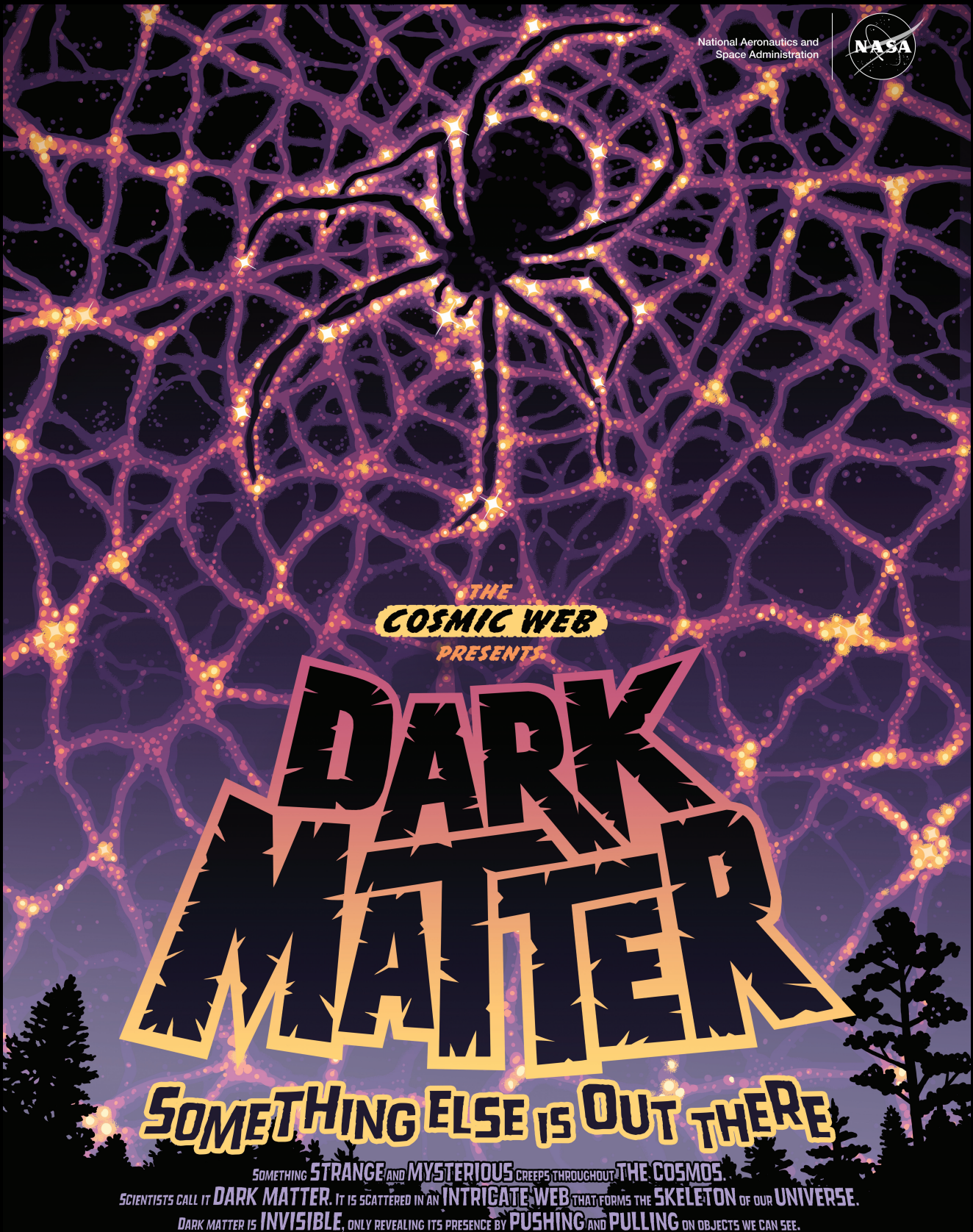


Matière noire : mirage ou réalité ?



---

# 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

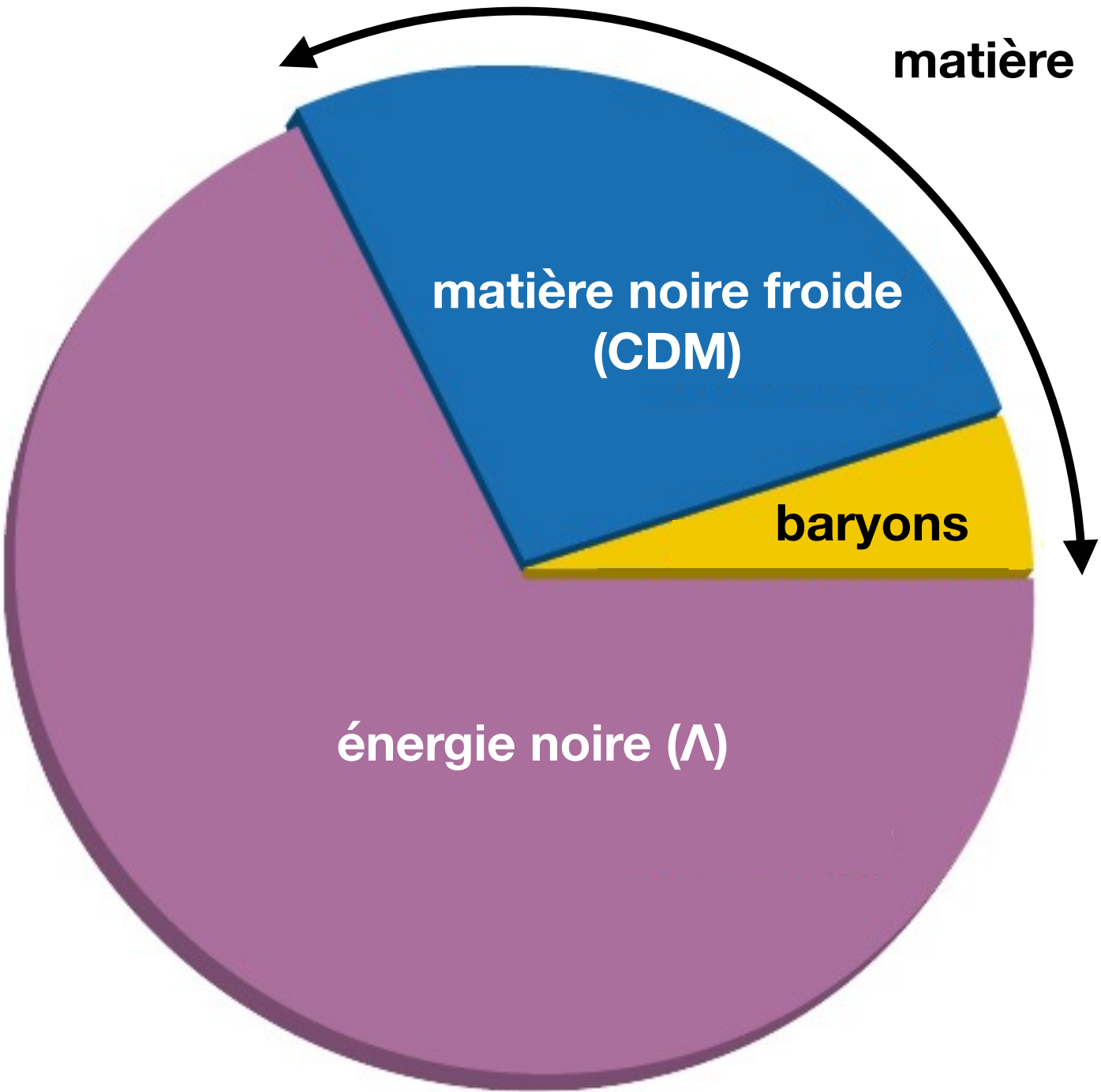
## Cours 4 (31/01/23) : Formation & évolution des galaxies : succès et défis du modèle cosmologique actuel

- 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

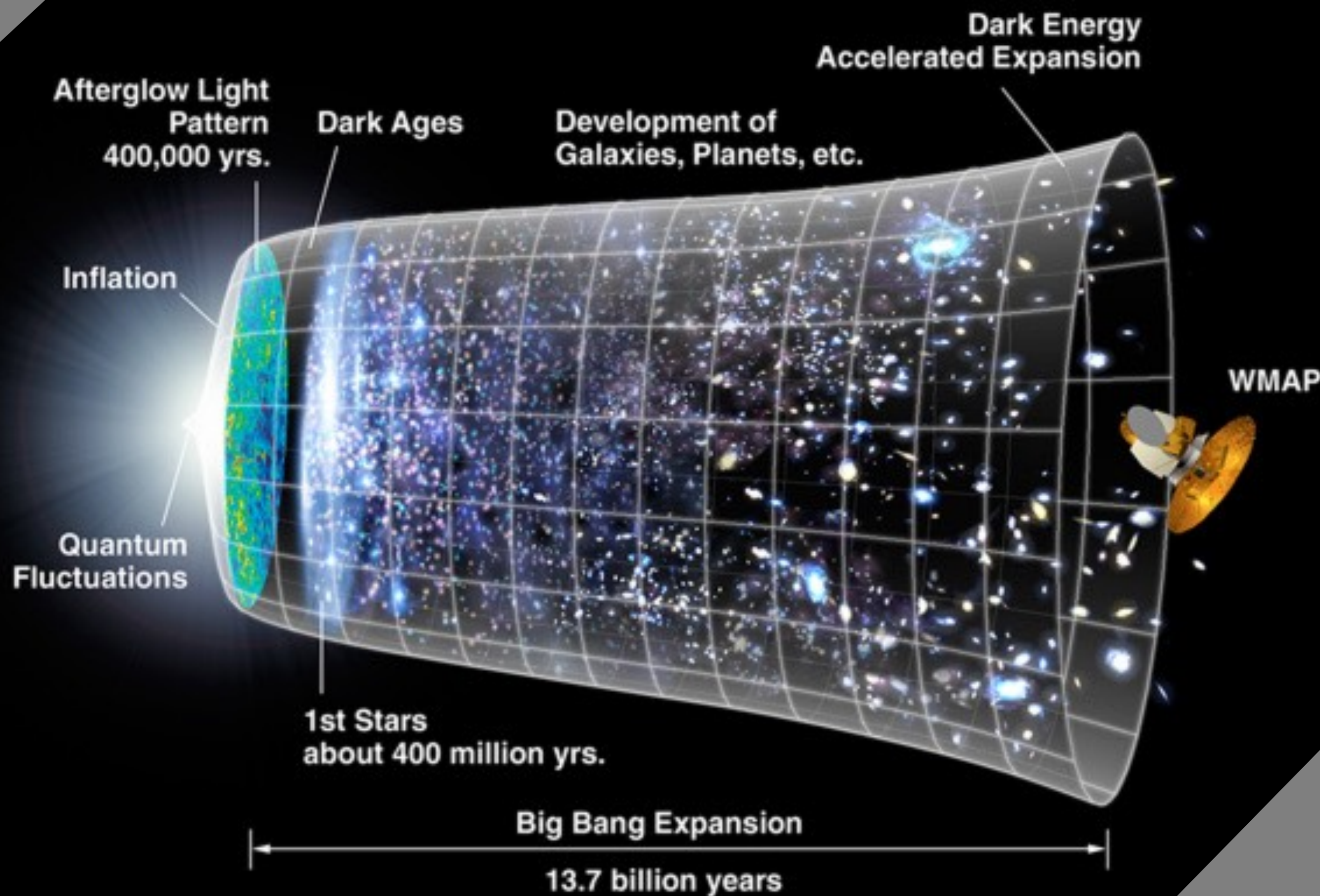
## Cours 5 (07/02/23) : Les alternatives à la matière noire froide

- 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

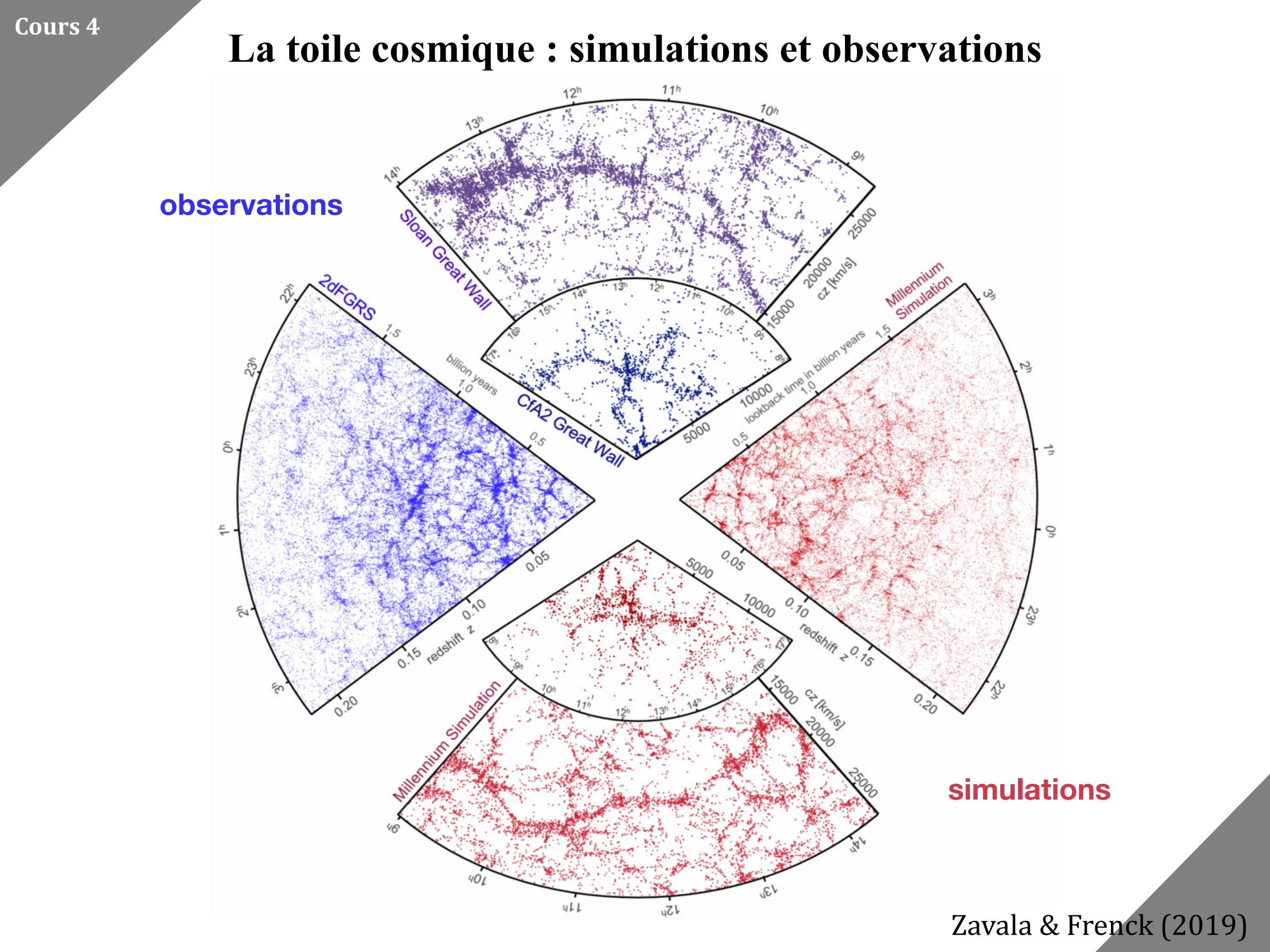
# La composition de l'Univers dans le modèle $\Lambda$ CDM









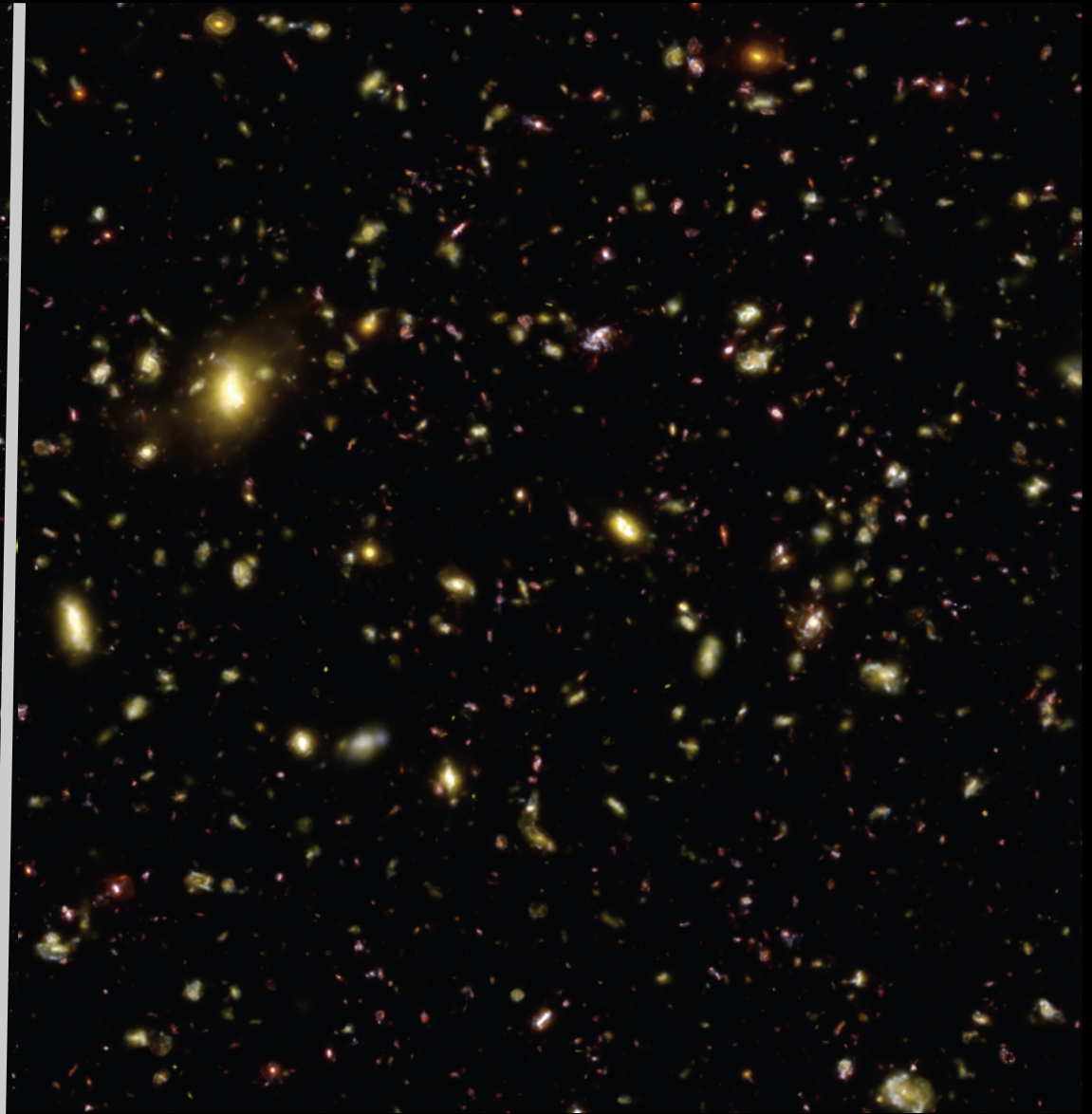




# Galaxies : simulations et observations



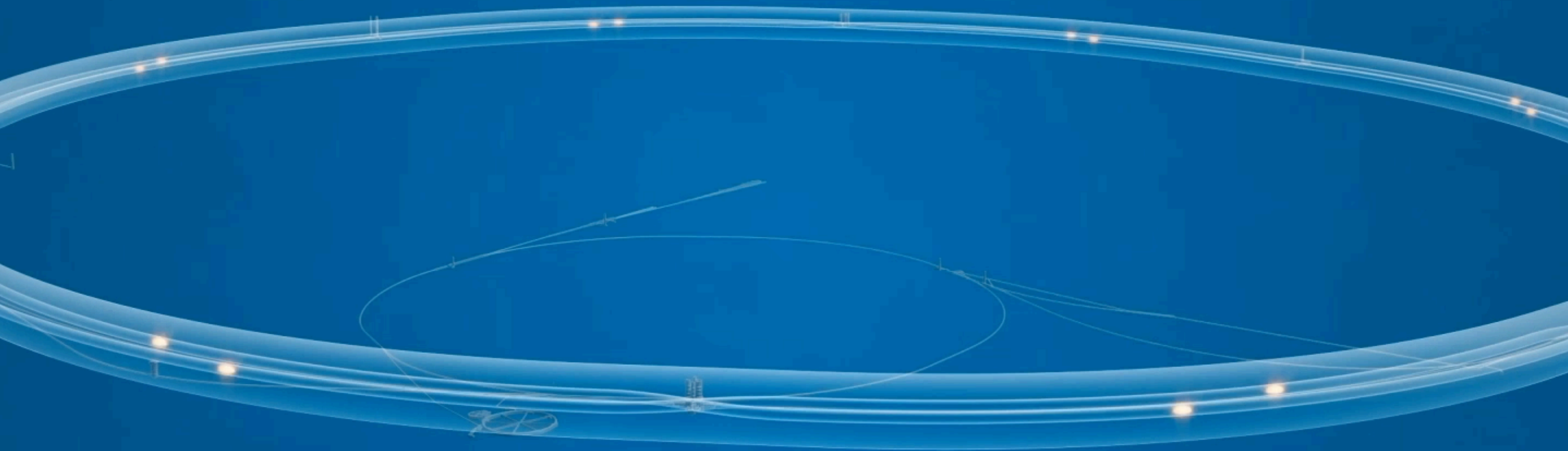
Hubble Space Telescope



Illustris simulation

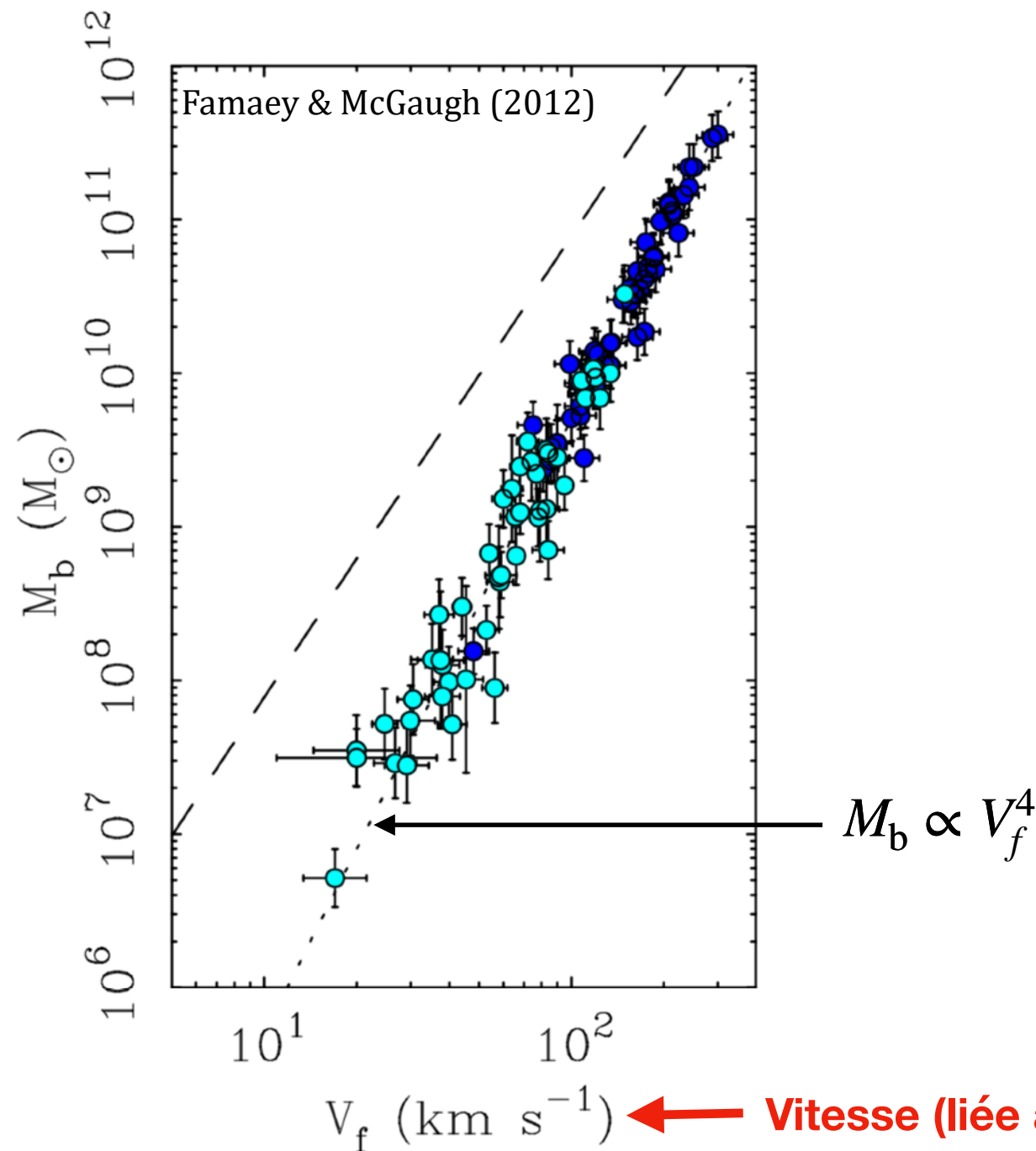


# Les défis du modèle $\Lambda$ CDM : la non-détection des WIMPS



# Les défis du modèle $\Lambda$ CDM : la corrélation entre masse baryonique et cinématique

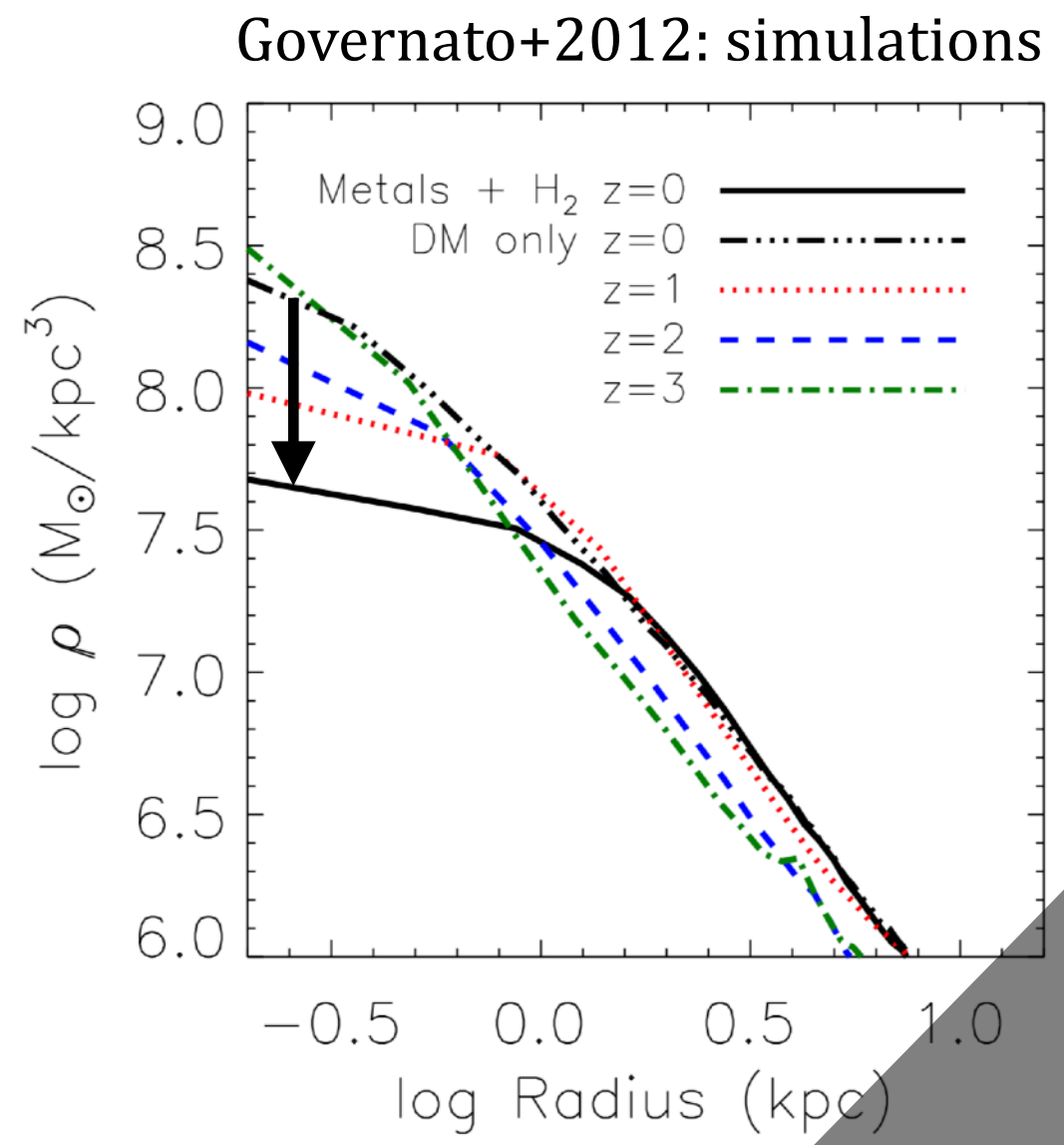
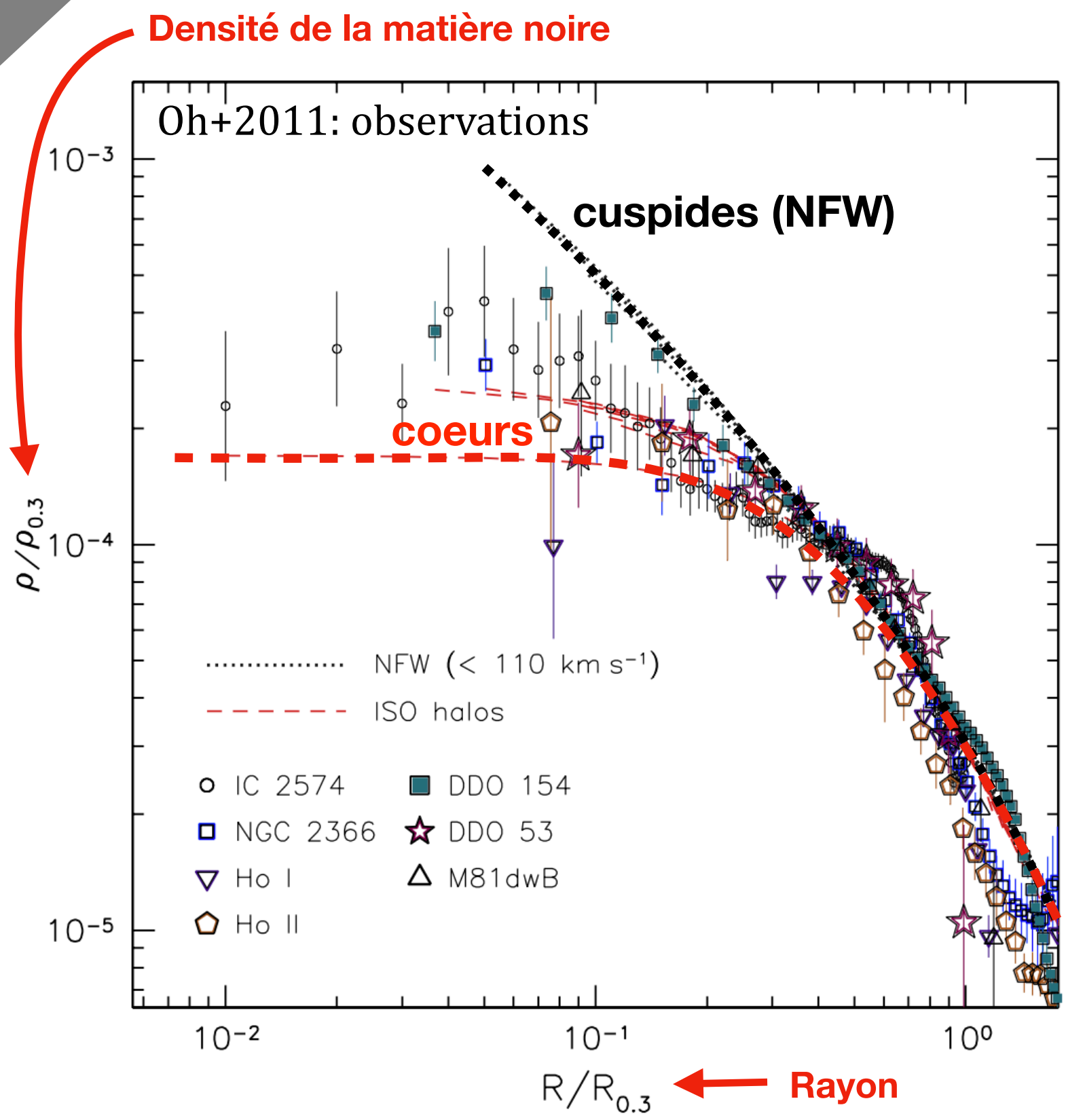
Masse baryonique (étoiles et gaz)



**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...



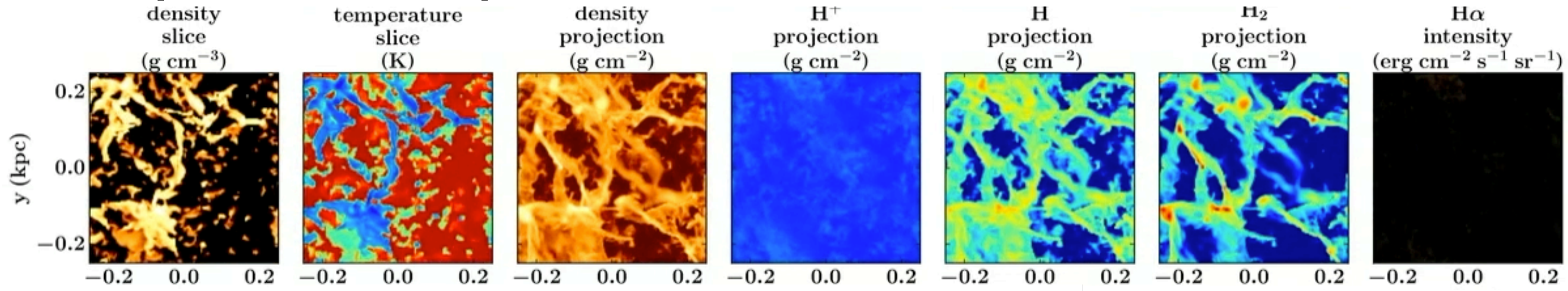
# Les défis du modèle $\Lambda$ CDM : la diversité de la forme des halos de matière noire



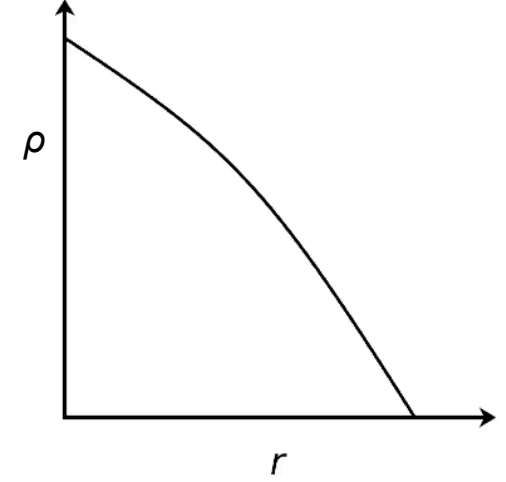
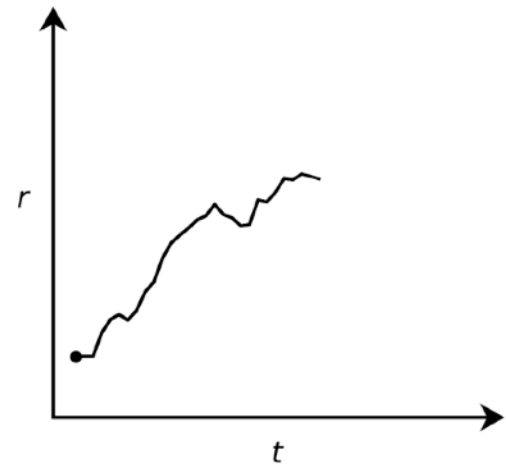
# Les défis du modèle $\Lambda$ CDM : la diversité de la forme des halos de matière noire

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

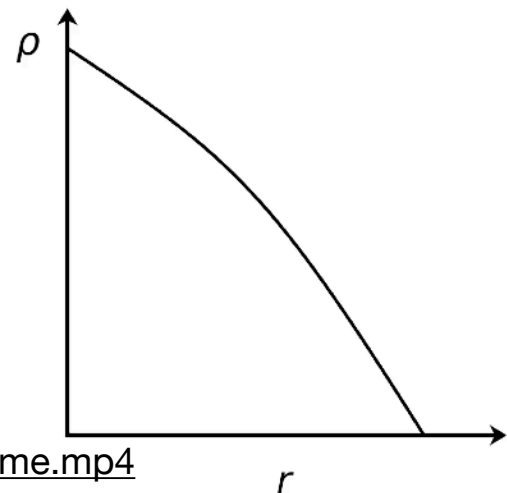
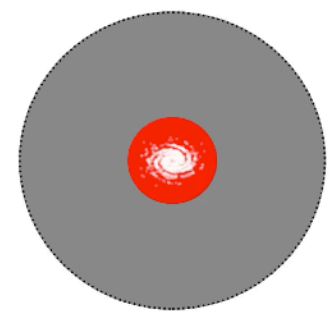
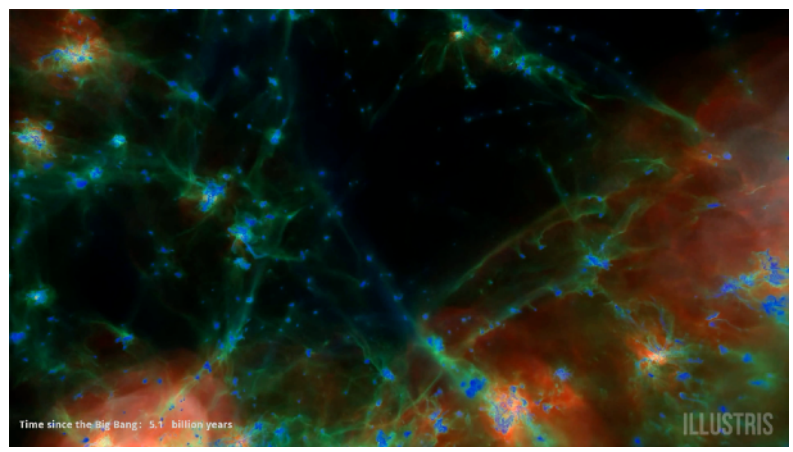
- soit par l'effet cumulatif des petites fluctuations du milieu interstellaire



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



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



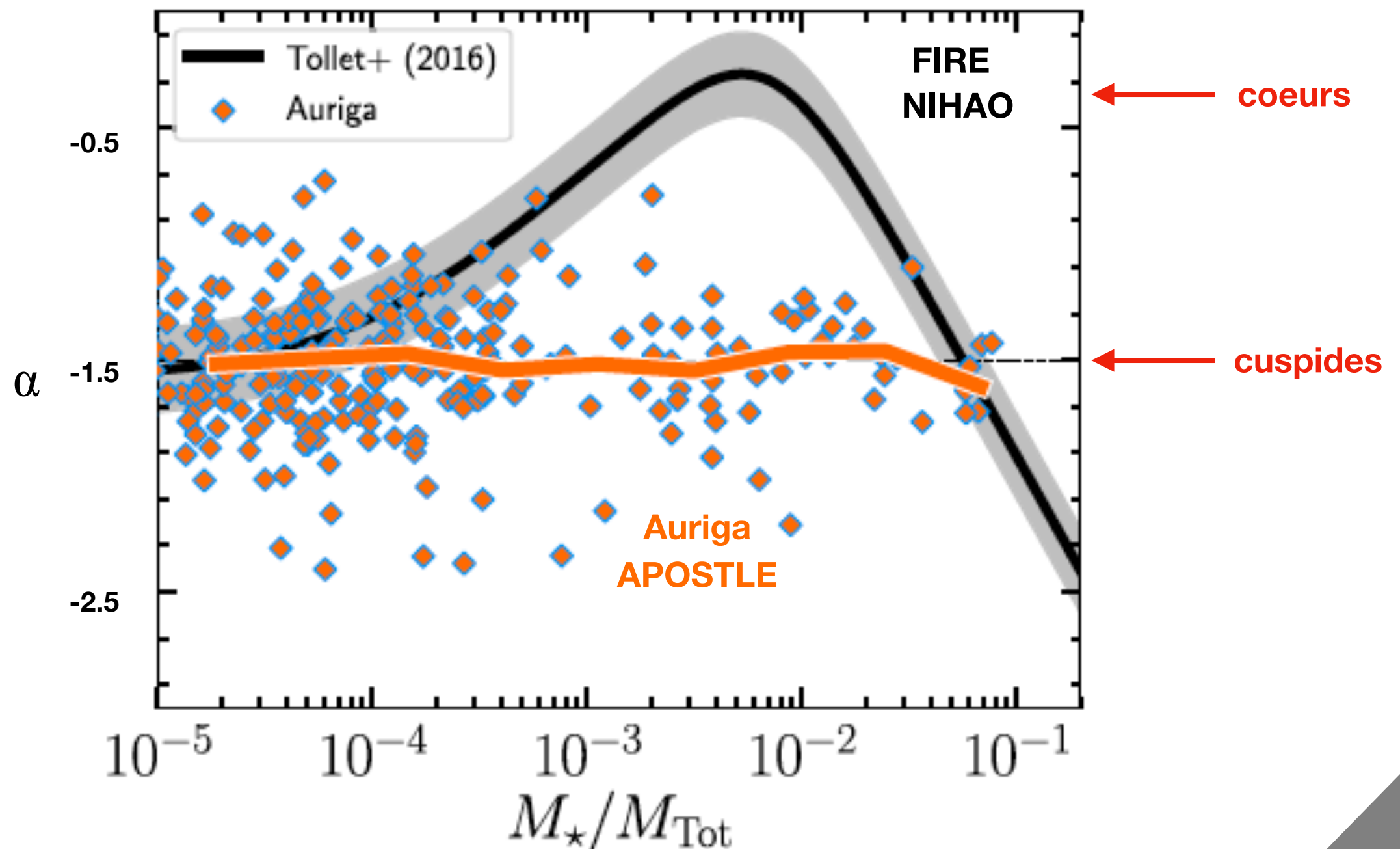
lien video : [https://www.illustris-project.org/movies/illustris\\_movie\\_rot\\_sub\\_frame.mp4](https://www.illustris-project.org/movies/illustris_movie_rot_sub_frame.mp4)

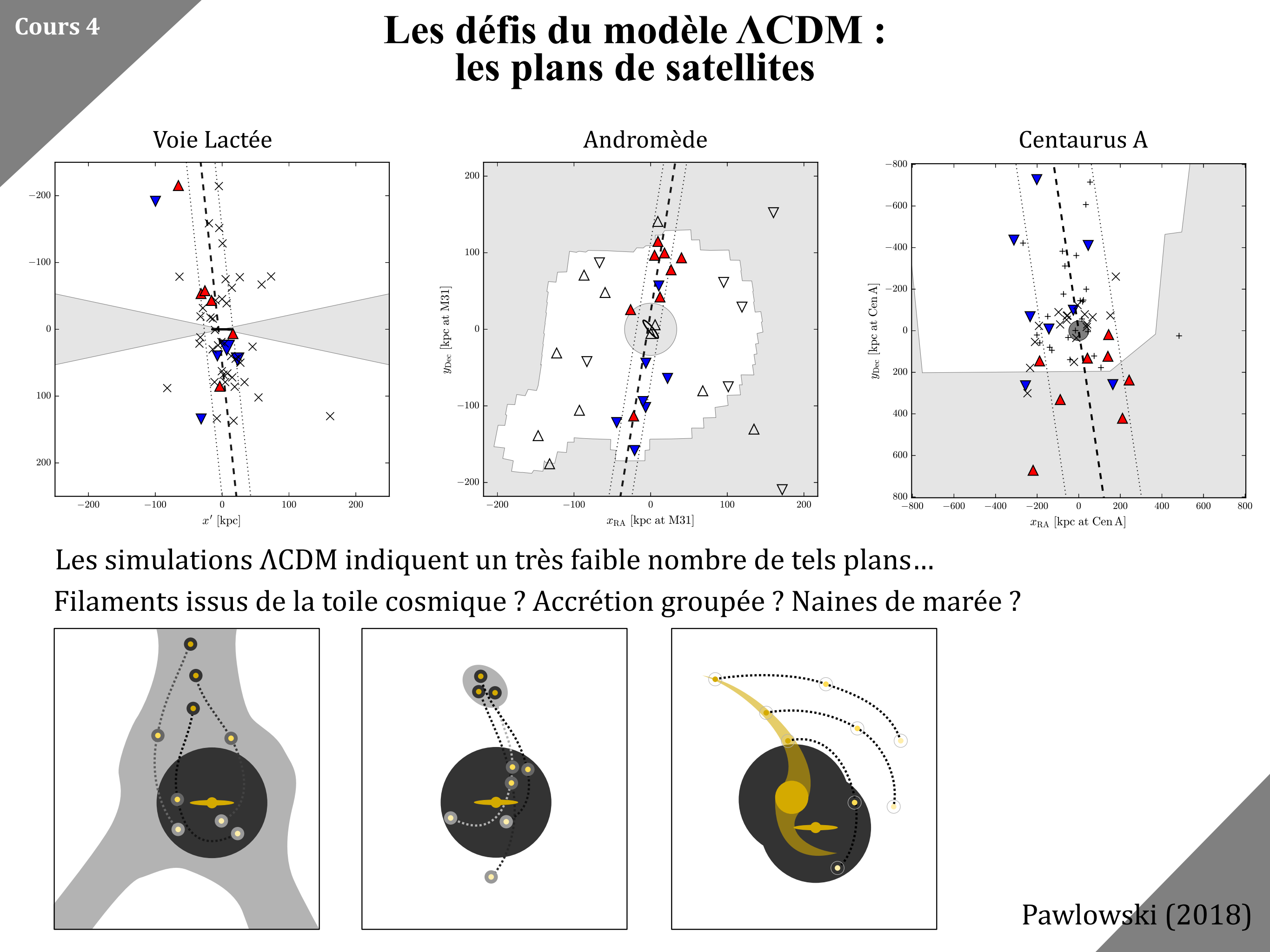


# Les défis du modèle $\Lambda$ CDM : la diversité de la forme des halos de matière noire

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

Pente au centre du halo de matière noire

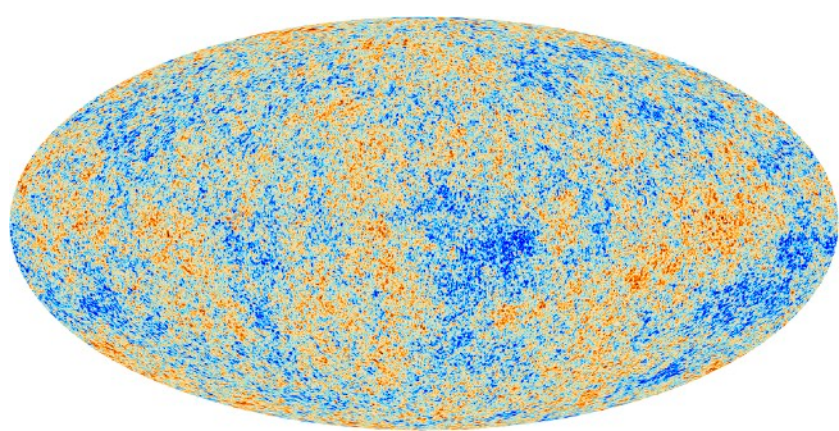






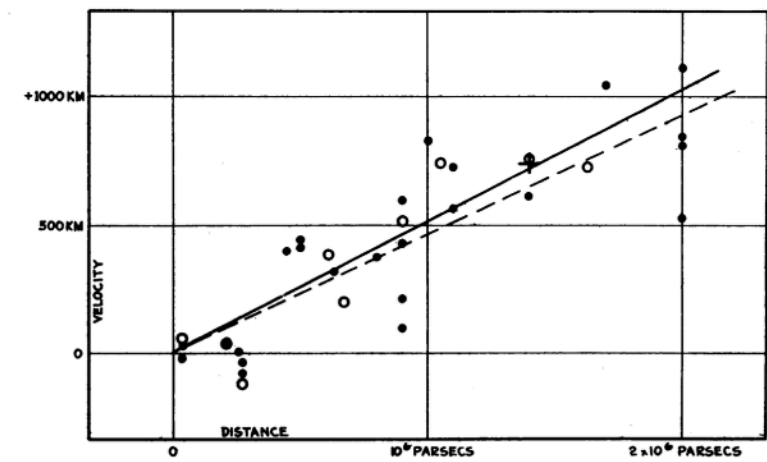
# Les défis du modèle $\Lambda$ CDM : les différentes valeurs de la constante de Hubble

## Fond diffus cosmologique



  
Planck  
(2018)

## Univers local

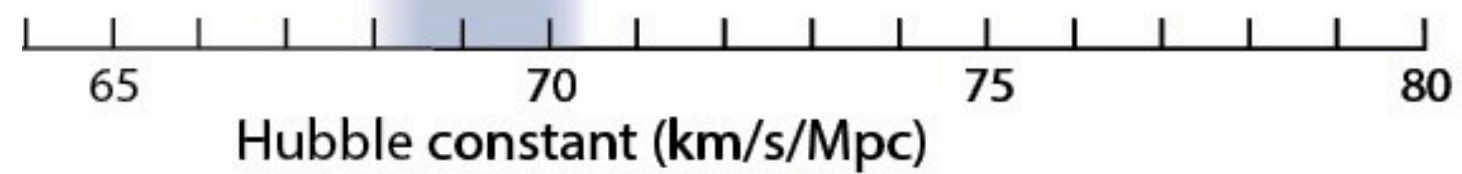


  
SH0ES (2018)

  
Carnegie (2018, H band)

  
Carnegie (2018, B band)

  
H0LiCOW (2018)



---

**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

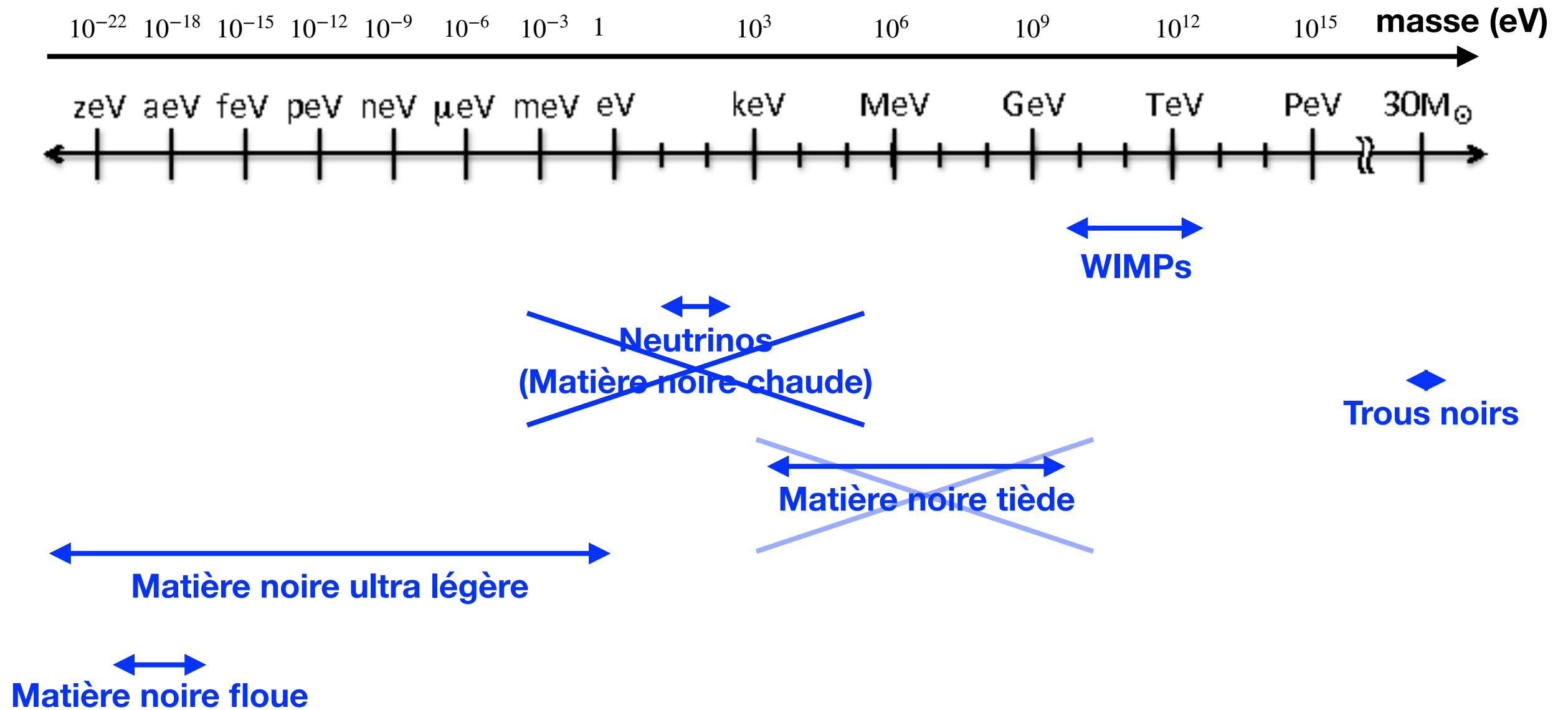
- Le scénario hiérarchique de formation des galaxies
- La toile cosmique et les halos de matière noire
- La formation des étoiles et les phénomènes de rétroaction
- La non-détection des particules de matière noire
- Les problèmes à l'échelle des galaxies
- L'énergie noire et la constante de Hubble

## 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



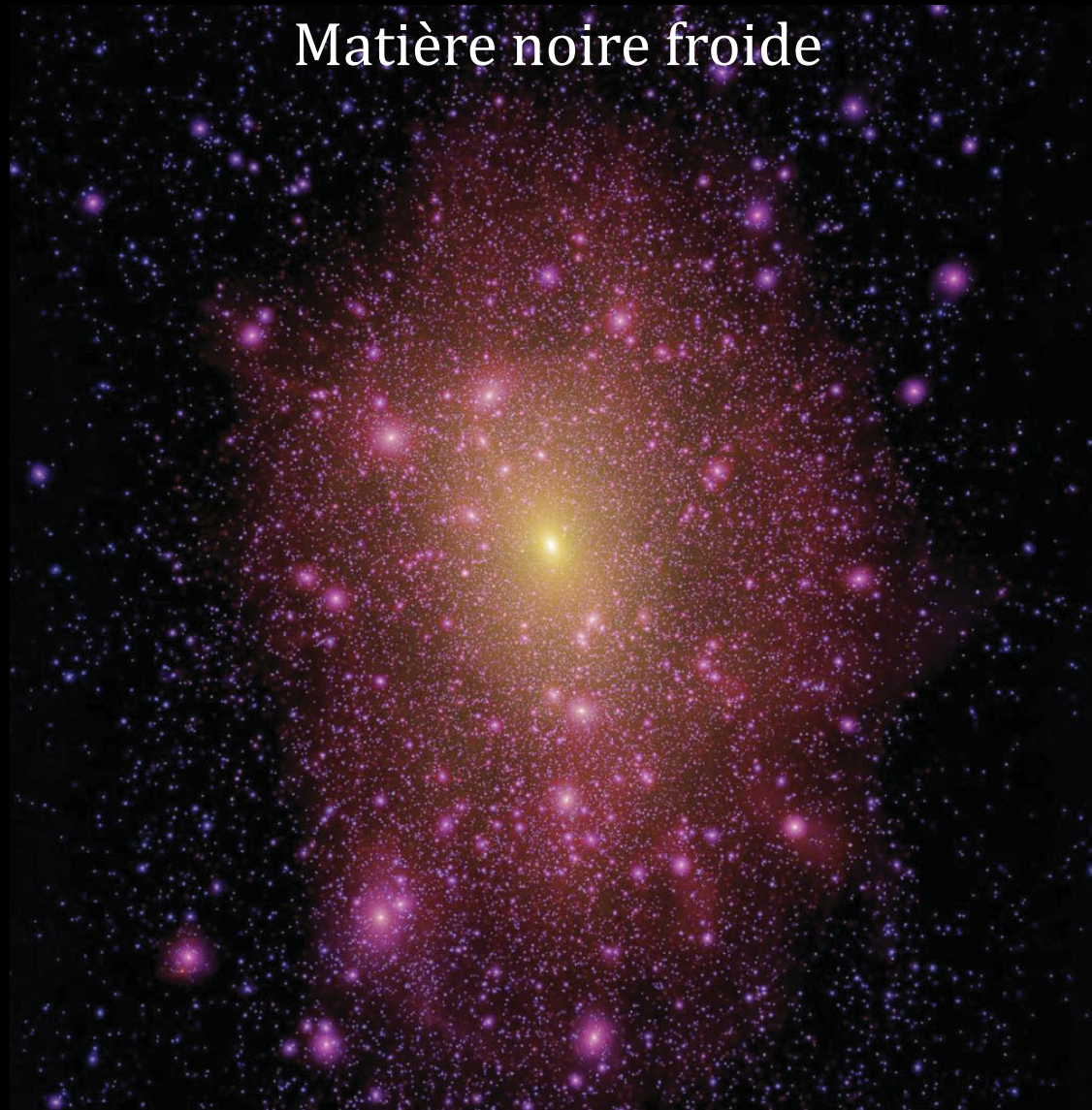
# Les candidats du secteur sombre



# La matière noire tiède (WDM)

$\sim \text{keV}$

Matière noire froide



Matière noire tiède ( $\sim 2\text{keV}$ )

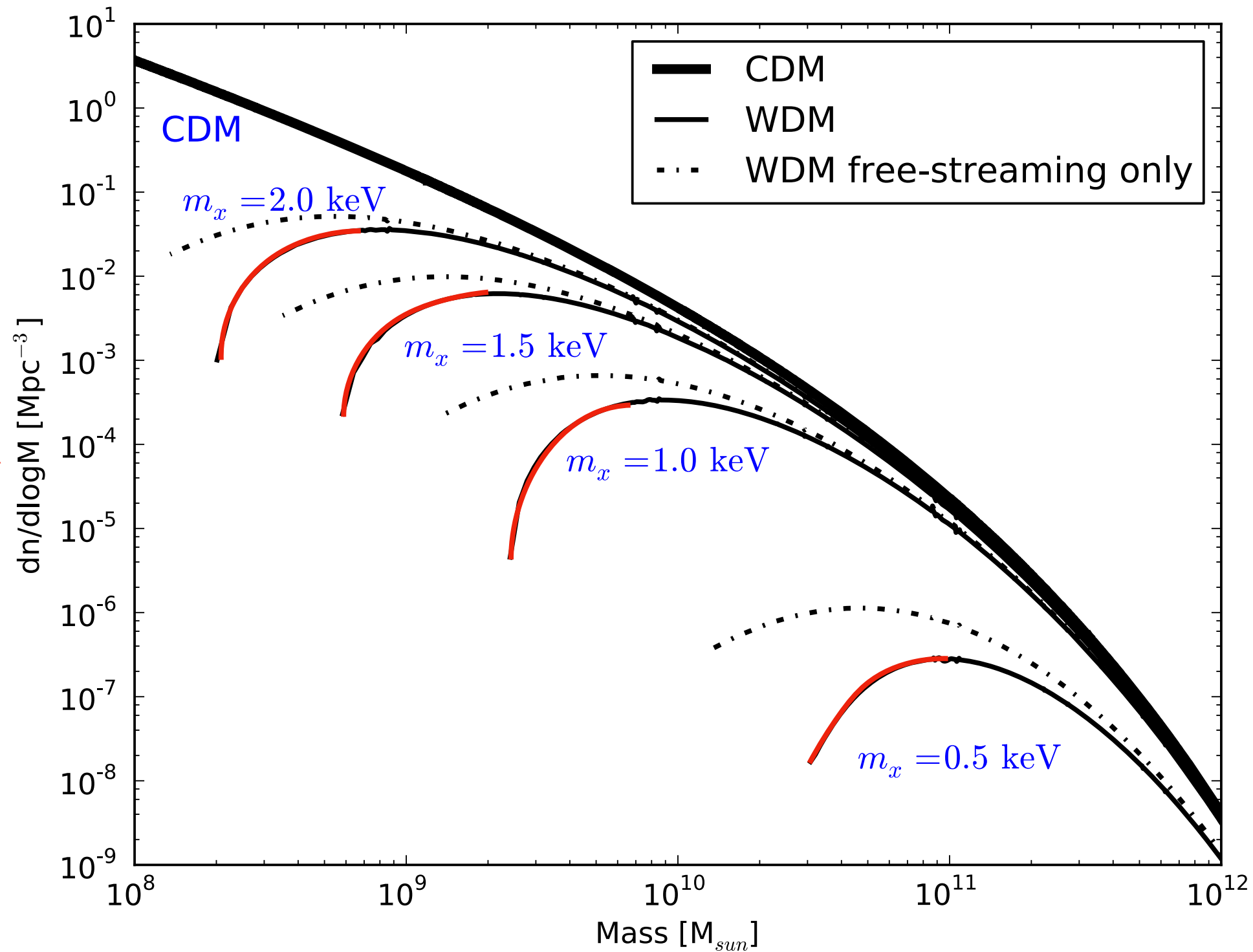


# La matière noire tiède (WDM)

~keV

Nombre de halos d'une certaine masse

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



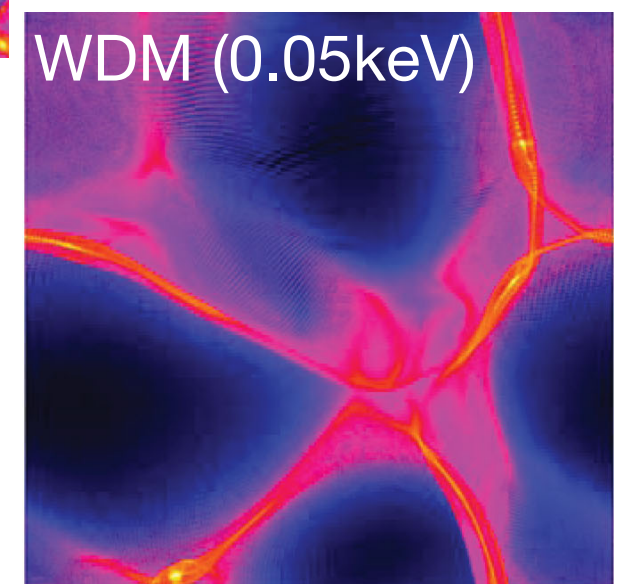
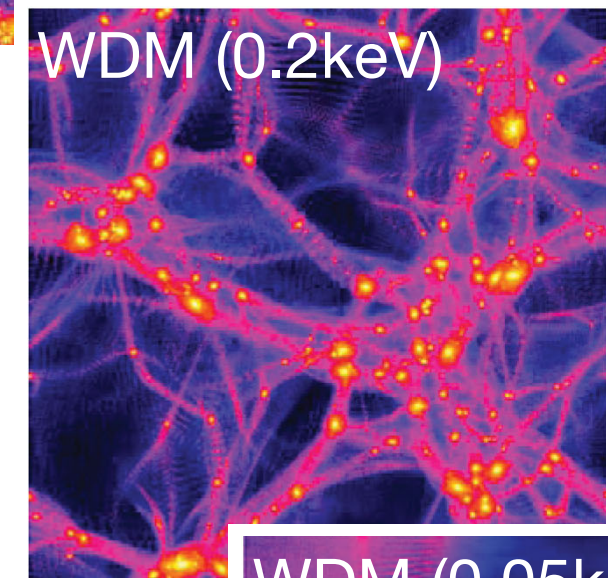
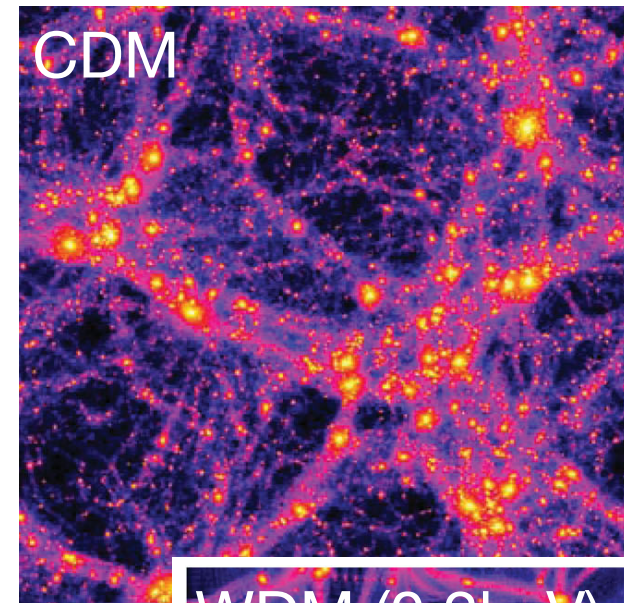
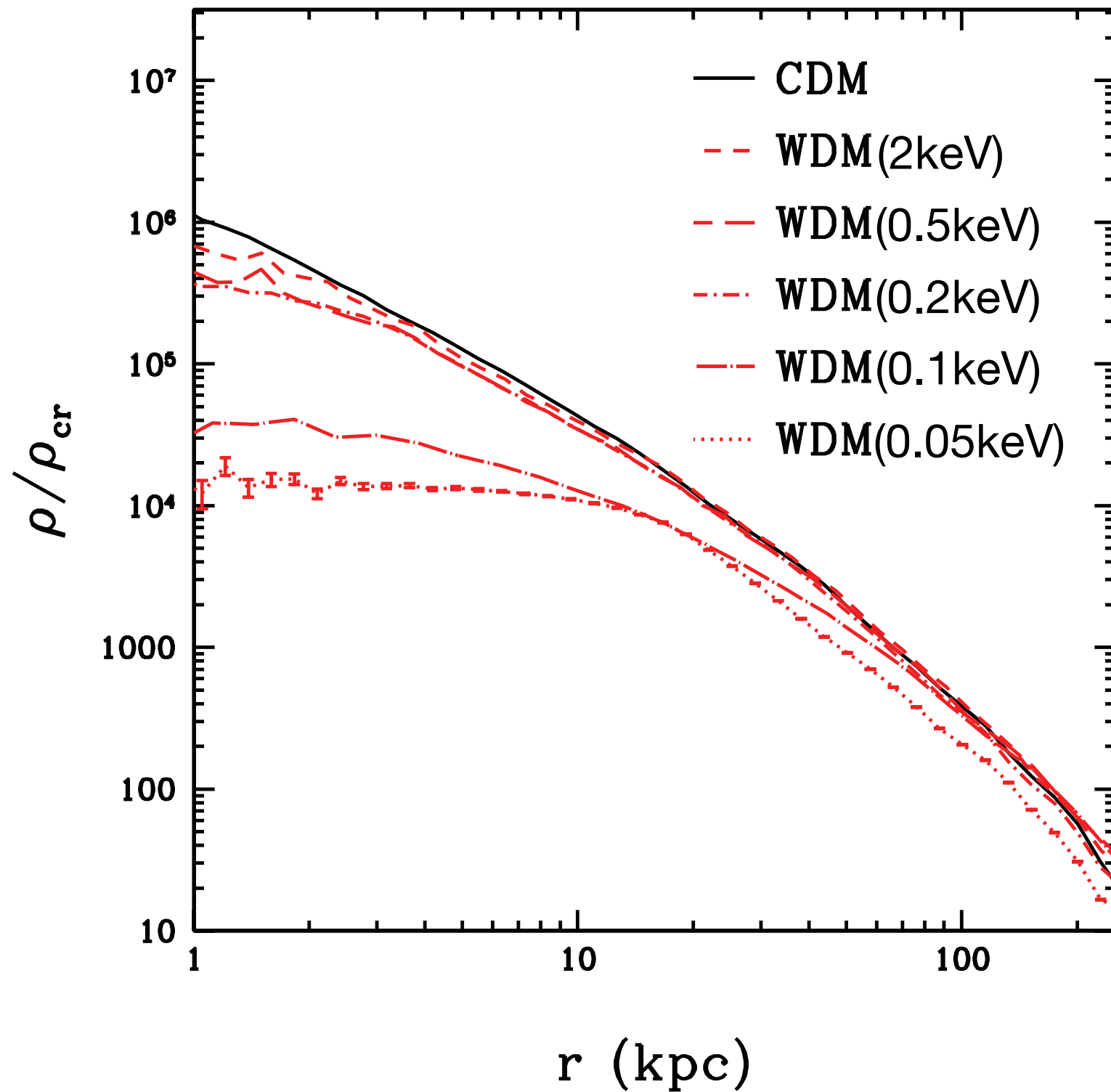
Les petites structures sont supprimées...

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...

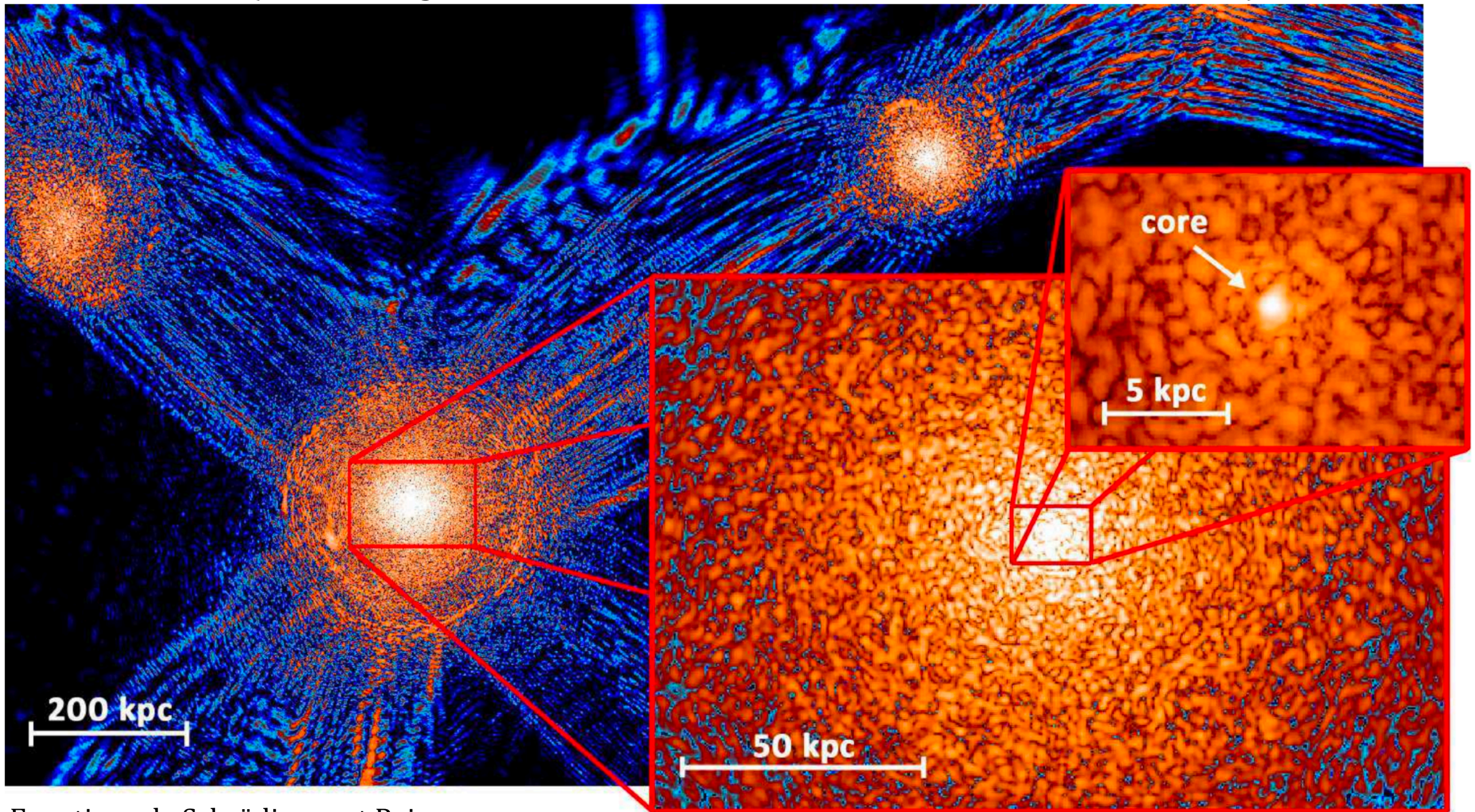
Maccio et al. (2012)



# 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

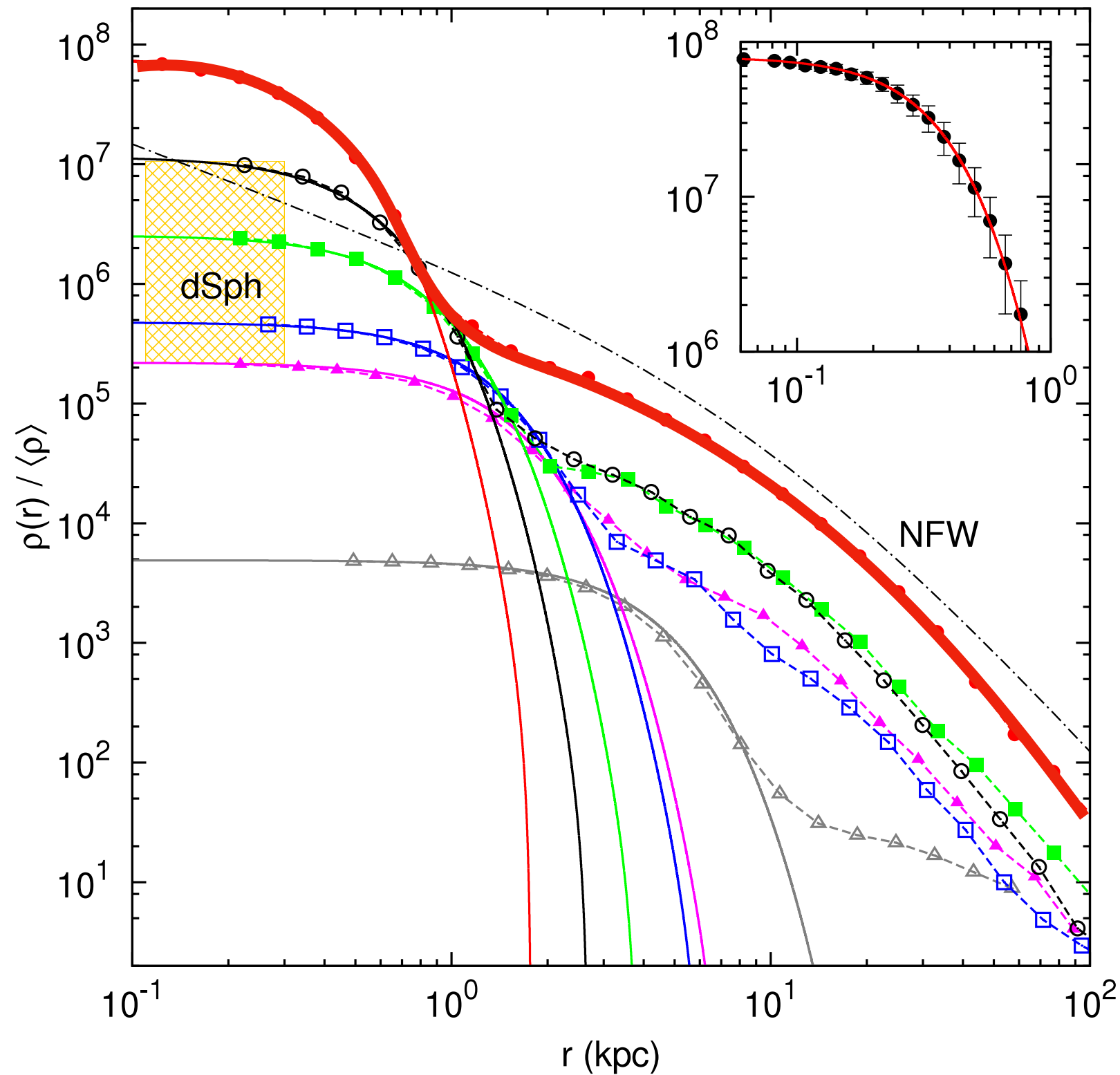
FDM : Fuzzy Dark Matter

Schive et al. (2014)



# La matière noire floue (FDM)

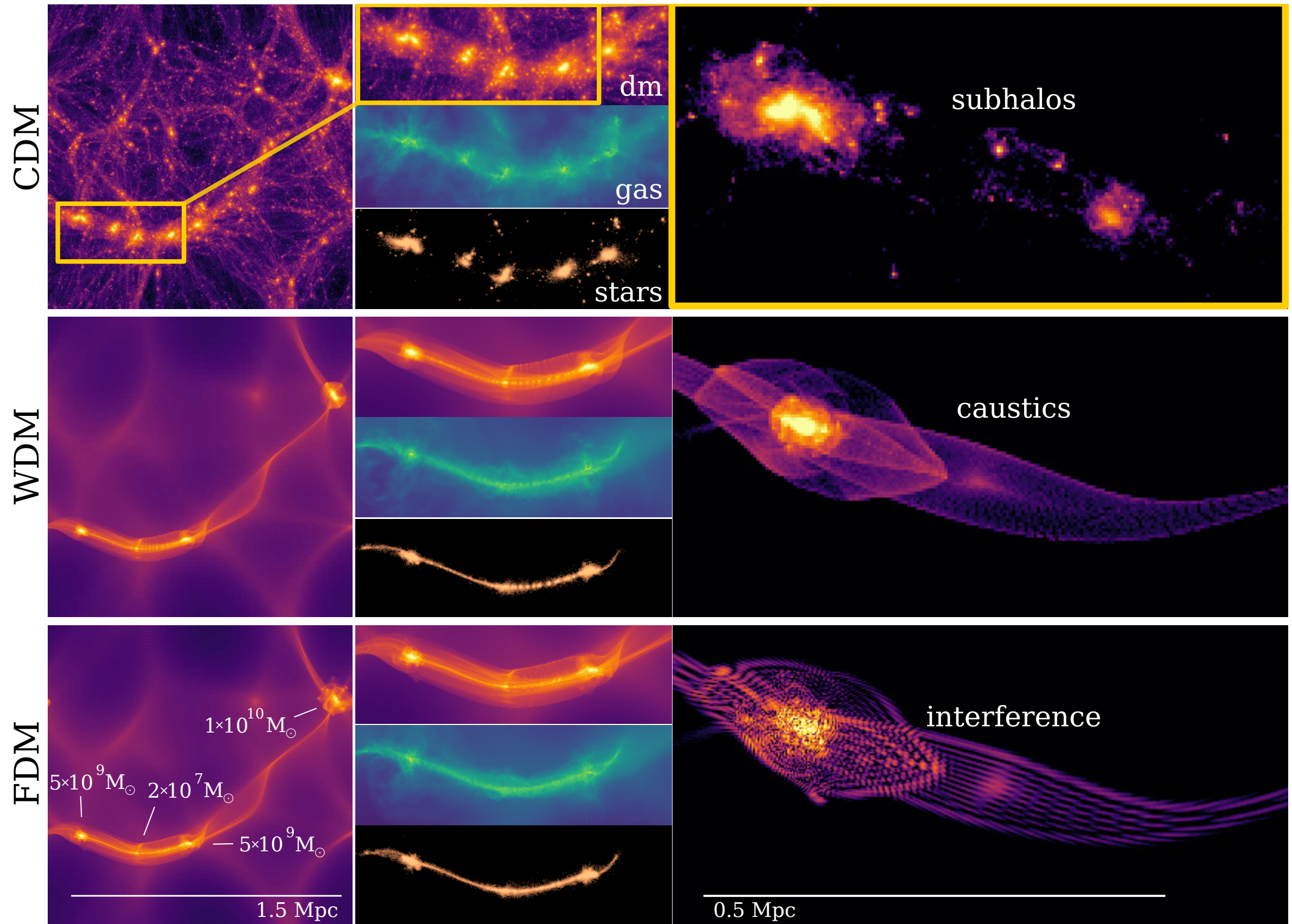
$\sim 10^{-22}$  eV





# La matière noire floue (FDM)

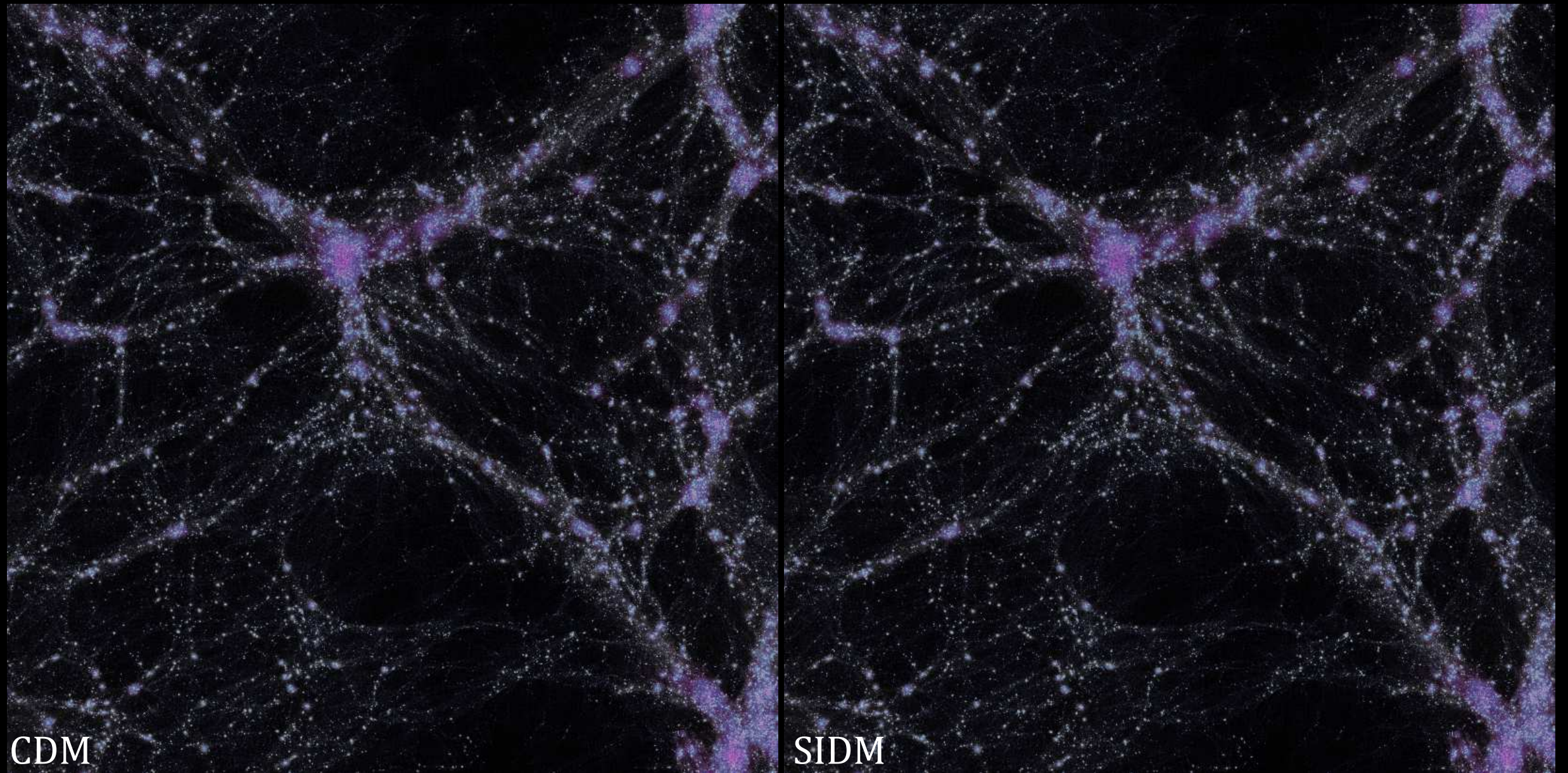
$\sim 10^{-22}$  eV





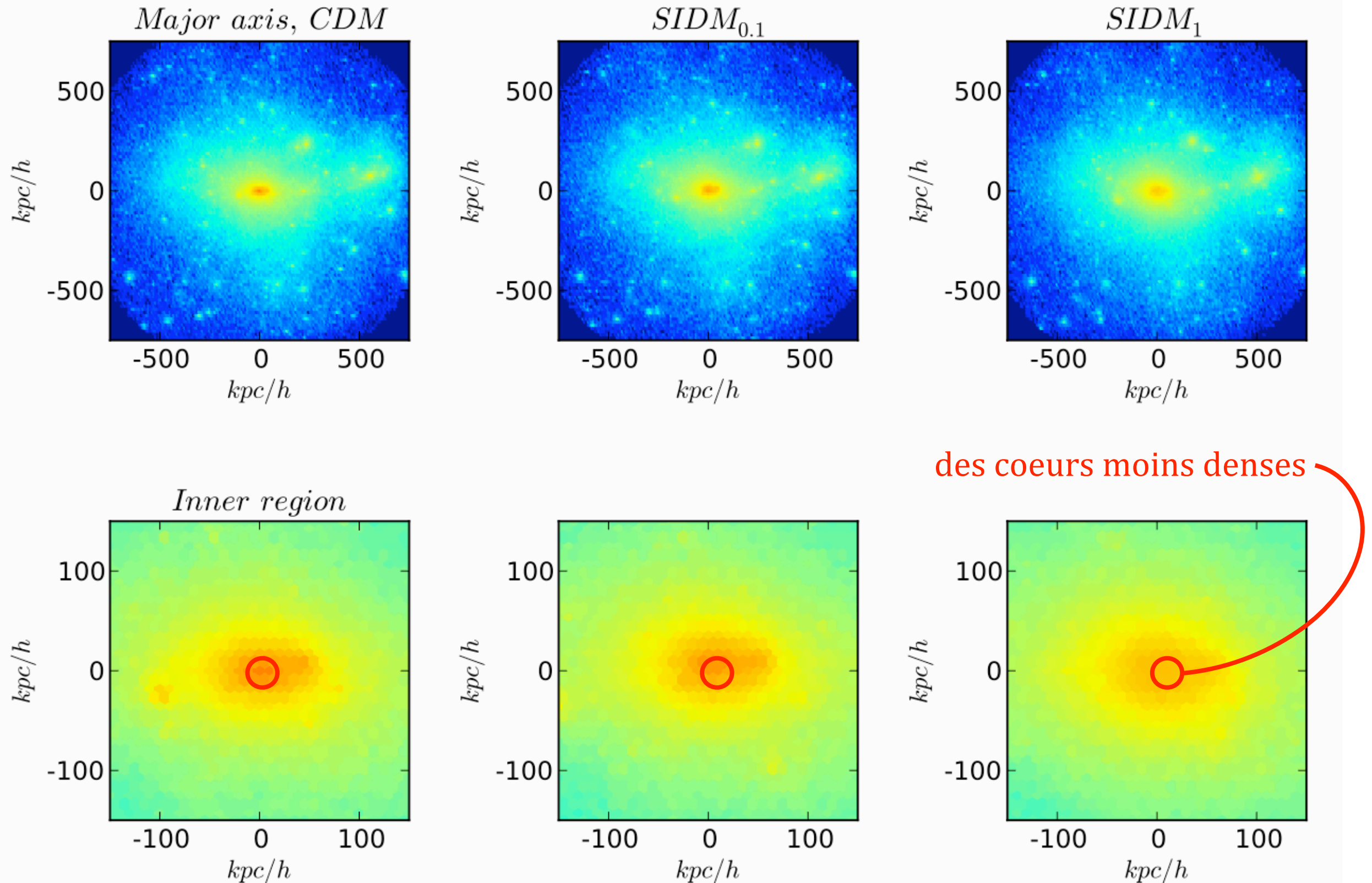
# La matière noire auto-interagissante (SIDM)

La même structure à grande échelle que la matière noire froide





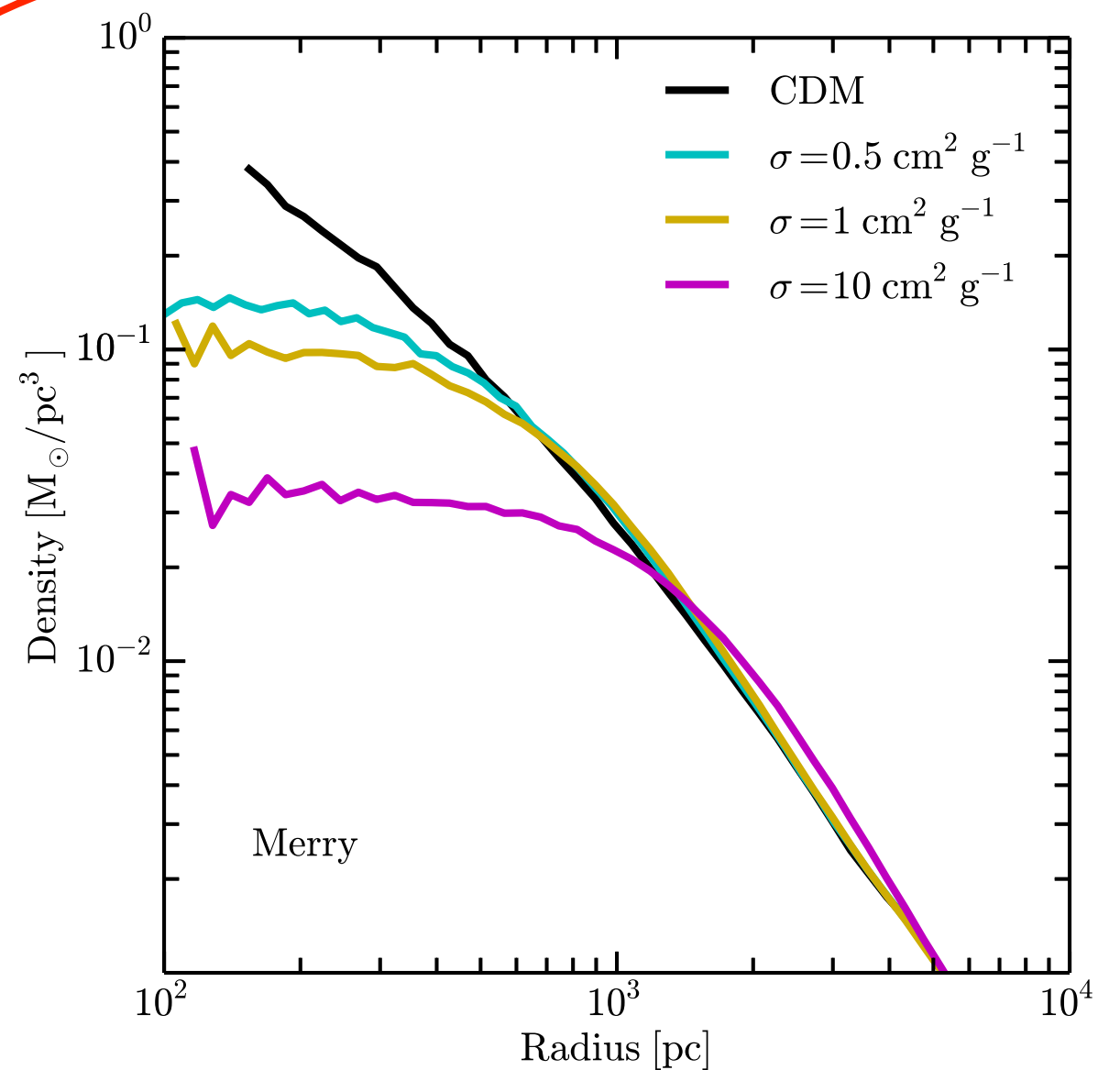
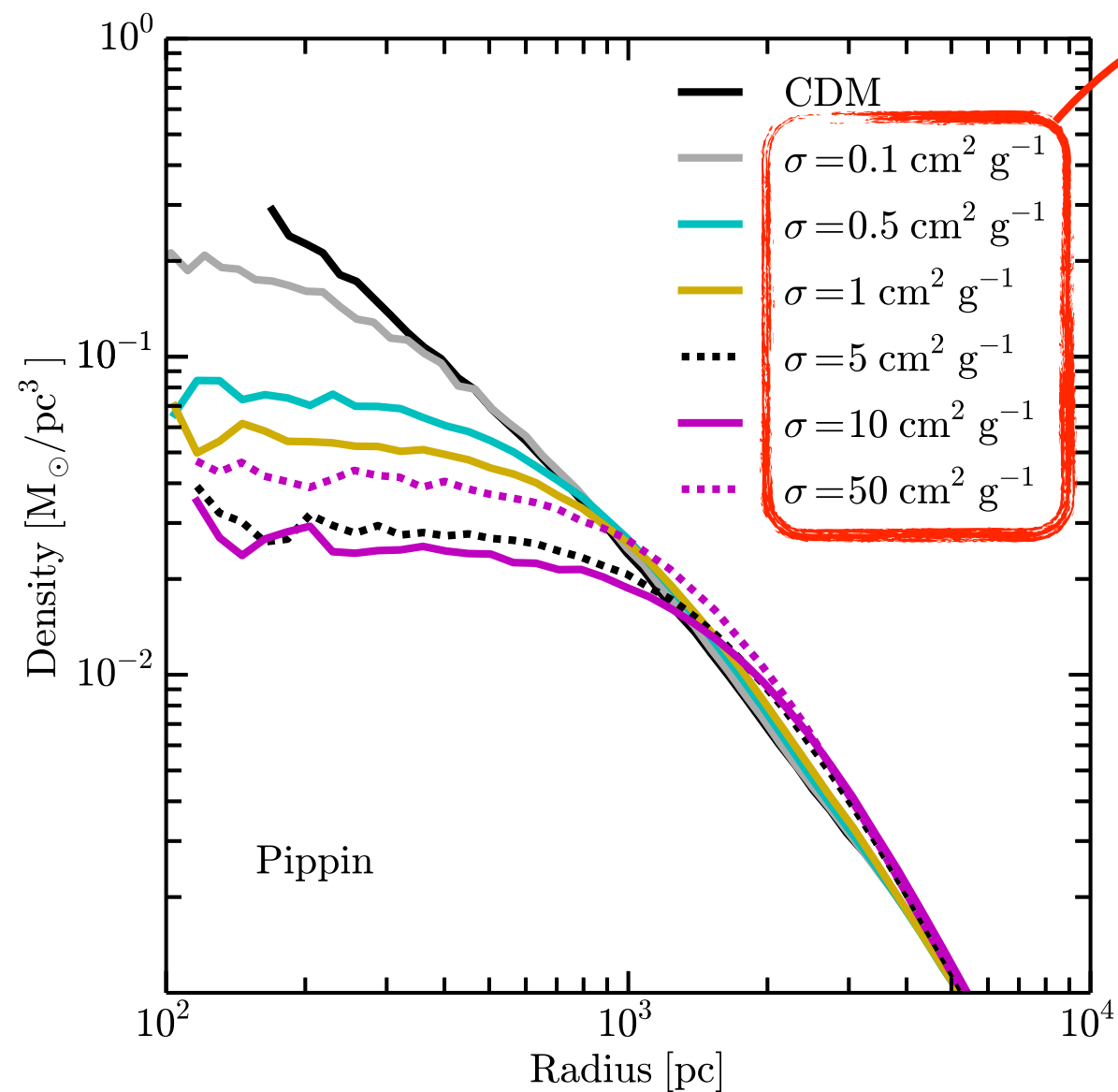
# La matière noire auto-interagissante (SIDM)





# La matière noire auto-interagissante (SIDM)

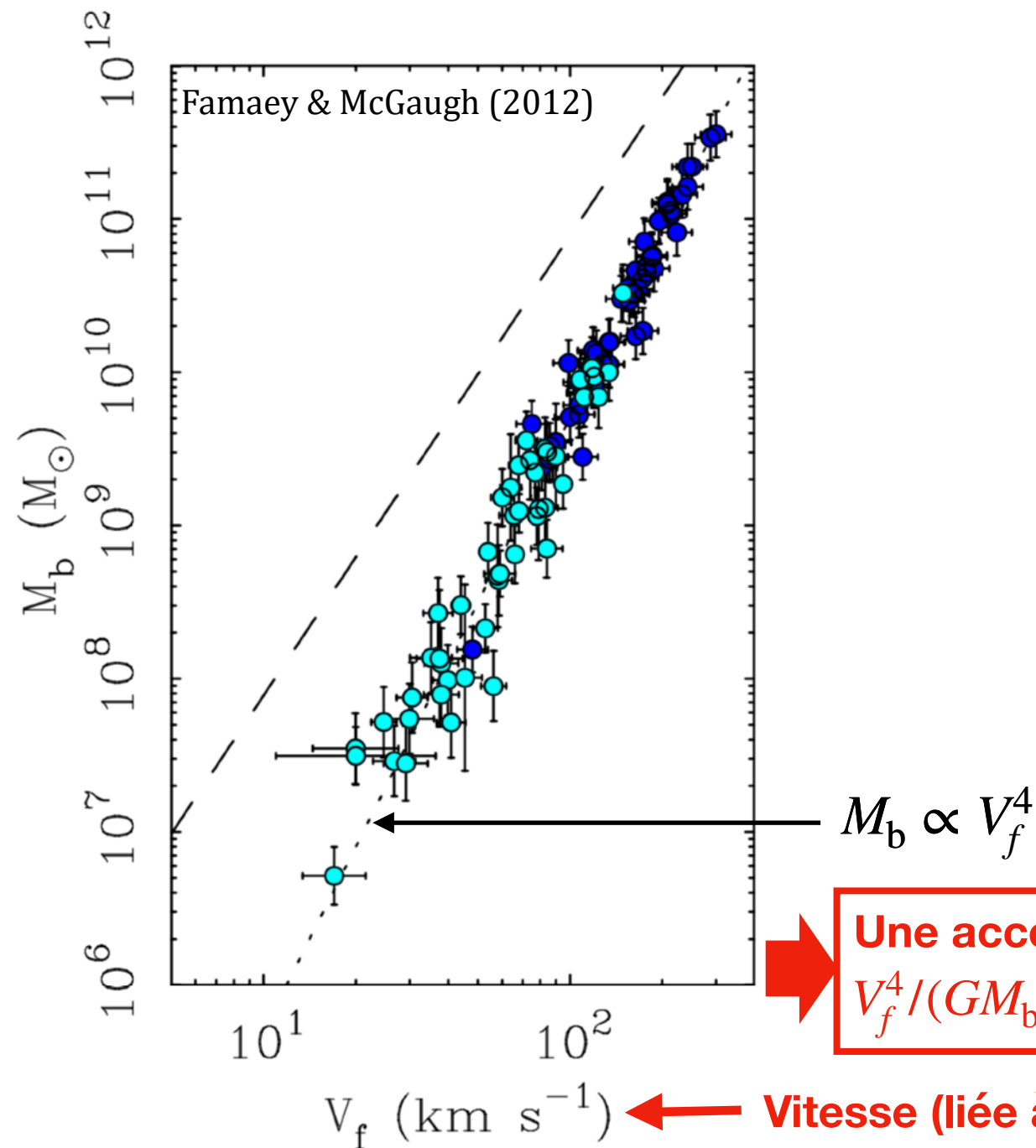
Des coeurs de matière noire



$\sigma$  : section efficace

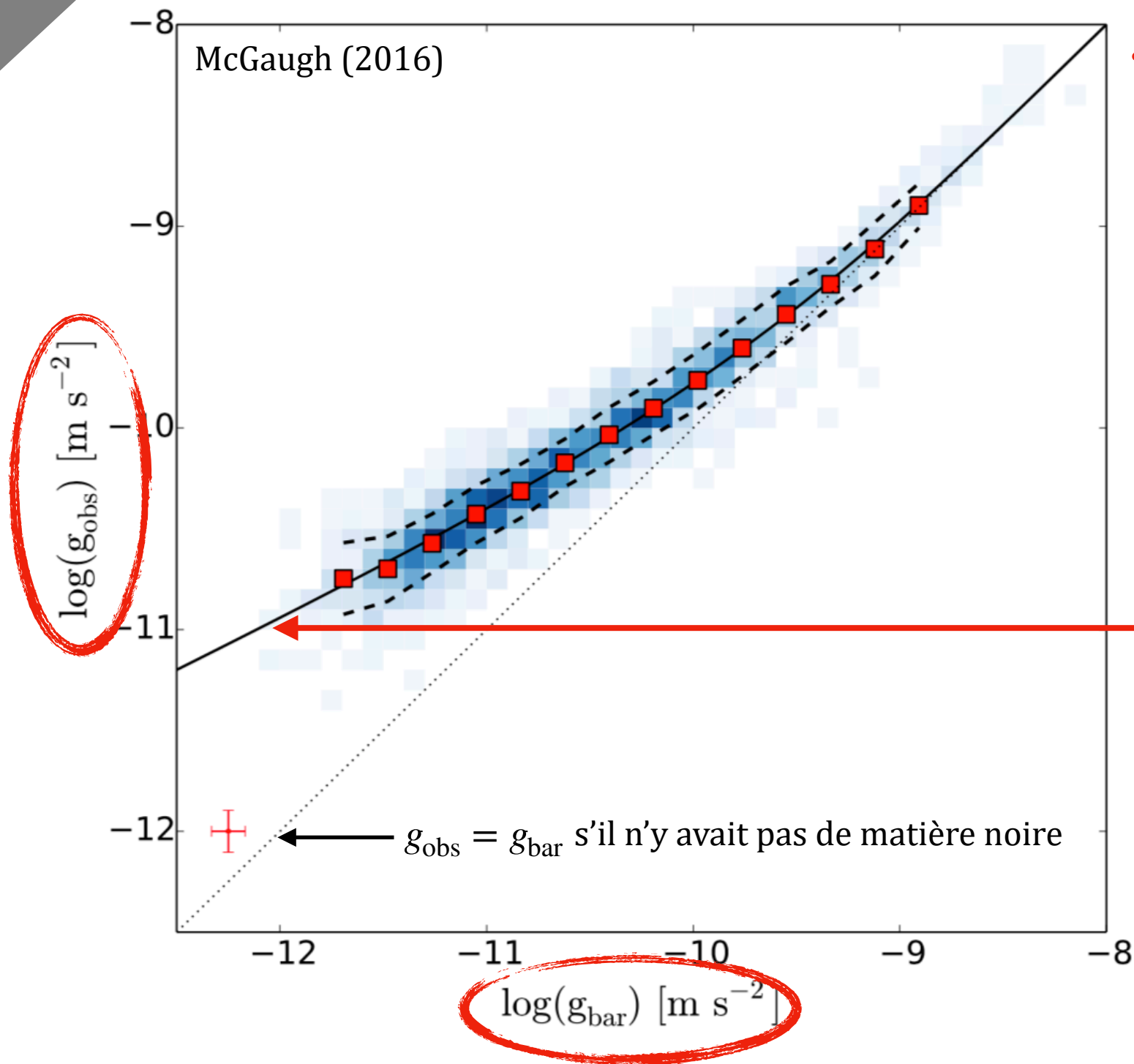
# Les défis du modèle $\Lambda$ CDM : la corrélation entre masse baryonique et cinématique

Masse baryonique (étoiles et gaz)



**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 $\Lambda$ CDM : l'accélération radiale



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

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

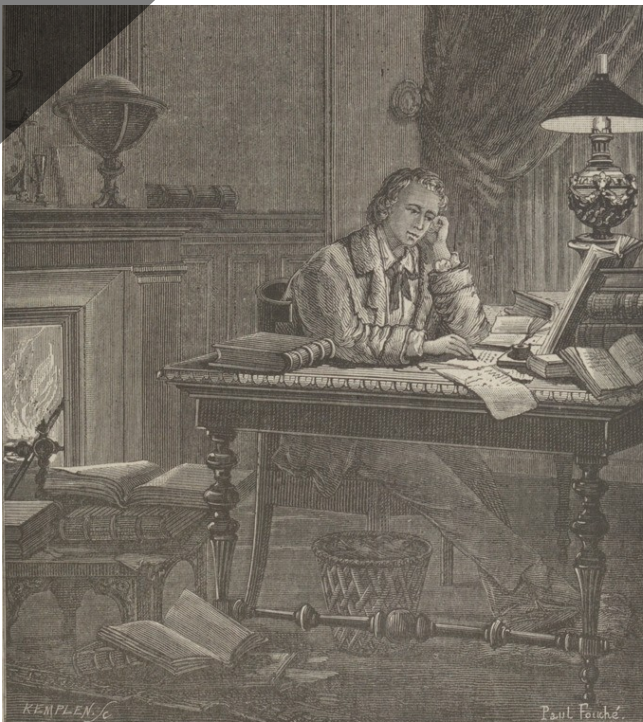
$$g_{\text{obs}} = \frac{g_{\text{bar}}}{1 - e^{-\sqrt{g_{\text{bar}}/a_0}}}$$

$$a_0 = 1.2 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-2}$$

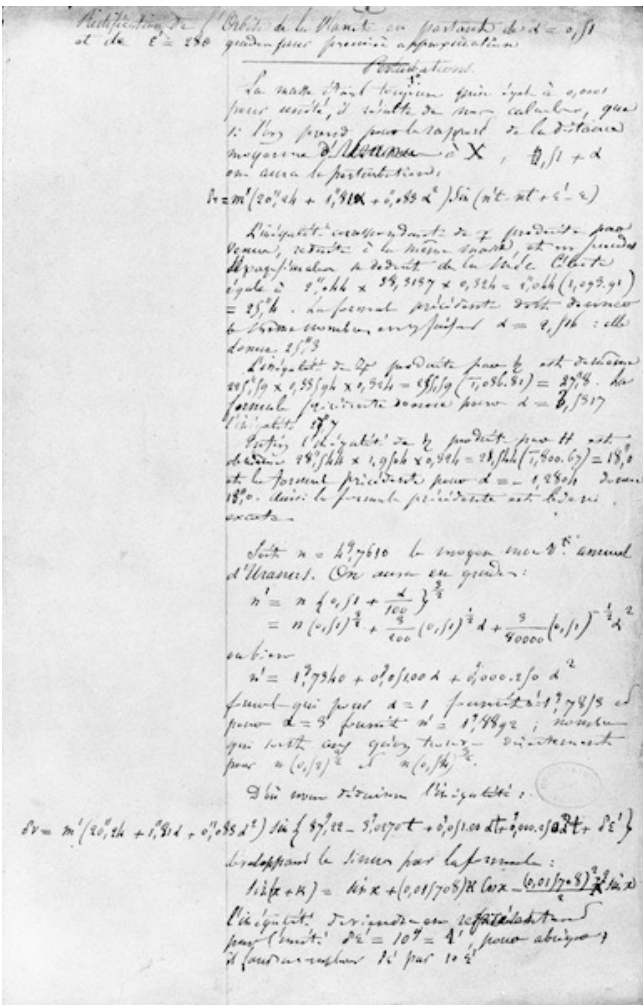
**Relation de l'accélération radiale :** tout se passe comme si la quantité de baryons était fixée par la quantité de matière noire du halo, alors même que le halo s'étend bien au-delà de la galaxie et que les processus d'évolution comprennent des fusions violentes et aléatoires qui devraient apporter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



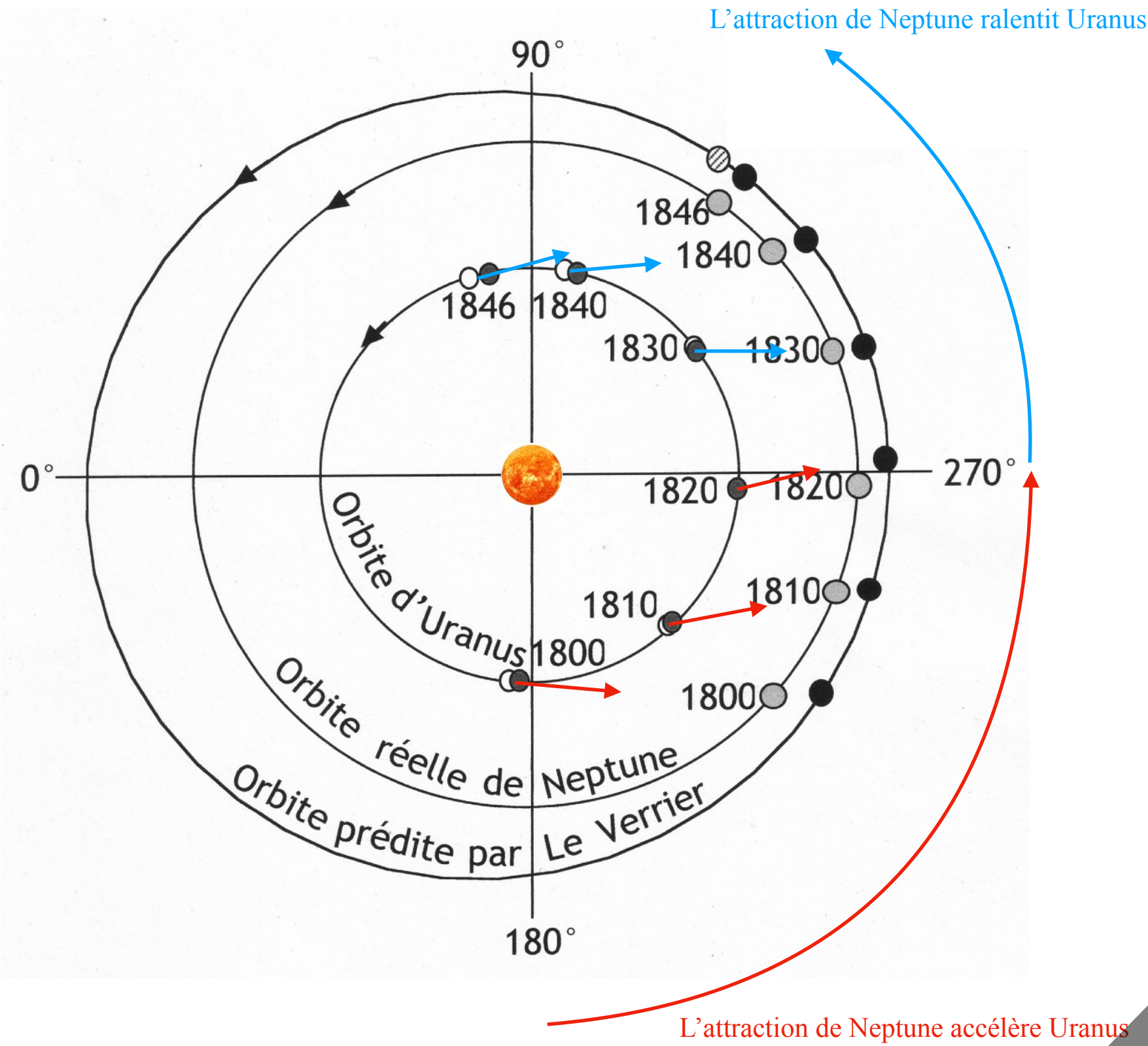
# La découverte de Neptune (Urbain le Verrier, 1846)



Le Verrier découvrant la planète Neptune (C. Flammarion, Astronomie Populaire, 1884)



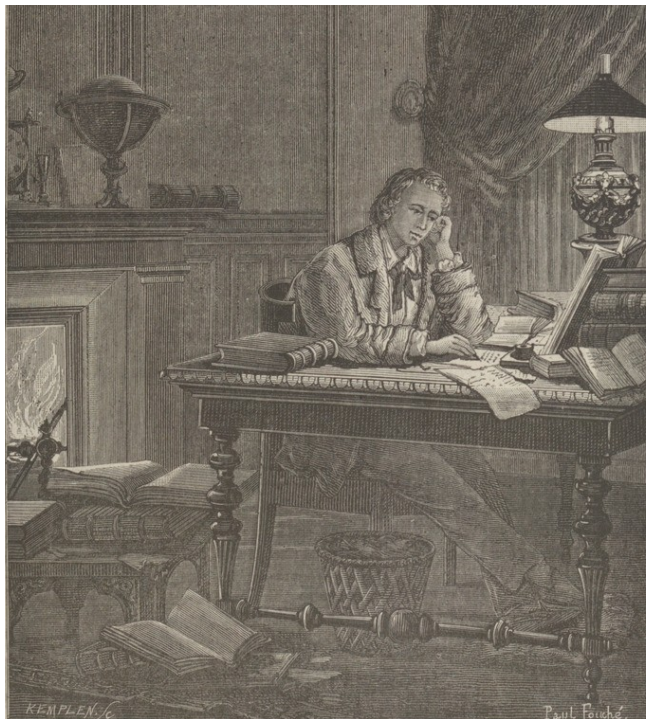
Page de calculs de Le Verrier (1846)



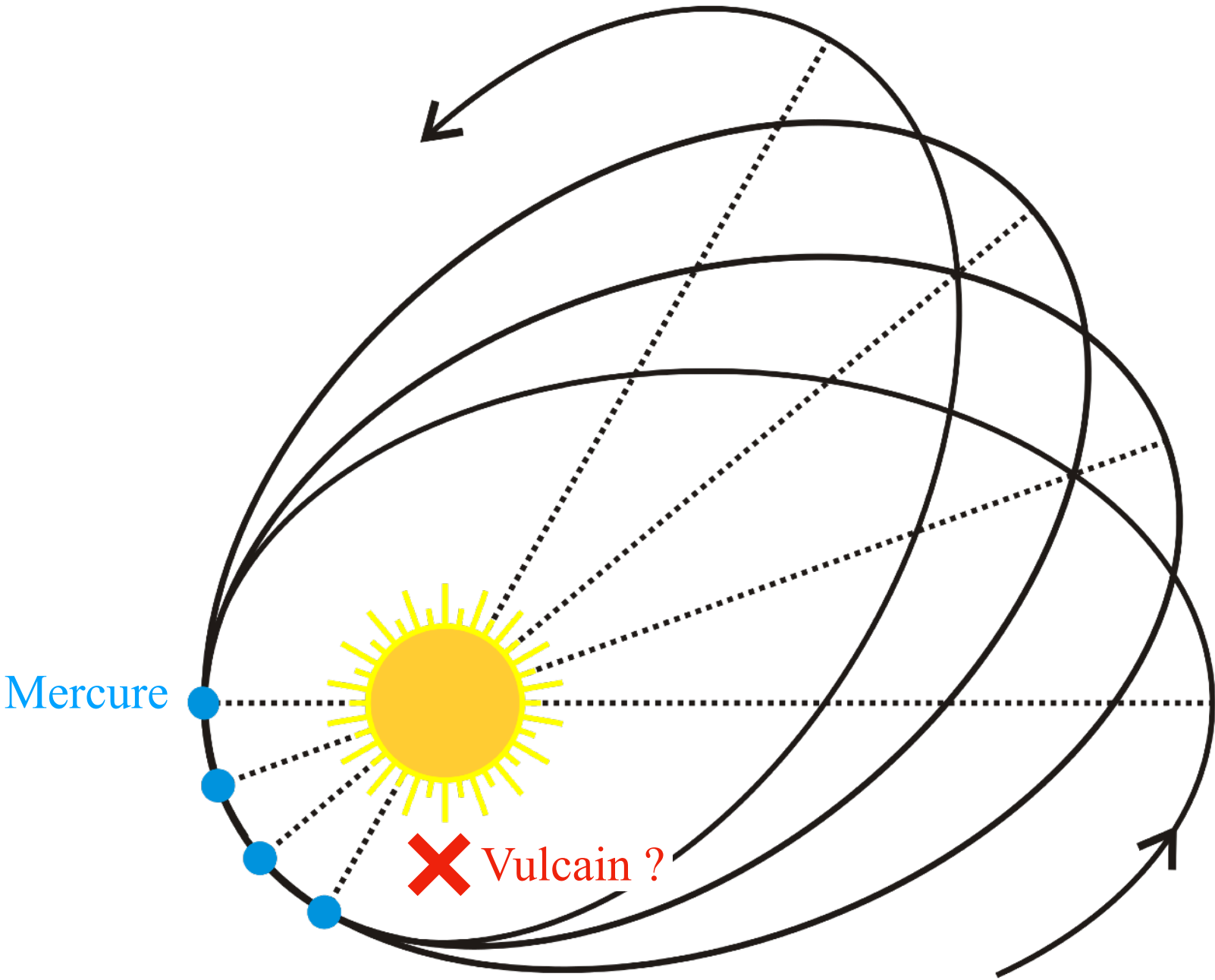
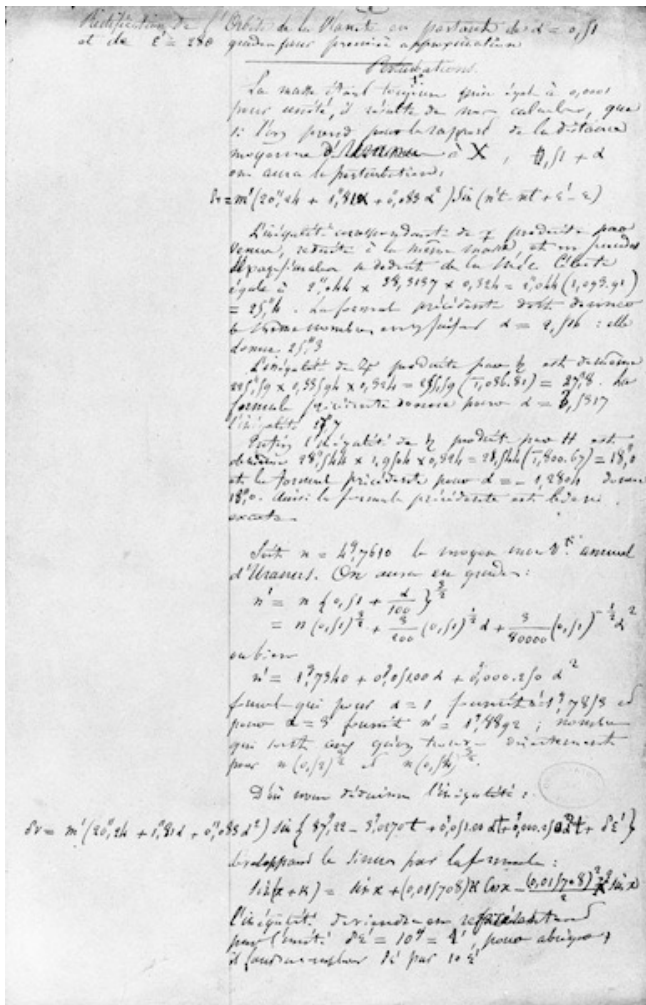
- Positions observées d'Uranus de 1800 à 1846
- Positions qu'Uranus aurait dû occuper sans Neptune



# La non-découverte de Vulcain (Urbain le Verrier, 1859)



Le Verrier découvrant la planète Neptune (C. Flammarion, Astronomie Populaire, 1884)



La précession rapide du périhélie de Mercure ne s'explique pas par une nouvelle planète, mais par un **changement de modèle** : la relativité générale.

# Modified Newtonian Dynamics (MOND) :

## Modifier la loi de la gravitation

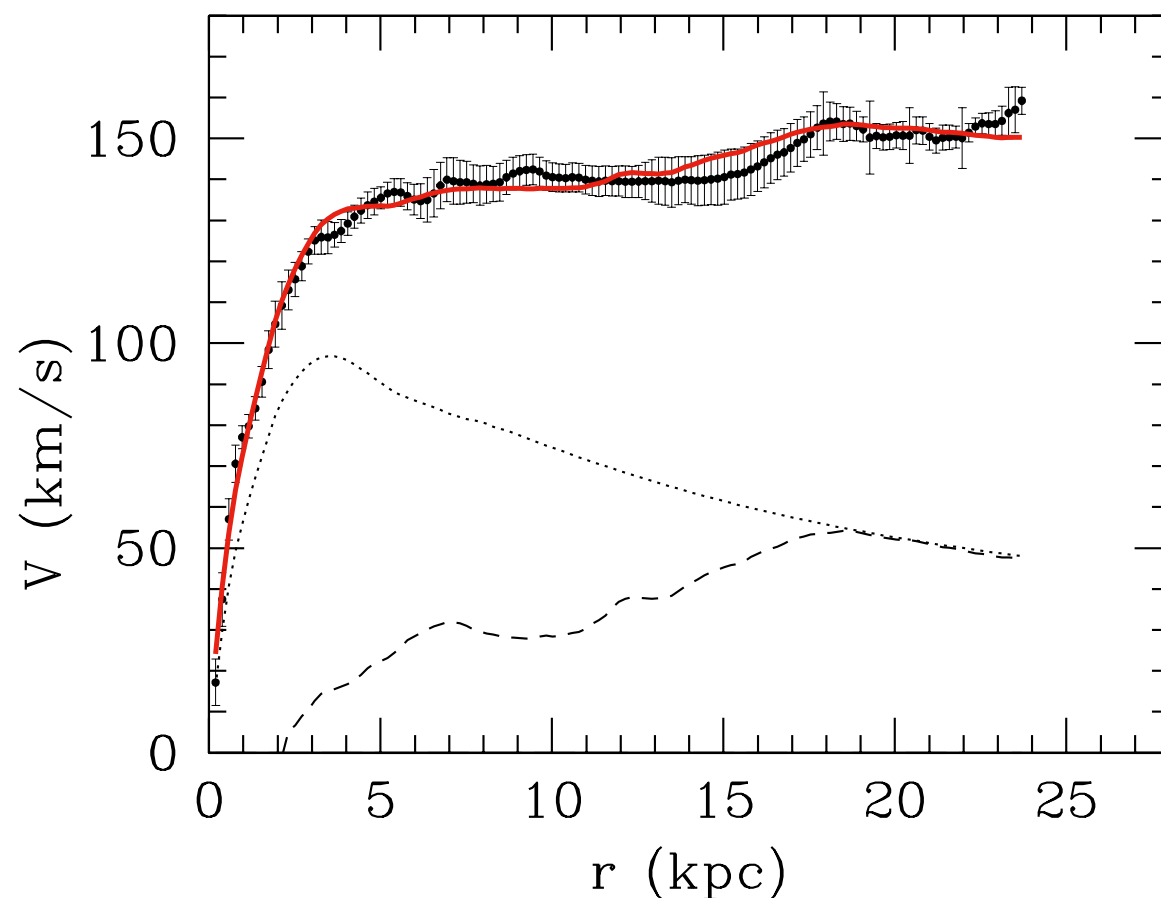
Milgrom (1983) :

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

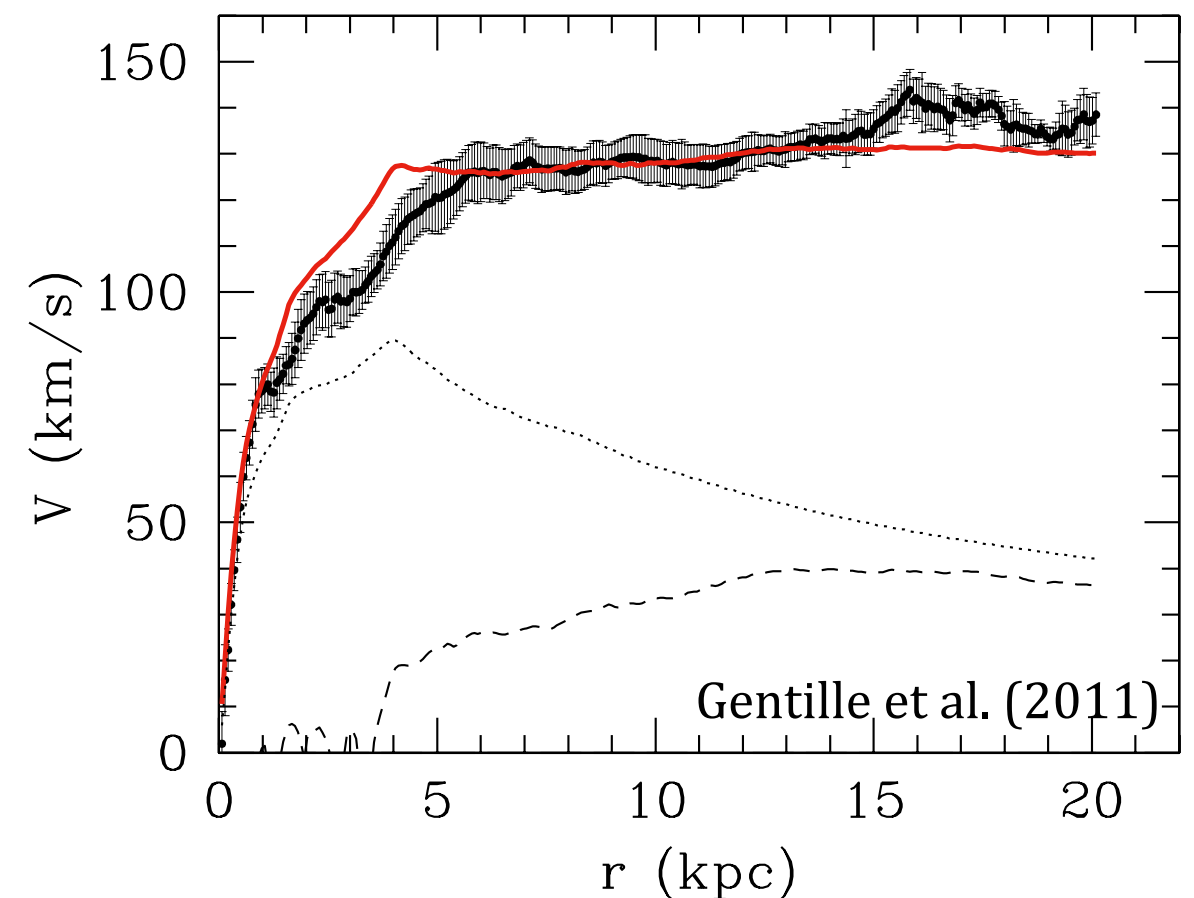


➔ Permet de décrire les courbes de rotation d'une grande variété de galaxies

NGC 3621



NGC 2403

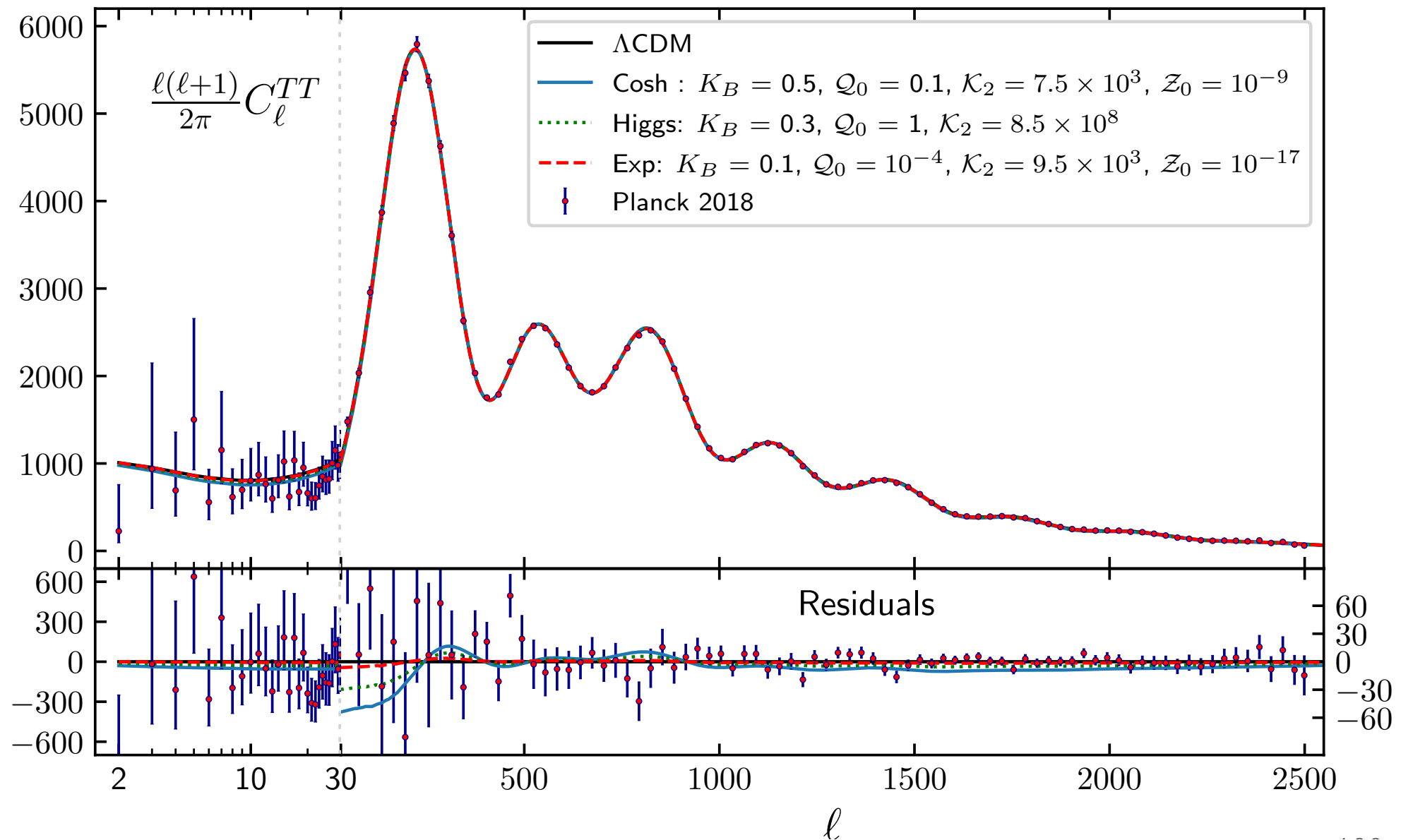


- ➔ Prédit la relation de Tully-Fisher baryonique et la relation de l'accélération radiale
- ➔ Permet plus facilement la présence de plans de satellites



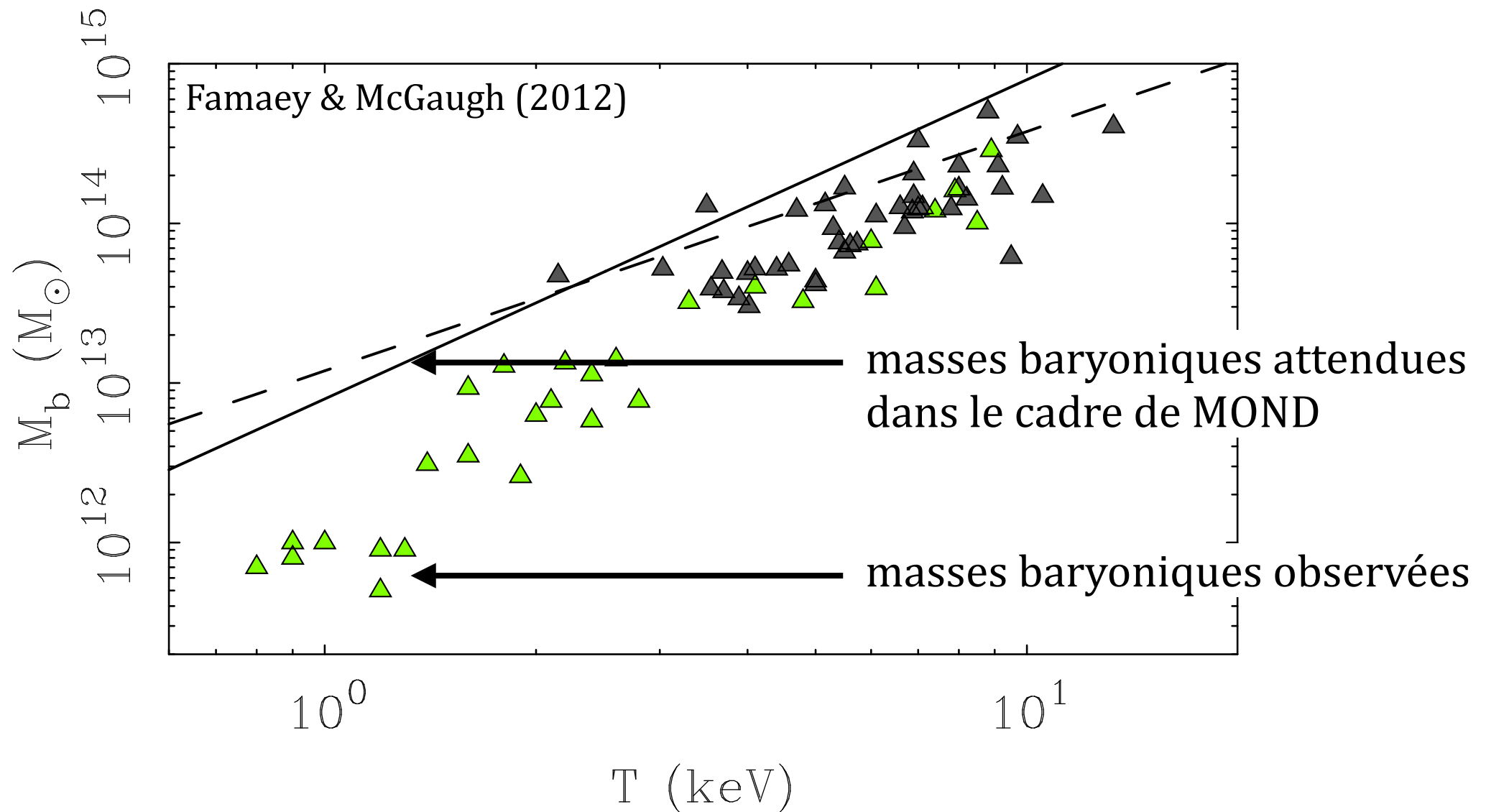
# Modified Newtonian Dynamics (MOND) :

## En quête d'une théorie relativiste



# Modified Newtonian Dynamics (MOND) :

## Des difficultés dans les amas

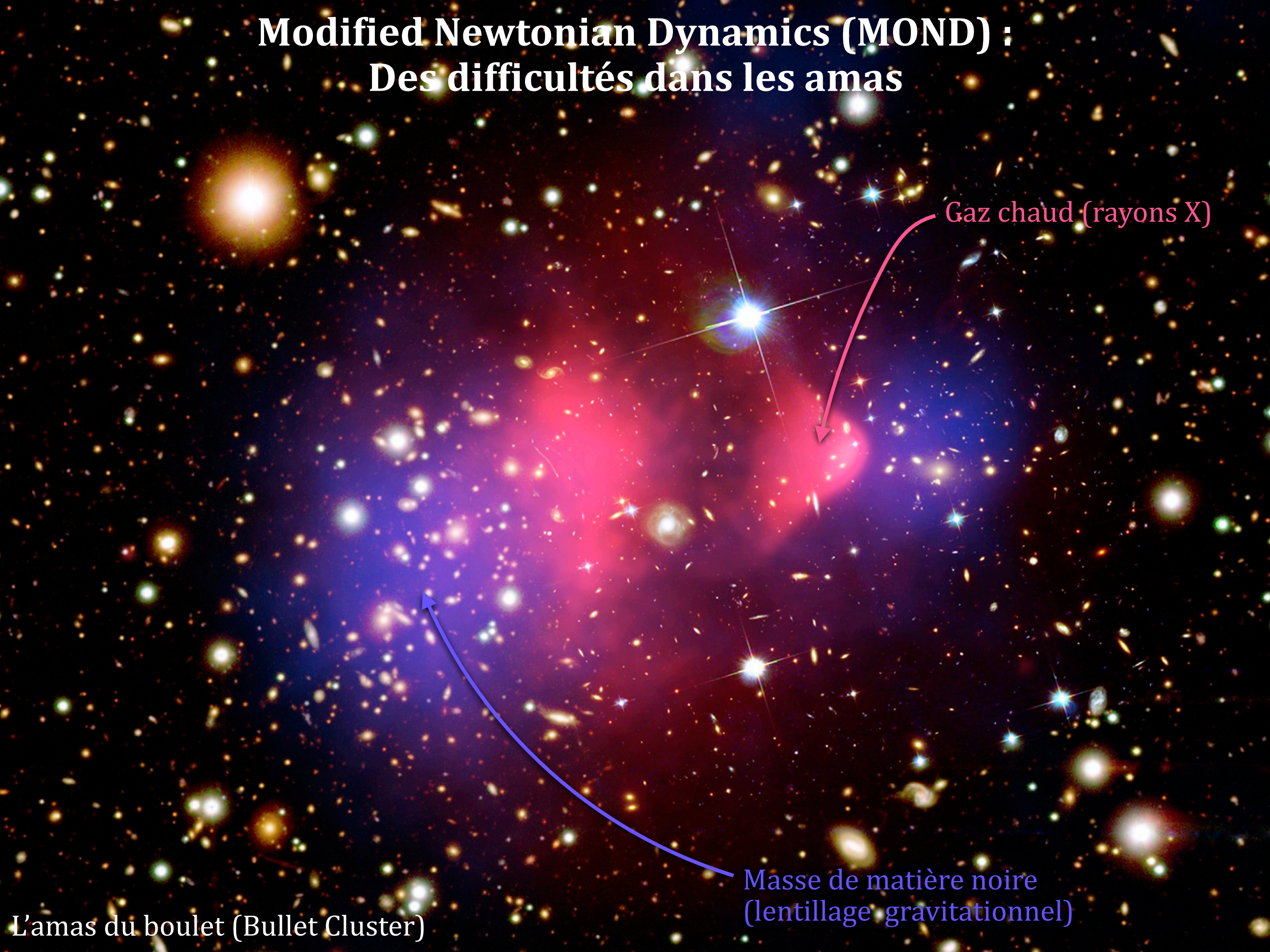


Il manque 2 à 10 fois la masse... et donc il faut quand même avoir recours à de la matière noire !



# Modified Newtonian Dynamics (MOND) :

## Des difficultés dans les amas



Gaz chaud (rayons X)

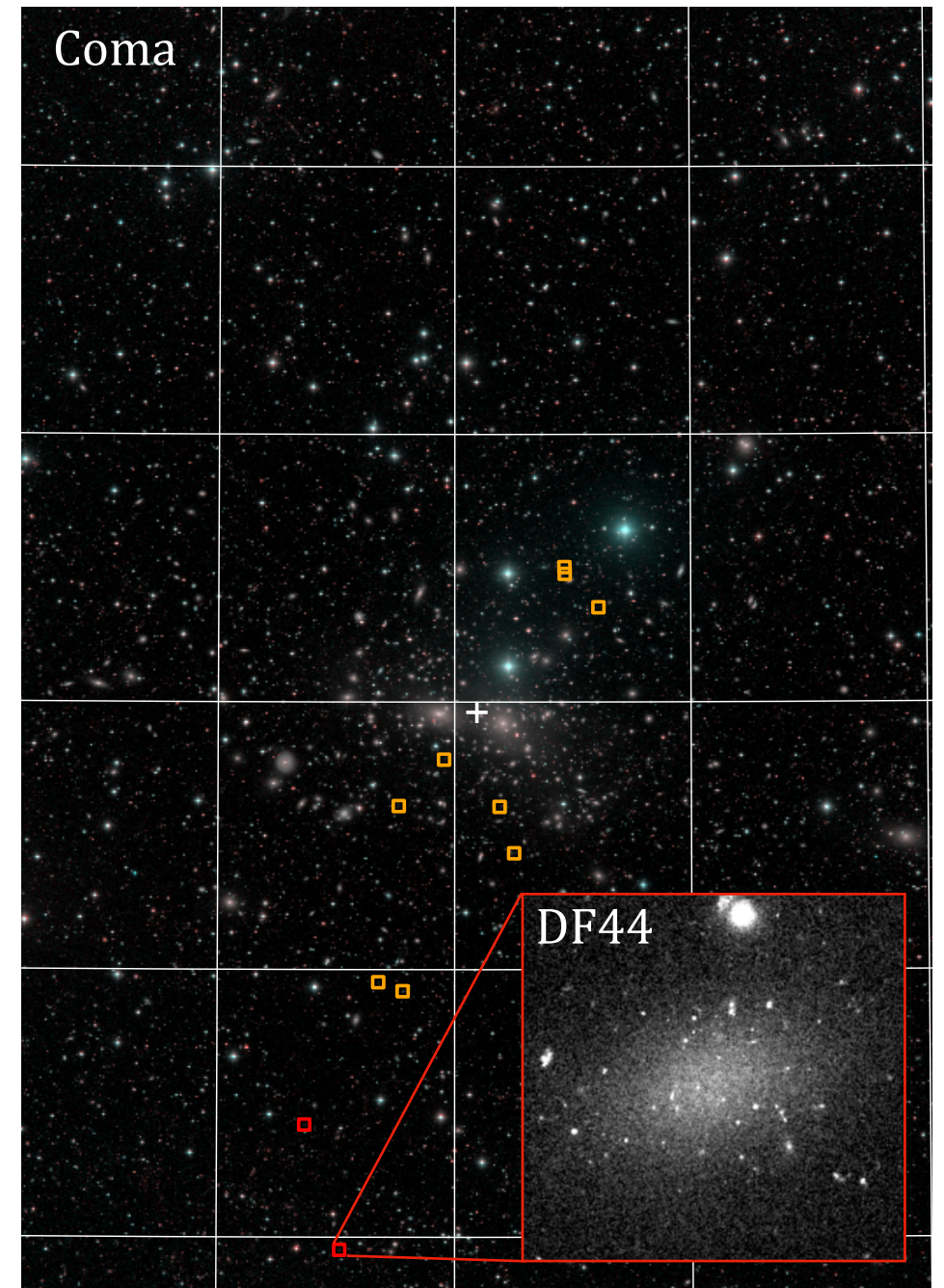
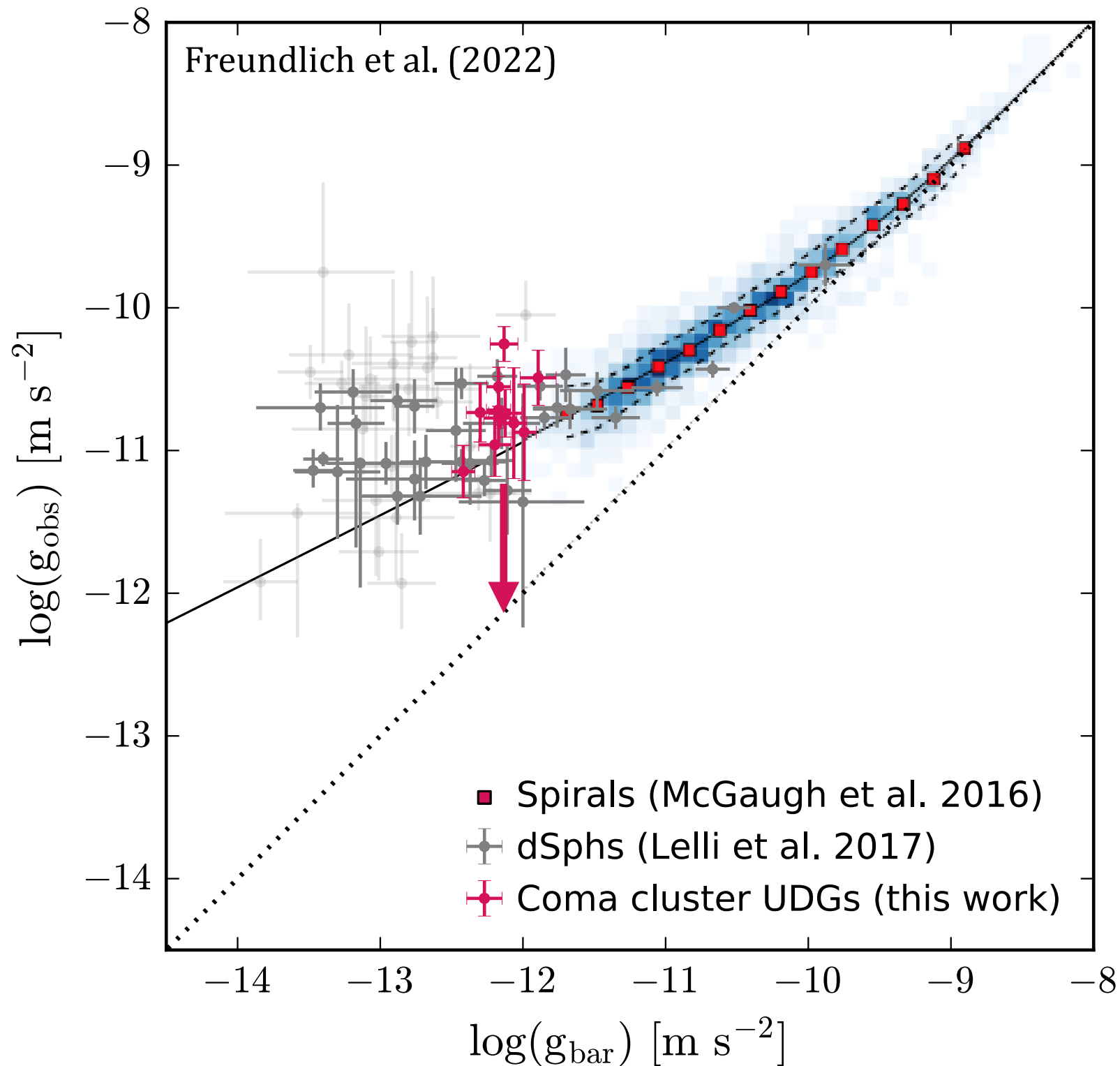
Masse de matière noire  
(lentillage gravitationnel)

L'amas du boulet (Bullet Cluster)



# Modified Newtonian Dynamics (MOND) :

## Des difficultés dans les amas

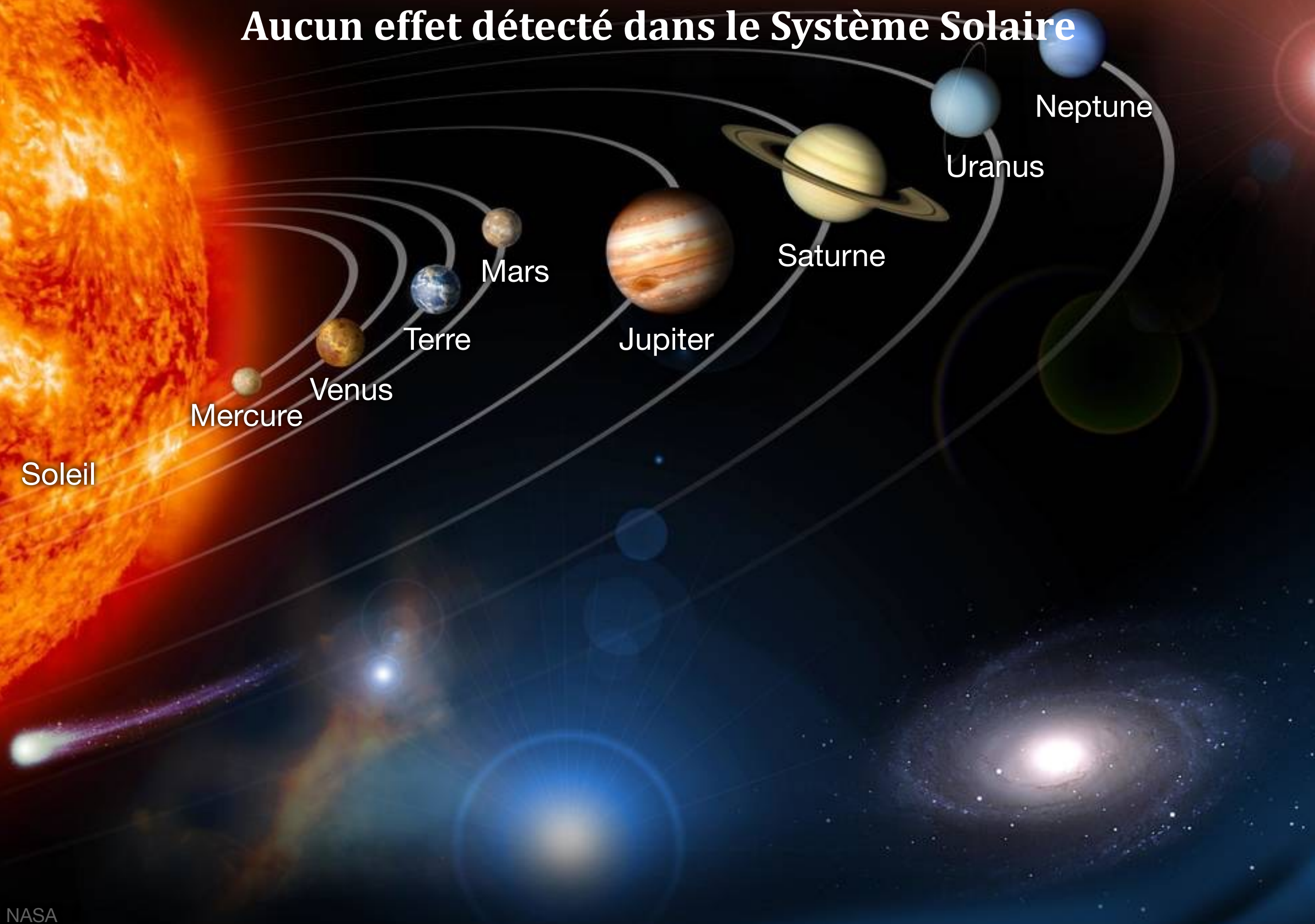


Les galaxies ultra-diffuses de l'amas de Coma se comportent comme si elles étaient isolées, ce qui n'est pas le cas... Elles devraient "tomber" vers la ligne pointillée dans le cadre de MOND.



# Modified Newtonian Dynamics (MOND) :

## Aucun effet détecté dans le Système Solaire





---

# 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