



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES
Département d'astronomie

Cosmologie

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

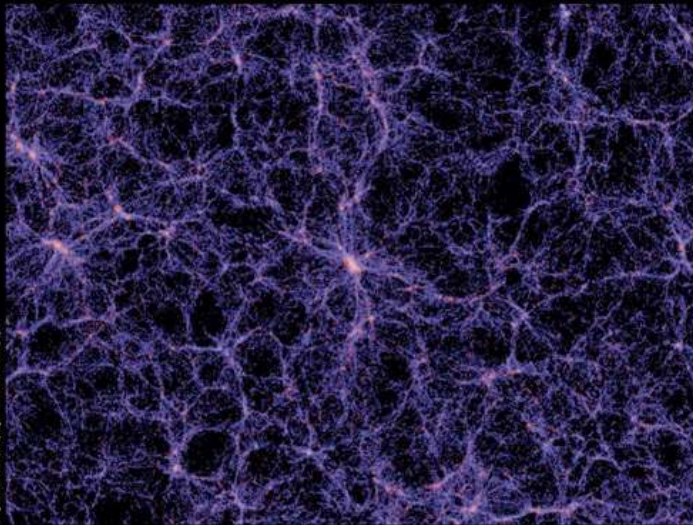


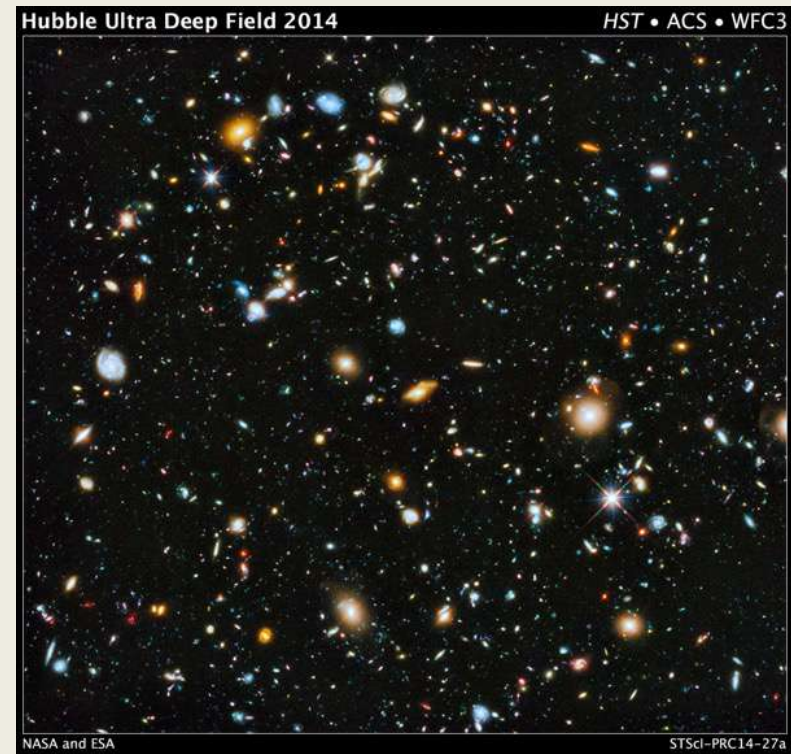
Image: O. Zahn, MPA, V. Springel/WMAP, S. D'Inverno

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 Matière noire (II)

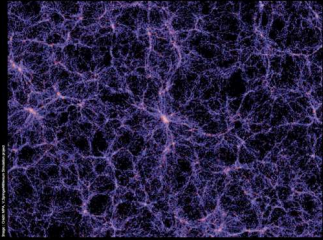


<https://mediaserver.unige.ch/play/204432>

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES
Département d'Astronomie

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

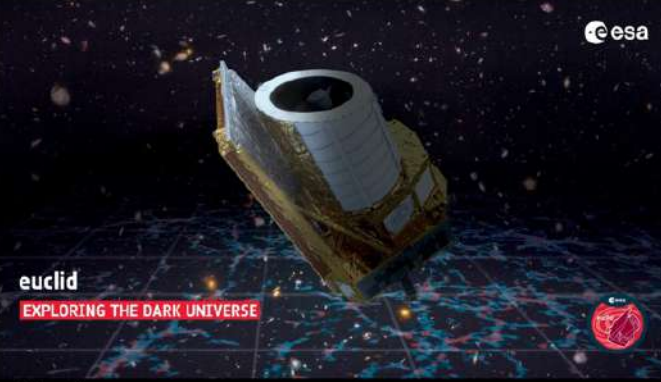
Inscription au cours sur place le 19 septembre
Renseignements : <http://unige.ch/sciences/astro>

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES

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

EPFL

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



euclid
EXPLORING THE DARK UNIVERSE

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

10A001 – Astronomie générale Cosmologie

En attendant le début du cours,
remplissez ce questionnaire anonyme

votamatic.unige.ch

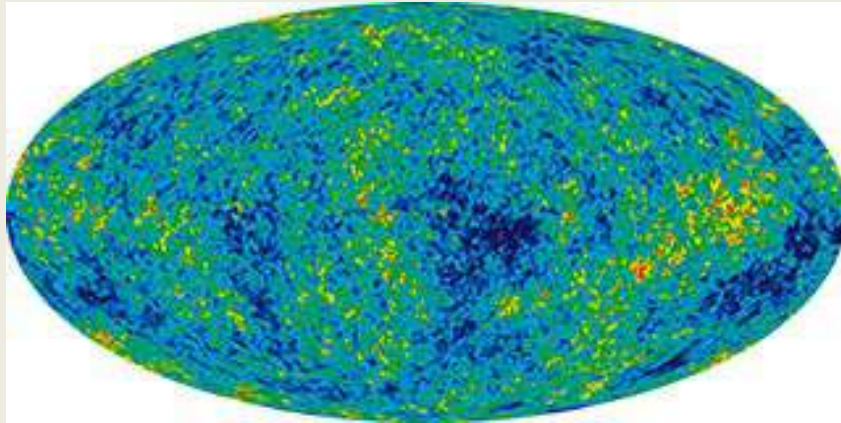
code d'accès
JNKV



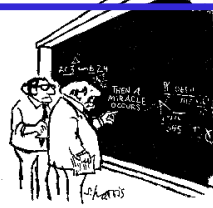
Anisotropies de température et de densité
 Contraste en densité δ

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

Note: $\delta > -1$



And then, a miracle occurs

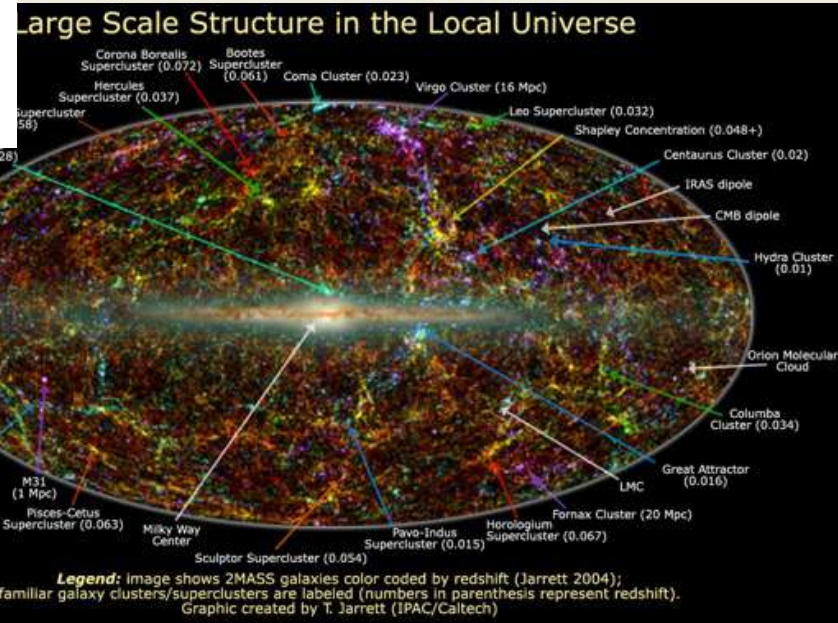


"I think you should be more explicit here in step two."

PY4A01 Solar System Science

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

(leçon 20231031 CC)



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 noire ni énergie noire.**

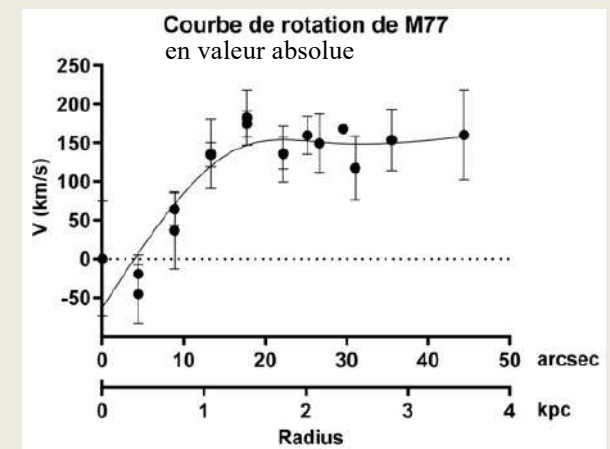
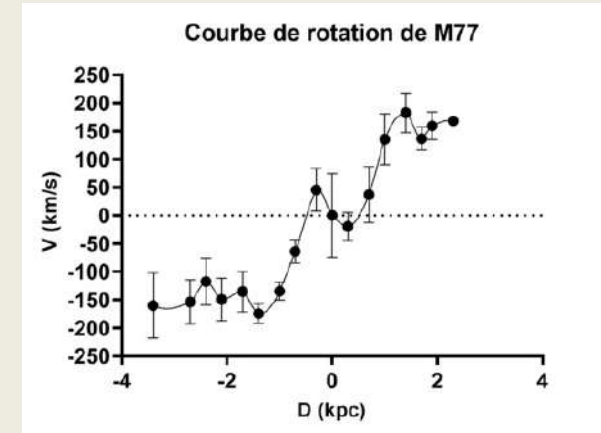
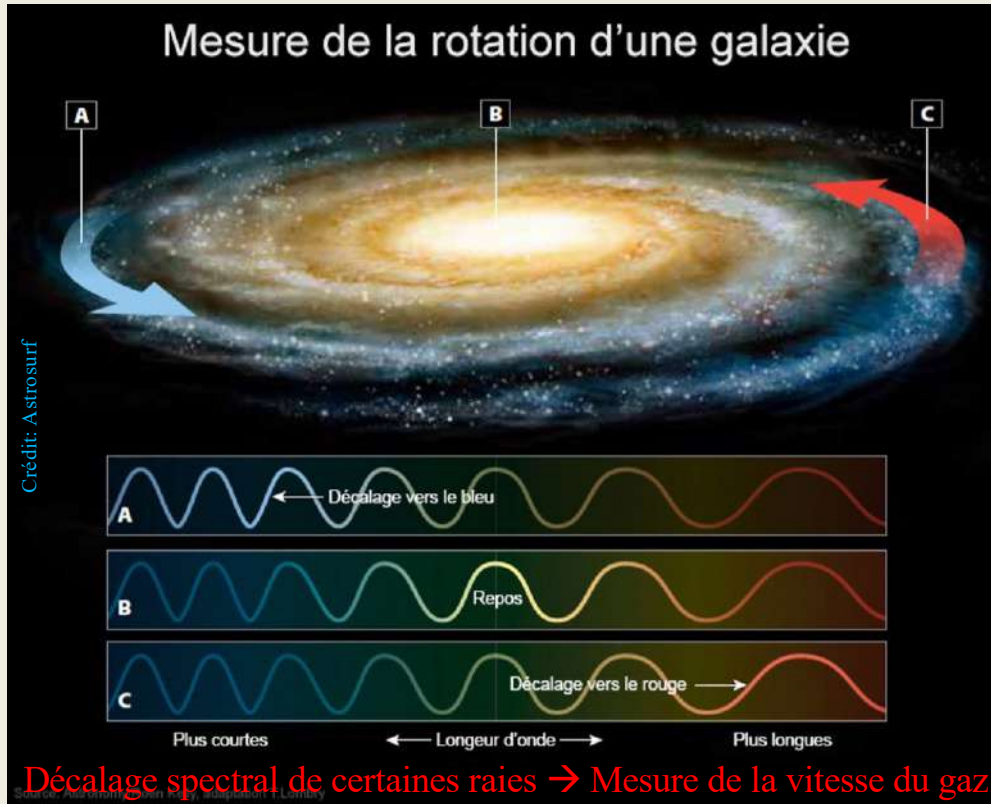
(leçon 20231114 CB)

Formation des grandes structures
Matière noire
(II)

Signatures observationnelles

- Courbe de rotation des galaxies
- Amas de galaxies
- Lentilles gravitationnelles

Matière noire – Courbe de rotation des galaxies



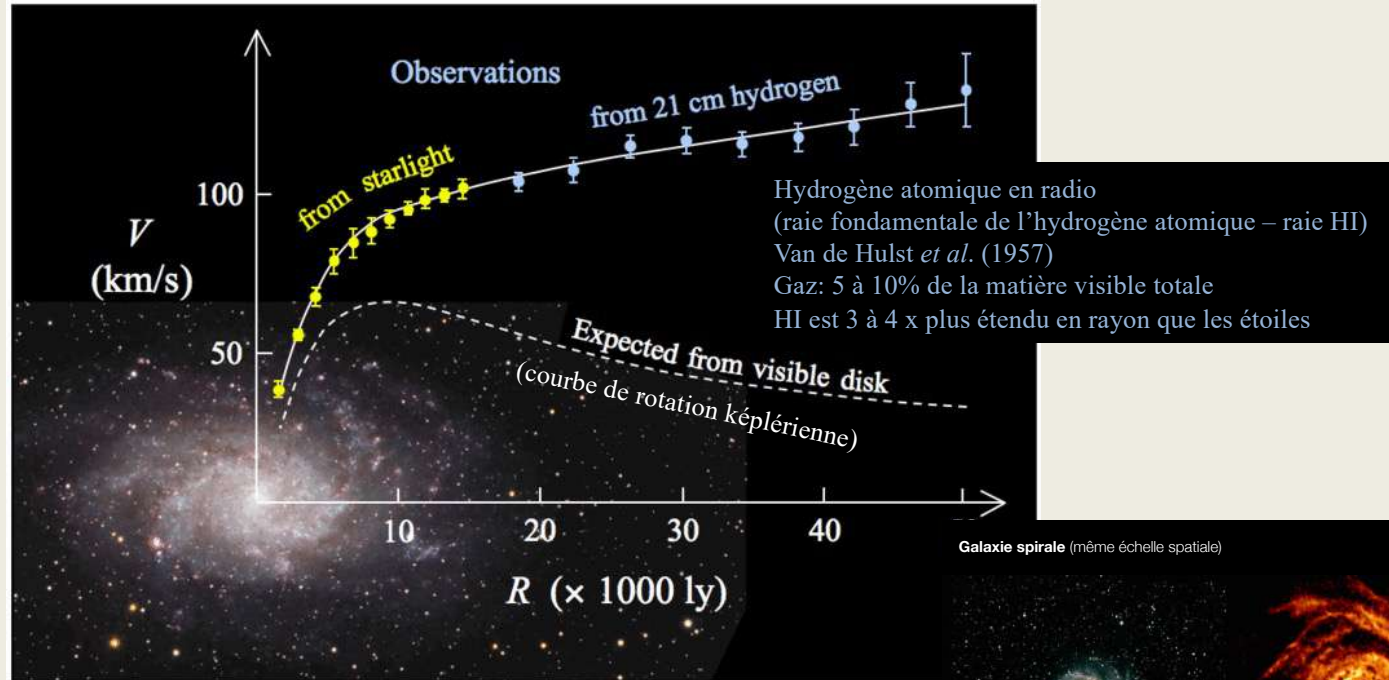
Premières observations: M31 (Babcock 1939)

Courbes de rotation mesurées par des spectres de raies de gaz ionisé (Ha et [NII] notamment) – Effet Doppler dans les longueurs d'onde optique (0,35-0,75 microns).

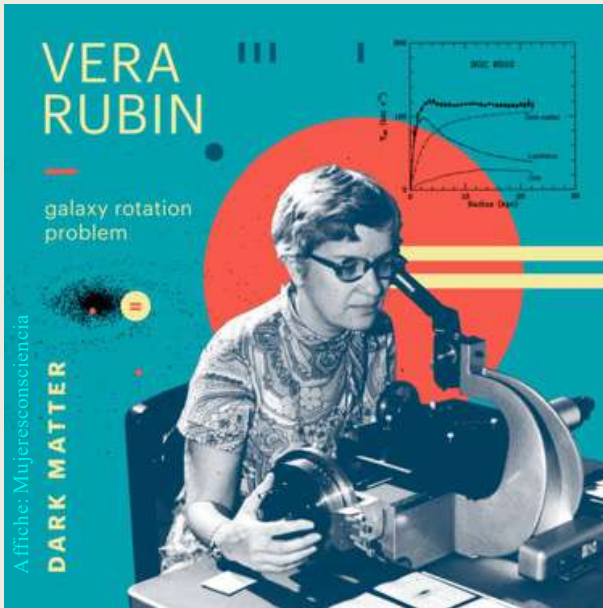
Beaucoup d'incertitudes observationnelles

- on ne voit pas tous les baryons dans l'optique (impacte la détermination de M)
- distances mal connues (impacte la détermination de L)

Matière noire – Courbe de rotation des galaxies



Courbe de rotation de la galaxie spirale M33
Image: Stefania Deluca



Catalogue de courbes de rotation: Rubin *et al.* (1980)

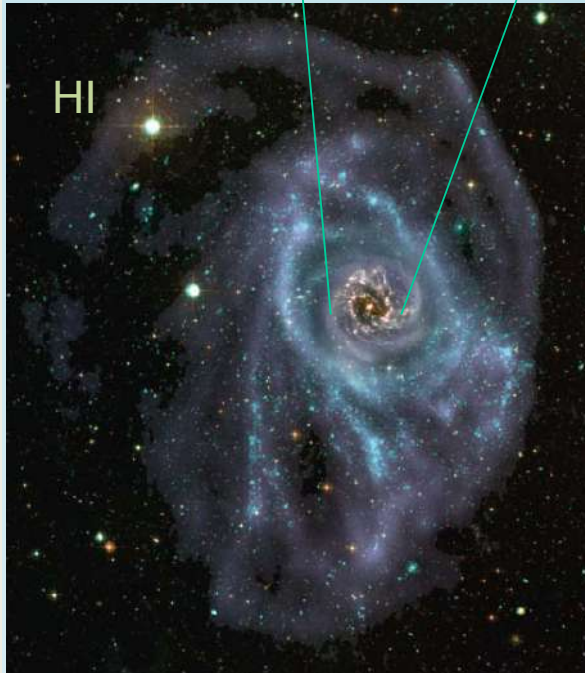
Les galaxies baignent dans un halo de matière noire
Ostriker & Peebles (1973)

$$V^2(\text{obs}) = V^2(\text{étoiles}) + V^2(\text{gaz}) + V^2(\text{halo})$$

Hydrogène atomique en radio – Galaxies

gque

M83: optique



Toutes les galaxies sont ramenées à la même échelle
Distances 3 à 15 Mpc
THINGS MPA - VLA

Masse manquante – Amas de galaxies



Fritz Zwicky
Matière sombre dans les amas de galaxies (1937)



Coma – Abel 1656
Credit: NASA/JPL-Caltech/L. Jenkins (GSFC)

Suggestions de FZ:

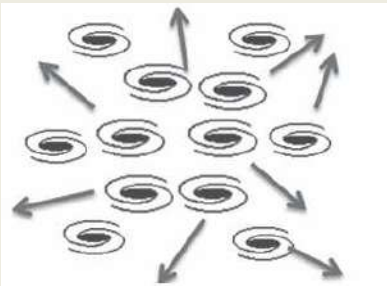
- Masse visible obscurcie par de la poussière intergalactique ?
- Loi de Newton modifiée à grande échelle ?
(e.g. Finzi 1963)
- Masse manquante dans les galaxies ou dans l'espace intergalactique ?
- Objets compacts ? Astres morts ? Poussière ? Gaz ?

Détermination de la masse de l'amas avec le **théorème du Viriel**:

Relie l'amplitude des **vitesse relatives** (ou dispersion des vitesses : énergie cinétique E_{cin}) des galaxies de l'amas à la **masse** totale de l'amas (: énergie potentielle de la gravitation E_p).

Pour un amas en équilibre: $2 \times E_{cin} + E_p = 0$

Mesures: vitesses $\sim 1000 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1}$ \rightarrow **Masse totale dynamique** $\sim 5 \times 10^{14} M_{\odot} > 100$ fois la masse visible des galaxies de l'amas

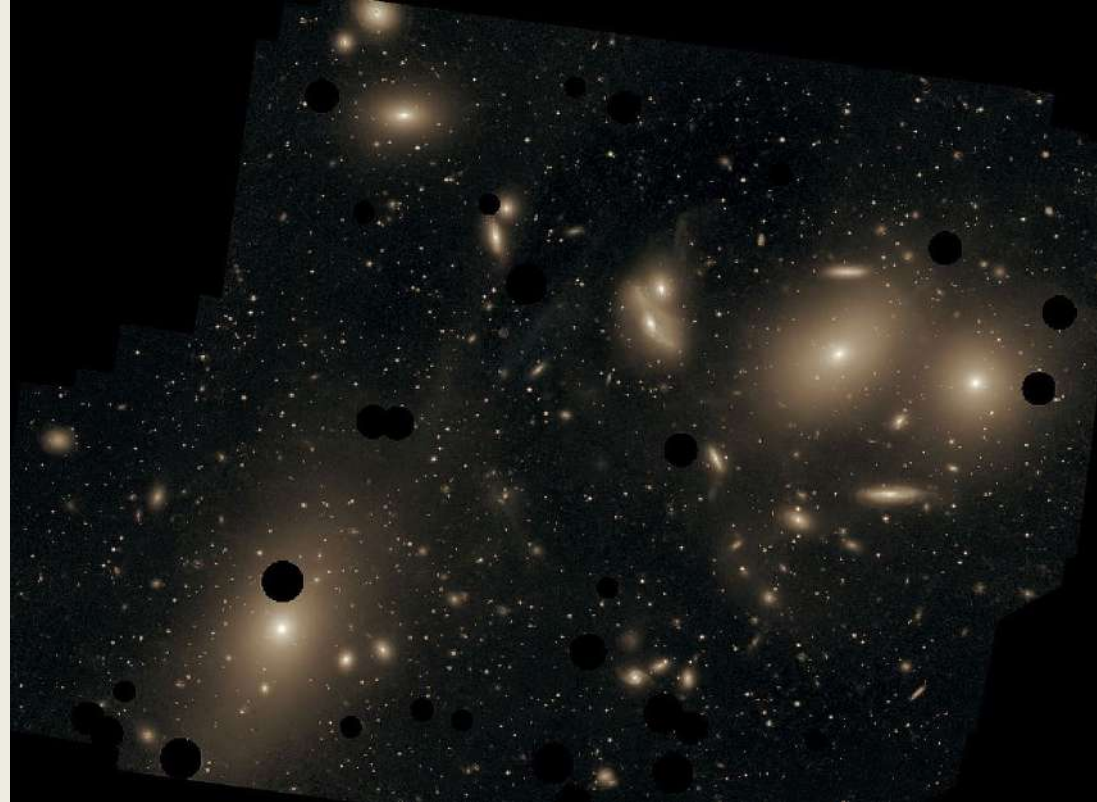


Beaucoup d'incertitudes observationnelles

- on ne voit pas tous les baryons dans l'optique (poussières, gaz chaud, ...) \rightarrow détermination de M baryonique très incertaine
- distances mal connues \rightarrow incertitude sur la détermination de la luminosité L
- le rapport M/L des populations stellaires était incertain
- ...

Masse manquante – Amas de galaxies Virgo

Sinclair Smith
« The mass of the Virgo cluster » (1936)
Mesures: Humason – Slipher
Théorème du Viriel



Partie centrale de Virgo
Crédit: C.Mihos (Case Western Reserve University) & ESO

Détermination de la masse de l'amas avec le **théorème du Viriel**
→ **Masse totale dynamique** $\sim 5 \times 10^{14} M_{\odot}$ **> 100 fois la masse visible des galaxies de l'amas**

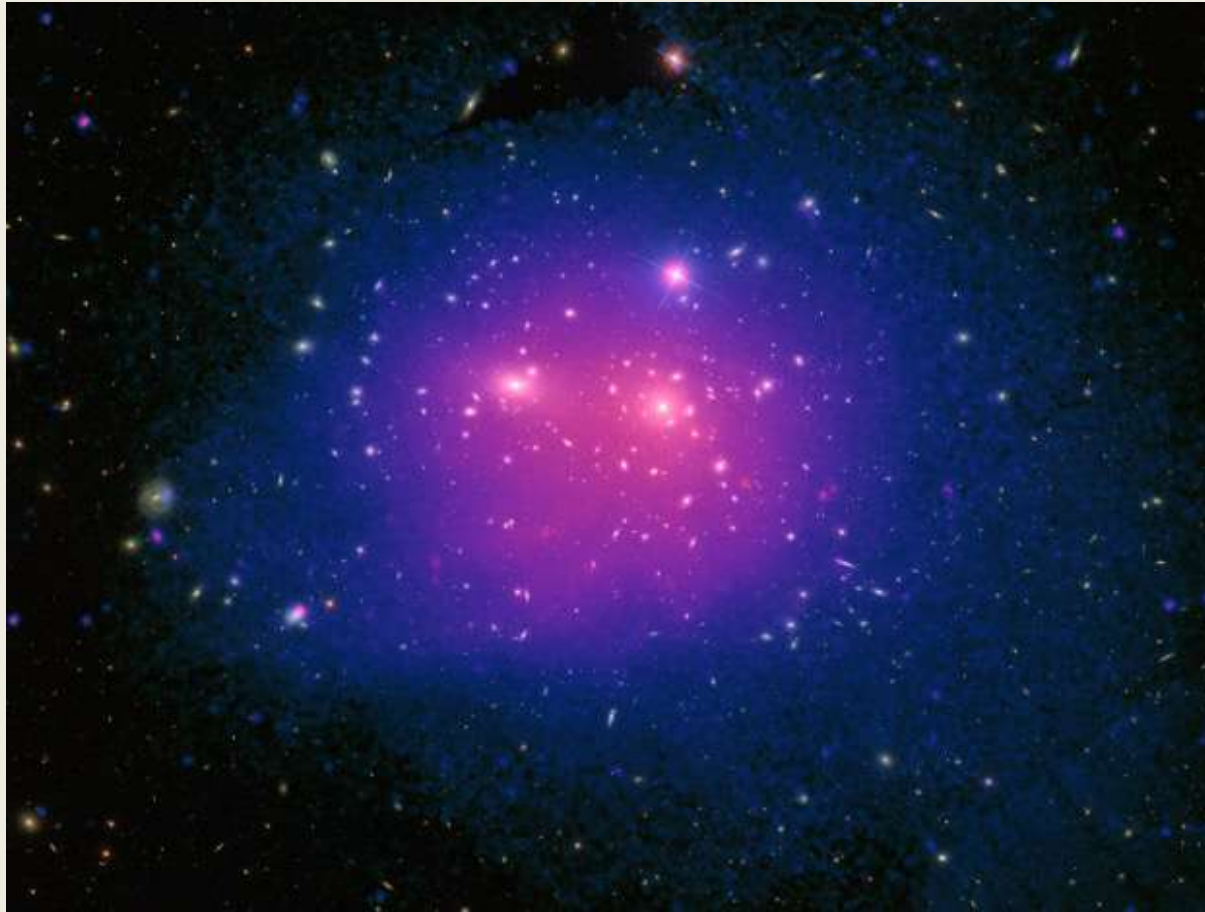
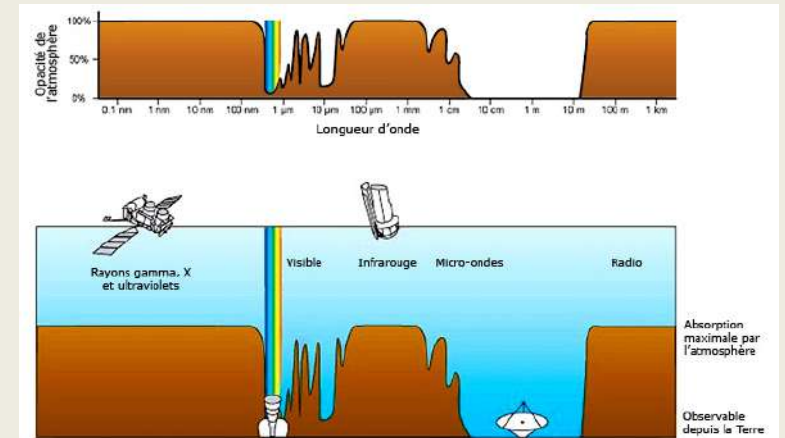
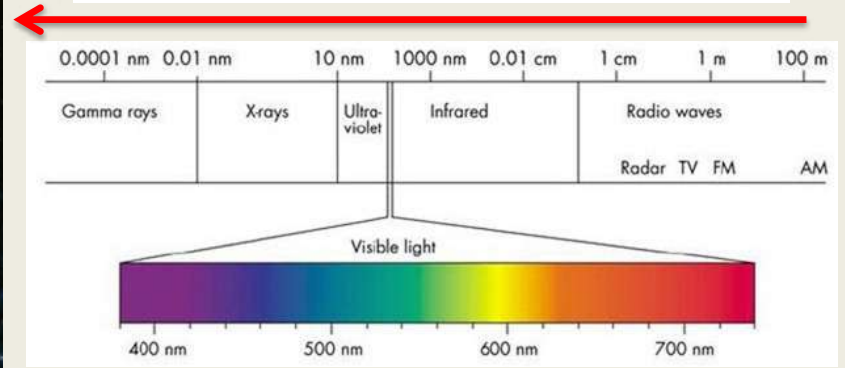
Masse manquante – Amas de galaxies

L'apport de l'astronomie des rayons X

1962: Naissance de l'astronomie des rayons X

2002: Riccardo Giacconi Prix Nobel de Physique

← Longueur d'onde ↘ Fréquence ↗ Energie ↗

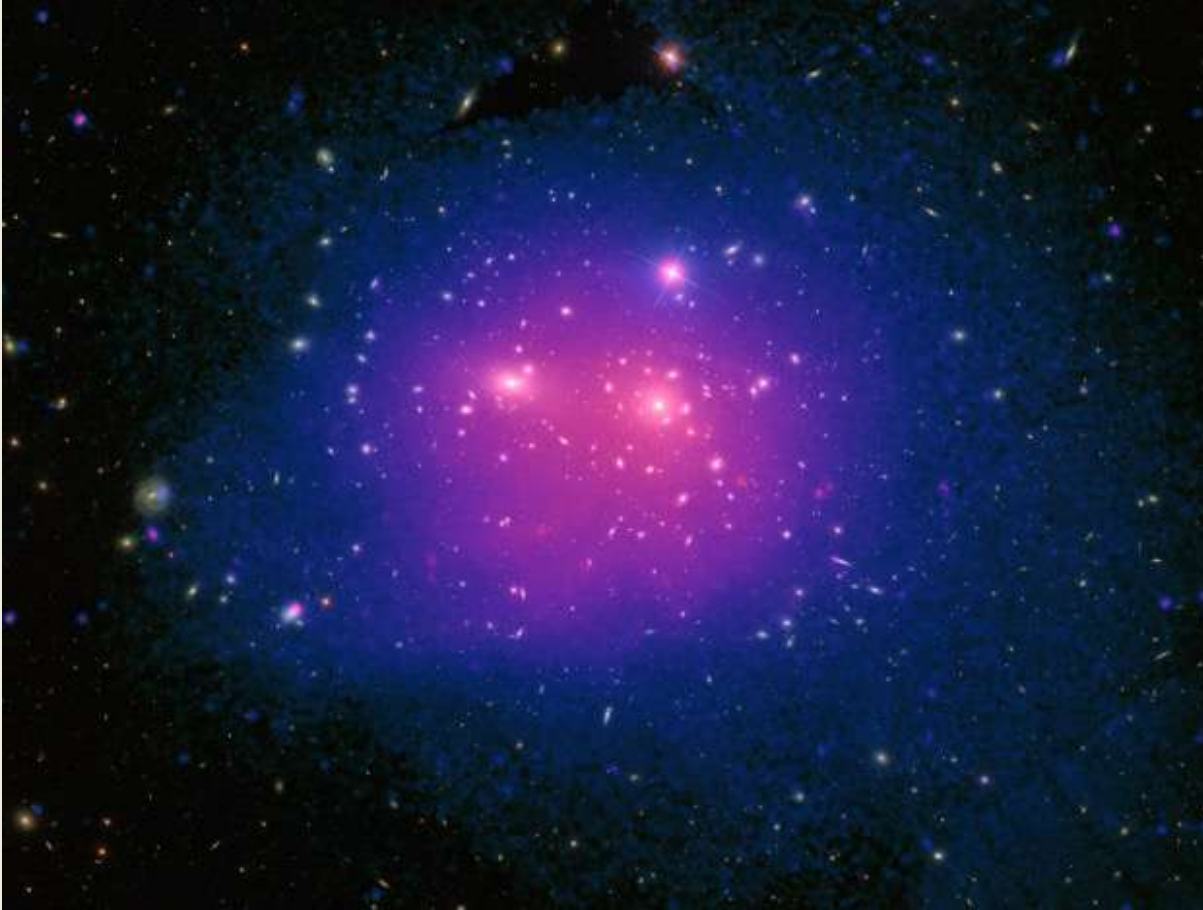


Satellite: XMM-Newton + image optique (SDSS)

Depicts: Coma galaxy cluster

Copyright: ESA/XMM-Newton/SDSS/J. Sanders *et al.* (2019)

Gaz très chaud dans les amas de galaxies Coma



Satellite: XMM-Newton + image optique (SDSS)
Depicts: Coma galaxy cluster
Copyright: ESA/XMM-Newton/SDSS/J. Sanders *et al.* (2019)

Premiers satellites en rayons X

- Très forte émission diffuse dans l'amas de Coma
(Bold *et al.* 1966)
- Rayonnement thermique émis par le gaz intergalactique très chaud (10 à 100 millions K) de faible densité ($\sim 1000 \text{ particules.m}^{-3}$)
(Felten *et al.* 1966)

Distribution du gaz assez régulière

- Amas \sim dynamiquement stable

Equilibre hydrostatique:

Pression du gaz (expansion)
balance l'effet de la gravité

- $M(\text{gaz}) / M(\text{totale dynamique}) \sim 14 \%$

Masse de gaz chaud dans les amas riches

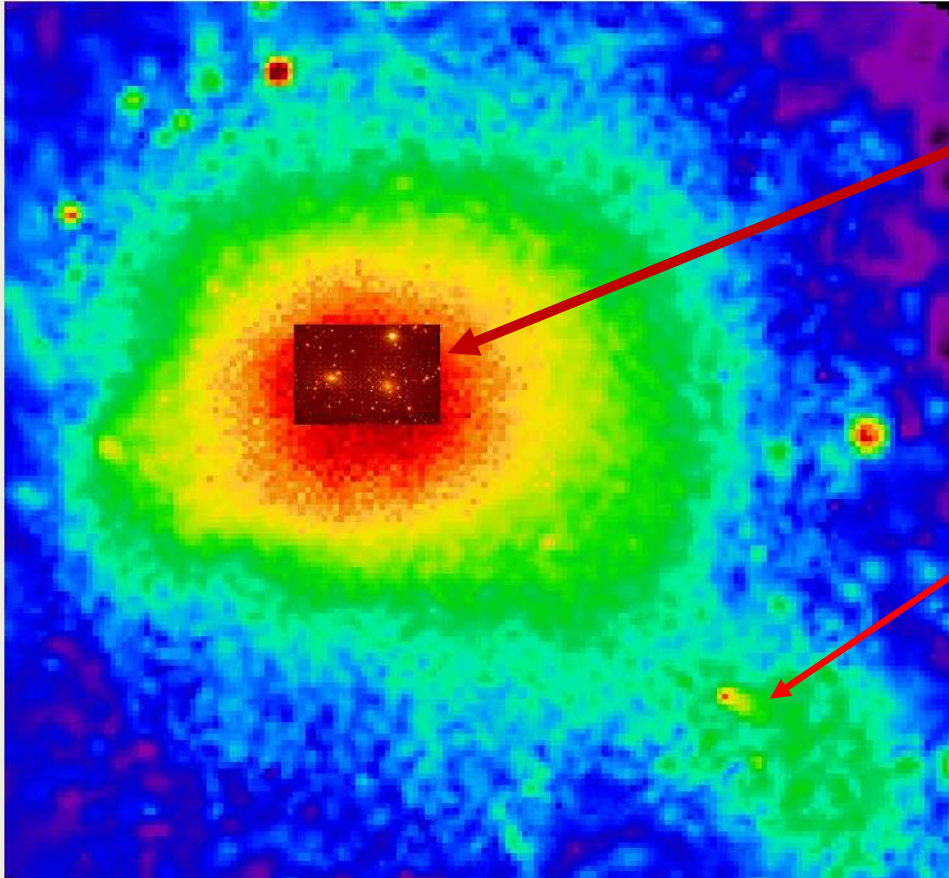
~ 10 x masse « visible » des galaxies

- La plupart de la matière ne rayonne pas dans l'optique
- Matière noire encore « nécessaire » pour expliquer le fait que le gaz chaud reste lié gravitationnellement ainsi que la dynamique des galaxies au sein de l'amas.

Masse totale dynamique de l'amas $\sim 10^{15} M_{\odot}$

Dominée par la matière noire non baryonique

Gaz très chaud dans les amas de galaxies Coma



Les galaxies baignent dans un plasma à très haute température.

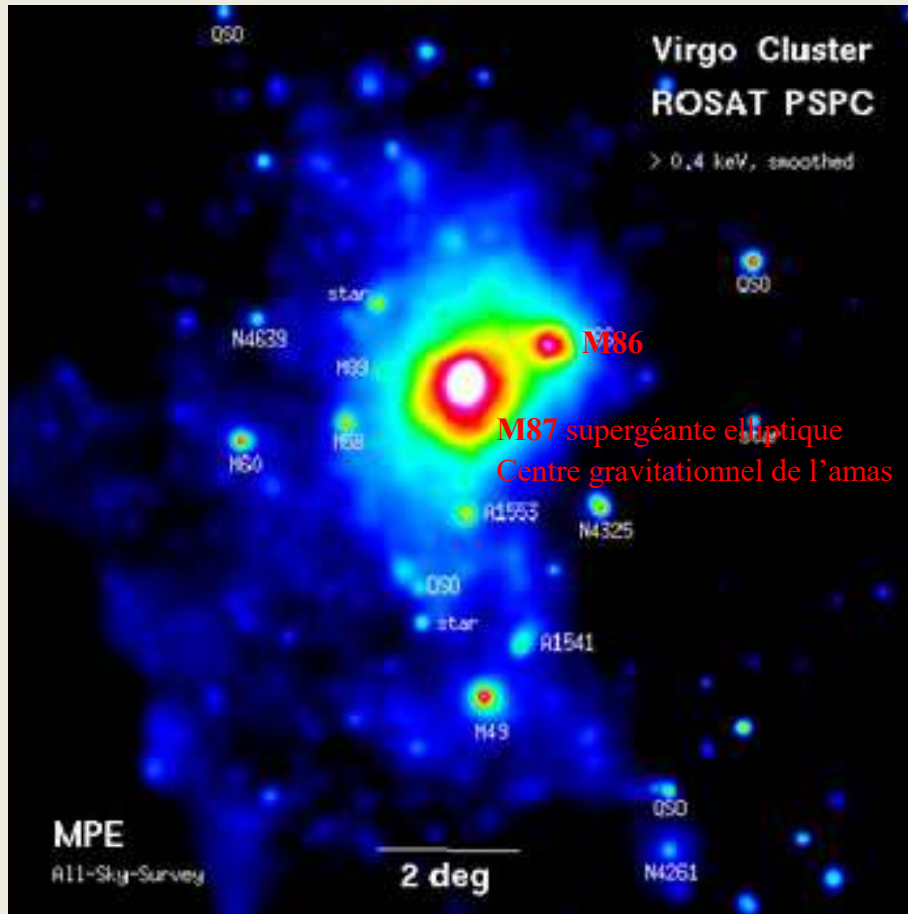
L'essentiel de l'émission X se trouve autour des amas de galaxies, à l'intersection des filaments de la toile cosmique.

Matière intergalactique chauffée par les galaxies qui « tombent » dans l'amas (*bremsstrahlung*: rayonnement de freinage des électrons dont la trajectoire est déviée par les protons).

Structure en train de « tomber » sur l'amas.

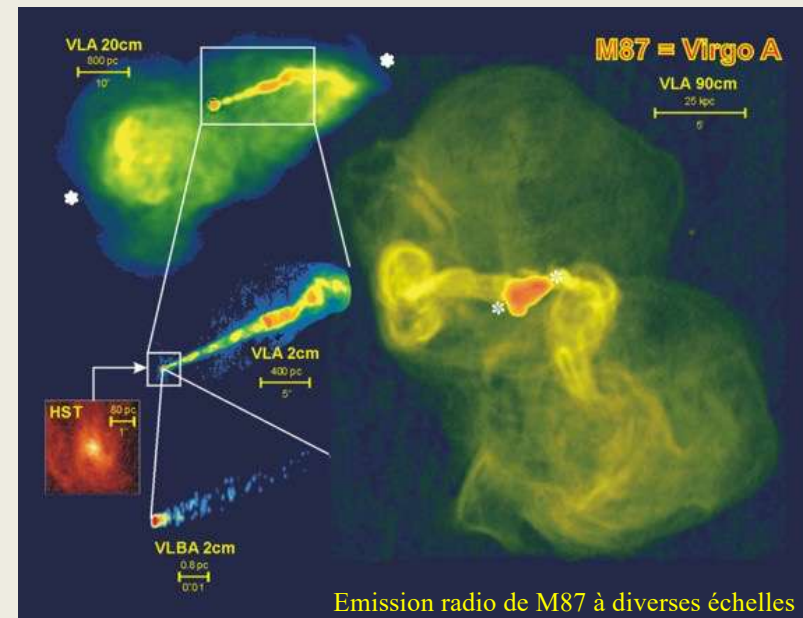
Crédit: Rieke
[ROSAT X-ray image](#)

Gaz très chaud dans les amas de galaxies Virgo



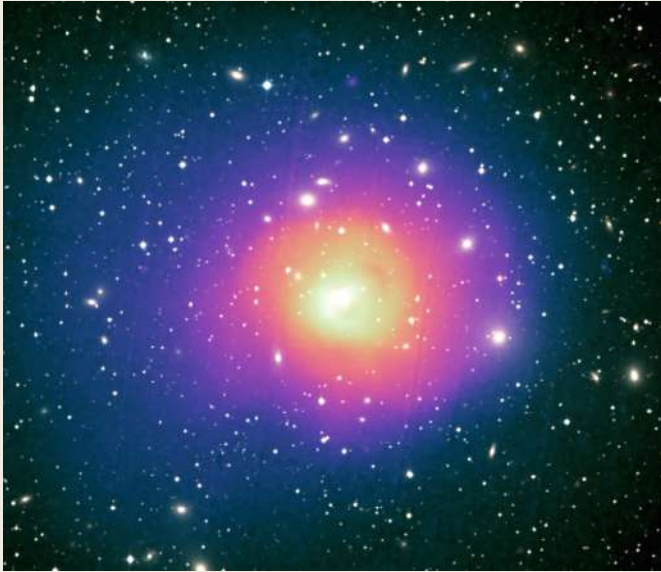
Böhringer *et al.* (1994)

- Distribution irrégulière du gaz chaud, l'essentiel est centré autour de M87
- Amas encore en formation, dynamiquement instable, composé de sous-systèmes en interaction/fusion (M86 sur M87)
- Choc augmente la température du gaz

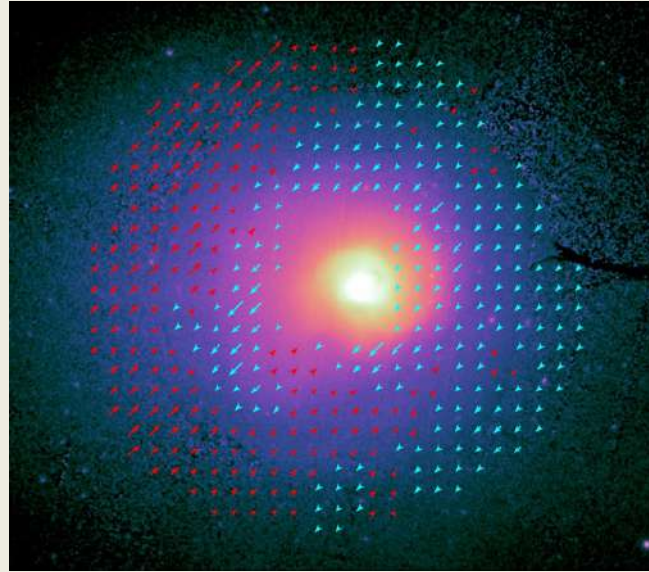


- Jet relativiste entretenu par le trou noir supermassif
(3 à $7 \times 10^9 M_{\odot}$)
- AGN : Noyau actif de galaxie

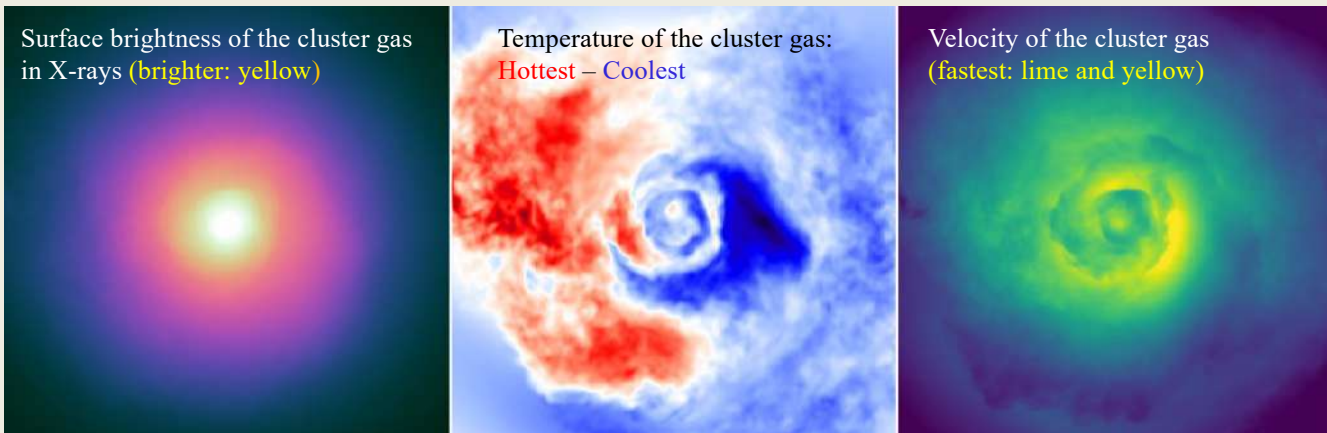
Gaz très chaud dans les amas de galaxies Perseus



X-ray and optical view of the Perseus galaxy cluster.
Credit: ESA/XMM-Newton/DSS-II/J. Sanders *et al.* (2019)



Mouvements du gaz (observations)



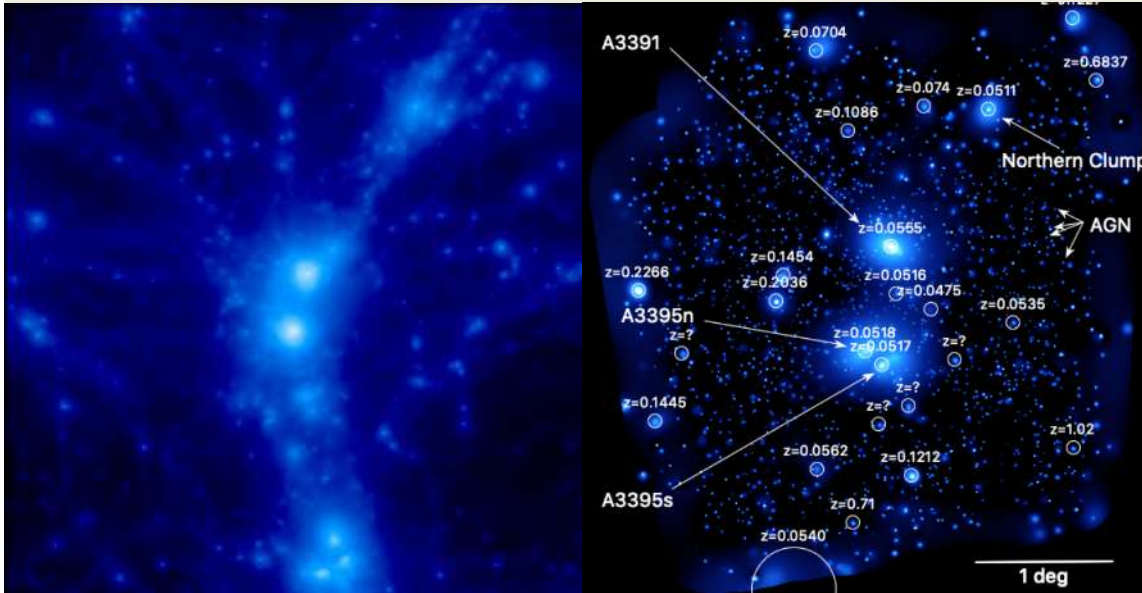
Simulations: Courtesy of J. Zuhone, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

Agitation du gaz probablement due à la collision et à la fusion de petits sous-amas avec l'amas principal
→ Evènements assez énergétiques pour perturber le champ gravitationnel de Persée et déclencher un mouvement de ballotement et de chauffage du gaz pendant plusieurs millions d'années.
Multiples flux de matière au sein de l'amas de Coma qui ne se sont pas encore rassemblés pour former un seul "blob" cohérent.

Le plus long filament de gaz intergalactique observé en rayons X

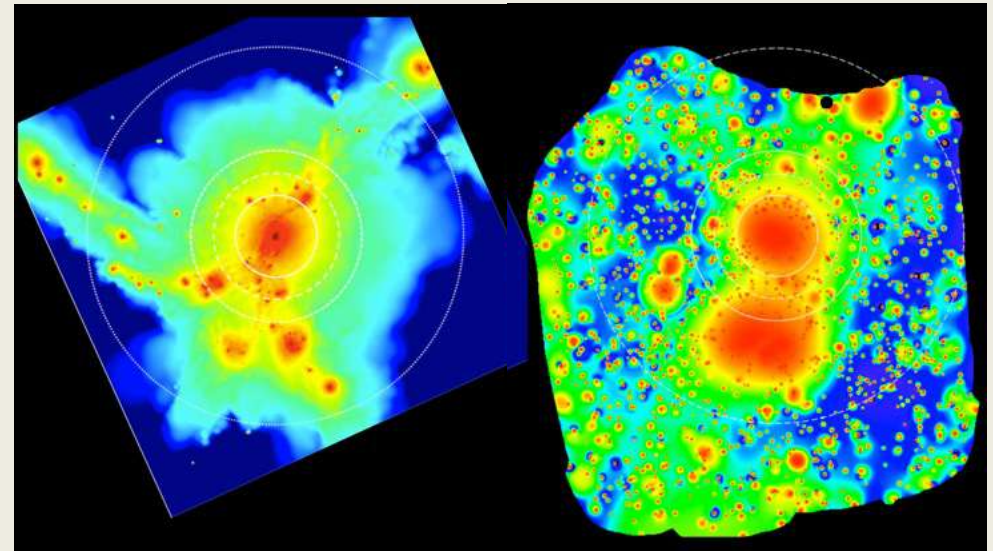
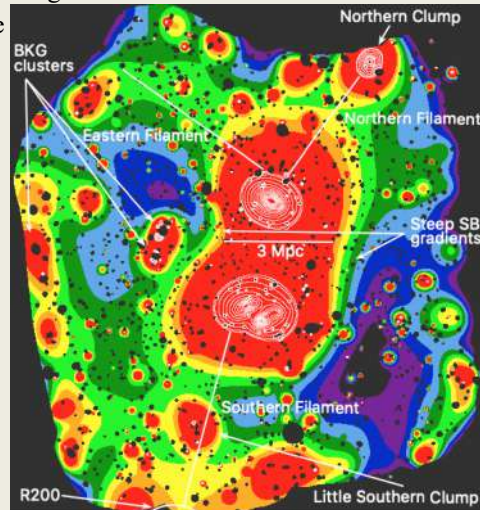
The Abell 3391/95 galaxy cluster system (3 amas de galaxies)
 A **15 Mpc intergalactic medium emission filament, a warm gas bridge**, infalling matter clumps, and (re-) accelerated plasma discovered by combining SRG/eROSITA data with ASKAP/EMU and DECam data
[Reiprich et al. \(2020\)](#)

« Matter highway »
 Les amas de galaxies sont à la croisée des filaments



Distribution de la densité du gaz chaud
Simulation numérique cube de 20 Mpc/h de côté
 Les amas tombent le long des filaments à grande échelle

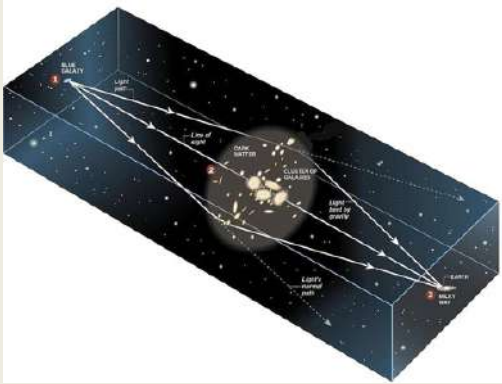
Observation par eROSITA de l'émission X du gaz chaud



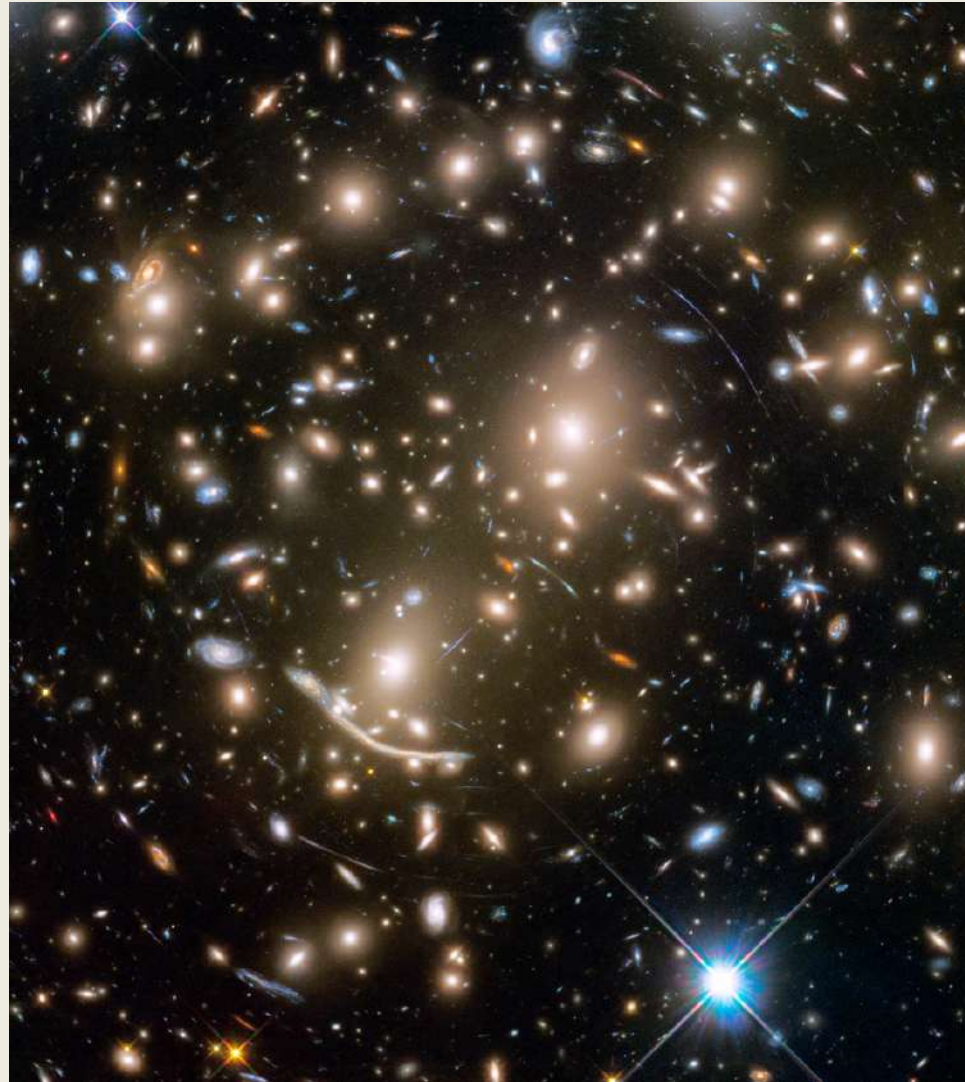
Idem simulations

Idem eROSITA mais couleurs permettant de faire ressortir les régions moins denses. Filaments reliant plusieurs systèmes

Cartographie de la masse manquante – Lentilles gravitationnelles



(leçon 20231010 SP)



Statistique des déformations des images des galaxies se trouvant en arrière plan de l'amas

→ Cartographie de la matière noire

Galaxies visibles de Abel 370 :
moins de 5 % de la matière

Abel 370
(Soucail *et al.* 1987)
HST
[Crédit: NASA, ESA, J.Lotz and HFF team](#)

Reconstruction de la distribution de matière noire dans les amas de galaxies

Abell 901/902 (centaines de galaxies) – Weak gravitational lensing (leçon 20231121 SP)

A partir de la distorsion de la « forme » des $\sim 60'000$ galaxies en arrière plan du superamas

→ Cartographie de la matière noire: 4 « clumps » de matière noire autour des amas de galaxies principaux



Credit for the Hubble images: NASA, ESA, Heymans, Gray, Barden, and the STAGES collaboration

Credit for the ground-based image: ESO, Wolf and the COMBO-17 collaboration

Formation des grandes structures
Matière noire
(II)

Conséquences pour la cosmologie

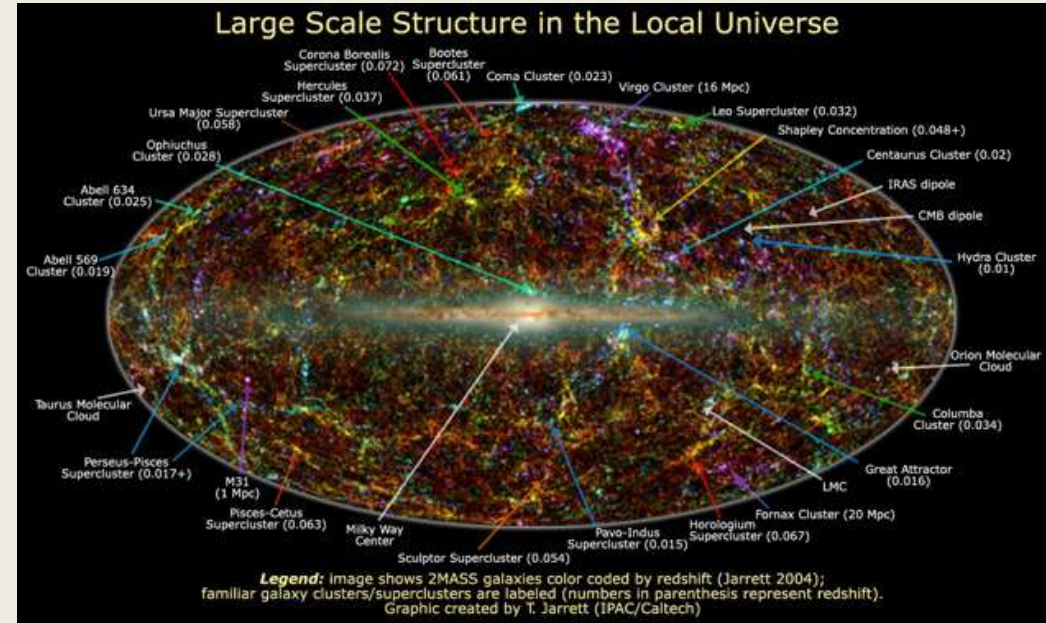
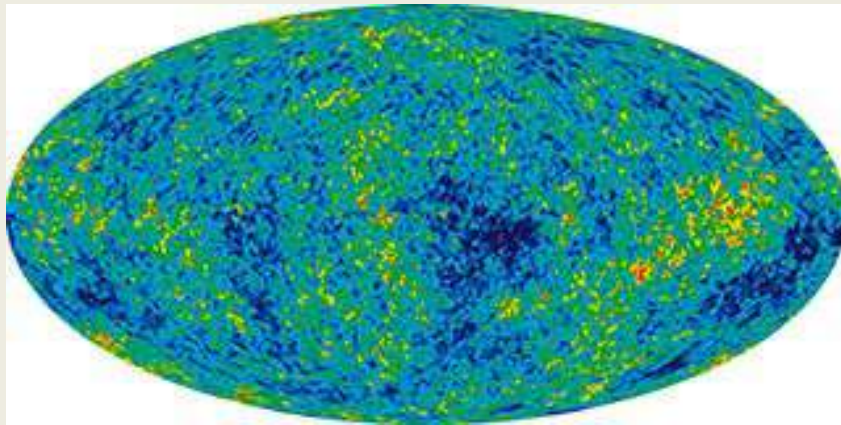
Des anisotropies dans le fonds diffus cosmologique à la formation des grandes structures

Anisotropies de température et de densité
 Contraste en densité δ

(leçon 20231031 CC)

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

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 noire ni énergie noire.**

(leçon 20231114 CB)

Physique et simulations numériques: Formation hiérarchique

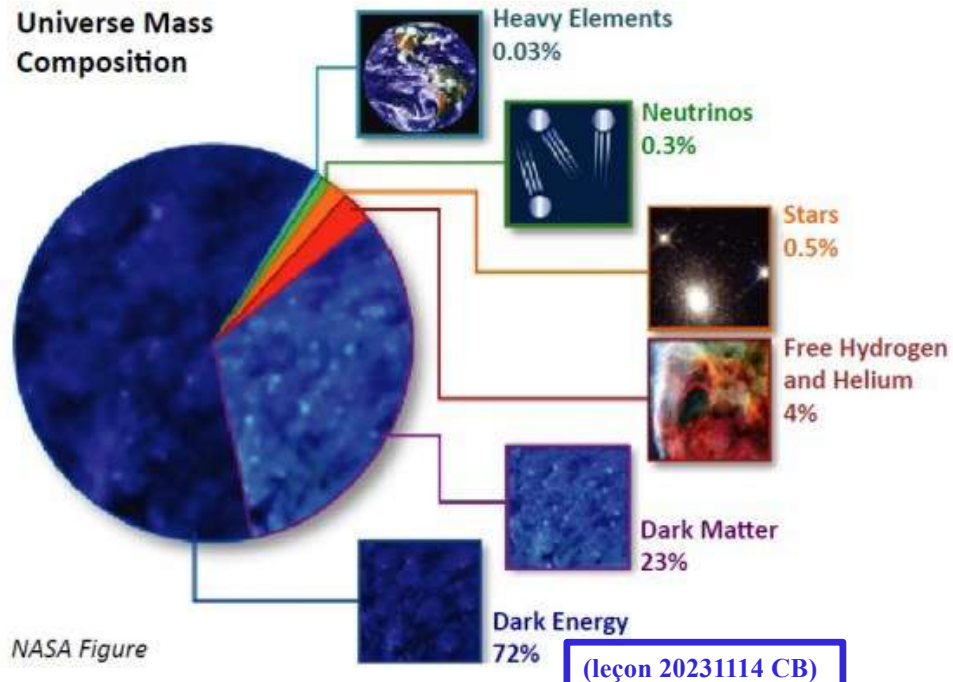
La matière noire forme des halos à $z \sim 4000$ (car elle n'interagit pas avec les photons) dont la masse croît avec le temps (essentiellement par fusion).
 Les baryons ne peuvent se condenser qu'à la recombinaison à $z \sim 1000$ et « suivent » les halos de matière noire.

Formation hiérarchique Cold Dark Matter

Matière noire « froide »:

- se déplace lentement par rapport à la vitesse de la lumière (particules plus massives, non relativistes)
 - Formation hiérarchique des plus petites aux plus grandes structures
 - interagit faiblement avec la matière baryonique et le rayonnement électromagnétique
- Peebles (1982), Bond et al. (1982), Blumenthal et al. (1982, 1984)
Candidats : WIMPS (Weakly Interacting Massive Particles)

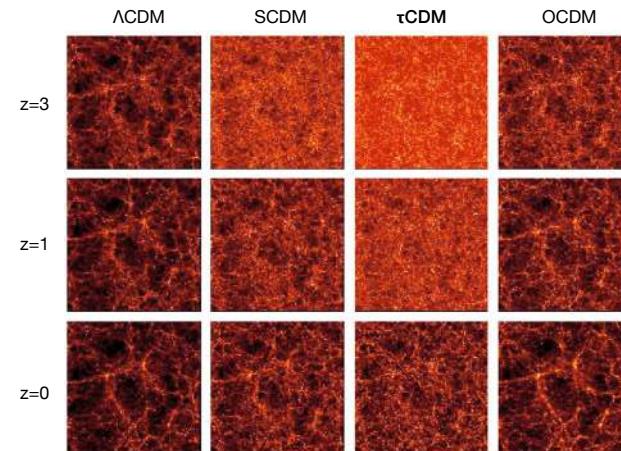
Prédictions de différents modèles d'univers



Λ CDM

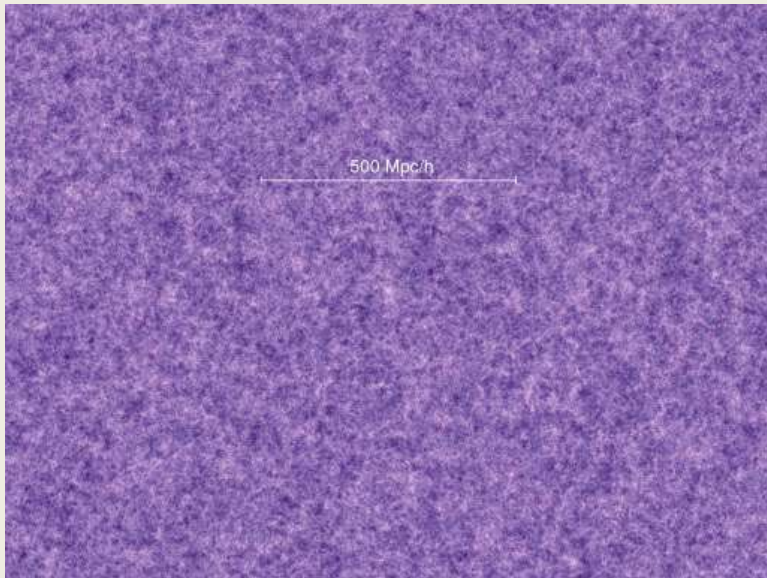
~ 75 % de la densité d'énergie : Dark Energy

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



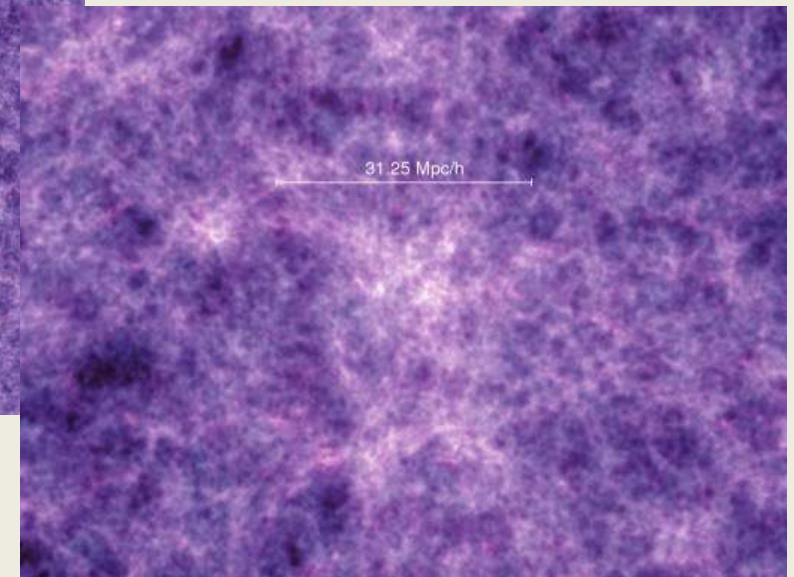
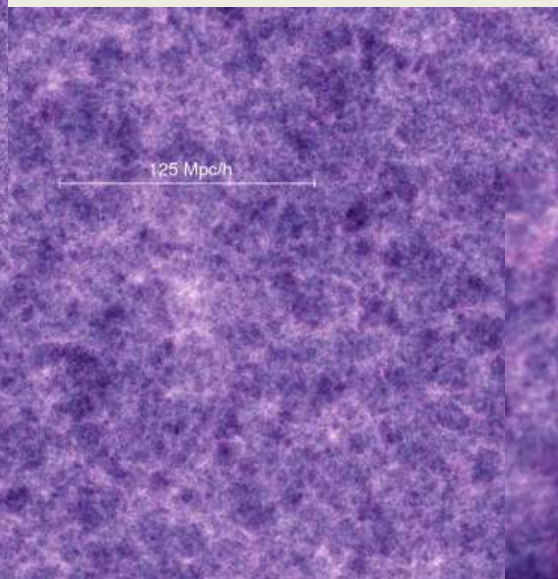
Virgo simulation suite

The Millenium Simulation Project



Conditions initiales: Fluctuations de densité du fonds diffus cosmologique
Evolution suivant les lois de la physique pour **Lambda Cold Dark Matter Model**.

→ Distribution de la matière noire à $z = 18.3$ (0.21 milliard d'années après Big Bang)



10 milliards de particules dans un cube de $2 \times 2 \times 2$ milliards d'années lumière

Simulations à N-corps

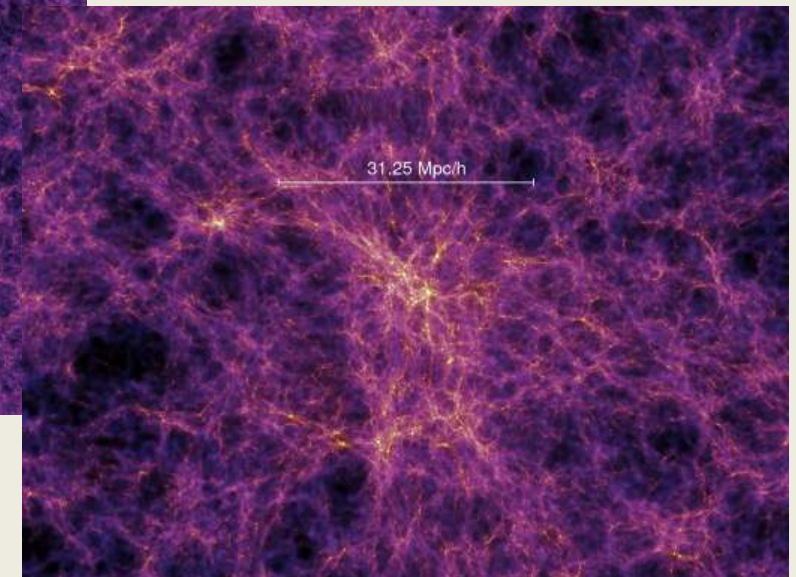
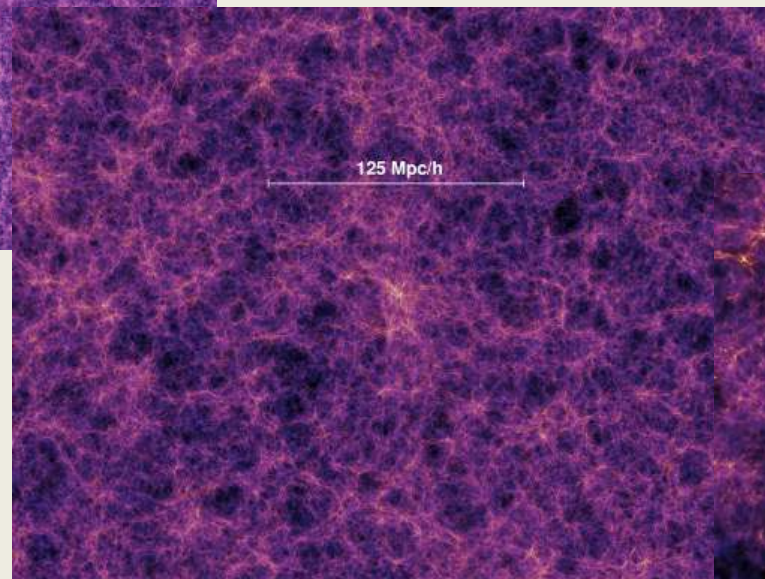
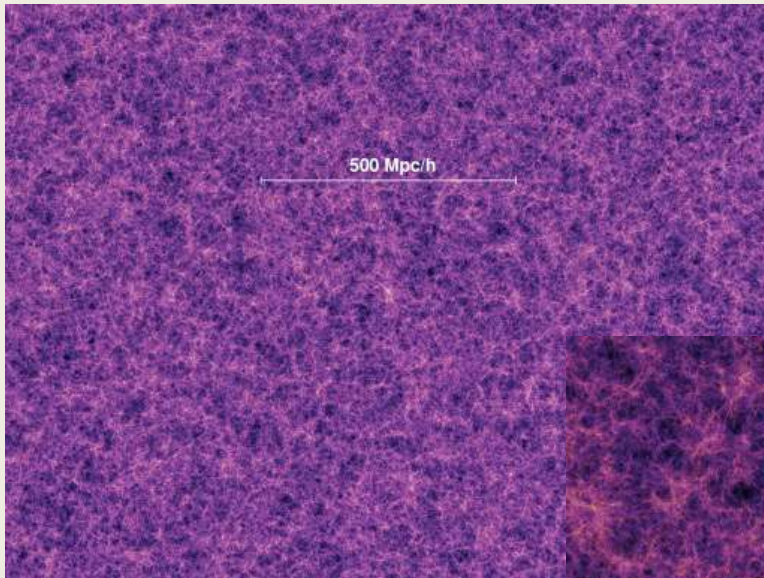
Springel et al. (2005 *Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars*) <https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

The Millenium Simulation Project

Distribution de la matière noire à $z = 5.7$ (1 milliard d'années après Big Bang)

Chacun des grumeaux initiaux attire la matière autour de lui.

La matière subit en même temps l'attraction de tous les grumeaux qui l'entourent; plus forte attraction avec les plus proches → Tiraillements → Concentration de la matière dans des plans formant les contours des grands vides de la toile cosmique. À l'intersection de ces plans, la matière se concentre plus et forme les filaments de la toile cosmique.



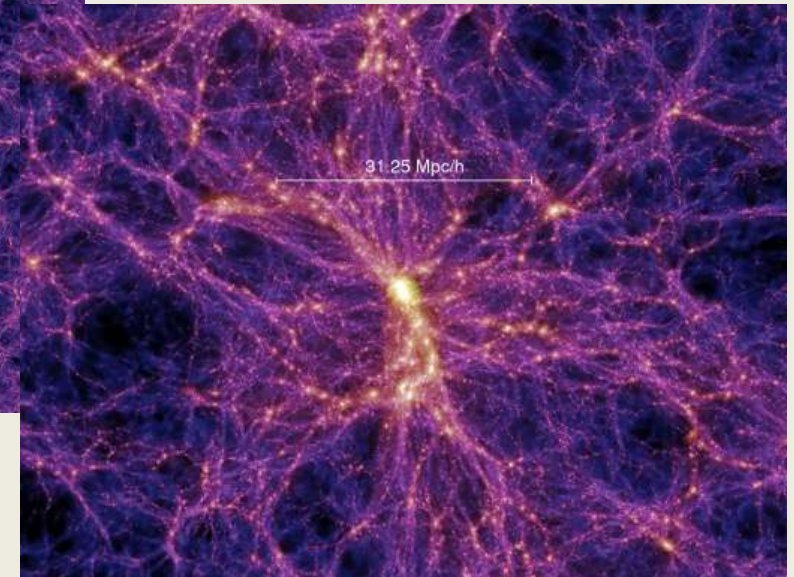
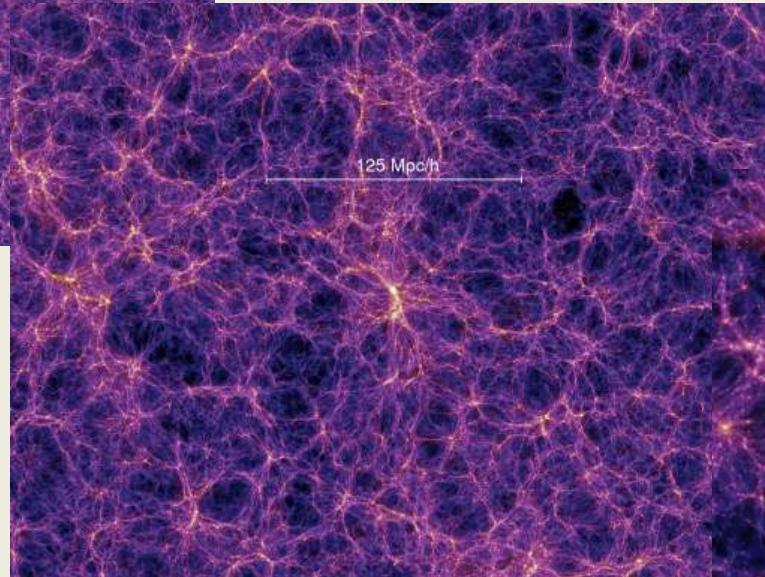
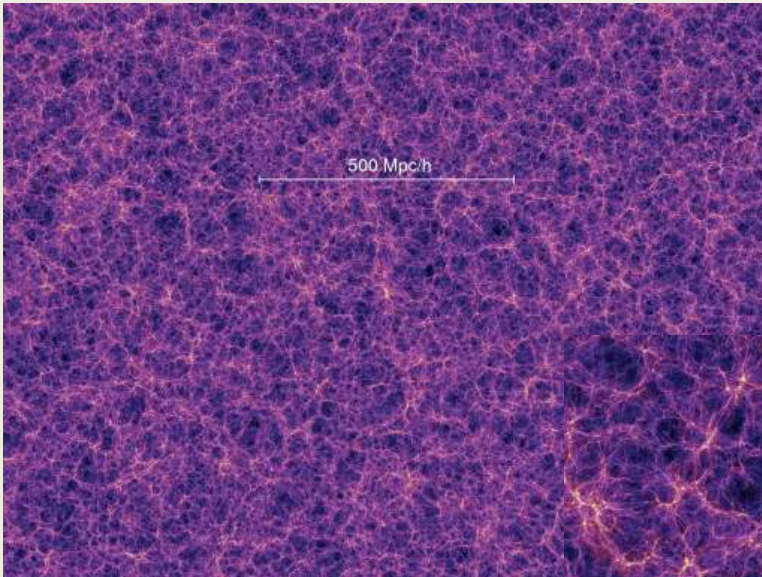
10 milliards de particules dans un cube de $2 \times 2 \times 2$ milliards d'années lumière

Simulations à N-corps

Springel et al. (2005 *Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars*) <https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

The Millenium Simulation Project

Distribution de la matière noire à $z = 4.7$ (1 milliard d'années après Big Bang)

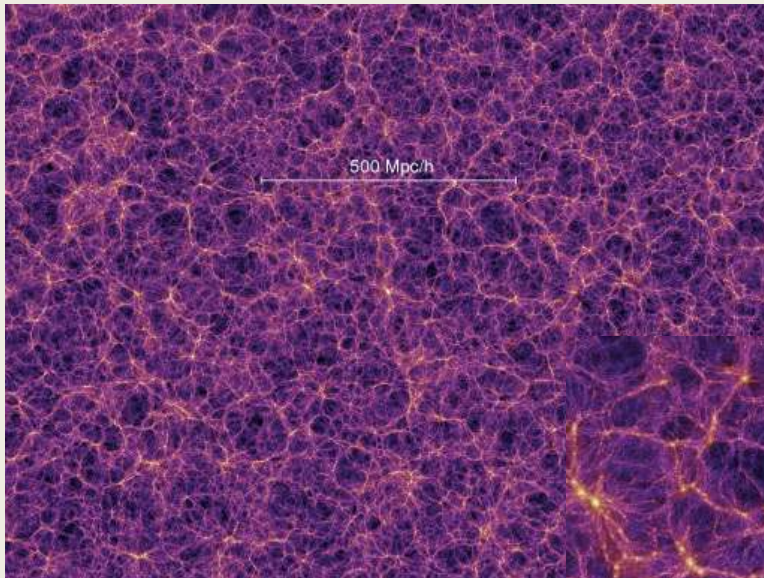


10 milliards de particules dans un cube de $2 \times 2 \times 2$ milliards d'années lumière

Simulations à N-corps

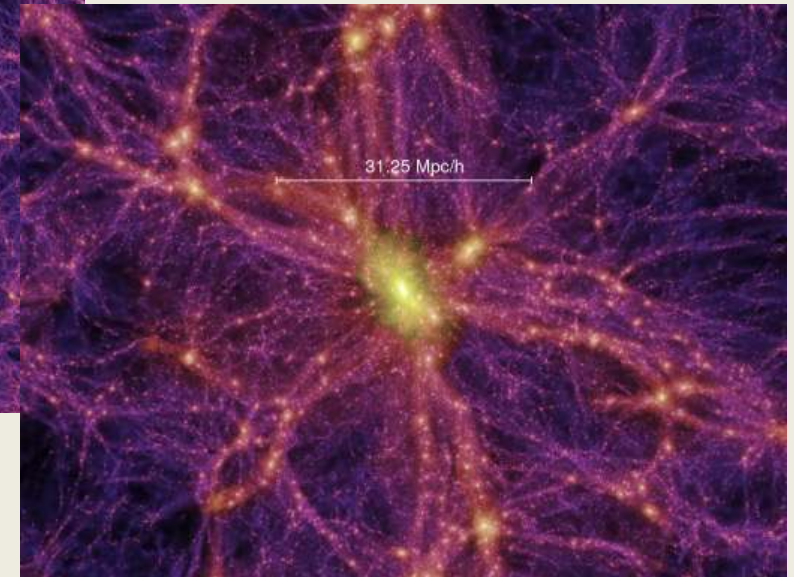
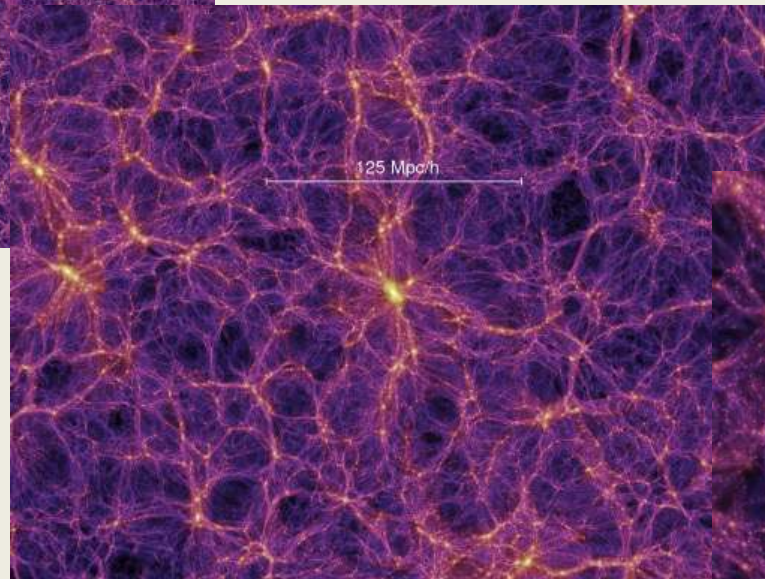
Springel et al. (2005 *Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars*) <https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

The Millenium Simulation Project



Distribution de la matière noire à $z = 0$ (13.6 milliard d'années après Big Bang)

Les **filaments cosmiques** et les grands vides émergent naturellement sous l'effet de la gravité.

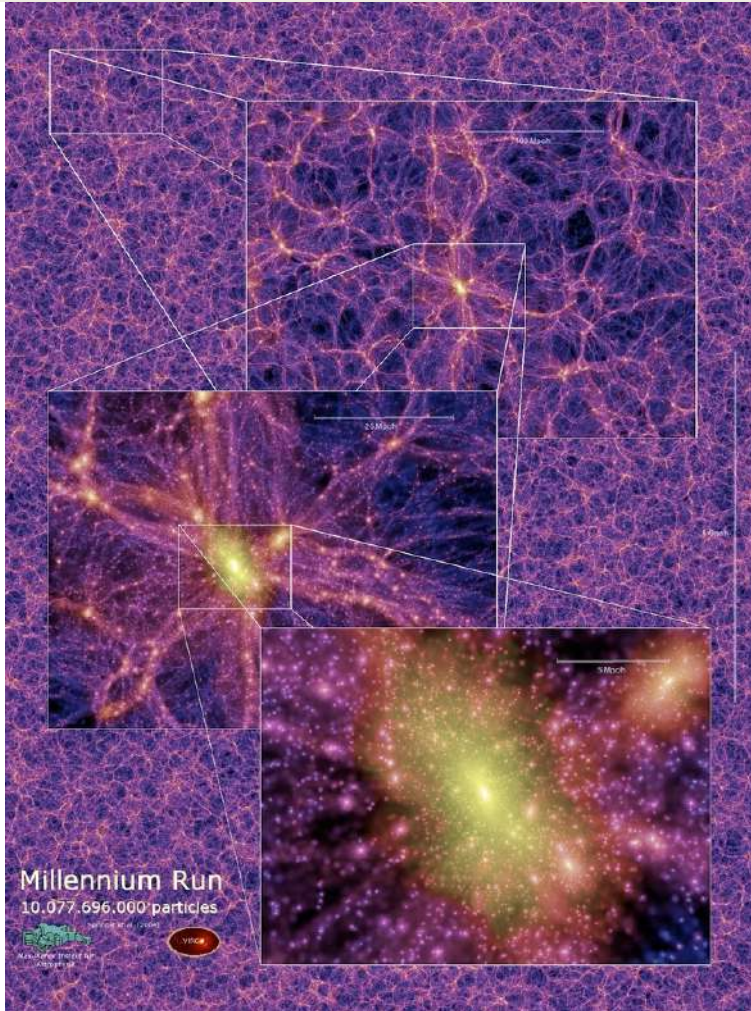


10 milliards de particules dans un cube de $2 \times 2 \times 2$ milliards d'années lumière

Simulations à N-corps

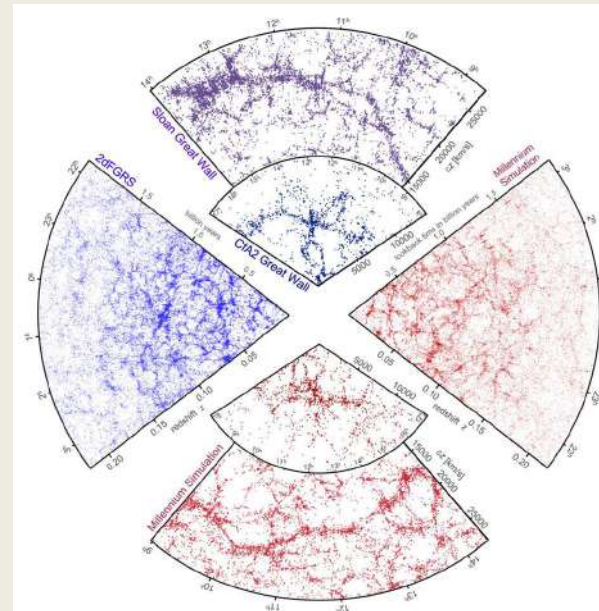
Springel et al. (2005 *Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars*) <https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

The Millenium Simulation Project



Distribution de la densité matière noire à $z = 0$ pour une « tranche » d'univers épaisse de 15 Mpc/h
Chaque coupe suivante réduit la taille d'un facteur 4.

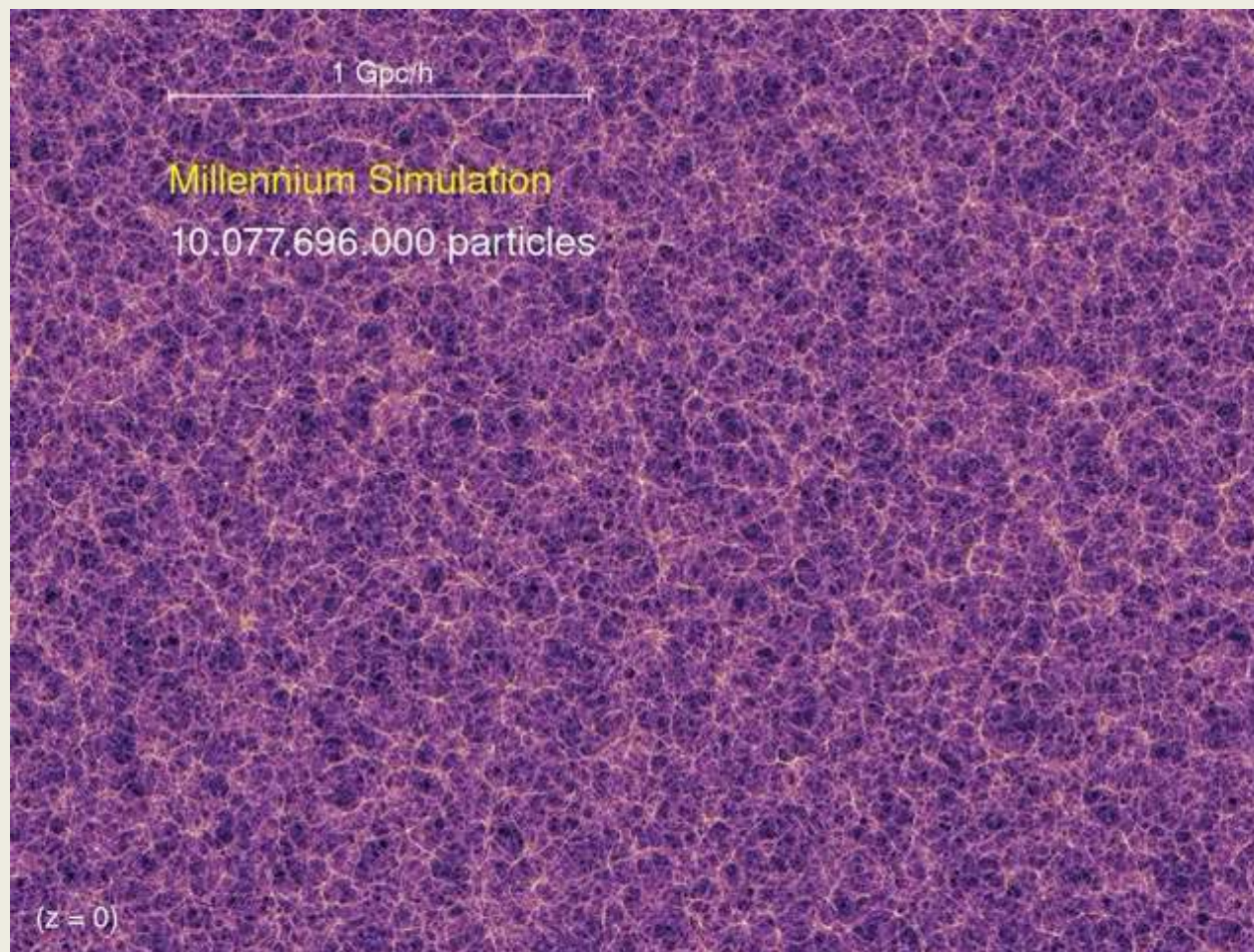
Les **filaments cosmiques** et les grands vides émergent naturellement sous l'effet de la gravité.



Distribution non-homogène et non-aléatoire des galaxies le long de filaments/feuilletts entourant des vides cosmiques de taille typique ~ 100 Mpc.

Distribution de la matière noire à $z = 0$ (13.6 milliard d'années après Big Bang)
de plusieurs Gpc à ~ 10 kpc

The Millenium Simulation Project



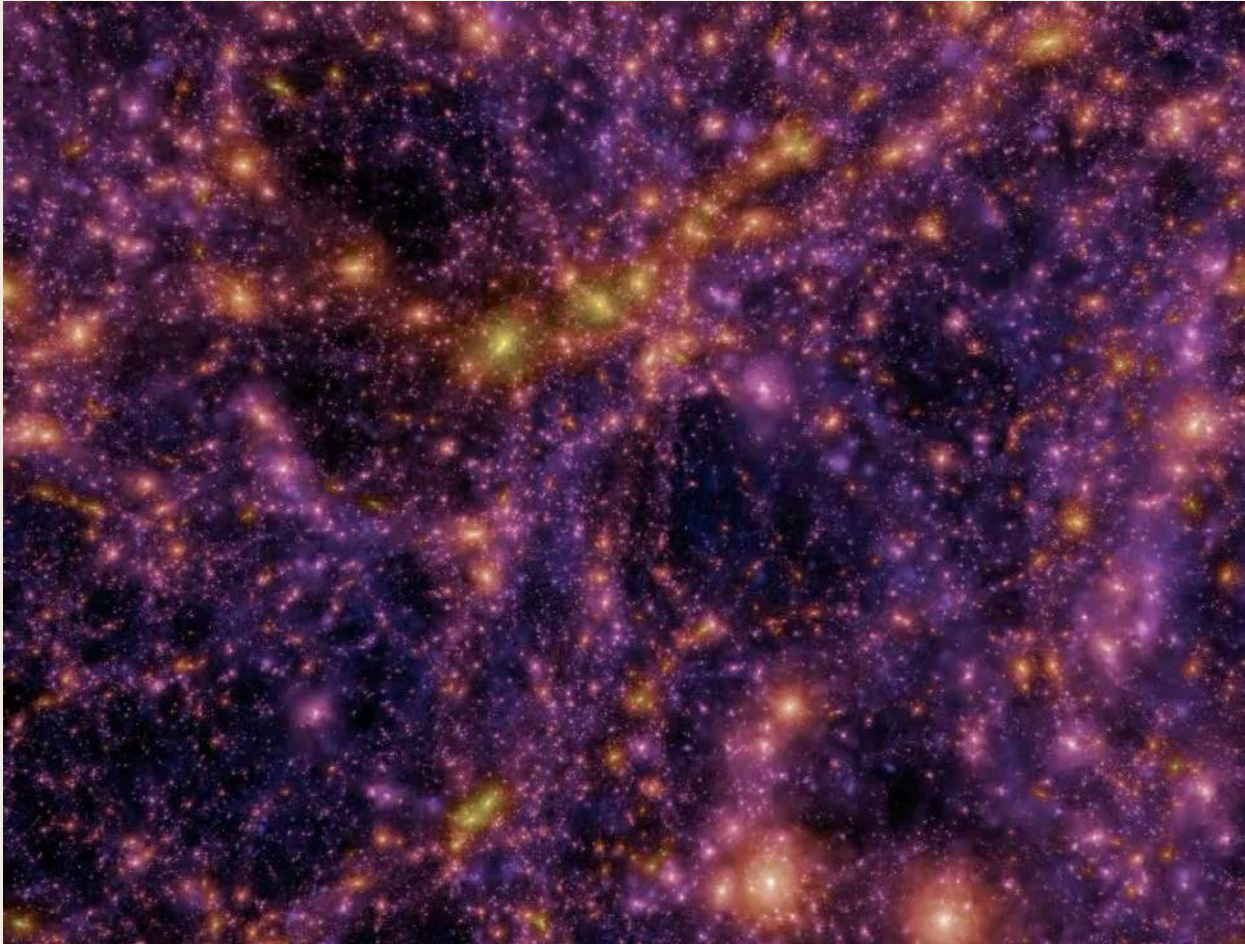
10 milliards de particules dans un cube de $2 \times 2 \times 2$ milliards d'années lumière)

Simulations à N-corps

Springel et al. (2005 *Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars*) <https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

Voyage à travers la portion d'univers simulée, distance parcourue ~ 2.4 milliards d'années lumière

The Millenium Simulation Project



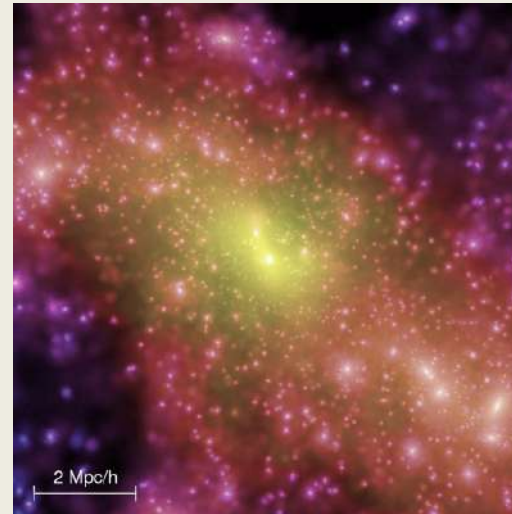
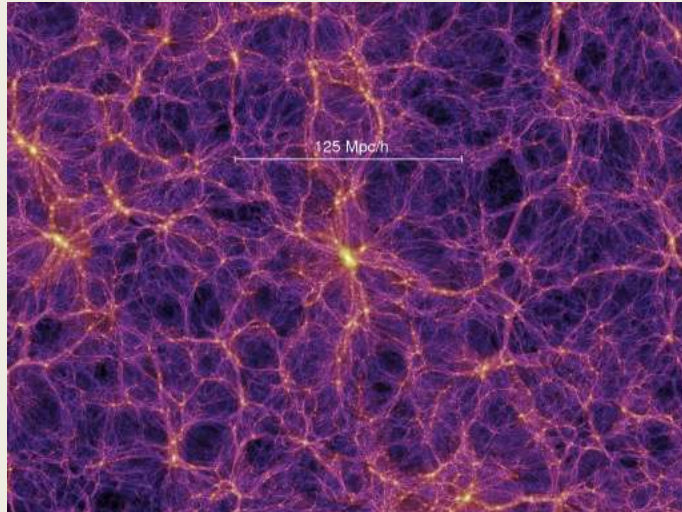
10 milliards de particules dans un cube de 2 x 2 x 2 milliards d'années lumière

Simulations à N-corps

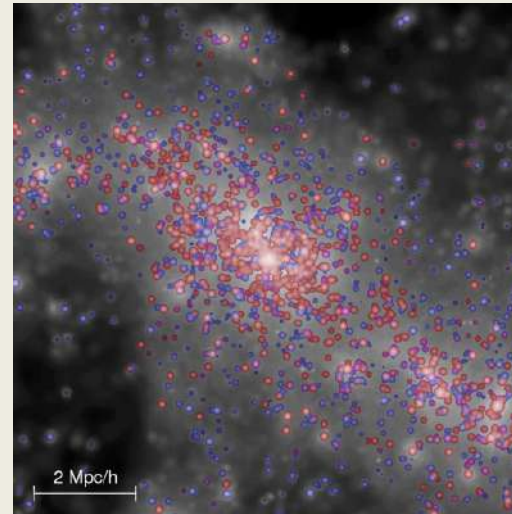
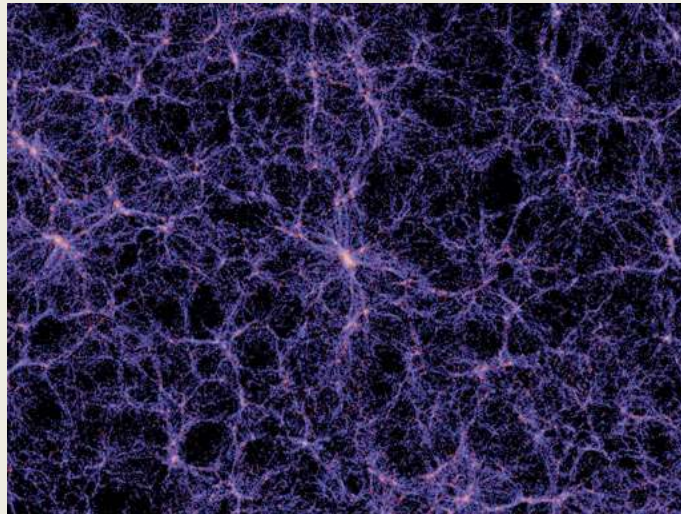
Springel et al. (2005 *Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars*) <https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

The Millenium Simulation Project

Distribution de la matière noire

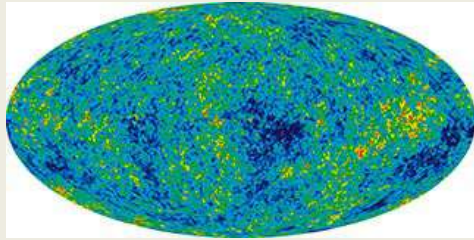


Distribution des galaxies



La matière baryonique suit le potentiel dominé par la matière sombre.

Formation hiérarchique Cold Dark Matter



Anisotropies du fluide primordial révélées
par les anisotropies du fonds diffus cosmologique

→ **Germes pour la formation des grandes structures de matière noire non baryonique**

« Two stage theory » pour la formation des galaxies (White & Rees 1978)

- 1) Les halos de matière noire se forment en premier (toile cosmique)
- 2) Les propriétés des galaxies sont déterminées par le refroidissement et la condensation du gaz dans le puits de potentiel des halos.

Toile cosmique

Description statistique de l'histoire de l'évolution des halos de matière noire → DM Halo Merger Tree

Les **petites** structures (mini halos de matière noire) se forment en premier

($z \sim 4000$ car la matière noire froide n'interagit pas avec les photons),

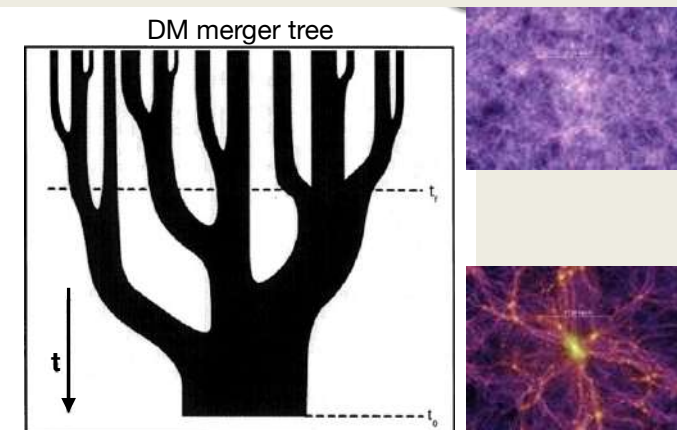
puis les plus **grandes** (halos de matière noire) se forment par **fusions successives et accrétion**.

→ Germes pour la formation des premières étoiles et des premières galaxies

« **Facile** » à modéliser : **seulement la gravitation**

Régions découplées de l'expansion lorsque la densité de la structure est $2 \times$ densité moyenne

Croissance trop lente sans la matière noire: **Nécessite ~ 30 % de matière noire**



Lacey & Cole (1993)

La taille des « racines/branches » est
proportionnelle à la masse des halos qui fusionnent
Simulations Monte-Carlo

Merger tree d'un halo de la taille d'un amas de galaxies
 Simulations N-corps

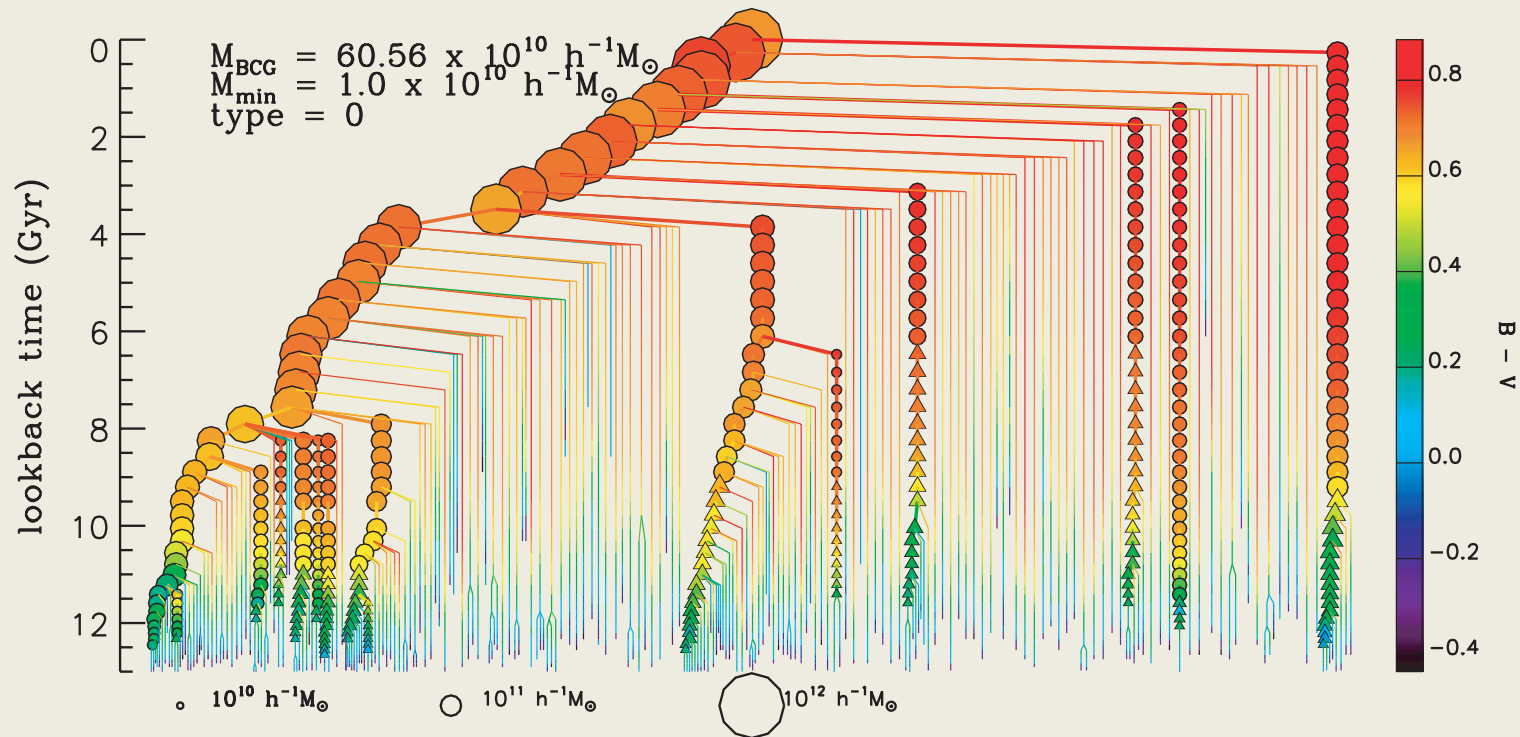
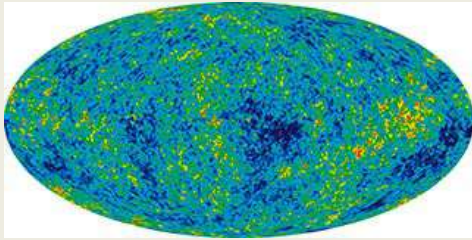


Figure 1. BCG merger tree. Symbols are colour-coded as a function of $B - V$ colour and their area scales with the stellar mass. Only progenitors more massive than $10^{10} M_{\odot} h^{-1}$ are shown with symbols. Circles are used for galaxies that reside in the FOF group inhabited by the main branch. Triangles show galaxies that have not yet joined this FOF group.

Formation hiérarchique Cold Dark Matter

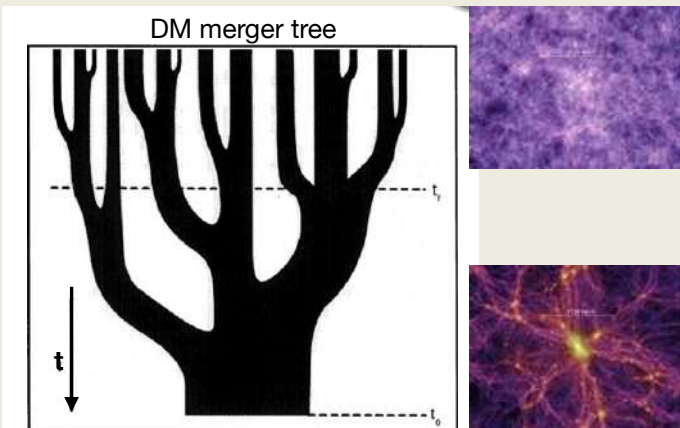


Anisotropies du fluide primordial révélées
par les anisotropies du fond diffus cosmologique

→ **Germes pour la formation des grandes structures de matière noire non baryonique**

« Two stage theory » pour la formation des galaxies (White & Rees 1978)

- 1) Les halos de matière noire se forment en premier (toile cosmique)
- 2) Les propriétés des galaxies sont déterminées par le refroidissement et la condensation du gaz dans le puits de potentiel des halos.



Toile cosmique

Description statistique de l'histoire de l'évolution des halos de matière noire → DM Halo Merger Tree

Les **petites** structures (mini halos de matière noire) se forment en premier

($z \sim 4000$ car la matière noire froide n'interagit pas avec les photons),

puis les plus **grandes** (halos de matière noire) se forment par **fusions successives et accrétion**.

→ Germes pour la formation des premières étoiles et des premières galaxies

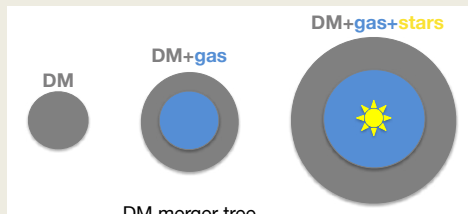
« **Facile** » à modéliser : **seulement la gravitation**

Régions découplées de l'expansion lorsque la densité de la structure est $2 \times$ densité moyenne

Croissance trop lente sans la matière noire: **Nécessite ~ 30 % de matière noire**

Lacey & Cole (1993)

La taille des « racines/branches » est proportionnelle à la masse des halos qui fusionnent
Simulations Monte-Carlo



Fleuves cosmiques

Au fur et à mesure de la croissance des halos de matière noire et après la recombinaison à $z \sim 1000$,

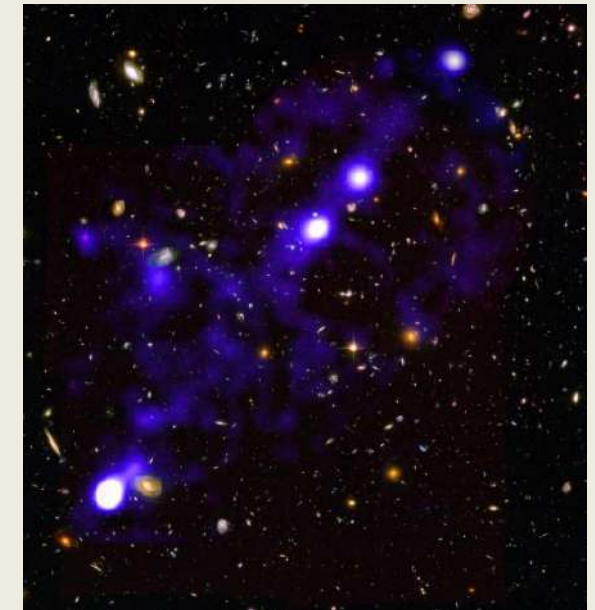
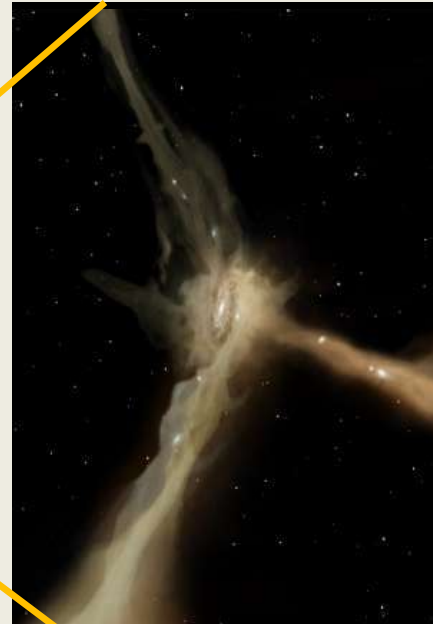
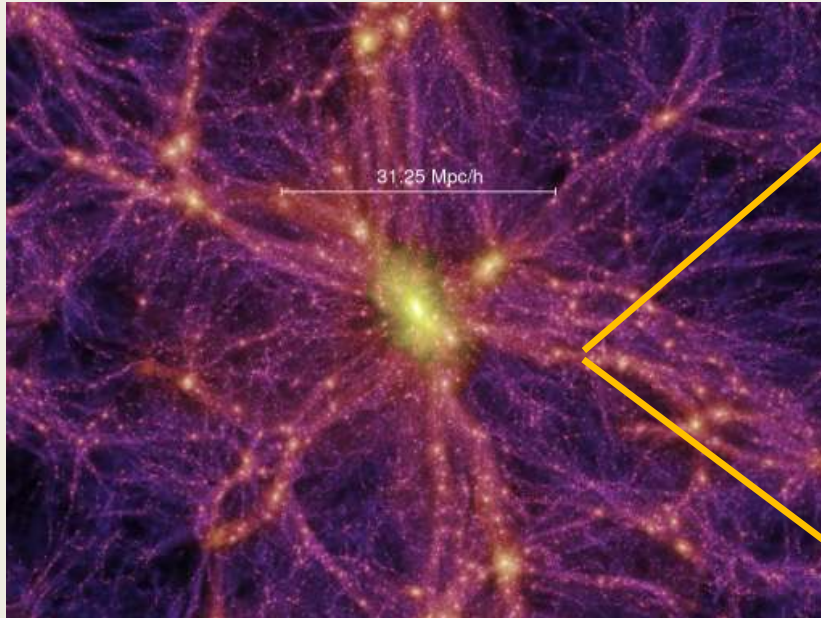
les puits de potentiel des halos de matière noire croissent et attirent les baryons (gaz hydrogène)

à partir duquel vont se former les **premières étoiles** à $z \sim 20 - 30$ (~ 100 à 200 millions d'années)

puis les **premières galaxies** (~ 200 à 500 millions d'années).

Difficile à modéliser, feedback et nombreux autres processus physiques

De la toile cosmique aux fleuves cosmiques engendrant les galaxies



Filaments dans la toile cosmique:

- centaines de millions d'années lumière
- alignements de galaxies

Fleuves cosmiques:

- quelques centaines de milliers d'années lumière
- matière diffuse qui « nourrit » les galaxies individuelles

Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique

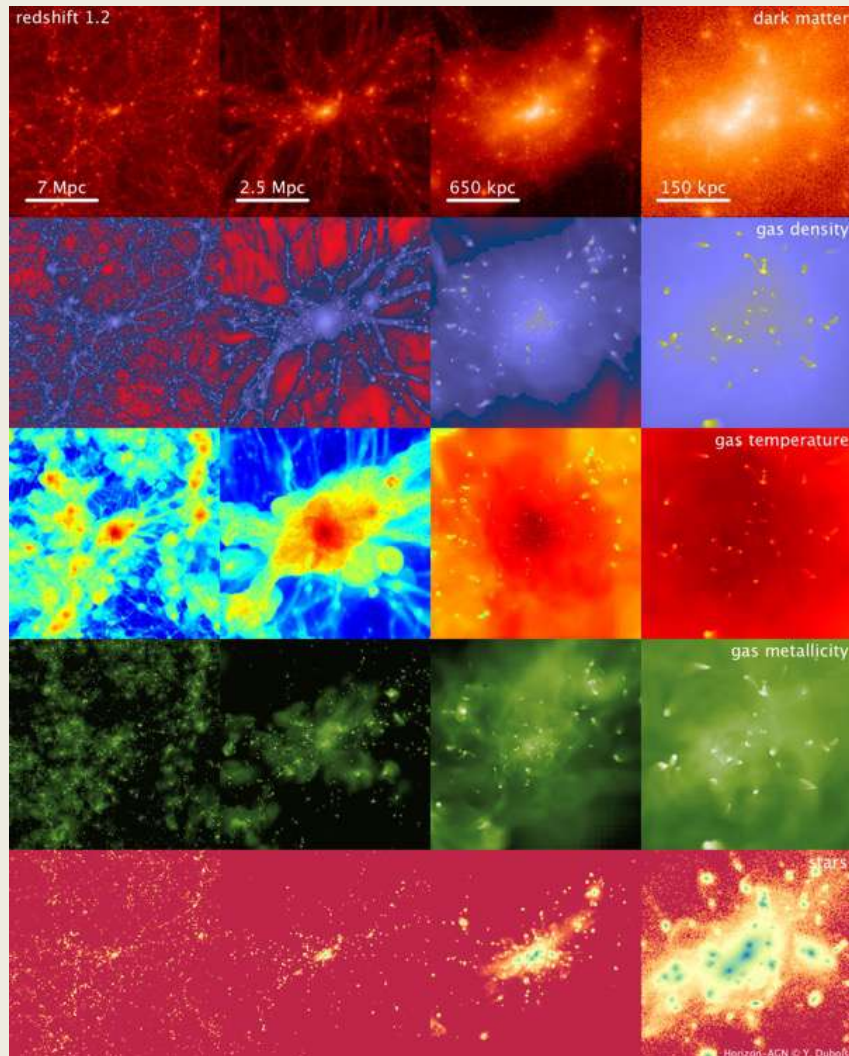
Des cocons d'hydrogène entourent les galaxies

Un des filaments d'hydrogène froid (en bleu) découverts par MUSE@VLT dans le champ ultra-profond de Hubble. Le rayonnement diffus est probablement dû à une population de très nombreuses galaxies naines, trop faiblement lumineuses pour être observées individuellement. Il est situé à 11,5 milliards d'années-lumière et s'étend sur plus de 15 millions d'années-lumière. L'image en arrière plan est celle de HST.

Discovery of diffuse extended Ly α emission from redshift 3.1 to 4.5, tracing cosmic web filaments on scales of 2.5–4 cMpc.

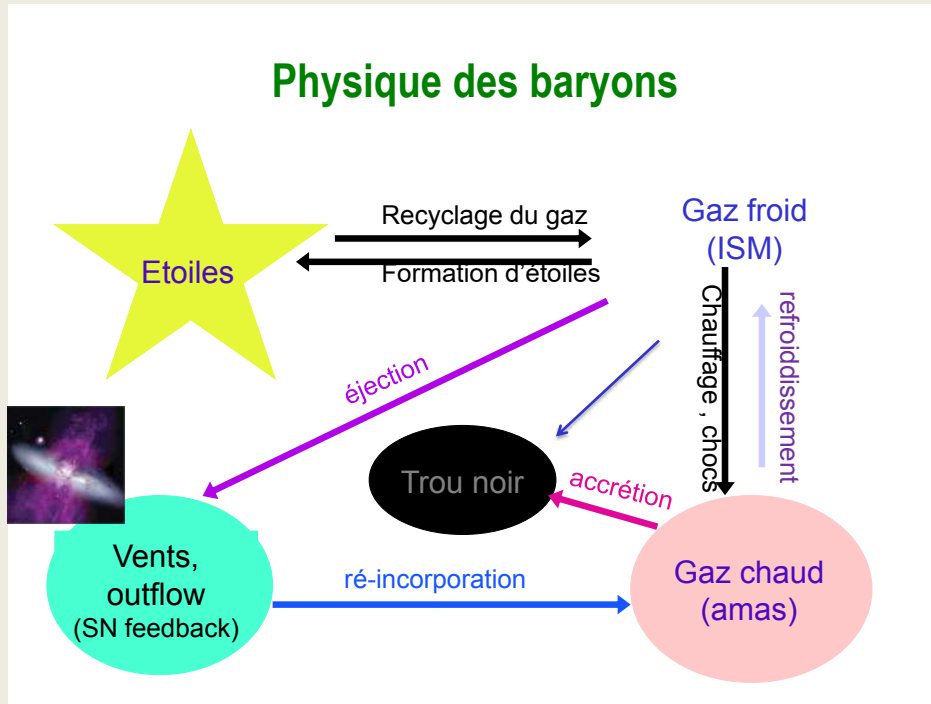
Crédit: Bacon et al. (2021)

De la toile cosmique aux fleuves cosmiques engendrant les galaxies

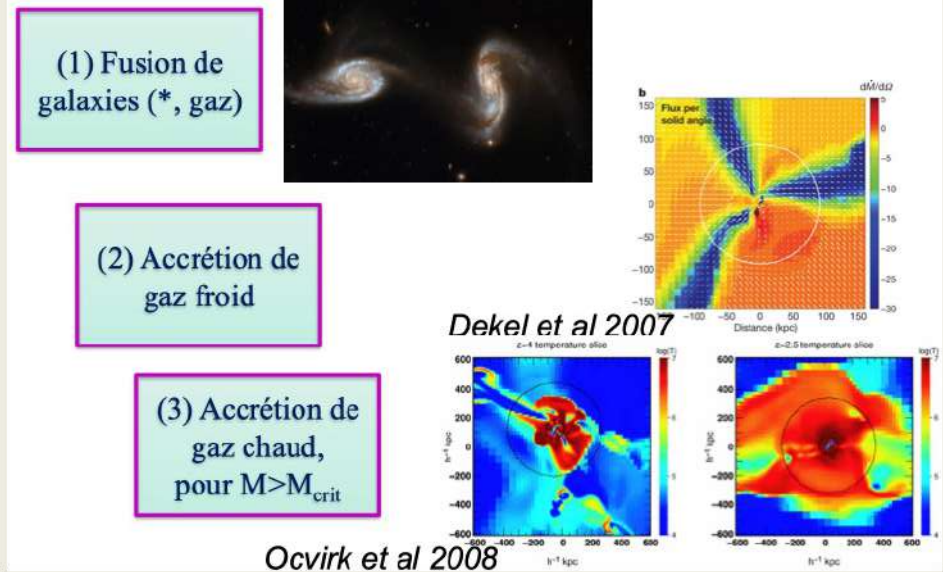


« Dancing in the dark »
L'histoire et la propriété des galaxies dépend
de la position initiale de leurs grumeaux originels

Complexité de la physique baryonique à différentes échelles



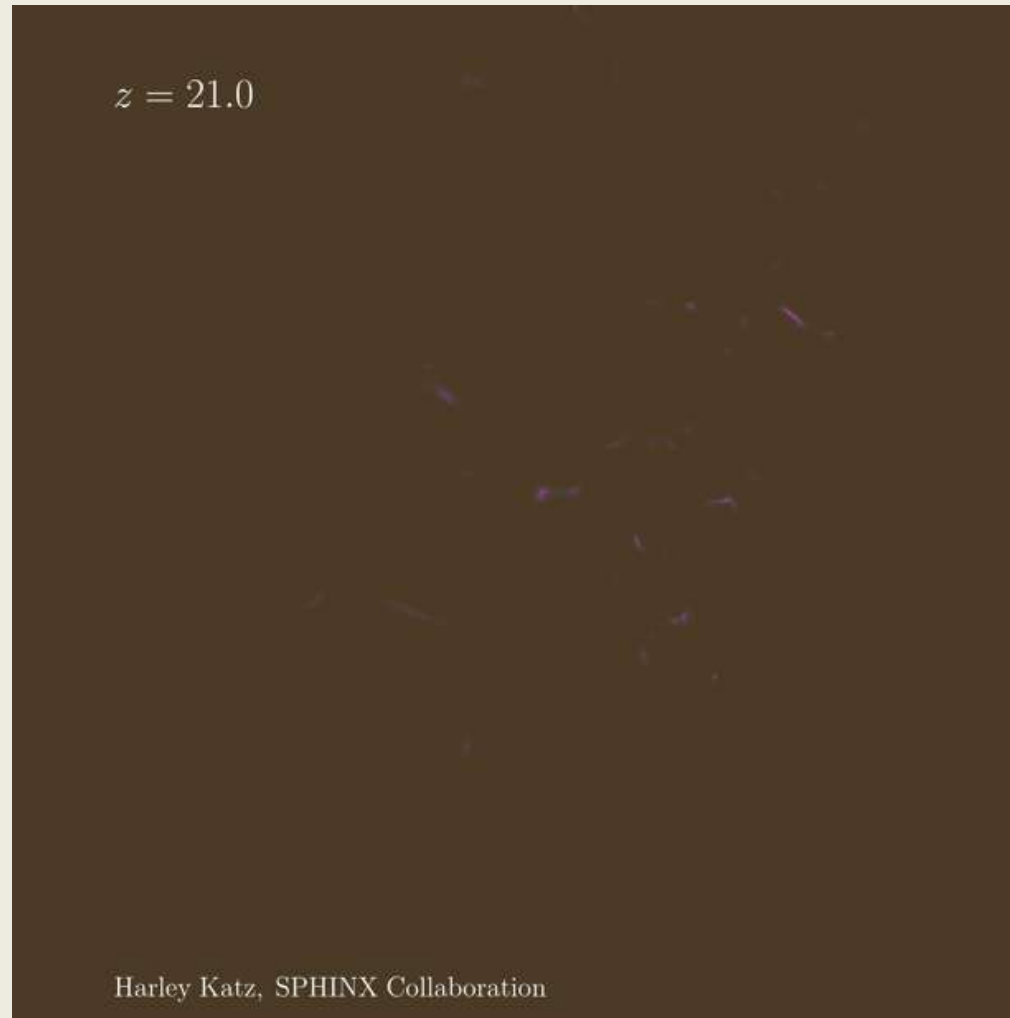
Accrétion de masse par les galaxies



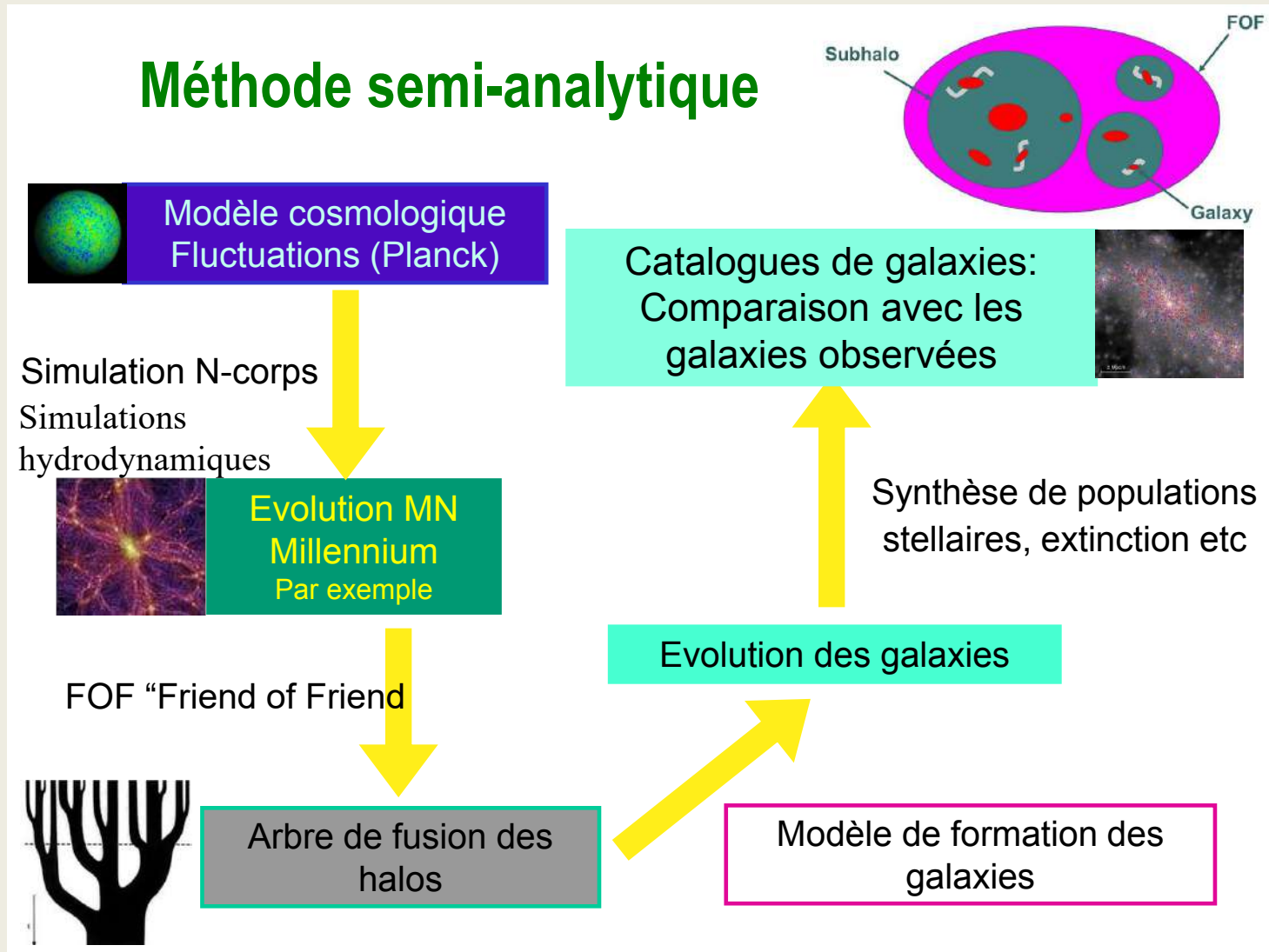
The SPHINX project

Cosmological radiation-hydrodynamical simulations of reionization

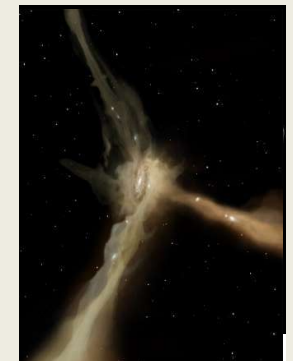
Gros plan sur un groupe de galaxies en évolution.
La fraction d'hydrogène neutre est représentée
par une couleur grise, la densité du gaz est en
violet, le rayonnement ionisant en jaune-rouge,
et les populations stellaires en blanc,
le tout dans le même cadre.



Méthode semi-analytique



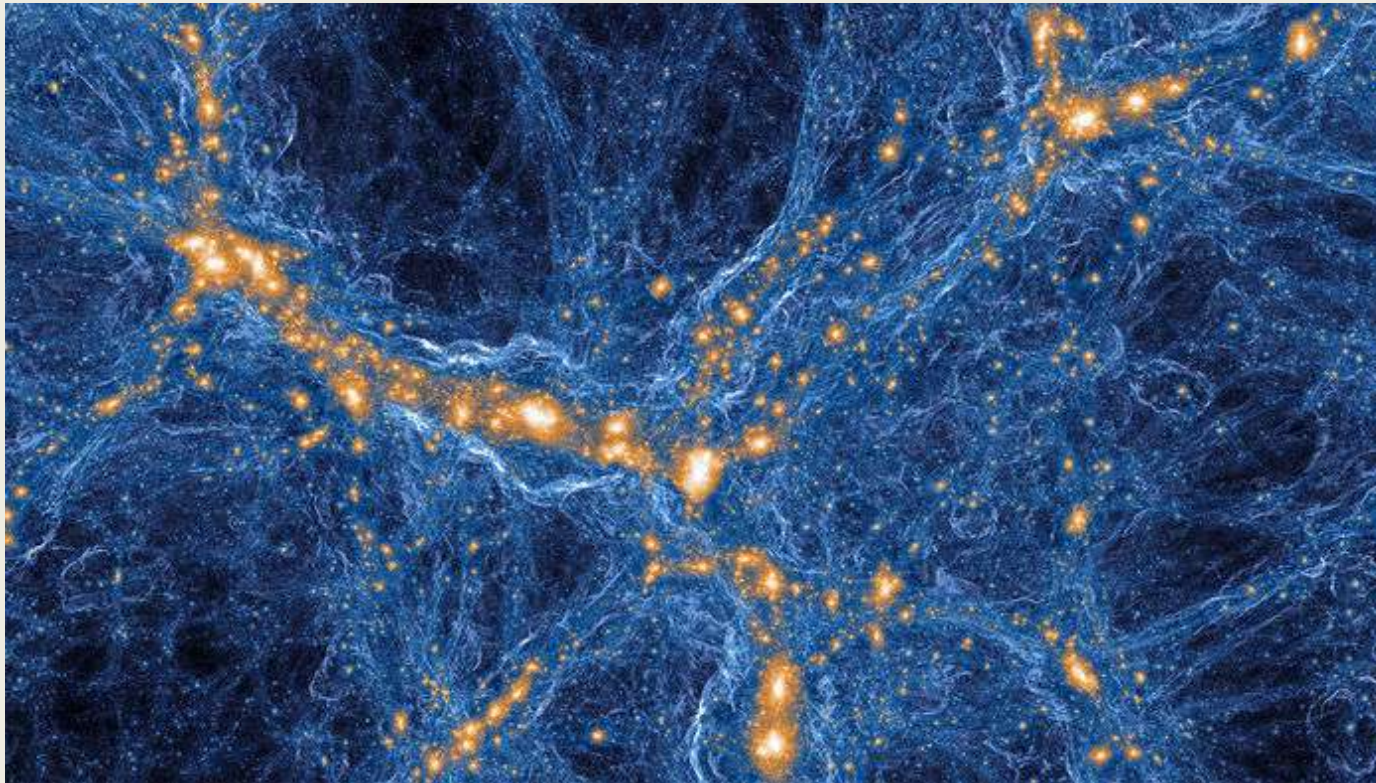
La matière baryonique suit le potentiel dominé par la matière sombre



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

Illustris simulation

Matière noire, gaz, étoiles
Gravité, magnéto-hydrodynamique, rayonnement,
interactions gaz-étoiles, évolution chimique



<http://www.illustris-project.org/>
<http://www.sciencemag.org/news/2018/05/galaxy-simulations-are-last-matching-reality-and-producing-surprising-insights-cosmic>

Film 3

Time evolution of a **10Mpc** (comoving) region within Illustris from the start of the simulation to $z=0$. The movie transitions between the dark matter density field, gas temperature (blue: cold, green: warm: white: hot), and gas metallicity.

Le premier milliard d'années de l'Univers



Loeb, Science 2006

← 400'000 ans: ($z \sim 1100$)
Fonds cosmologique diffus

“Ages sombres”

← 100-200 millions ans: ($z \sim 20-30$)
Les premières étoiles se forment

Pas de « théorie » complète
Nombreux processus physiques
Simulations

Observations (HST, JWST)

(leçon 20231128 CC)

← 200-500 millions ans: ($z \sim 10-20$)
Les premières galaxies se forment

← Pendant 13 milliards ans:
Formation des galaxies actuelles



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES
Département d'astronomie

Cosmologie

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

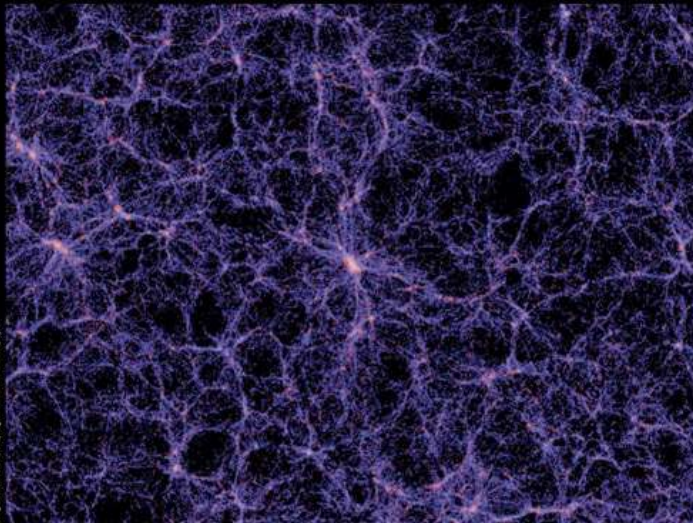


Image : OMBL MPA, V. Springel/Massachusetts Institute of Technology

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 – 14 novembre 2023

Energie noire
Prof.e Camille Bonvin

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES
16^{èmes} conférences publiques d'astronomie
UNIGE-EPFL année 2023
EPFL

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

euclid
EXPLORING THE DARK UNIVERSE

ESA

Mercredi 15 novembre 2023 à 19h00
Auditoire C01 EPFL
Ecublens/Lausanne

Judi 16 novembre 2023 à 19h00
Salle U300 Auditoire Roullier
Uni-Dufour Genève

Entrée libre

Cours 9 – 21 novembre 2023

Sondes cosmologiques
Prof. Stéphane Paltani

Cours 10 – 28 novembre 2023
Les premières galaxies vues par JWST
CC