

Observatoire

astronomique

de Strasbourg | ObAS

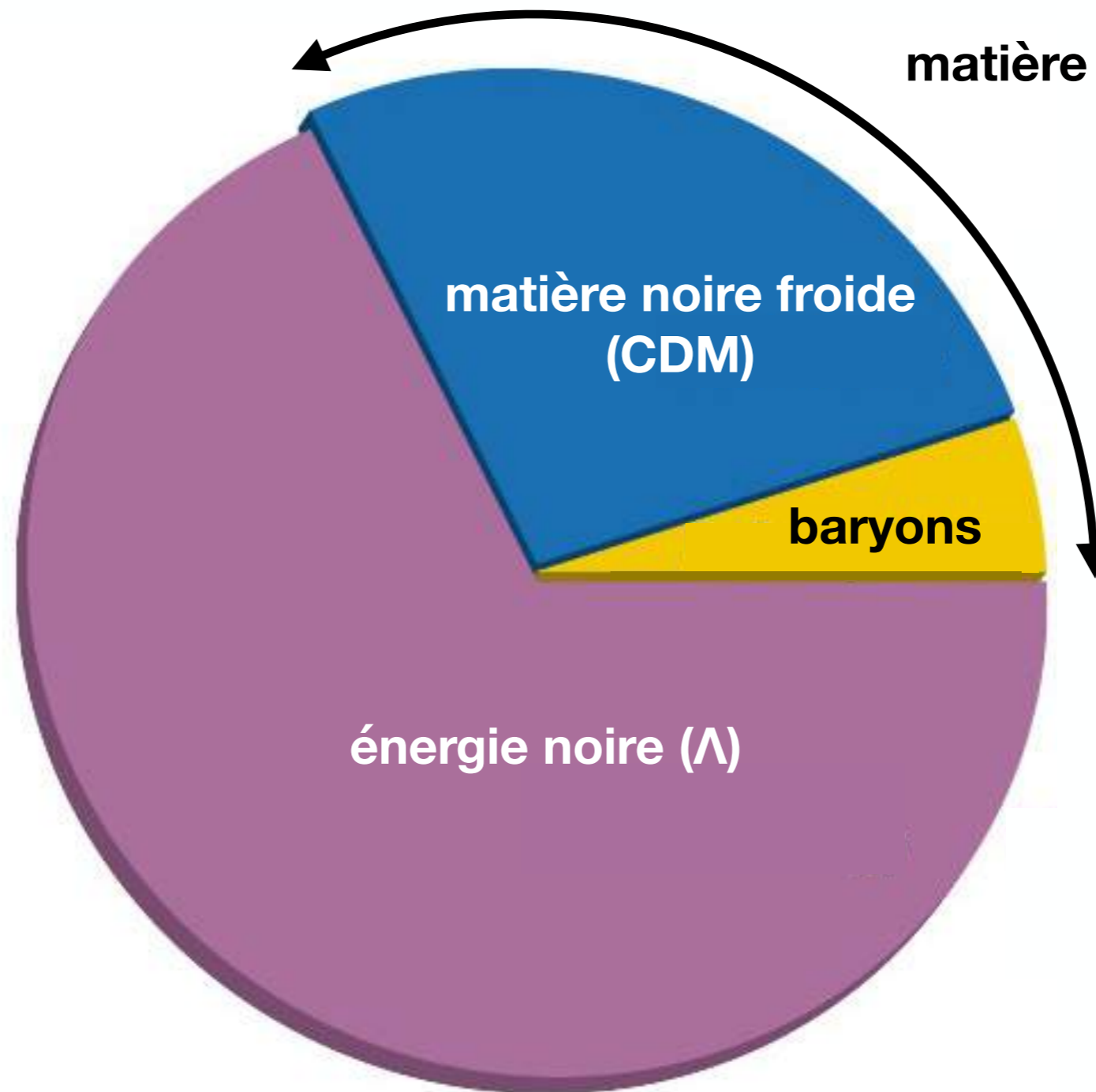
Défis à l'échelle des galaxies et alternatives à la matière noire froide

Jonathan Freundlich

Le modèle Λ CDM et ses succès

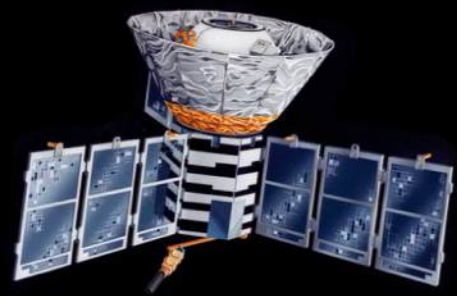
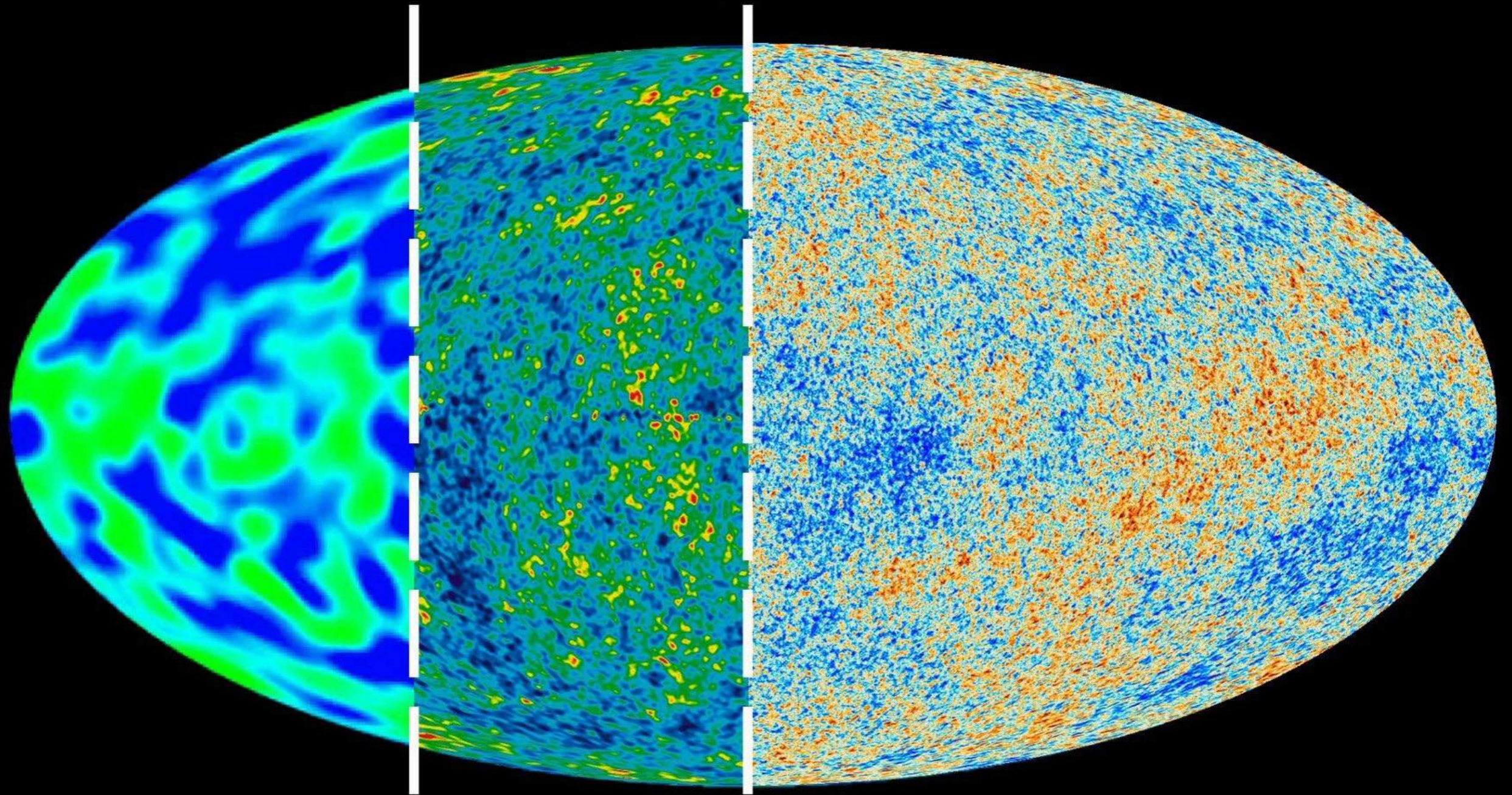
Λ : constante cosmologique, associée à l'accélération de l'expansion de l'Univers
CDM (*cold dark matter*): matière noire froide

La composition de l'Univers dans le modèle Λ CDM

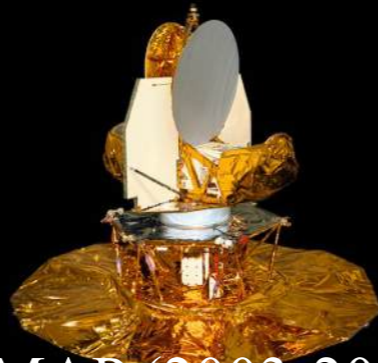


Λ : constante cosmologique, associée à l'accélération de l'expansion de l'Univers
CDM (*cold dark matter*): matière noire froide

Le fond diffus cosmologique fixe la composition de l'Univers



COBE (1989-1993)

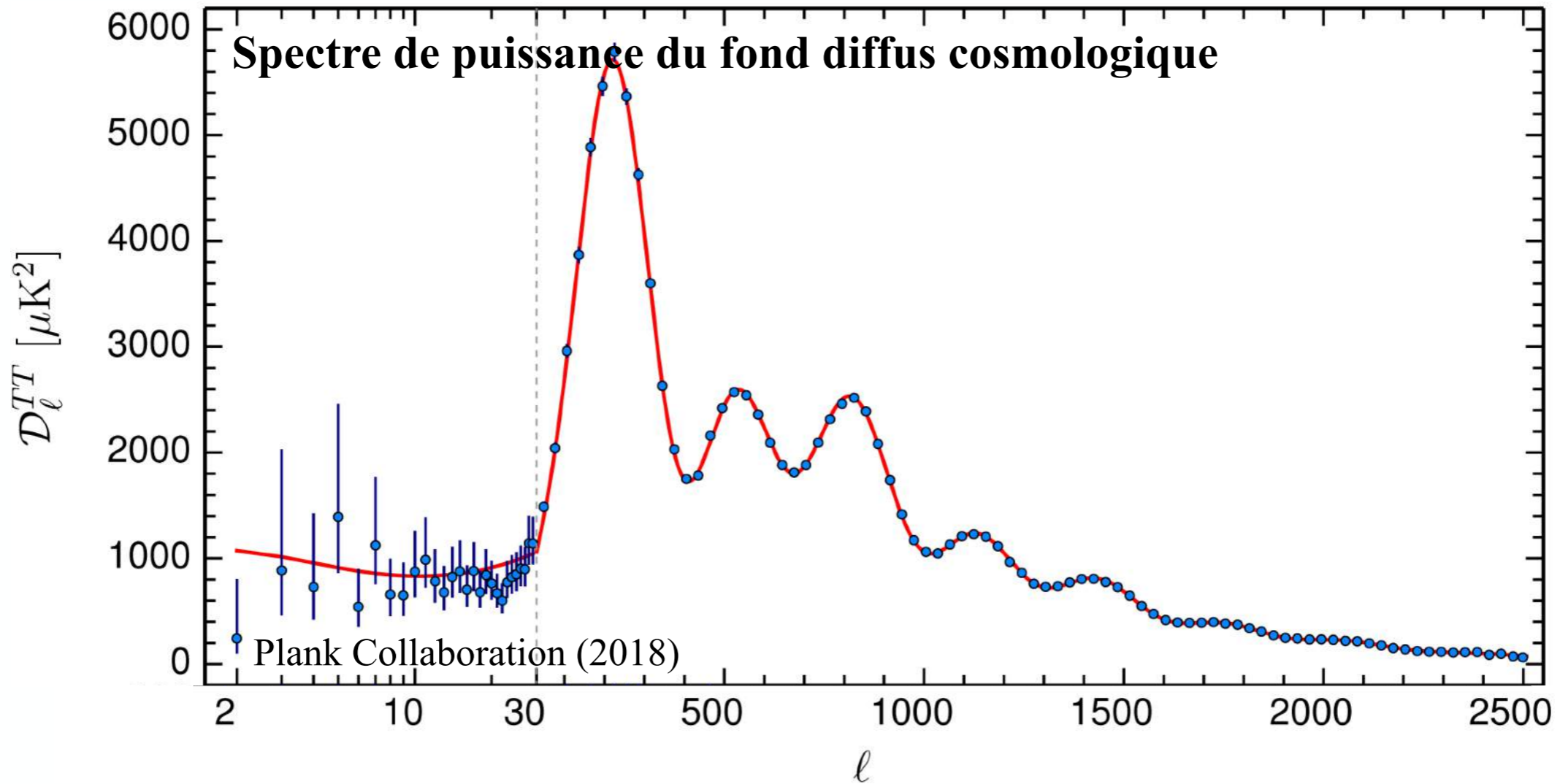


WMAP (2003-2012)

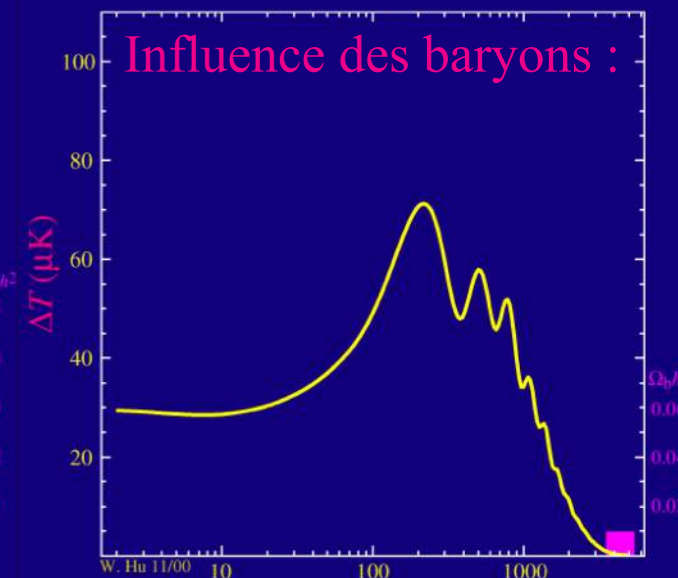
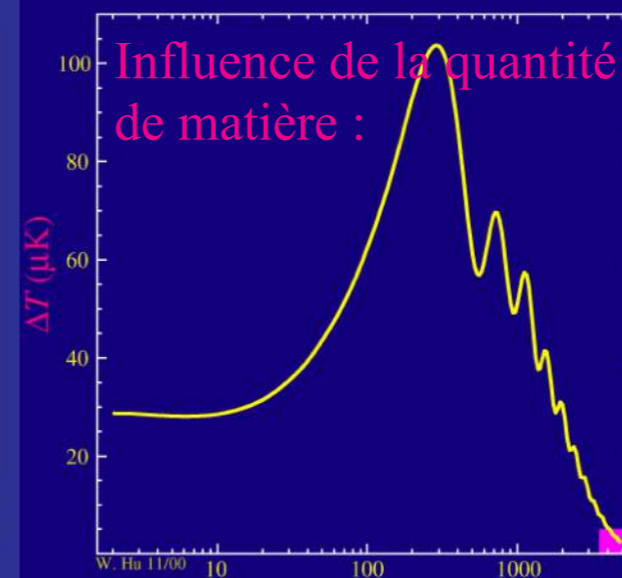
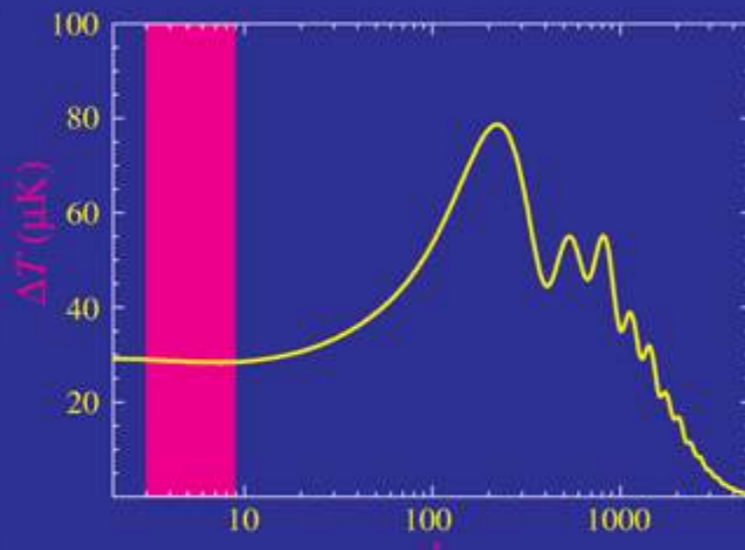
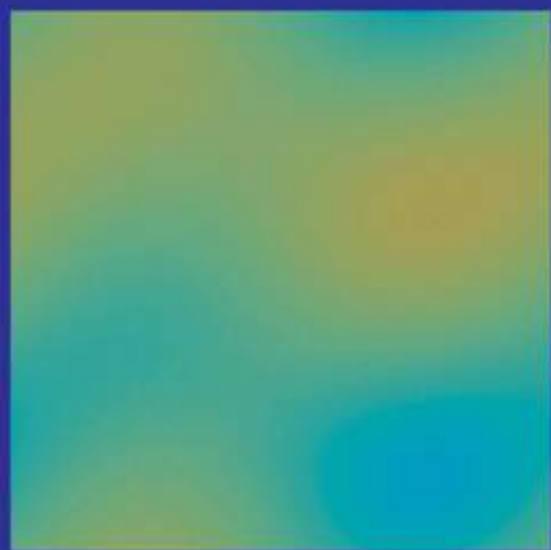


Planck (2009-2013)

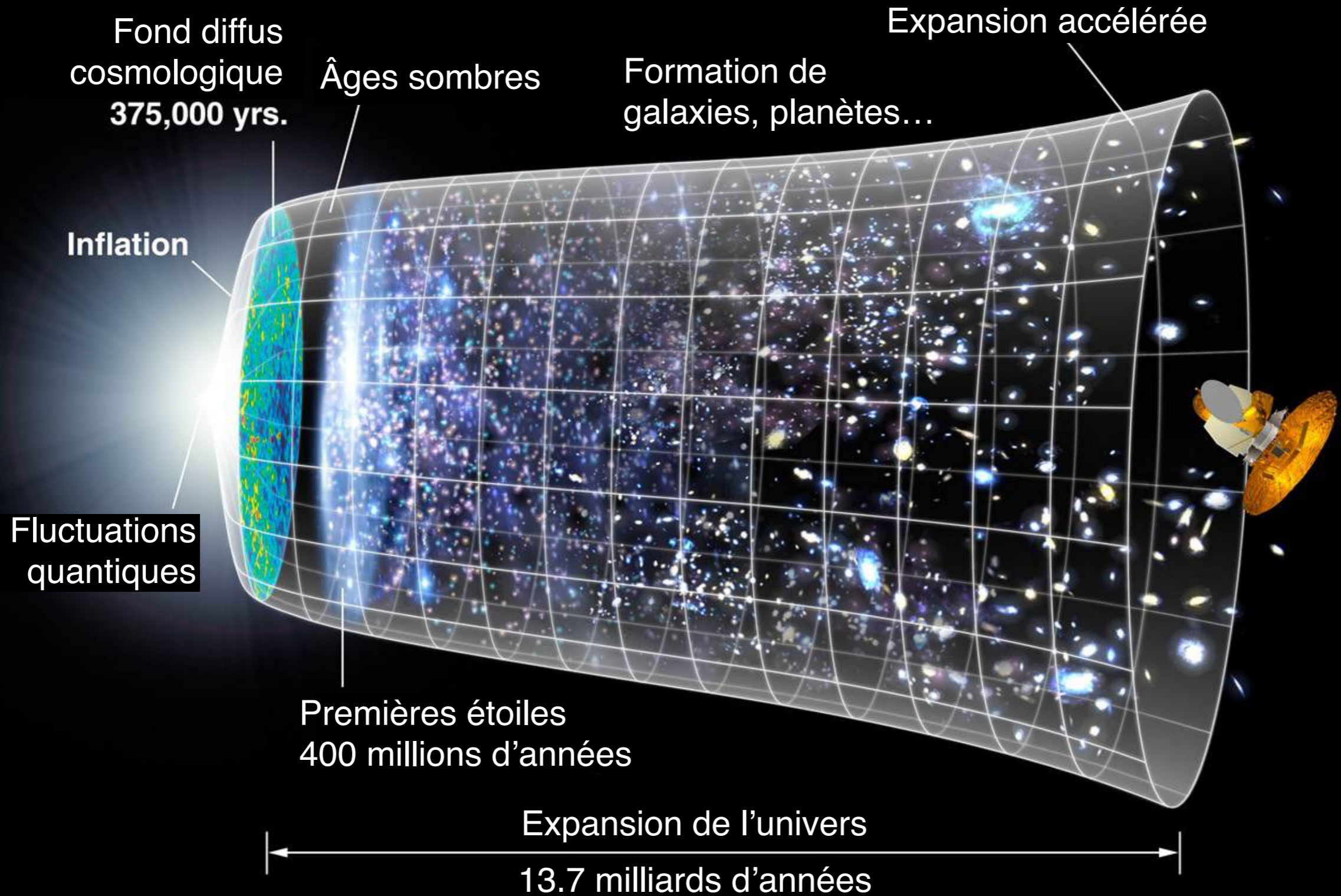
Le fond diffus cosmologique fixe la composition de l'Univers



Amplitude des fluctuations à différentes échelles :

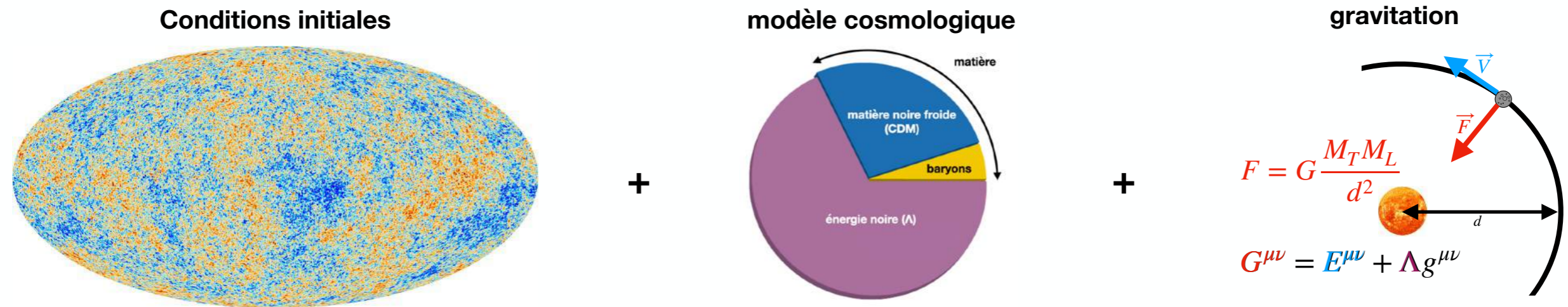


Un Univers en expansion

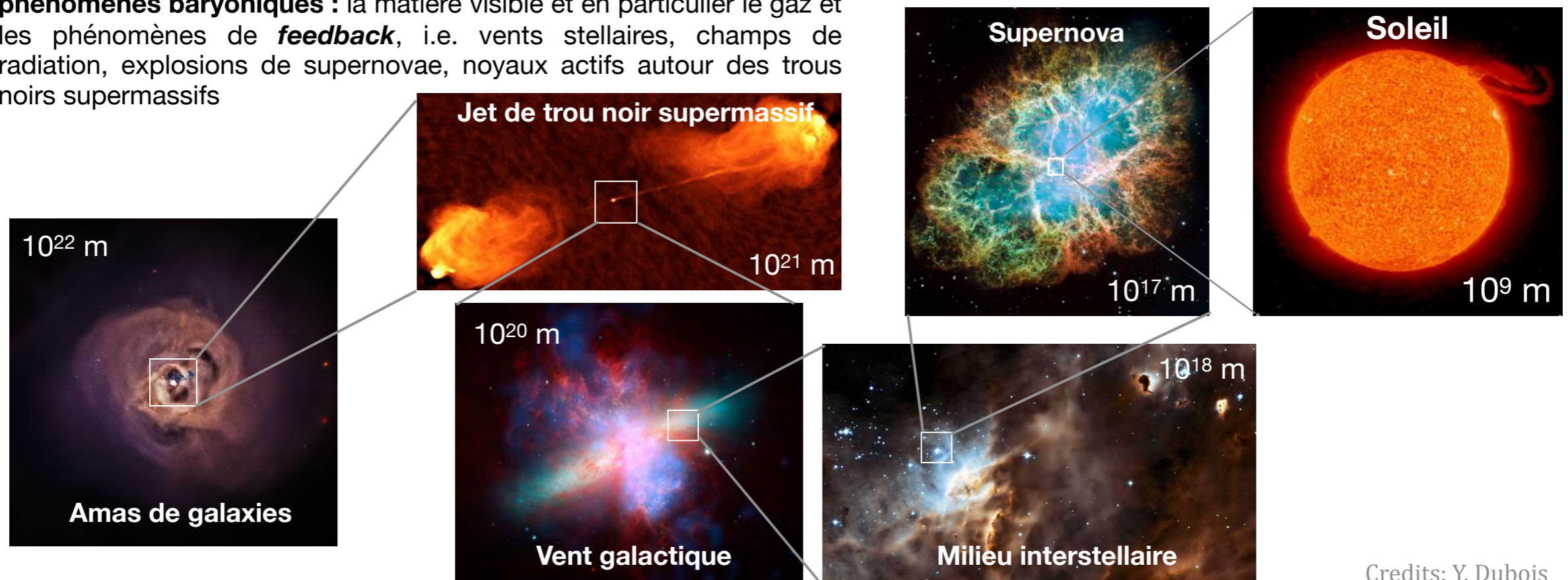


Simuler la formation des structures dans l'Univers

- **Un problème multi-échelles** : des sites de formation d'étoiles (10^{16} m) aux grandes structures (20^{22} m)
- **Différents types de phénomènes physiques** : gravité, dynamique des gaz, couplage entre le gaz et le rayonnement, dynamique des poussières, réactions chimiques, champs magnétiques, rayons cosmiques, formation et évolution des étoiles, etc.
- **Ingrédients** :



+ **phénomènes baryoniques** : la matière visible et en particulier le gaz et les phénomènes de *feedback*, i.e. vents stellaires, champs de radiation, explosions de supernovae, noyaux actifs autour des trous noirs supermassifs





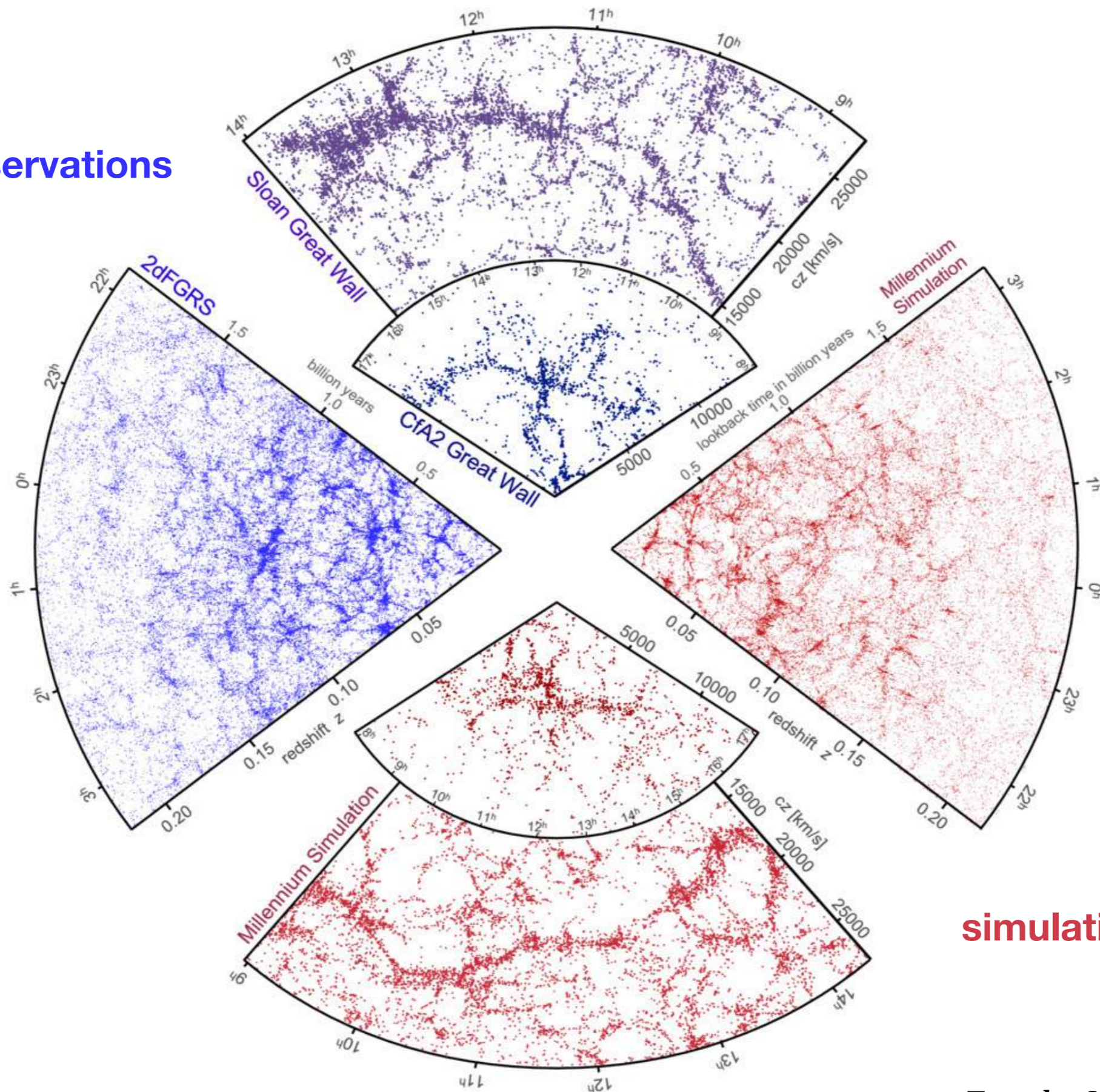
Illustris simulation

Time since the Big Bang: 3.6 billion years

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

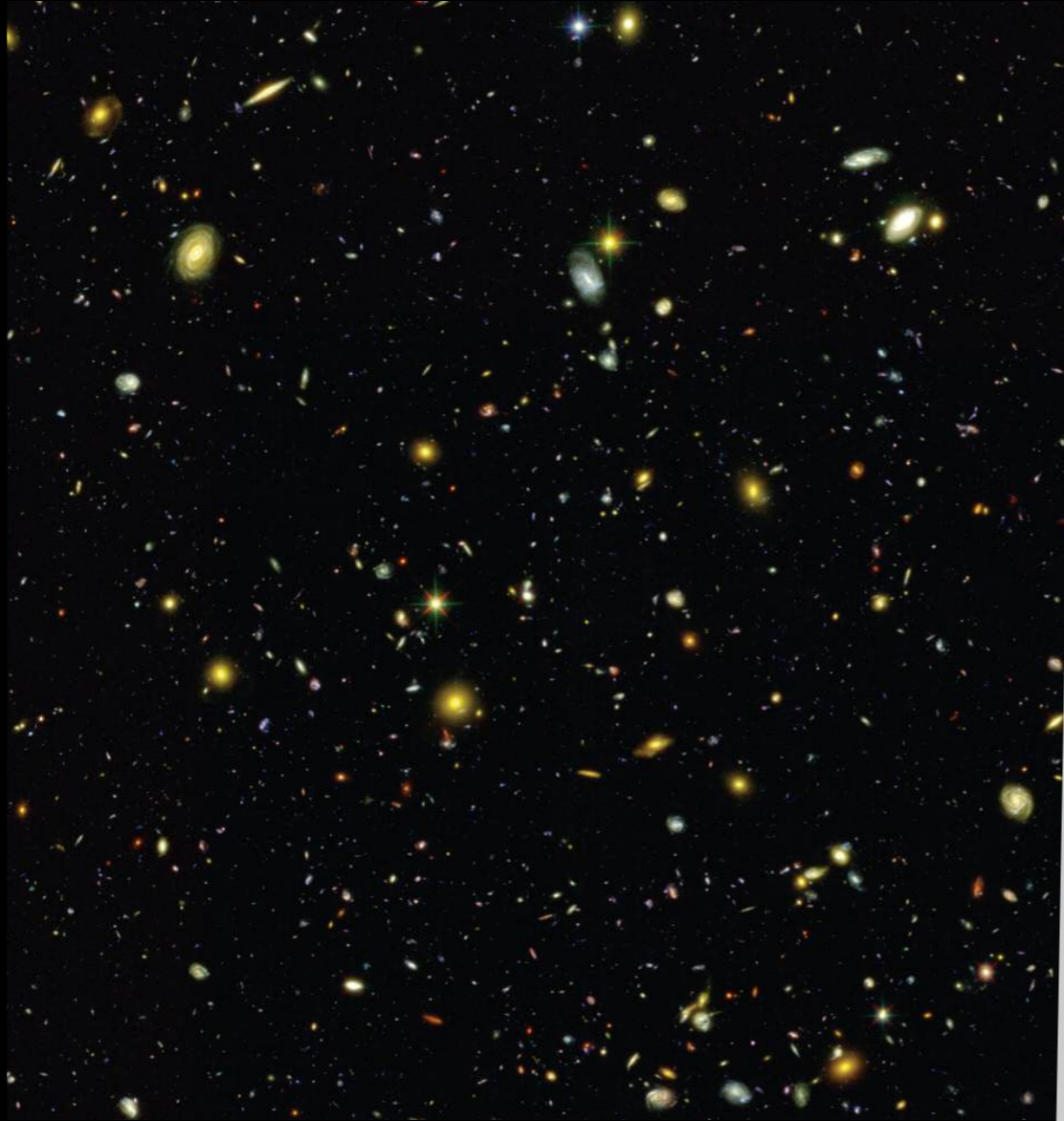
La toile cosmique : simulations et observations

observations



simulations

Galaxies : simulations et observations



Hubble Space Telescope



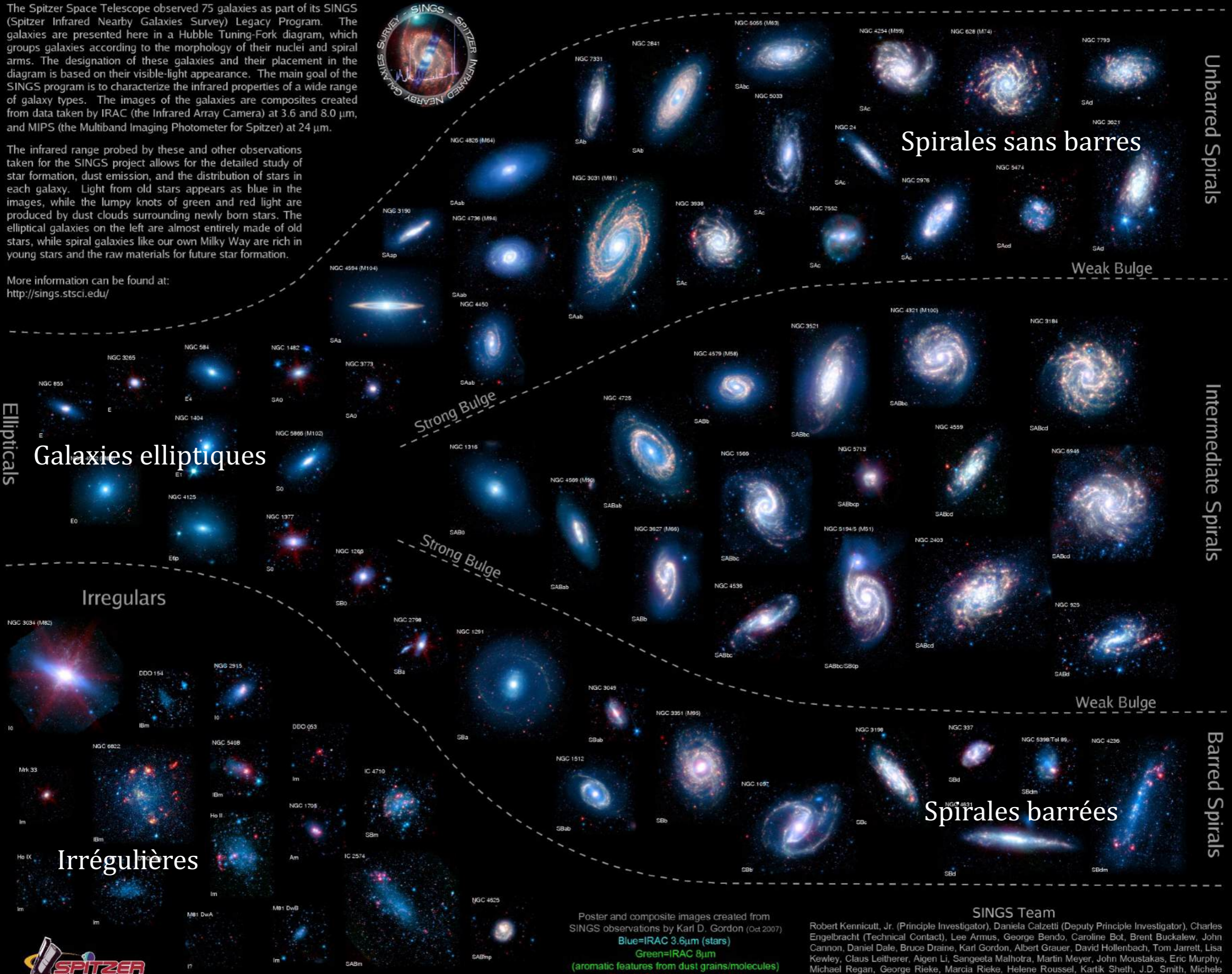
Illustris simulation

Galaxies : observations

The Spitzer Space Telescope observed 75 galaxies as part of its SINGS (Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey) Legacy Program. The galaxies are presented here in a Hubble Tuning-Fork diagram, which groups galaxies according to the morphology of their nuclei and spiral arms. The designation of these galaxies and their placement in the diagram is based on their visible-light appearance. The main goal of the SINGS program is to characterize the infrared properties of a wide range of galaxy types. The images of the galaxies are composites created from data taken by IRAC (the Infrared Array Camera) at 3.6 and 8.0 μm , and MIPS (the Multiband Imaging Photometer for Spitzer) at 24 μm .

The infrared range probed by these and other observations taken for the SINGS project allows for the detailed study of star formation, dust emission, and the distribution of stars in each galaxy. Light from old stars appears as blue in the images, while the lumpy knots of green and red light are produced by dust clouds surrounding newly born stars. The elliptical galaxies on the left are almost entirely made of old stars, while spiral galaxies like our own Milky Way are rich in young stars and the raw materials for future star formation.

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

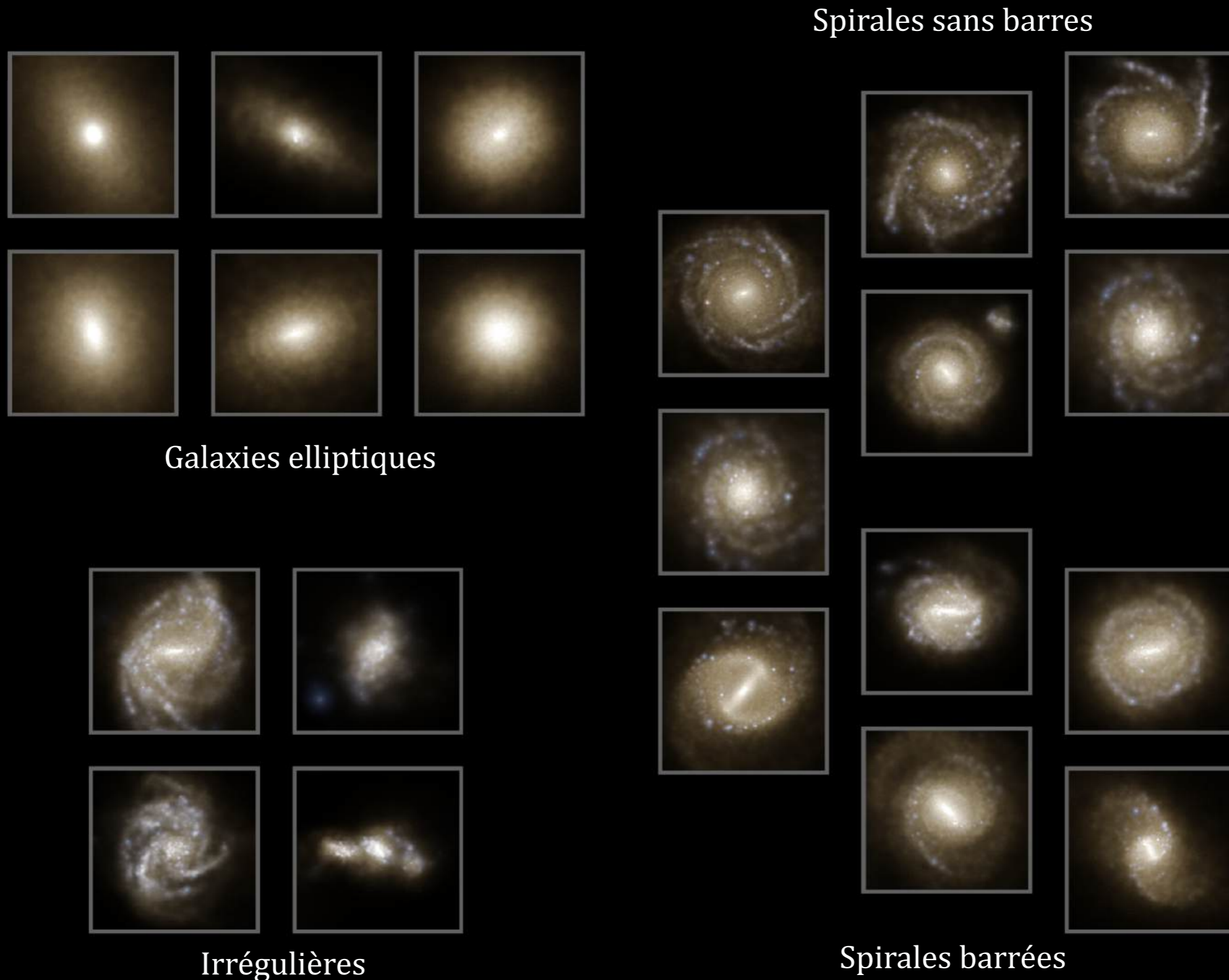


SINGS Team

Robert Kennicutt, Jr. (Principle Investigator), Daniela Calzetti (Deputy Principle 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



Spirales sans barres

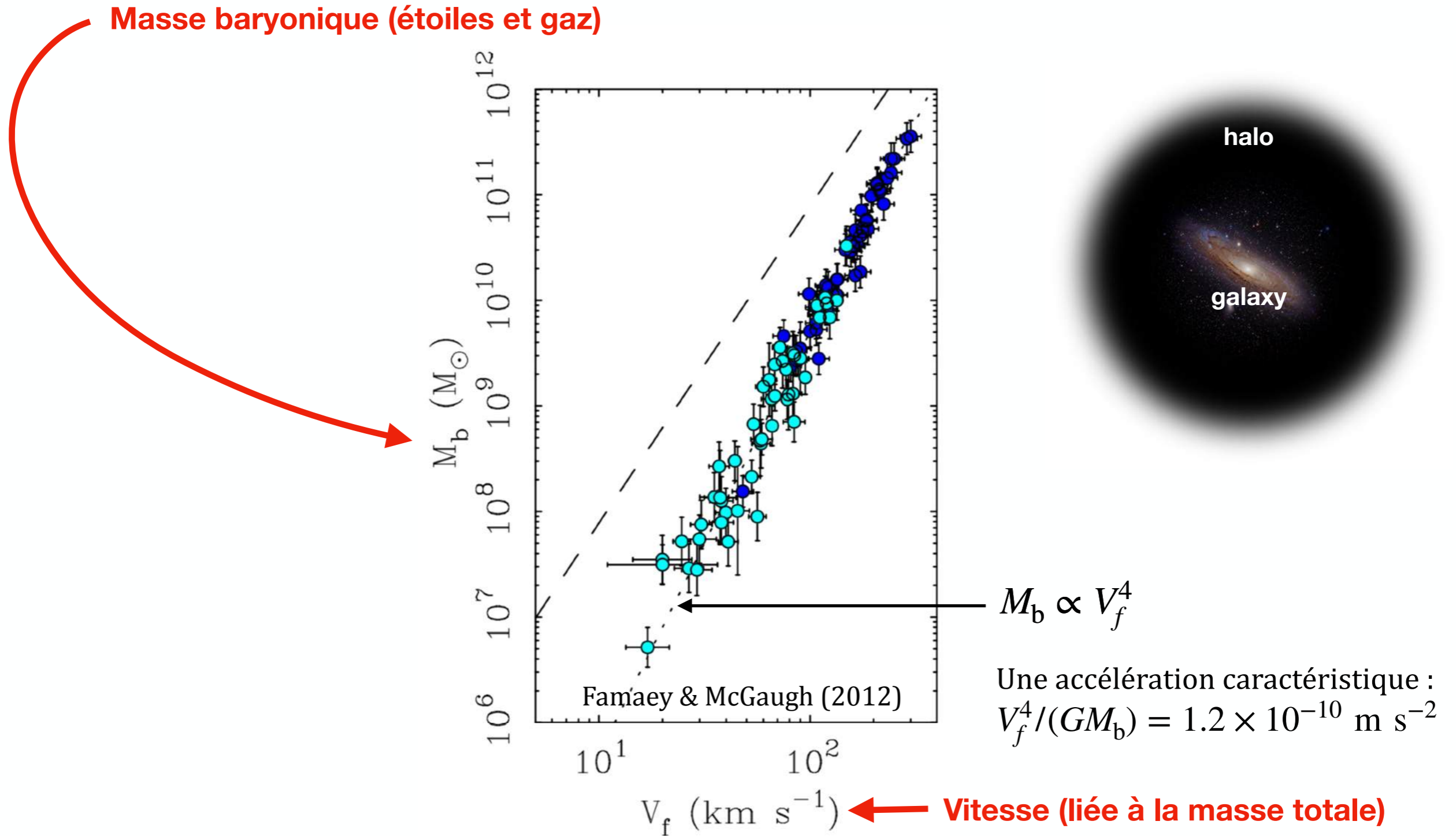
Galaxies elliptiques

Irrégulières

Spirales barrées

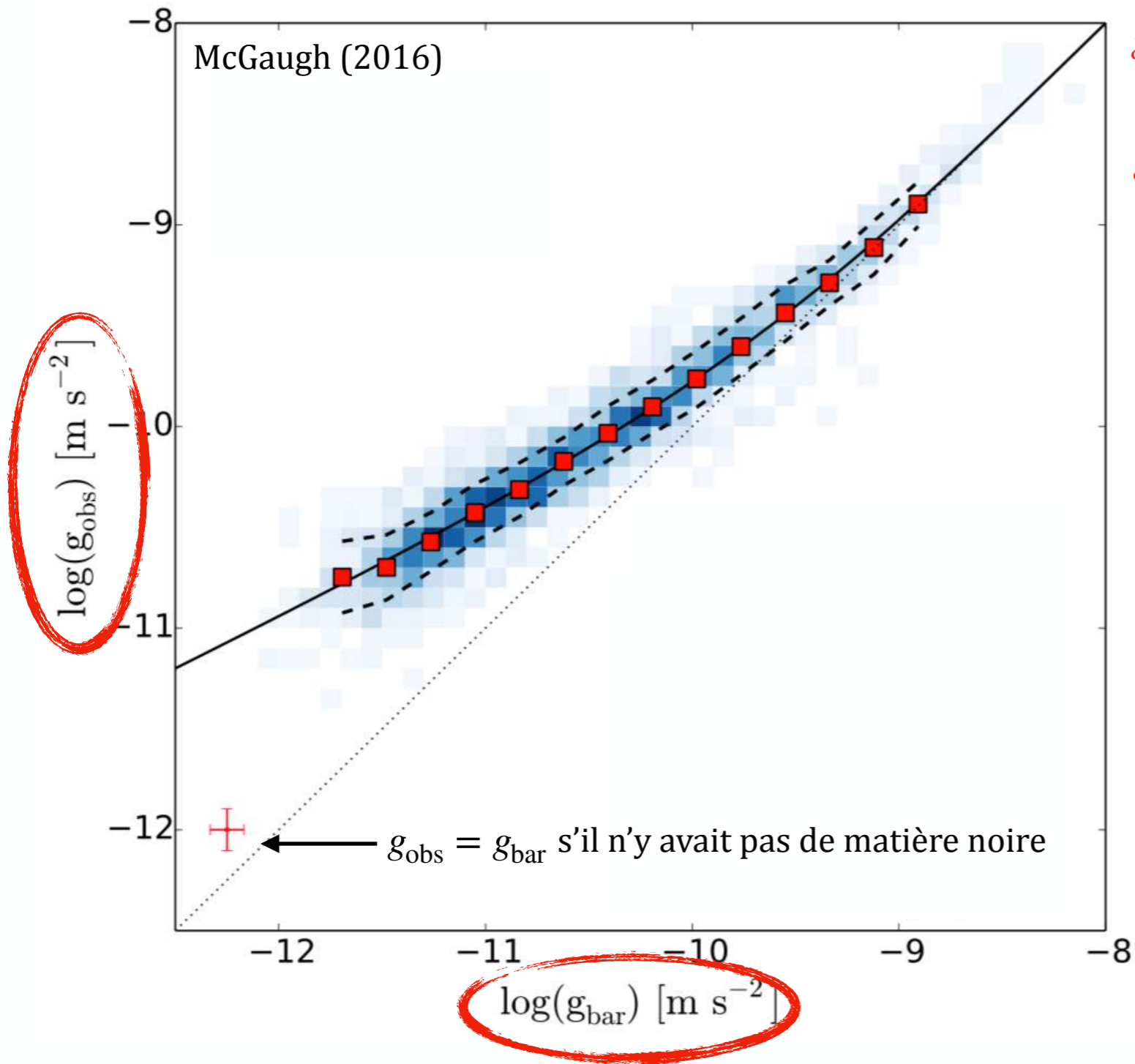
Défis du modèle Λ CDM à l'échelle des galaxies

Les galaxies et leurs halos de matière noire: La relation de Tully-Fisher baryonique



Une trop grande corrélation masse baryonique/champ gravitationnel ? 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 galaxies et leurs halos de matière noire: L'accélération radiale



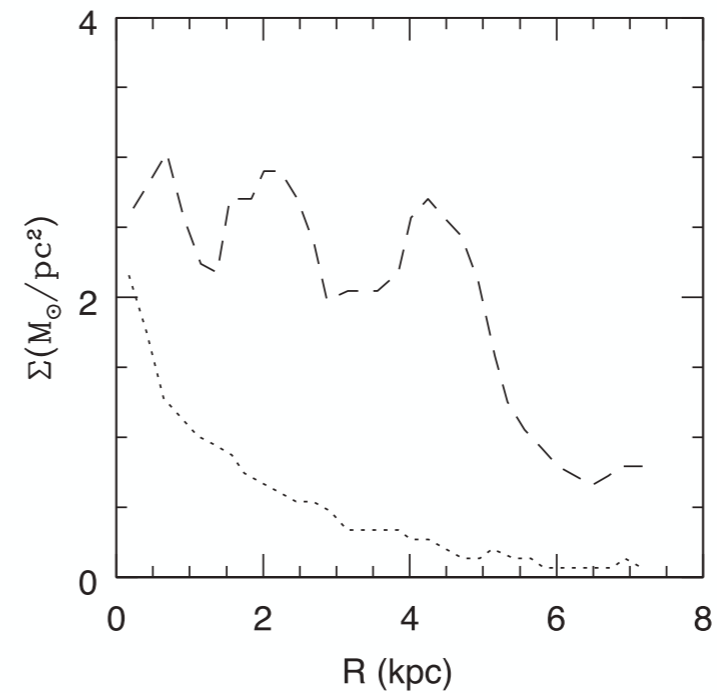
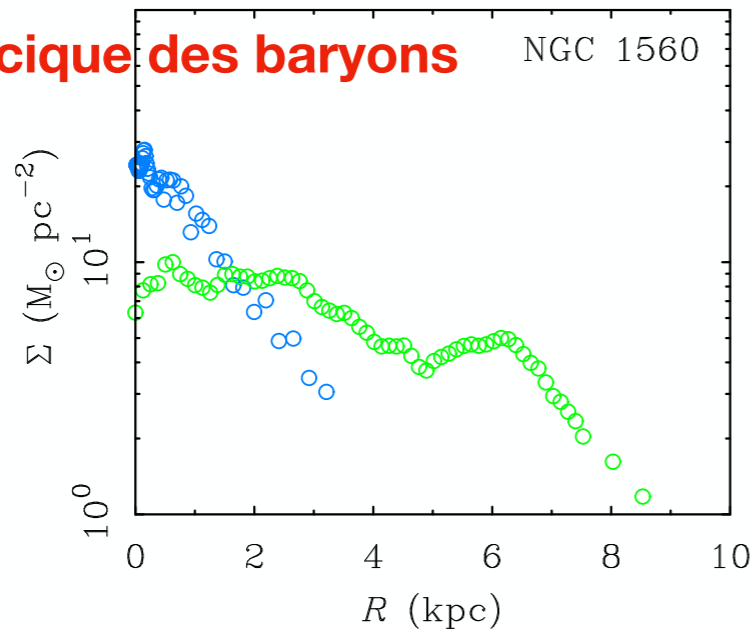
g_{obs} obtenue à partir de la vitesse observée
(liée à la masse totale)

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

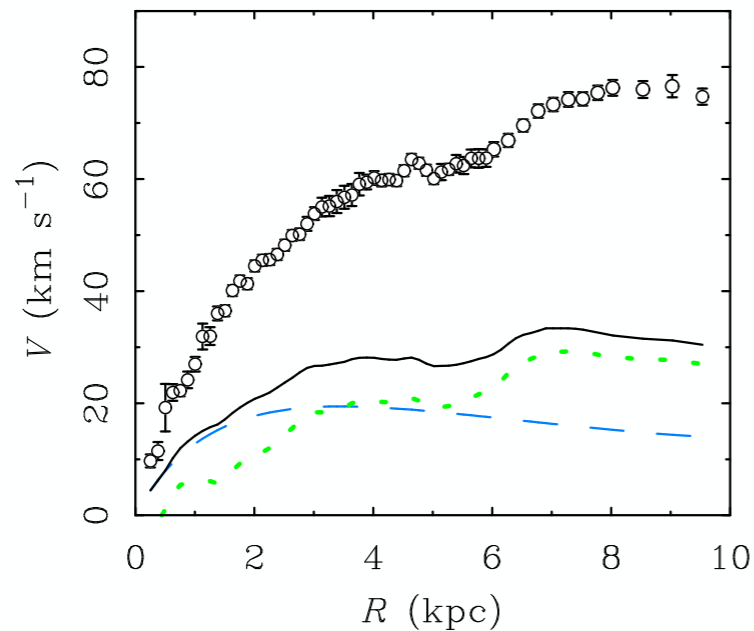
Une trop grande corrélation masse baryonique/champ gravitationnel ? Tout se passe comme si la quantité de baryons était fixée par la quantité de matière noire du halo, alors même que le halo s'étend bien au-delà de la galaxie et que les processus d'évolution comprennent des fusions violentes et aléatoires qui devraient apporter une certaine variabilité...

Les galaxies et leurs halos de matière noire: Des corrélations à plus petite échelle (*Renzo's rule*) ?

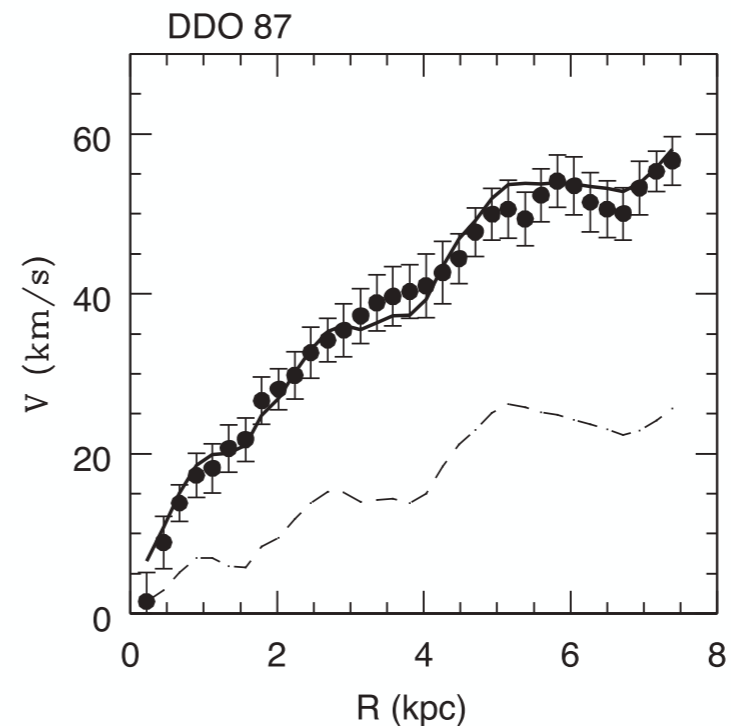
Densité surfacique des baryons



Vitesse de rotation (traçant la masse totale)



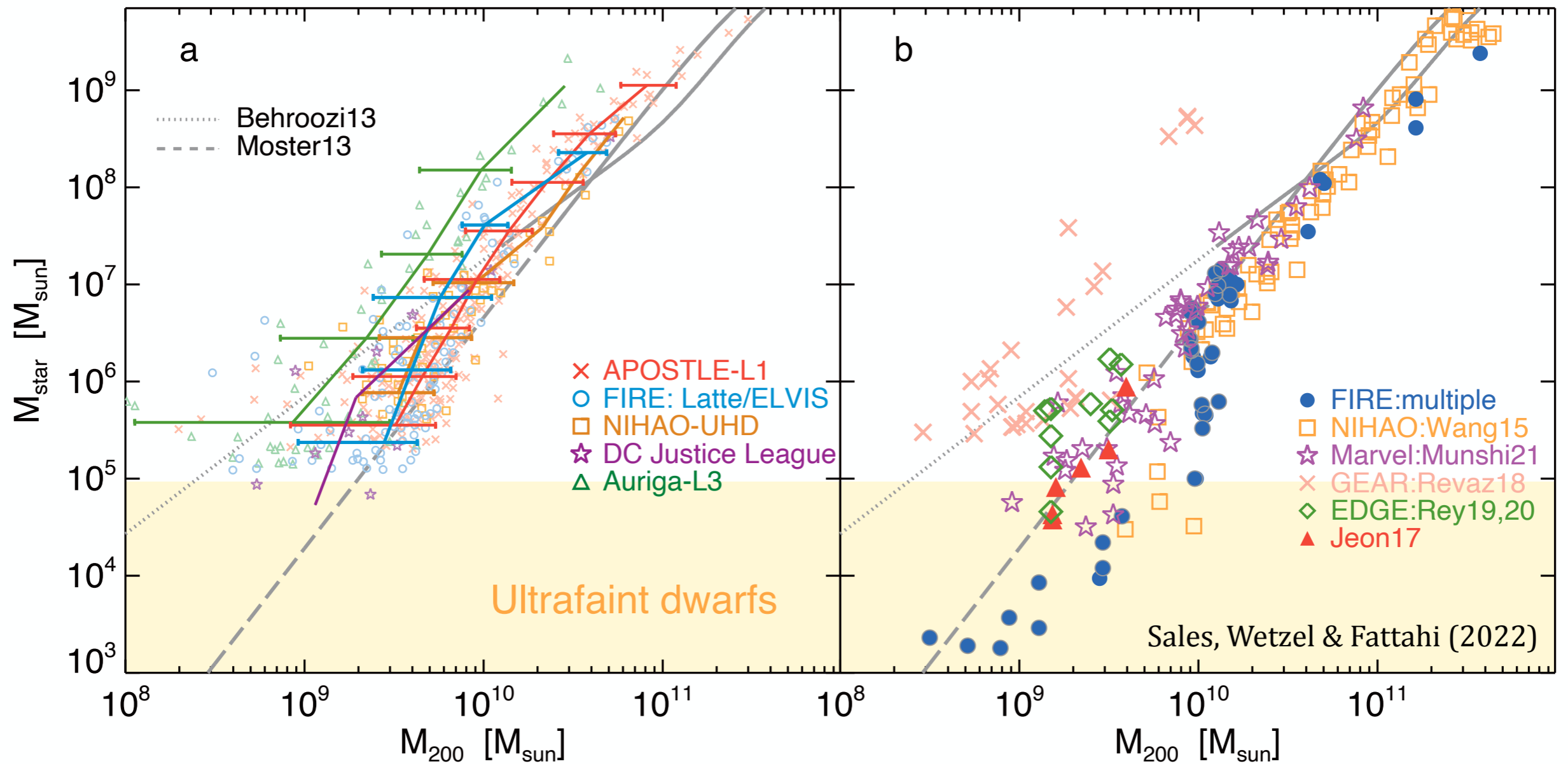
Famaey & McGaugh (2012)



Sanders 2019

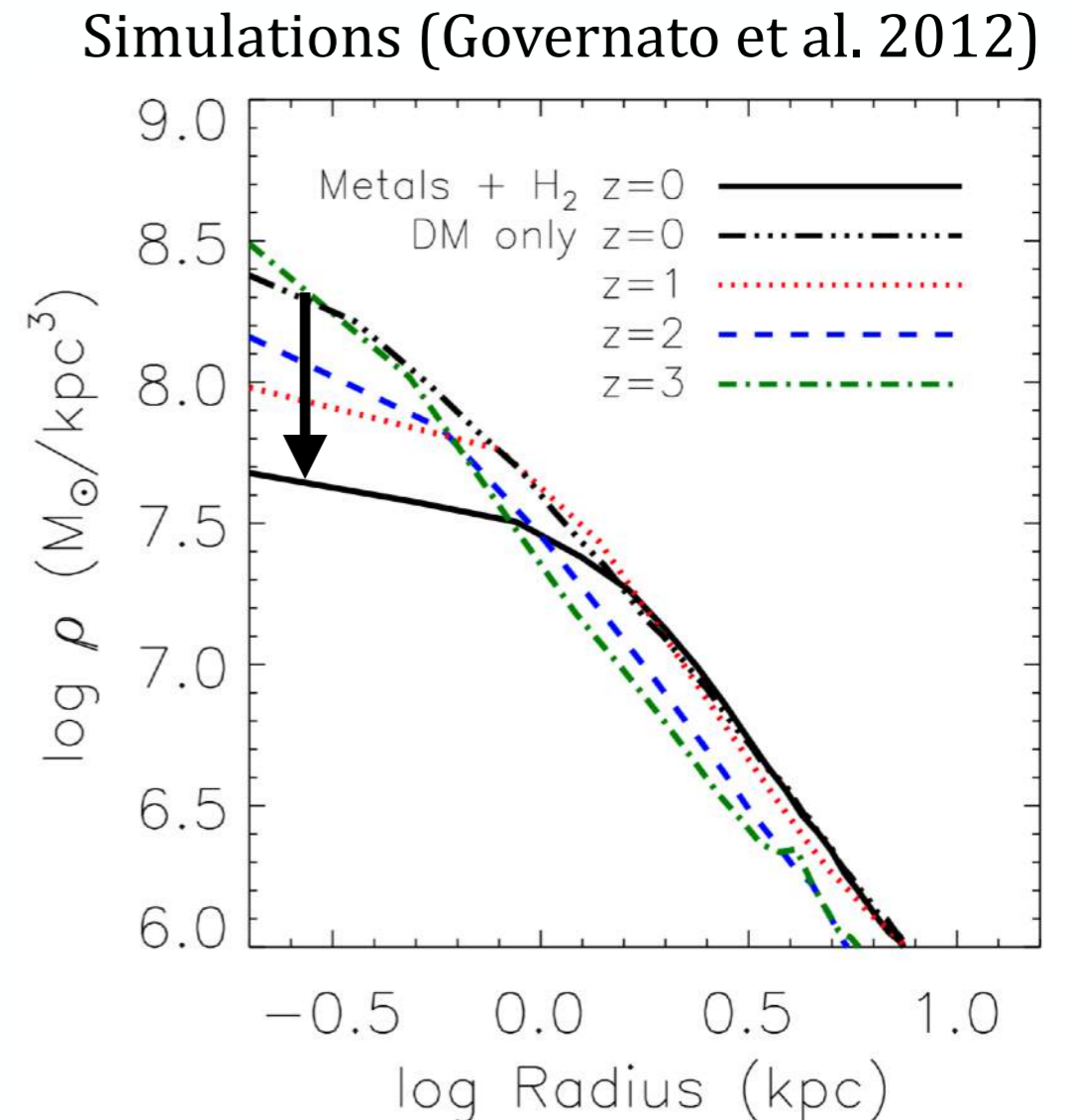
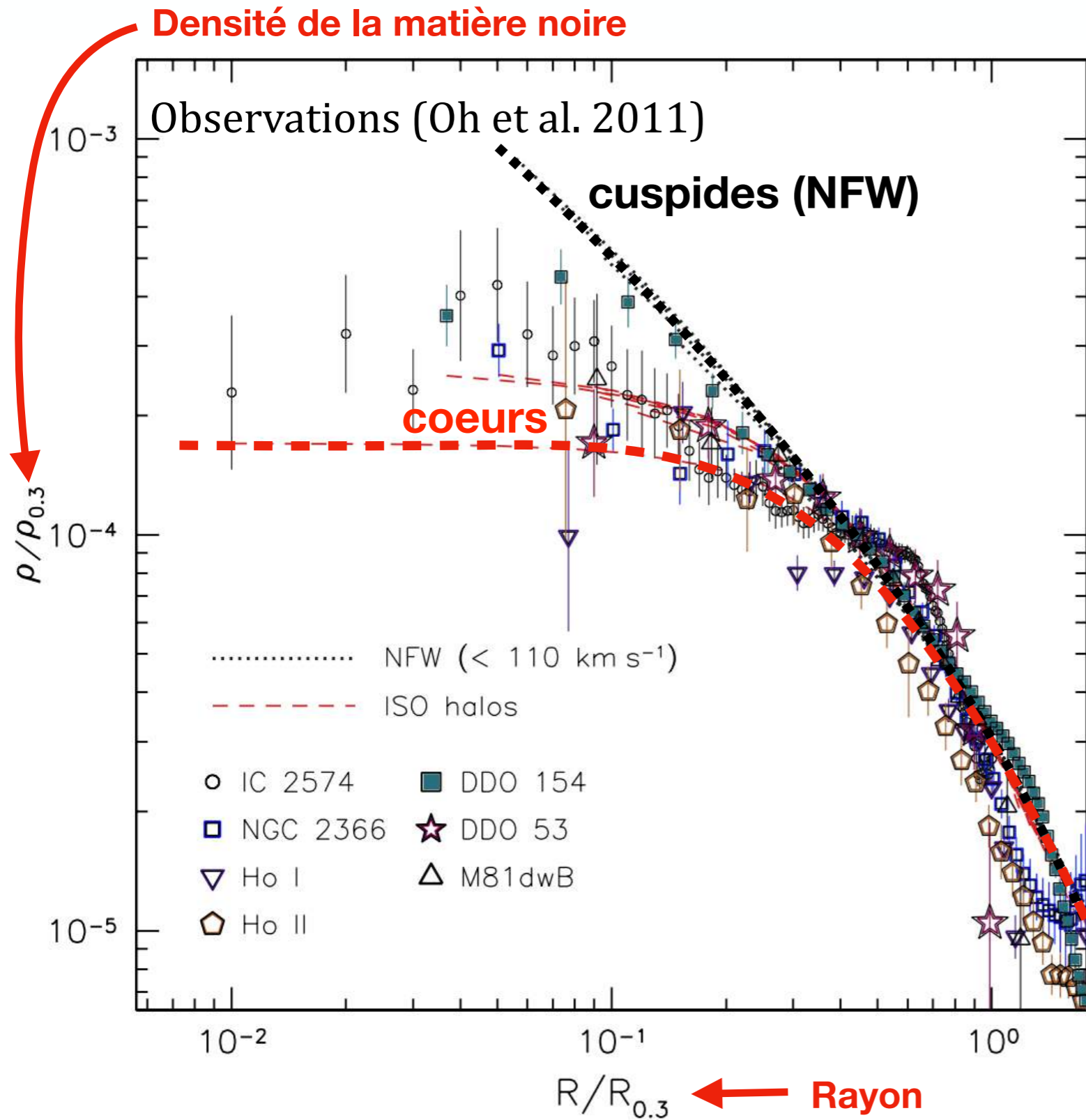
Une trop grande corrélation masse baryonique/champ gravitationnel ? Tout se passe comme si la quantité de baryons était fixée par la quantité de matière noire du halo, alors même que le halo s'étend bien au-delà de la galaxie et que les processus d'évolution comprennent des fusions violentes et aléatoires qui devraient apporter une certaine variabilité...

Les galaxies et leurs halos de matière noire: Différentes prédictions issues des simulations



La relation entre la **masse stellaire** (M_{star}) et la **masse du halo de matière noire** (M_{200}) peut varier d'une simulation à l'autre, en particulier pour les galaxies les moins massives.

La répartition de la matière noire : Le problème des cuspides



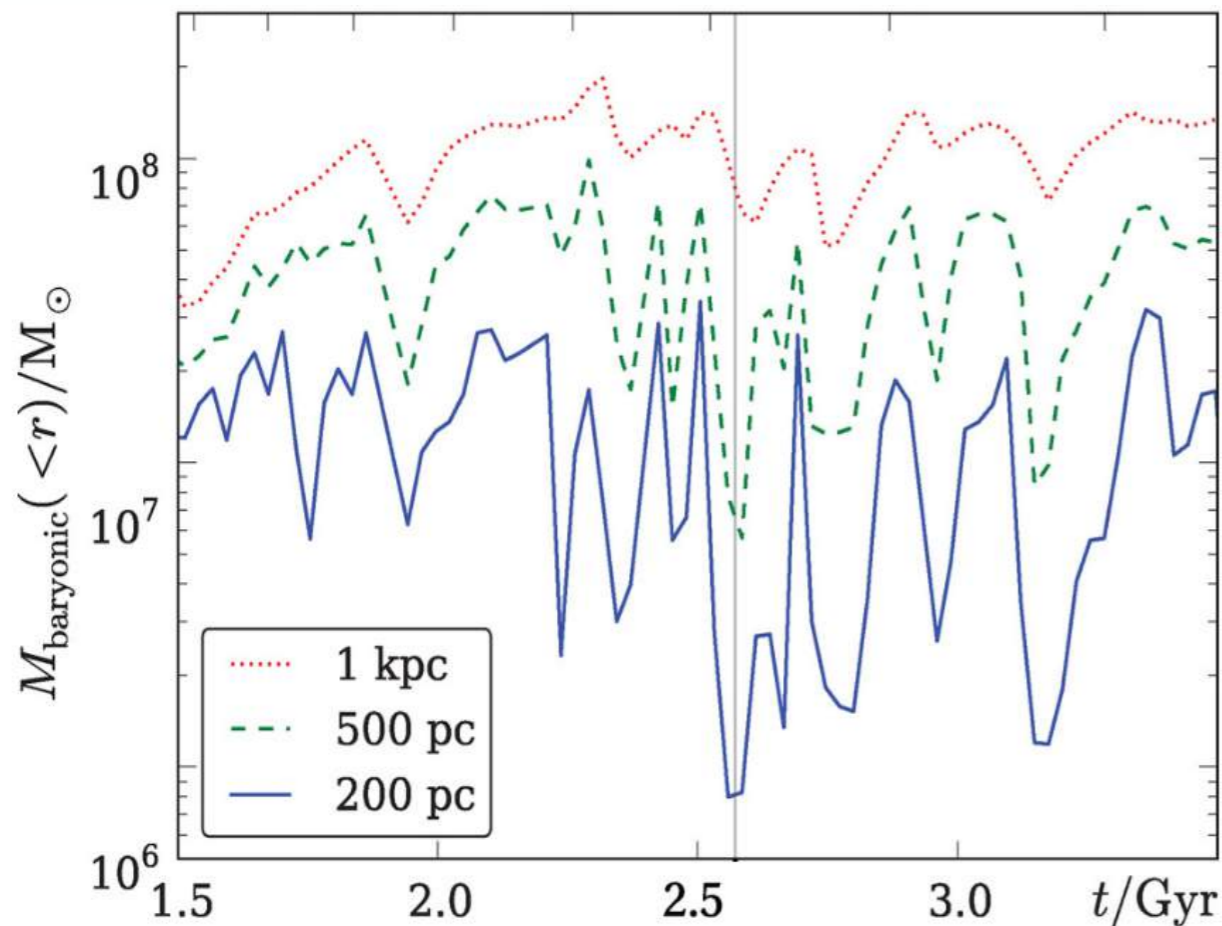
Les simulations de matière noire seule prédisent des profils de densité pour les halos de matière noire plus « pentus » au centre (les cuspides) qu'observé. L'introduction des phénomènes baryoniques dans les simulations permet toutefois de réduire cette tension.

La répartition de la matière noire :

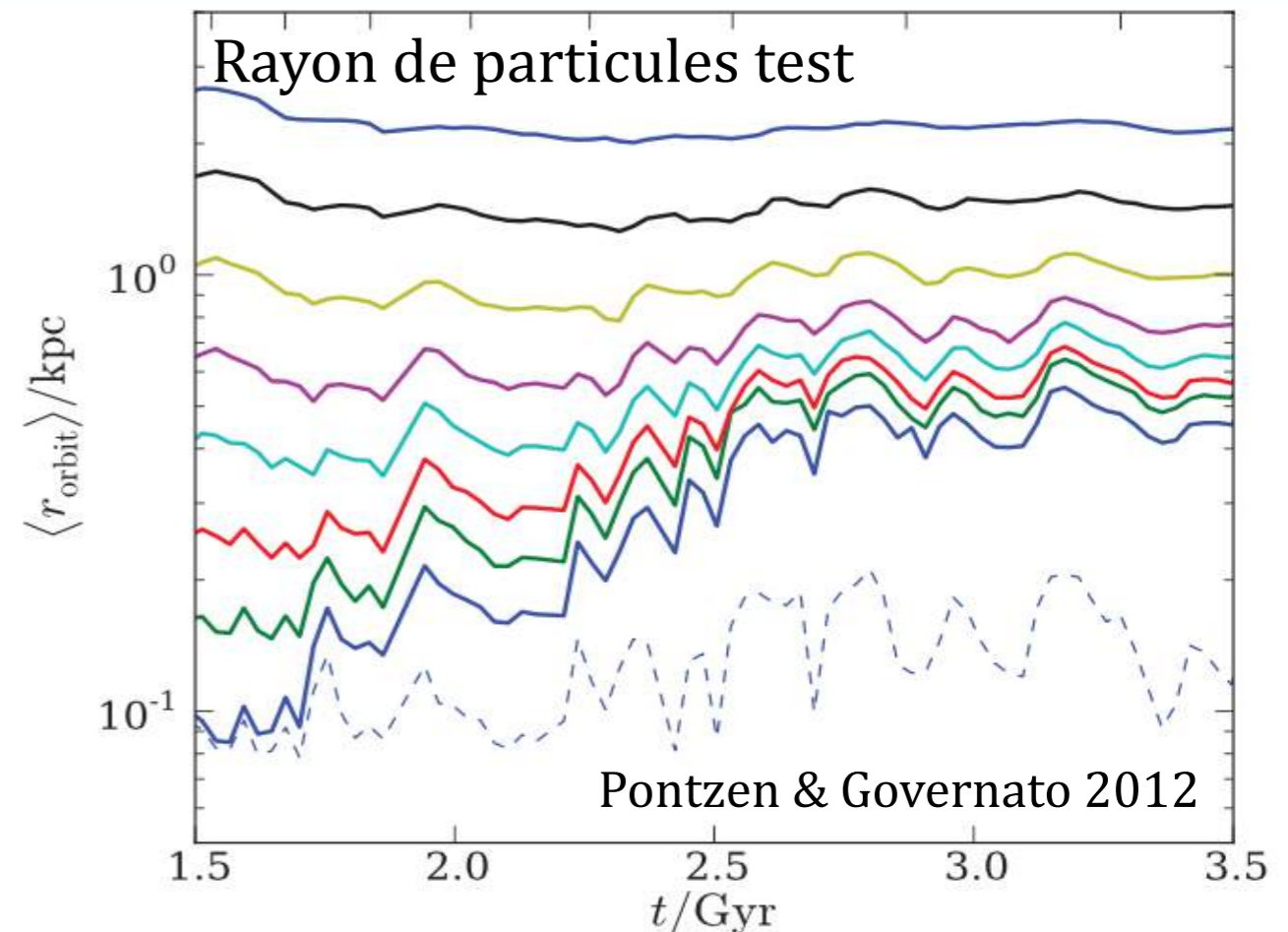
Comment les baryons peuvent-ils affecter la matière noire ?

- ◆ Contraction adiabatique (Blumenthal+1986)
- ◆ Friction dynamique (El-Zant+2001, 2004)
- ◆ Fluctuations répétées du potentiel gravitationnel dues aux phénomènes baryoniques dits de *feedback* : vents stellaires, champs de radiation, explosions de supernovae, noyaux actifs autour des trous noirs super-massifs (Pontzen & Governato 2012)

Fluctuations de la masse des baryons



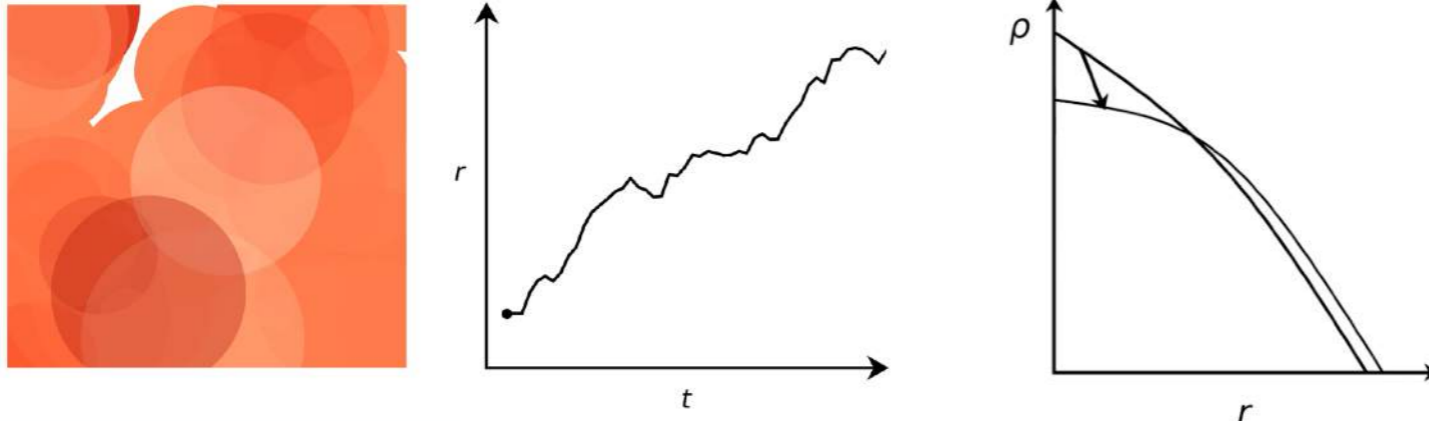
Chauffage dynamique de la matière noire



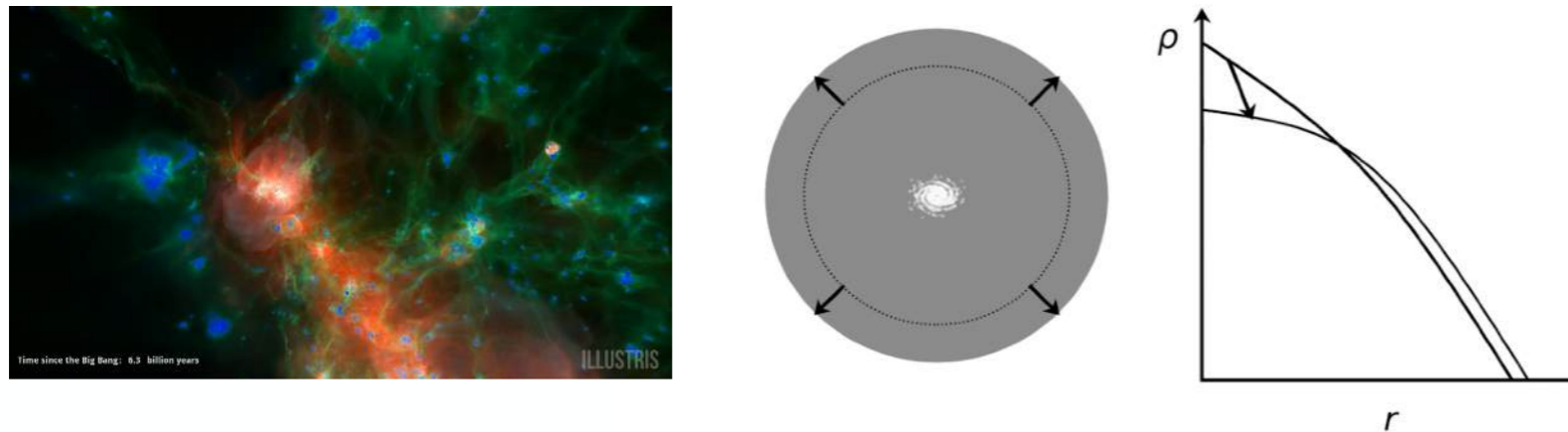
La répartition de la matière noire :

Comment les baryons peuvent-ils affecter la matière noire ?

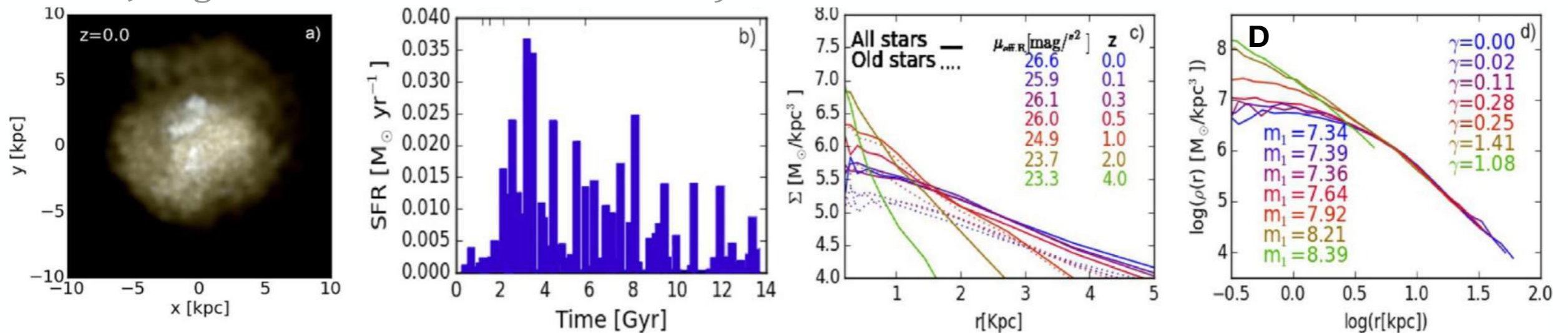
- ◆ Effet cumulatif des petites fluctuations du milieu interstellaire dues au feedback (El-Zant, Freundlich & Combes 2016)



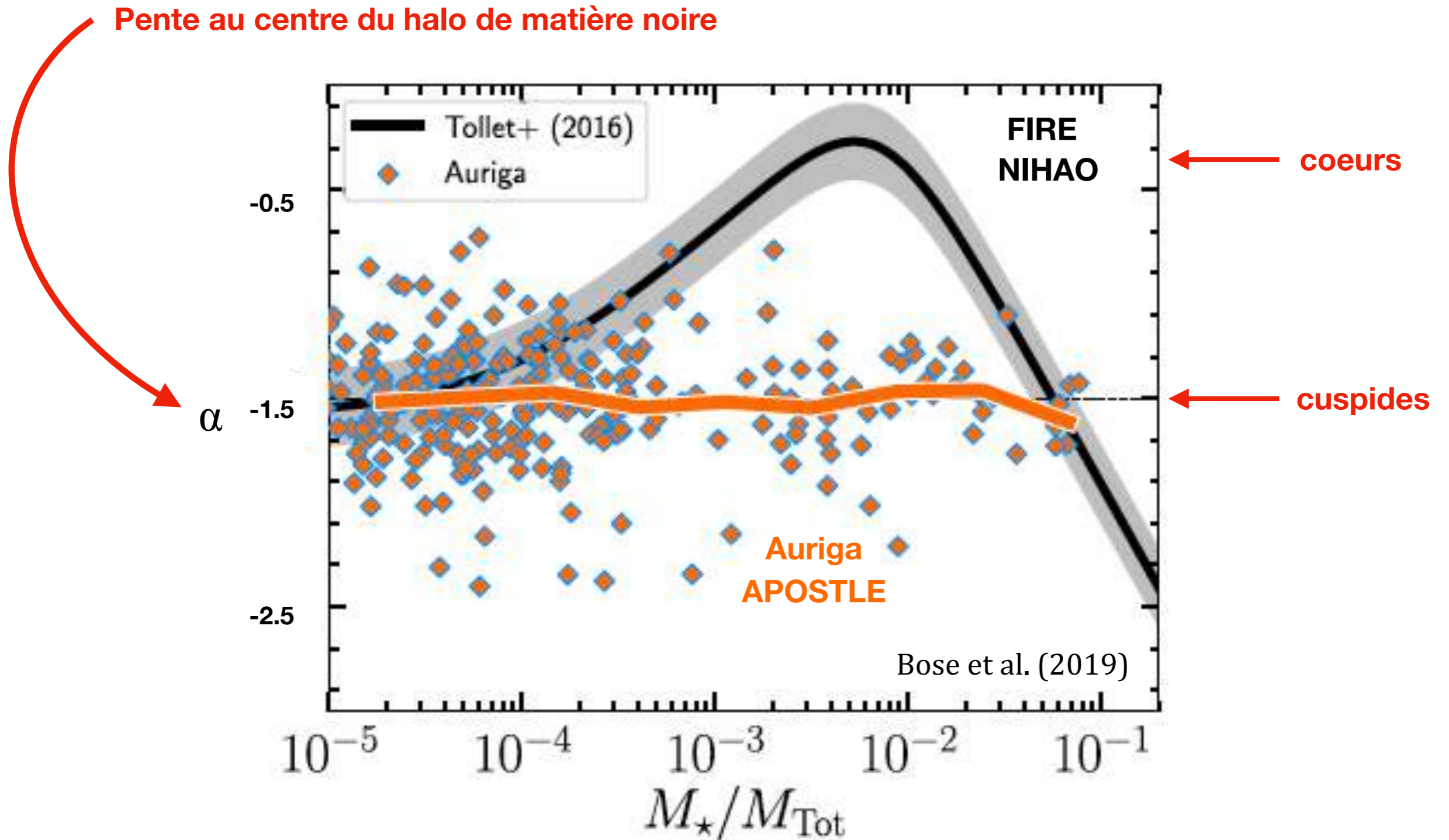
- ◆ Ejection brutale d'une grande quantité de gaz du fait du feedback (Freundlich et al. 2020)



- ◆ Le même phénomène pourrait aussi faire enfler les galaxies ultra-diffuses (Di Cintio et al. 2017, Jiang, Dekel, Freundlich et al. 2019)

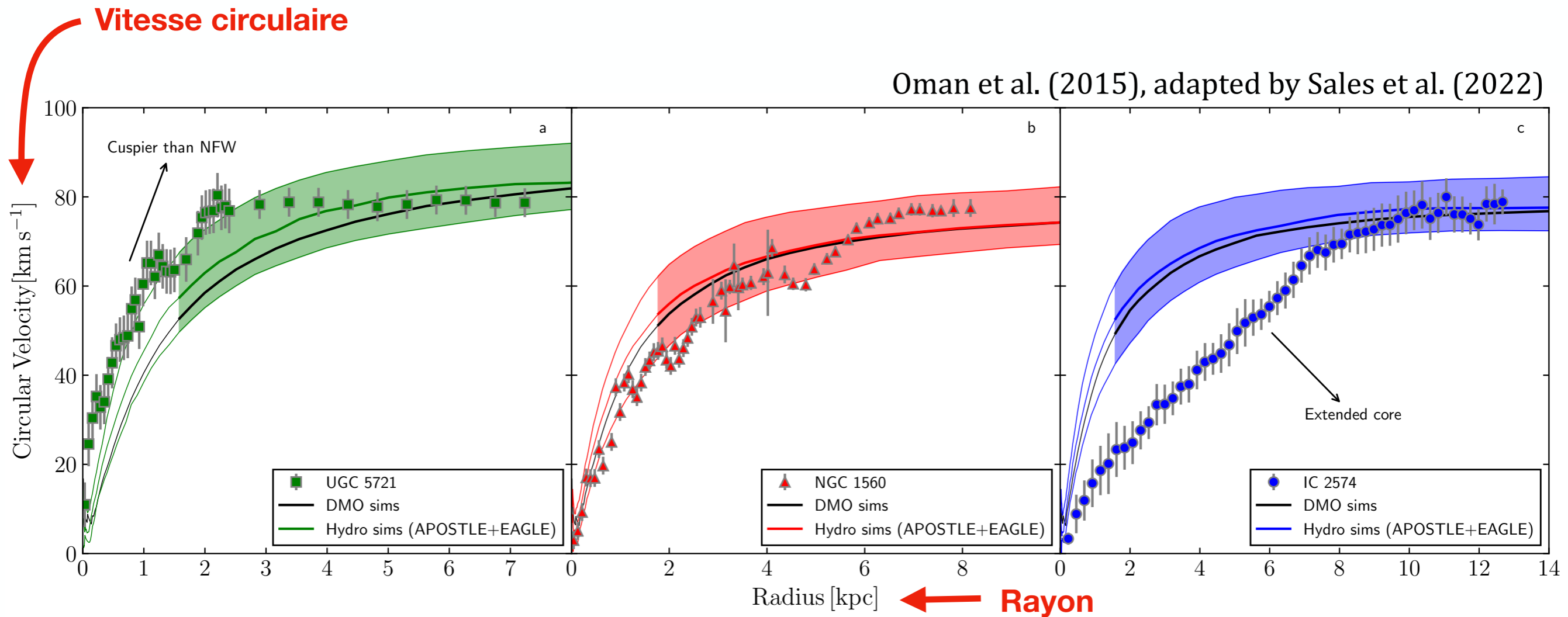


La répartition de la matière noire : Comment les baryons affectent-ils la matière noire ?



Les simulations prenant en compte les phénomènes baryoniques prédisent des répartitions de matière noire très différentes (formation des étoiles et phénomènes de feedback différents).

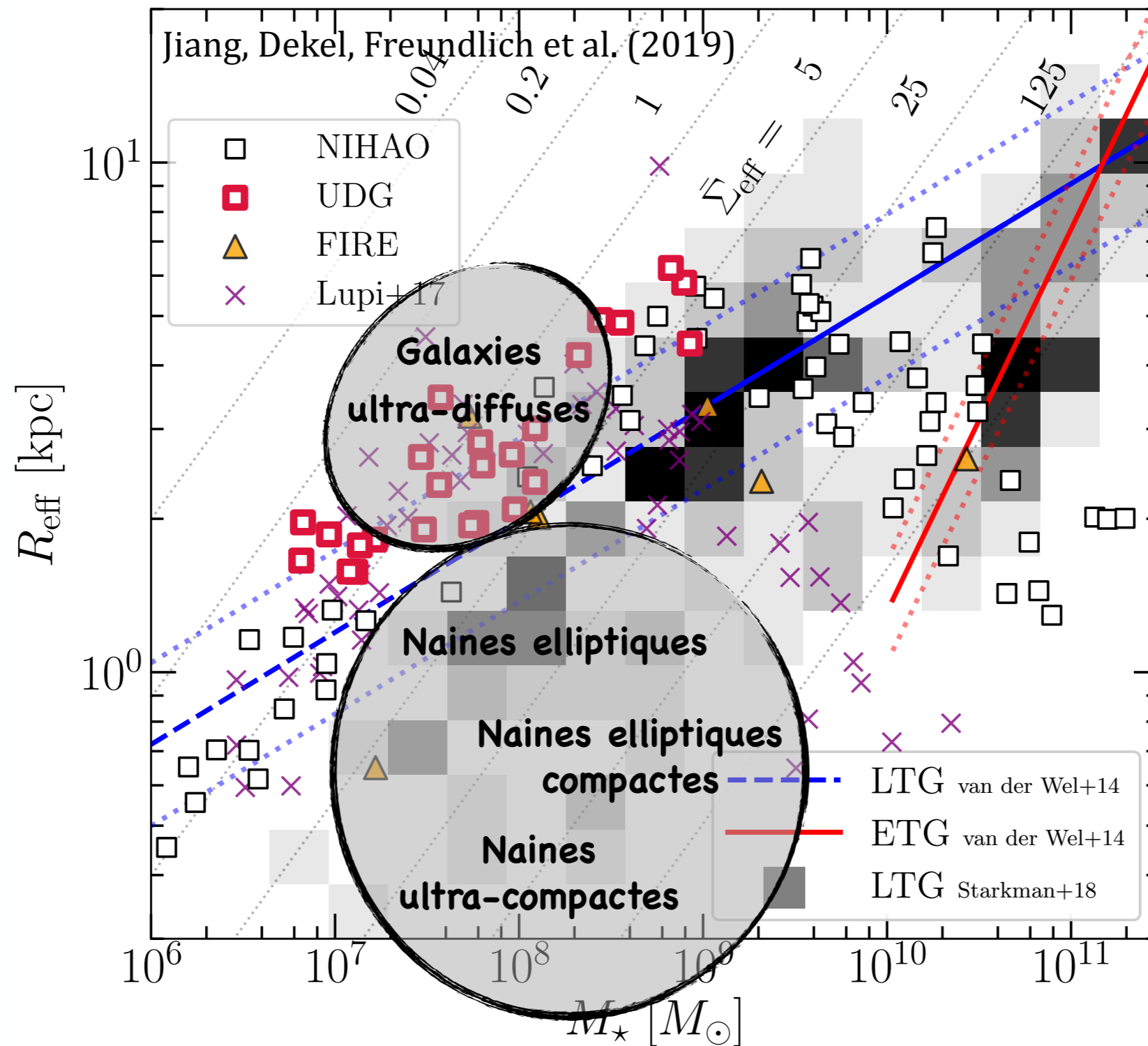
La répartition de la matière noire : La diversité des courbes de rotation



On observe une diversité des courbes de rotation (i.e. de la répartition de la matière noire) à masse totale donnée, alors qu'on aurait pu s'attendre à plus d'uniformité dans le cadre du modèle.

Galaxies naines et satellites :

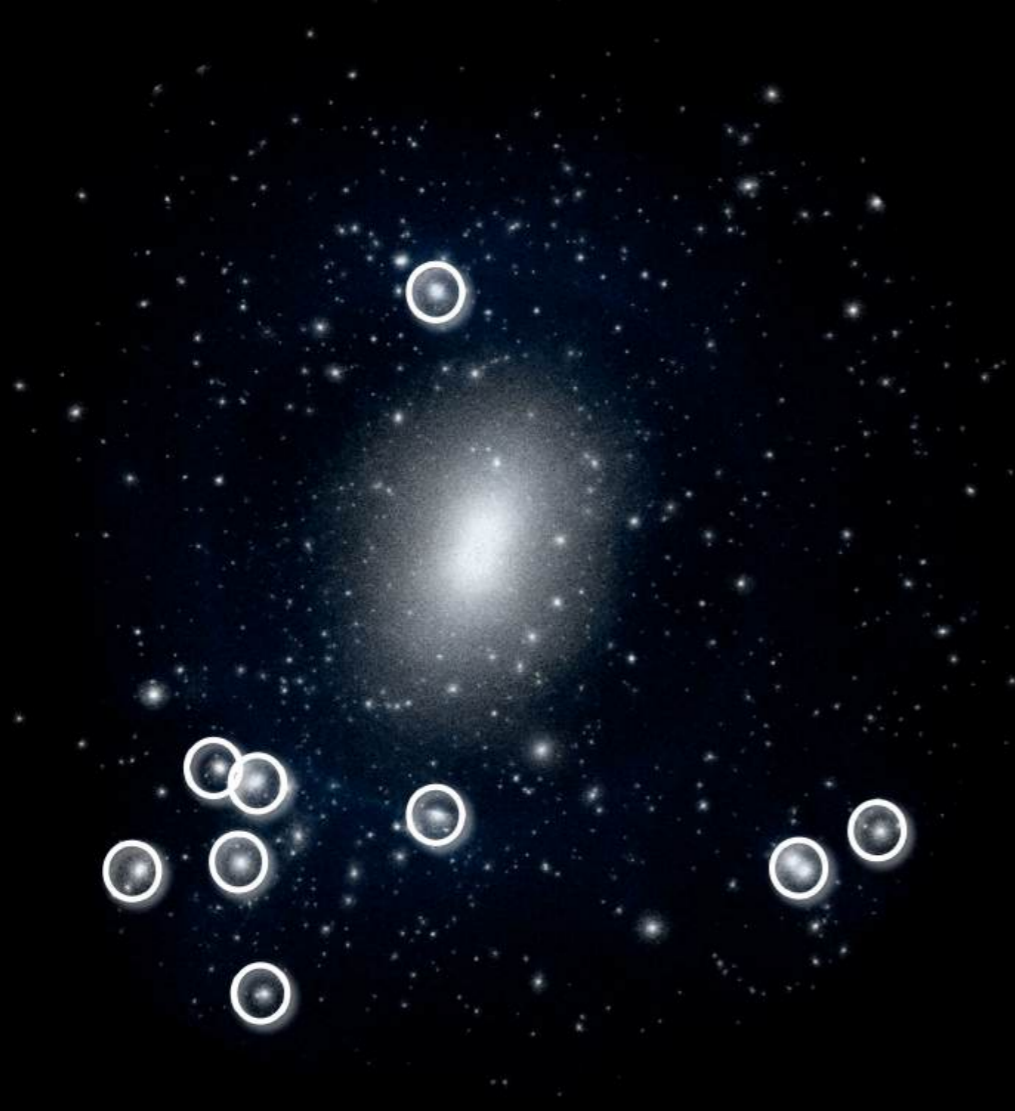
Un problème de diversité des galaxies naines



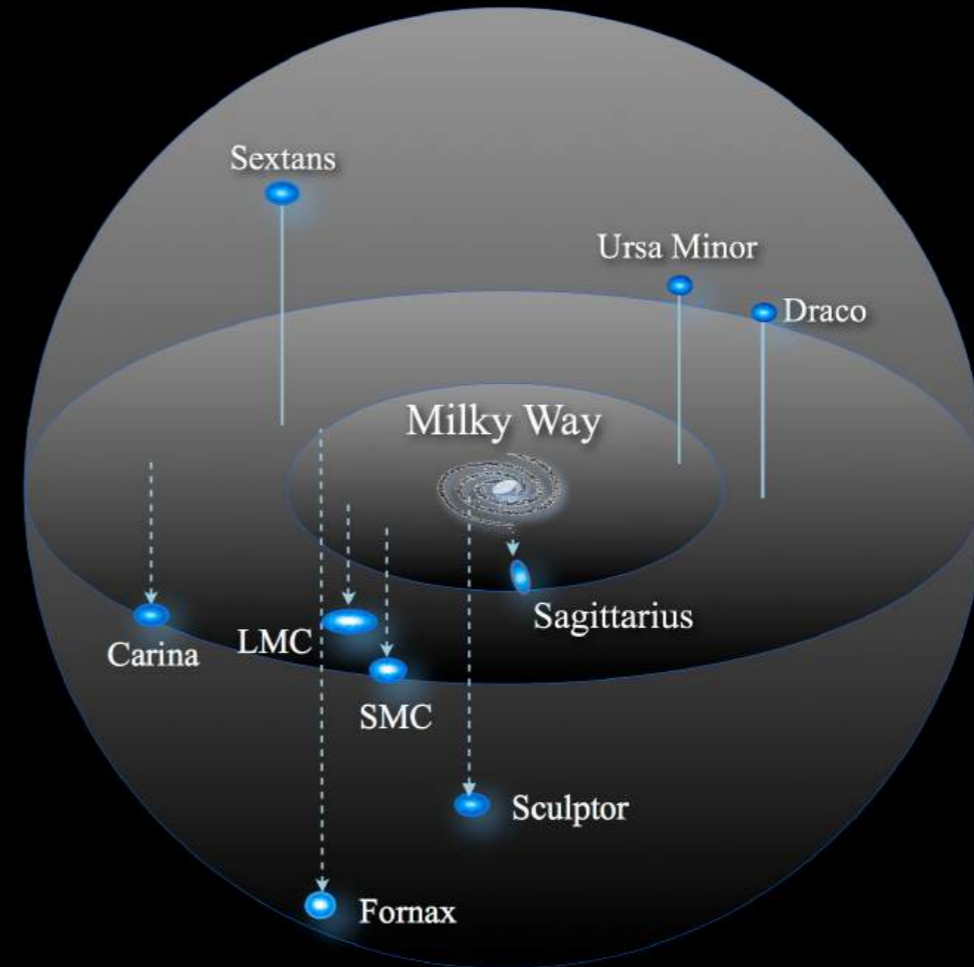
Les simulations ne produisent pas les bonnes populations de galaxies naines. Par exemple, pas de naines compactes dans les simulations NIHAO.

Galaxies naines et satellites : Le problème « too big to fail »

Galaxie simulée de type Voie Lactée



Satellites de la Voie Lactée



Weinberg et al. (2013)

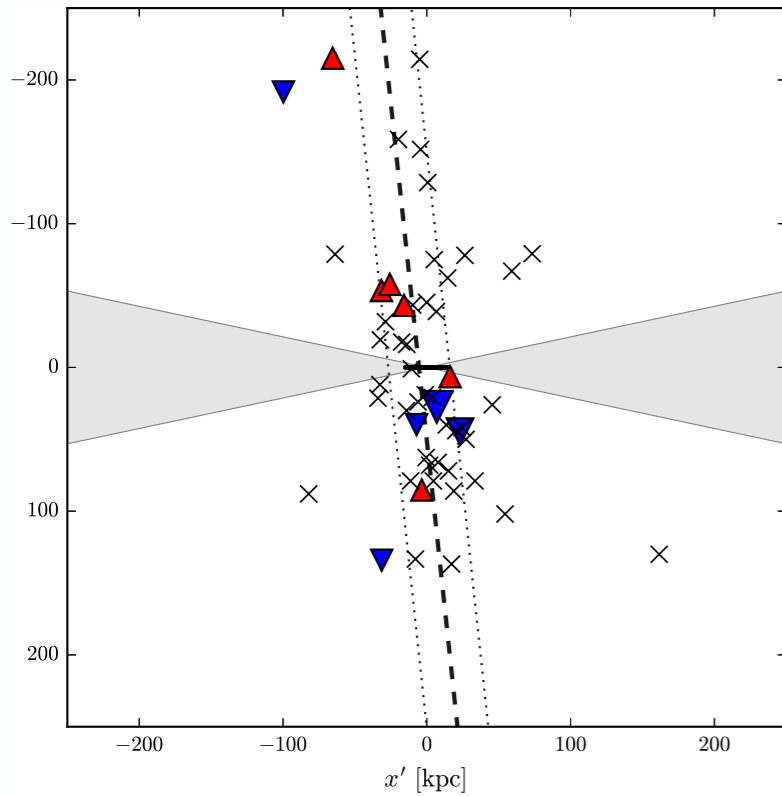
La masse de matière noire des satellites observés est typiquement plus petite que dans les simulations : certains sous-halos massifs auraient-ils échoué à former des étoiles (alors qu'ils n'auraient pas dû échouer) ?

Autres possibilités : masse de la Voie Lactée plus petite, coeurs de matière noire pour les sous-halos, érosion par les forces de marée...

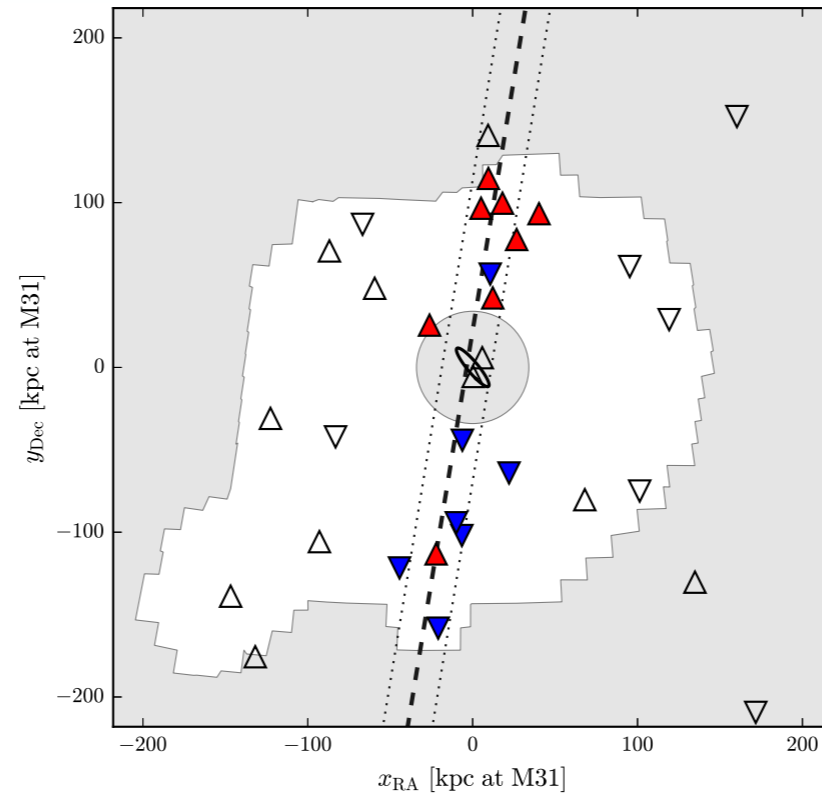
Galaxies naines et satellites :

Les plans de satellites

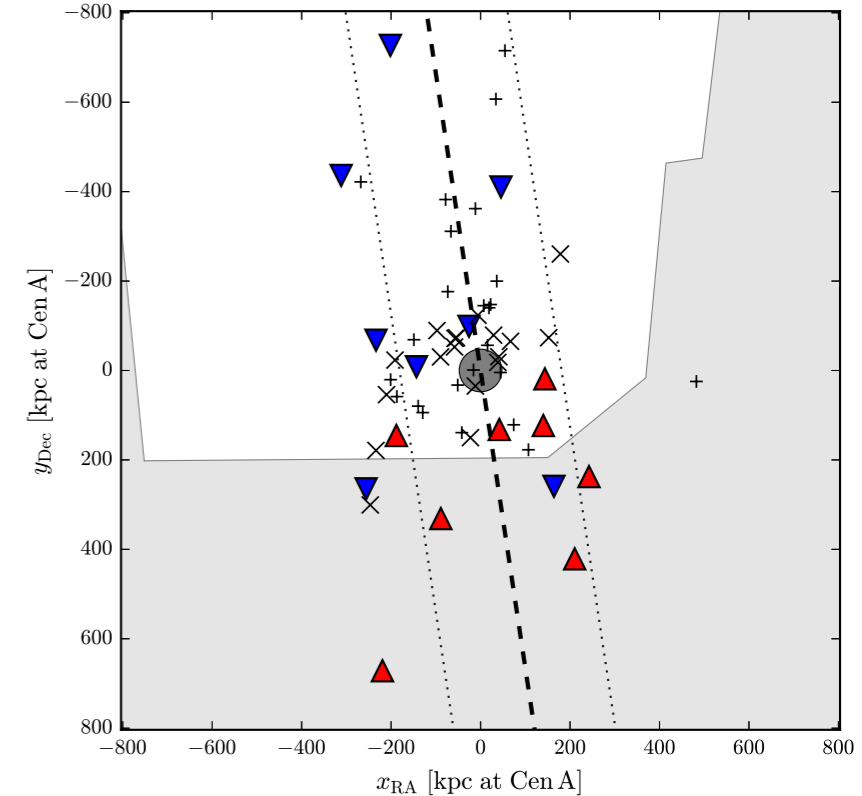
Voie Lactée



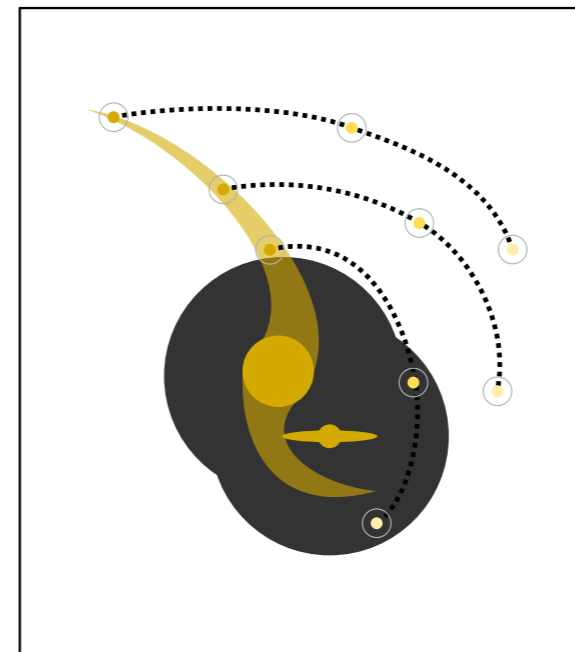
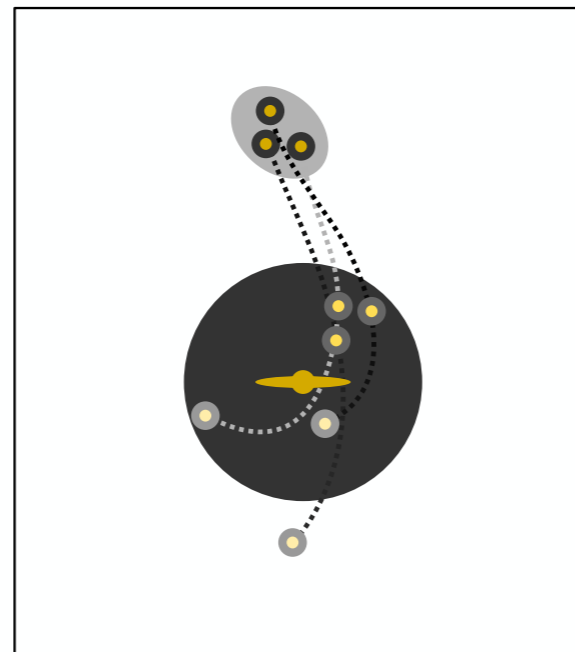
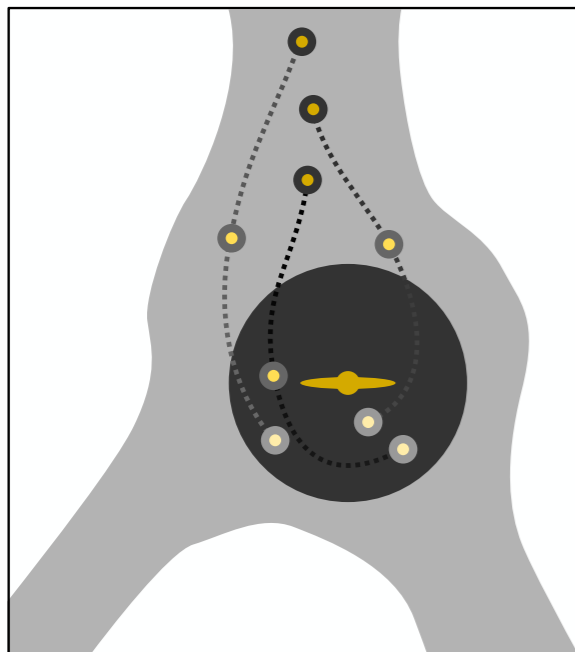
Andromède



Centaurus A



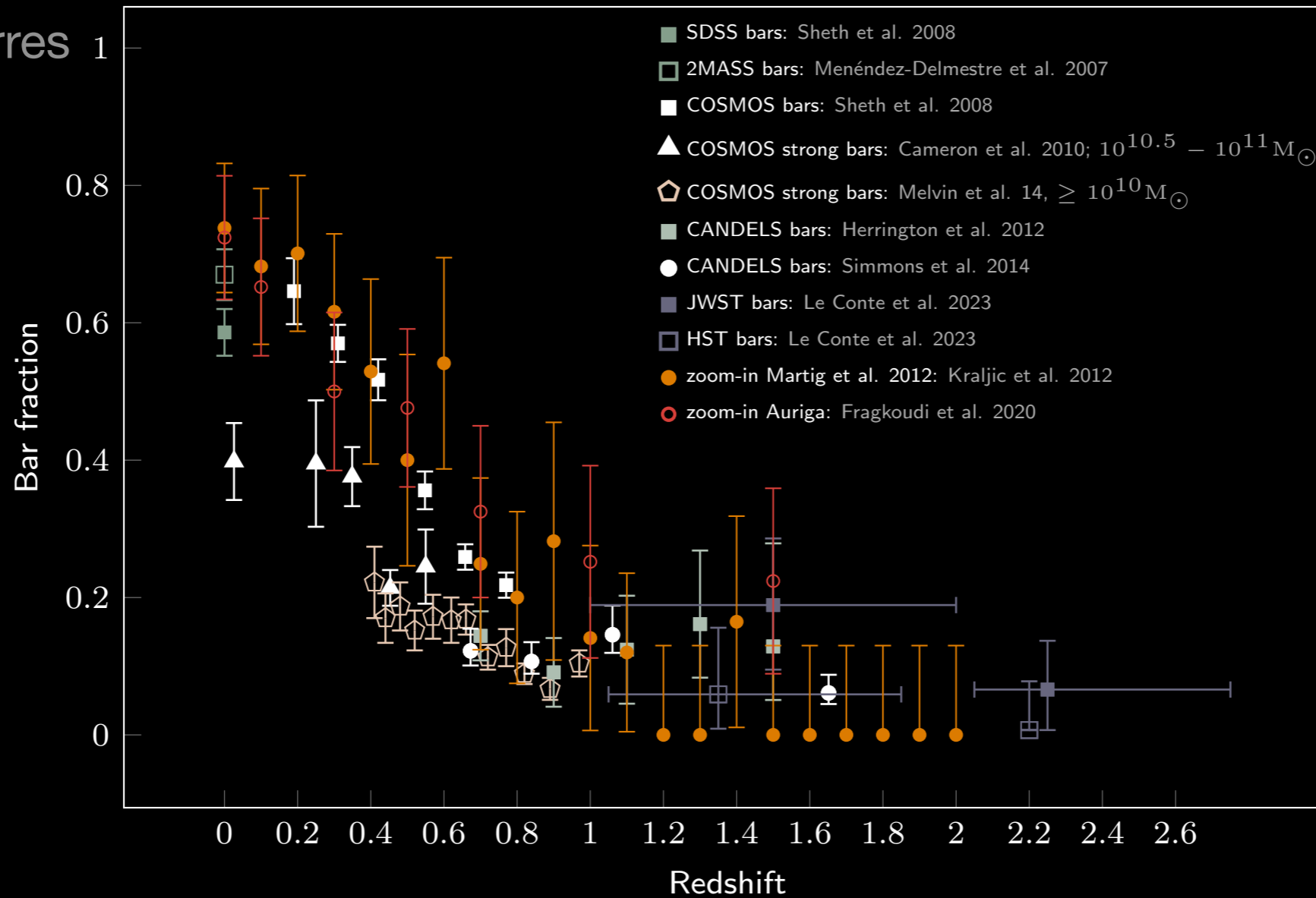
Les simulations Λ CDM indiquent un très faible nombre de tels plans... Filaments issus de la toile cosmique ? Accrétion groupée ? Naines de marées ? Situation temporaire ?



Morphologie des galaxies : Les barres



fraction de barres

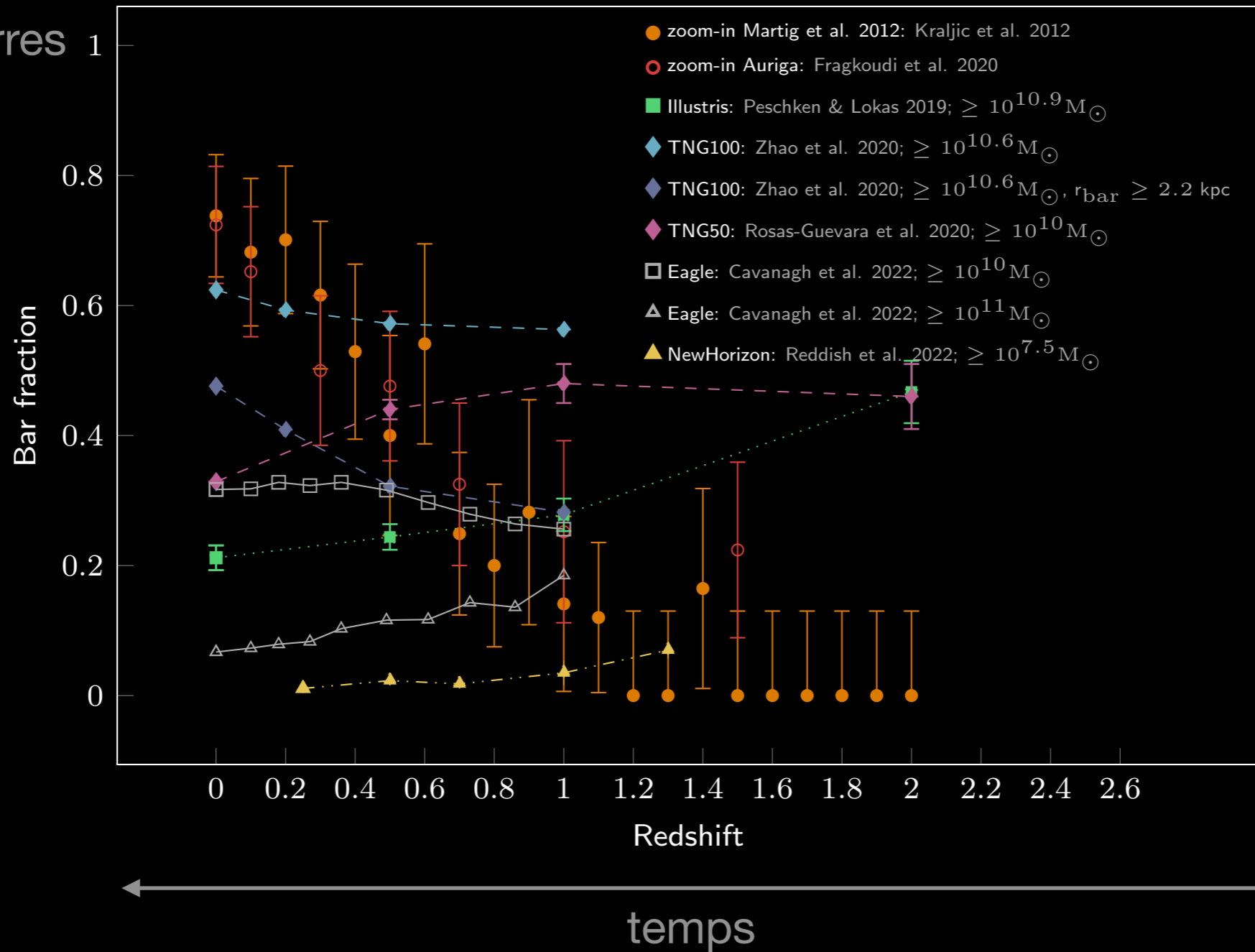


← temps

Morphologie des galaxies : Les barres



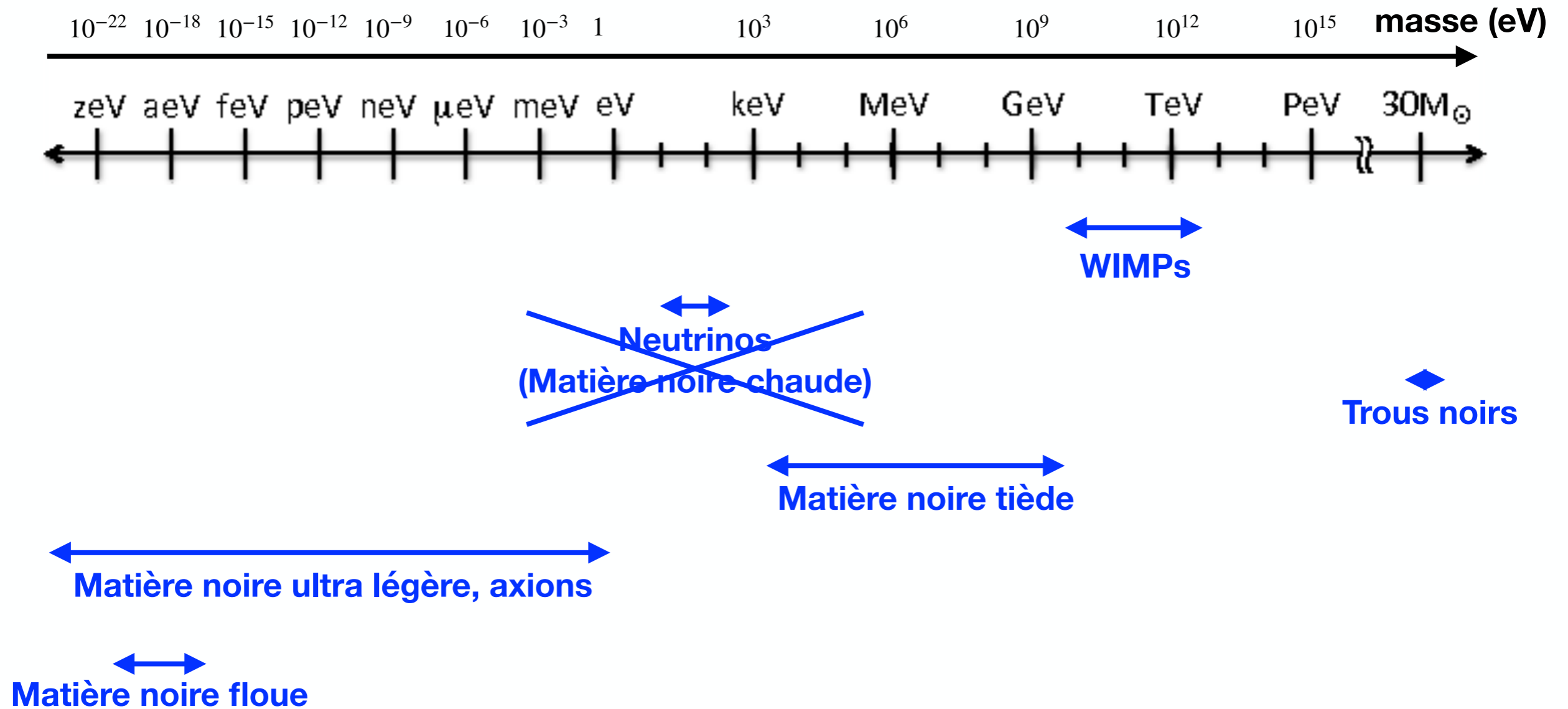
fraction de barres



Seules quelques simulations zoom-in reproduisent l'évolution observée de la fraction des barres avec le temps, toutes les grandes simulations cosmologiques y échouent.

Alternatives au modèle Λ CDM

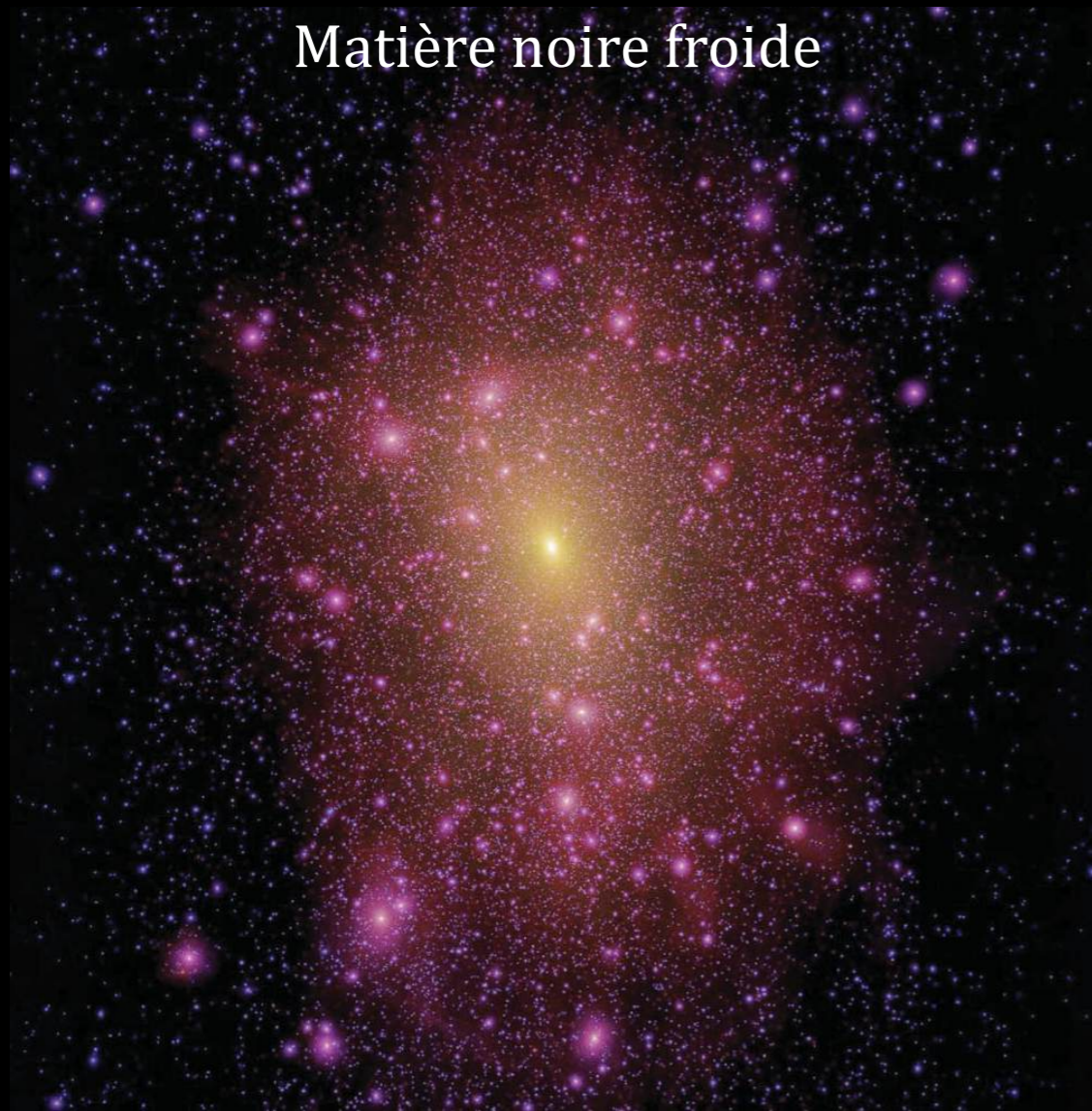
Quelques candidats du secteur sombre



La matière noire tiède (WDM)

~keV

Matière noire froide



Matière noire tiède (~2keV)

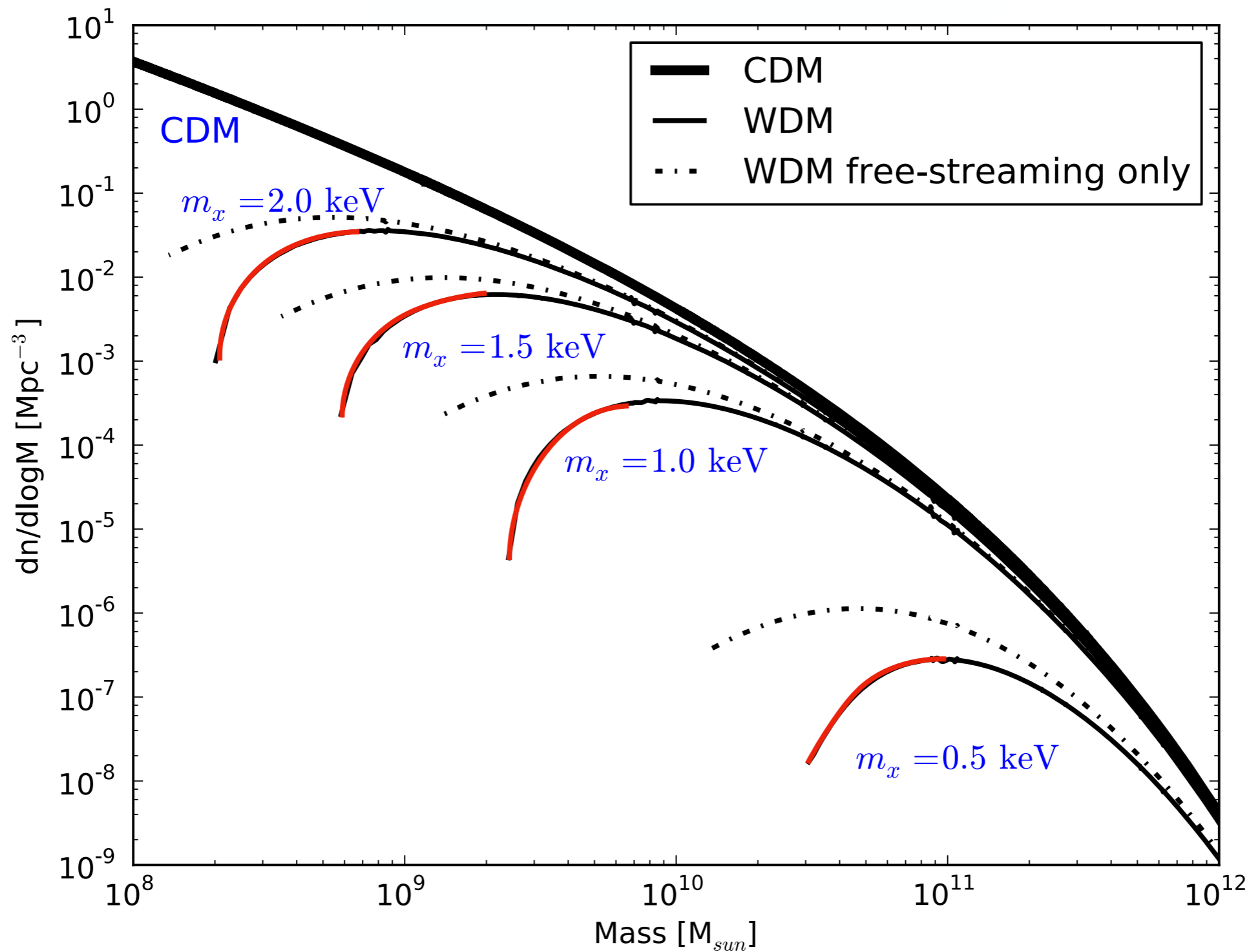


La matière noire tiède (WDM)

~keV

Nombre de halos d'une certaine masse

La fonction de masse de la matière noire tiède (à $z=10$)

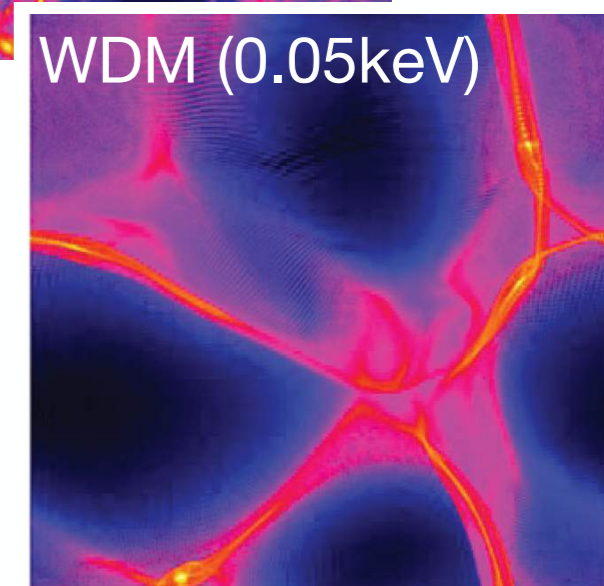
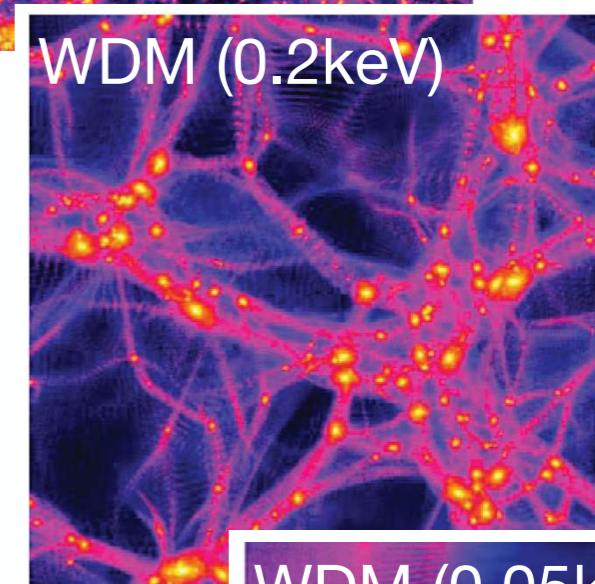
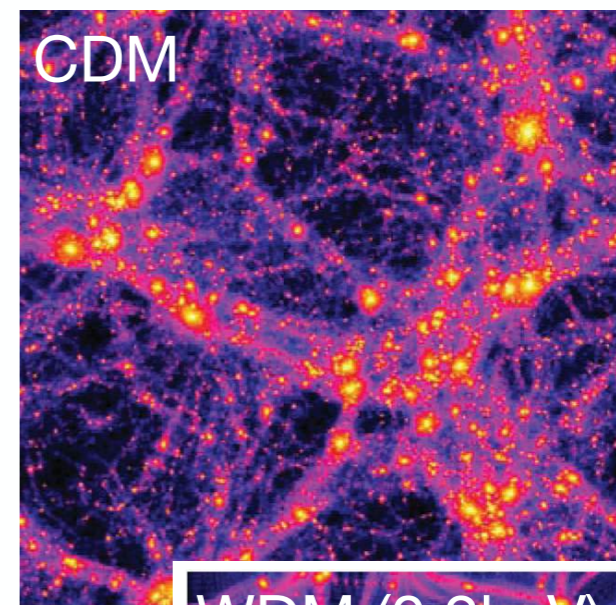
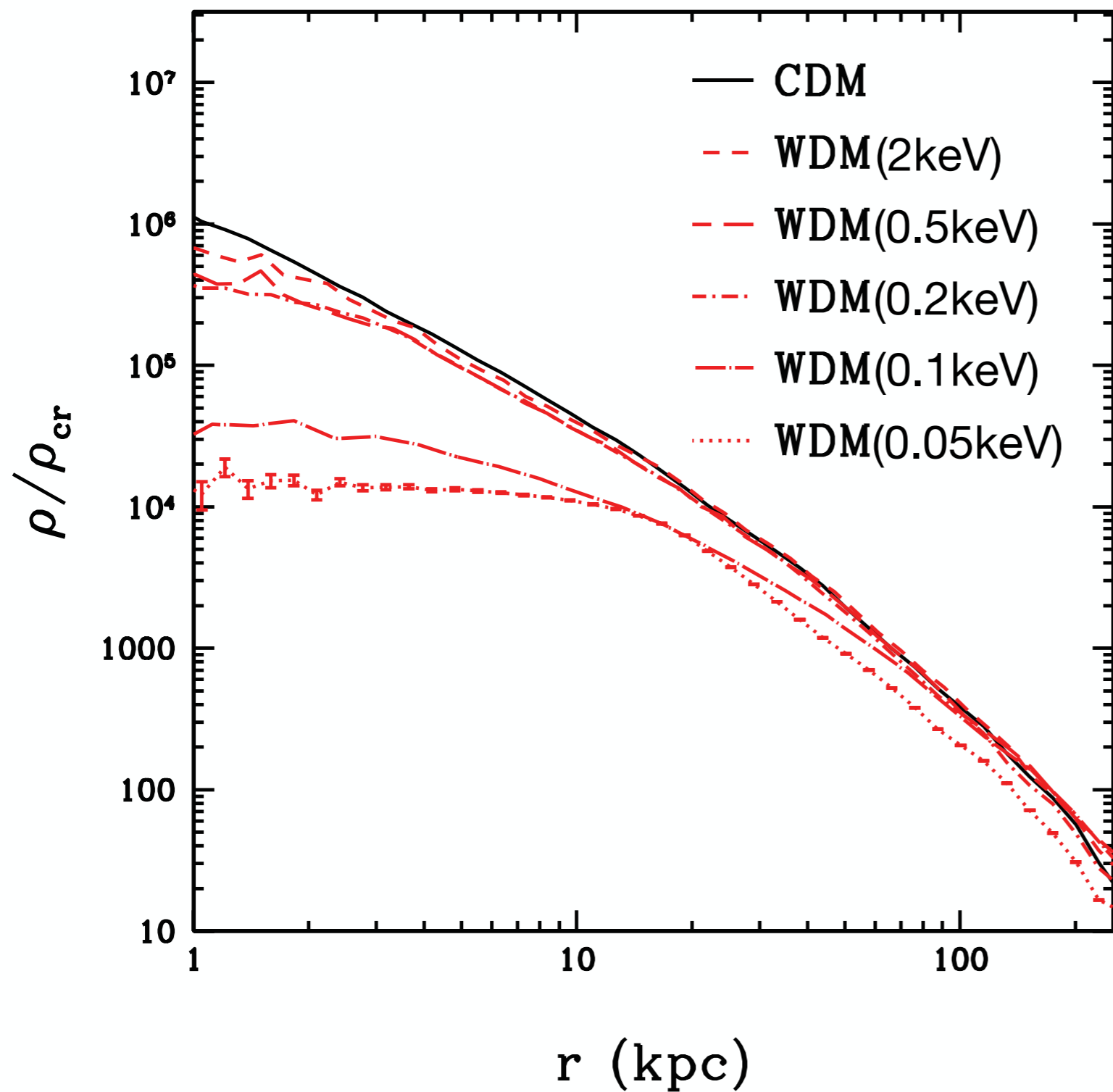


Les petites structures sont supprimées...

Pacucci et al. (2013)

La matière noire tiède (WDM)

~keV



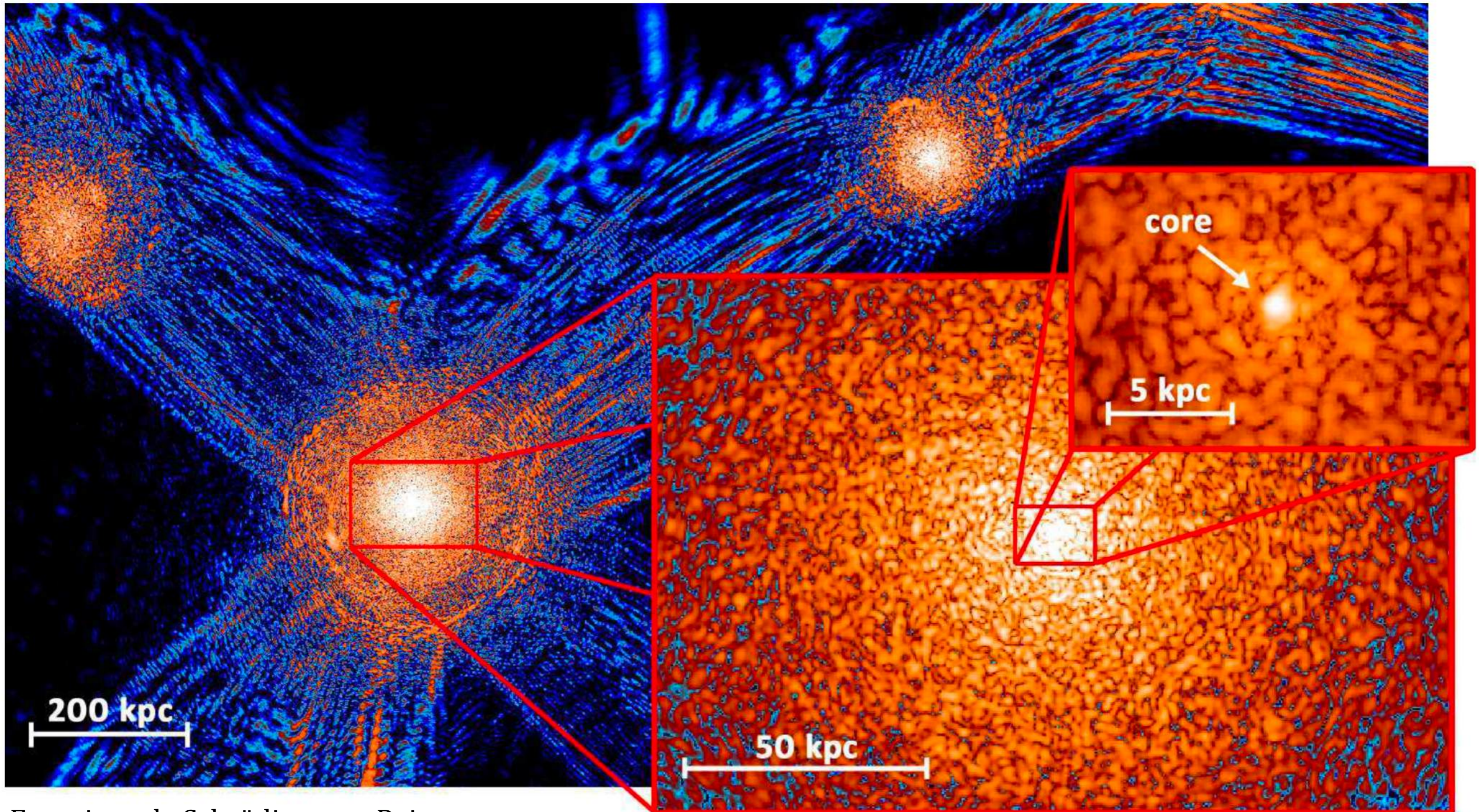
Pour former un coeur, il faut des masses très petites exclues des modèles (on ne forme pas des galaxies comme celles qui sont observées) ou il faut quand même invoquer le feedback...

Maccio et al. (2012)

La matière noire floue (FDM)

$\sim 10^{-22}$ eV

(a.k.a Ultra Light DM, Scalar Field DM, Wave DM, Bose-Einstein Condensate DM)



Equations de Schrödinger et Poisson :

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\mathbf{r}, t) + m \Phi_s(\mathbf{r}, t) \psi(\mathbf{r}, t)$$

$$\nabla^2 \Phi_s(\mathbf{r}, t) = 4\pi G |\psi(\mathbf{r}, t)|^2$$

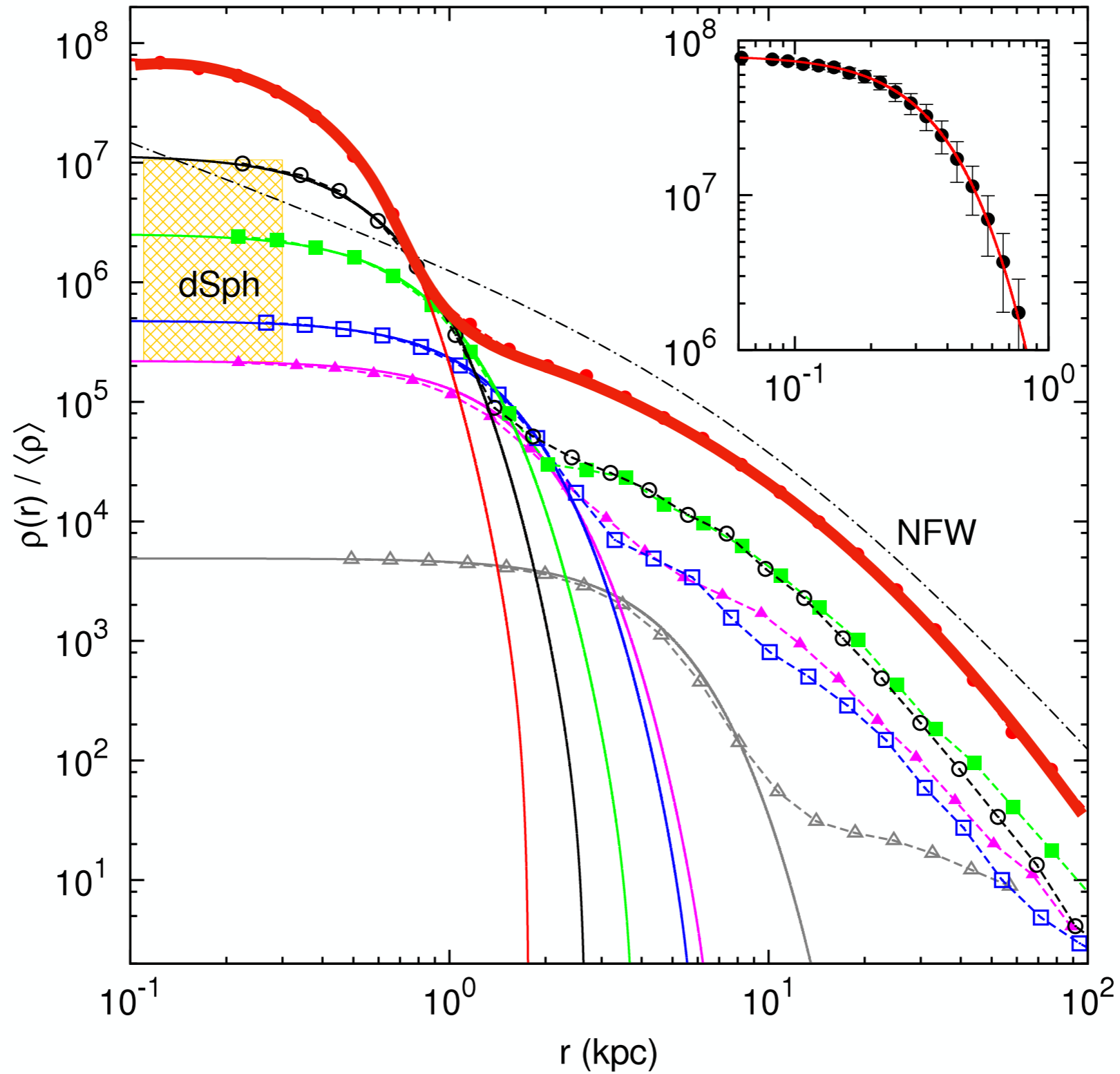
Interférences, granules, coeur (soliton)

FDM : Fuzzy Dark Matter

Schive et al. (2014)

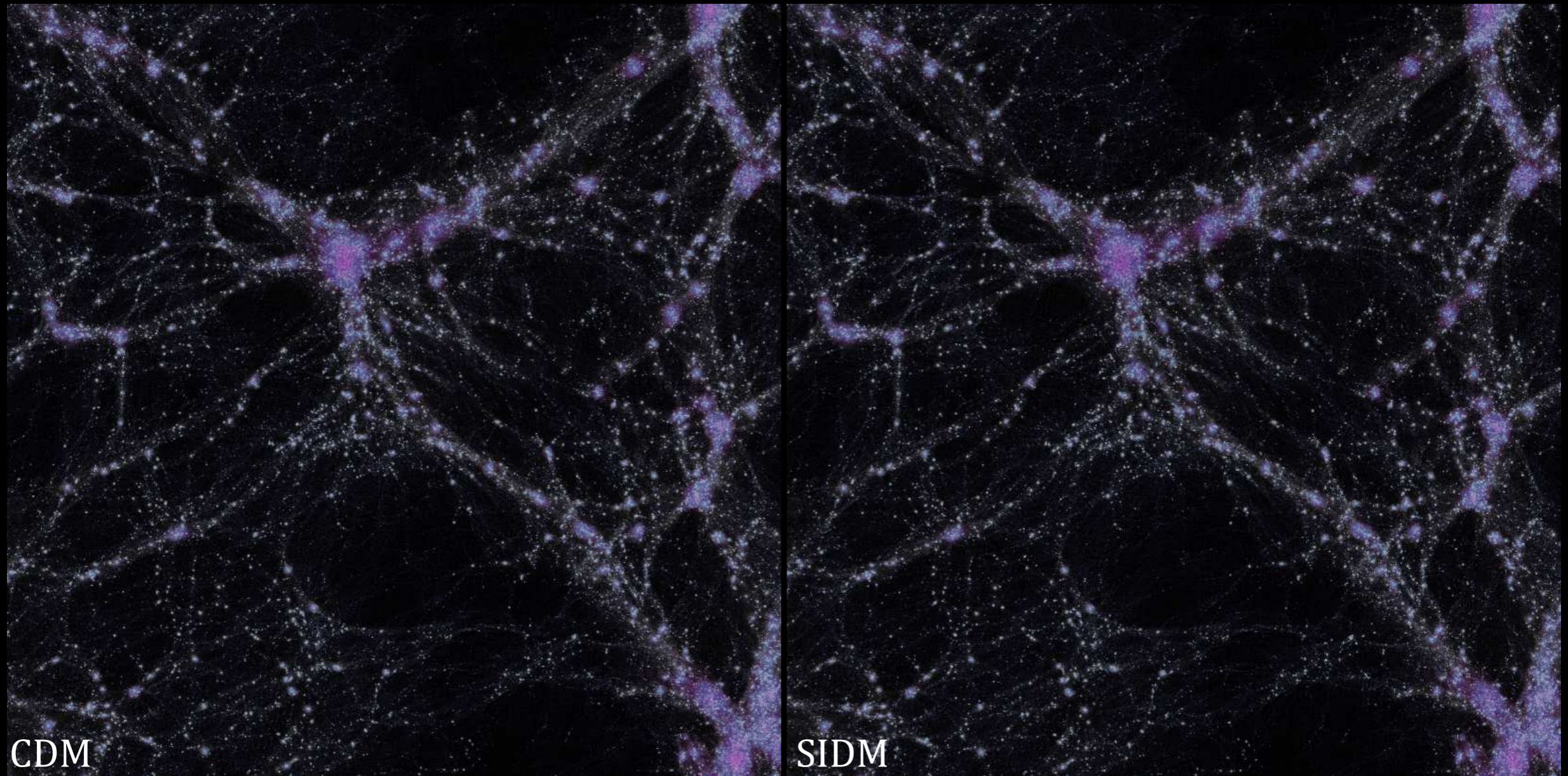
La matière noire floue (FDM)

$\sim 10^{-22}$ eV

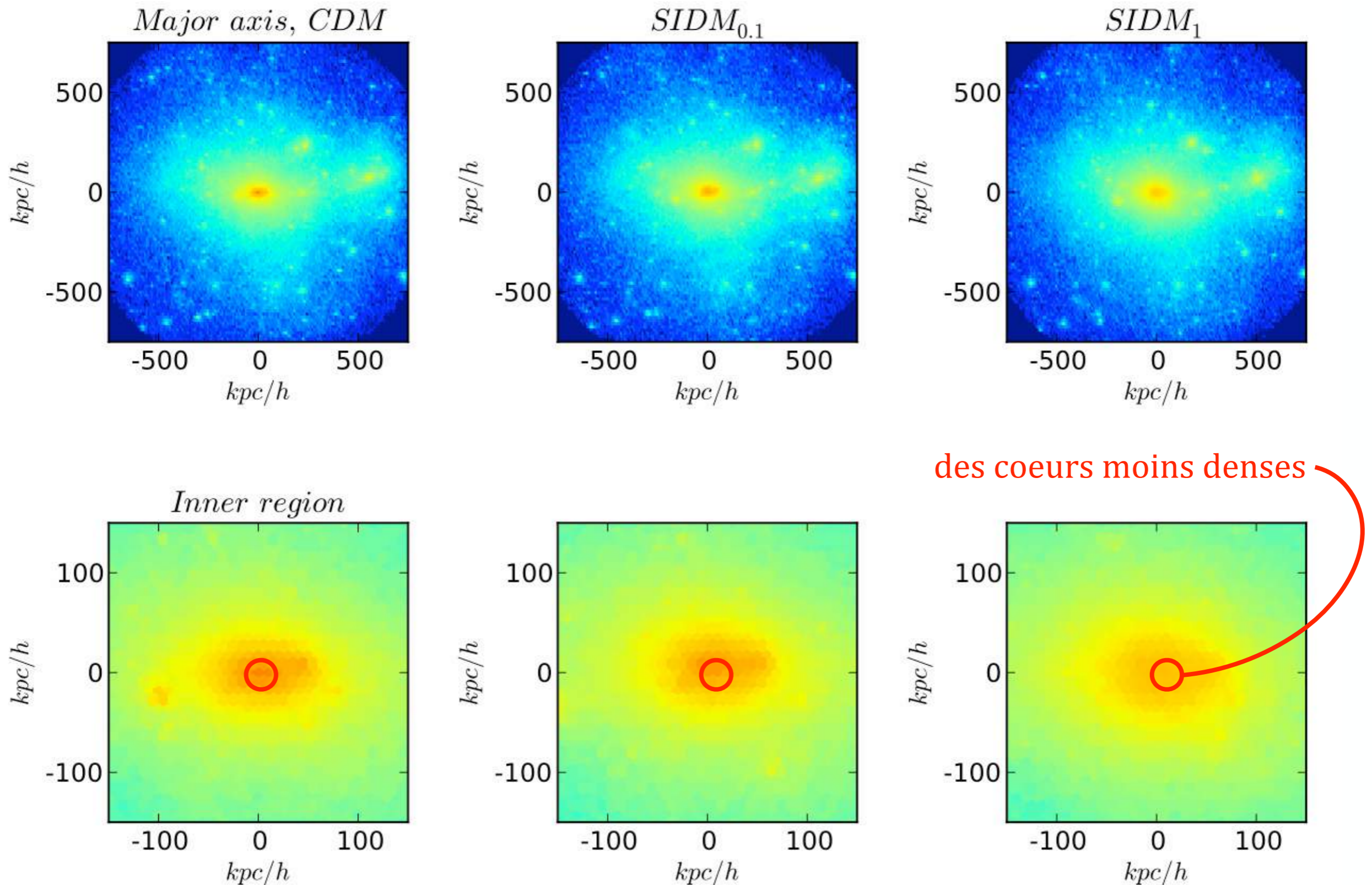


La matière noire auto-interagissante (SIDM)

La même structure à grande échelle que la matière noire froide



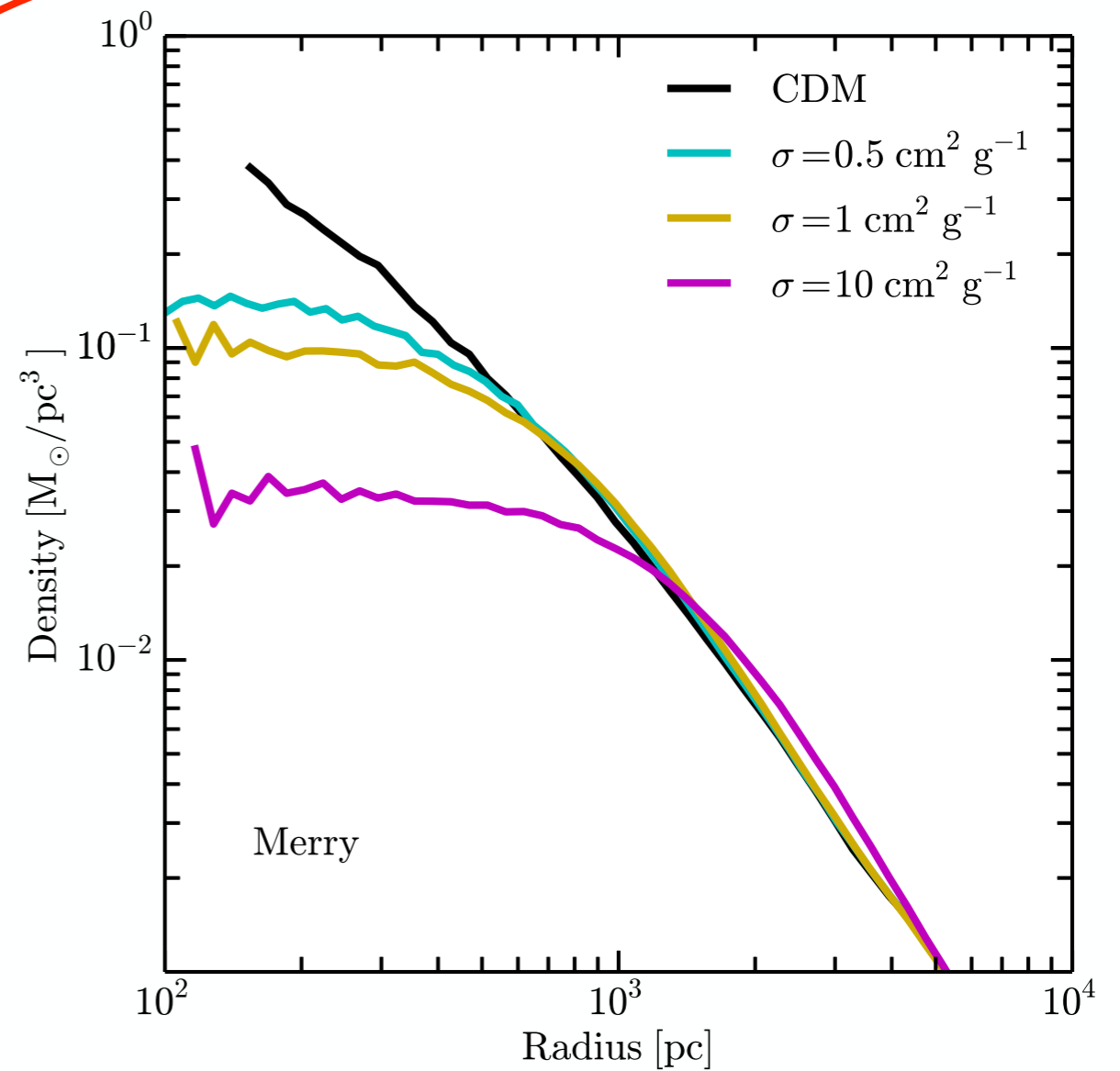
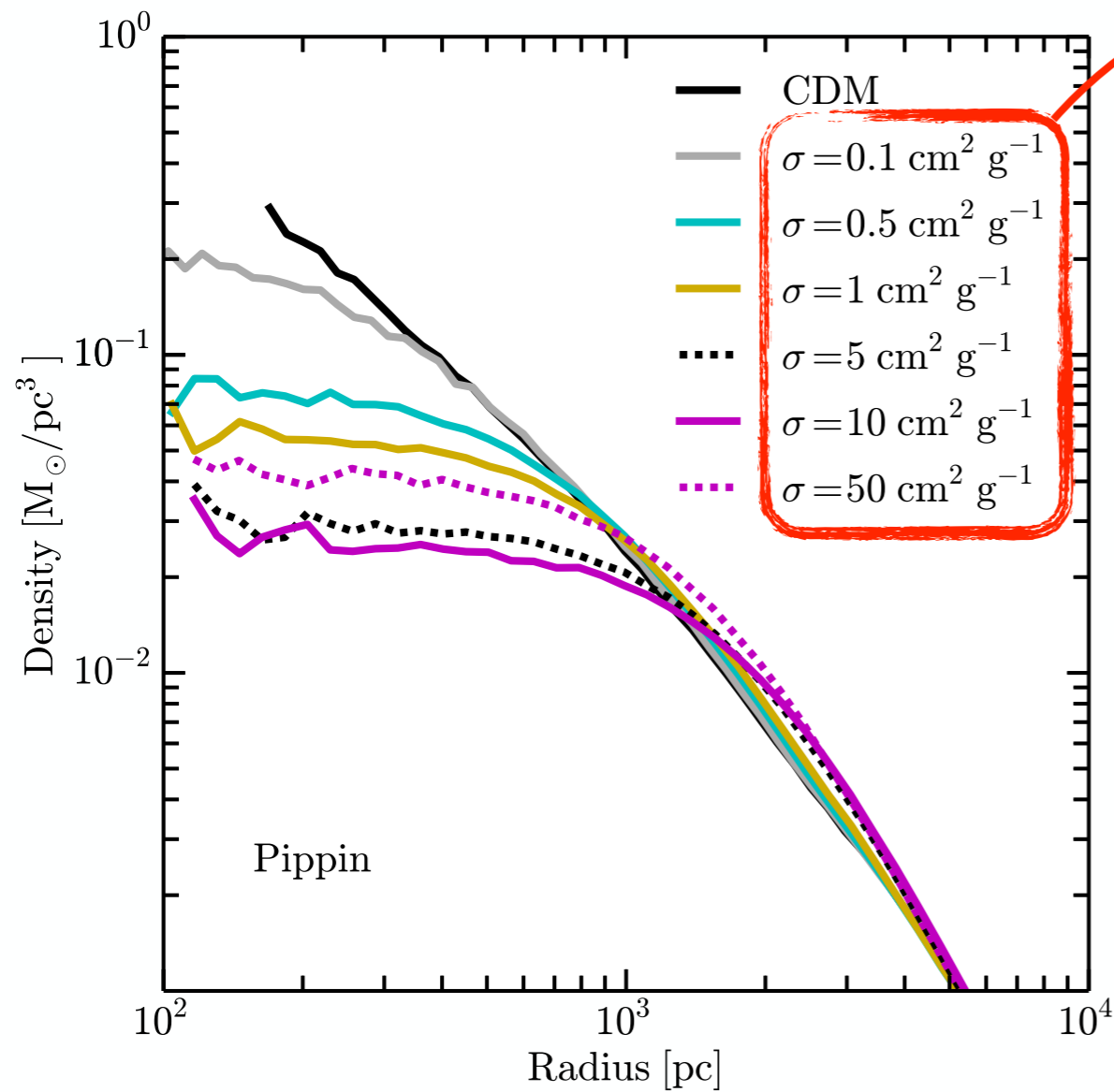
La matière noire auto-interagissante (SIDM)



La matière noire auto-interagissante (SIDM)

Des coeurs de matière noire

σ : section efficace

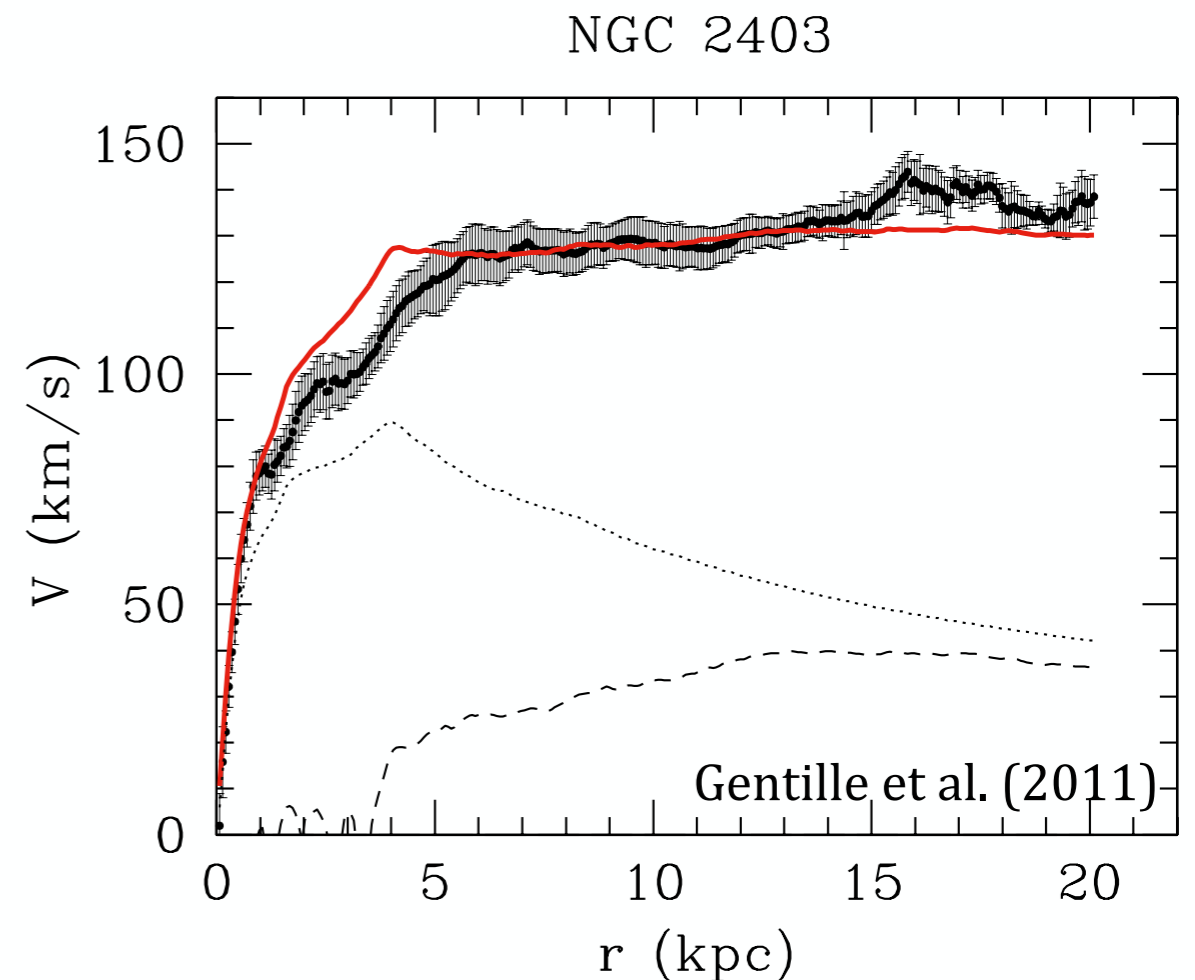
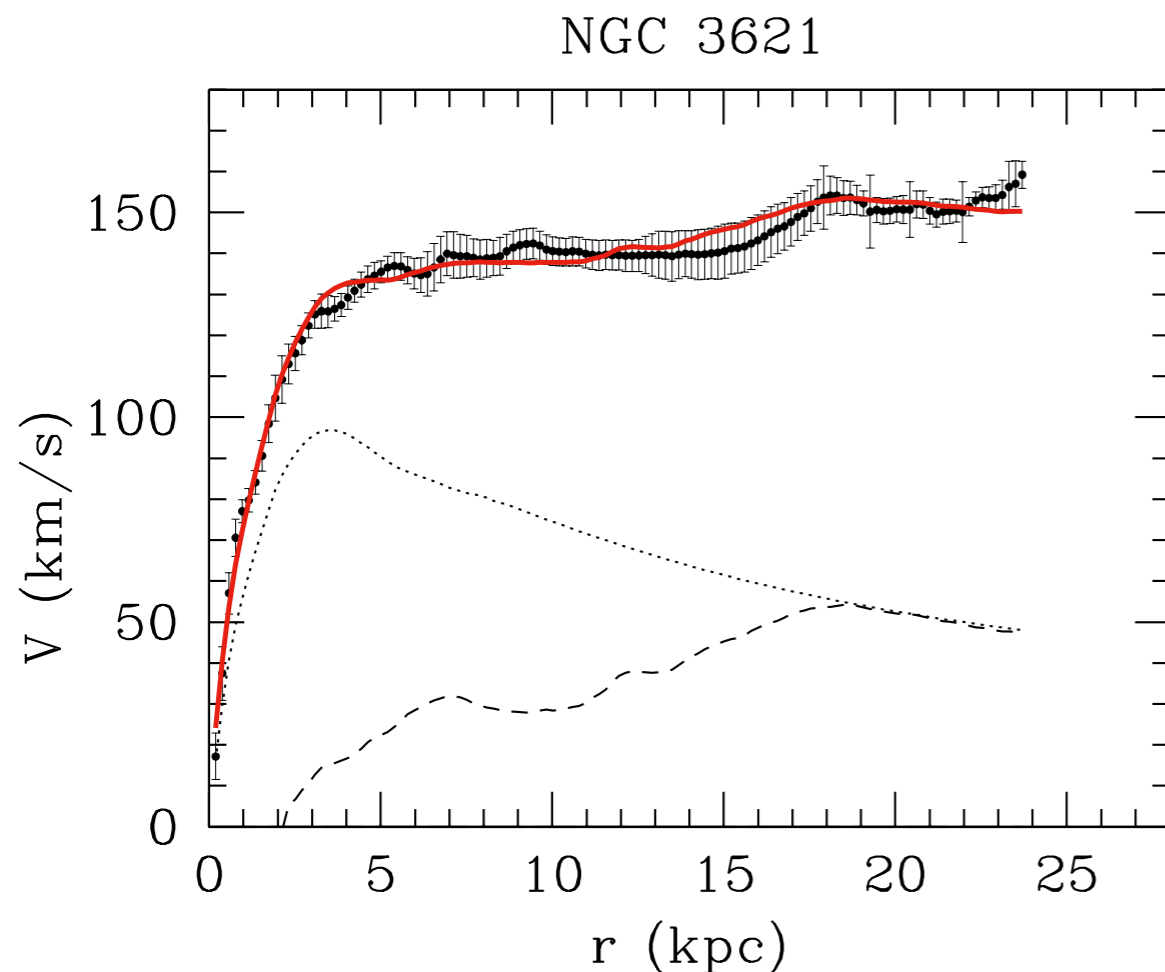


Modified Newtonian Dynamics (MOND) : Modifier la loi de la gravitation

Milgrom (1983) :

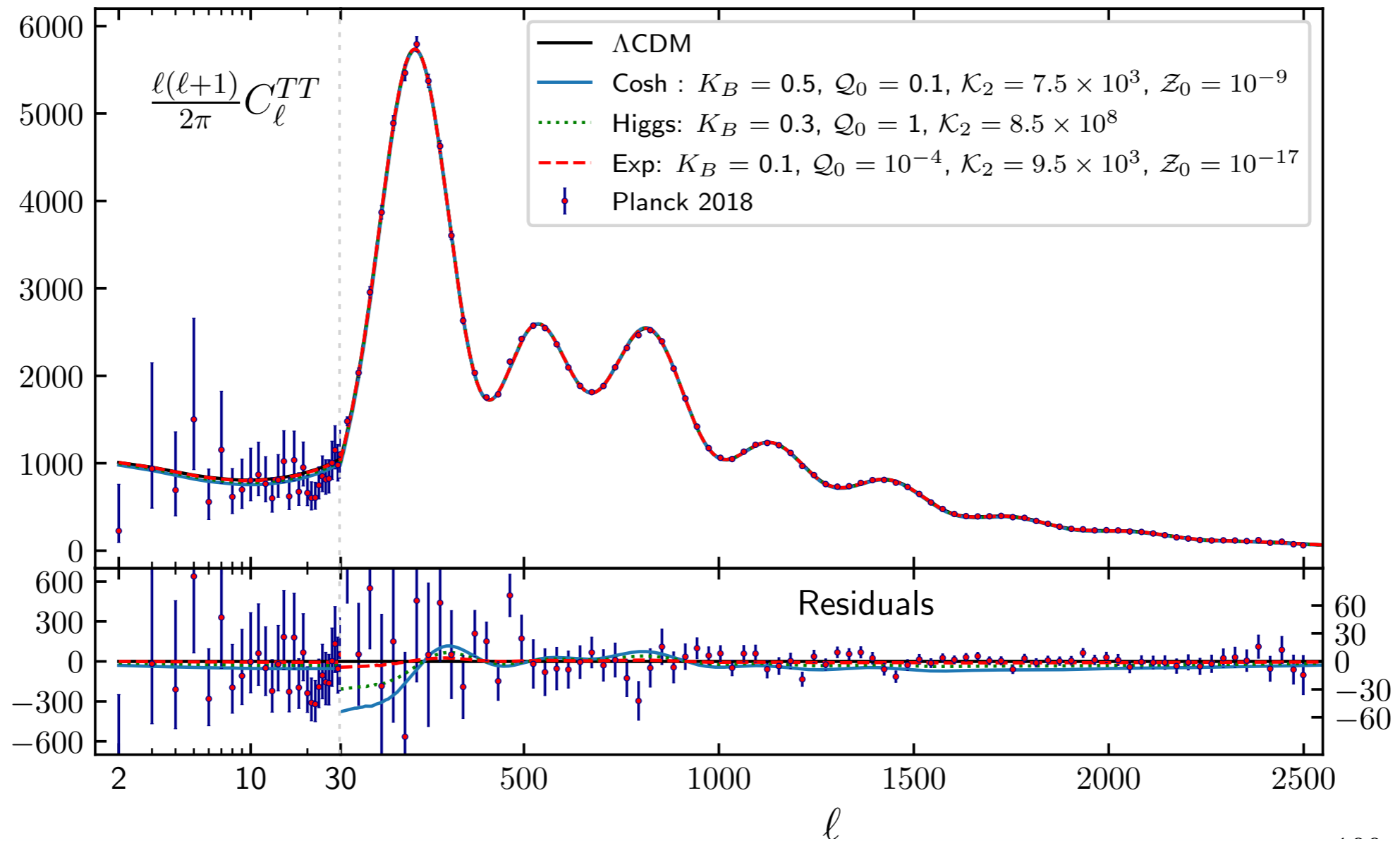
$$\begin{cases} g = g_N & \text{quand } g \gg a_0 \\ g = \sqrt{g_N a_0} & \text{quand } g \ll a_0 \end{cases} \quad \text{avec } a_0 \approx 10^{-10} \text{ m s}^{-2}$$

➔ Permet de décrire les courbes de rotation d'une grande variété de galaxies

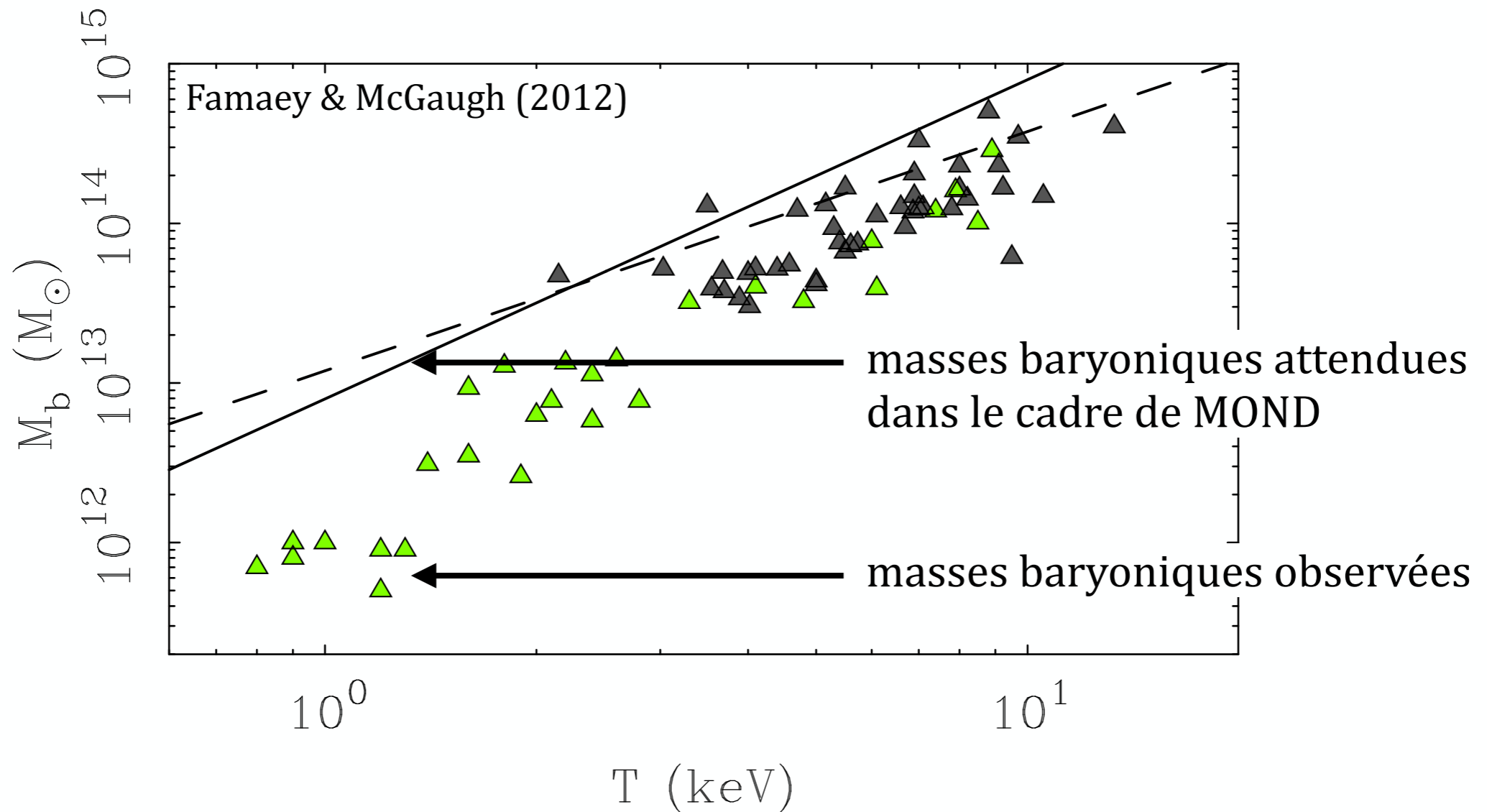


- ➔ Prédit la relation de Tully-Fisher baryonique et la relation de l'accélération radiale
- ➔ Permet plus facilement la présence de plans de satellites

Modified Newtonian Dynamics (MOND) : En quête d'une théorie relativiste

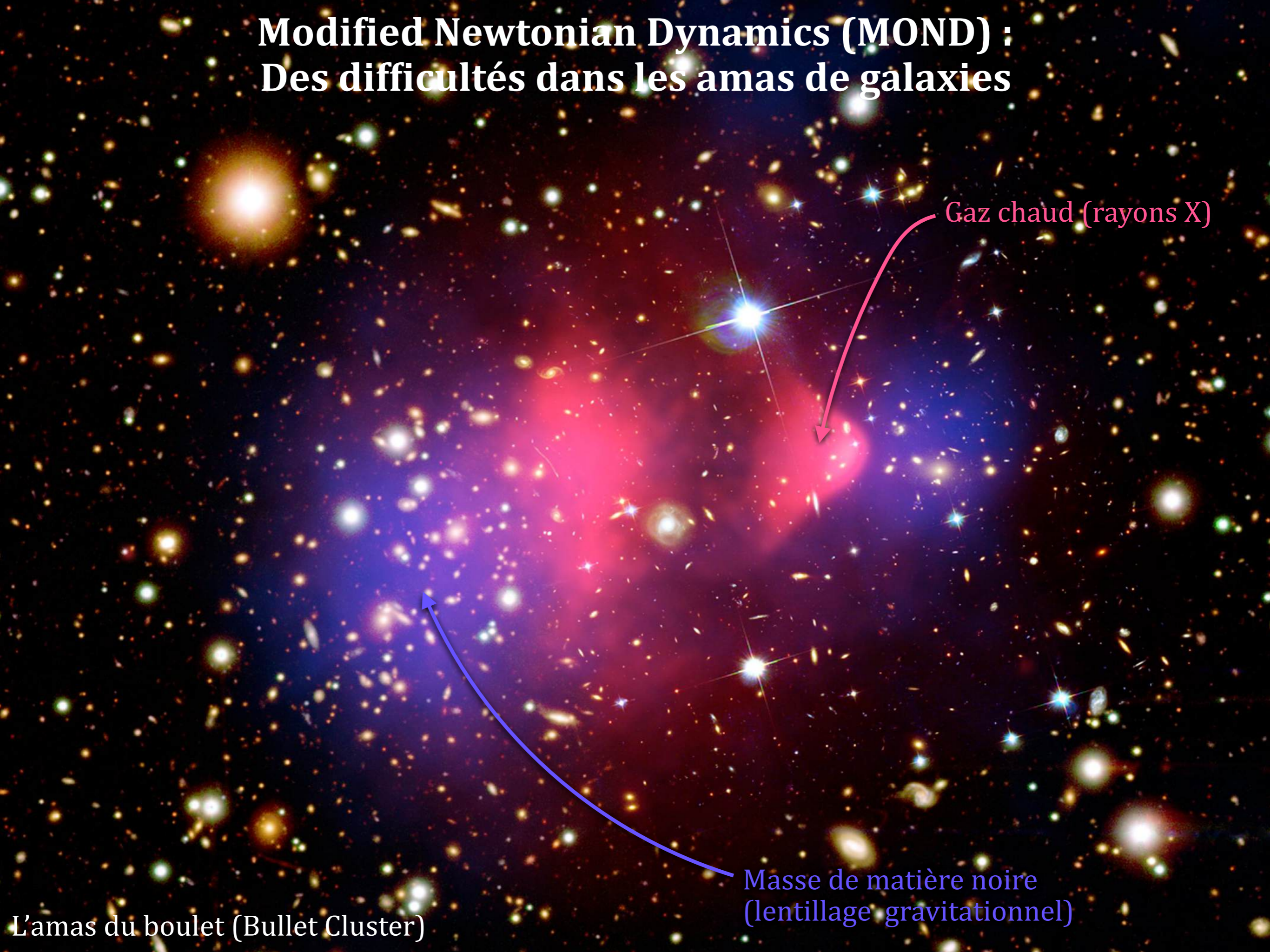


Modified Newtonian Dynamics (MOND) : Des difficultés dans les amas de galaxies



Il manque 2 à 10 fois la masse... et donc il faut quand même avoir recours à de la matière noire !

Modified Newtonian Dynamics (MOND) : Des difficultés dans les amas de galaxies

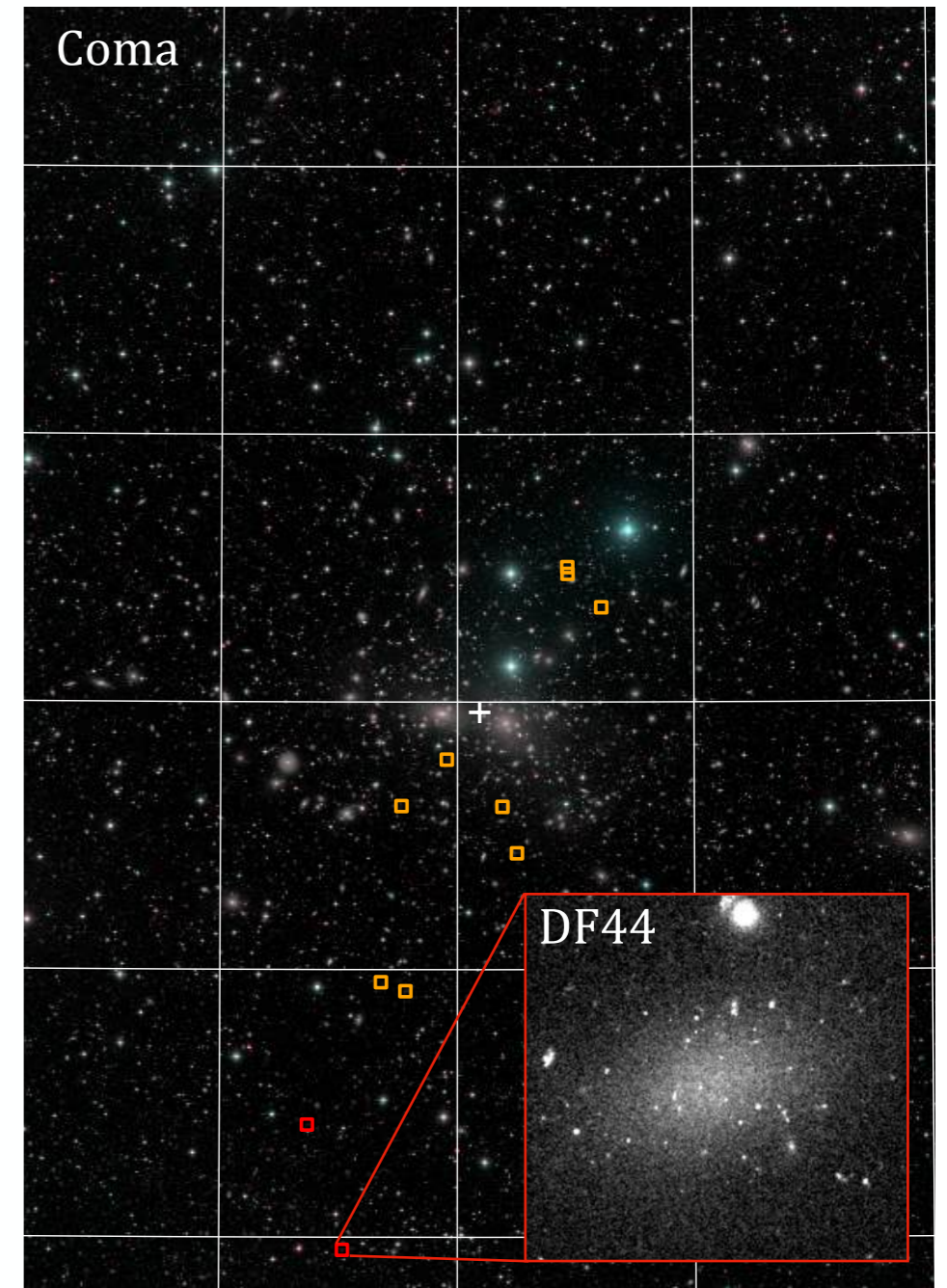
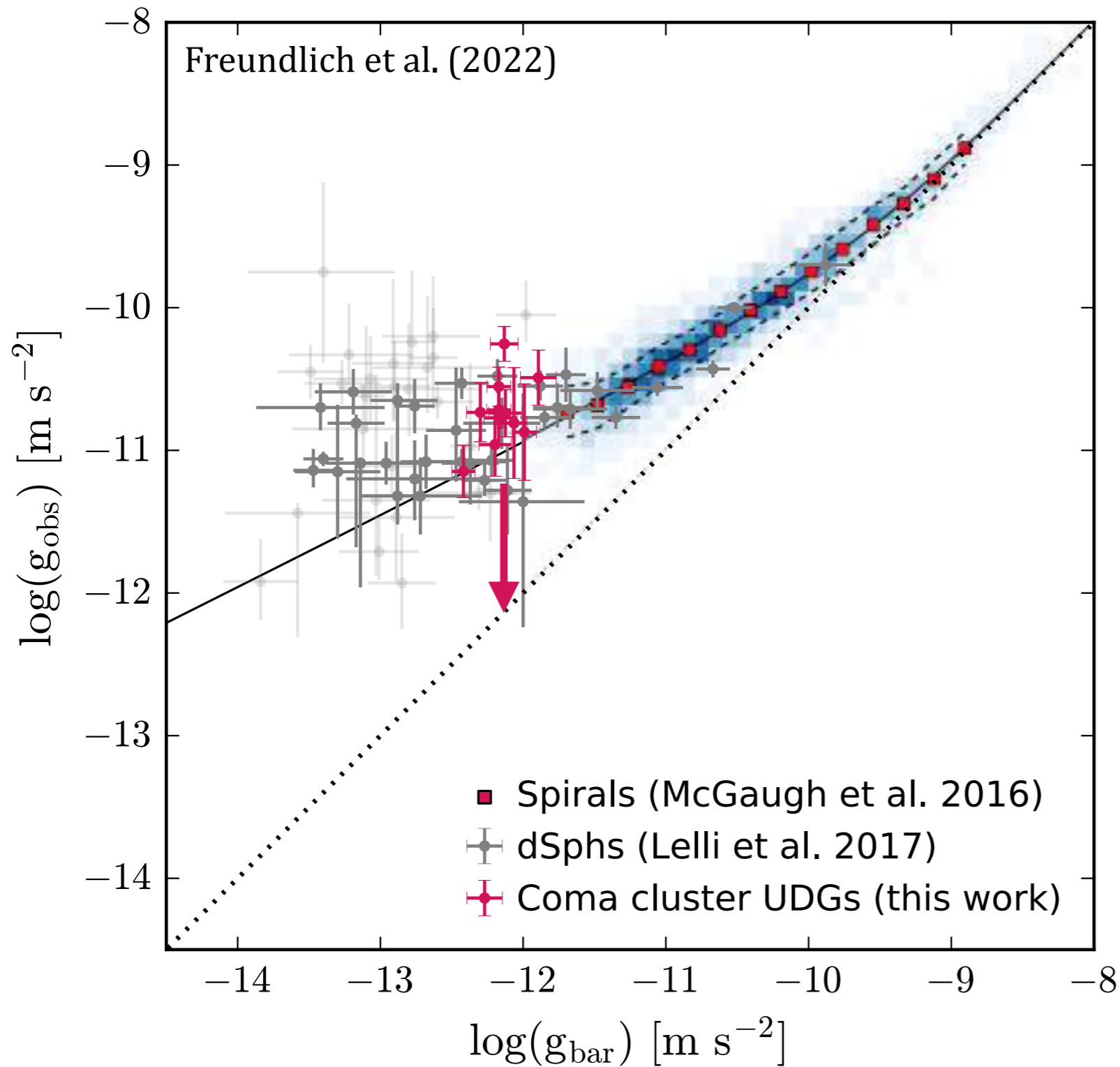


Gaz chaud (rayons X)

Masse de matière noire
(lentillage gravitationnel)

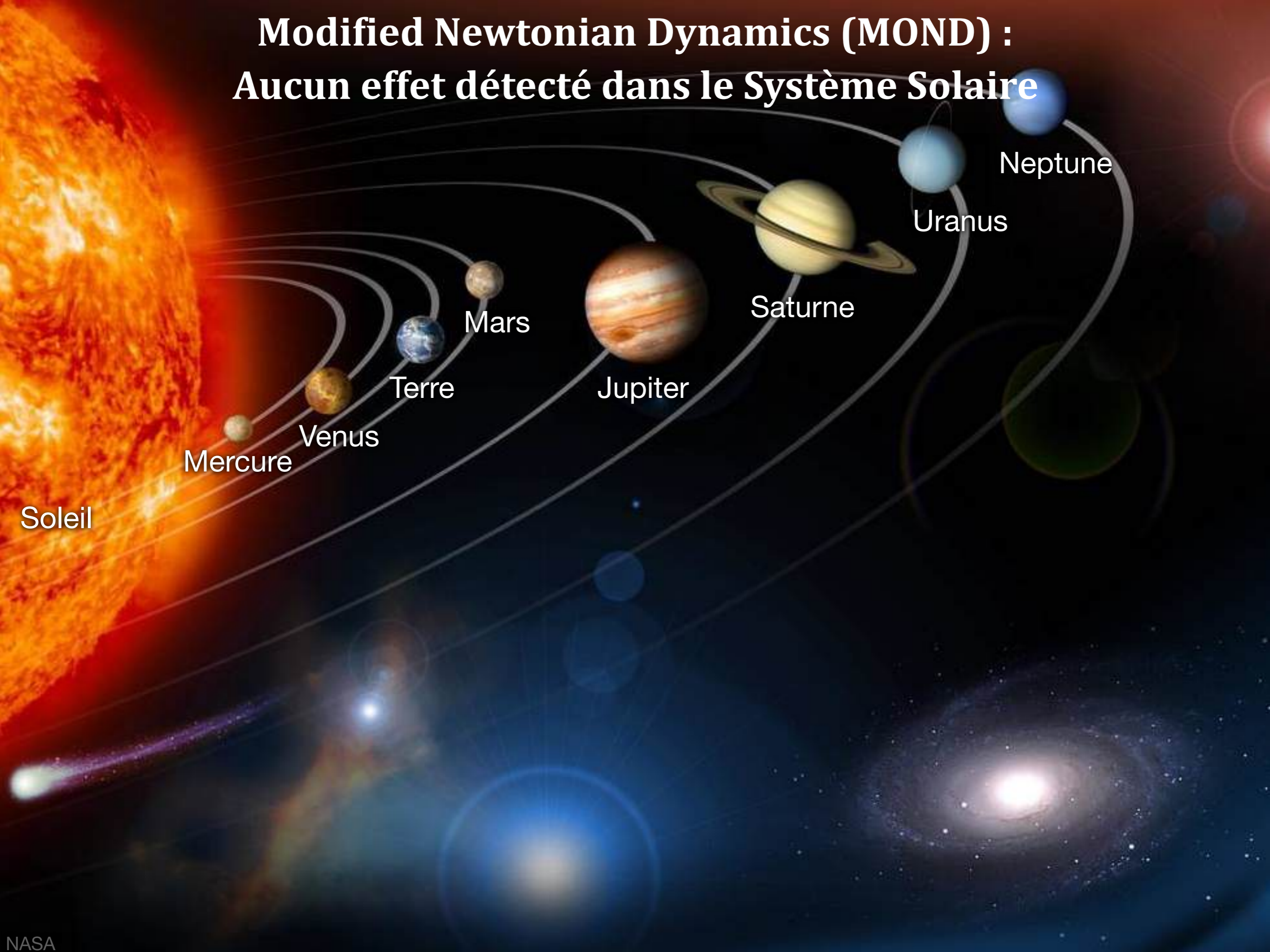
L'amas du boulet (Bullet Cluster)

Modified Newtonian Dynamics (MOND) : Des difficultés dans les amas de galaxies



Les galaxies ultra-diffuses de l'amas de Coma se comportent comme si elles étaient isolées, ce qui n'est pas le cas... Elles devraient "tomber" vers la ligne pointillée dans le cadre de MOND.

Modified Newtonian Dynamics (MOND) : Aucun effet détecté dans le Système Solaire



Conclusion

- ◆ Le modèle Λ CDM permet de rendre compte du fond diffus cosmologique, de décrire l'Univers à grande échelle, et de le simuler.
-

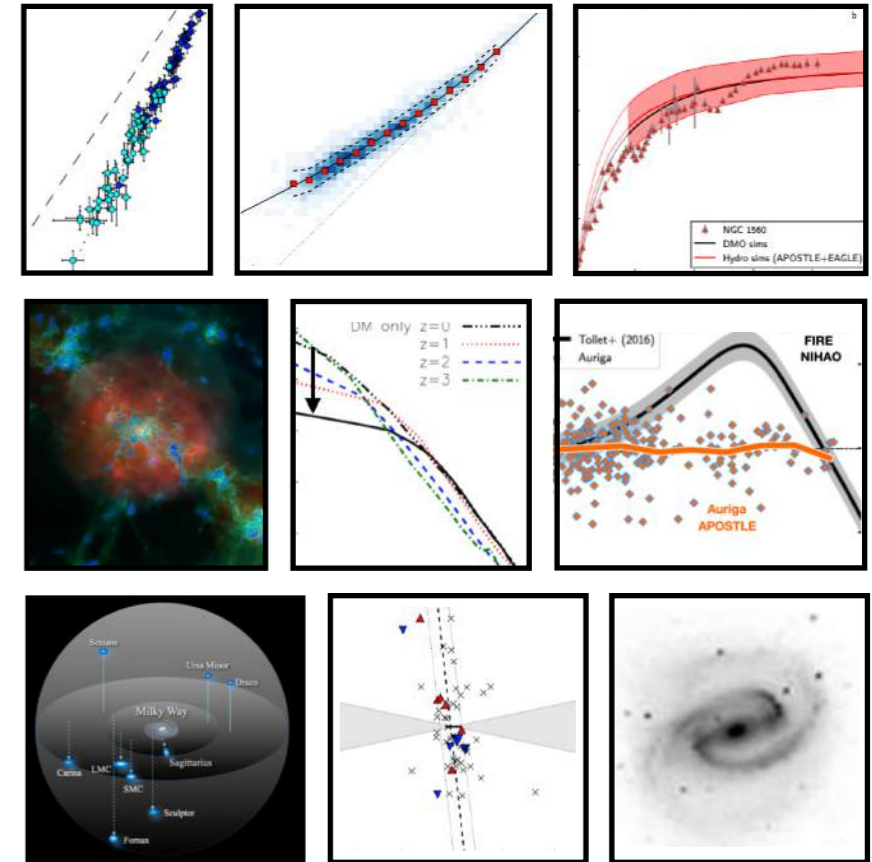
- ◆ Mais il demeure des défis à l'échelle des galaxies qui devraient être mieux compris ou pourraient indiquer les limites du modèle :

- les fortes corrélations observées entre masse baryonique et champ gravitationnel, ainsi que la diversité des courbes de rotation ;

- les phénomènes de feedback, leur implémentation dans les simulations, et leur influence sur les halos de matière noire et les satellites ;

- l'évolution des galaxies naines et des satellites (formation d'étoiles, plans) ;

- la formation et l'évolution des barres.



- ◆ Des alternatives existent mais connaissent elles-mêmes leurs propres défis :

- matière noire tiède, floue, auto-interagissante

- gravité modifiée

- ...

