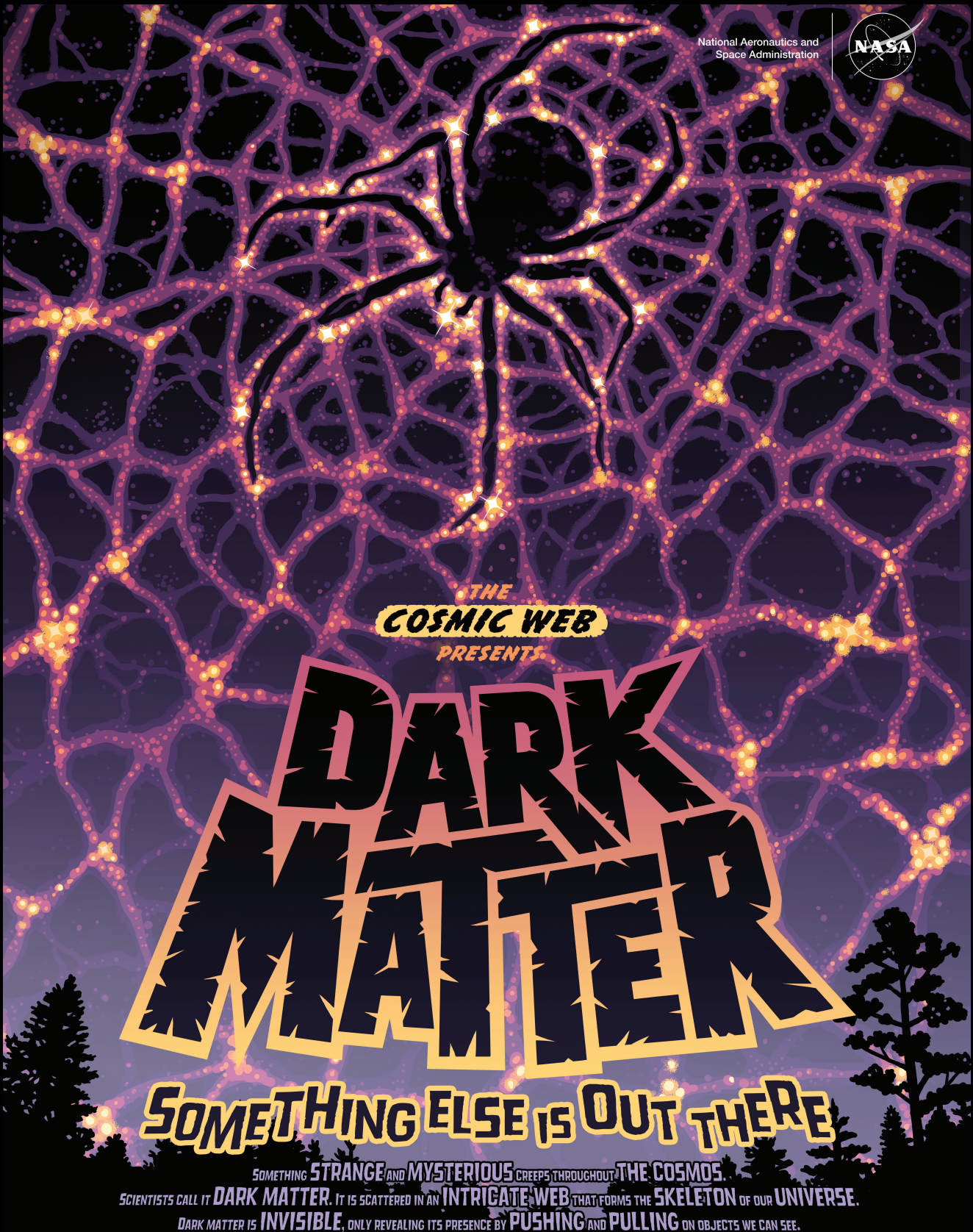


Matière noire : mirage ou réalité ?



Matière noire : mirage ou réalité ?

Cours 1 (10/01/23) : Peser l'Univers grâce à la loi de la gravitation

- Modéliser le mouvement des astres : Ptolémée, Copernic, Newton, Einstein
- Mesurer la masse de la Terre et du Soleil
- Découvrir l'invisible: Neptune, les exoplanètes, le trou noir central de notre Galaxie

Cours 2 (17/01/23) : Le problème de la masse manquante : la matière noire

- La galaxie d'Andromède à différentes longueurs d'onde : le visible et l'invisible
- Les différents types de galaxies
- Les courbes de rotation des galaxies et la matière noire

Cours 3 (24/01/23) : La nature de la matière noire

- Les différentes indications en faveur de la matière noire
- A la recherche de la masse manquante : gaz, MACHOs, trous noirs, neutrinos, WIMPS, etc.
- Le fond diffus cosmologique, la nucléosynthèse primordiale et l'expansion de l'Univers
- Le modèle cosmologique actuel

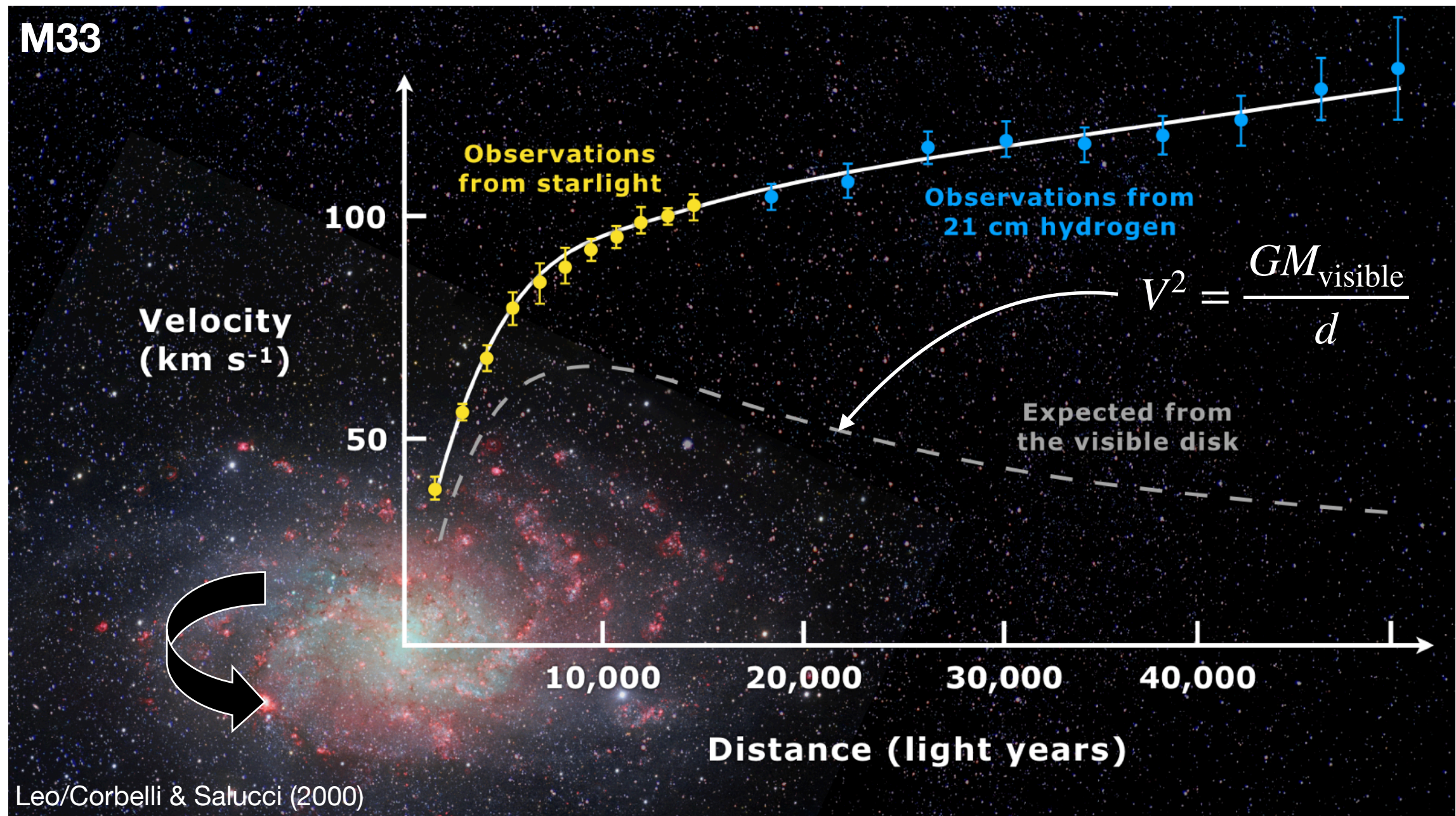
Cours 4 (31/01/23) : Formation & évolution des galaxies : succès et défis du modèle cosmologique actuel

- Le scénario hiérarchique de formation des galaxies
- La toile cosmique et les halos de matière noire
- La formation des étoiles et les phénomènes de rétroaction
- La non-détection des particules de matière noire
- Les problèmes à l'échelle des galaxies
- L'énergie noire et la constante de Hubble

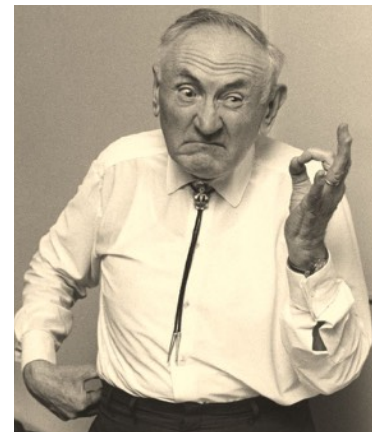
Cours 5 (07/02/23) : Les alternatives à la matière noire froide

- Résoudre une partie des problèmes grâce aux phénomènes de rétroaction
- Les autres types de matière noire : chaude, tiède, floue, interagissant avec elle-même
- La gravité modifiée

Indications en faveur de la matière noire : les courbes de rotation des galaxies



Fritz Zwicky, Vera Rubin & Albert Bosma



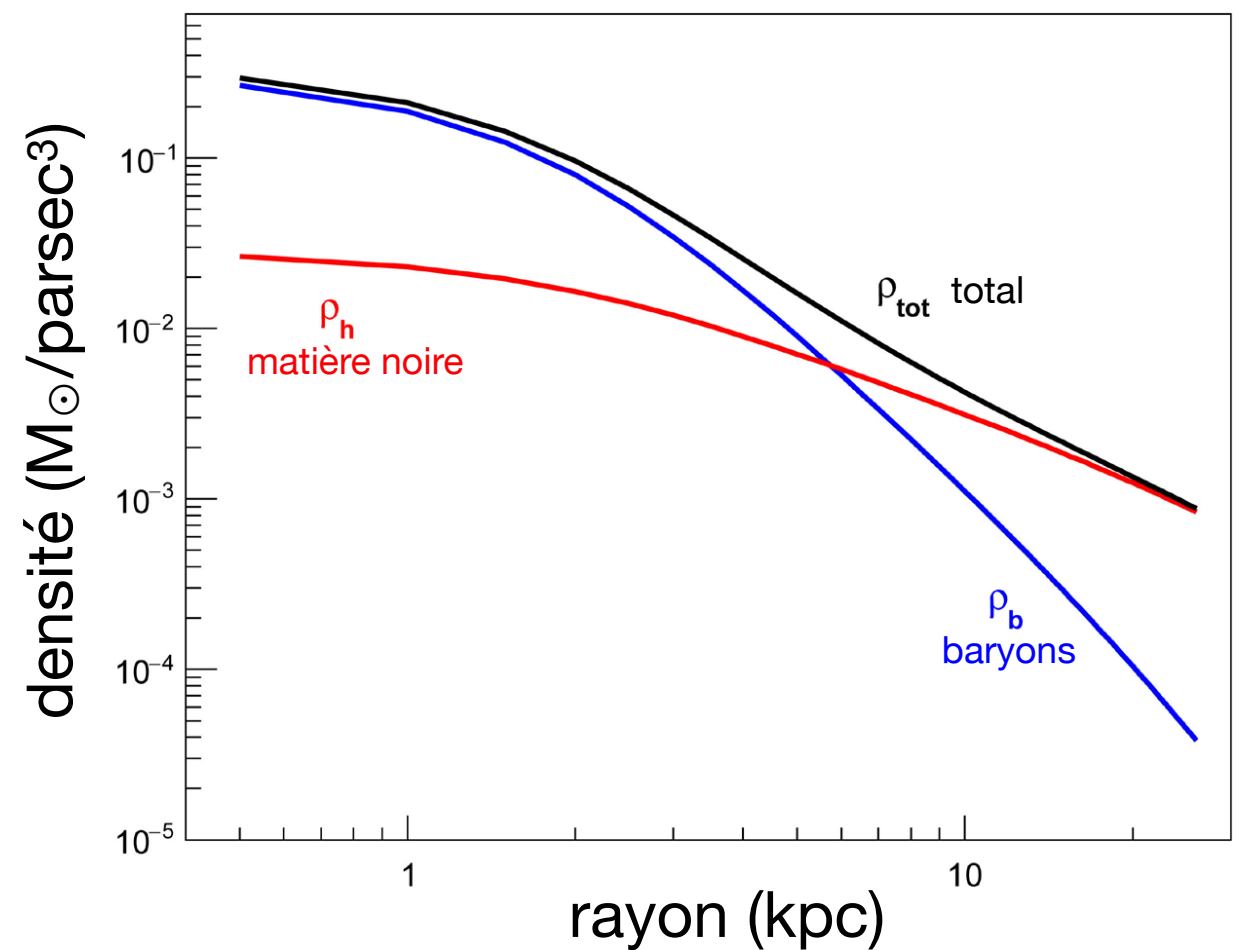
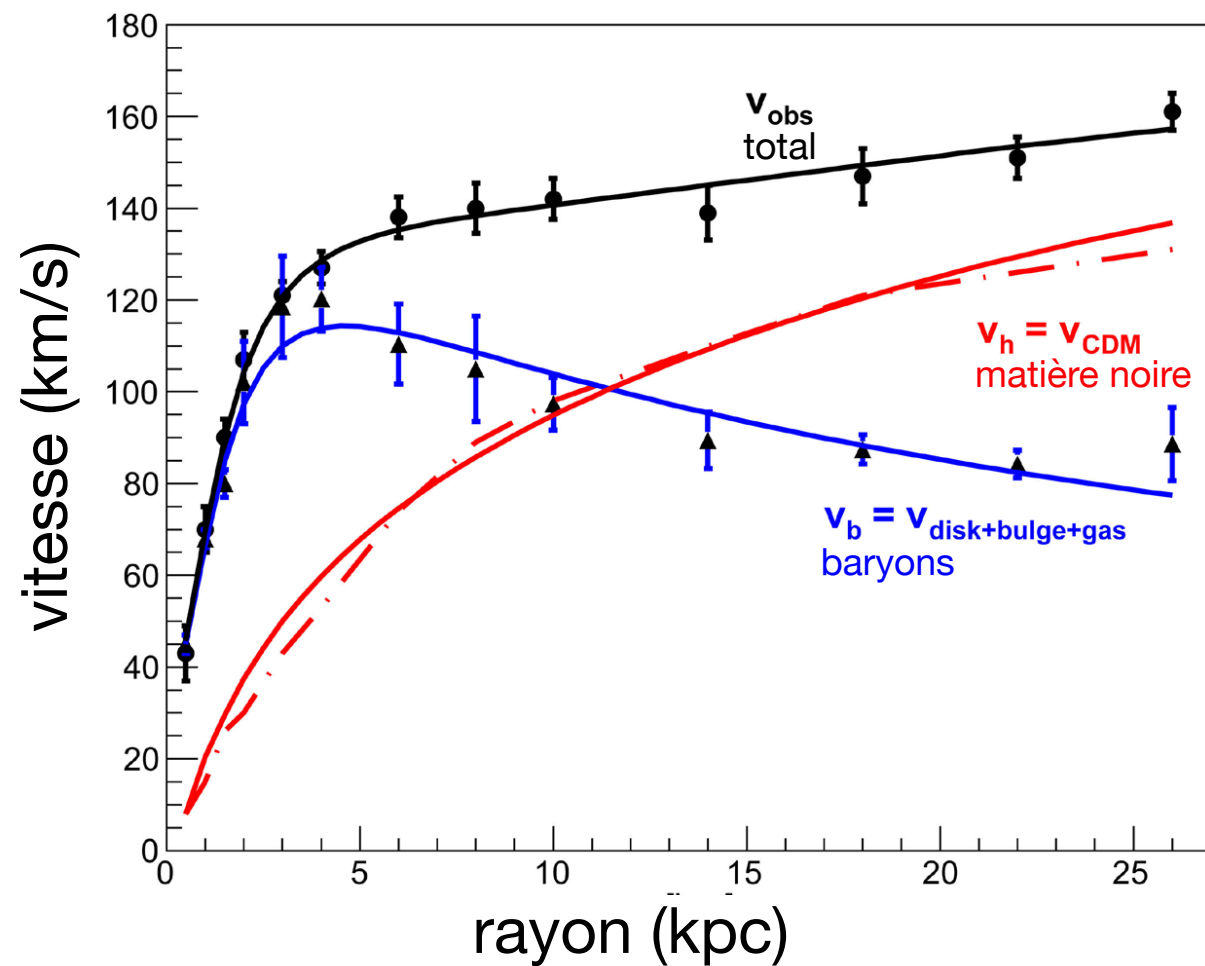
Correspondance courbe de rotation/profil de densité



NGC 3621

Note :

$$\begin{aligned}
 1 \text{ M}_\odot/\text{parsec}^3 &= 6 \times 10^{-20} \text{ kg/m}^3 \\
 &= 0.0000000000000000000006 \text{ kg/m}^3 \\
 &= 40 \text{ atomes d'hydrogene par cm}^3
 \end{aligned}$$



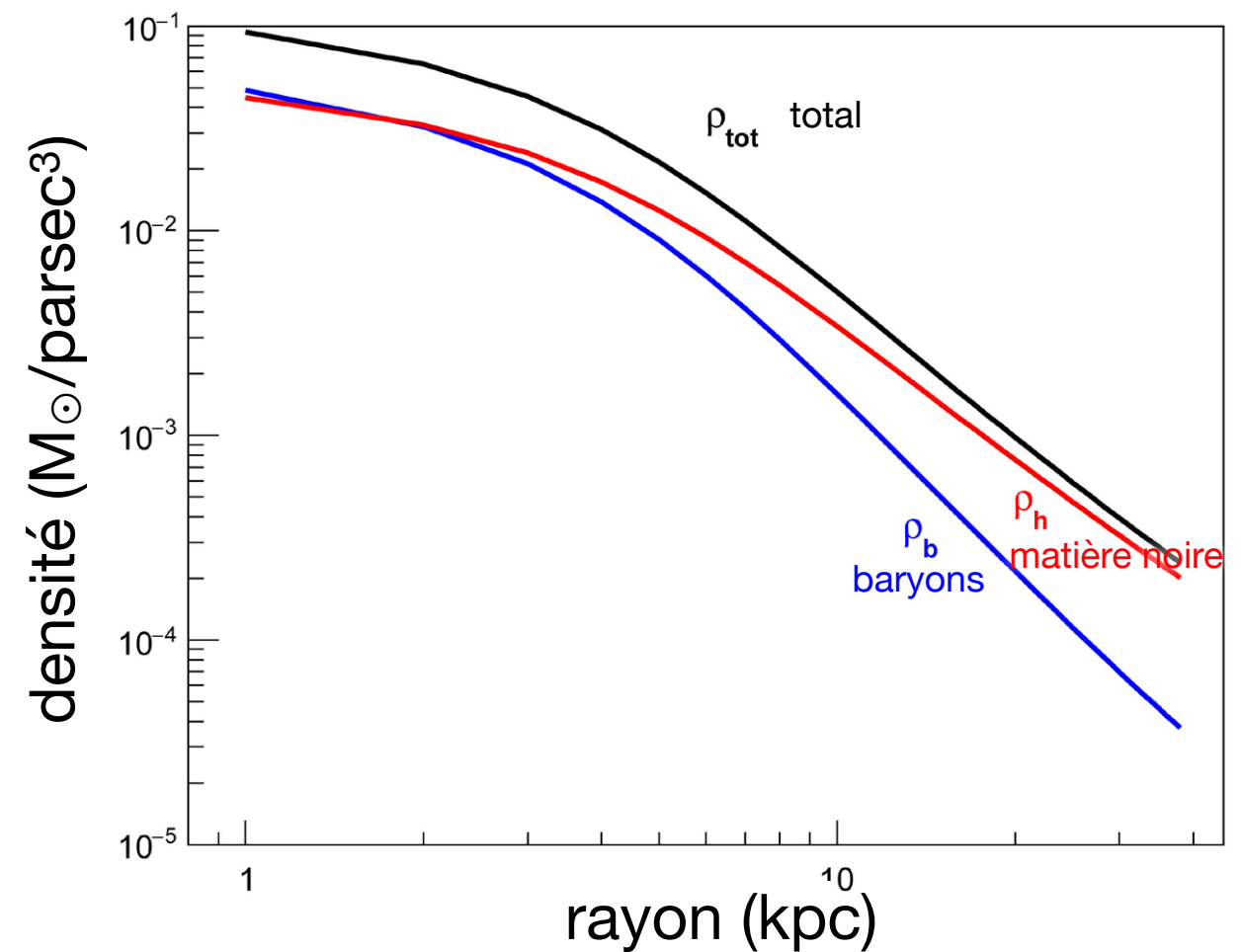
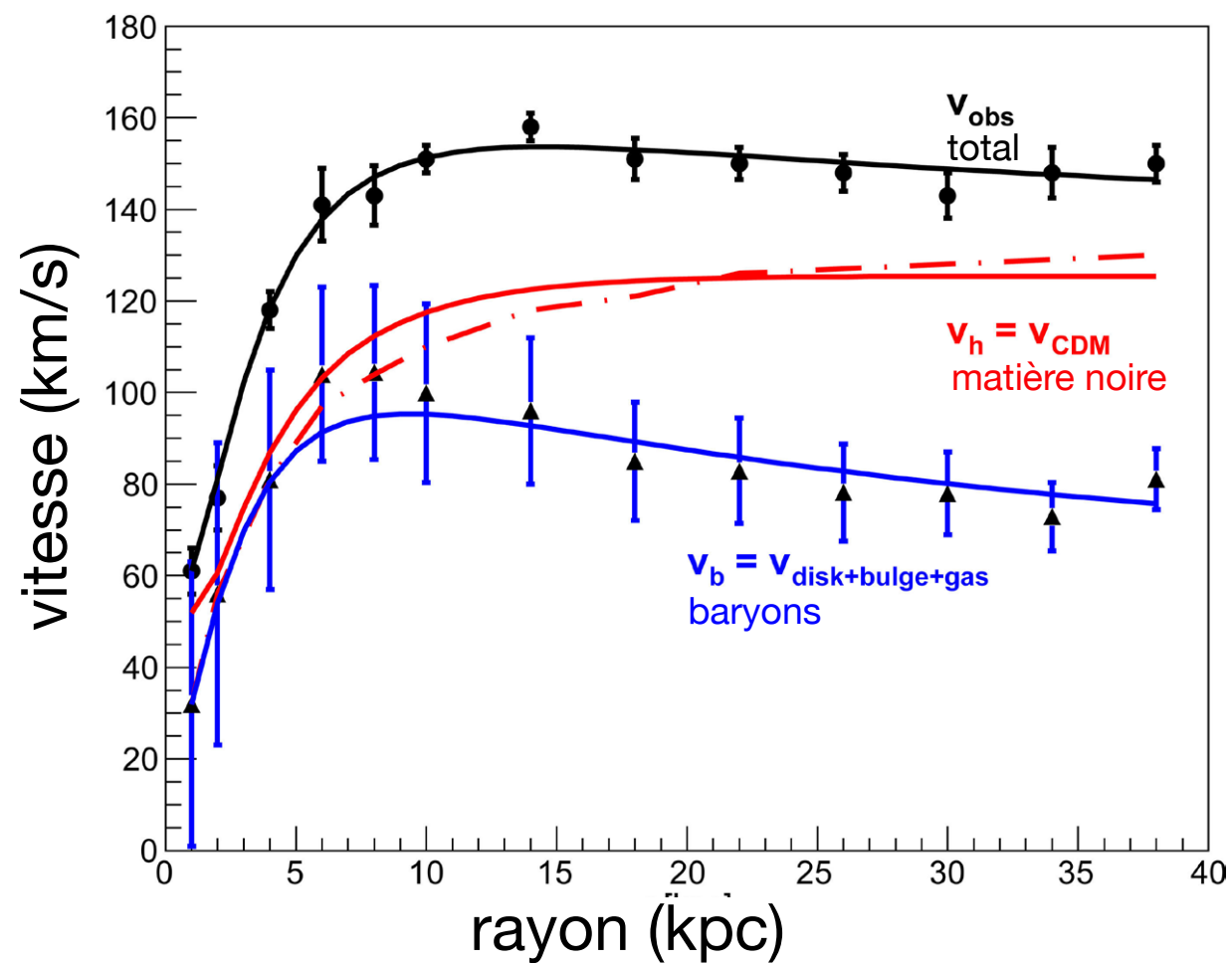
Correspondance courbe de rotation/profil de densité



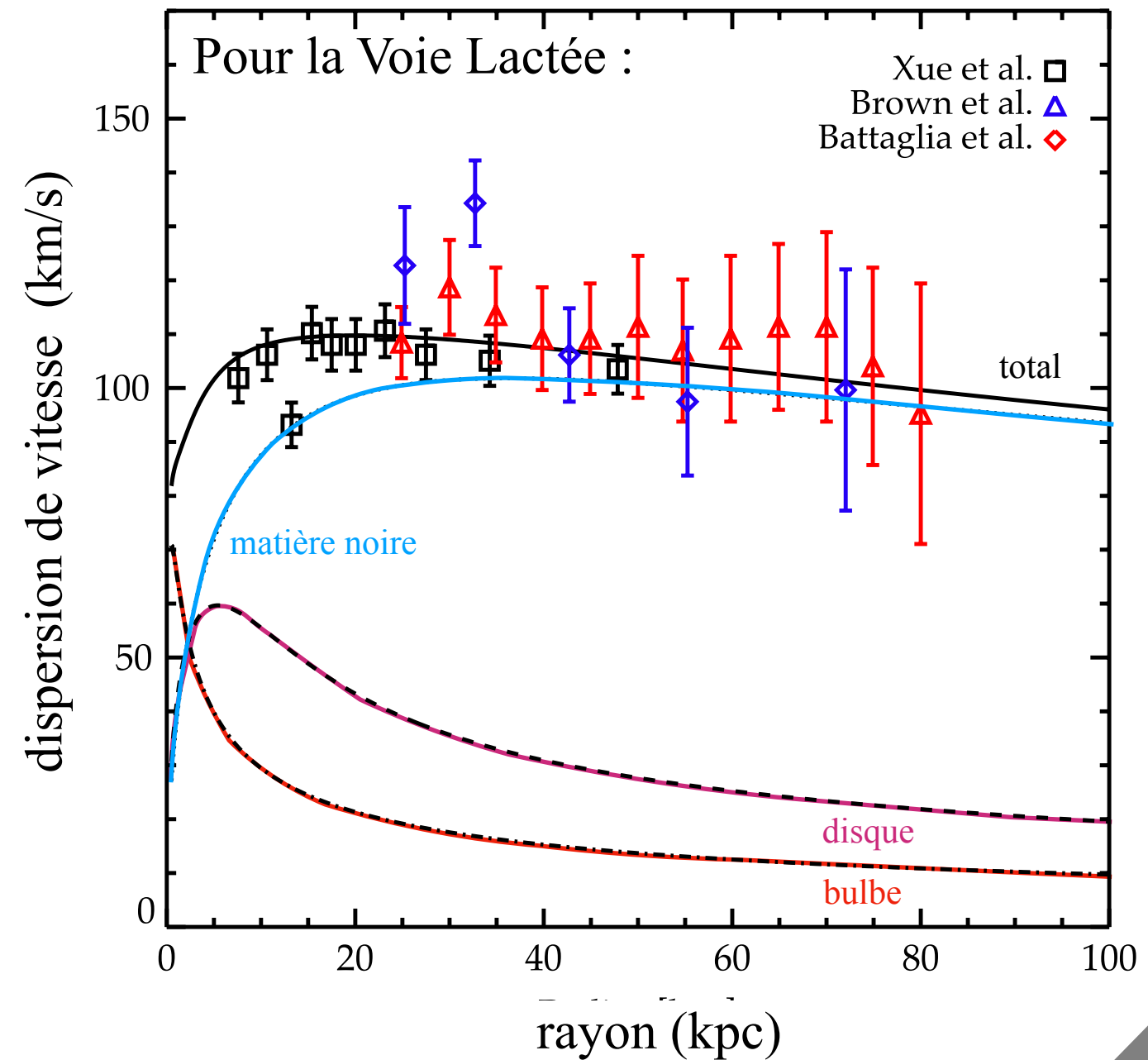
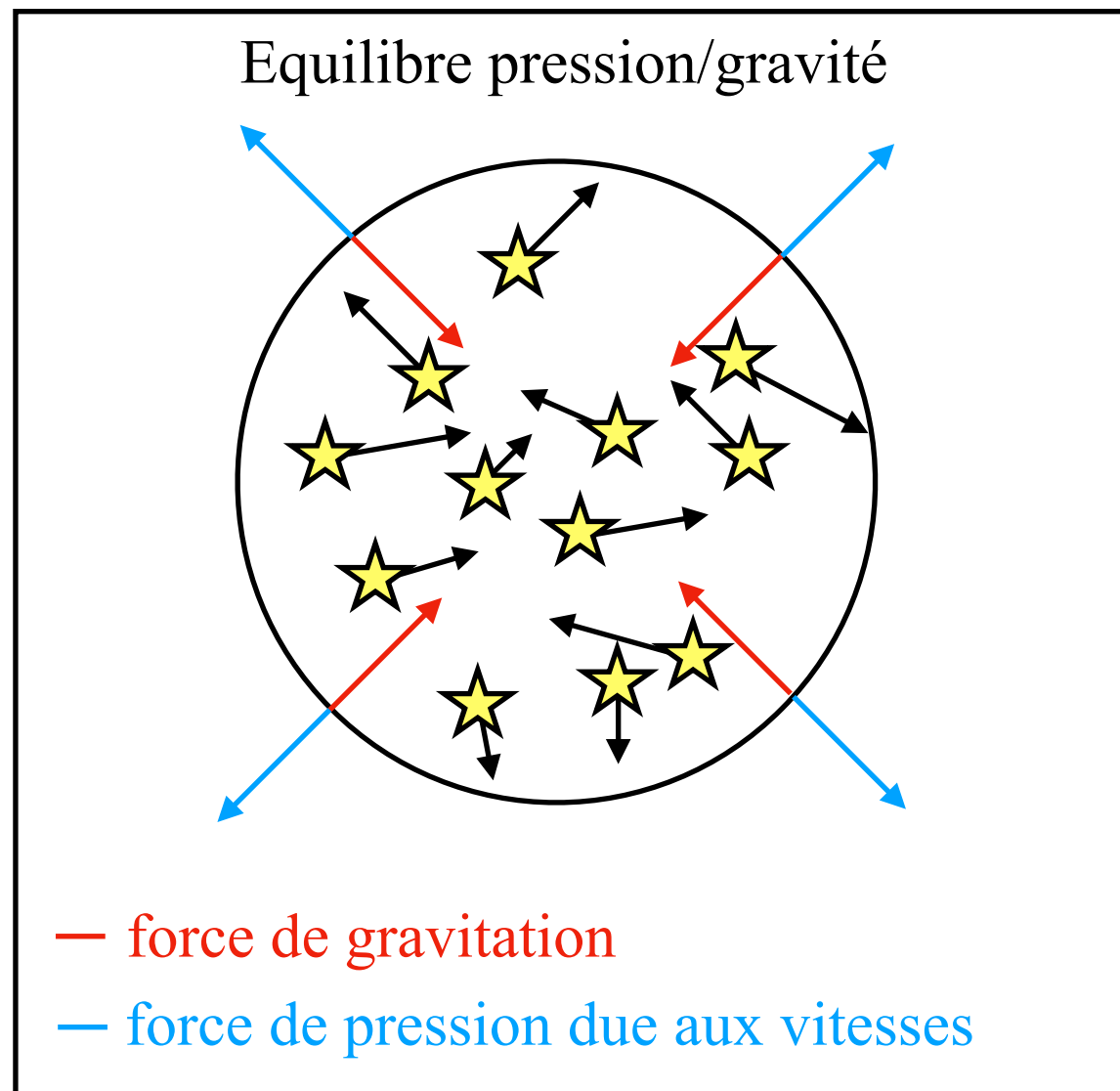
NGC 3198

Note :

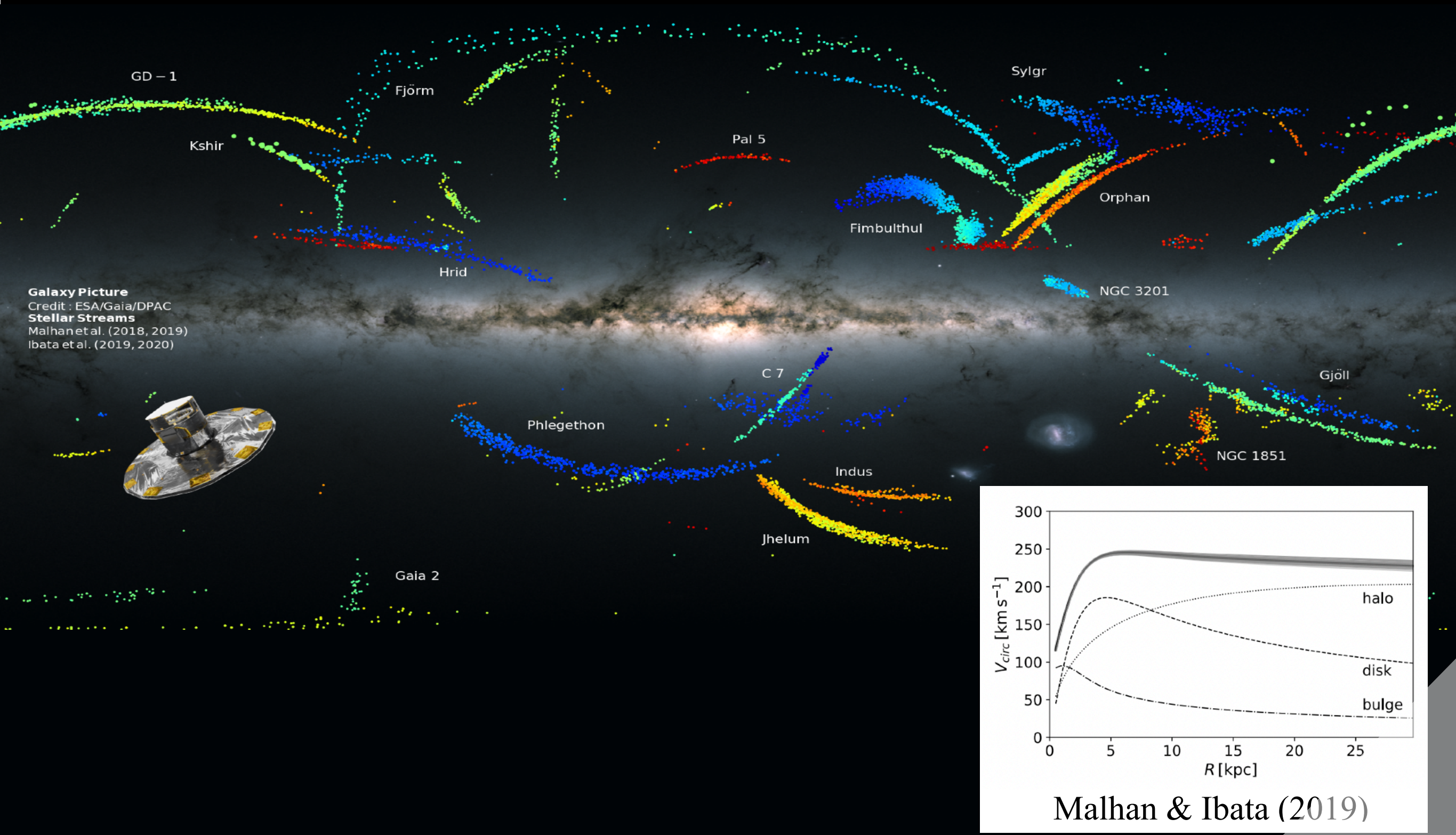
$$\begin{aligned}
 1 \text{ M}_\odot/\text{parsec}^3 &= 6 \times 10^{-20} \text{ kg/m}^3 \\
 &= 0.000000000000000000006 \text{ kg/m}^3 \\
 &= 40 \text{ atomes d'hydrogene par cm}^3
 \end{aligned}$$



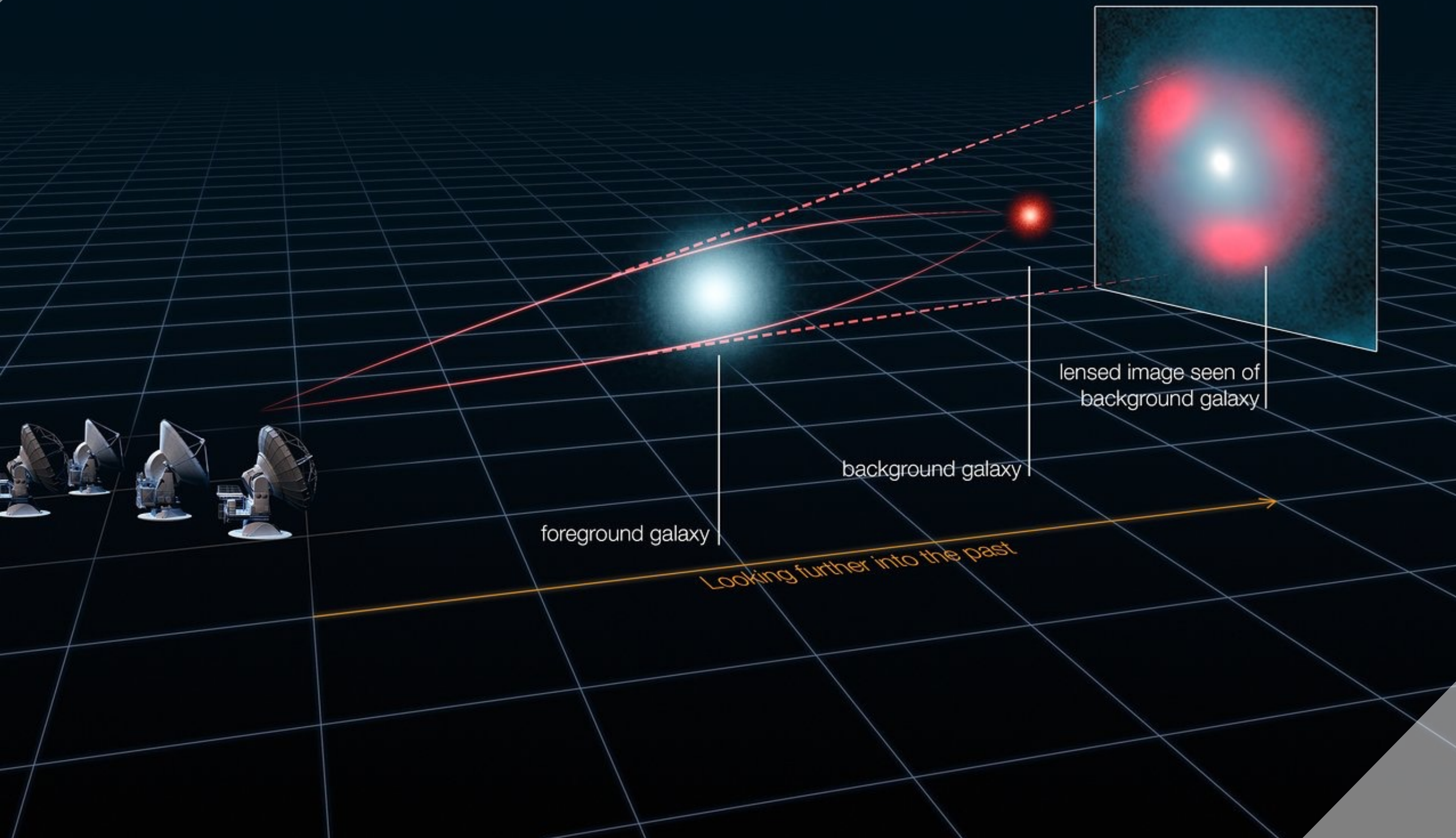
Indications en faveur de la matière noire : les dispersions de vitesse des galaxies



Indications en faveur de la matière noire : les courants d'étoiles autour de la Voie Lactée



Indications en faveur de la matière noire : les lentilles gravitationnelles



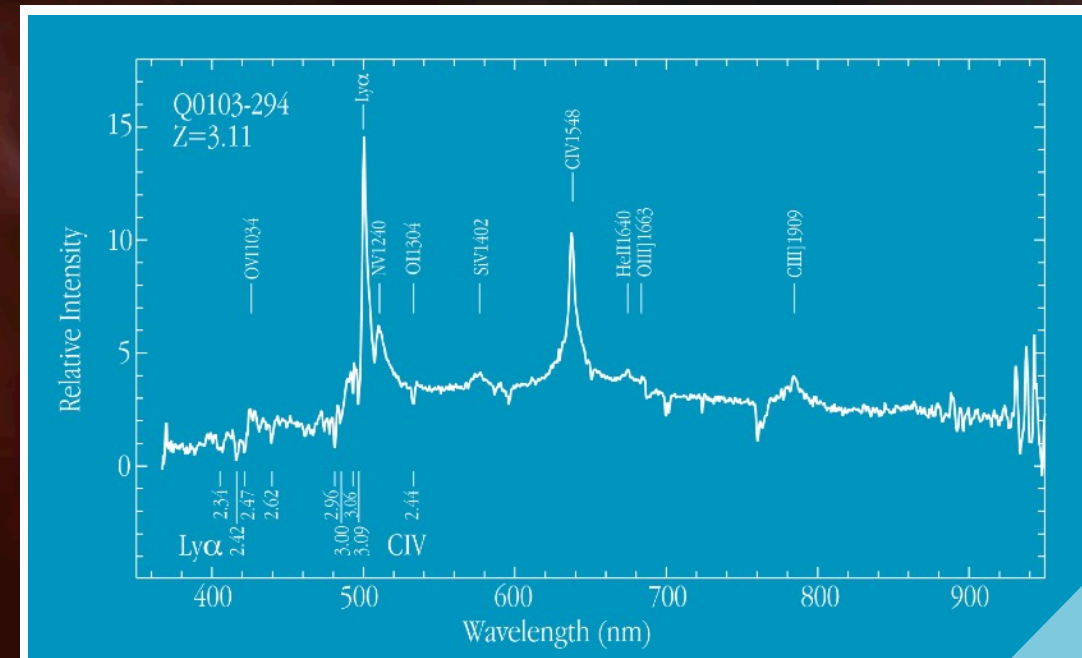


Indications en faveur de la matière noire : le gaz chaud des amas de galaxies

Gaz chaud émettant des rayons X

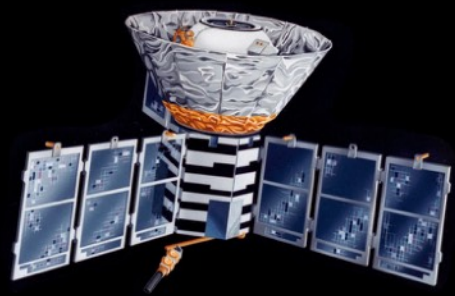
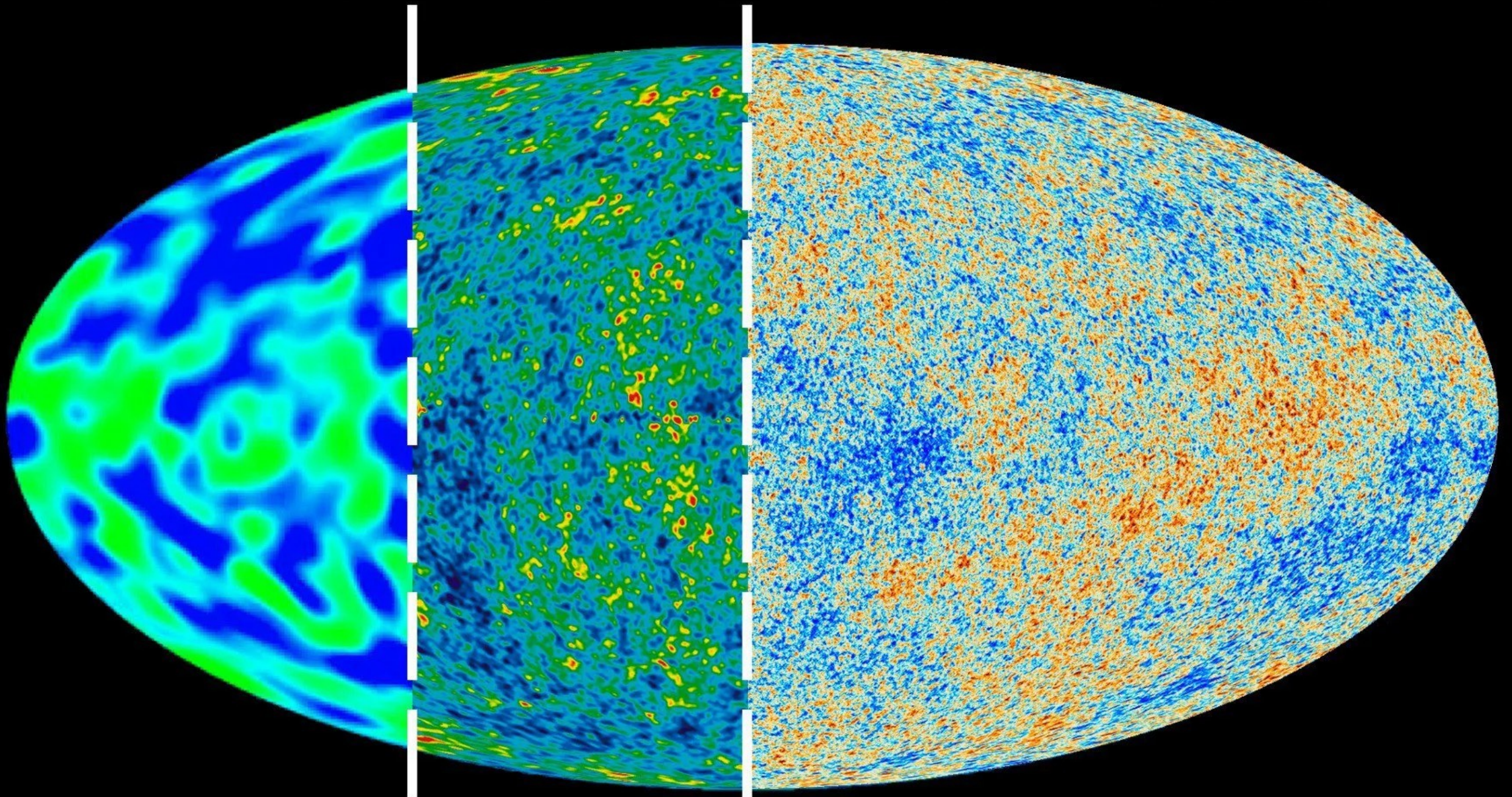
Une solution au problème de la masse manquante ?
Non, car il faut justement de la matière noire pour le retenir !

La nature de la matière noire : les quasars lointains montrent qu'elle doit être exotique !

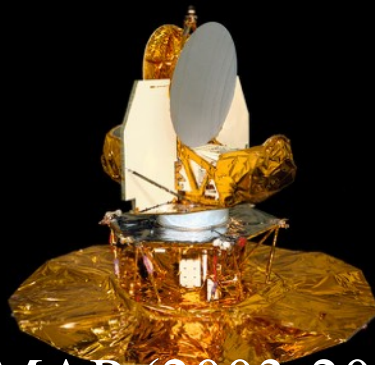


Nucléosynthèse primordiale : l'abondance des éléments dépend de la quantité de matière baryonique dans l'Univers.

La nature de la matière noire : le fond diffus cosmologique fixe la composition de l'Univers



COBE (1989-1993)

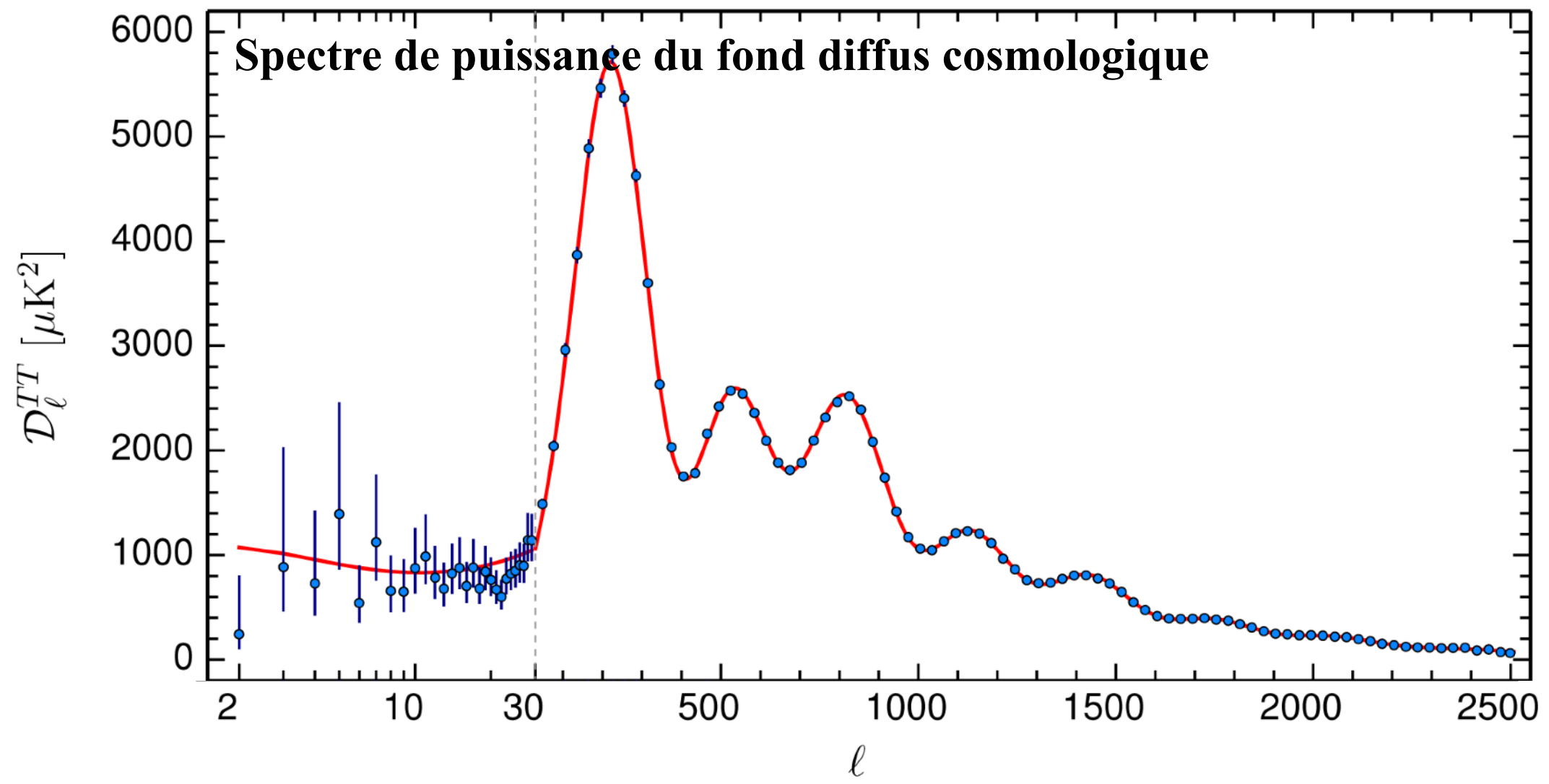


WMAP (2003-2012)

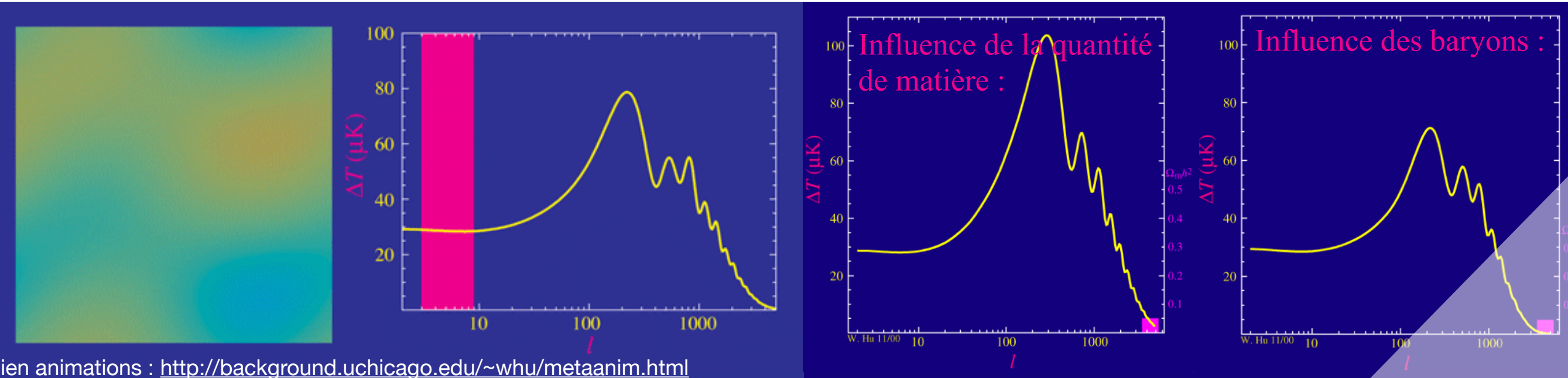


Planck (2009-2013)

La nature de la matière noire : le fond diffus cosmologique fixe la composition de l'Univers

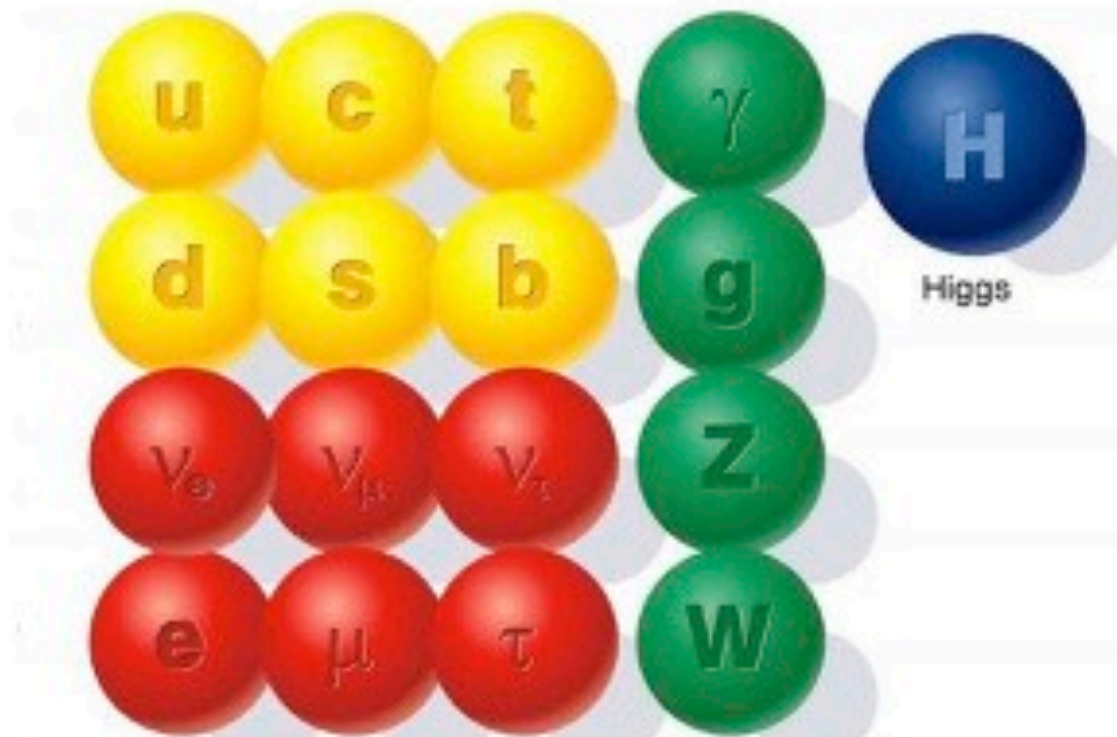


Amplitude des fluctuations à différentes échelles :



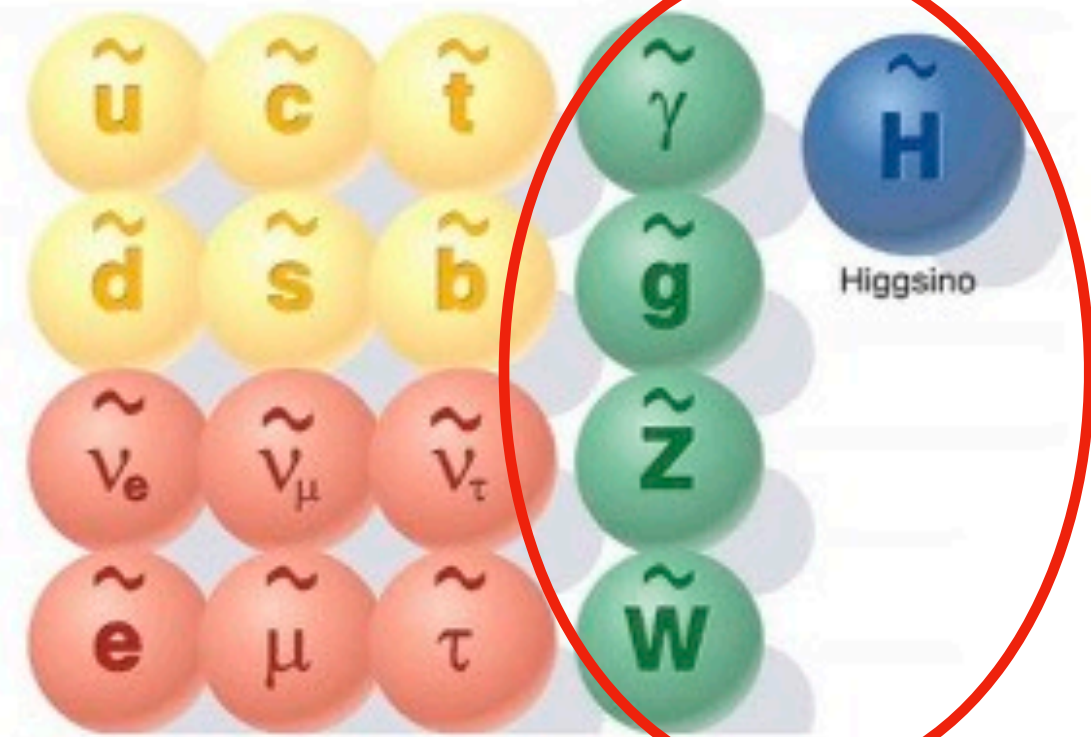
La nature de la matière noire : les WIMPs ?

Particules connues du modèle standard de la physique des particules



- quarks
- leptons
- force carriers

Particules supersymétriques hypothétiques



- squarks
- sleptons
- SUSY force carriers

WIMPs: Weakly Interactive Massive Particles

Les modèles cosmologiques issus de la relativité générale

Les équations d'Einstein

$$G^{\mu\nu} = E^{\mu\nu} + \Lambda g^{\mu\nu}$$

$G^{\mu\nu}$: tenseur décrivant la matière

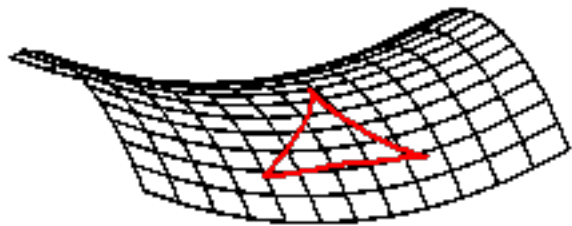
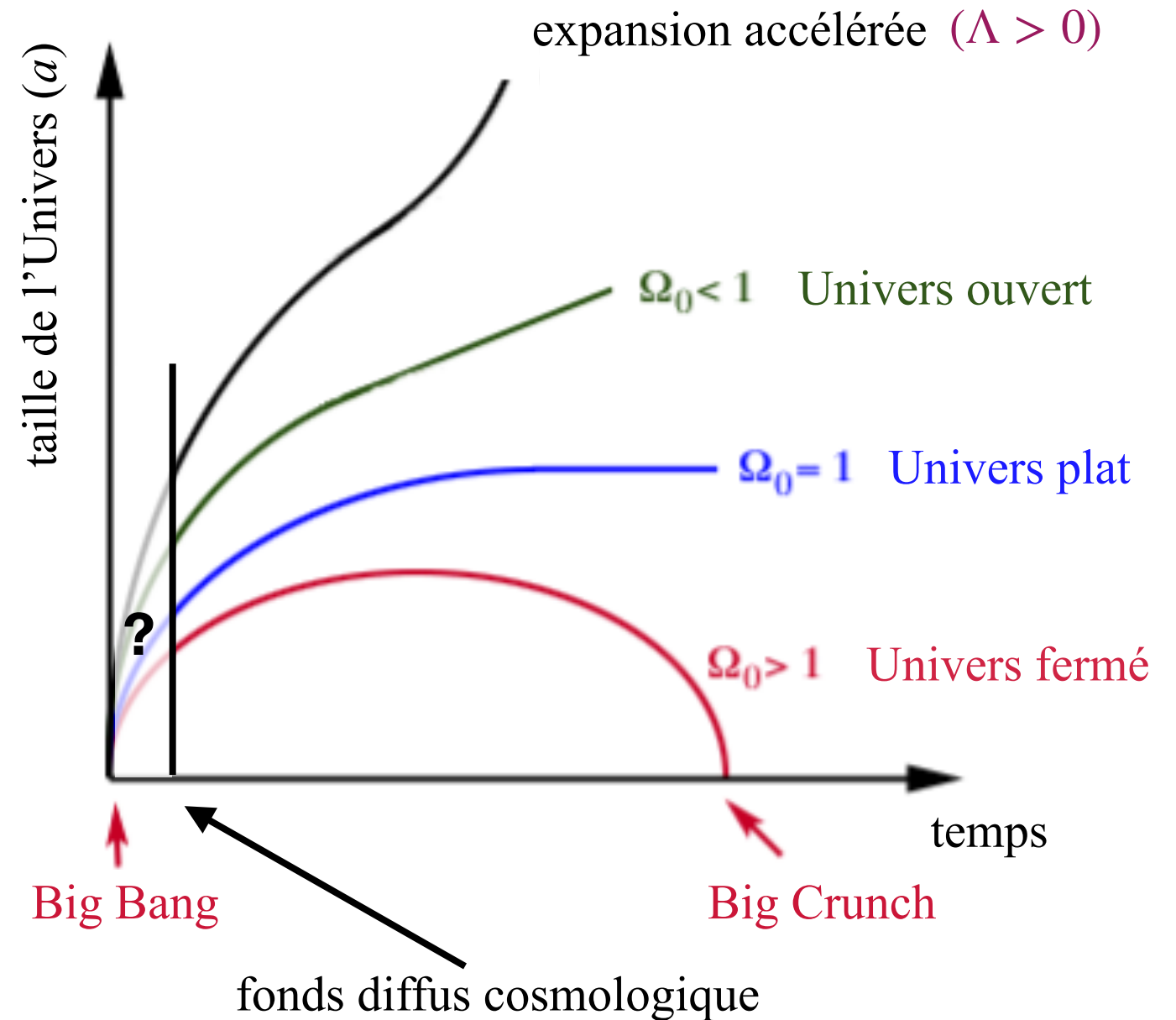
$E^{\mu\nu}$: tenseur décrivant l'espace-temps

Λ : constante cosmologique

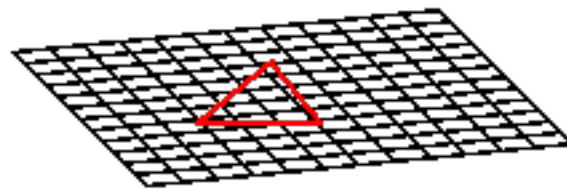
Les équations de Friedmann

$$\begin{cases} \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} \\ \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3P}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3} \end{cases}$$

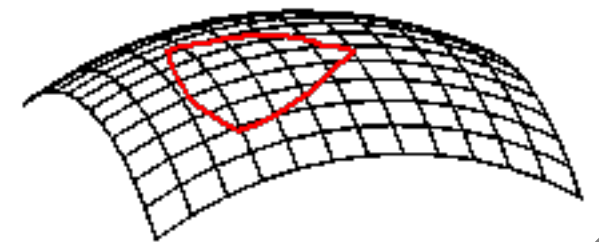
Le facteur d'échelle a décrit l'expansion de l'Univers



Univers ouvert : ressemble à une selle de cheval

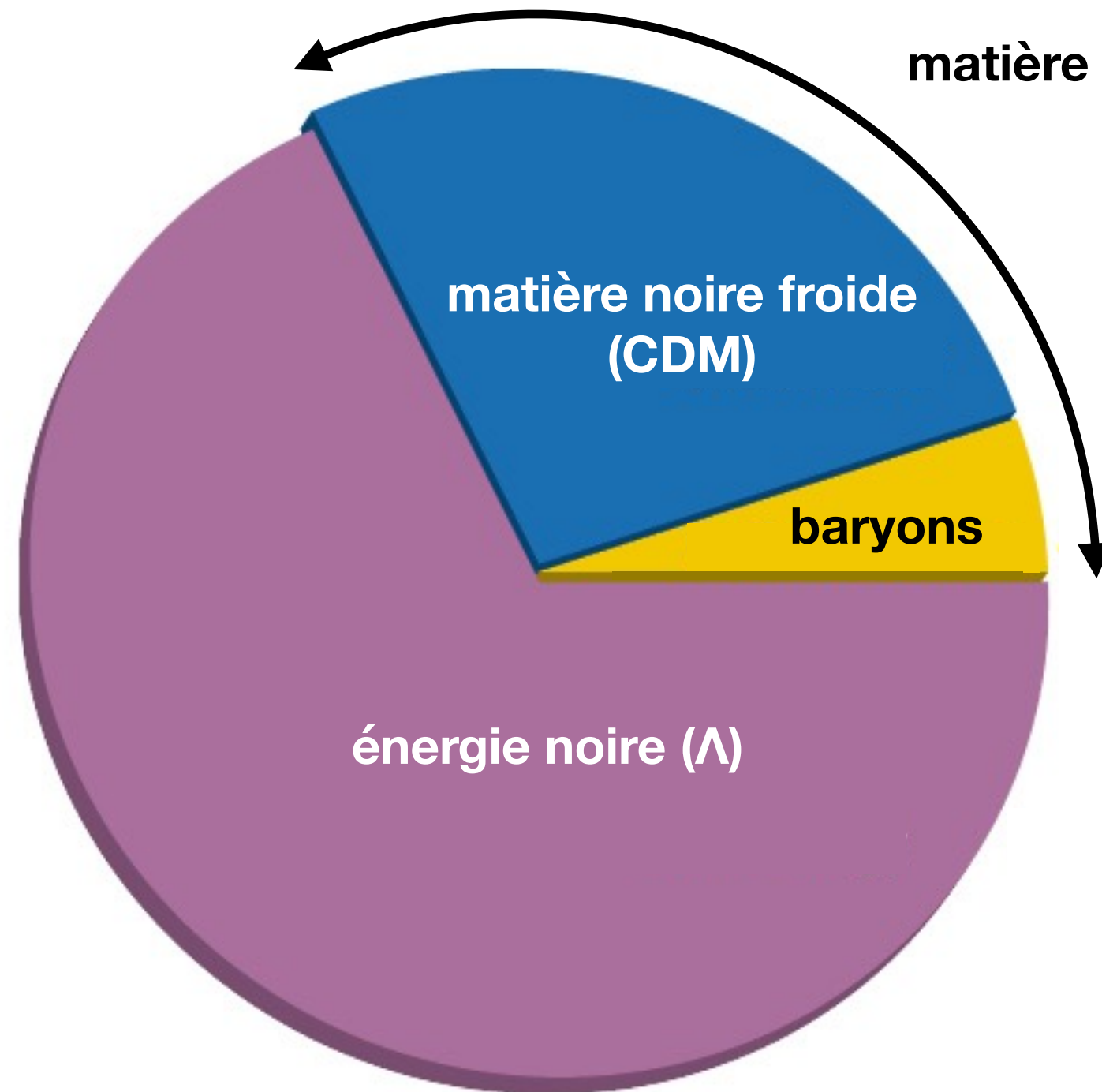


Univers plat



Univers fermé : semblable à la surface d'une sphère

La composition de l'Univers dans le modèle Λ CDM



Des questions ?

Matière noire : mirage ou réalité ?

Cours 1 (10/01/23) : Peser l'Univers grâce à la loi de la gravitation

- Modéliser le mouvement des astres : Ptolémée, Copernic, Newton, Einstein
- Mesurer la masse de la Terre et du Soleil
- Découvrir l'invisible: Neptune, les exoplanètes, le trou noir central de notre Galaxie

Cours 2 (17/01/23) : Le problème de la masse manquante : la matière noire

- La galaxie d'Andromède à différentes longueurs d'onde : le visible et l'invisible
- Les différents types de galaxies
- Les courbes de rotation des galaxies et la matière noire

Cours 3 (24/01/23) : La nature de la matière noire

- Les différentes indications en faveur de la matière noire
- A la recherche de la masse manquante : gaz, MACHOs, trous noirs, neutrinos, WIMPS, etc.
- Le fond diffus cosmologique, la nucléosynthèse primordiale et l'expansion de l'Univers
- Le modèle cosmologique actuel

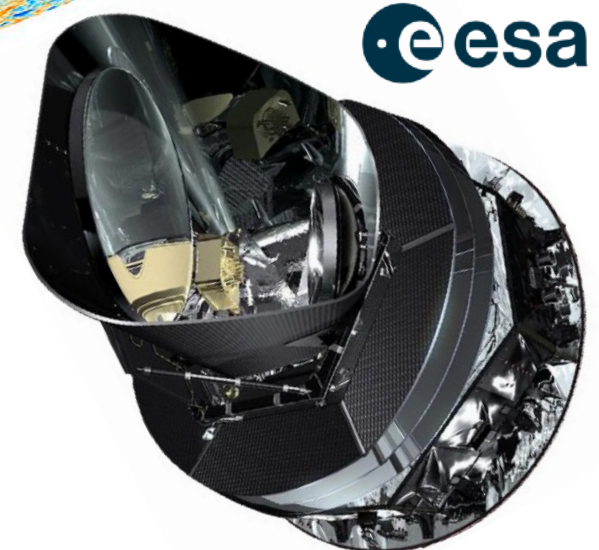
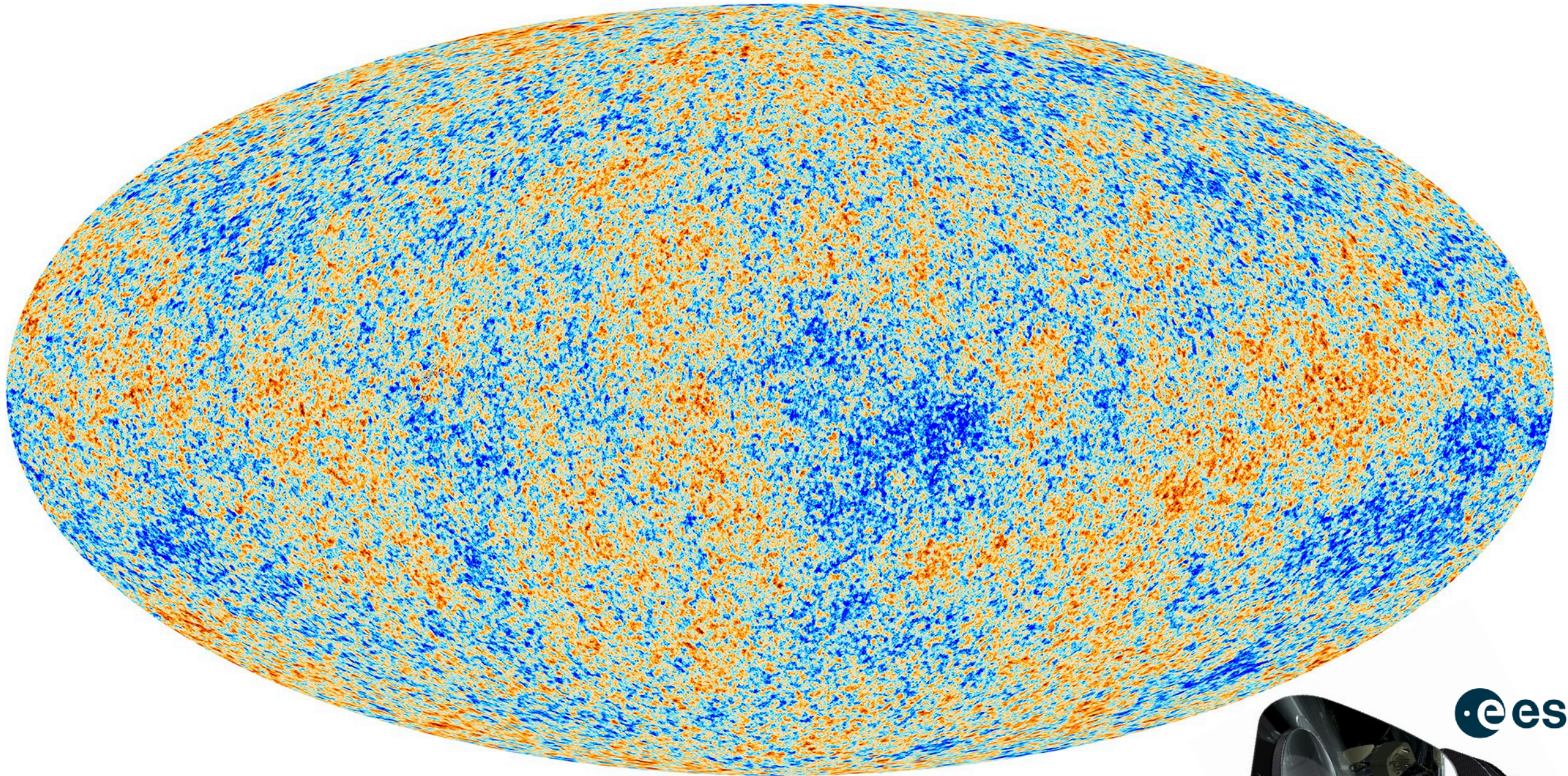
Cours 4 (31/01/23) : Formation & évolution des galaxies : succès et défis du modèle cosmologique actuel

- Le scénario hiérarchique de formation des galaxies
- La toile cosmique et les halos de matière noire
- La formation des étoiles et les phénomènes de rétroaction
- La non-détection des particules de matière noire
- Les problèmes à l'échelle des galaxies
- L'énergie noire et la constante de Hubble

Cours 5 (07/02/23) : Les alternatives à la matière noire froide

- Résoudre une partie des problèmes grâce aux phénomènes de rétroaction
- Les autres types de matière noire : chaude, tiède, floue, interagissant avec elle-même
- La gravité modifiée

**Tout commence par un univers très homogène,
il y a 13.7 milliards d'années...**



esa

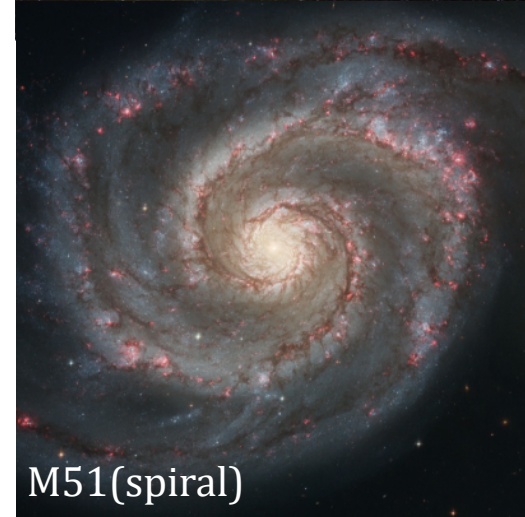
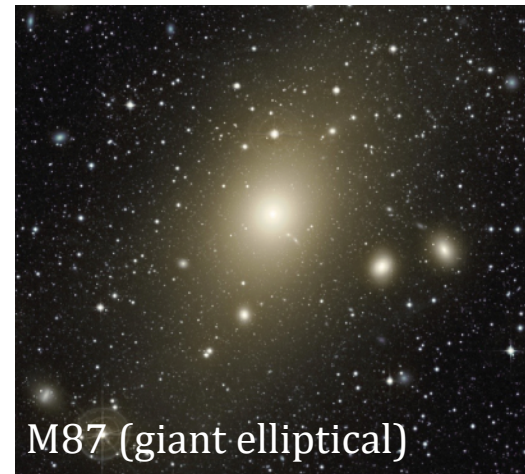
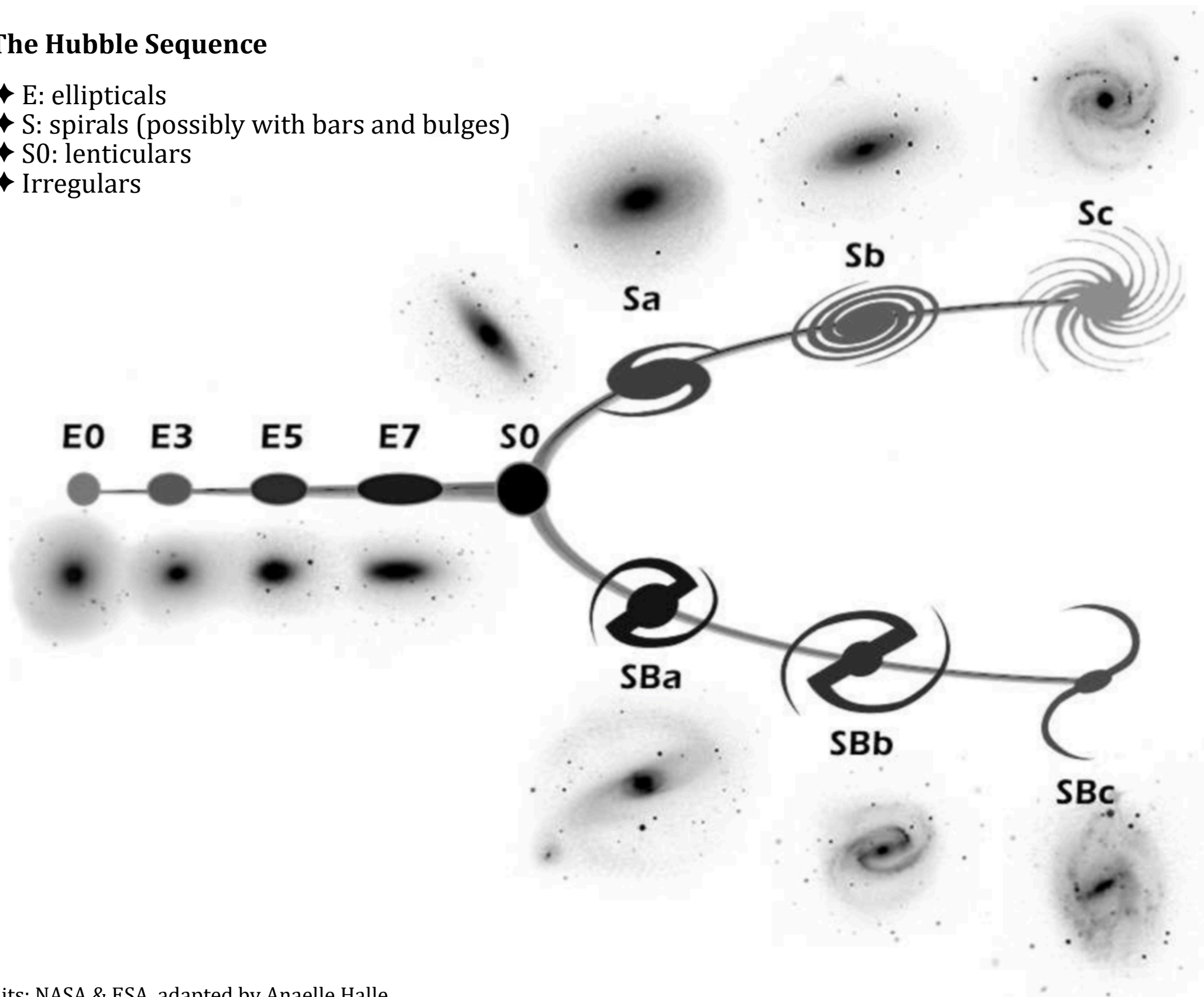
Inhomogénéités de l'ordre de $10^5 = 1/100\ 000$

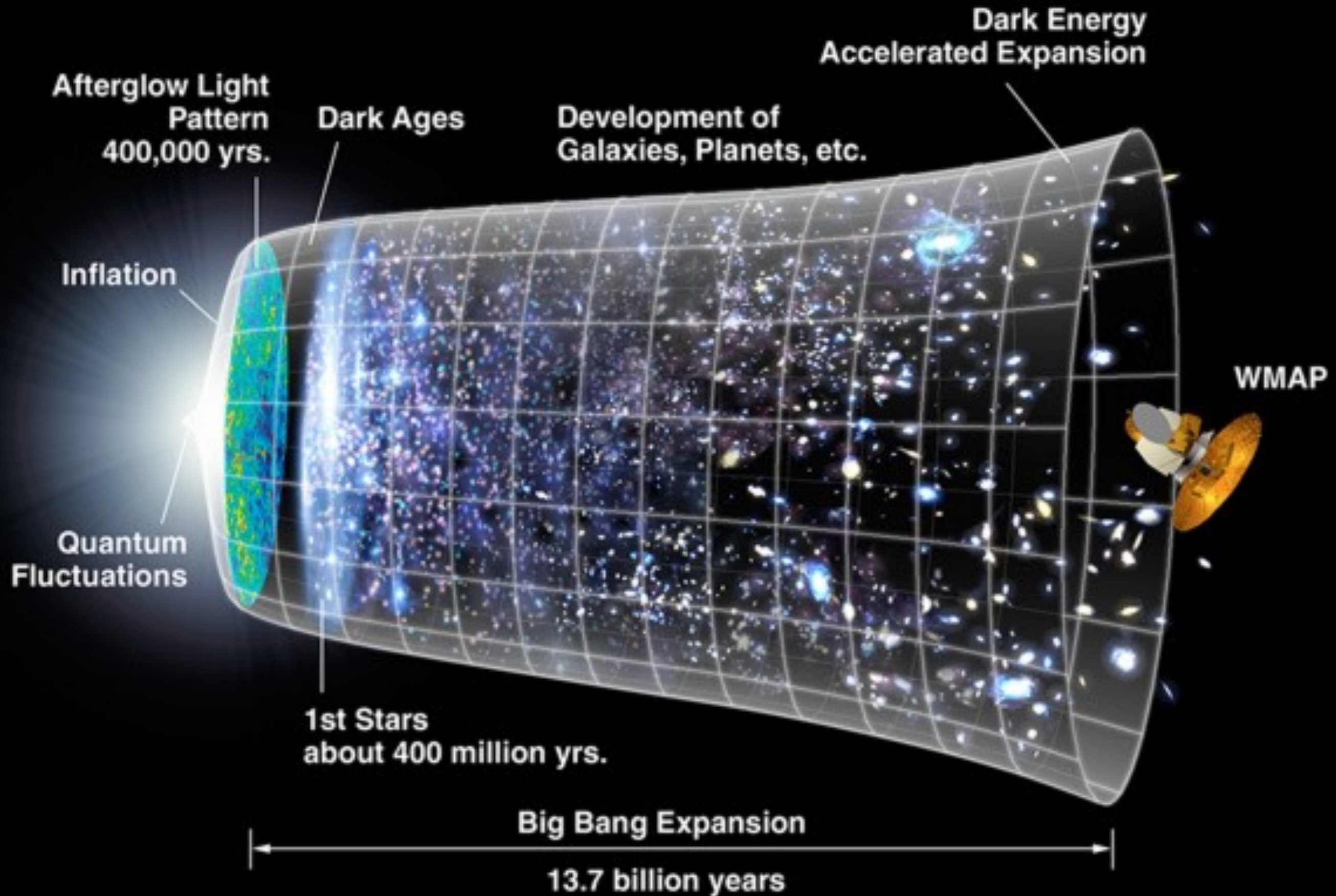
Planck Space Telescope

...pour aboutir à une grande diversité de galaxies aujourd'hui

The Hubble Sequence

- ◆ E: ellipticals
- ◆ S: spirals (possibly with bars and bulges)
- ◆ S0: lenticulars
- ◆ Irregulars





$z = 48.4$

$T = 0.05 \text{ Gyr}$

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>

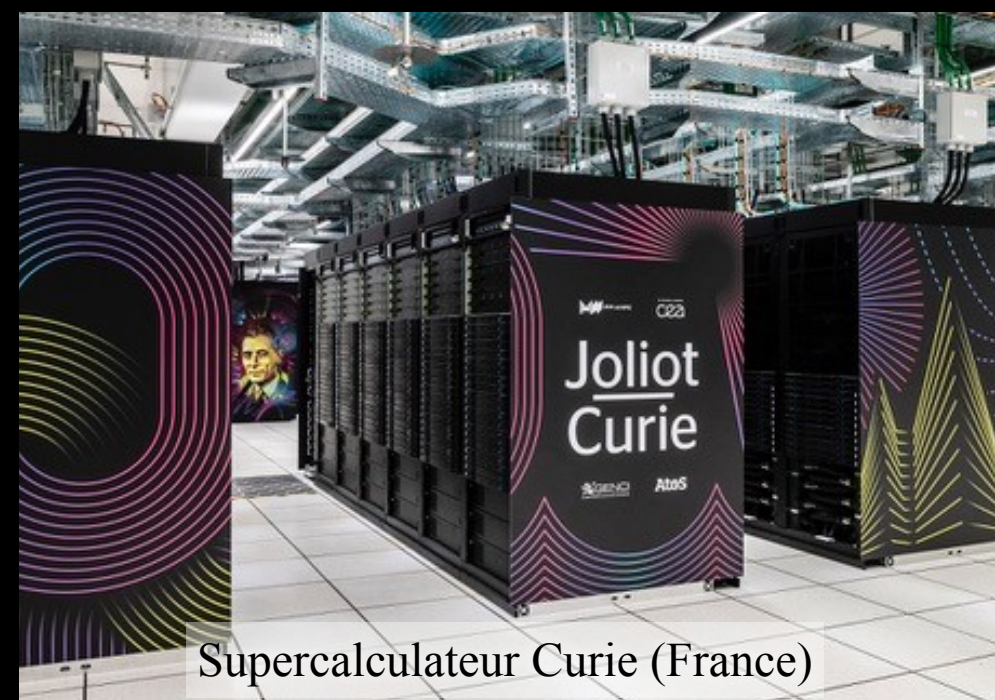
500 kpc



Supercalculateur COBRA (Allemagne)

Illustris simulation

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



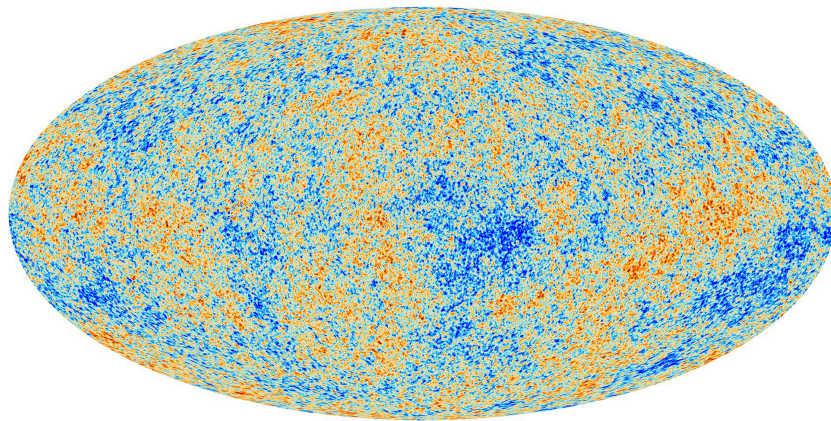
Supercalculateur Curie (France)

Ingrédients des simulations numériques

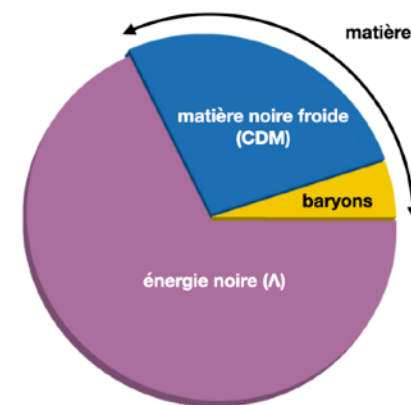
Pourquoi des simulations numériques ?

- Difficile de rendre compte de toute la complexité de l'Univers juste avec des calculs analytiques
- **Un problème multi-échelles** : des sites de formation d'étoiles (10^{16} m) aux grandes structures (10^{22} m)
(comme si on voulait simuler le corps humain en suivant chacune de ses cellules !)
- **Différents types de phénomènes physiques** : gravité, dynamique des gaz, couplage entre le gaz et le rayonnement, dynamique des poussières, réactions chimiques, champs magnétiques, rayons cosmique, formation et évolution des étoiles, etc.

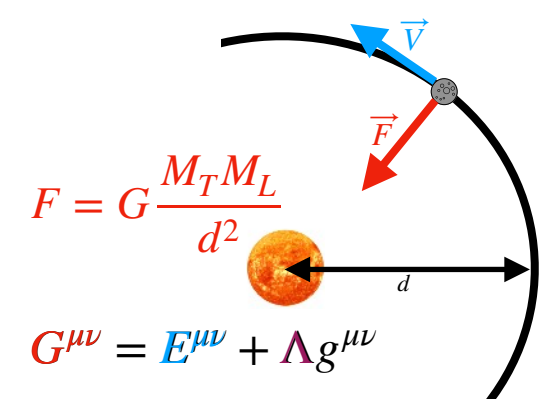
Conditions initiales



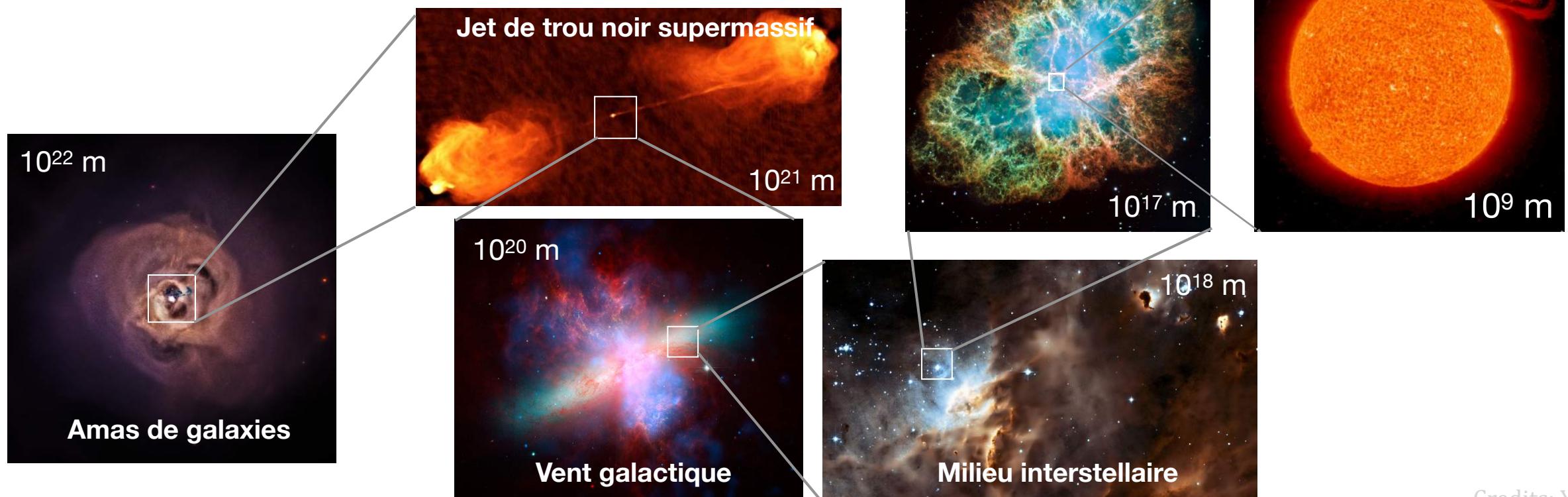
modèle cosmologique



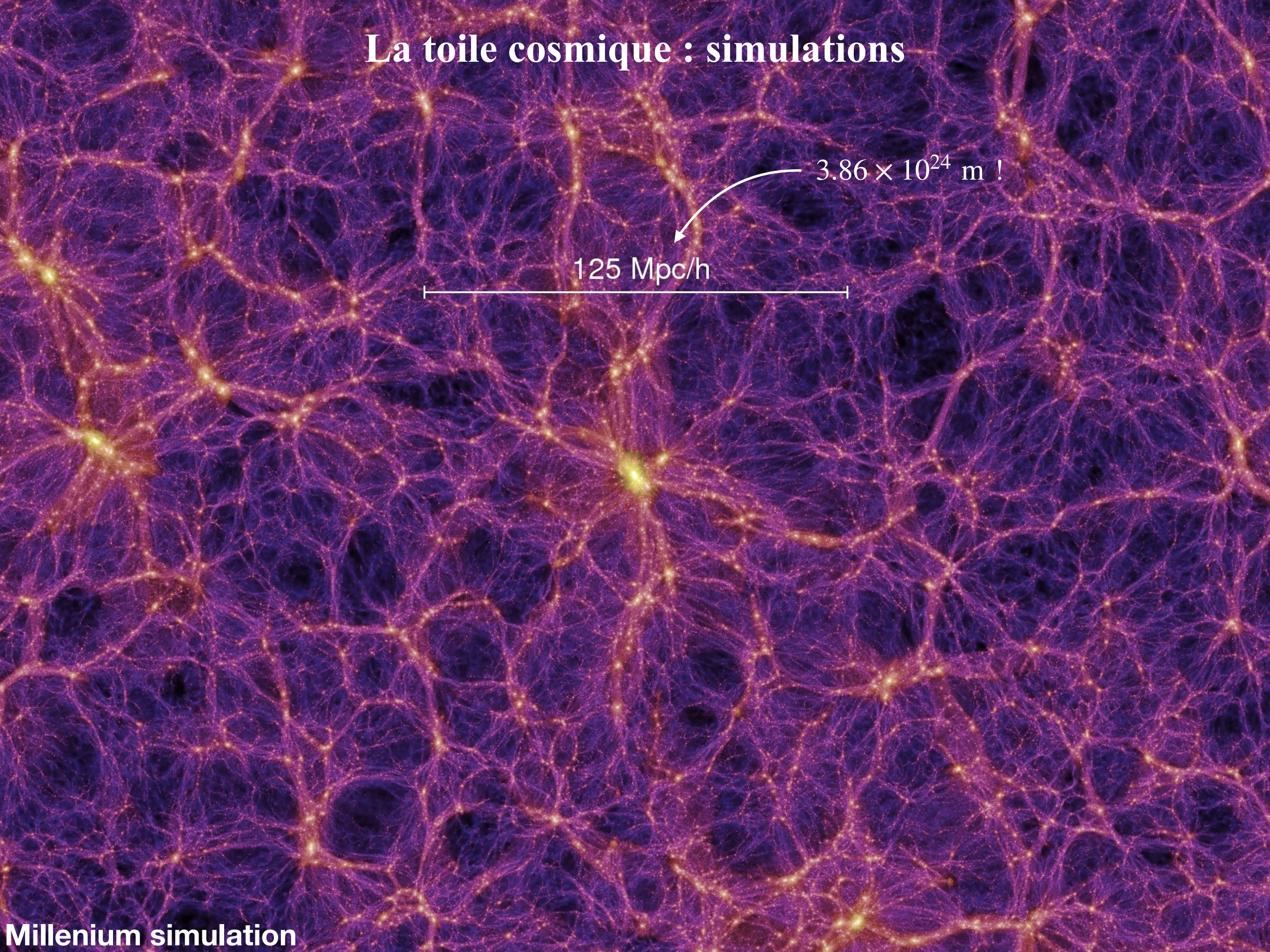
gravitation



+ phénomènes baryoniques : la matière visible et en particulier le gaz

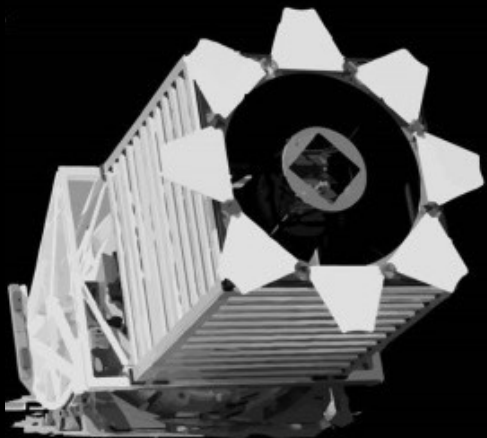
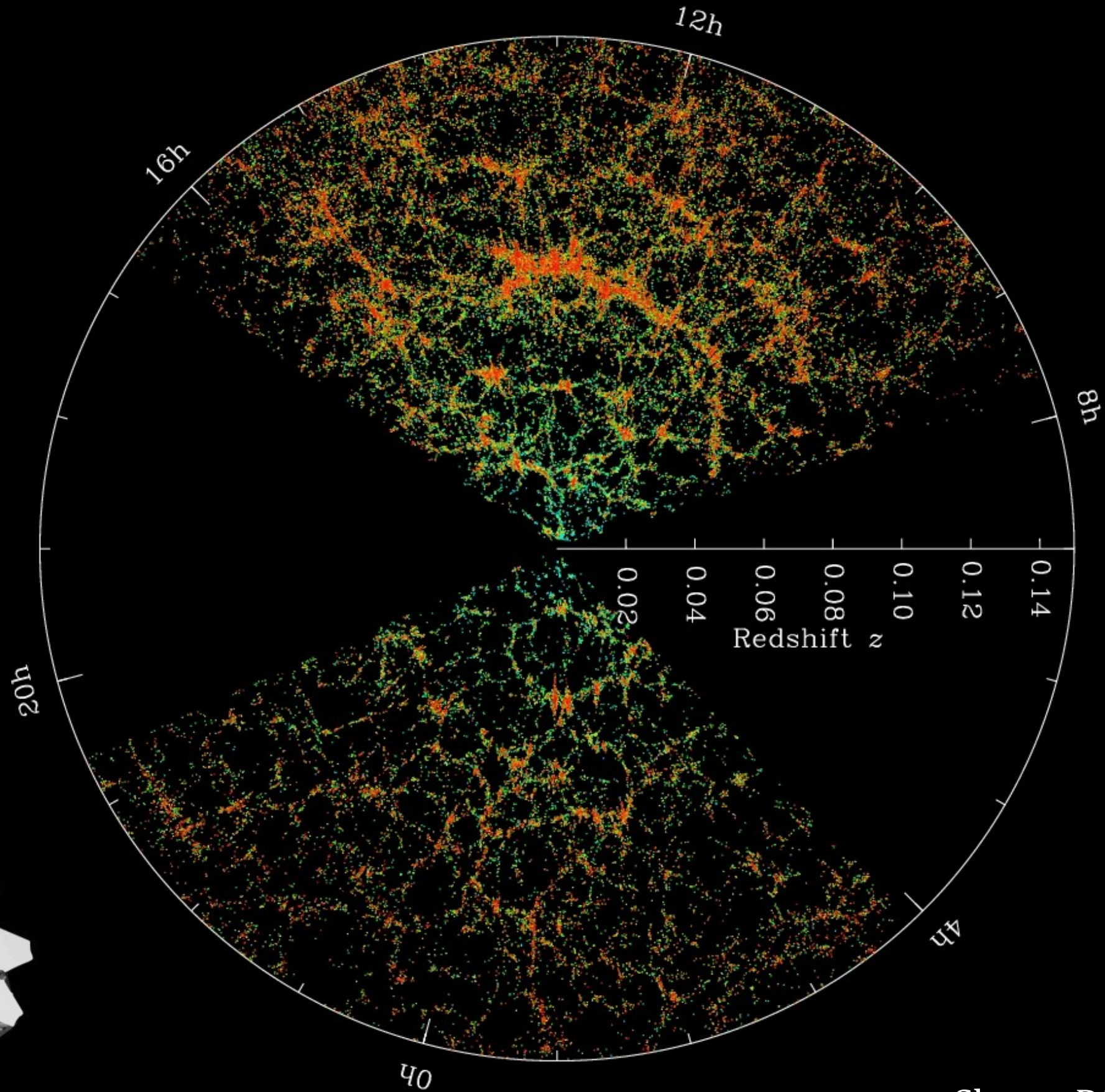


La toile cosmique : simulations



Millenium simulation

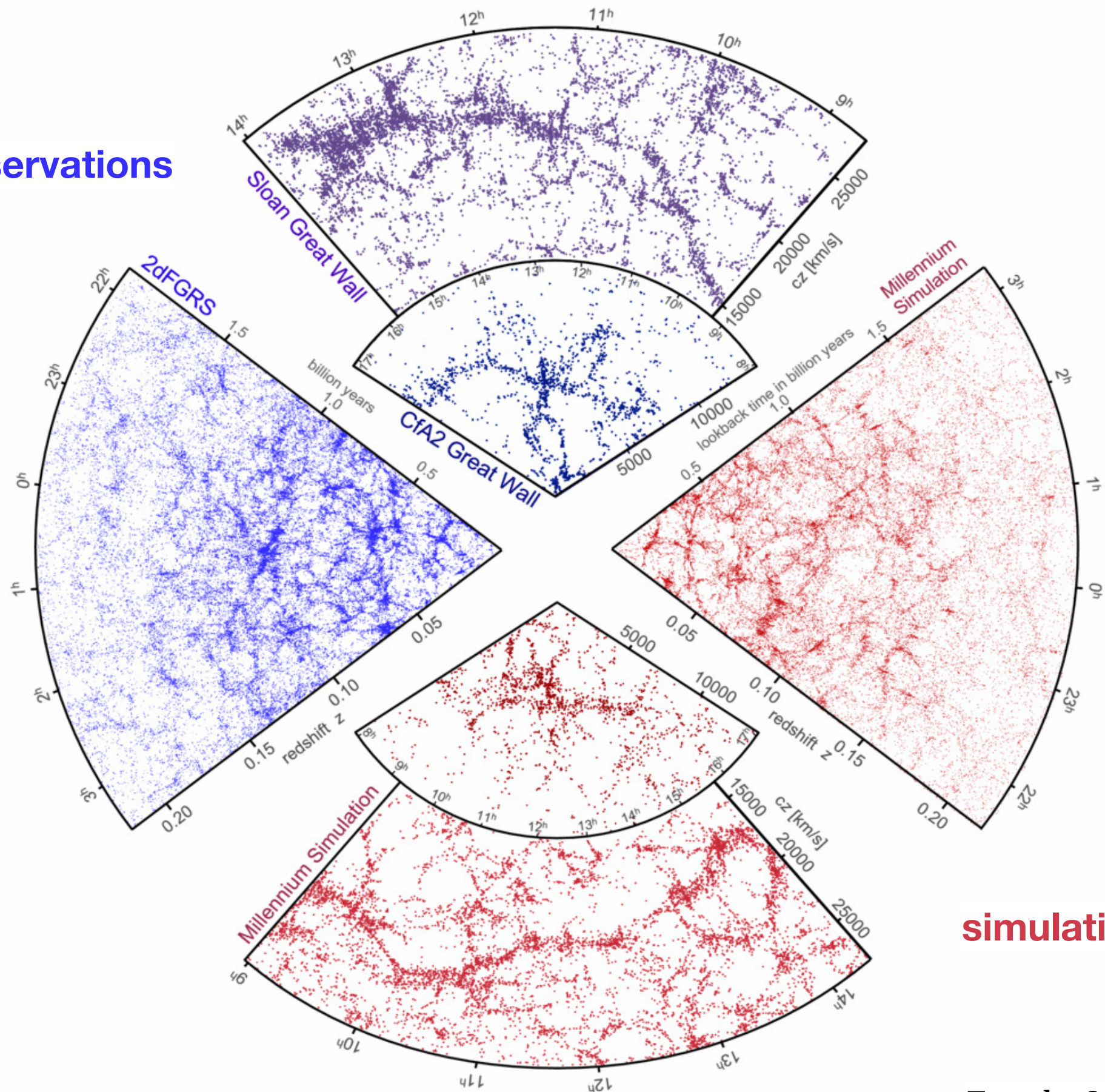
La toile cosmique : observations



Sloane Digital Sky Survey

La toile cosmique : simulations et observations

observations

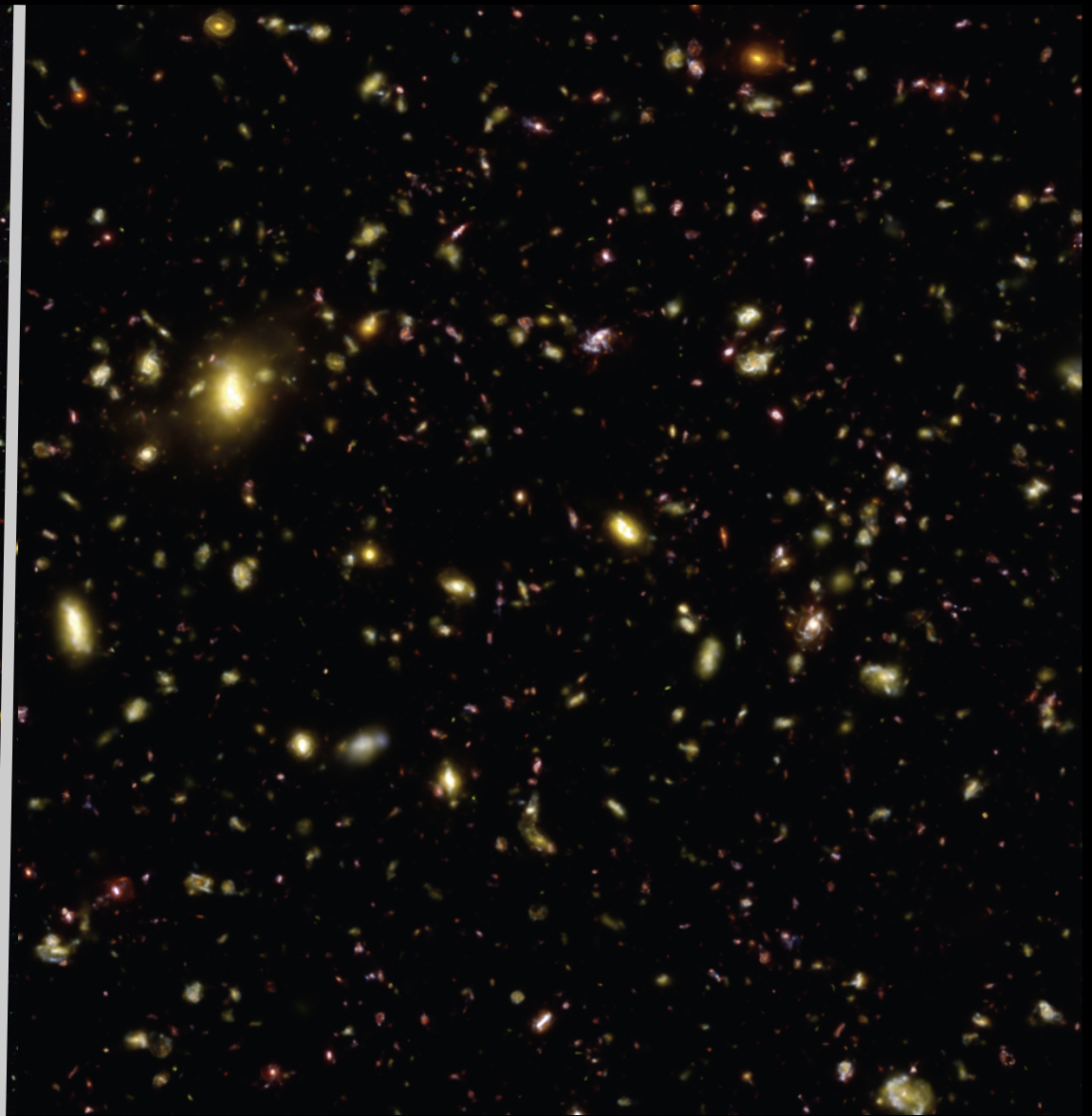


simulations

Galaxies : simulations et observations



Hubble Space Telescope



Illustris simulation

More information can be found at:
<http://sings.stsci.edu/>

Ellipticals

Irregulars

Unbarred Spirals

Intermediate Spirals

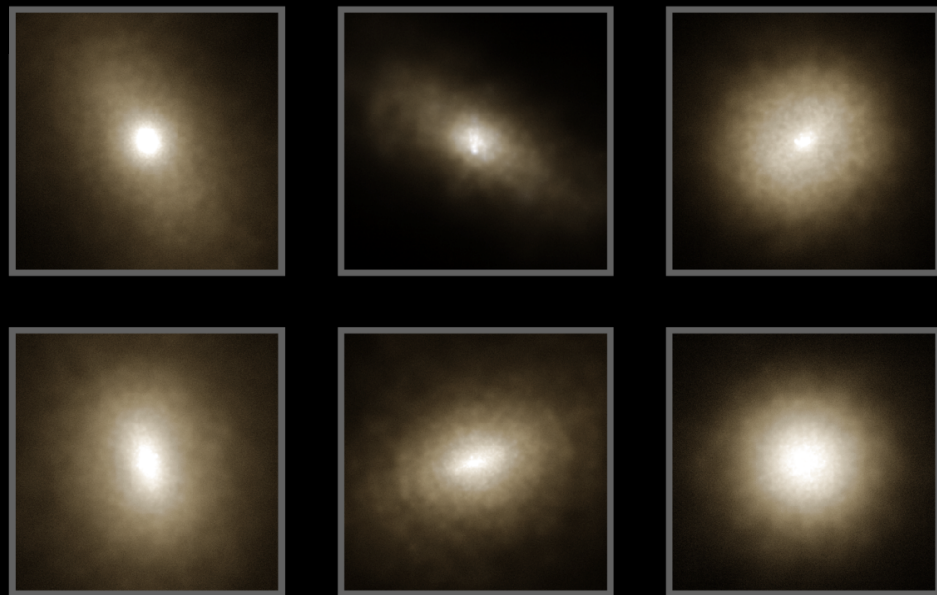
Barred Spirals

Blue=IRAC 3.6 μ m (stars)
Green=IRAC 8 μ m
(aromatic features from dust grains/molecules)
Red=MIPS 24 μ m (warm dust)

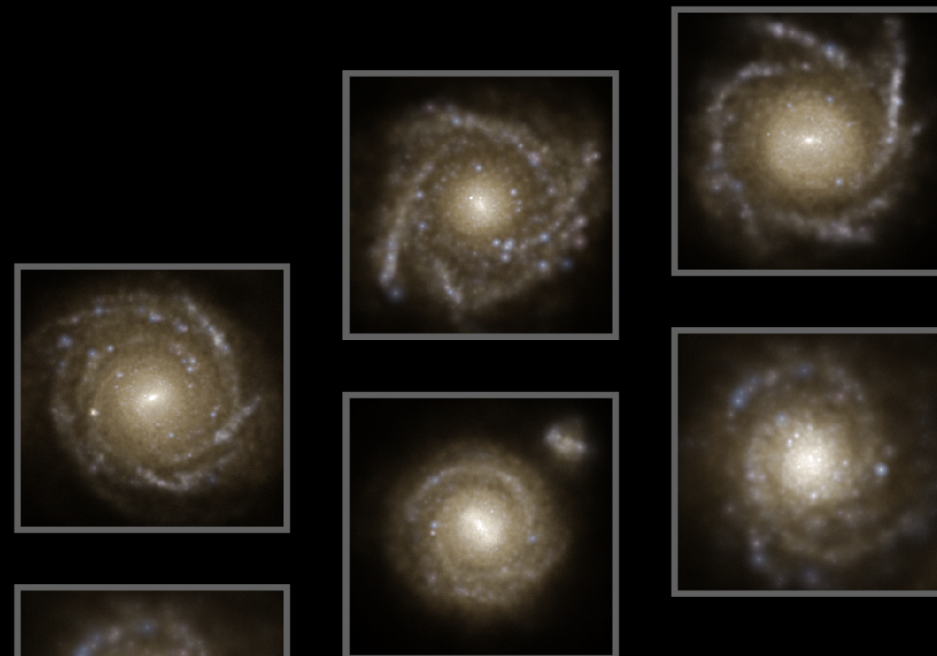
Robert Kennicutt, Jr. (Principal Investigator), Daniela Calzetti (Deputy Principal Investigator), Charles Engelbracht (Technical Contact), Lee Armus, George Bendo, Caroline Bot, Brent Buckalew, John Cannon, Daniel Dale, Bruce Draine, Karl Gordon, Albert Grauer, David Hollenbach, Tom Jarrett, Lisa Kewley, Claus Leitherer, Aigen Li, Sangeeta Malhotra, Martin Meyer, John Moustakas, Eric Murphy, Michael Regan, George Rieke, Marcia Rieke, Helene Roussel, Kartik Sheth, J.D. Smith, Michele Thornley, Fabian Walter & George Helou



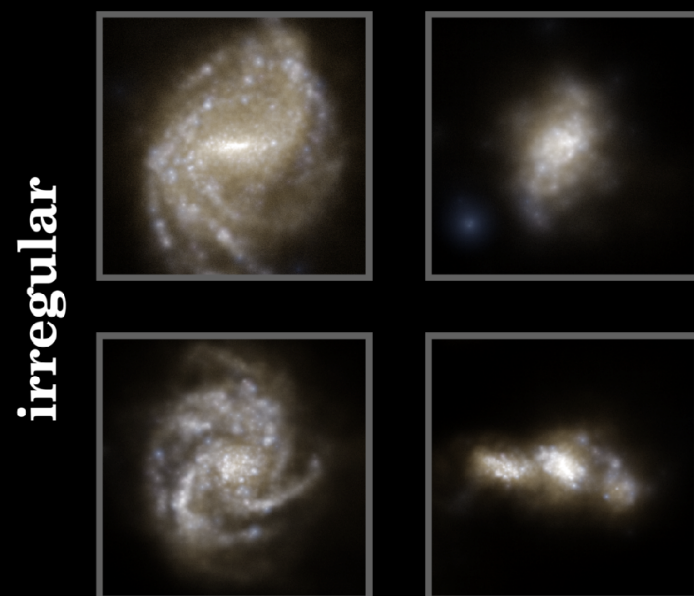
Galaxies : simulations



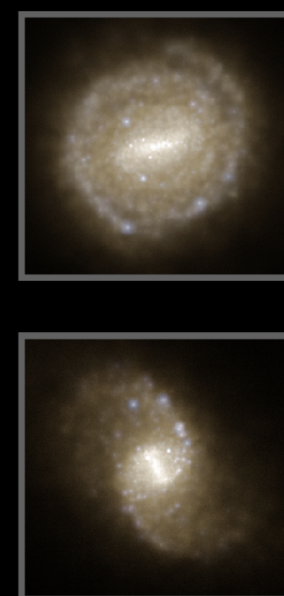
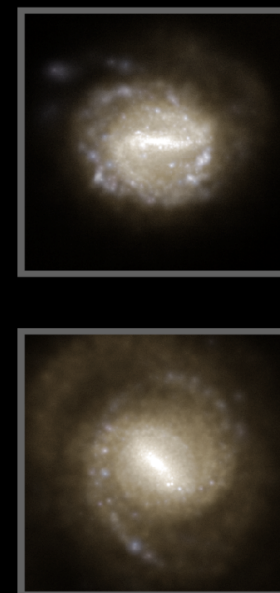
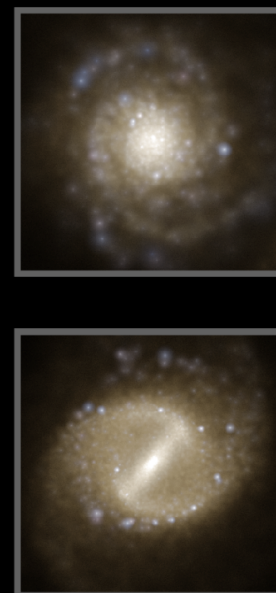
ellipticals



disk galaxies



irregular

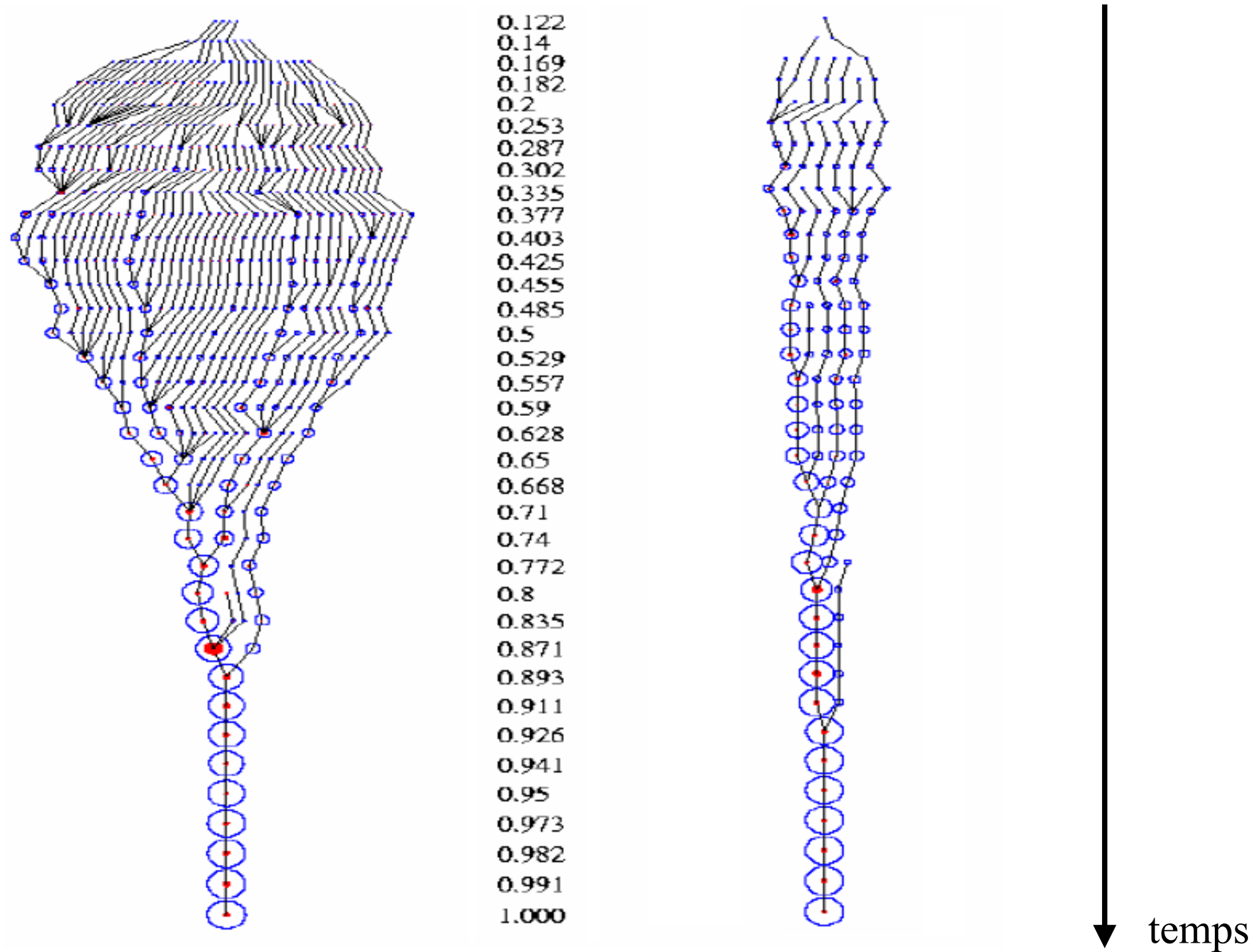


La croissance des galaxies : les fusions

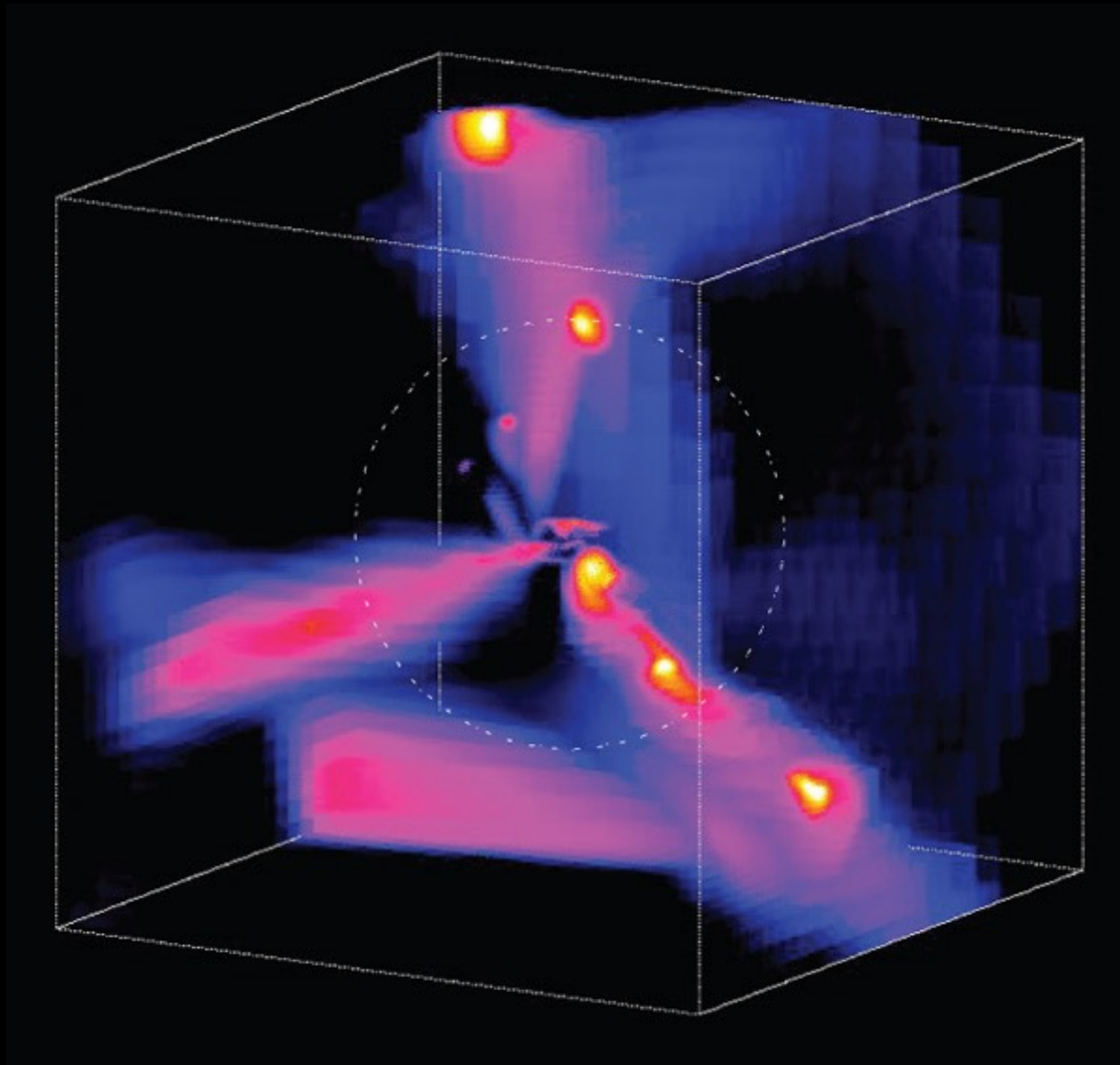


La croissance des galaxies : les fusions

La croissance des galaxies : les fusions



La croissance des galaxies : les filaments issus de la toile cosmique

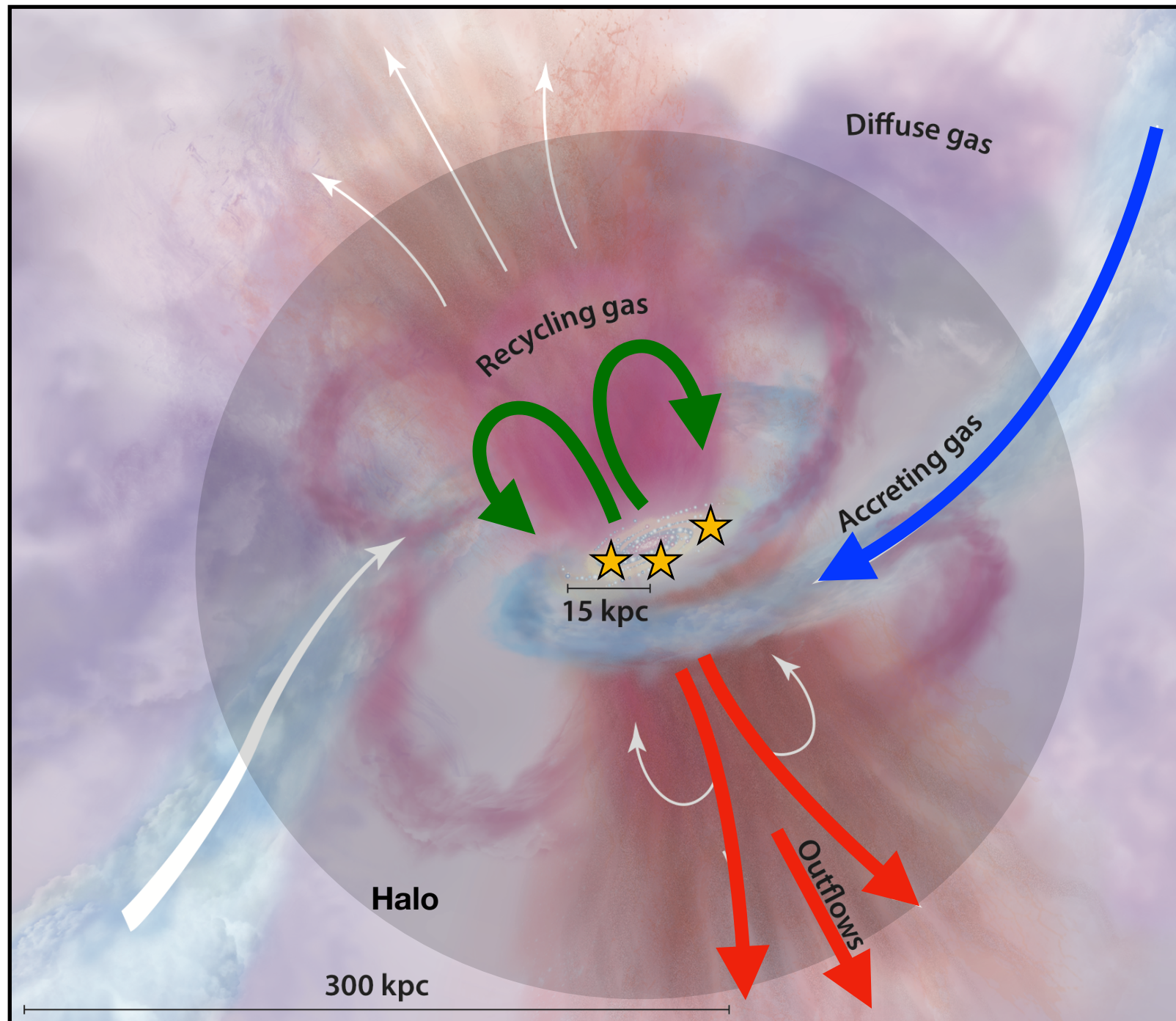


Dekel et al., incl. Freundlich (2009)

Le gaz dans les galaxies

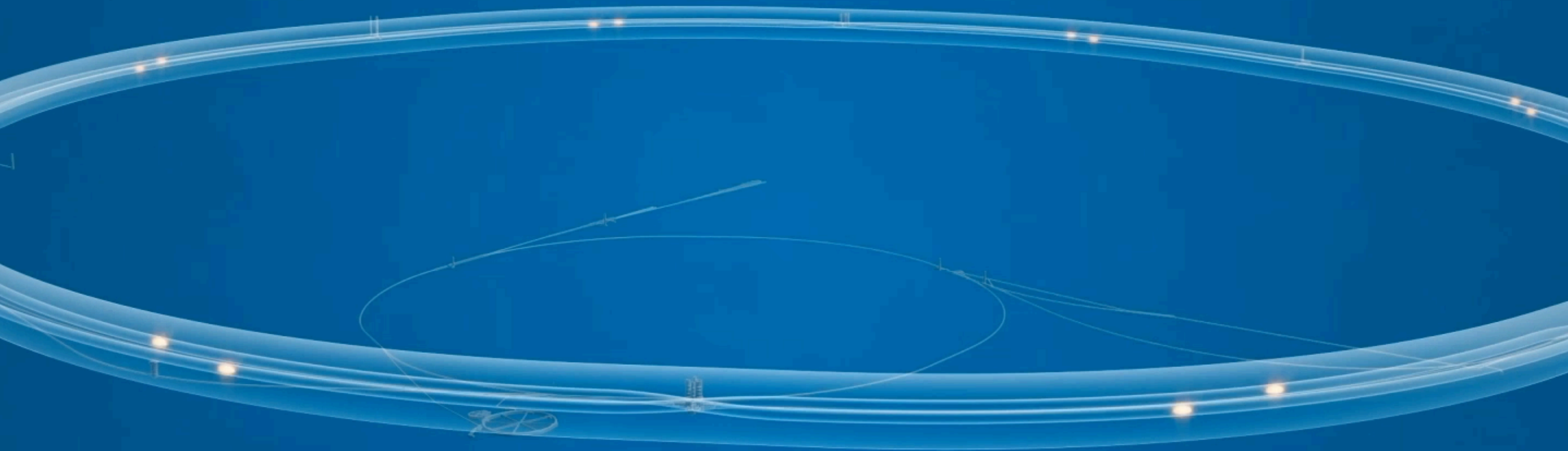
$$\dot{M}_{\text{gaz}} = \dot{M}_{\text{gaz,in}} - \dot{M}_{\star} - \eta \dot{M}_{\star} + R \dot{M}_{\star}$$

Gas accretion ♦ Star formation ♦ Gas ejection (feedback) ♦ Recycling

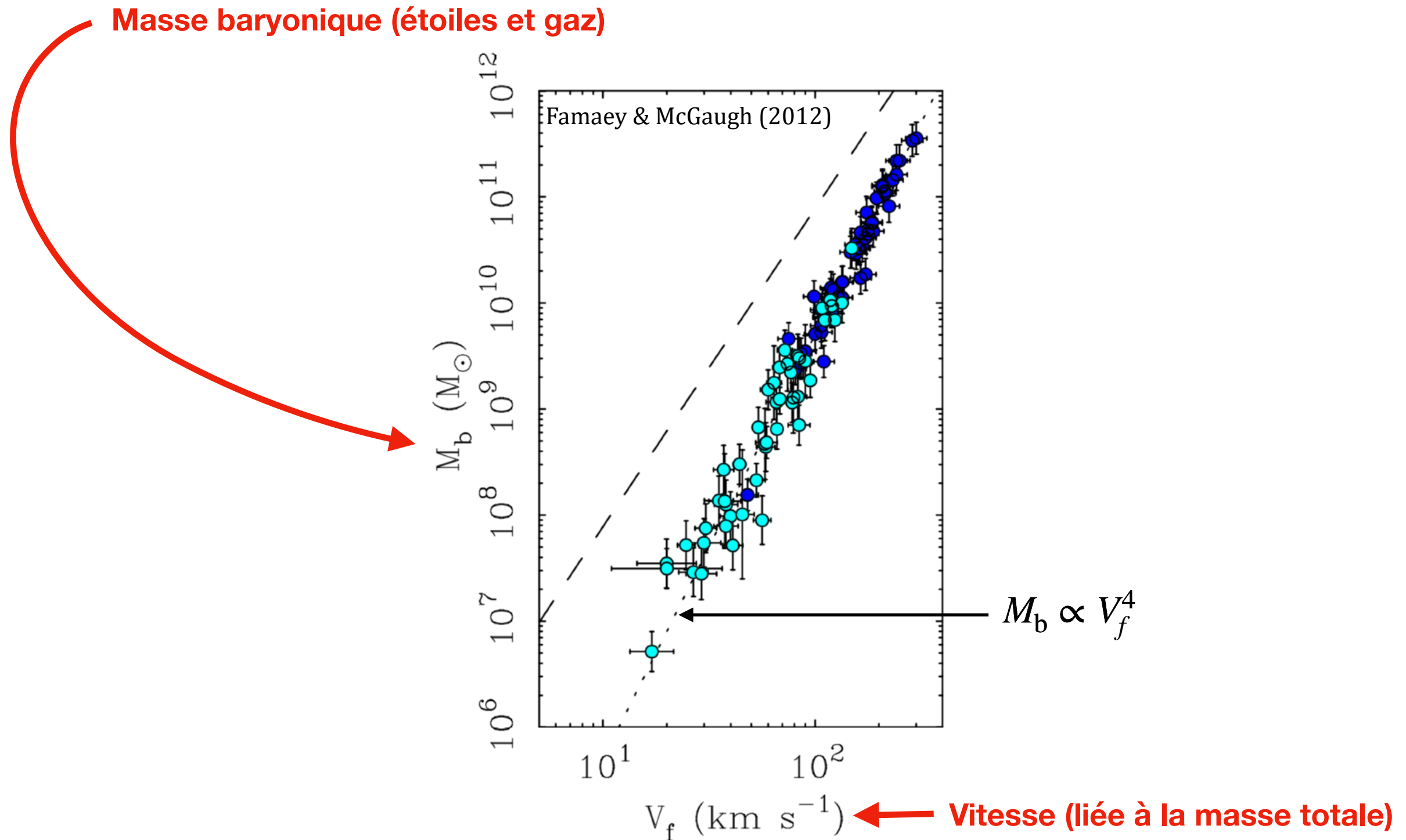


Tumlinson, Peebles & Werk (2017)

Les défis du modèle Λ CDM : la non-détection des WIMPS

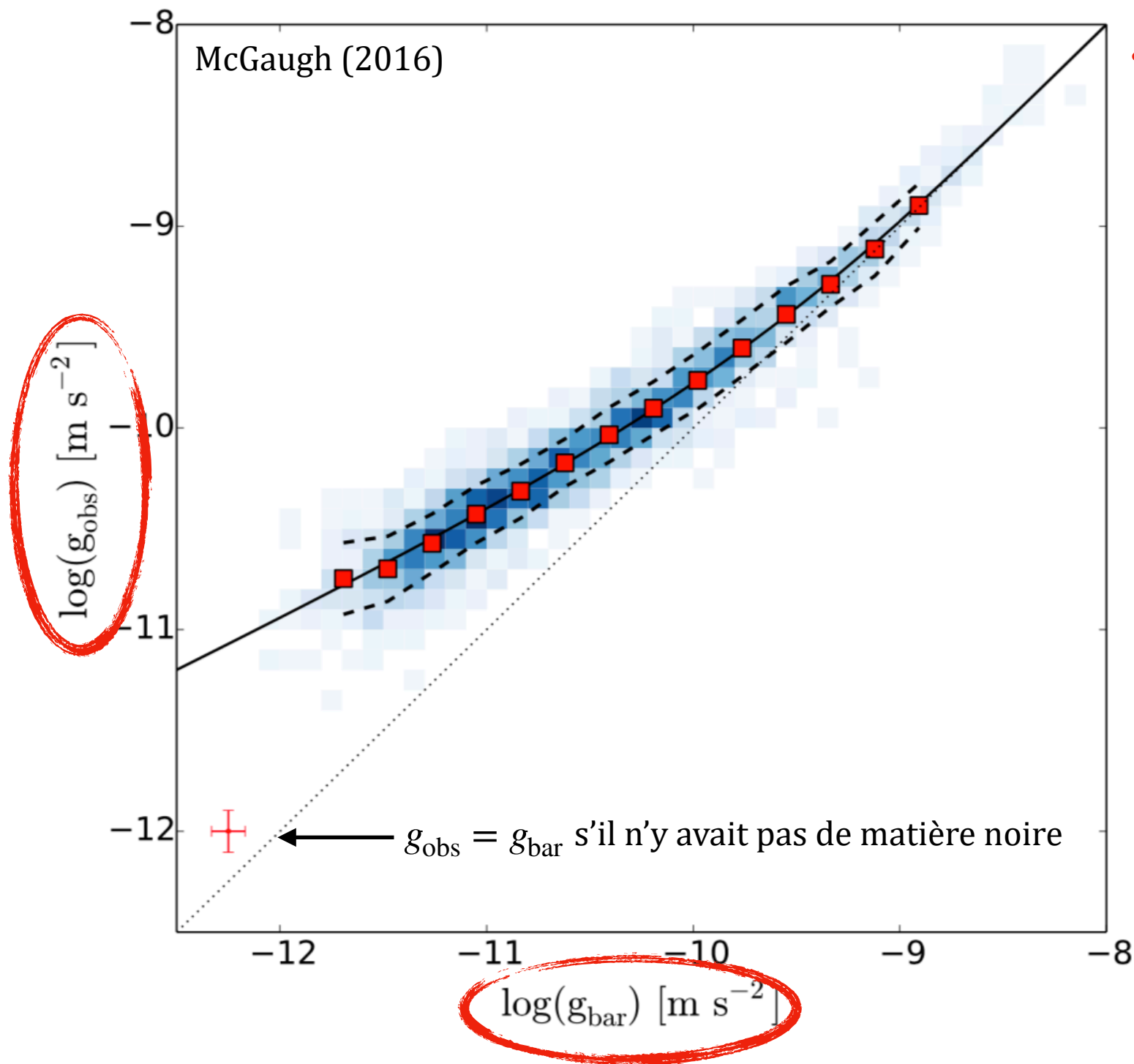


Les défis du modèle Λ CDM : la corrélation entre masse baryonique et cinématique



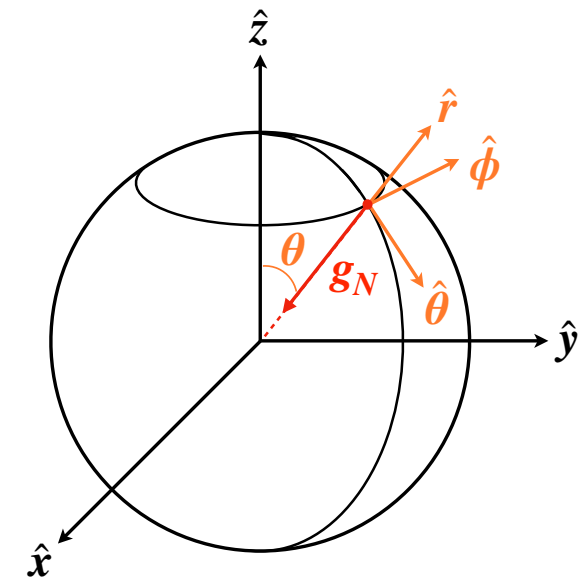
Relation de Tully-Fisher baryonique : tout se passe comme si la quantité de baryons était fixée par la quantité de matière noire du halo, alors même que le halo s'étend bien au-delà de la galaxie et que les processus d'évolution comprennent des fusions violentes et aléatoires qui devraient apporter une certaine variabilité...

Les défis du modèle Λ CDM : l'accélération radiale



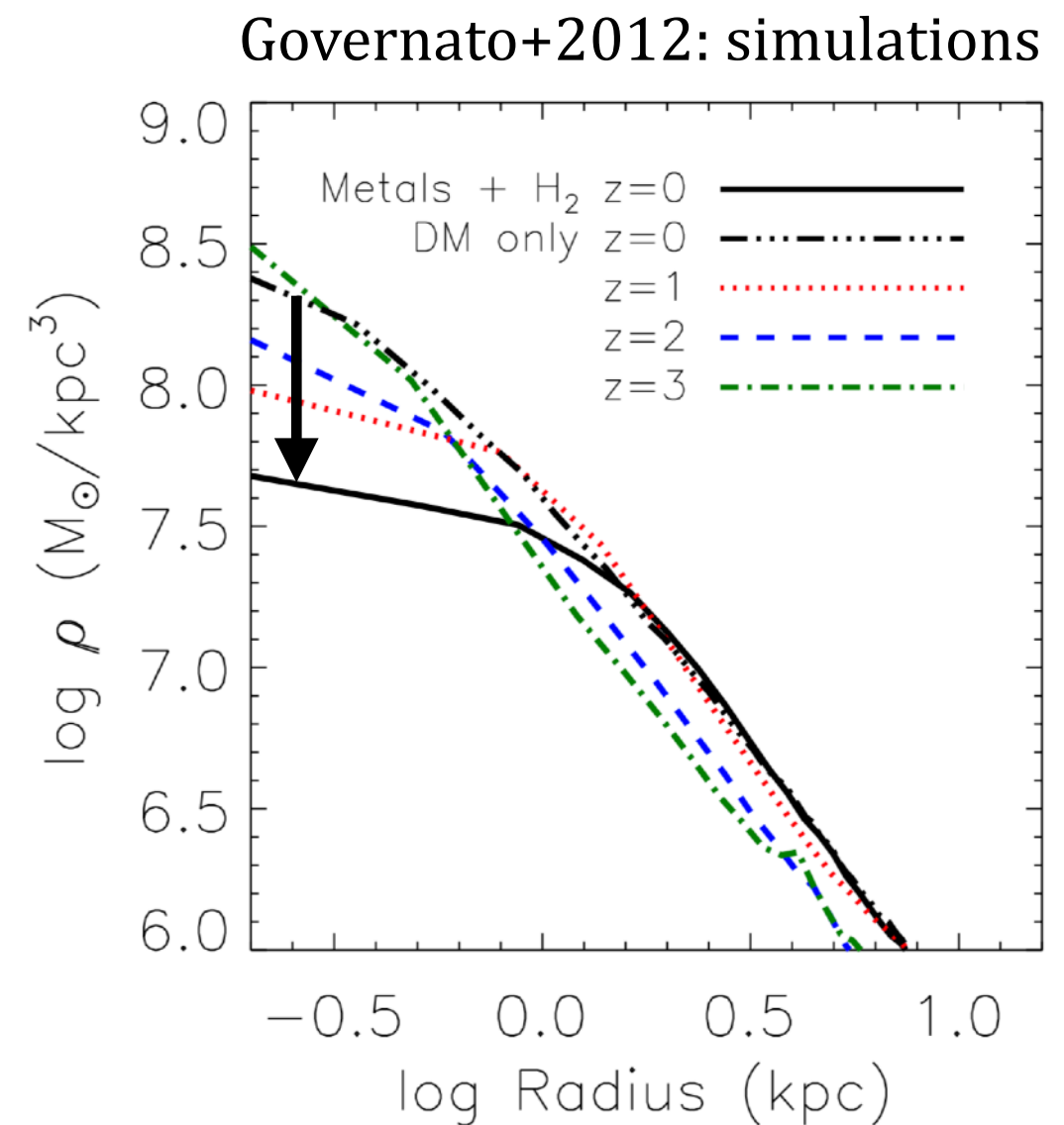
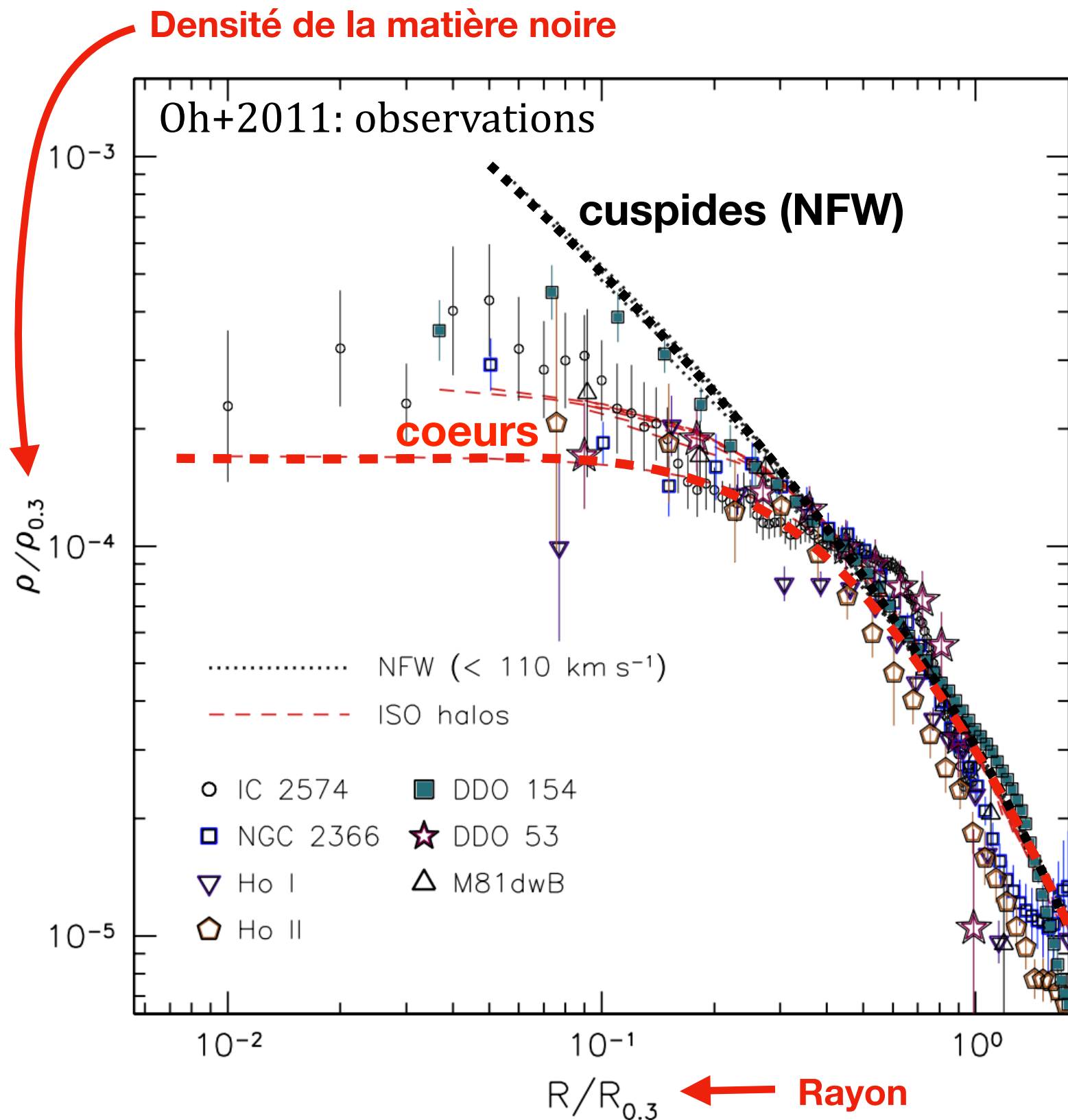
g_{obs} obtenue à partir de la vitesse observée
(liée à la masse totale)

g_{bar} obtenue à partir de la distribution des
baryons (gaz et étoiles)



Relation de l'accélération radiale : tout se passe comme si la quantité de baryons était fixée par la quantité de matière noire du halo, alors même que le halo s'étend bien au-delà de la galaxie et que les processus d'évolution comprennent des fusions violentes et aléatoires qui devraient apporter une certaine variabilité...

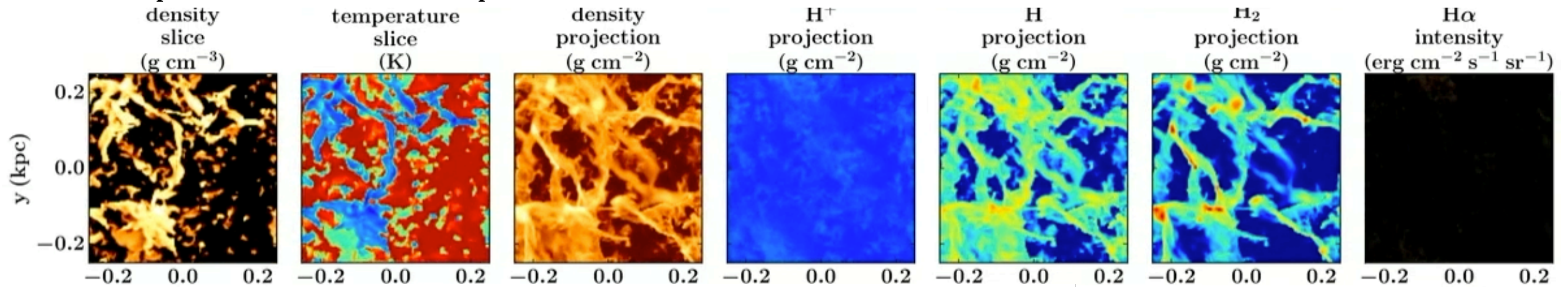
Les défis du modèle Λ CDM : la diversité de la forme des halos de matière noire



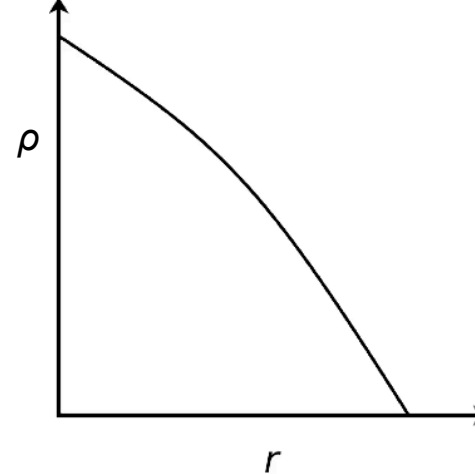
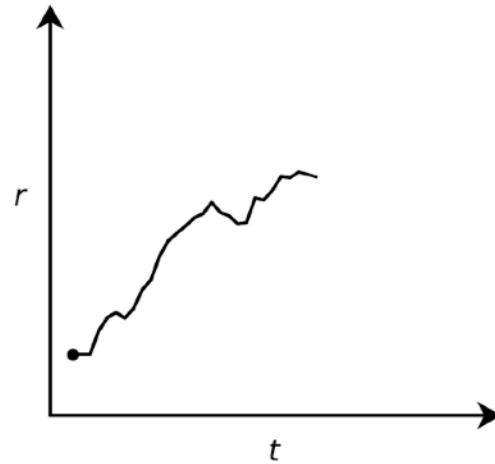
Les défis du modèle Λ CDM : la diversité de la forme des halos de matière noire

Les mouvements de gaz dus au feedback peuvent aboutir à la formation d'un coeur :

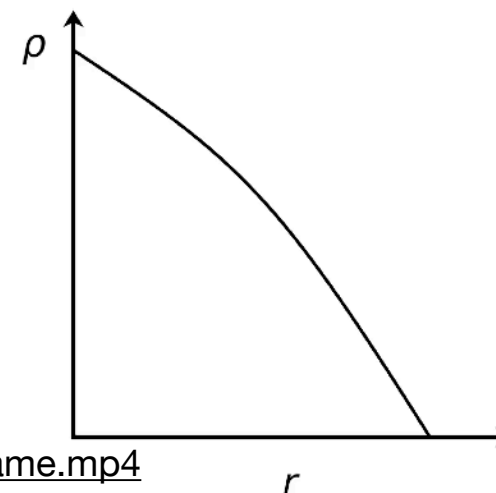
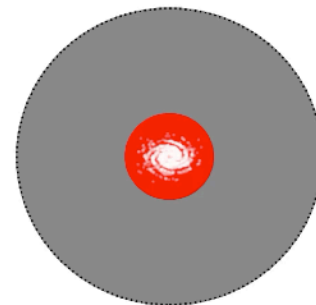
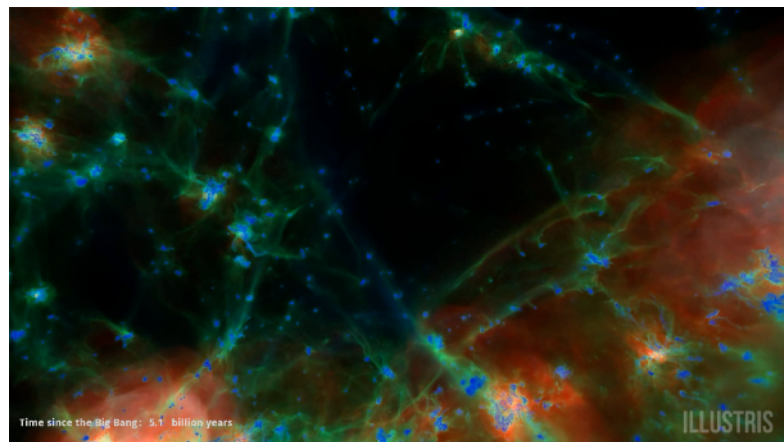
- soit par l'effet cumulatif des petites fluctuations du milieu interstellaire



lien video : <https://hera.ph1.uni-koeln.de/~silcc/>



- soit par l'ejection brutale d'une grande quantité de gaz

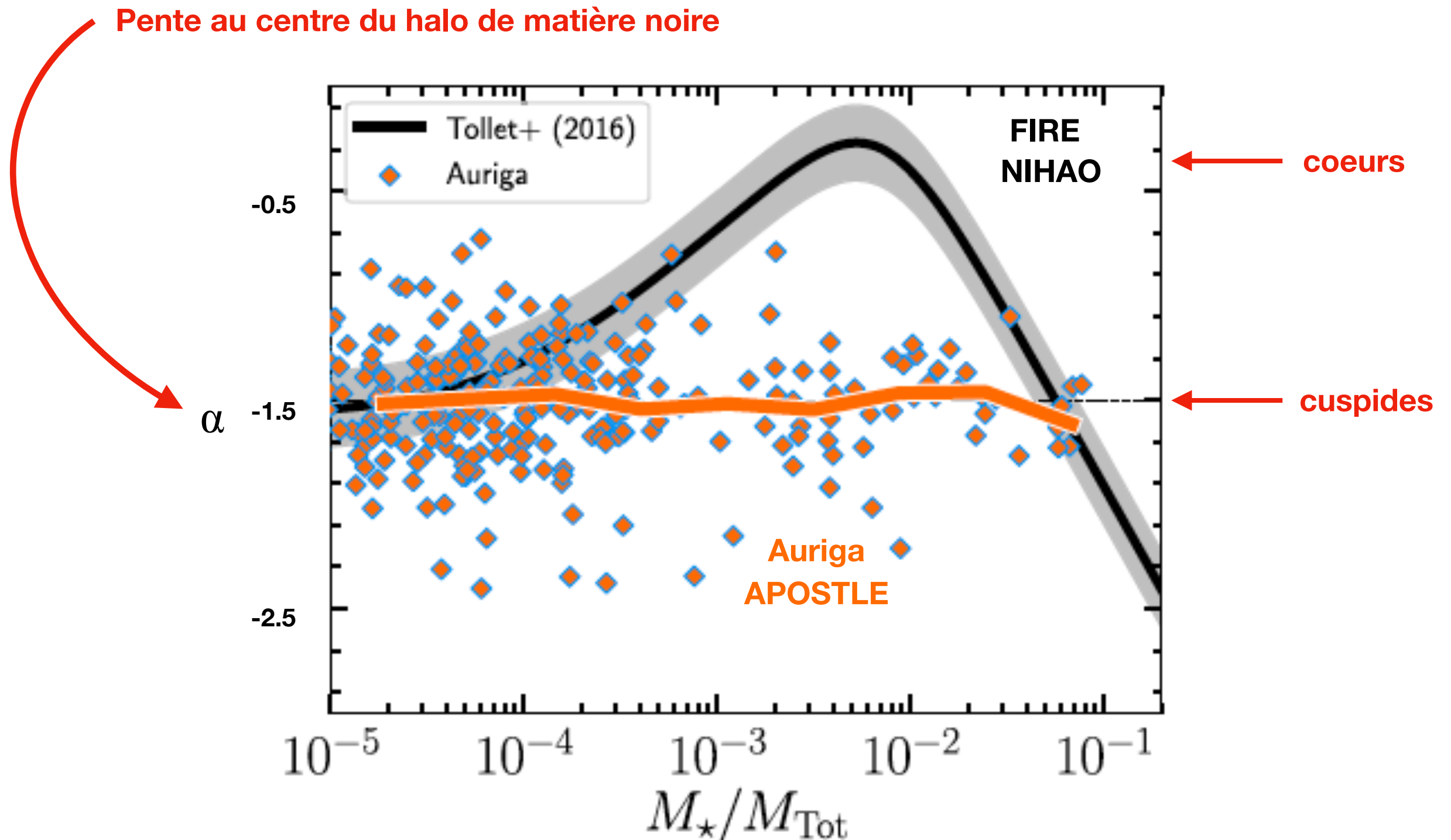


lien video : https://www.illustris-project.org/movies/illustris_movie_rot_sub_frame.mp4

Pontzen & Governato (2012), El-Zant, Freundlich & Combes (2016), Freundlich et al. (2020)

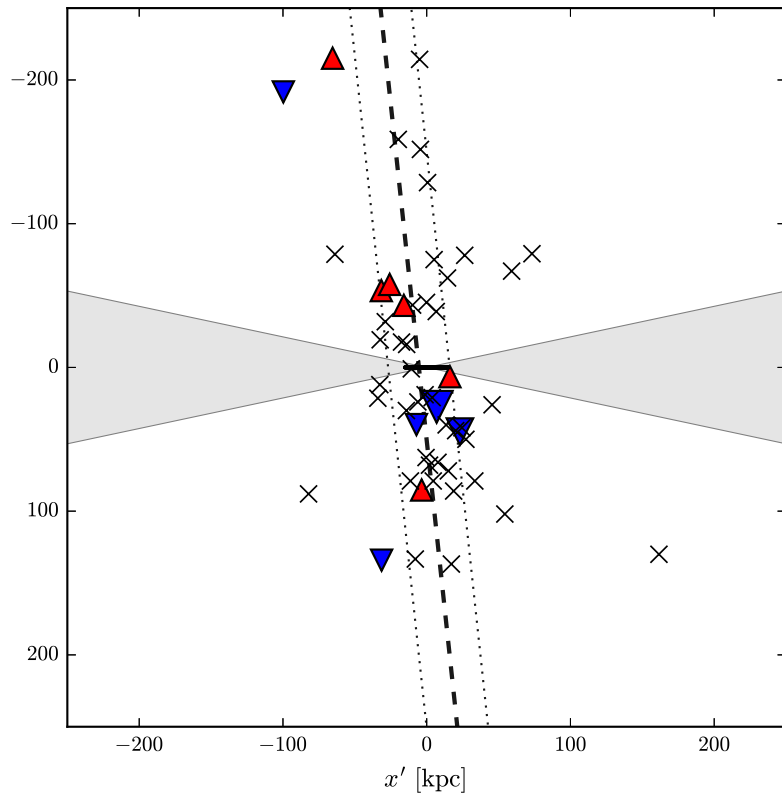
Les défis du modèle Λ CDM : la diversité de la forme des halos de matière noire

Mais non seulement les simulations ne s'accordent pas sur l'intensité du feedback et leur effet sur la répartition de la matière noire, mais on observe une grande diversité de courbes de rotation à masse totale donnée

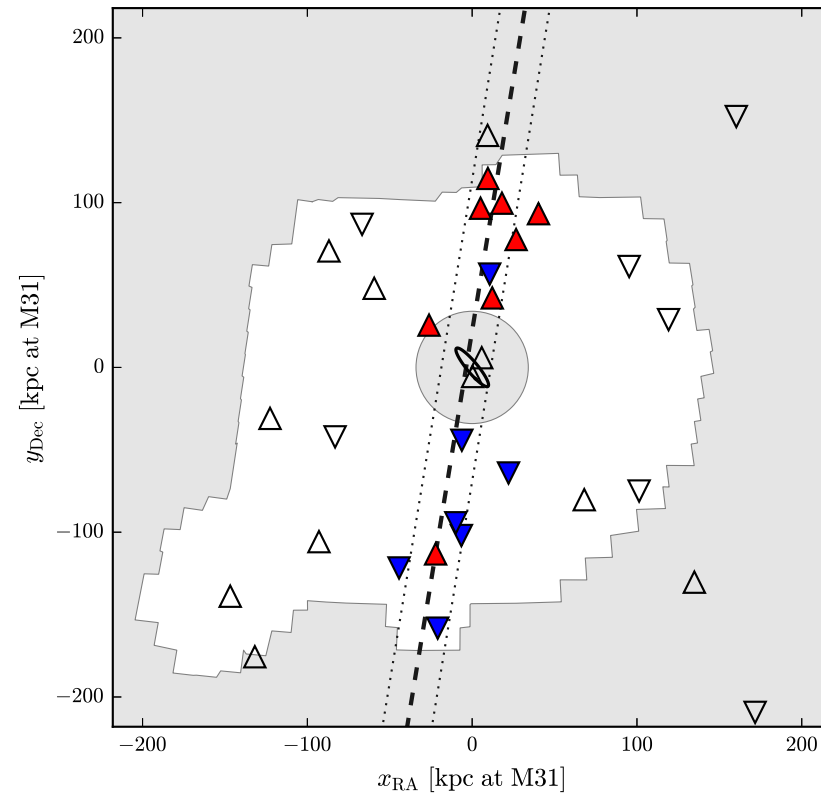


Les défis du modèle Λ CDM : les plans de satellites

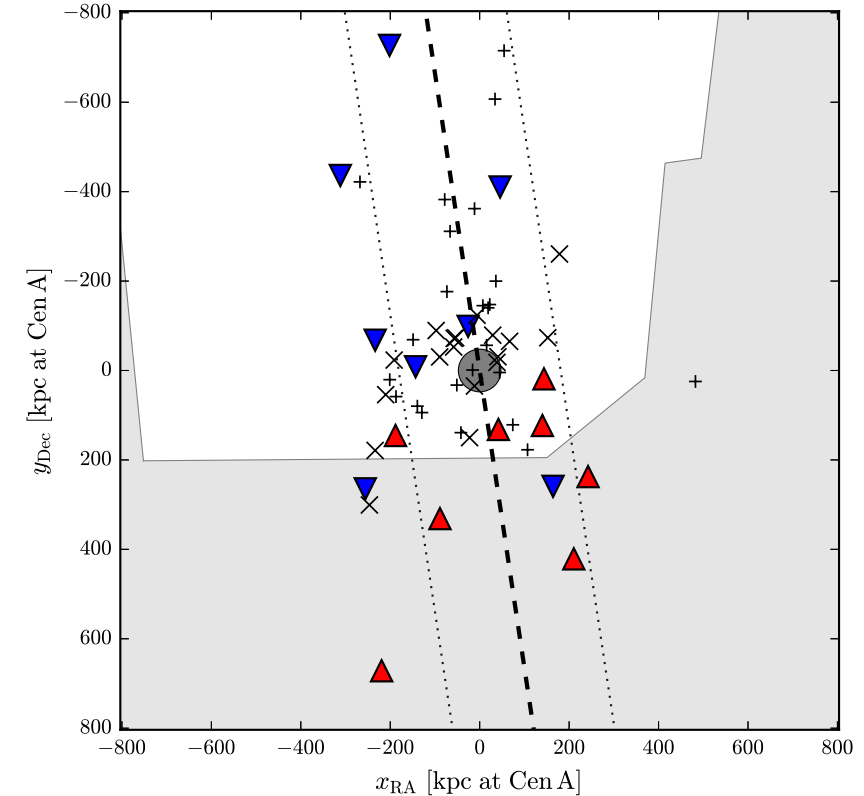
Voie Lactée



Andromède

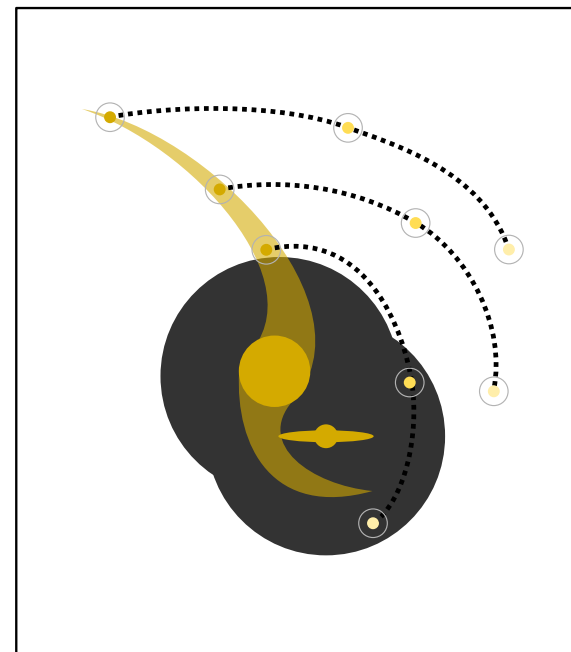
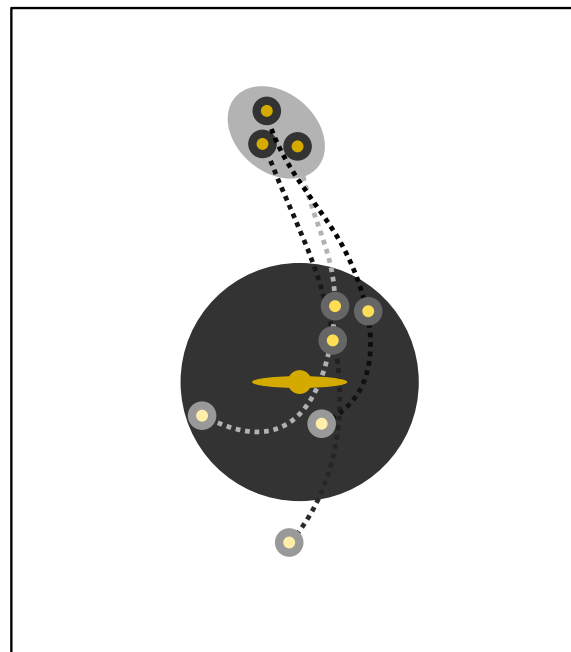
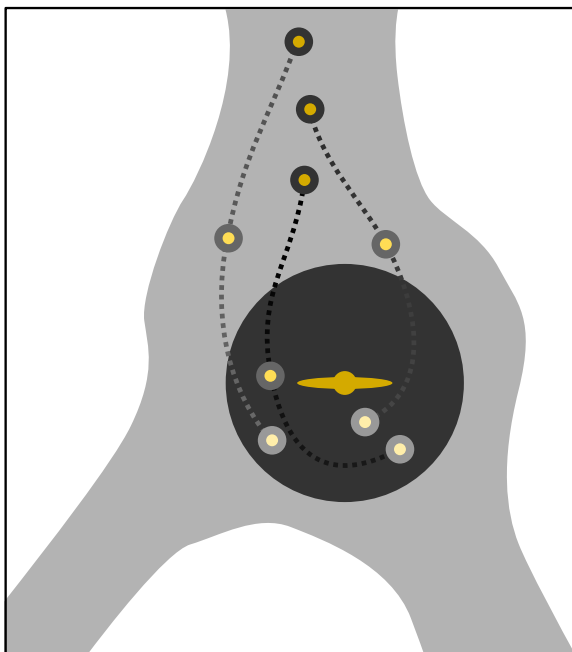


Centaurus A



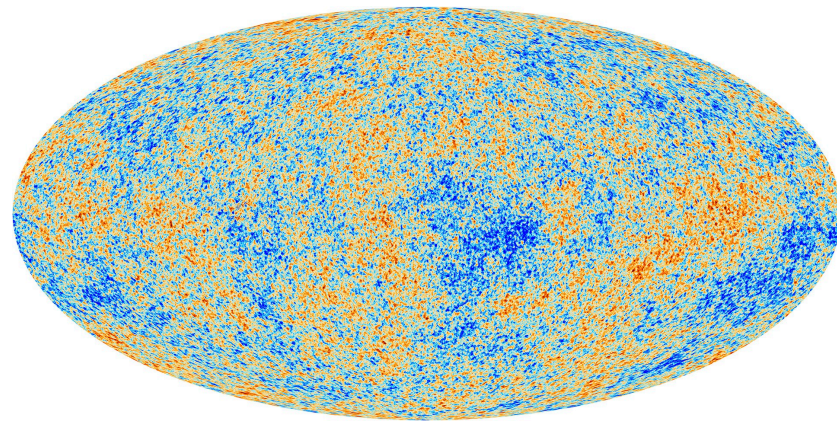
Les simulations Λ CDM indiquent un très faible nombre de tels plans...

Filaments issus de la toile cosmique ? Accrétion groupée ? Naines de marrées ?



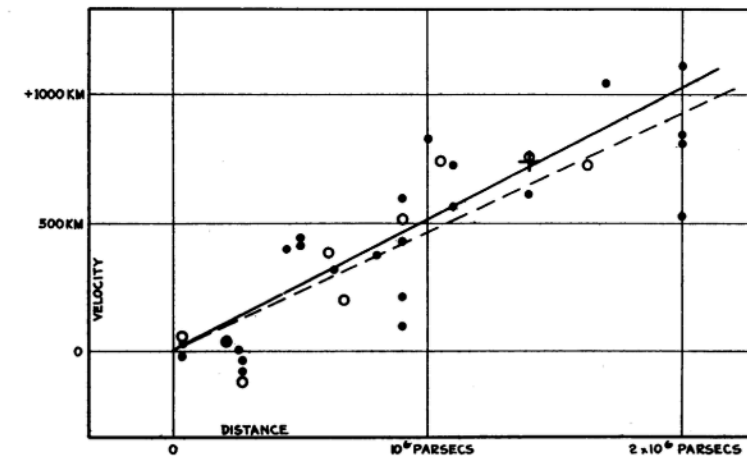
Les défis du modèle Λ CDM : les différentes valeurs de la constante de Hubble

Fond diffus cosmologique




Planck
(2018)

Univers local

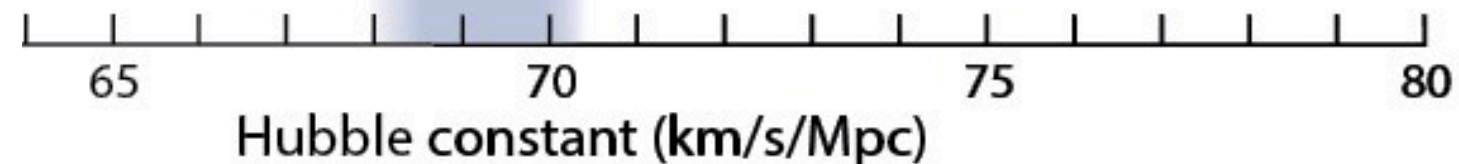



SH0ES (2018)


Carnegie (2018, H band)


Carnegie (2018, B band)


H0LiCOW (2018)



Matière noire : mirage ou réalité ?

Cours 1 (10/01/23) : Peser l'Univers grâce à la loi de la gravitation

- Modéliser le mouvement des astres : Ptolémée, Copernic, Newton, Einstein
- Mesurer la masse de la Terre et du Soleil
- Découvrir l'invisible: Neptune, les exoplanètes, le trou noir central de notre Galaxie

Cours 2 (17/01/23) : Le problème de la masse manquante : la matière noire

- La galaxie d'Andromède à différentes longueurs d'onde : le visible et l'invisible
- Les différents types de galaxies
- Les courbes de rotation des galaxies et la matière noire

Cours 3 (24/01/23) : La nature de la matière noire

- Les différentes indications en faveur de la matière noire
- A la recherche de la masse manquante : gaz, MACHOs, trous noirs, neutrinos, WIMPS, etc.
- Le fond diffus cosmologique, la nucléosynthèse primordiale et l'expansion de l'Univers
- Le modèle cosmologique actuel

Cours 4 (31/01/23) : Formation & évolution des galaxies : succès et défis du modèle cosmologique actuel

- Le scénario hiérarchique de formation des galaxies
- La toile cosmique et les halos de matière noire
- La formation des étoiles et les phénomènes de rétroaction
- La non-détection des particules de matière noire
- Les problèmes à l'échelle des galaxies
- L'énergie noire et la constante de Hubble

Cours 5 (07/02/23) : Les alternatives à la matière noire froide

- Résoudre une partie des problèmes grâce aux phénomènes de rétroaction
- Les autres types de matière noire : chaude, tiède, floue, interagissant avec elle-même
- La gravité modifiée

Matière noire : mirage ou réalité ?

Cours 1 (10/01/23) : Peser l'Univers grâce à la loi de la gravitation

- Modéliser le mouvement des astres : Ptolémée, Copernic, Newton, Einstein
- Mesurer la masse de la Terre et du Soleil
- Découvrir l'invisible: Neptune, les exoplanètes, le trou noir central de notre Galaxie

Cours 2 (17/01/23) : Le problème de la masse manquante : la matière noire

- La galaxie d'Andromède à différentes longueurs d'onde : le visible et l'invisible
- Les différents types de galaxies
- Les courbes de rotation des galaxies et la matière noire

Cours 3 (24/01/23) : La nature de la matière noire

- Les différentes indications en faveur de la matière noire
- A la recherche de la masse manquante : gaz, MACHOs, trous noirs, neutrinos, WIMPS, etc.
- Le fond diffus cosmologique, la nucléosynthèse primordiale et l'expansion de l'Univers
- Le modèle cosmologique actuel

Cours 4 (31/01/23) : Formation & évolution des galaxies : succès et défis du modèle cosmologique actuel

- Le scénario hiérarchique de formation des galaxies
- La toile cosmique et les halos de matière noire
- La formation des étoiles et les phénomènes de rétroaction
- La non-détection des particules de matière noire
- Les problèmes à l'échelle des galaxies
- L'énergie noire et la constante de Hubble

Cours 5 (07/02/23) : Les alternatives à la matière noire froide

- Résoudre une partie des problèmes grâce aux phénomènes de rétroaction
- Les autres types de matière noire : chaude, tiède, floue, interagissant avec elle-même
- La gravité modifiée