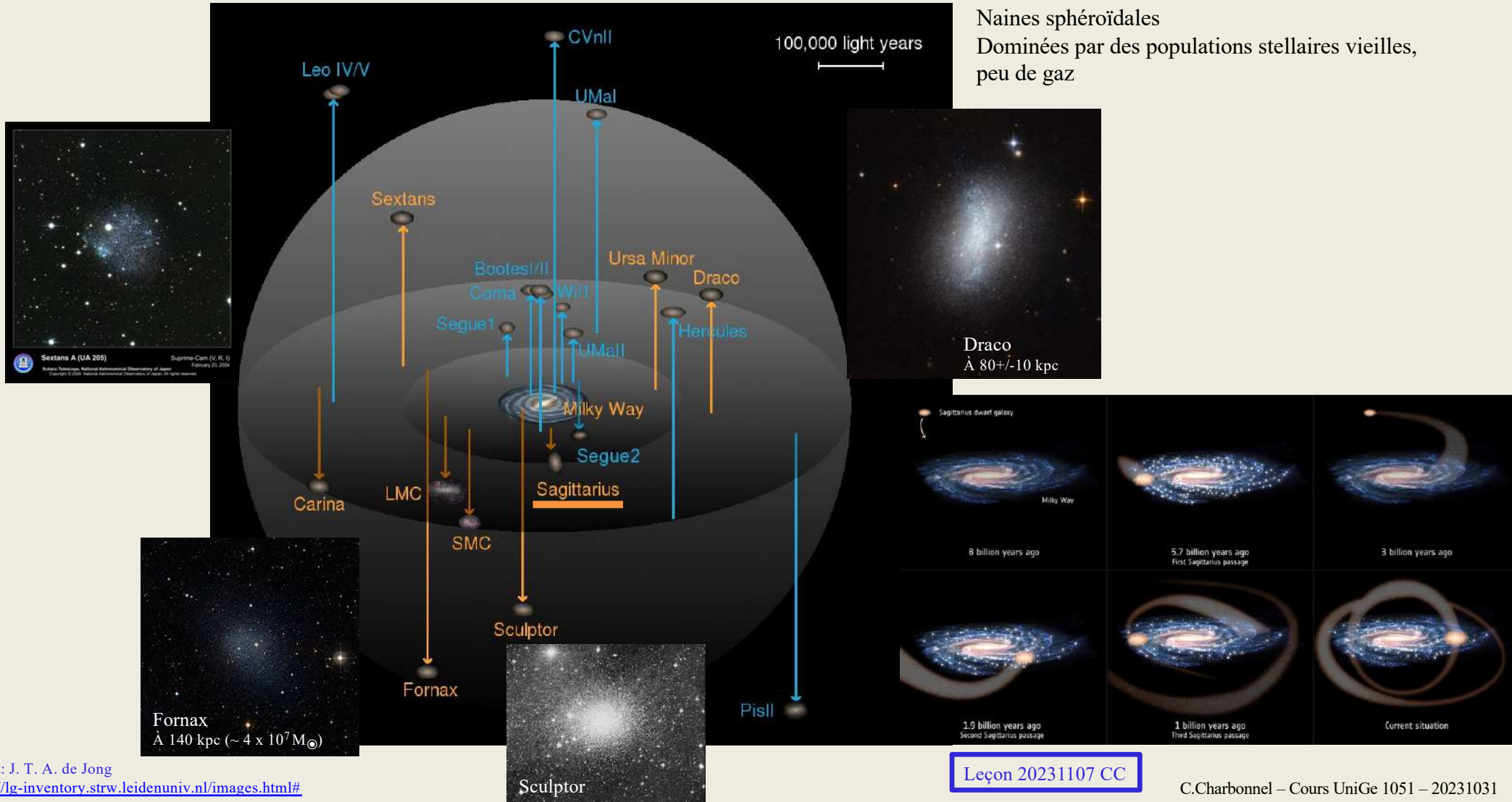
Plusieurs sites de formation stellaire (30 Doradus)



Grand nuage (LMC diamètre $\sim 30'000$ a.l)
 $\dot{A} \sim 52$ kpc ($\sim 160'000$ al)

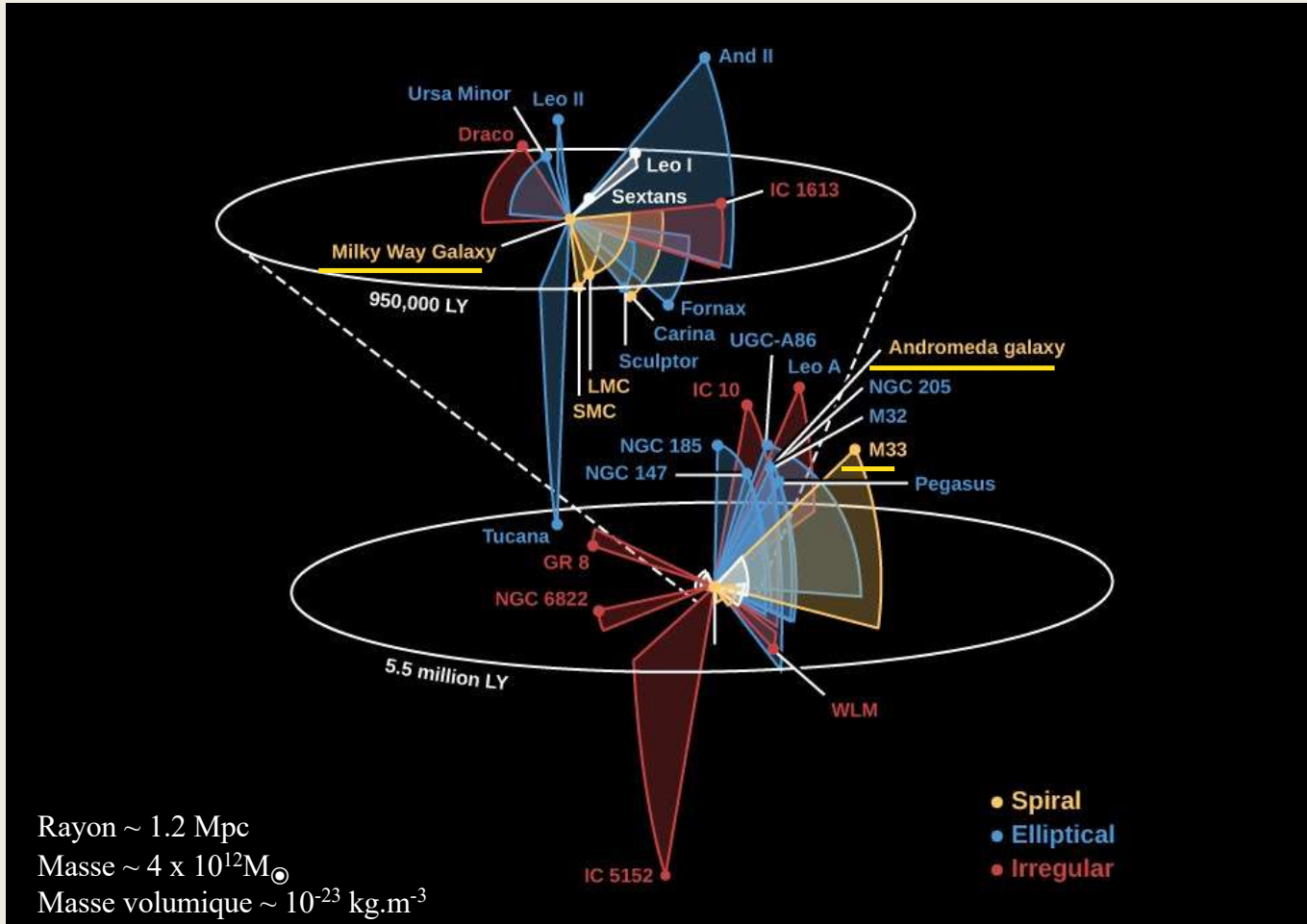
Petit nuage (SMC)
 $\dot{A} \sim 66$ kpc ($\sim 240'000$ al)

Les satellites (sous-groupe) de la Voie Lactée



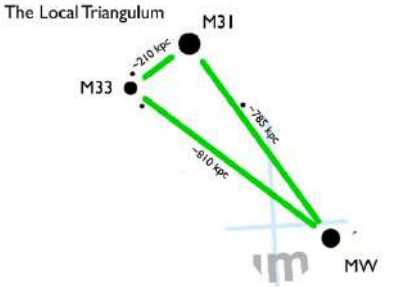
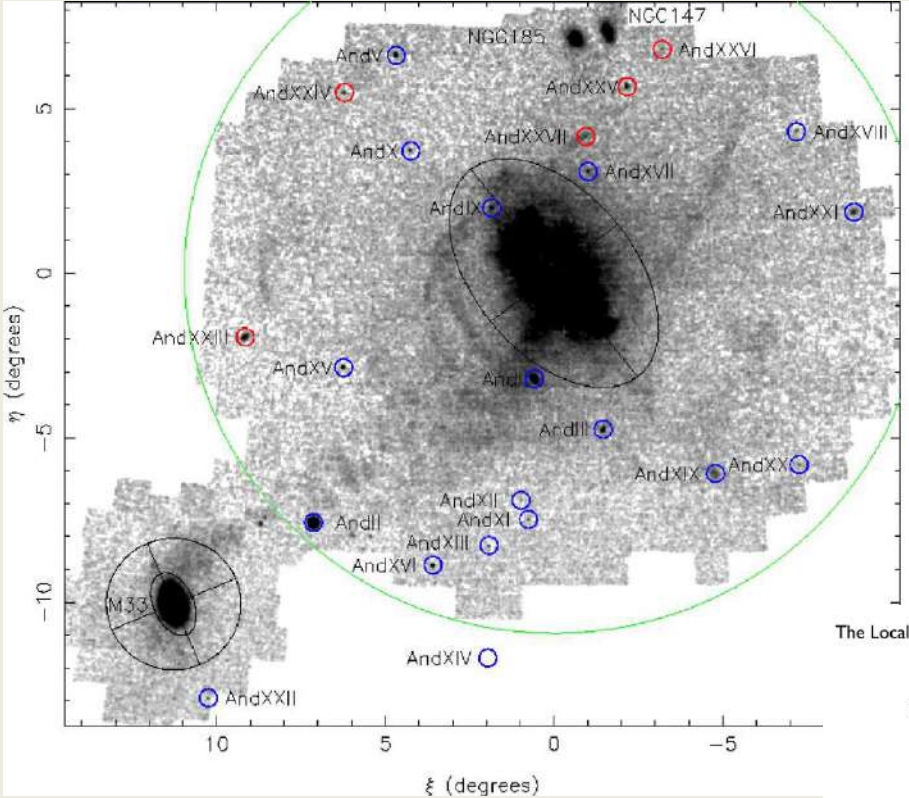
Le Groupe Local

~ 35 galaxies (20 elliptiques naines, 10 irrégulières, 3 grandes galaxies spirales – MW, M31, M33)



Le Groupe Local

Pont d'hydrogène (~ 200 kpc) entre M31 et M33
 Interaction « récente » entre les deux galaxies (effets de marée) (?)



M31



M33

Fusion dans ~ 6 milliards d'années
 → Mylkomeda

De la Galaxie aux grandes structures, un peu de nomenclature et quelques exemples

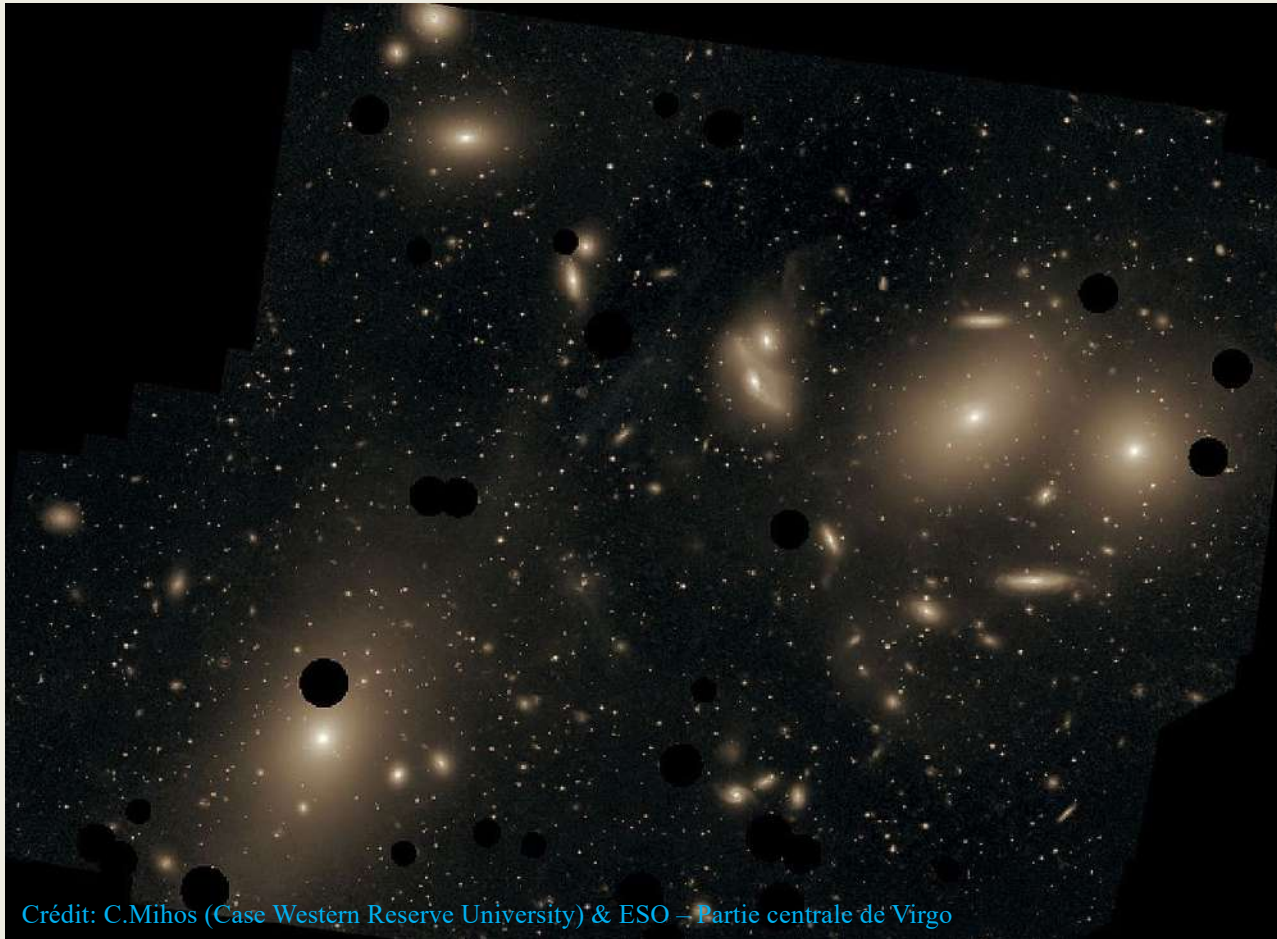
Image credit: Alan McConnachie and the PAndAS survey team
 Raie d'émission HI à 21cm

Fusion dans ~ 6 milliards d'années
→ Mylkomeda

A cette échelle, la gravité lie les galaxies entre elles et domine par rapport à l'expansion de l'univers



À ~ 17 Mpc (50 millions a.l.) – Diamètre ~ 15 millions a.l.
 ~ 2000 galaxies ($\sim 90\%$ naines) $\sim 120\,000$ milliards de M_{\odot}
Amas riche \rightarrow Dominé au centre par elliptiques et lenticulaires
En formation \rightarrow Nombre important de spirales et irrégulières



Virgo – Amas de la Vierge

Amas de galaxies: quelques centaines à quelques milliers de galaxies.
Diamètre moyen ~ 3 Mpc
Masse volumique $\sim 10^{-24}$ kg.m $^{-3}$

Attraction gravitationnelle
sur le Groupe Local (~ 200 km.sec $^{-1}$)

A cette échelle, la gravité lie les galaxies
entre elles et domine par rapport à
l'expansion de l'univers

*Cannibalisme
au sein des amas de galaxies*

Evolution morphologique et cannibalisme galactique
→ Formation de galaxies géantes elliptiques
Modèle cosmologique hiérarchique

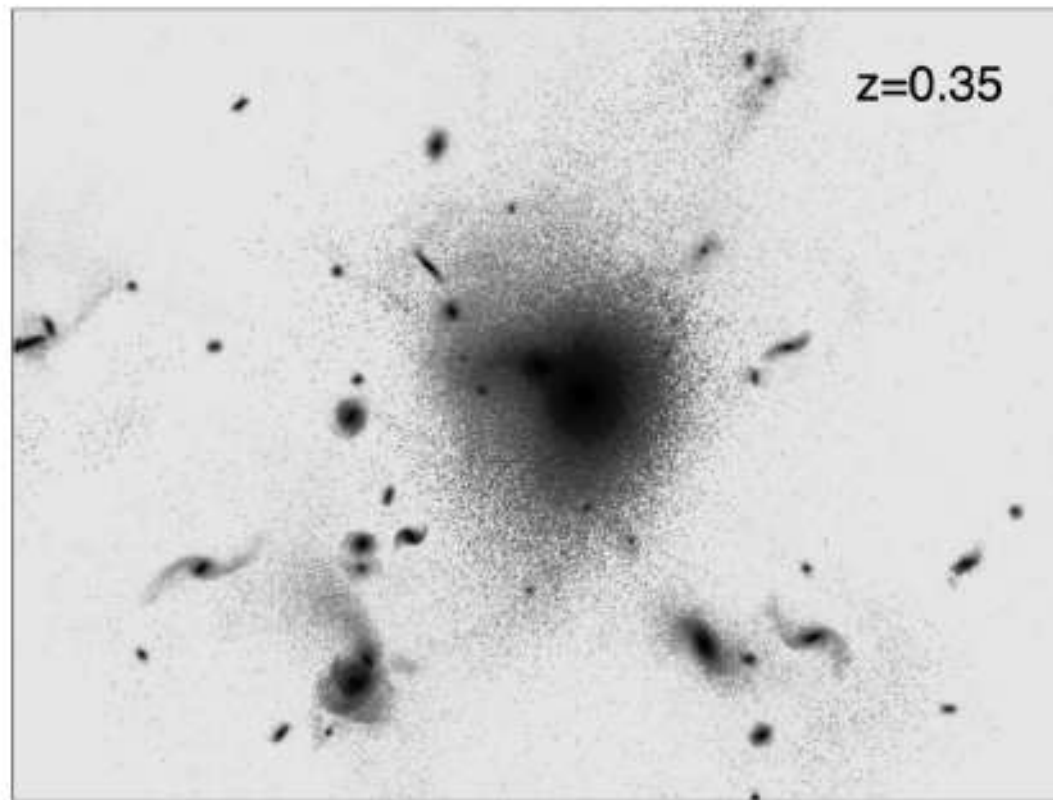


FIG. 4.—Close-up of the central region of the cluster at $z = 0.35$, during a very active phase of the collapse. The giant elliptical is undergoing a major merger, while various disk galaxies are throwing off tidal tails resulting from strong tidal interactions with the cluster center.

~3000 galaxies
Diamètre ~ 20 millions d'a.l.
À ~ 90 Mpc ~ 300 millions d'a.l.
Galaxies visibles (mouvement):
moins de 5 % de la matière → Matière noire



Fritz Zwicky
Mise en évidence de la présence de matière noire
dans les amas de galaxies (1933 – amas de Coma)

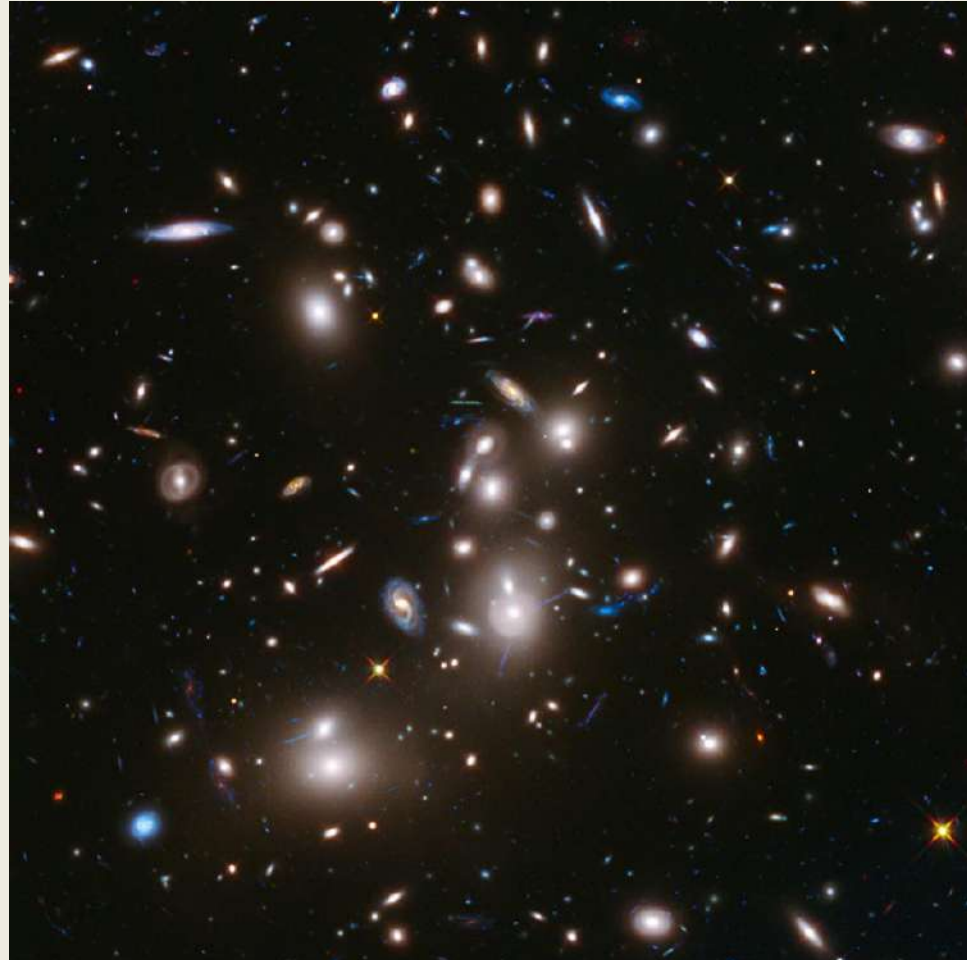
Leçon 20231107 CC



Credit: NASA/JPL-Caltech/L. Jenkins (GSFC)
Spitzer (IR) and SLOAN (visible)

Abel 2755 – Pandora's cluster

À ~ 1.2 Mpc
Taille ~ 350 millions d'a.l.
Galaxies visibles : moins de 5 % de la matière
→ Matière noire



Superamas de galaxies:

quelques dizaines à centaines de milliers de galaxies.
 Diamètre ~ 100 Mpc
 Masse volumique ~ 10^{-26} à 10^{-26} kg.m⁻³
 (~ 1 atome d'hydrogène par m³)

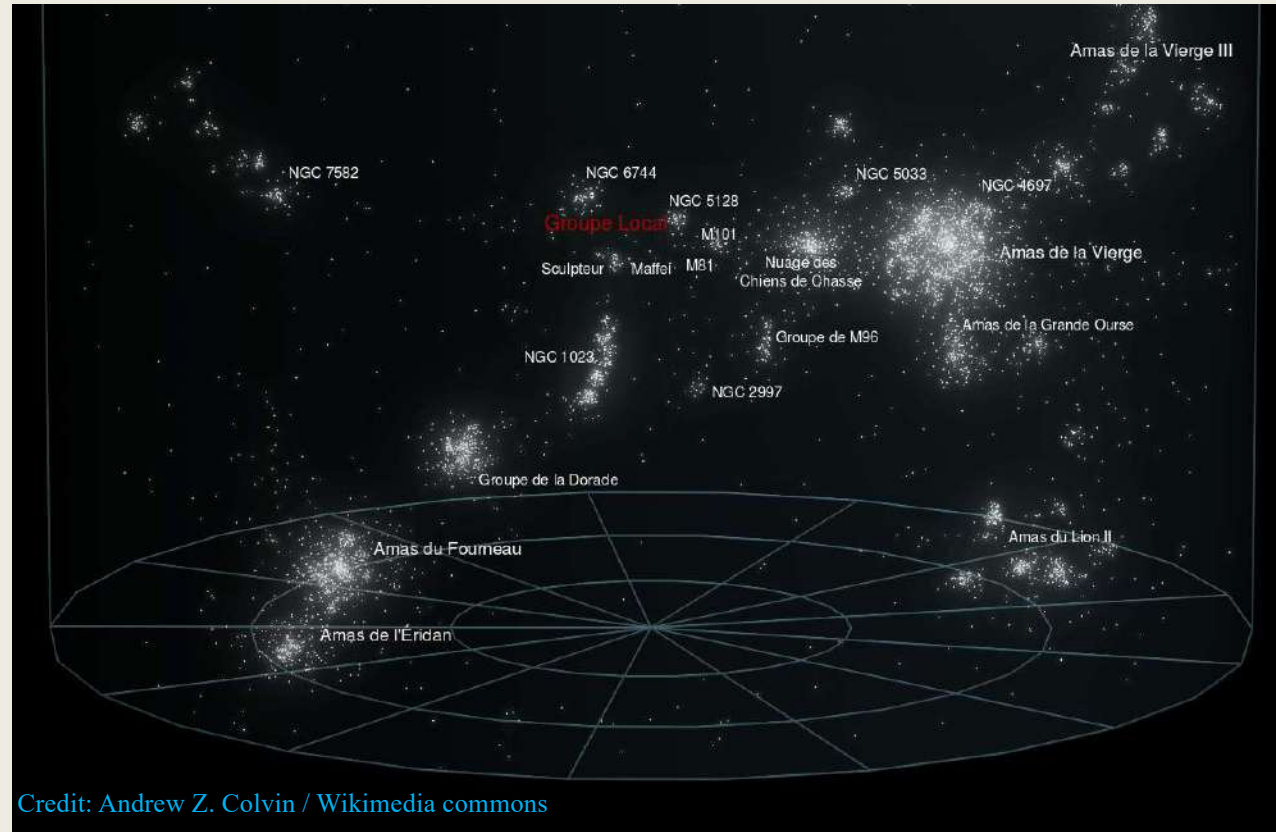
Les galaxies ne sont pas réparties de manière uniforme.

C'est à l'échelle du superamas que l'expansion de l'univers commence à se faire sentir par rapport à la force gravitationnelle qui lie les amas entre eux.

e.g. Virgo s'éloigne du Groupe Local à 1250 km.sec⁻¹, l'amas Coma à 6700 km.sec⁻¹
 Les amas s'éloignent les uns des autres et la taille des superamas augmente dans le temps

Superamas (local) de la Vierge

Diamètre ~ 100 - 200 millions d'a.l.
 ~ 100 groupes et amas de galaxies (~10'000 galaxies)
 Centre de gravité près de Virgo



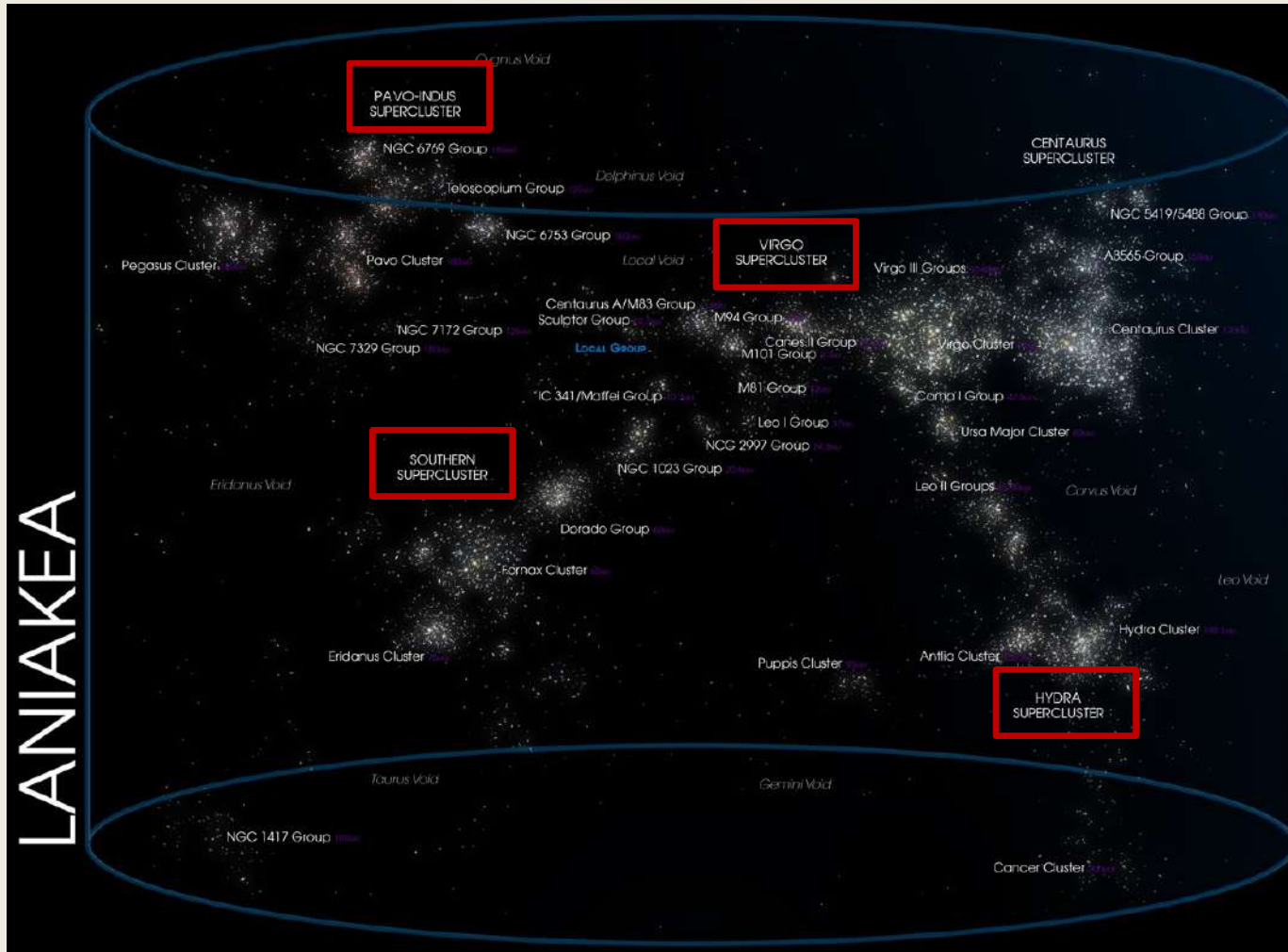
Credit: Andrew Z. Colvin / Wikimedia commons

Appartient au Complexe (filament) de super amas Poisson-Baleine
 ~ 150 millions a.l. x 1 milliard a.l.

Superamas Laniakea

Diamètre ~ 160 Mpc ($h^{-1} = 67.8$, H_0 Planck 2013)

Groupe de superamas de galaxies
($\sim 100'000$ à $150'000$ galaxies)



Faiblement (non?)
lié gravitationnellement

Superamas Laniakea

Laniakea supercluster



Diamètre ~ 160 Mpc ~ 500 millions a.l.
~ $10^{17} M_{\odot}$
~ 100'000 galaxies



Crédit: Brent Tully *et al.* (Nature 2014)

C.Charbonnel – Cours UniGe 1051 – 2018-12-18

Appartient au Complexe (filament) de super amas Poisson-Baleine

~ 150 millions a.l. x 1 milliard a.l.

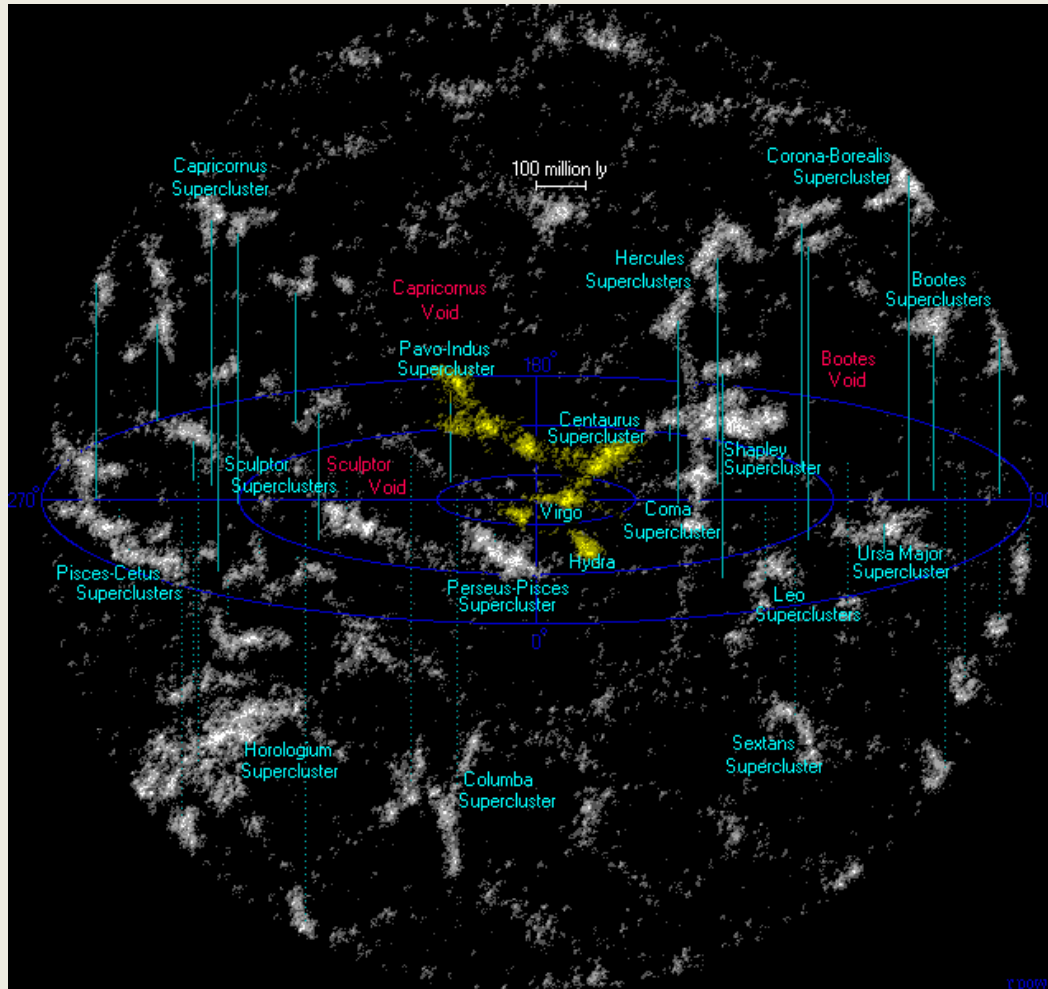
C.Charbonnel – Cours UniGe 1051 – 20231031

Superamas Laniakea



Complexes (filaments) de superamas

Carte des filaments et vides
Dans un rayon de ~1 milliard d'a.l.



En jaune: Laniakea

Complexes (filaments) de superamas

Les galaxies ne sont pas distribuées de manière aléatoire.
Structures les plus visibles: **Superamas et vides**

Superamas:

- Contient un ou plusieurs amas de galaxies
- Objet en train de s'effondrer sous l'effet de sa propre gravité
- Structure aplatis (~ planes) ou allongées (~ linéaires)

Vides (bulles cosmiques):

- Sous-dense
- ~ sphériques

→ Distribution « bulleuse », « spongieuse », « écumeuse », « mousseuse »

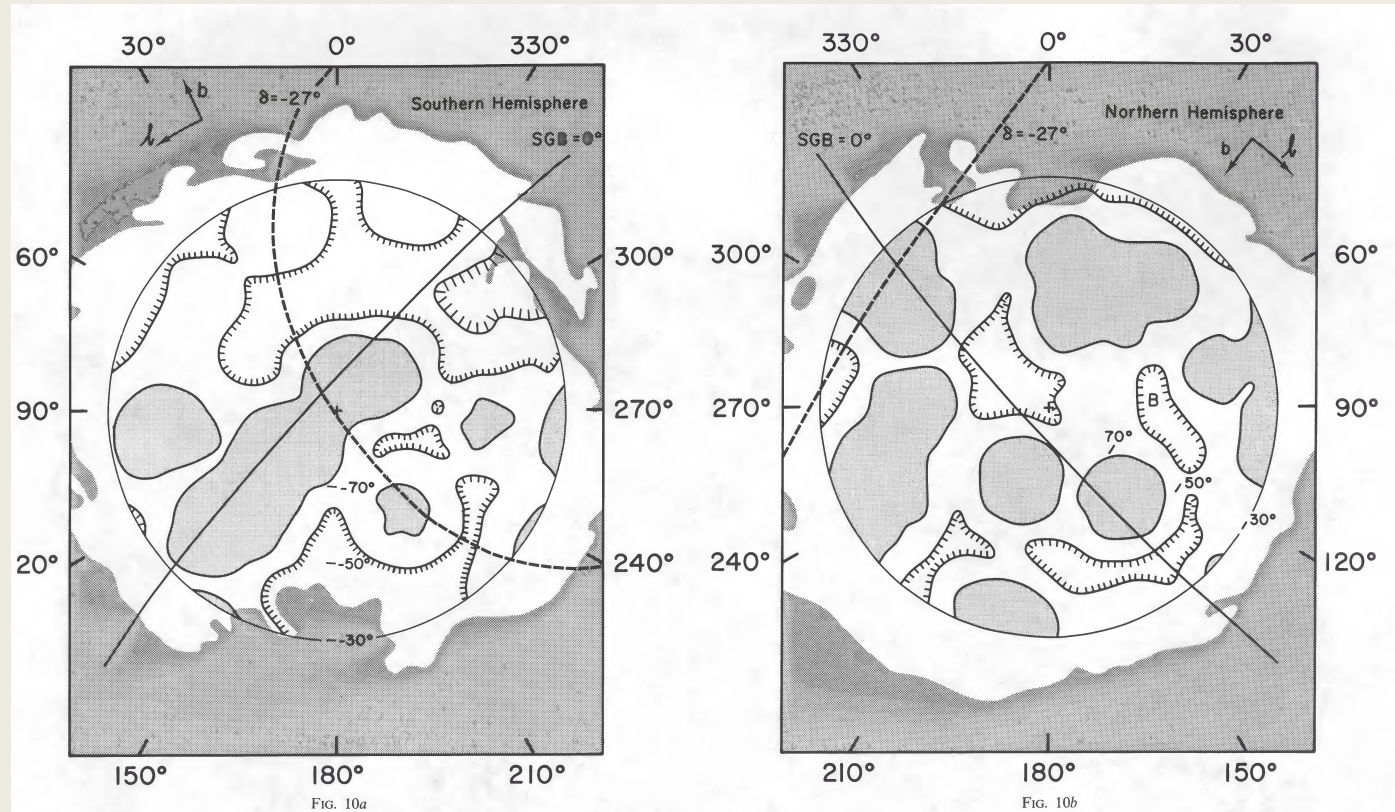


FIG. 10.—Holes between clusters at a distance of $200 h_{75}^{-1}$ Mpc. A grid of positions was considered at specified values of (l, b) and a distance of $200 h_{75}^{-1}$ Mpc. At each position, the sphere of the largest diameter was found that contained *no* cluster from the present sample. Contours of constant hole size on the grid are illustrated. Voids within the shaded contour have diameters less than $80 h_{75}^{-1}$ Mpc, while voids within the contours marked by short lines have diameters greater than $120 h_{75}^{-1}$ Mpc. In the Southern galactic hemisphere there is one additional contour where void diameters are greater than $180 h_{75}^{-1}$ Mpc. The search for holes was restricted to $|b| > 30$. The irregular shaded outer region is below the Burstein-Heiles H I contour corresponding to Galactic absorption of $A_B \approx 0.5$. The southern limit of the Abell survey, at $\delta = -27$, and the locus of the supergalactic equator, $SGB = 0$, are also indicated. (a) Northern Galactic Hemisphere. The void in Bootes discovered by Kirschner *et al.* (1981) is located at "B." (b) Southern Galactic Hemisphere. The major feature outlined by the $80 h_{75}^{-1}$ Mpc contour that is elongated parallel to the supergalactic equator is the core of the Pisces-Cetus Supercluster.

Tully (1986)

Structures à grandes échelles de l'univers : caractéristiques de la distribution de matière et de lumière dans l'univers observable sur de très grandes échelles (~ milliard d'années lumière).

« A slice of the Universe »

de Lapparent, Geller & Huchra (1986 ApJ 302, L1)

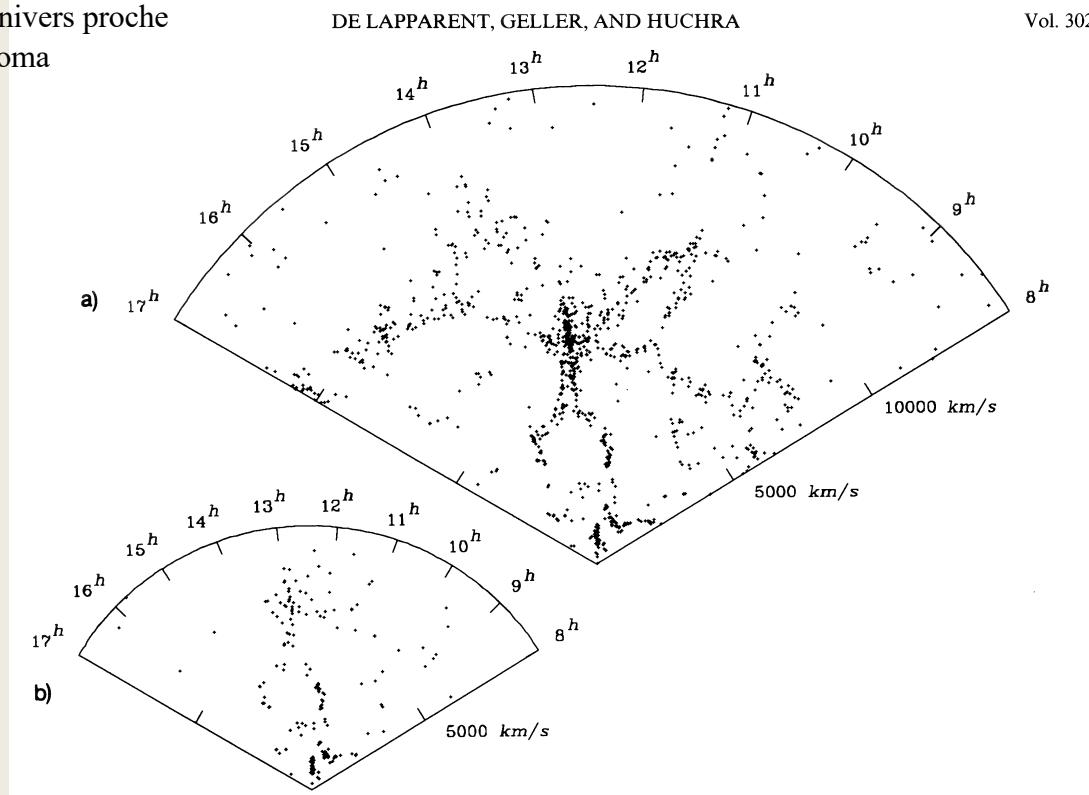
Center for Astrophysics redshift survey

centré sur le pôle galactique

1100 galaxies de l'univers proche

jusqu'à l'amas de Coma

CfA Great Wall



Les galaxies ne sont pas réparties de manière uniforme.

Mesure du redshift → structure 3D

Structure en éponge

Les galaxies se distribuent selon des «**filaments cosmiques**» (1D) ou des «**feuillettes**» (2D) → **toile cosmique** (cosmic web).

CfA Great Wall:

~ 500 x 200 millions a.l., épaisseur ~ 15 millions a.l.

Les **amas de galaxies** sont situés à l'intersection des filaments cosmiques.

L'espace est principalement fait de déserts galactiques, gigantesques **bulles cosmiques** quasiment vides de galaxies qui mesurent ~ 300 millions d'a.l.

SLOAN SDSS

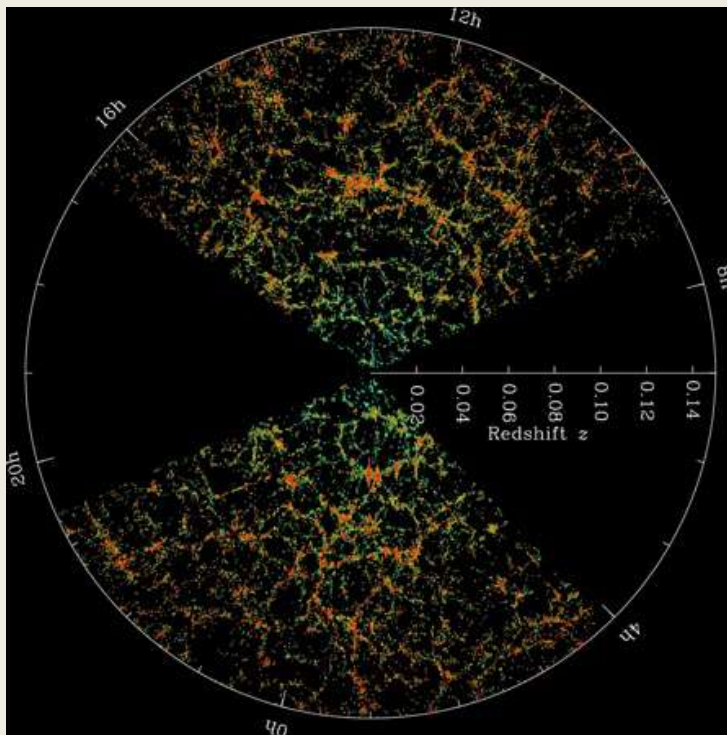
<https://www.sdss.org/>

Apache Point Observatory
T2.5m wide-angle
Sacramento Mountains
New Mexico

¼ du ciel, catalogue de 100 millions d'astres

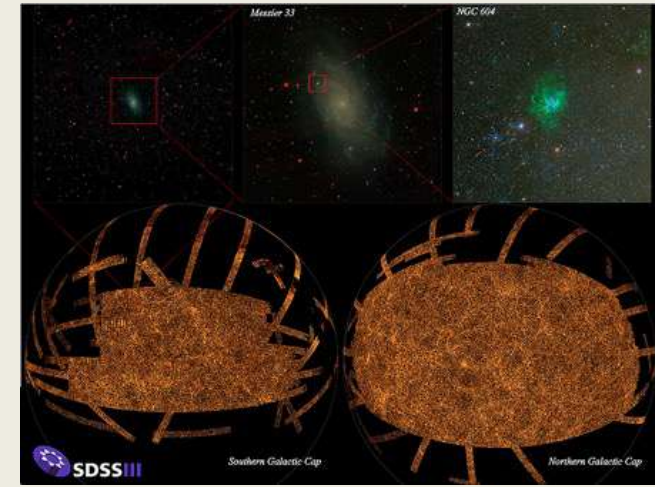
Spectre et redshift de 1 million de galaxies et quasars

Plusieurs grands relevés depuis 2000, du système solaire aux galaxies ($z \leq 0.1$) et quasars ($z \sim 2$)



Relevés cosmologiques

Cartographie de l'univers à grande échelle



SDSS Legacy Survey (2000 – 2008)

Distribution 3D des galaxies proches ($z < 0.15$, ~ 2 milliards a.l.)

Tranches de la carte tridimensionnelle du SDSS de la distribution des galaxies.

La Terre est au centre, et **chaque point représente une galaxie**, contenant généralement environ 100 milliards d'étoiles.

Les **galaxies sont colorées en fonction de l'âge de leurs étoiles**, les points les plus rouges et les plus fortement regroupés représentant des galaxies massives composées d'étoiles plus anciennes. Les points bleus et verts sont des galaxies en train de former des étoiles massives et bleues.

Le cercle extérieur se trouve à une distance de **deux milliards d'années-lumière** (taille d'~7 bulles cosmiques).

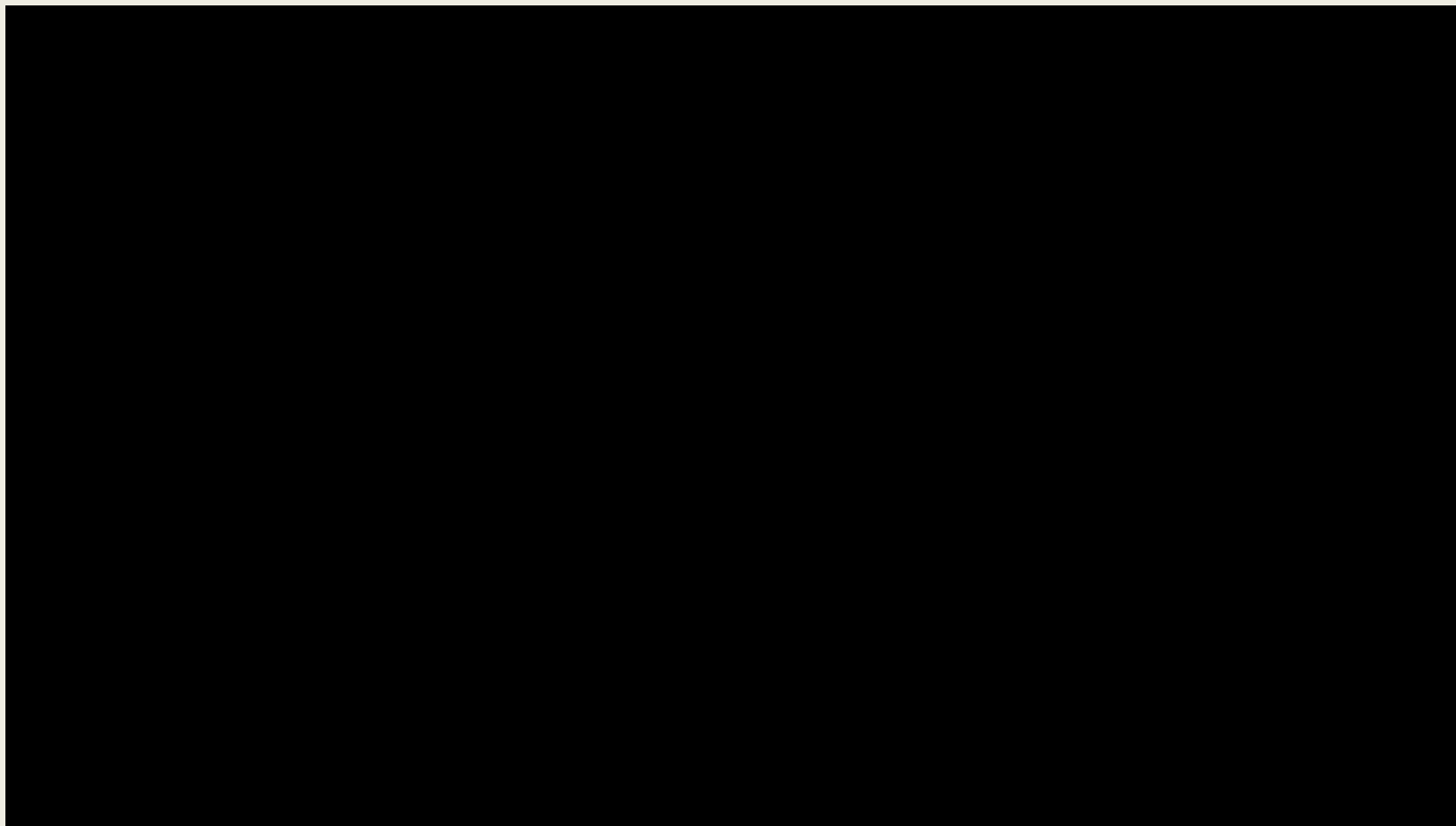
La région située entre les coins n'a pas été cartographiée par le SDSS car la poussière de notre galaxie obscurcit la vue de l'univers lointain dans ces directions. Les deux tranches contiennent toutes les galaxies situées entre -1,25 et 1,25 degrés de déclinaison.

Crédit : M. Blanton et Sloan Digital Sky Survey.

SDSS Legacy Survey (2000 – 2008)

<http://www.sdss3.org/press/dr9.php>

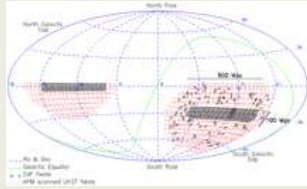
Relevés cosmologiques Cartographie de l'univers à grande échelle



~ 400'000 galaxies « proches »
z max ~ 0.1 – ~ 1.3 milliards a.l.

[2dF Galaxy Redshift survey](#)

(2003) 2 degree Field – Anglo-Australian T3.9m



Les galaxies ne sont pas distribuées de manière aléatoire.
Structures les plus visibles: **Superamas et vides**

Superamas:

- Contient un ou plusieurs amas de galaxies
- Objet en train de s'effondrer sous l'effet de sa propre gravité
- Structure aplaties (~ planes) ou allongées (~ linéaires)

Vides (bulles cosmiques):

- Sous-dense
- ~ sphériques

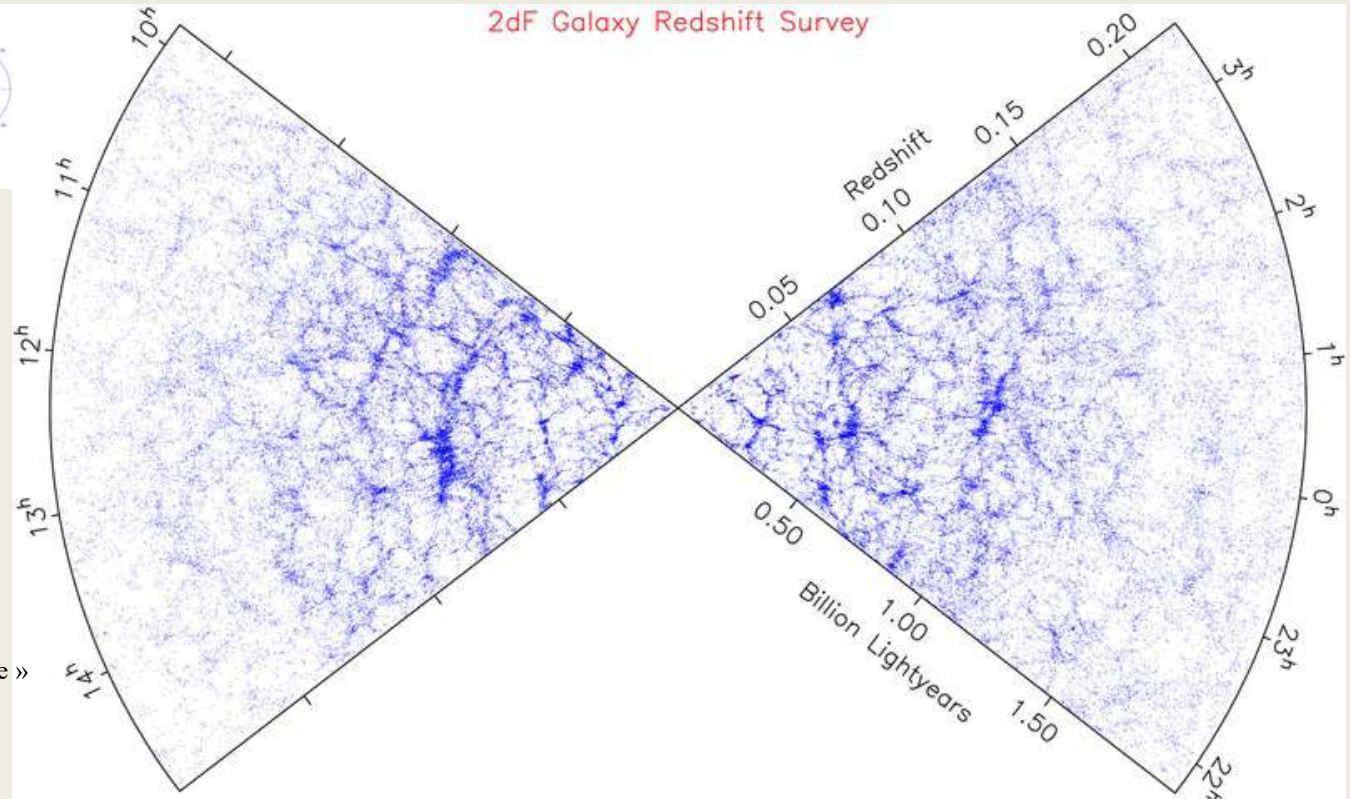
→ Distribution « bulleuse », « spongieuse », « écumeuse », « mousseuse »

Contraste en densité δ jusqu'à 200 aux échelles de ~1.5Mpc

$$\delta(\mathbf{r}, t) := \frac{\rho(\mathbf{r}, t) - \bar{\rho}(t)}{\bar{\rho}(t)}$$

Note: $\delta > -1$

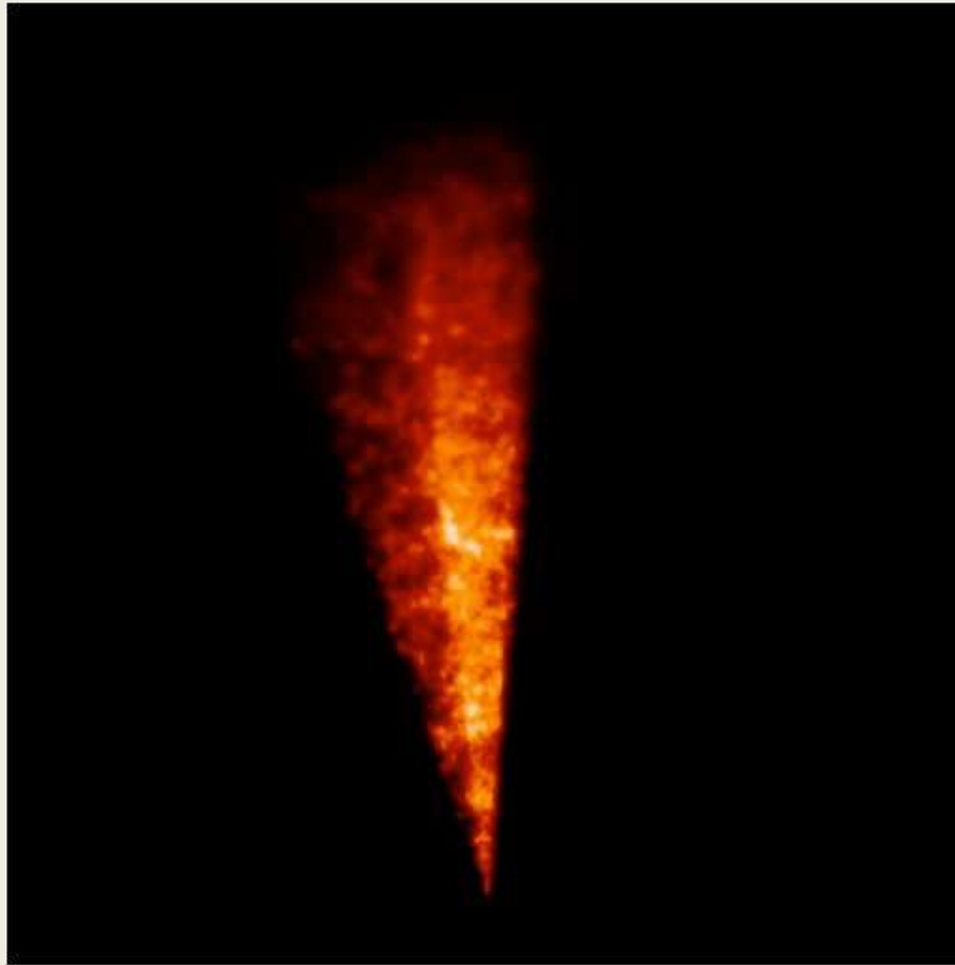
Relevés cosmologiques Cartographie de l'univers à grande échelle



Position des galaxies (~ 75'000) en fonction de leur redshift (~ distance) dans une tranche d'univers
(position angulaire des galaxies dans une longue et étroite bande du ciel.)

Cartographie de l'univers à grande échelle

Position des galaxies ($\sim 75'000$)
en fonction de leur redshift (\sim distance)
dans une tranche d'univers
(position angulaire des galaxies
dans une longue et étroite bande du ciel).

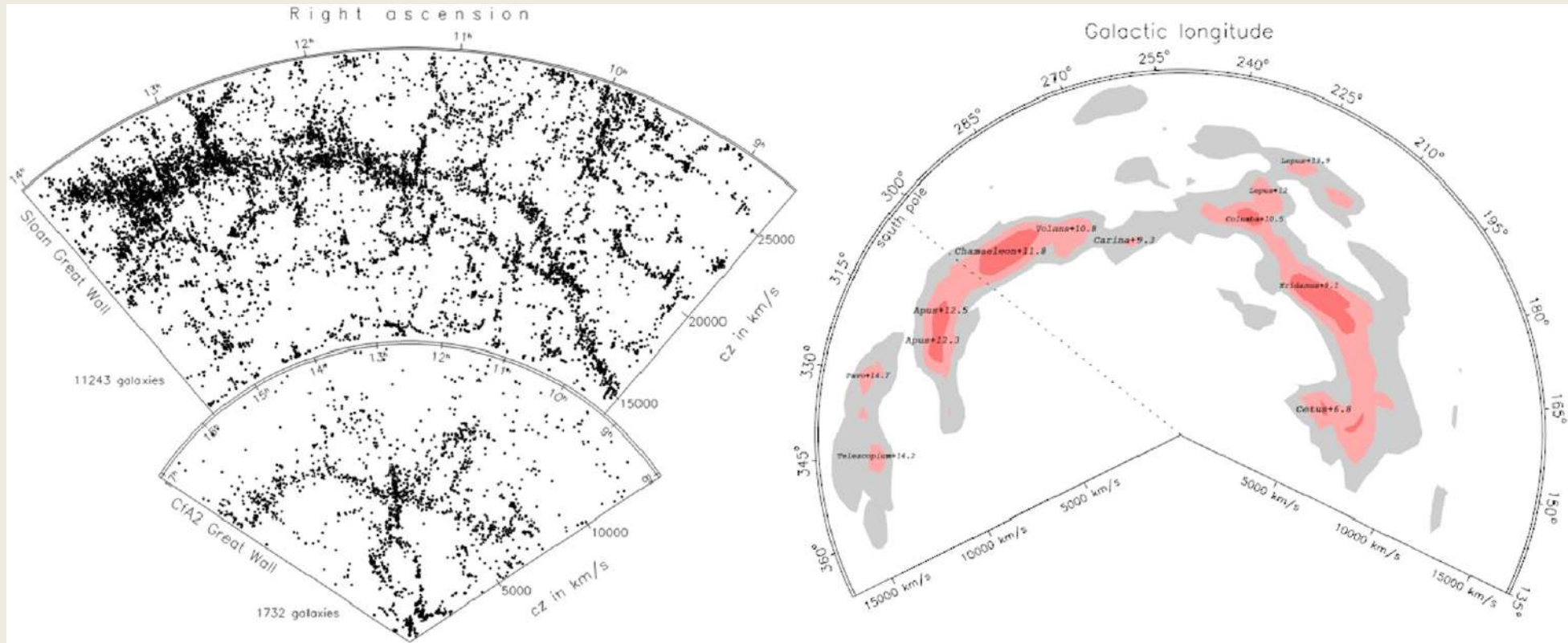


[2dF Galaxy Redshift survey](#)
(2003)

Mur du Pôle Sud Filament géant de la toile cosmique

Sloan Great Wall (Gott et al. [2005](#)) and CfA Great Wall (de Laparrent et al. 1986)

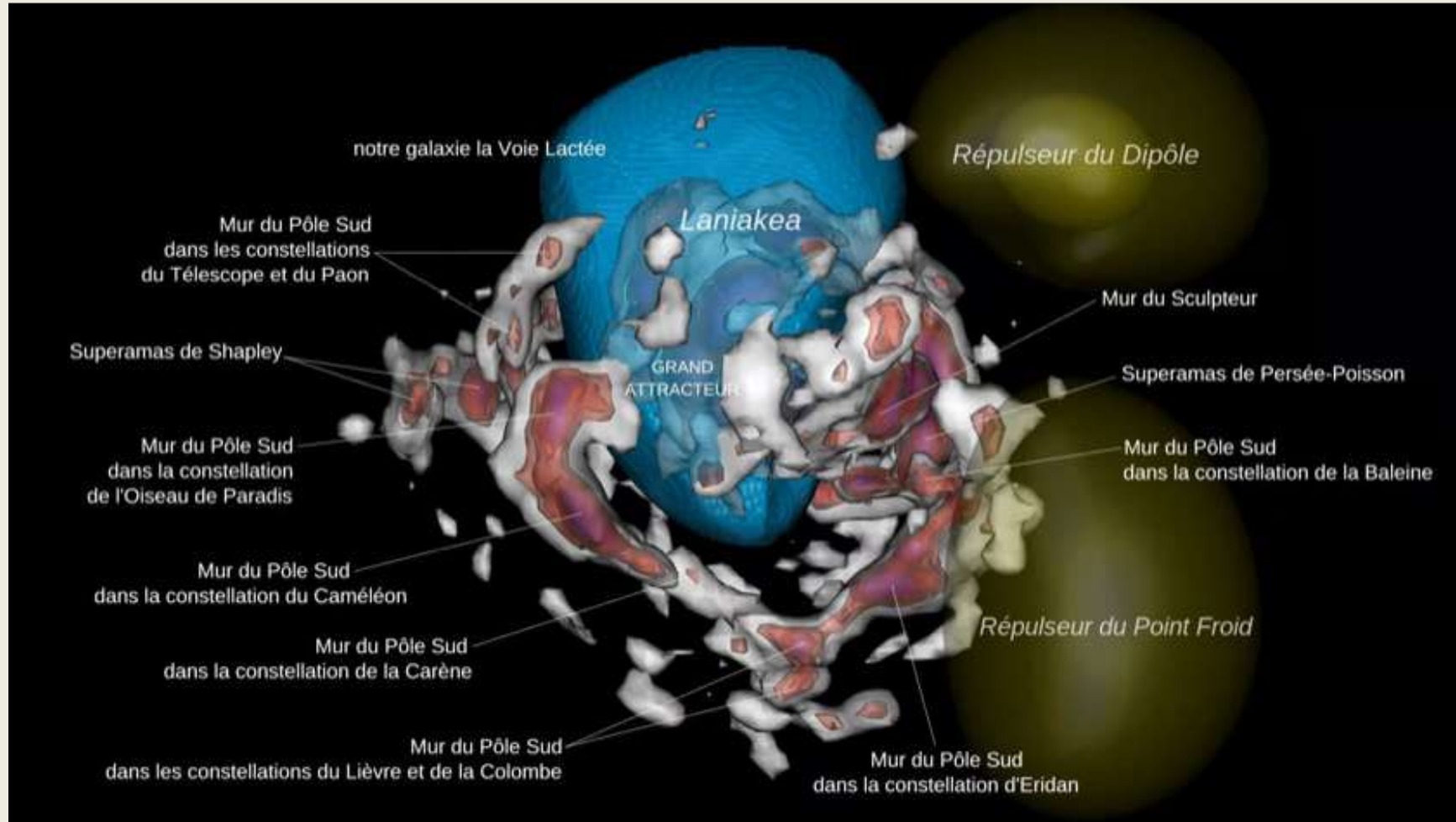
South Pole Wole ([Pomarede et al. 2020](#))



A comparison of the extent of the South Pole Wall with two other nearby structures: the CfA Great Wall (bottom left) and the Sloan Great Wall (top left). The South Pole Wall (right) is represented by isodensity contour levels derived from the peculiar velocity field. The linear scales are the same. The South Pole Wall is roughly intermediate in distance from us compared with the other two.

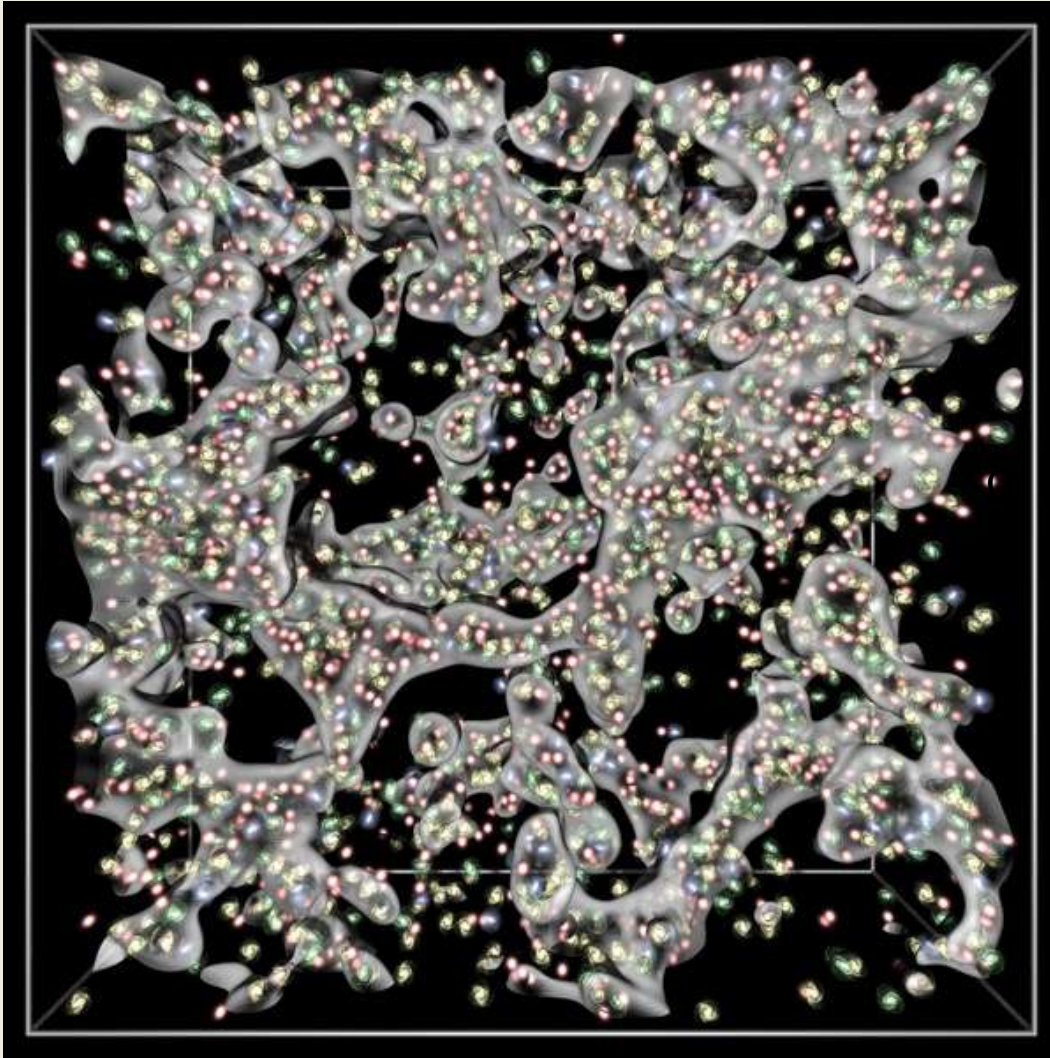
Un filament de matière (des centaines de milliers de galaxies) long d'environ **1.4 milliards d'années lumière**, à seulement 500 millions d'années de la Voie Lactée

Mur du Pôle Sud Filament géant de la toile cosmique



La carte de notre univers local. Elle couvre une **région d'un milliard d'années-lumière**. En bleu, notre superamas de galaxies, Laniakea. En gris et en rouge, la structure de la toile cosmique et le Mur du Pôle Sud. En vert sombre semi-transparent sont représentés les vides cosmiques. © Daniel Pomarède, Irfu - 18.000 mesures de vitesses de galaxies

Structures fractales



Représentation en perspective 3D du relevé 2dF, montrant la structure fractale imbriquée des galaxies (site 2dF)

Les galaxies ne sont pas distribuées de façon homogène,
mais selon une hiérarchie de structures (groupes, amas, superamas)

densité \propto taille $^{-\alpha}$

$\alpha = 1.7$ (de Vaucouleurs 1970)

Fractal (loi indépendante d'échelle; Mandelbrot 1975)

Densité des structures dans l'univers

Système solaire – 10^{-12} g.cm $^{-3}$

Voie Lactée – 10^{-24} g.cm $^{-3}$

Groupe Local – 10^{-28} g.cm $^{-3}$

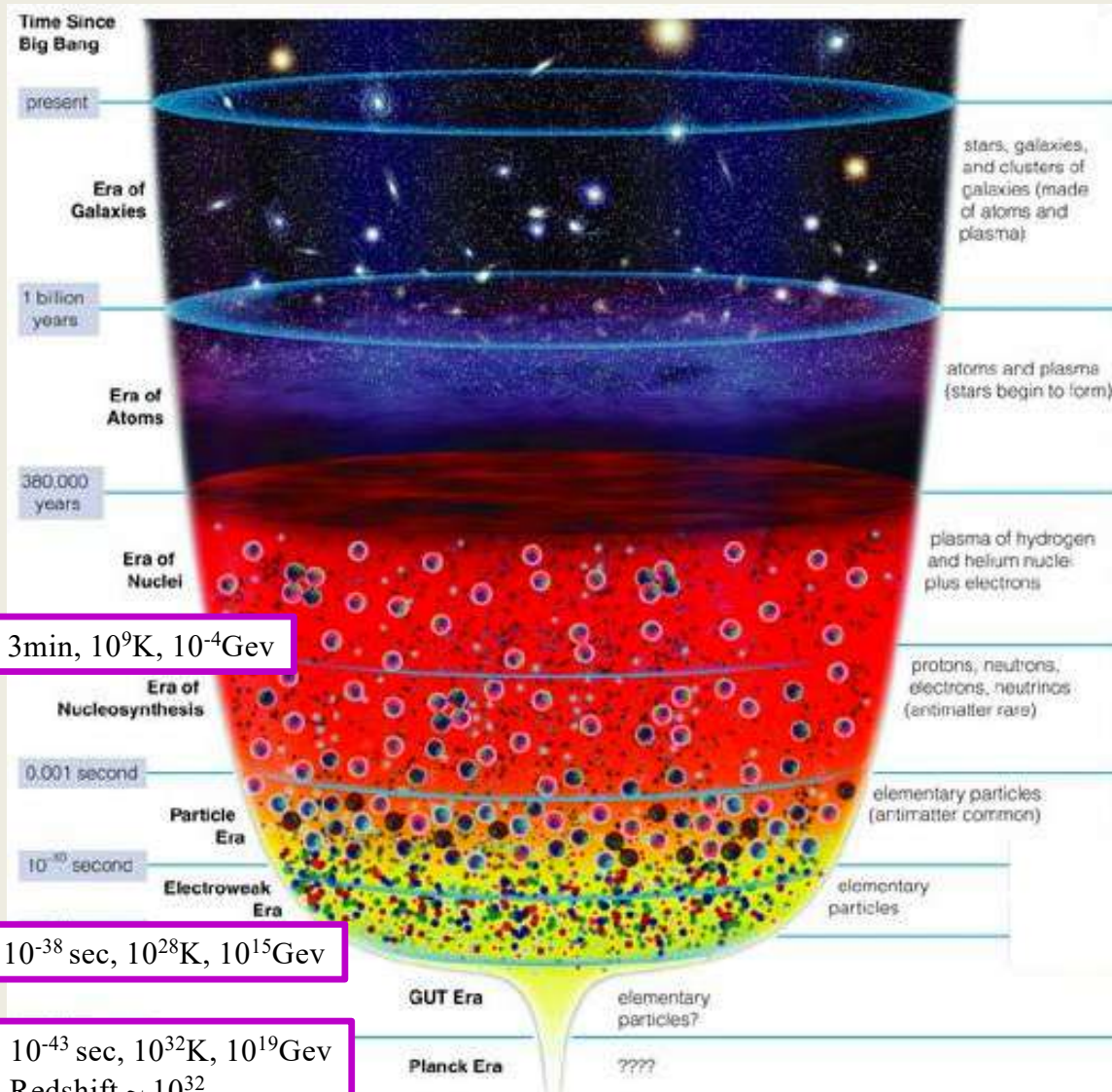
Amas de galaxies – 10^{-29} g.cm $^{-3}$

Superamas – 10^{-30} g.cm $^{-3}$

Densité des photons (3K) – 10^{-34} g.cm $^{-3}$

Densité critique ($\Omega=1$) – 10^{-29} g.cm $^{-3}$

Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud



Nucléosynthèse primordiale (3 à 30 minutes après le Big Bang)

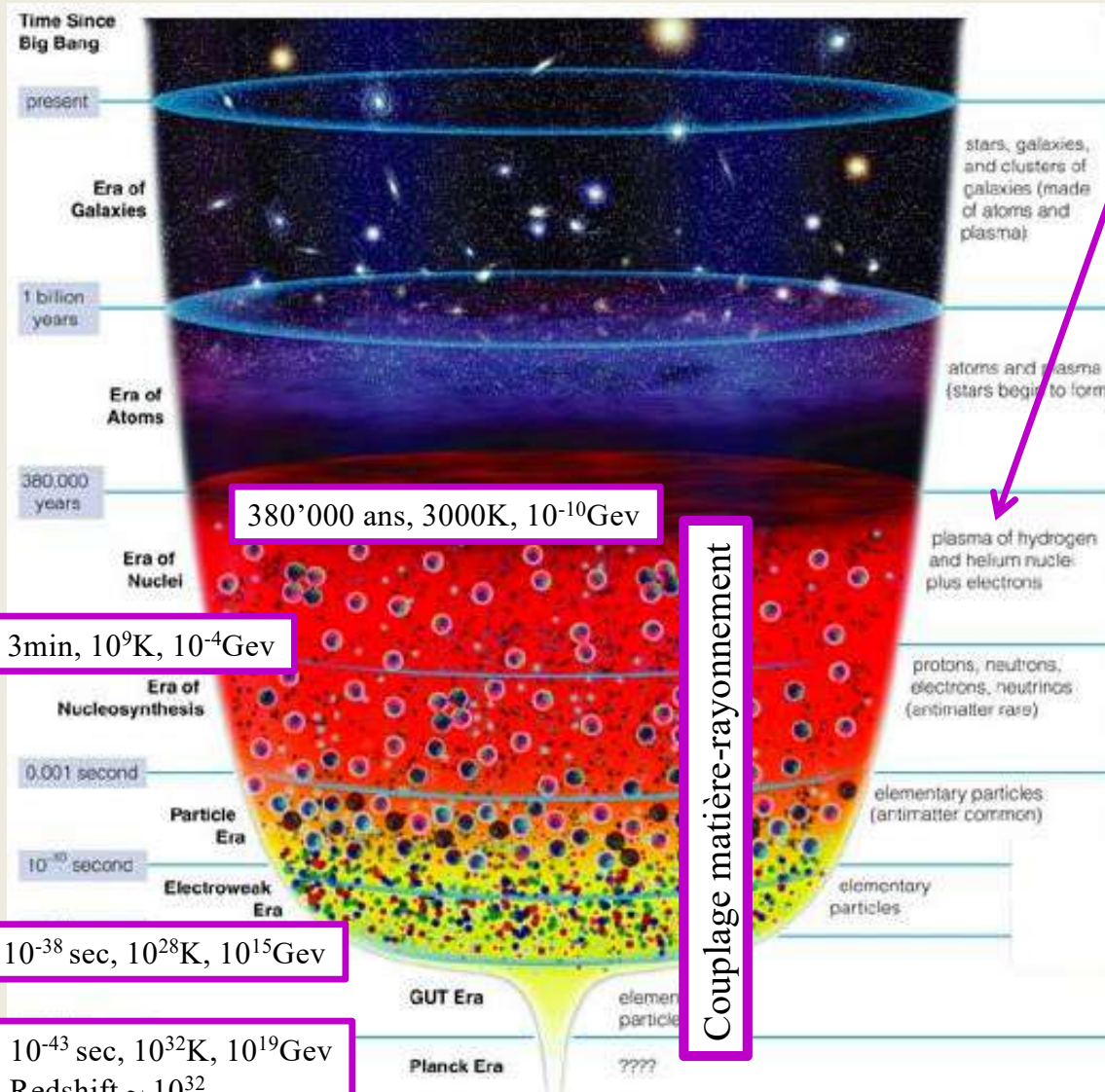
Univers primordial ionisé (neutrons et protons « libres »)

Température comparable à celle des noyaux d'étoiles:
entre le million et le milliard de Kelvin

Neutrons et protons fusionnent → Éléments légers

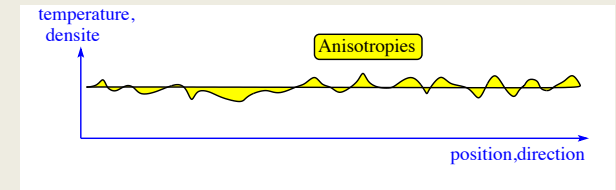
(leçon 20231024 CC)

Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud

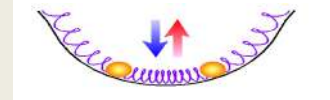


Plasma primordial – Le tambour

Après la nucléosynthèse, milieu composé de protons, quelques noyaux d'He, électrons libres, photons
Composante dominante, photons
Interactions entre photons et électrons/protons
Les photons résistent à une compression
Milieu presque isotrope

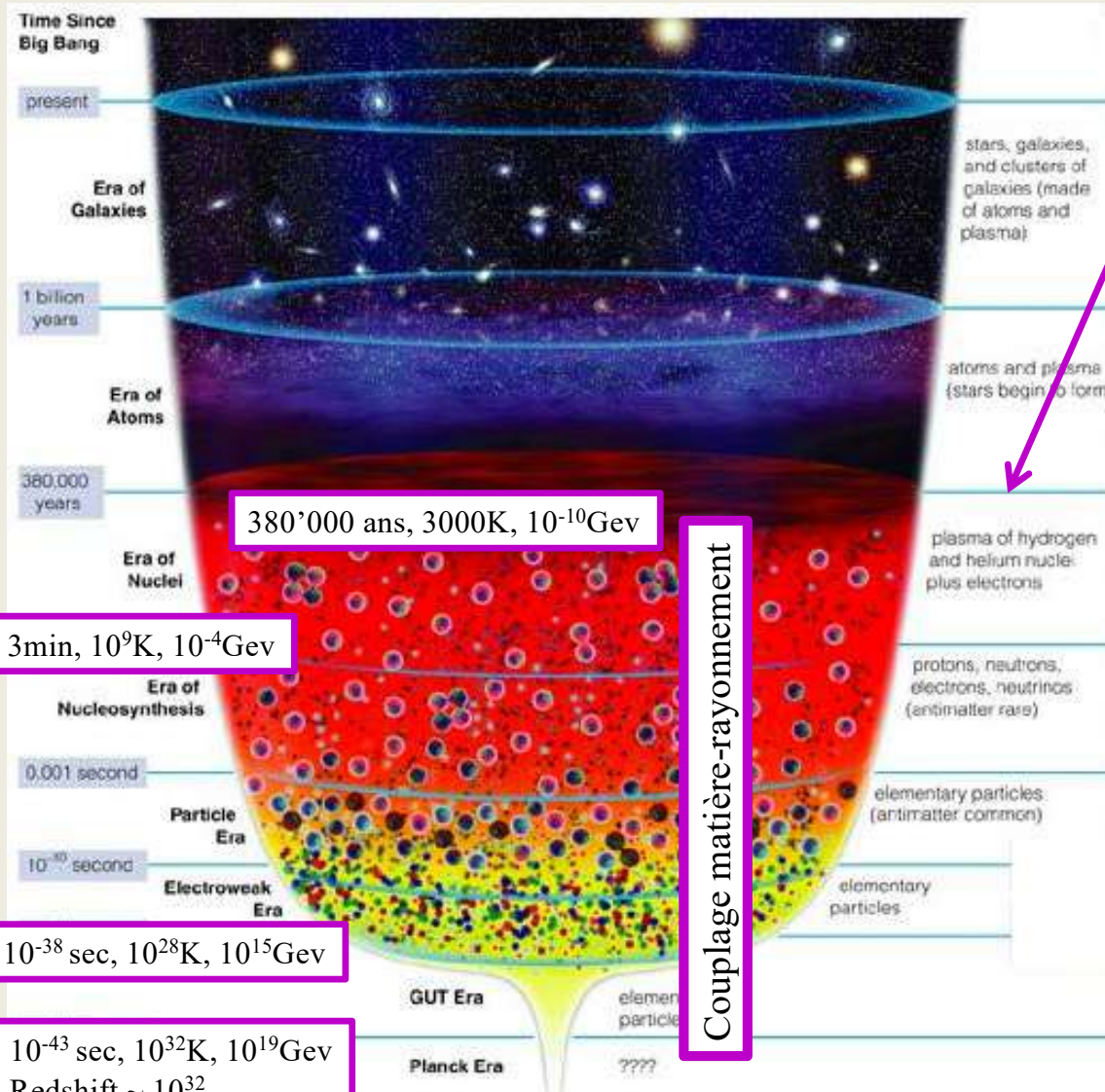


- Il existe des régions plus denses dans lesquelles la matière « tombe » sous l'effet de la gravitation
 - La contraction réchauffe la matière dans la région de surdensité
 - Augmentation de la pression de radiation
 - La pression « lutte contre » la gravité, forçant la surdensité à se dilater
 - La dilatation entraîne une baisse de température et de pression
 - La gravité redevient plus forte
 - Le cycle recommence
- Équation d'un oscillateur harmonique amorti



Début de l'attraction gravitationnelle autour des régions de surdensité

Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud



Découplage rayonnement-matière (380'000 ans après le Big Bang)

Température est suffisamment basse (< 3000K)

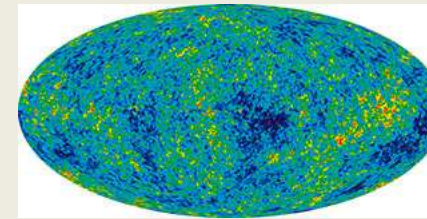
pour ne plus pouvoir ioniser les atomes

→ Capture des électrons par les noyaux, cad **recombinaison**

“Libération” des photons

→ Émission du **fonds diffus cosmologique (CMB)**

Infimes fluctuations de température du fonds diffus cosmologique:
Empreintes des **fluctuations de densité** existantes à l'époque du découplage



(leçon 20231017 SP)

Anisotropies de température (qq dizaines de milliardième de kelvin) et de densité
Contraste en densité δ

380 000 ans après le Big-Bang
Conditions initiales $\delta = \delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$

$$\delta(\mathbf{r}, t) := \frac{\rho(\mathbf{r}, t) - \bar{\rho}(t)}{\bar{\rho}(t)}$$

Note: $\delta > -1$

Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud

Ère de la matière (10⁶ à 10¹⁰ ans)

La matière évolue indépendamment du rayonnement, la gravitation domine. La dynamique de l'expansion est contrôlée par le champ gravitationnel de la densité de matière moyenne

$$\bar{\rho}(t) = \frac{1}{V} \int_V \rho(\vec{r}, t) d^3r$$

Localement, un champ gravitationnel est généré par une fluctuation de densité

$$\Delta\rho(\vec{r}, t) = \rho(\vec{r}, t) - \bar{\rho}(t)$$

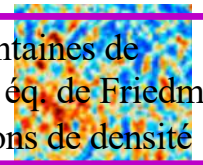
Les régions sur-denses $\Delta\rho > 0$ s'étendent plus lentement que l'expansion moyenne de Hubble, à cause de la gravité locale

- Dans ces régions, la densité va diminuer plus lentement que la moyenne cosmique
- Le contraste en densité augmente
- Localement, le champ gravitationnel va continuer d'augmenter
- Les zones de surdensité attirent gravitationnellement la matière environnante – Dans un univers en expansion, les structures ne collapent pas de façon exponentielle, mais se développent de façon linéaire.
- Formation des grandes structures (galaxies, étoiles) par la gravitation

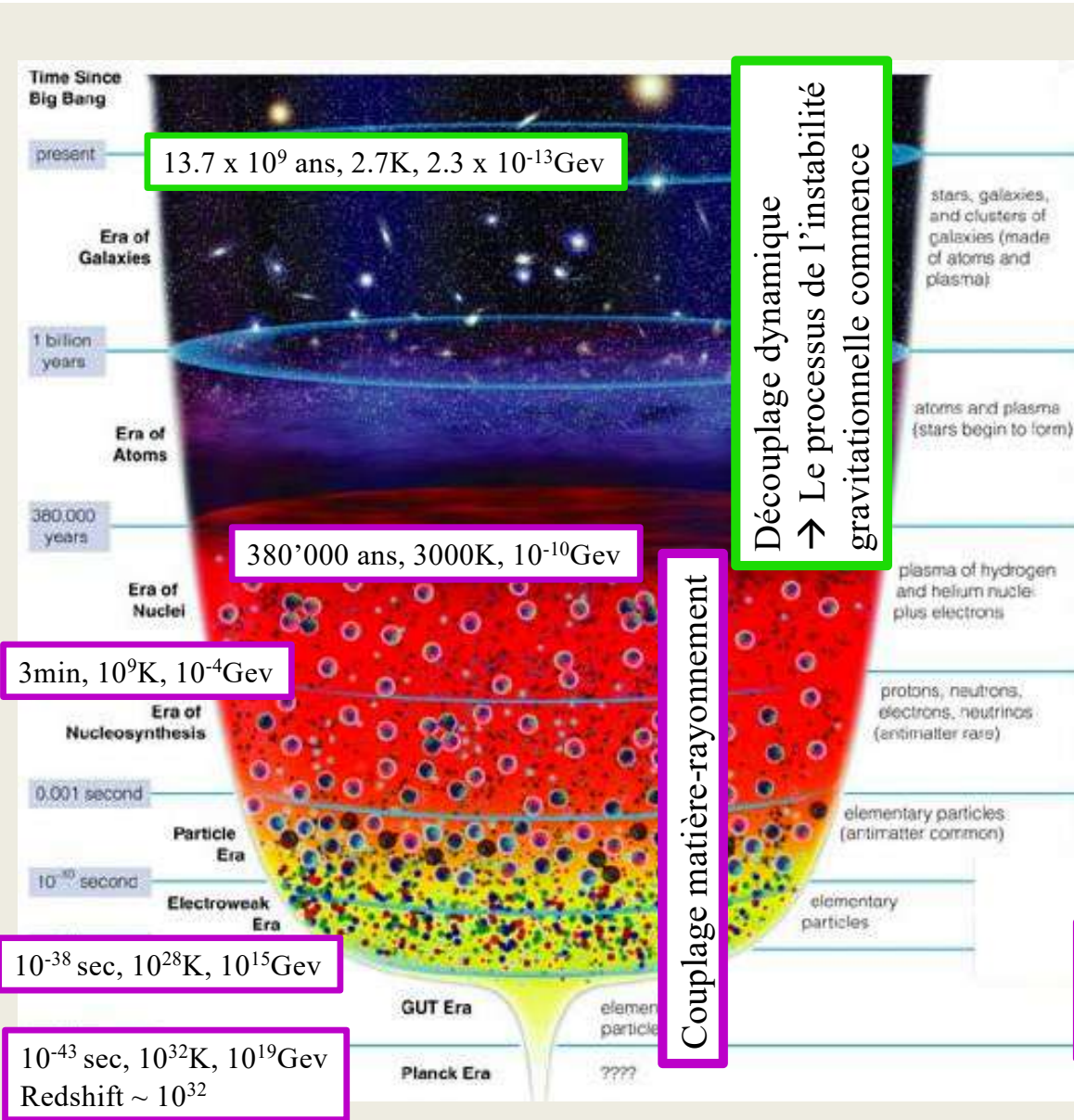
Importance de la matière noire

Mesure de la taille des fluctuations

Univers homogène et isotrope à l'échelle de centaines de Megaparsec (Métrique de Robertson-Walker et eq. de Friedmann)
Aux plus petites échelles (~ 50 Mpc), fluctuations de densité



La taille des fluctuations contient l'histoire de ρ_m et de ρ_r



Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud

Plasma primordial – Le tambour

Le gonflement / dégonflement périodique de la surdensité crée des ondes de compression / décompression qui se propagent dans le plasma primordial
→ Apparition d'oscillations, ou **ondes sonores primordiales**, ou **oscillations acoustiques des baryons (BAO)**

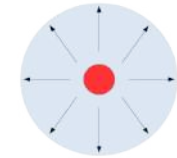
James Peebles (1970, prix Nobel physique 2019)

Taille des fluctuations

- On peut montrer que la vitesse du son vaut:

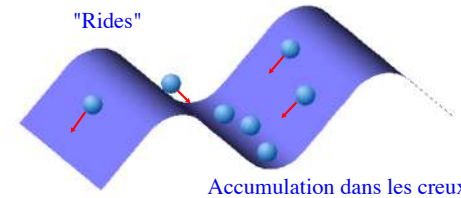
$$c_s^2 = \frac{1}{3 \left(1 + \frac{3\rho_B}{4\rho_R}\right)} c^2$$

- $c_s < \sqrt{3}^{-1} c \approx 0.56 c$, dépend de la cosmologie



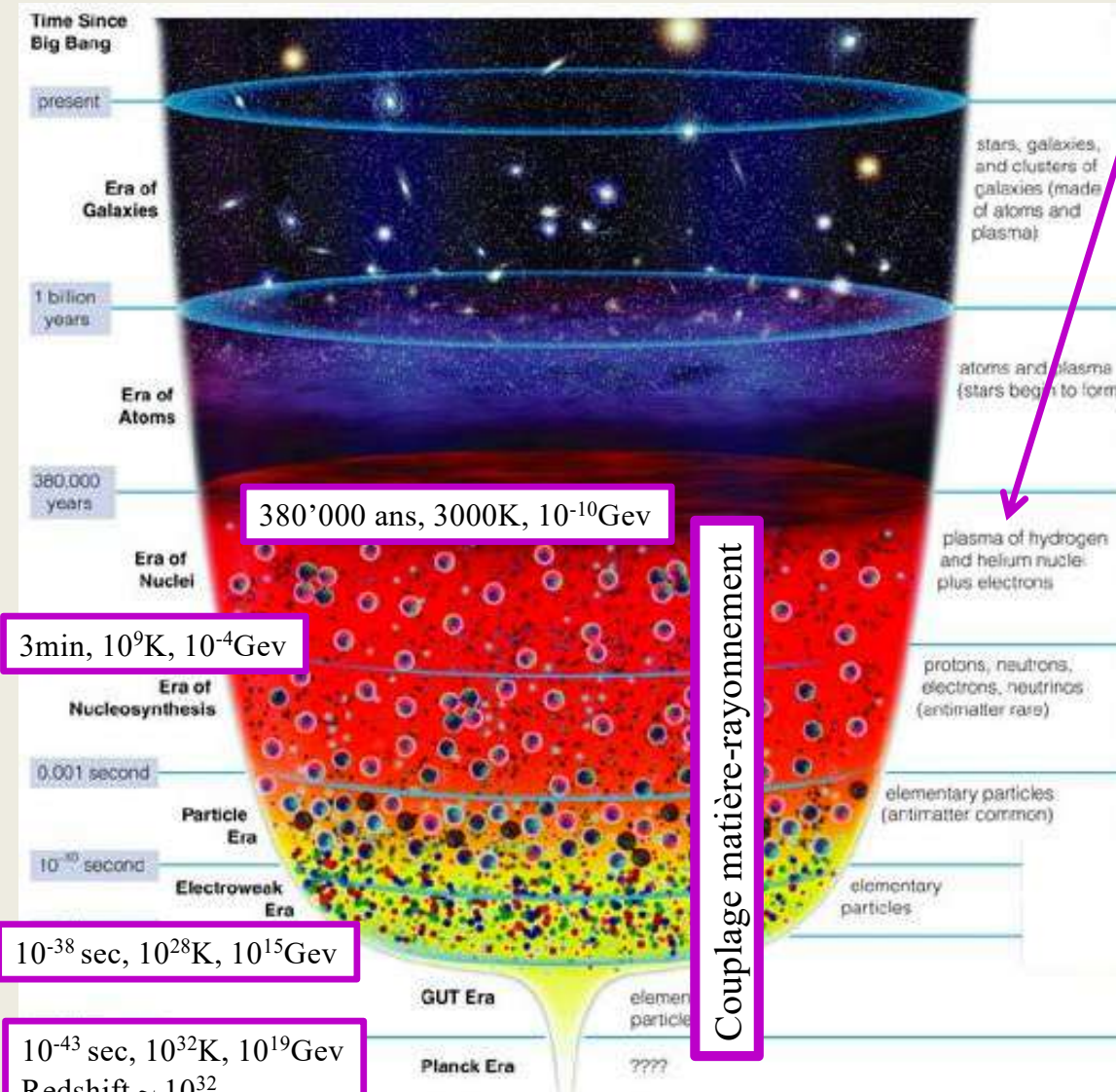
Horizon sonore : Taille de la zone causalement reliée de la surdensité
Taille correspond à une compression
Ordre de grandeur : En 370'000 ans, la distance parcourue par le son est 56 Mpc

Leçon 20231017 SP



Découplage rayonnement-matière (380'000 ans après le Big Bang)

- Les ondes sont «figées», les photons n'agissant plus sur la matière

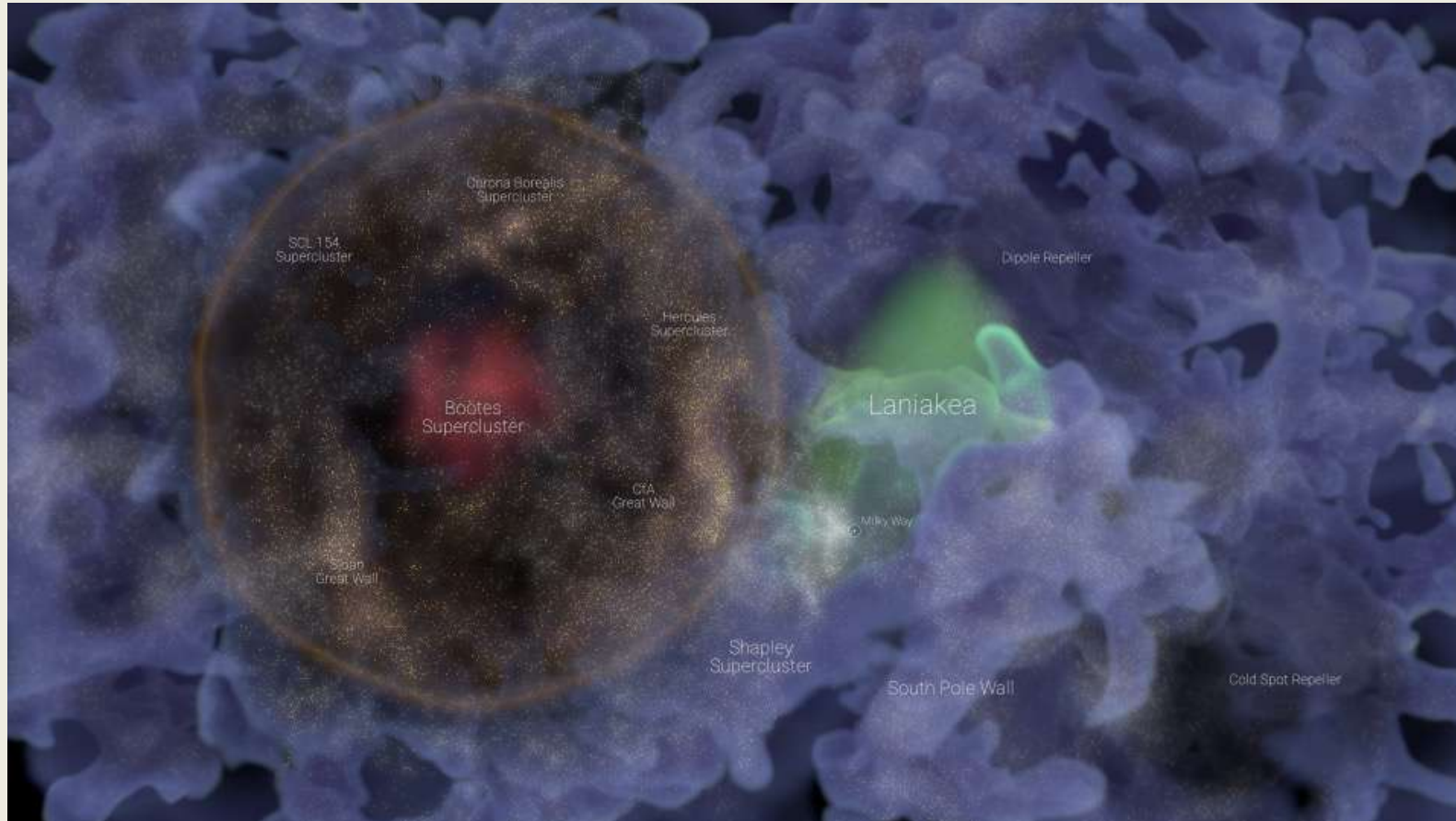


BAO (Baryon Acoustic Oscillation) Diamètre ~ 1 milliard d'années lumière

Distance de son centre ~ 820 millions d'années lumière de la Voie Lactée

Empreinte laissée par une onde acoustique baryonique (BAO), oscillations qui trouvent leur origine dans l'opposition entre la gravitation et la pression du plasma, exacerbée dans les régions de plus haute densité; a grandi avec l'expansion de l'univers depuis le moment où l'onde a été figée ~ 380'000 ans après le Big Bang (au moment de la recombinaison)

Ho'oilana super-amas
Une immense bulle de galaxies
témoin de l'univers primordial



Cosmic web en
bleu

Ho'oilana super-amas
Une immense bulle de galaxies
témoin de l'univers primordial



Ho'oleilana

An individual Baryon Acoustic Oscillation

The screenshot shows the radiofrance website interface. At the top, there is a navigation bar with 'radiofrance' logo, search bar, and 'Se connecter' button. Below it, a secondary navigation bar includes 'france culture' and various content categories like 'Grille des programmes', 'Podcasts', 'Fictions', etc. The main content area features a large article titled 'Oscillations acoustiques baryoniques, ça bulle ?' with a play button and 'ÉCOUTER (58 MIN)' button. To the right is a visualization of galaxy distribution with overlaid circles. Below the article is a 'CONTACTER L'ÉMISSION' button. A 'Les plus écoutés' section is visible at the bottom right.

Radios ▾ Podcasts Catégories ▾ Espace musique **radiofrance** Rechercher 🔍 Se connecter 👤 Votre

france **culture** Grille des programmes Podcasts Fictions Documentaires Savoirs Arts et Création

Oscillations acoustiques baryoniques, ça bulle ?

Mercredi 4 octobre 2023

▶ ÉCOUTER (58 MIN) 📖 🌐

Il est possible de retrouver la trace des BAO en établissant une carte de la distribution des galaxies dans le cosmos. ©Radio France - Gabriela Secara, Institut Périmètre

Provenant du podcast **La Science, CQFD** 📧 CONTACTER L'ÉMISSION 📻

Les plus écoutés de France Culture

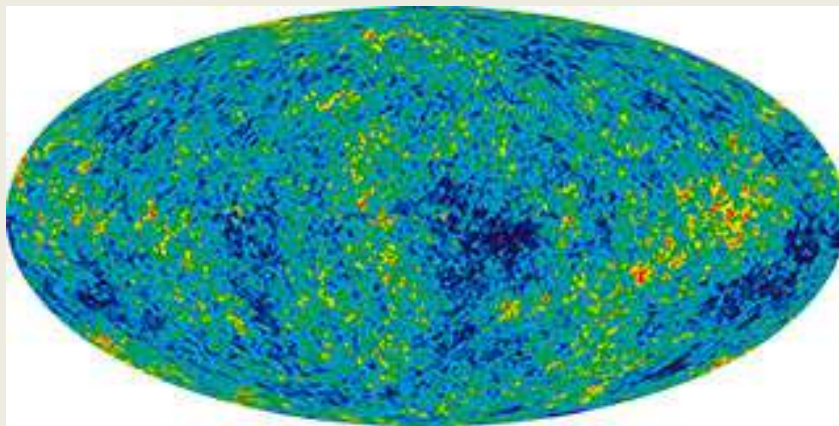
1 Avant l'État d'Israël, le sionisme et le peuplement de la Palestine Le Cours de l'histoire

Des anisotropies dans le fonds diffus cosmologique ... à la formation des grandes structures

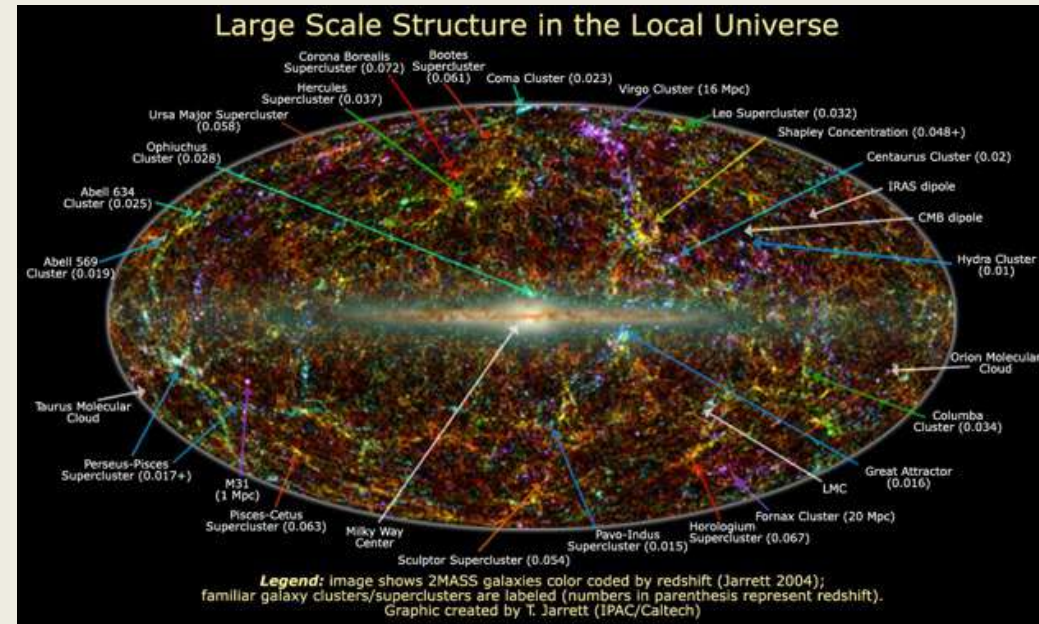
Anisotropies de température et de densité
Contraste en densité δ

$$\delta(\mathbf{r}, t) := \frac{\rho(\mathbf{r}, t) - \bar{\rho}(t)}{\bar{\rho}(t)}$$

Note: $\delta > -1$



380 000 ans après le Big-Bang
Conditions initiales $\delta = \delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$

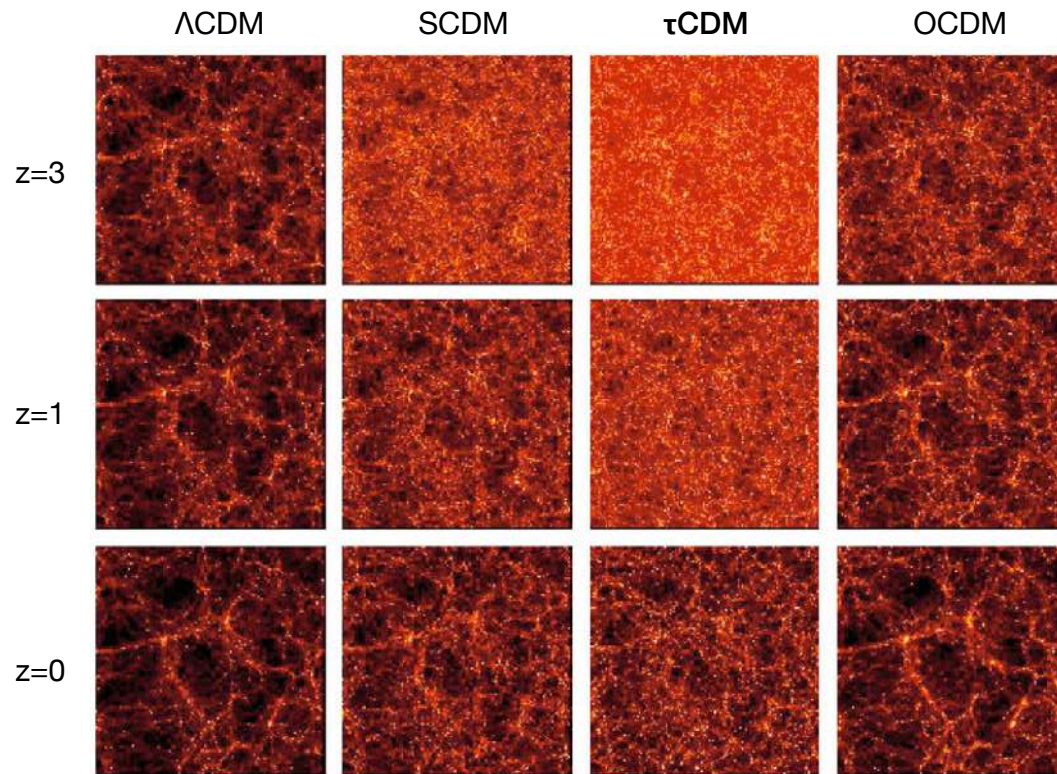


13.8 milliards d'années
Structures $\delta \sim 10^{-10}$

Les grandes structures (filaments) dans l'univers croissent à partir de fluctuations aléatoires initiales.
Dépend du « contenu » de l'univers qui dicte la géométrie de l'Univers, impossible sans matière ni énergie noire.

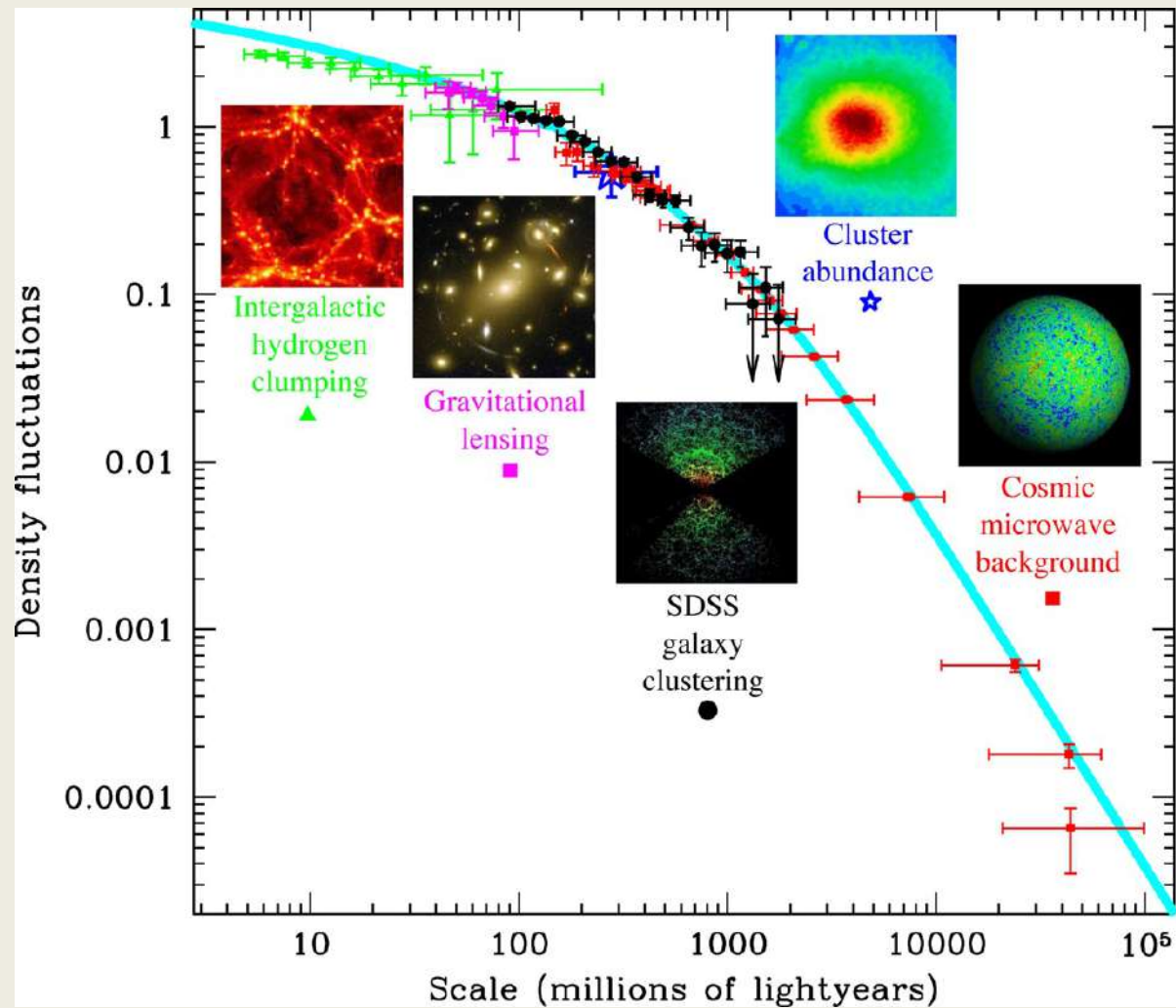
(leçon 20231107 CC)
(leçon 20231114 CB)

The Large Scale Structure (LSS) evolves quite differently for different model universes:
can be used to constrain the cosmology!



Virgo simulaton suite

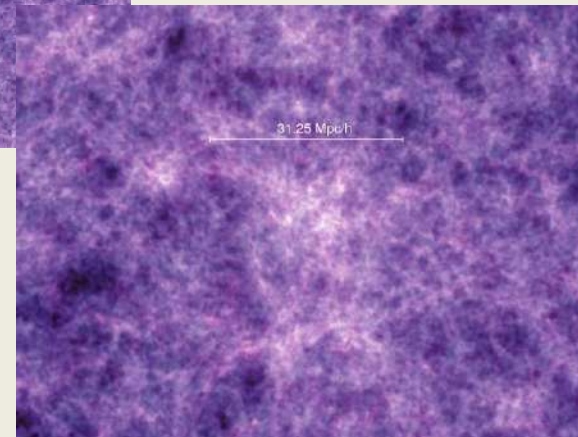
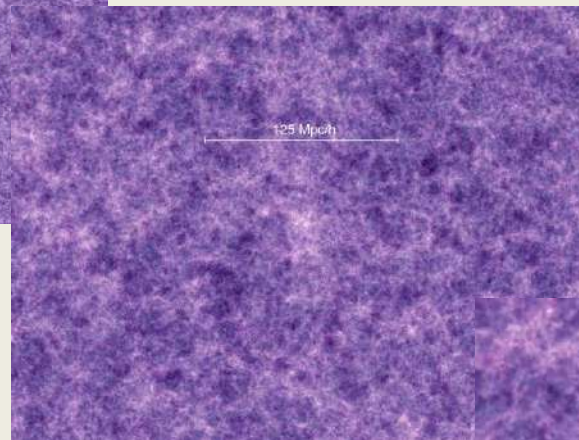
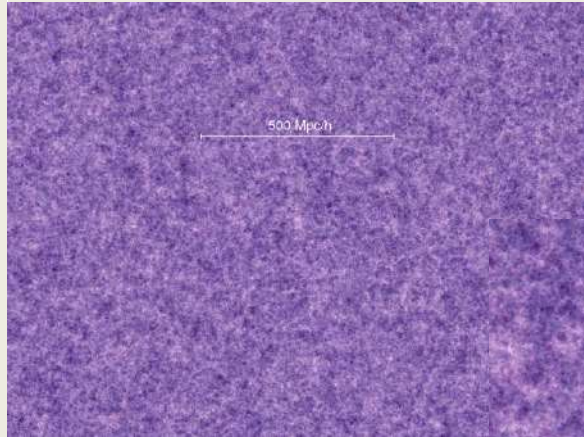
Amplitude des fluctuations de densité
de quelques millions à 40 milliards d'a.l.



Mesures par diverses méthodes
versus modèle de concordance comprenant
5% de baryons, 25 % de matière noire, 70 % d'énergie noire
Tegmark (2004)

*Grandes structures
Millennium simulation*

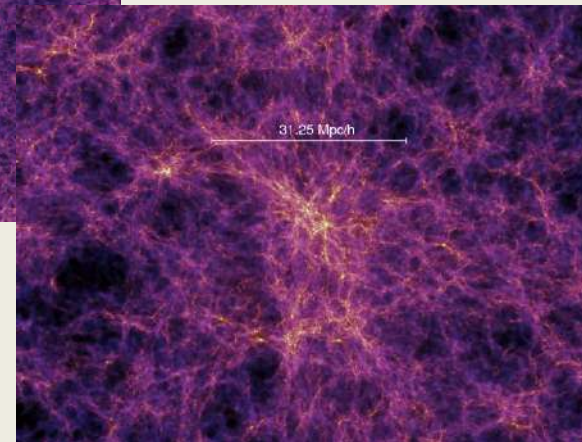
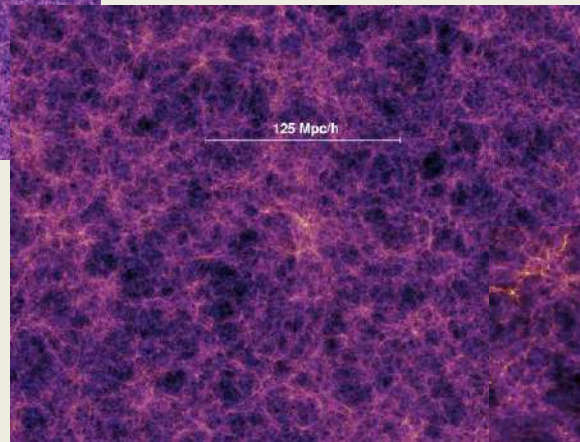
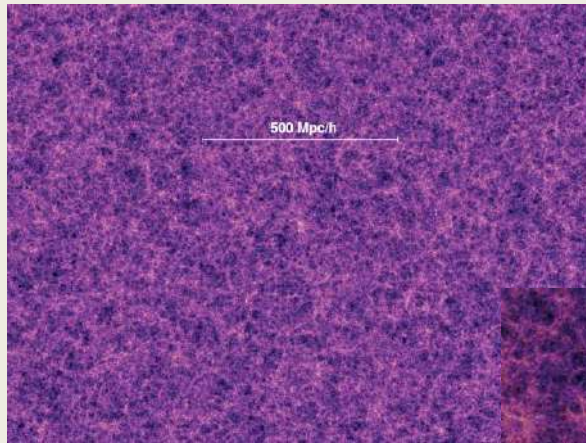
Distribution de la matière noire
à $z = 18.3$ ($t = 0.21$ milliards d'années après le Big Bang)



Simulations à N-corps
(10 millions de particules dans un cube de 2 milliards d'al)
<https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

*Grandes structures
Millennium simulation*

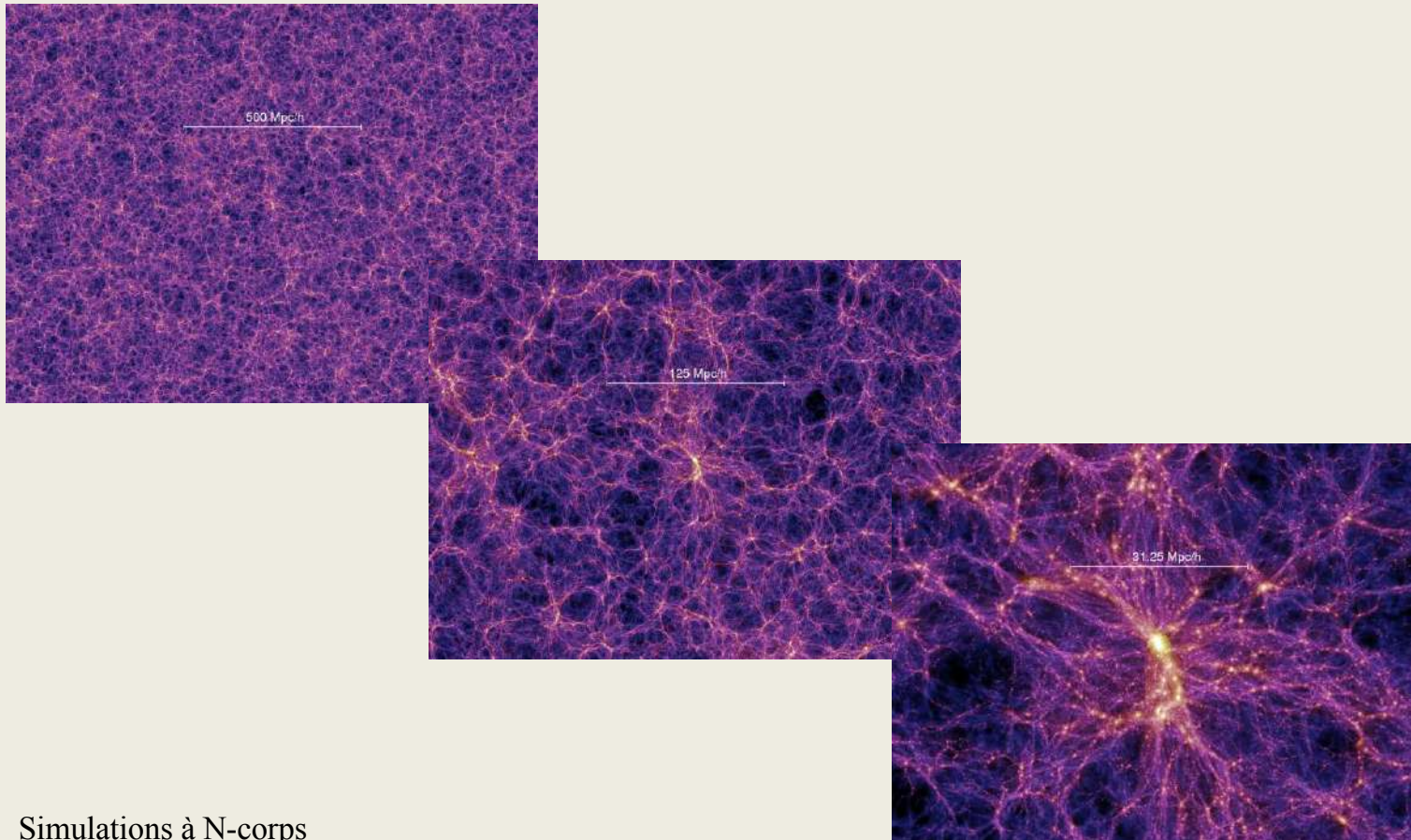
Distribution de la matière noire
à $z = 5.7$ ($t = 1$ milliard d'années après le Big Bang)



Simulations à N-corps
(10 millions de particules dans un cube de 2 milliards d'al)
<https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

*Grandes structures
Millennium simulation*

Distribution de la matière noire
à $z = 1.4$ ($t = 4.7$ milliards d'années après le Big Bang)



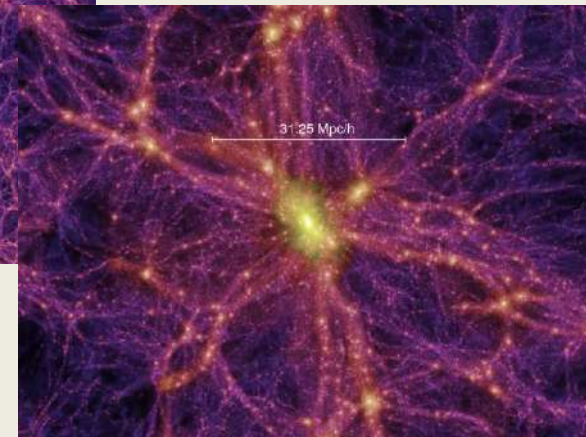
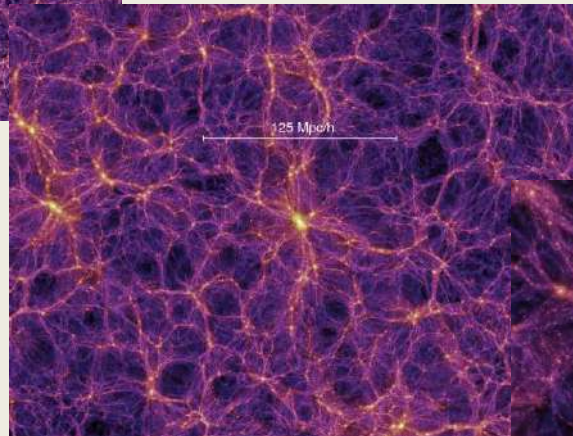
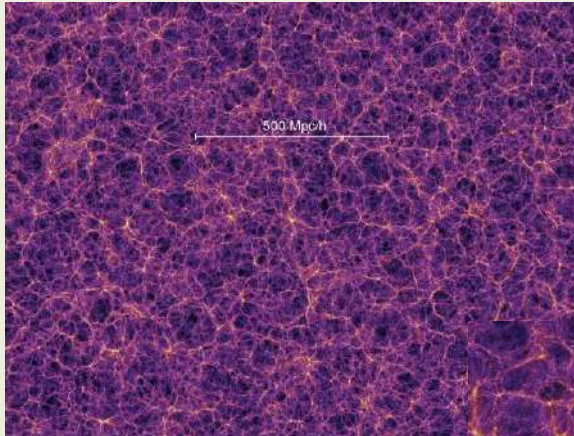
Simulations à N-corps
(10 millions de particules dans un cube de 2 milliards d'al)
<https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

C.Charbonnel – Cours UniGe 1051 – 2018-12-18

C.Charbonnel – Cours UniGe 1051 – 20231031

*Grandes structures
Millennium simulation*

Distribution de la matière noire
à $z = 0$ ($t = 13.6$ milliards d'années après le Big Bang)
→ Formation de 20 millions de galaxies

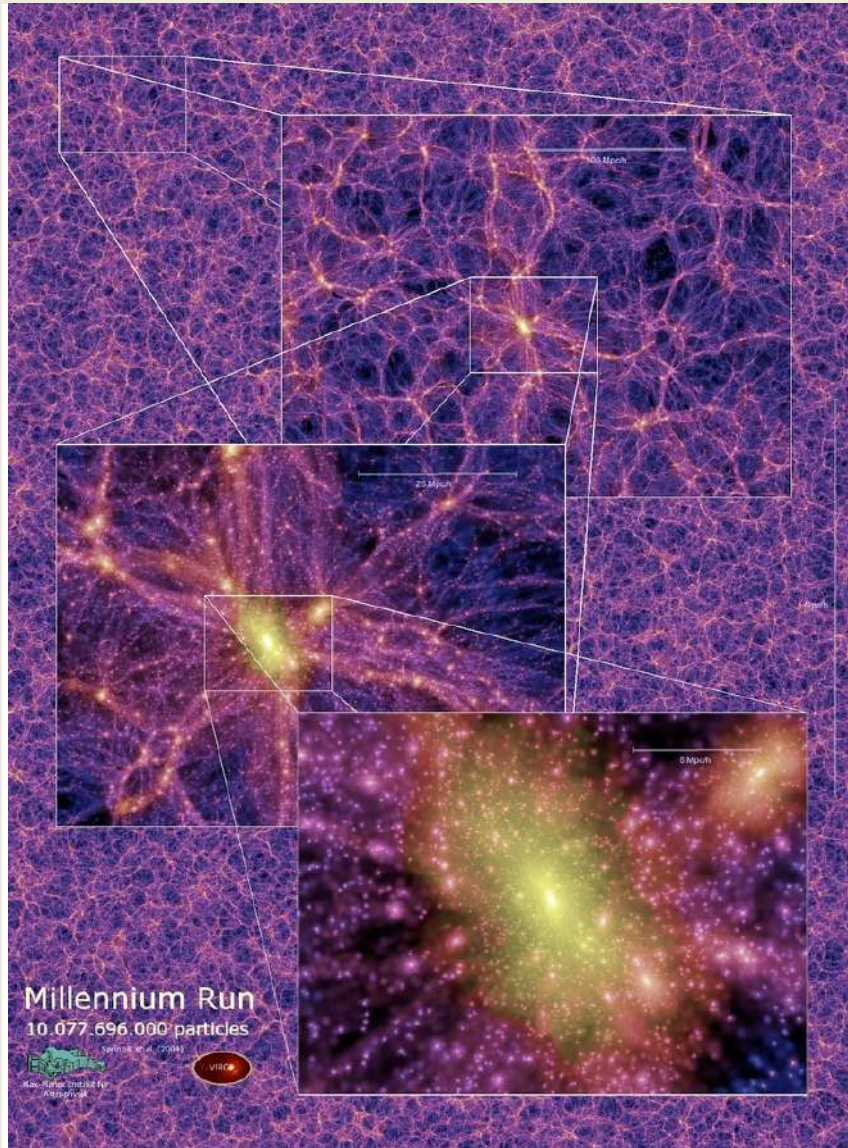


28 jours de calcul, 200 milliards d'opérations par seconde

Simulations à N-corps

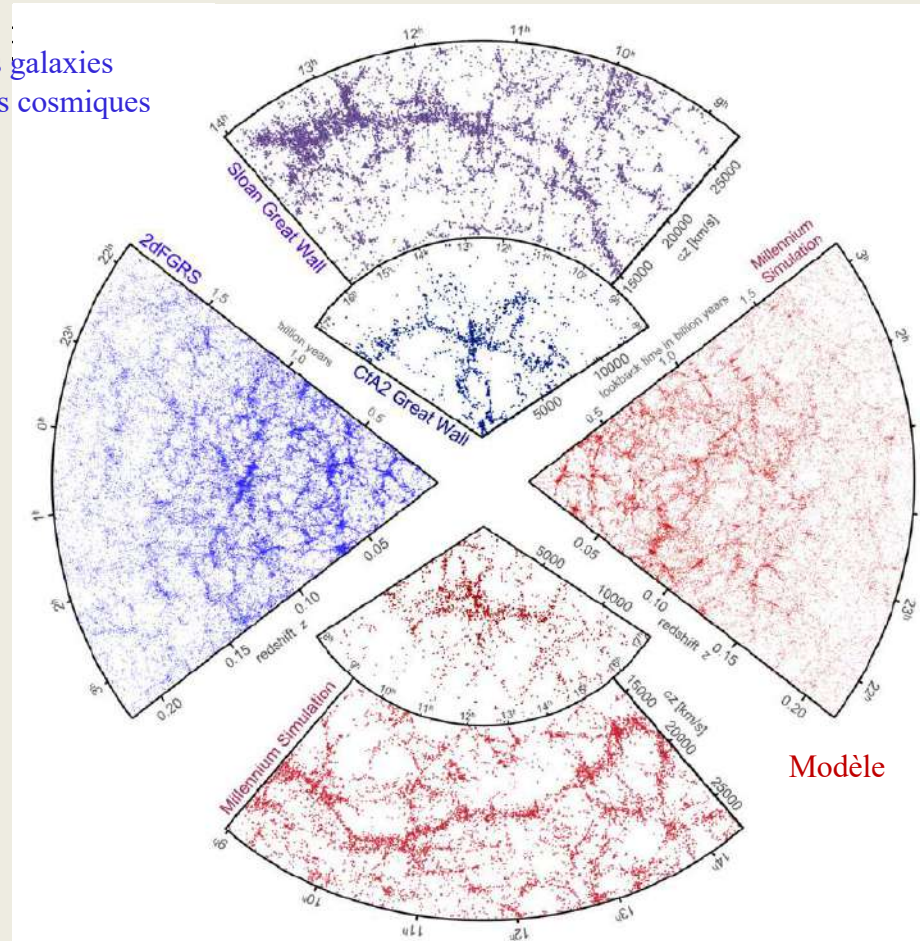
(10 millions de particules dans un cube de 2 milliards d'al)

<https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>



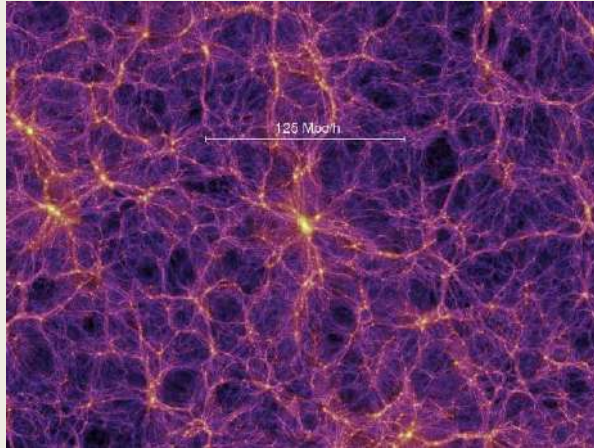
Grandes structures

Distribution non-homogène et non-aléatoire des galaxies
le long de filaments/feuilletts entourant des vides cosmiques
de taille typique $\sim 100\text{Mpc}$

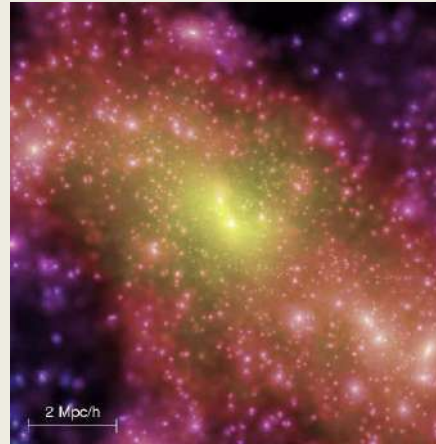


Un univers dominé par la matière noire (froide)
reproduit les structures observées

Grandes structures Millennium simulation



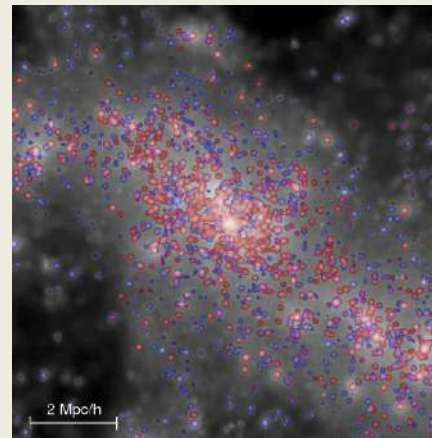
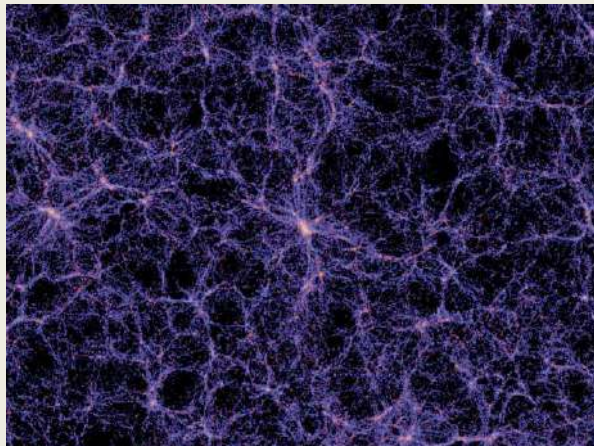
Distribution de la matière noire



La matière baryonique
suit le potentiel dominé
par la matière sombre



Distribution des galaxies



Apport continu de gaz
→ Formation d'étoiles
intense
→ Croissance des galaxies
par le réseau cosmique
Rôle relatif des fusions de
galaxies?

<https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

C.Charbonnel – Cours UniGe 1051 – 2018-12-18

C.Charbonnel – Cours UniGe 1051 – 20231031



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES
Département d'astronomie

Cosmologie

Corinne Charbonnel & Stéphane Paltani
Professeur.e.s au Département d'Astronomie UniGE

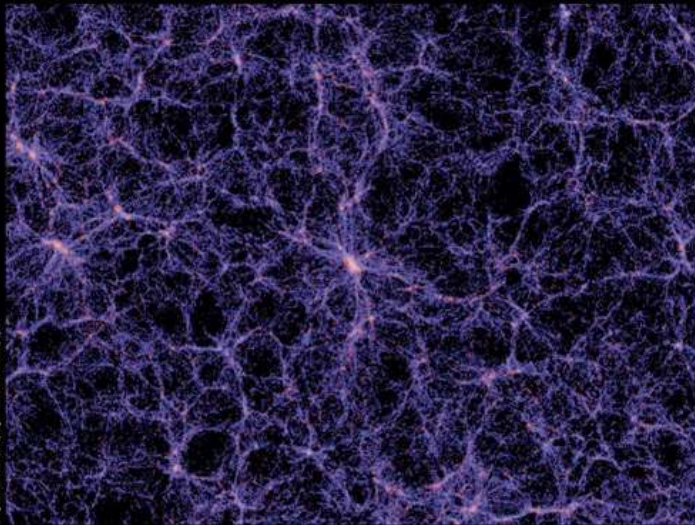


Image : Ochiel, MPA, V. Springel/Max Planck Institute for Astrophysics

le mardi, du 19 septembre au 19 décembre 2023
de 17h45 à 18h45
Auditoire A300 - Sciences II, 30 quai Ernest-Ansermet, Genève

Inscription au cours sur place le 19 septembre
Renseignements : <http://unige.ch/sciences/astro>

Cours 8 – 7 novembre 2023

Formation des grandes structures Galaxies, amas de galaxies et matière noire (II)

