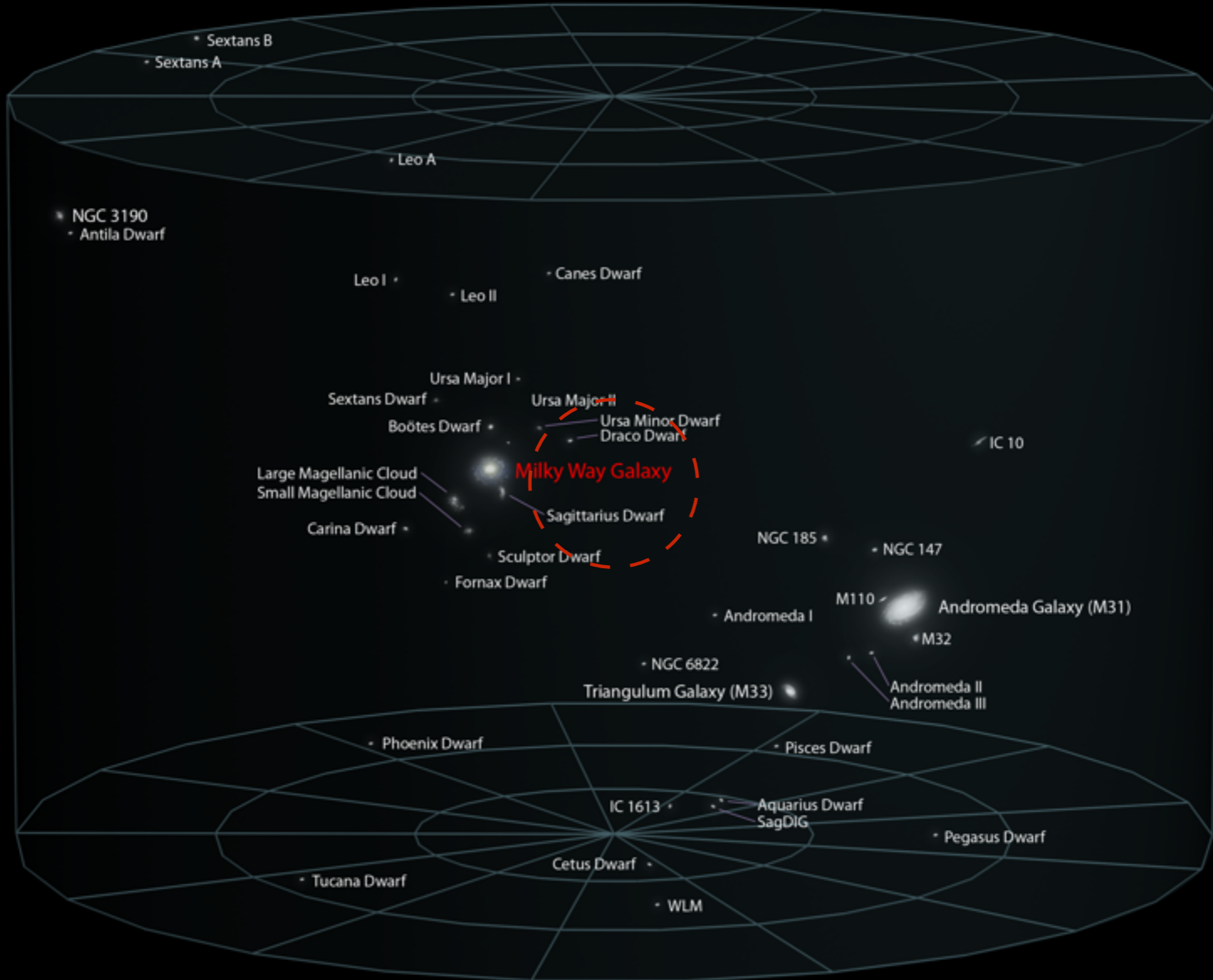


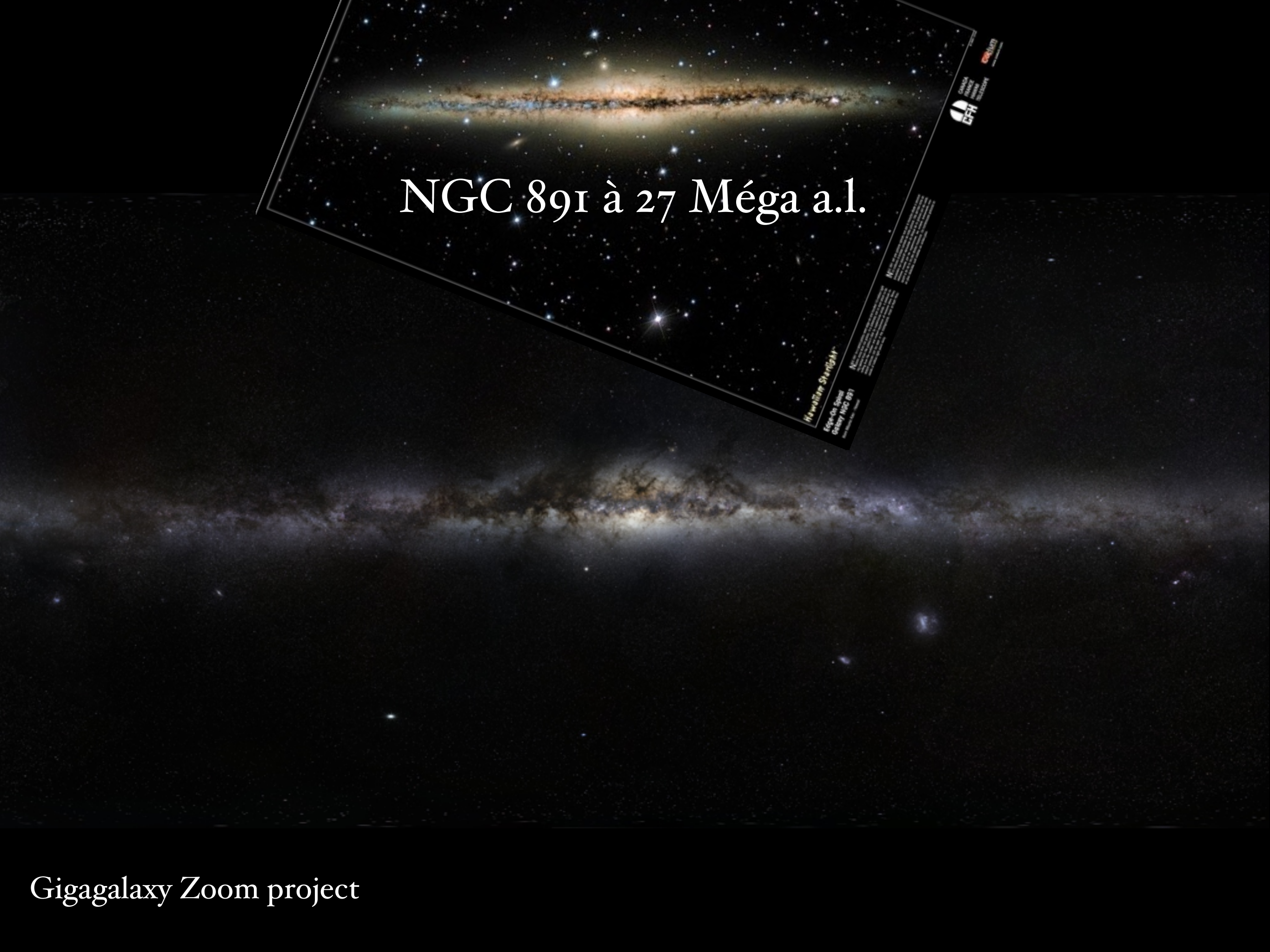


Masse manquante dans les  
galaxies proches.  
Qu'en disent les satellites?

Rodrigo Ibata  
Observatoire de Strasbourg

# Le Groupe Local (galaxies très proches)





NGC 891 à 27 Méga a.l.

Hawaitine Starlight™

Edge-on Spiral  
Galaxy NGC 891



CONSEIL  
FRANCAIS  
D'ASTRONOMIE

FRANCAIS  
D'ASTRONOMIE



# Une galaxie spirale vue par la tranche...

~200 milliards d'étoiles...

## Densité?

Densité de surface:  $100 \text{ gr/m}^2$   
similaire à celle du papier!

Densité volumique de  
matière baryonique  
(normale):  $1 \text{ kg}/(6500 \text{ km})^3$

[Univers:  $1 \text{ kg}/(450000 \text{ km})^3$ ]

Hawaiian Starlight™

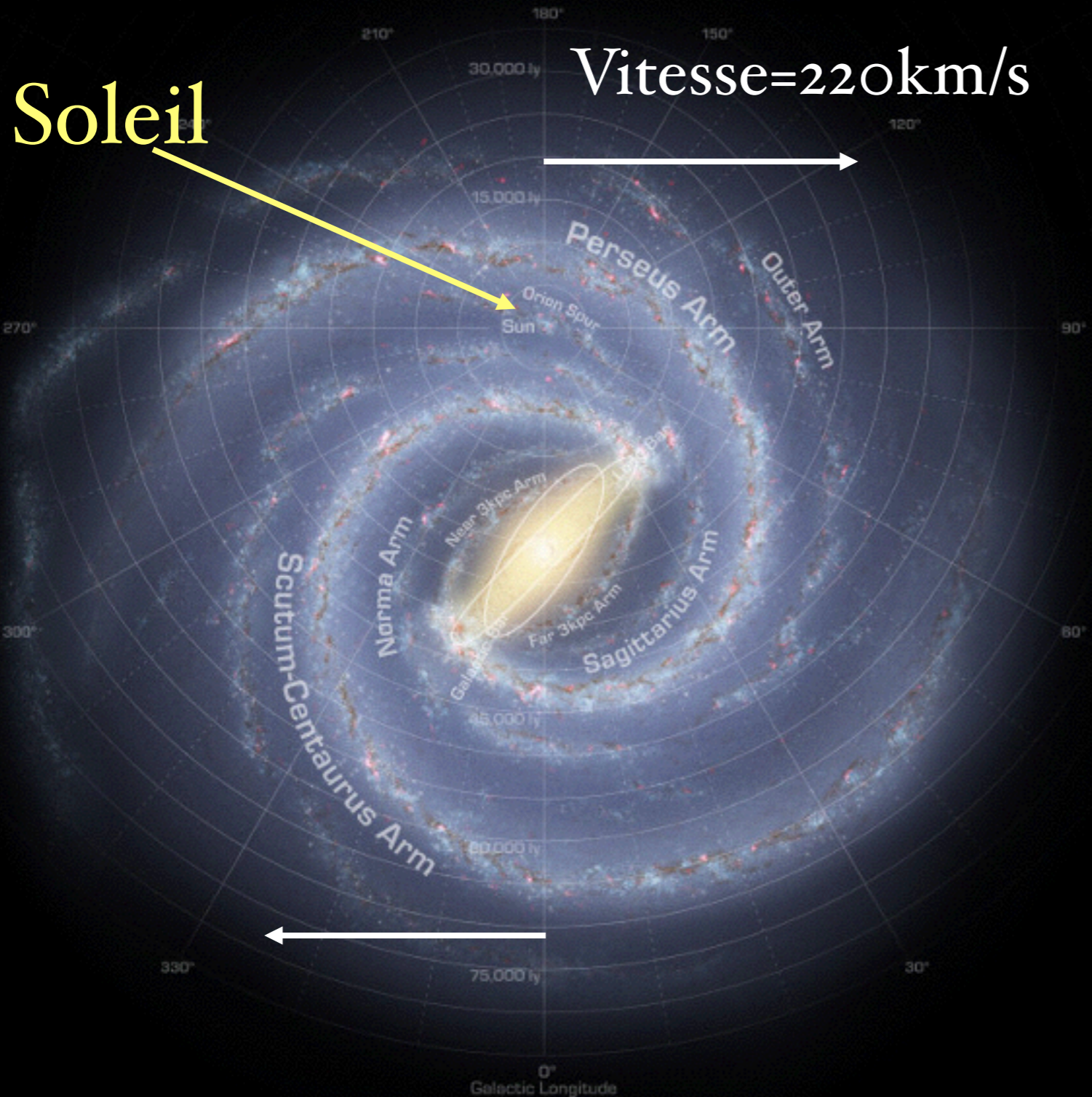
Edge-On Spiral  
Galaxy NGC 891  
From Richard King - Hawaii

NGC 891 is a spiral galaxy seen edge-on and located 10 million light years away from our galaxy. It is extremely rich in star clusters in the ring formed from the galaxy's disk by superheated winds, a process resulting from the system and inward migration of massive stars. Many bright galaxies can be seen in the background, most of them thousands of million light years away.

NGC 891 est une galaxie spirale vue par la tranche située à environ 10 millions d'années-lumière de notre galaxie. Elle est très riche en amas stellaires résultant du disque de la galaxie par les vents superchauffés créés par les supernovae, un résultat directement résultant de la migration et du retour des étoiles massives. De nombreuses galaxies brillantes sont visibles en arrière-plan, toutes à des distances de millions de années-lumière.

CFH CANADA FRANCE HAWAII TELESCOPE

coelum www.coelum.com



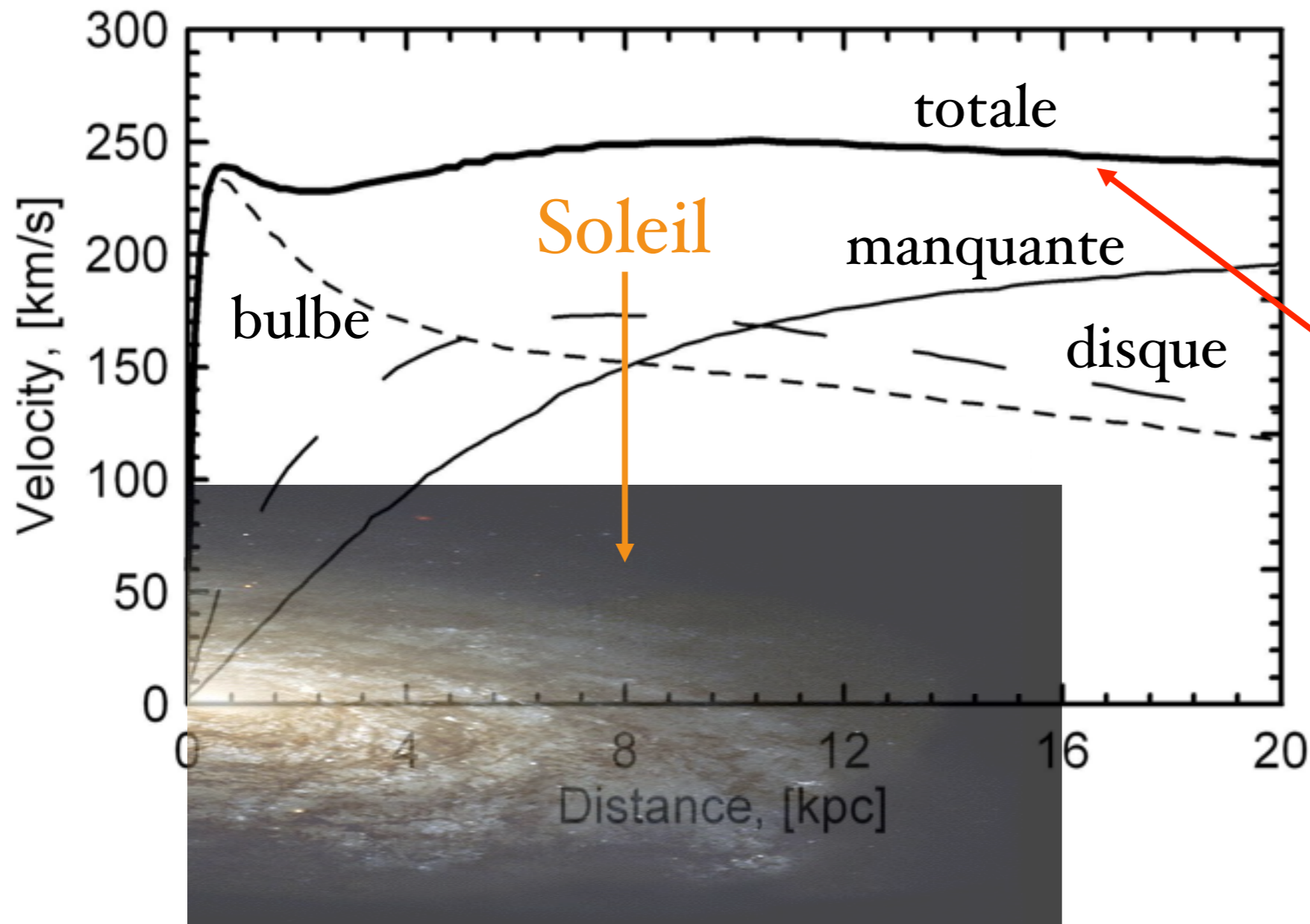
1 rotation = 230 M.a.  
 = 1 année Galactique  
 (Trias)

Les dinosaures ont  
 disparu il y a 1/4 d'une  
 rotation

Le Soleil et la Terre  
 sont apparus il y a 20  
 révolutions

Age de l'univers  
 = 59 révolutions

# Dans la Voie Lactée



La courbe de rotation ne tombe pas après la fin de la partie visible de la Galaxie

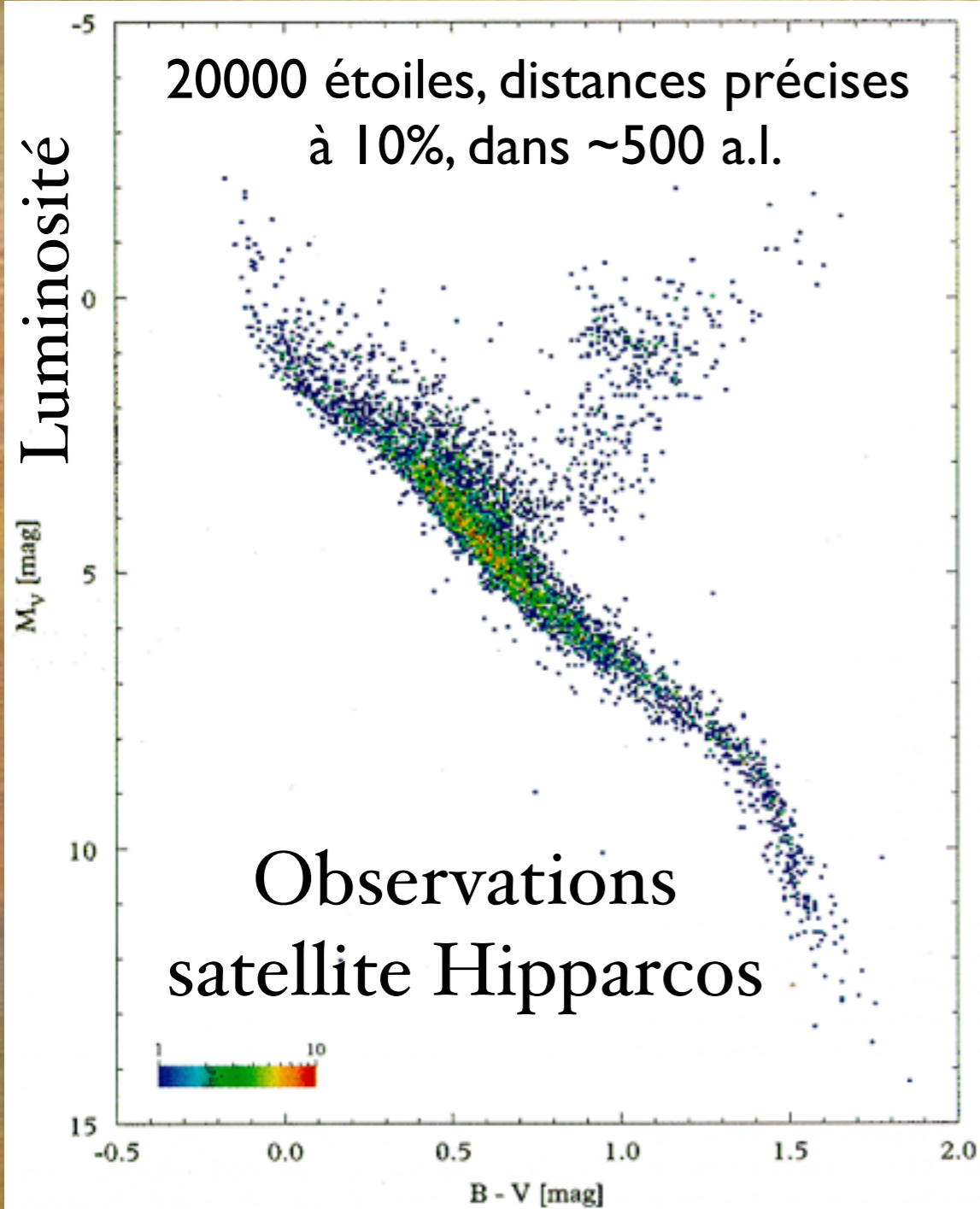
Il y a beaucoup de masse au delà de la partie visible de la Galaxie

Mais combien de matière noire faut-il dans la Voie Lactée?

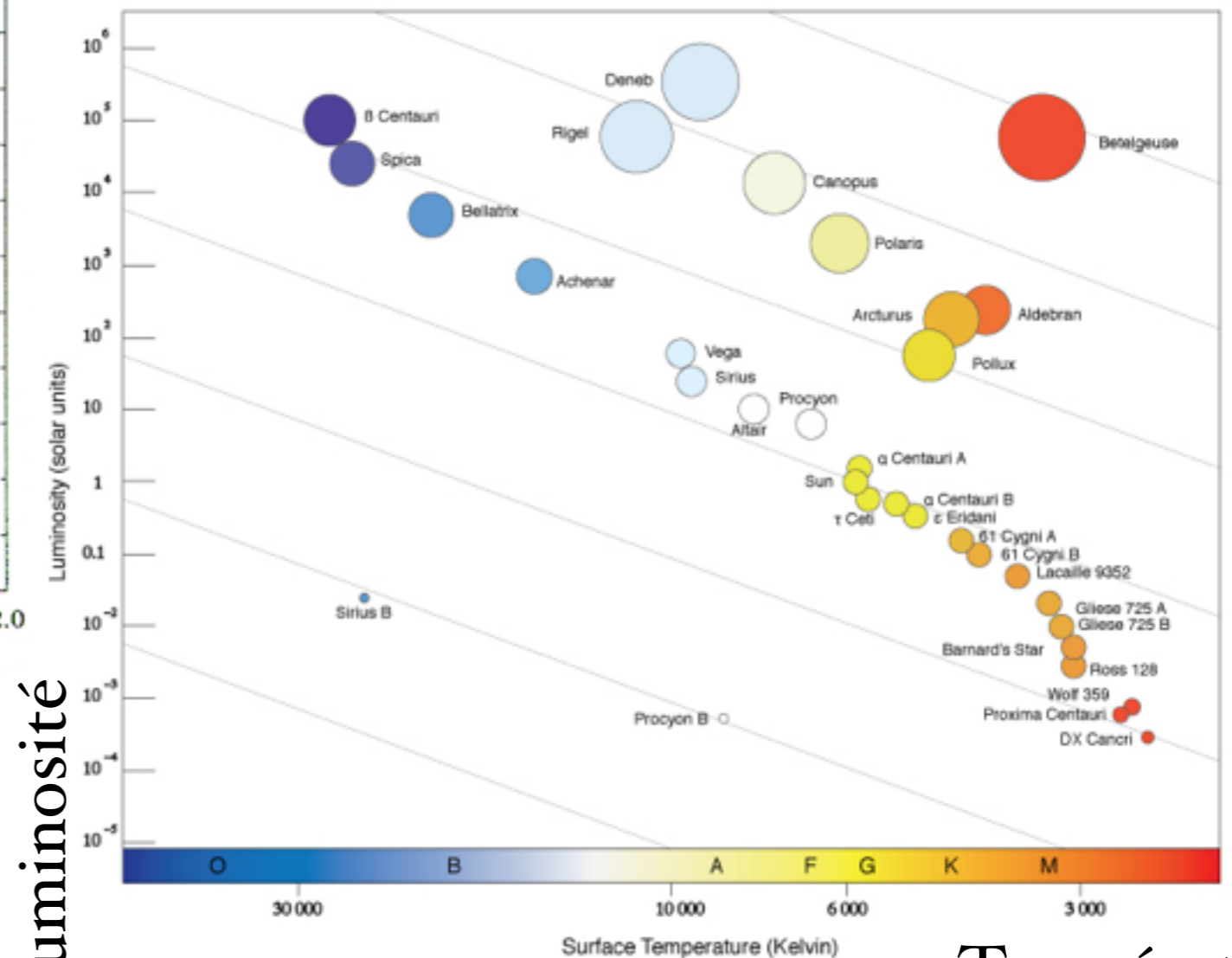
# Masse de la matière visible

## Estimation de la masse visible:

- relevés d'étoiles
- mesures de distance
- mesures de masse d'étoiles (binaires, astérosismologie, modélisation d'atmosphères, etc)
- modélisation de la Galaxie



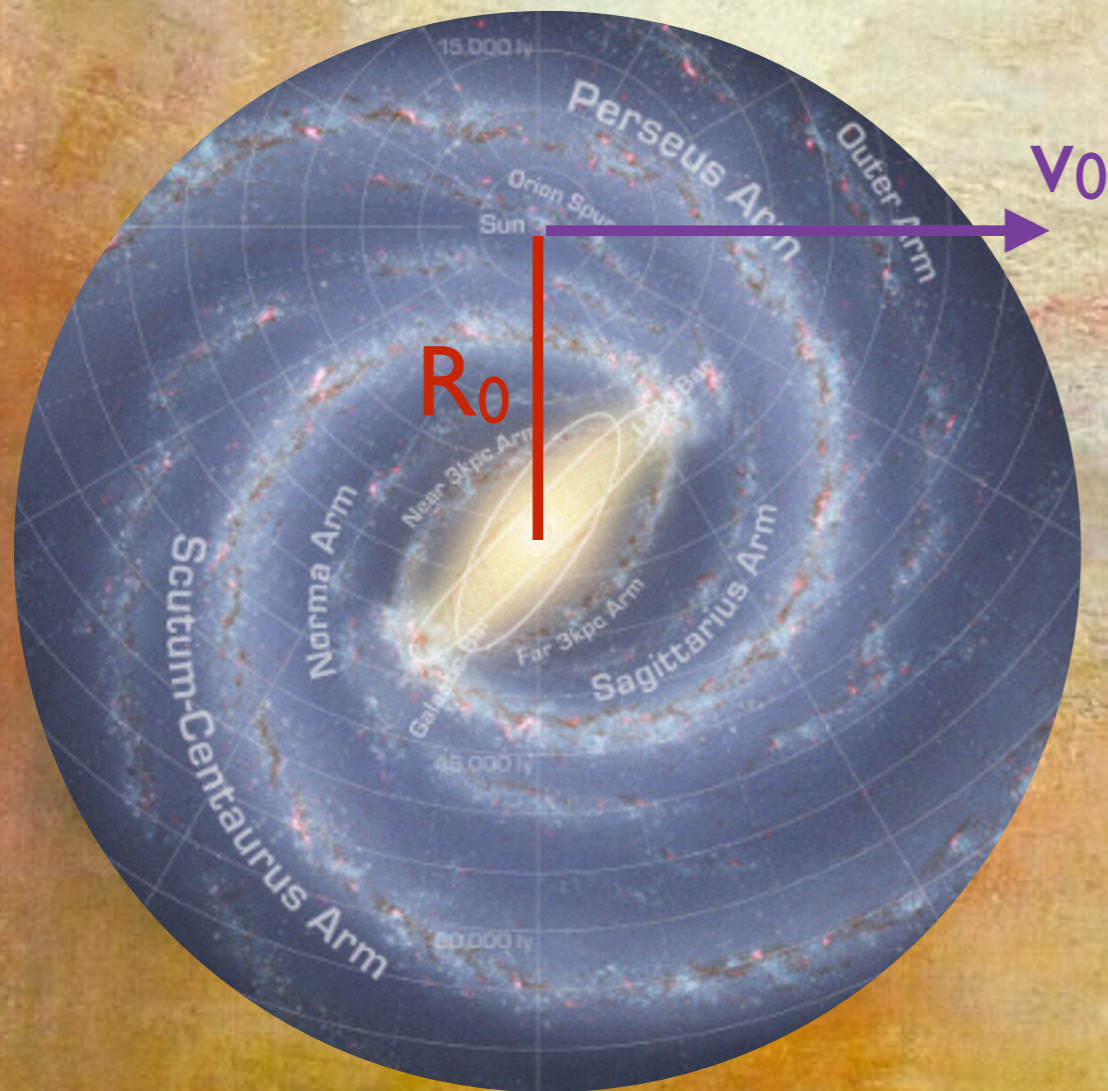
Température



Luminosité

Température

# La courbe de rotation de la Voie Lactée se mesure à partir de chez nous...



➤ Paramètres Galactiques très incertains (McMillan & Binney 2010):

■  $R_0$  :  $20600 \pm 1500$  à  $27400 \pm 2800$  a.l.

■  $v_0$  :  $200 \pm 20$  à  $279 \pm 33$  km/s

➤ Très grossièrement:

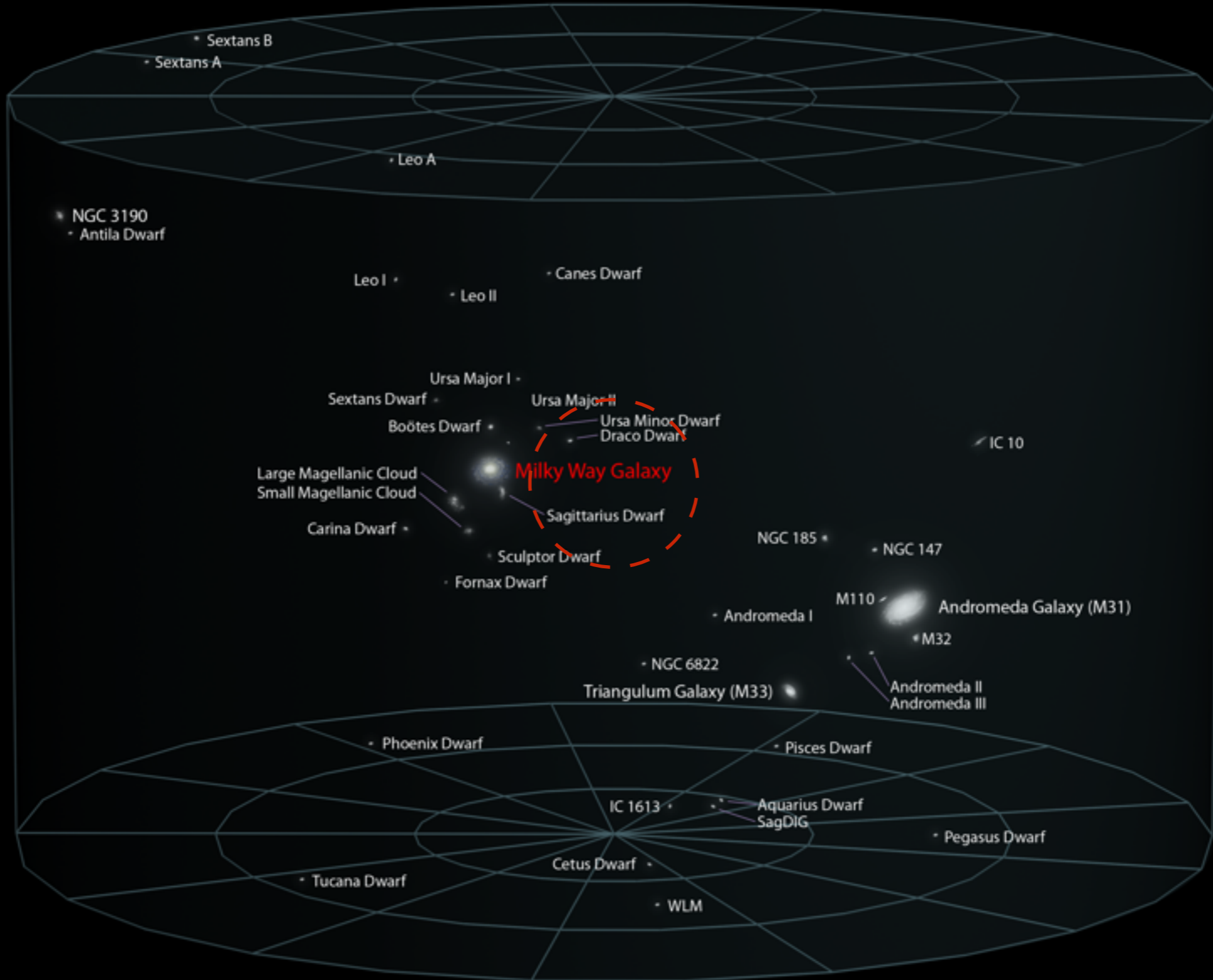
$$M \propto v_0^2 R_0$$

donc les incertitudes sur  $M(R)$  sont énormes...

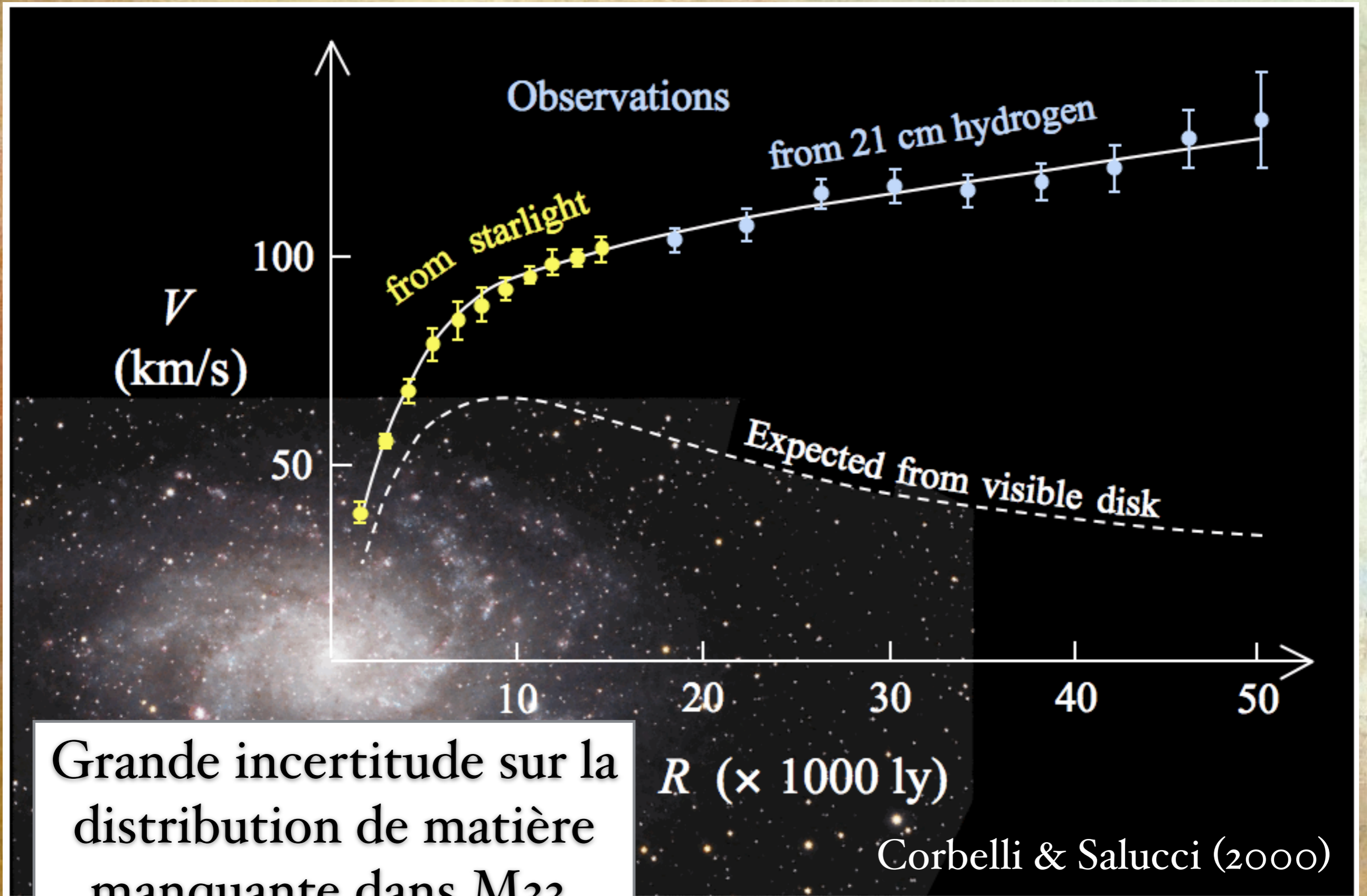
Grande incertitude sur la quantité de matière manquante dans la Voie Lactée, même au rayon Solaire.



# Le Groupe Local (galaxies très proches)



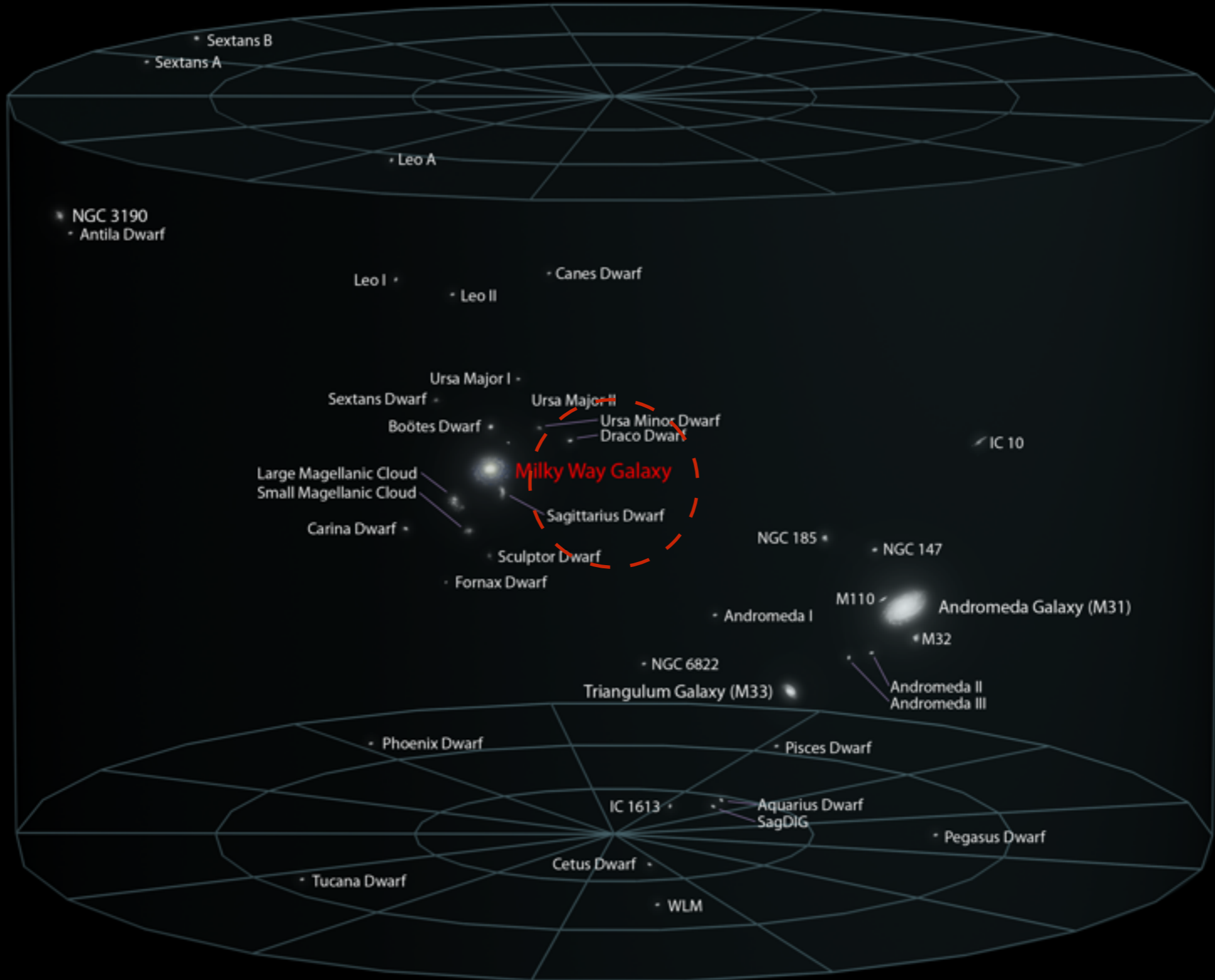
# M33 : une galaxie spirale du Groupe Local



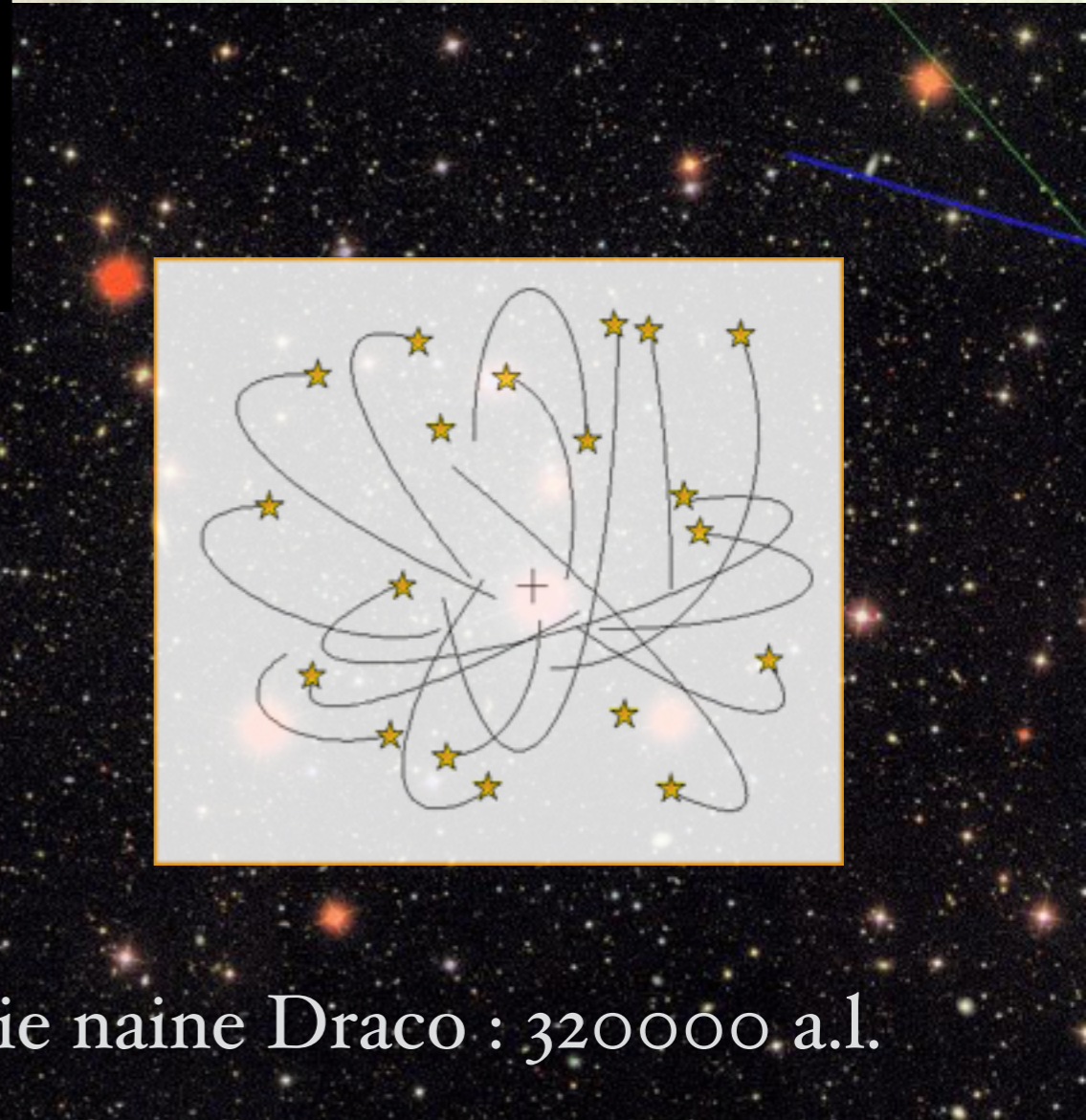
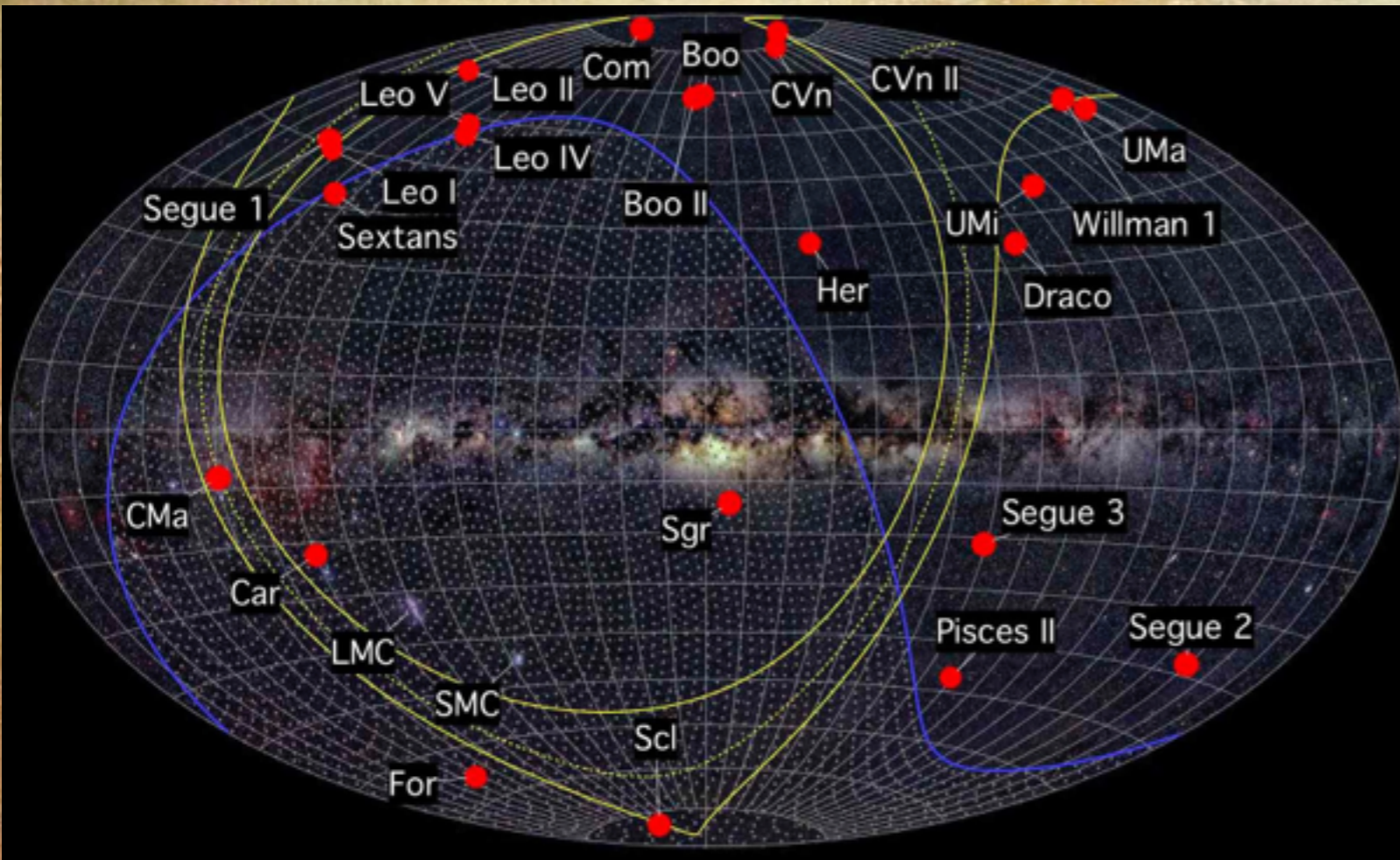
Grande incertitude sur la distribution de matière manquante dans M33.

Corbelli & Salucci (2000)

# Le Groupe Local (galaxies très proches)



# Matière noire dans des galaxies naines



galaxie naine Draco : 320000 a.l.

# Equation fondamentale de la dynamique stellaire (Jeans sphérique):

$$\frac{GM(r)}{r} = -\overline{v_r^2} \left[ \frac{d \ln \rho}{d \ln r} + \frac{d \ln \overline{v_r^2}}{d \ln r} + 2 \left( 1 - \frac{\overline{v_\theta^2}}{\overline{v_r^2}} \right) \right],$$

chaleur, direction azimutale

Grande incertitude sur la quantité de matière manquante dans les galaxies naines (sphéroïdales)

chaleur, direction radiale

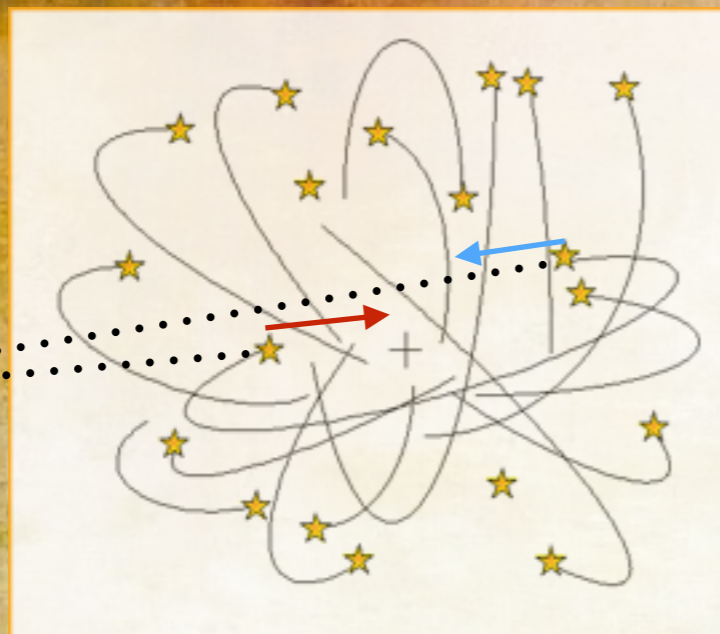
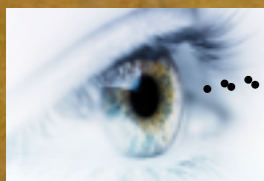
Avec uniquement des mesures projetées sur la ligne de visée l'équation n'est pas assez contrainte, donc nous sommes forcés de faire des suppositions simplificatrices.

ex. galaxie naine Draco

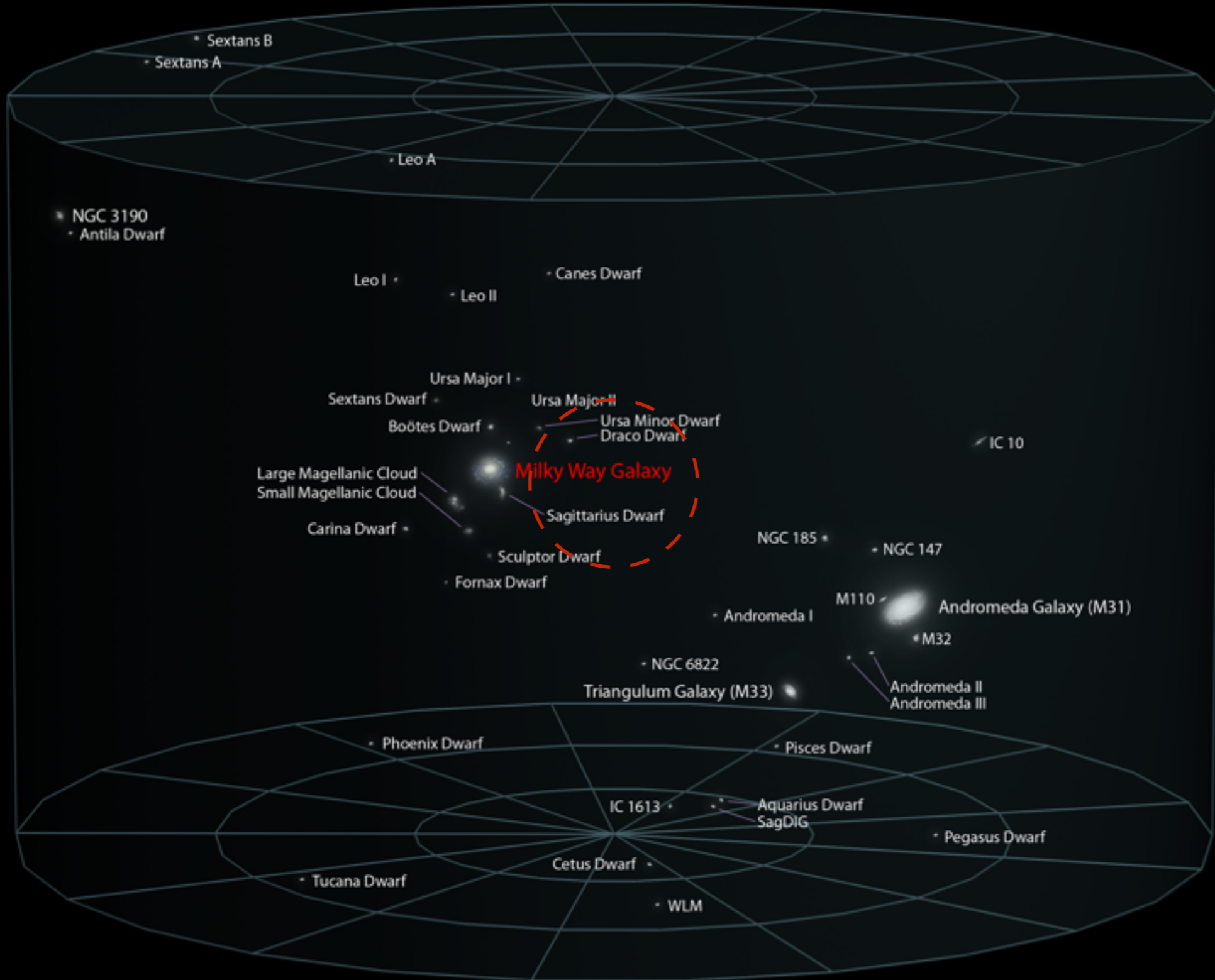
$M_{\text{totale}}/M_{\text{étoiles}} = 539 \pm 136$  (Long et al. 2010)

mais avec toute liberté:

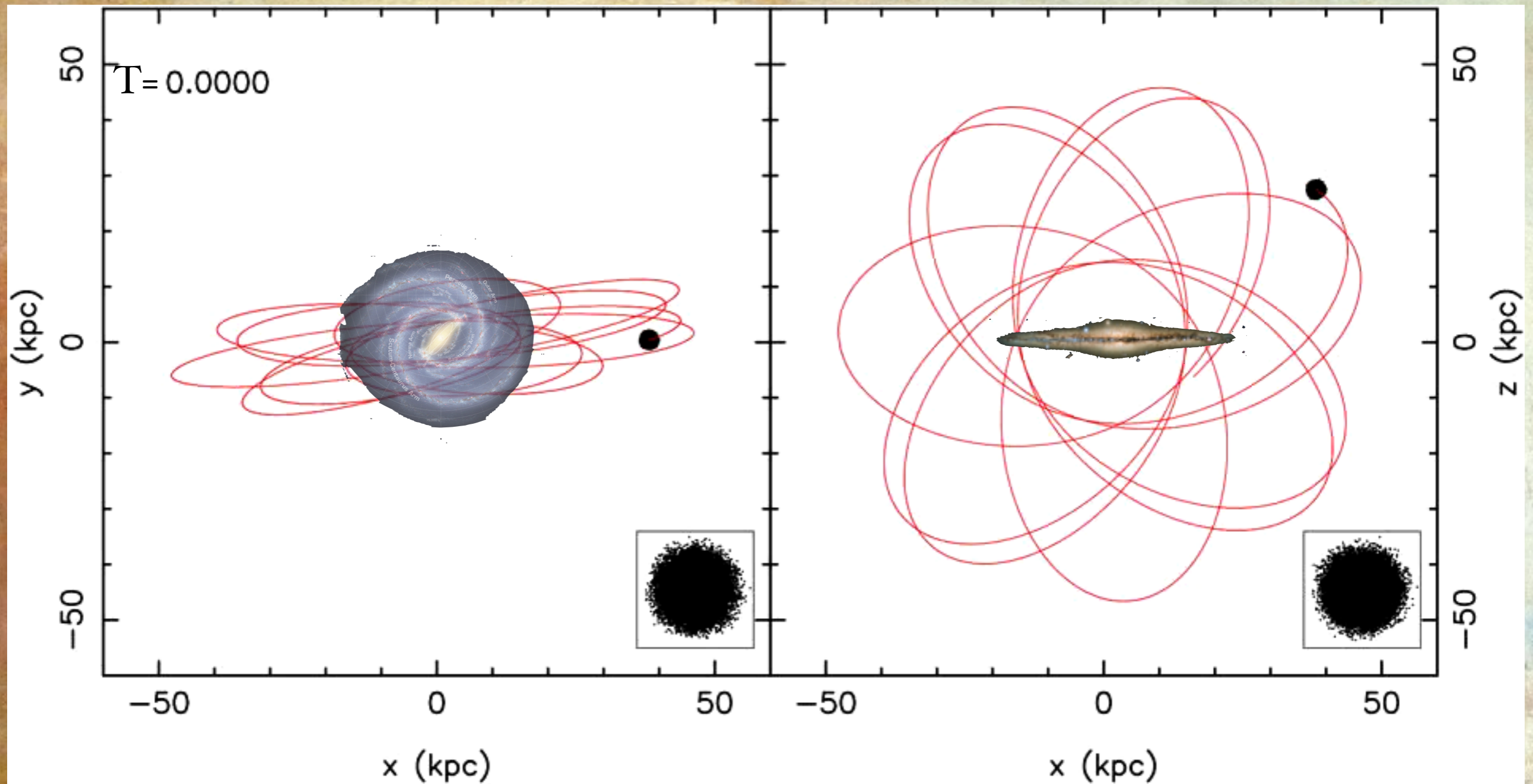
$M_{\text{totale}}/M_{\text{étoiles}} \sim 10 - 20$



# Le Groupe Local (galaxies très proches)



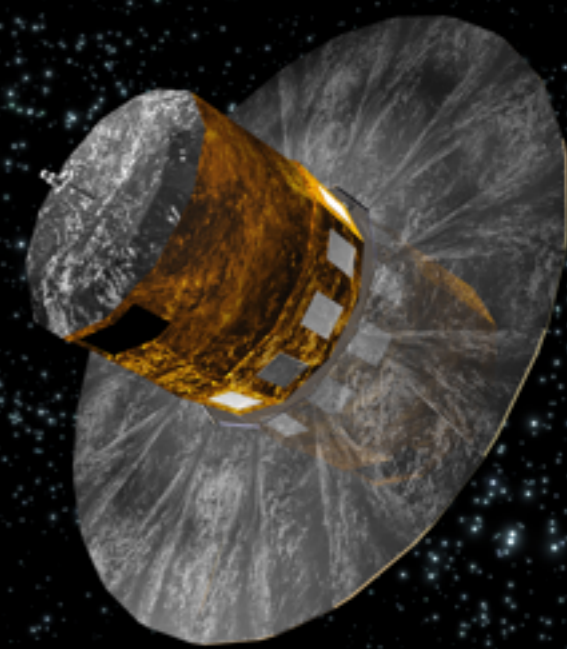
# Courants stellaires de la destruction de satellites



À peu près le seul moyen fiable de mesurer la masse a grande distance

# la révolution Gaia

30000 a.l. : distances à 10%



depuis  
Dec 2013...

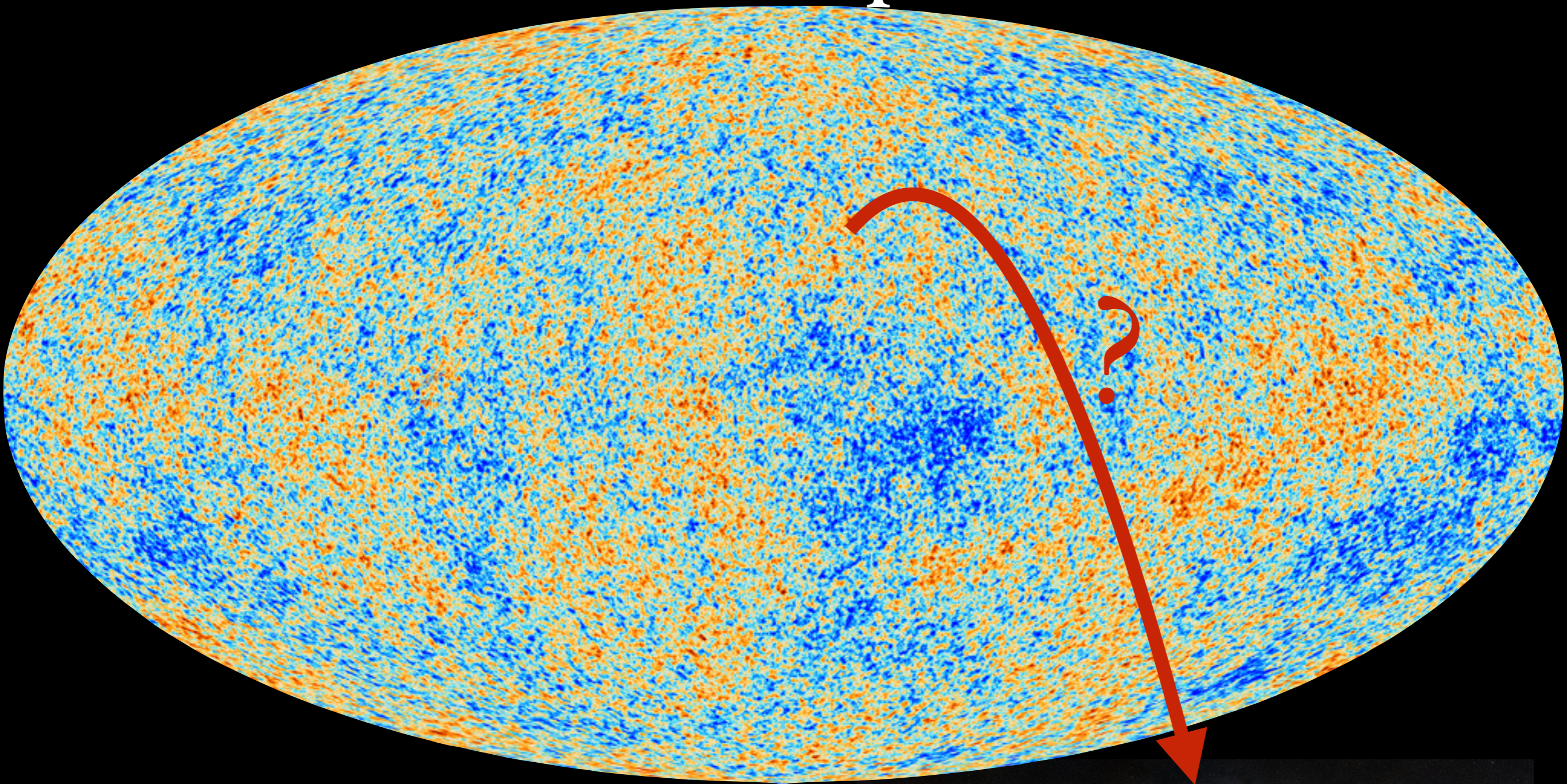
Soleil  
distances à 10%  
actuels ~500 a.l.

A la fin de la mission Gaia, en 2022, nous aurons (enfin!) une compréhension détaillée de la distribution de la matière manquante.

60000 a.l. :  
mouvements à 1 km/s



# Formation galactique dans un univers dominé par l'obscur



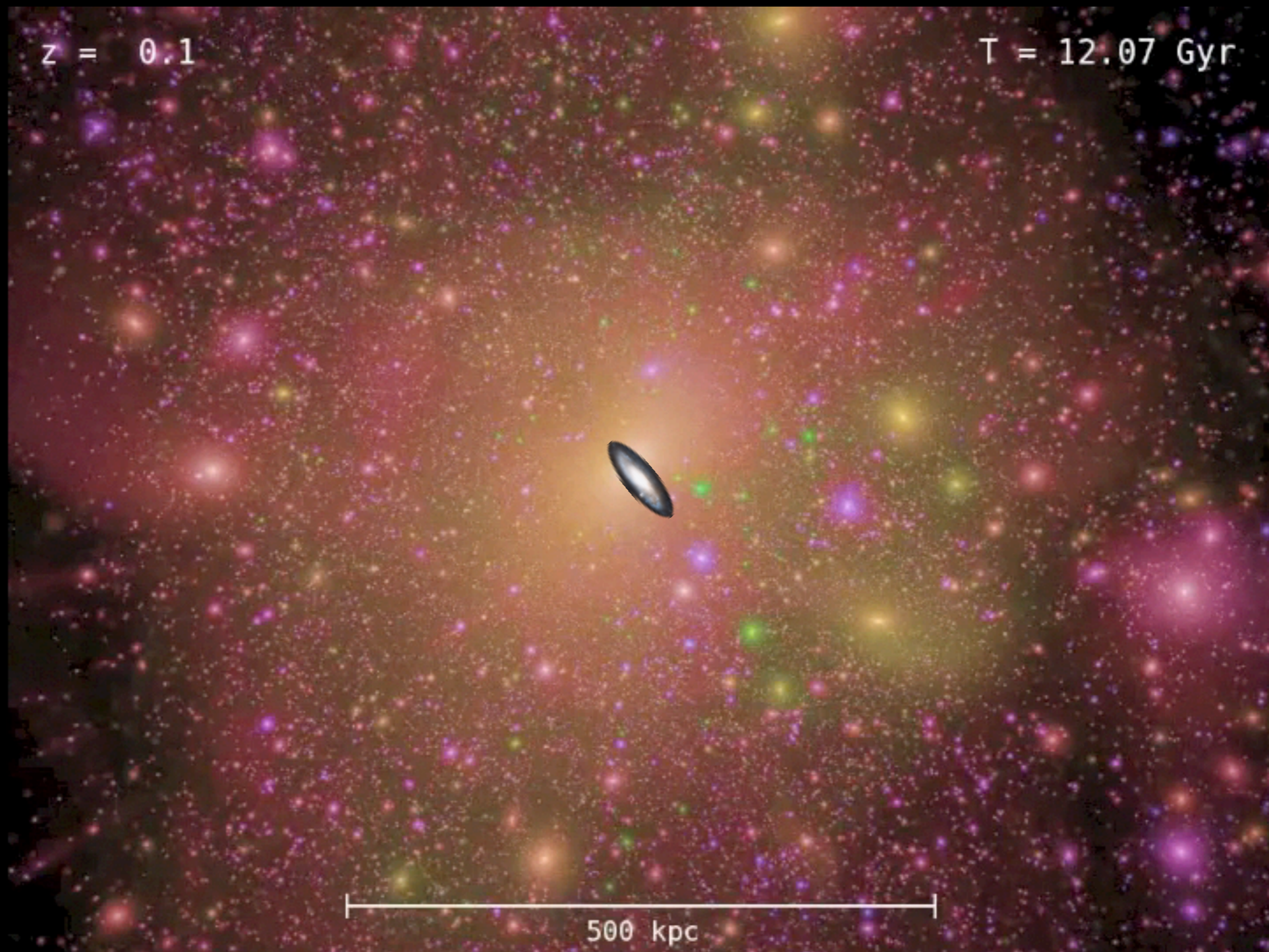
Satellite Planck: fond diffus cosmologique  
Fluctuations primordiales de l'univers



# simulation cosmologique “Illustris”

(matière noire + baryons, résolution moyenne  $6 \times 10^6 M_{\odot}$ )

# simulation cosmologique “Aquarius”



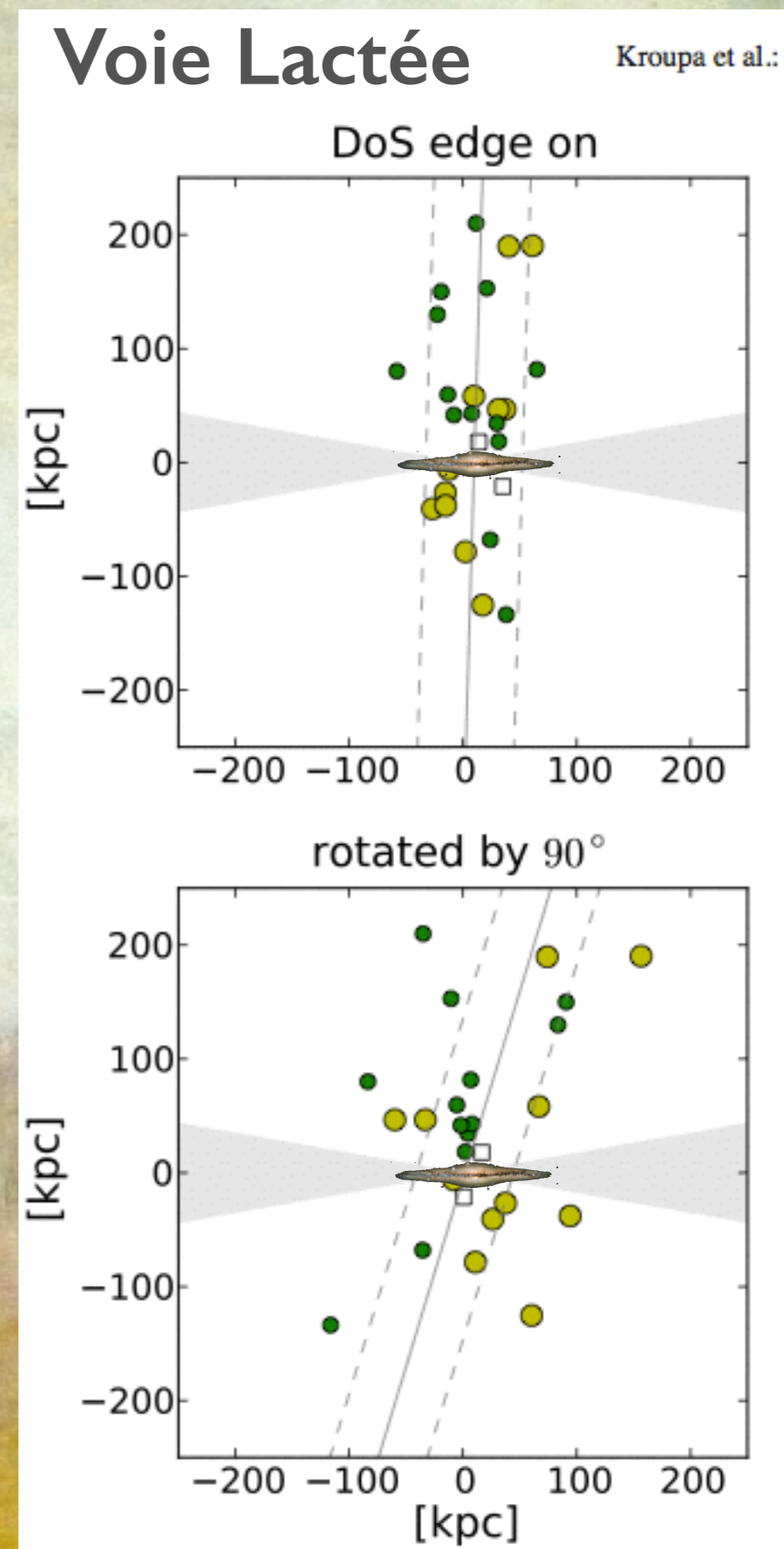
(matière noire, haute resolution  $\sim 10^6 M_{\odot}$ )

# Matière noire : prédictions pour les satellites des galaxies

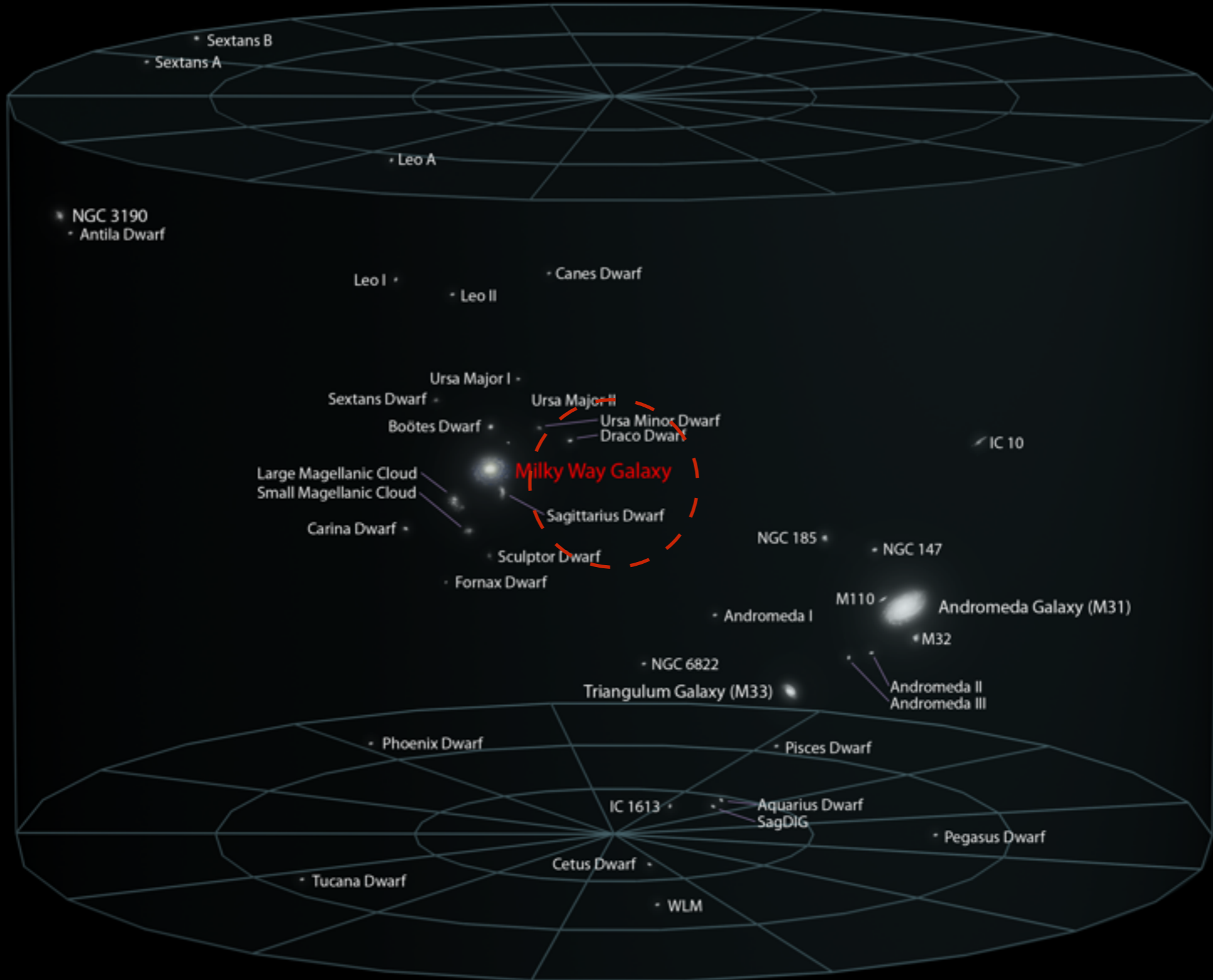
- simulations : existence de milliers de satellites (de matière noire) avec  $M > 10^7$  masses Solaires
  - observations : quelques dizaines de satellites
  - On pense que seulement les galaxies satellites les plus massives (à  $z=6 - 7$ ) contiennent des étoiles.
- distribution spatiale approximativement sphérique
  - cinématique approximativement aléatoire
  - petit N : des structures aplaties sont possibles, mais elles sont rares et transitoires (e.g. Libeskind et al. 2009, Gillet et al. 2014)

# Distribution des satellites de la Voie Lactée

- Lynden-Bell (1976) a remarqué des corrélations entre satellites de la Voie Lactée et courants d'hydrogène HI.
- Kroupa (2005), Metz et al. (2007,2008); Pawlowski et al. (2012a,2012b, 2013) affirment que ceci pose un problème majeur pour la théorie de la matière noire. Solutions proposées par D'Onghia & Lake (2008), Li & Helmi (2008), Lovell et al. (2011), Wang et al. (2012).
- Difficile à interpréter dans la Voie Lactée. Observations vers la galaxie d'Andromède beaucoup plus simples.

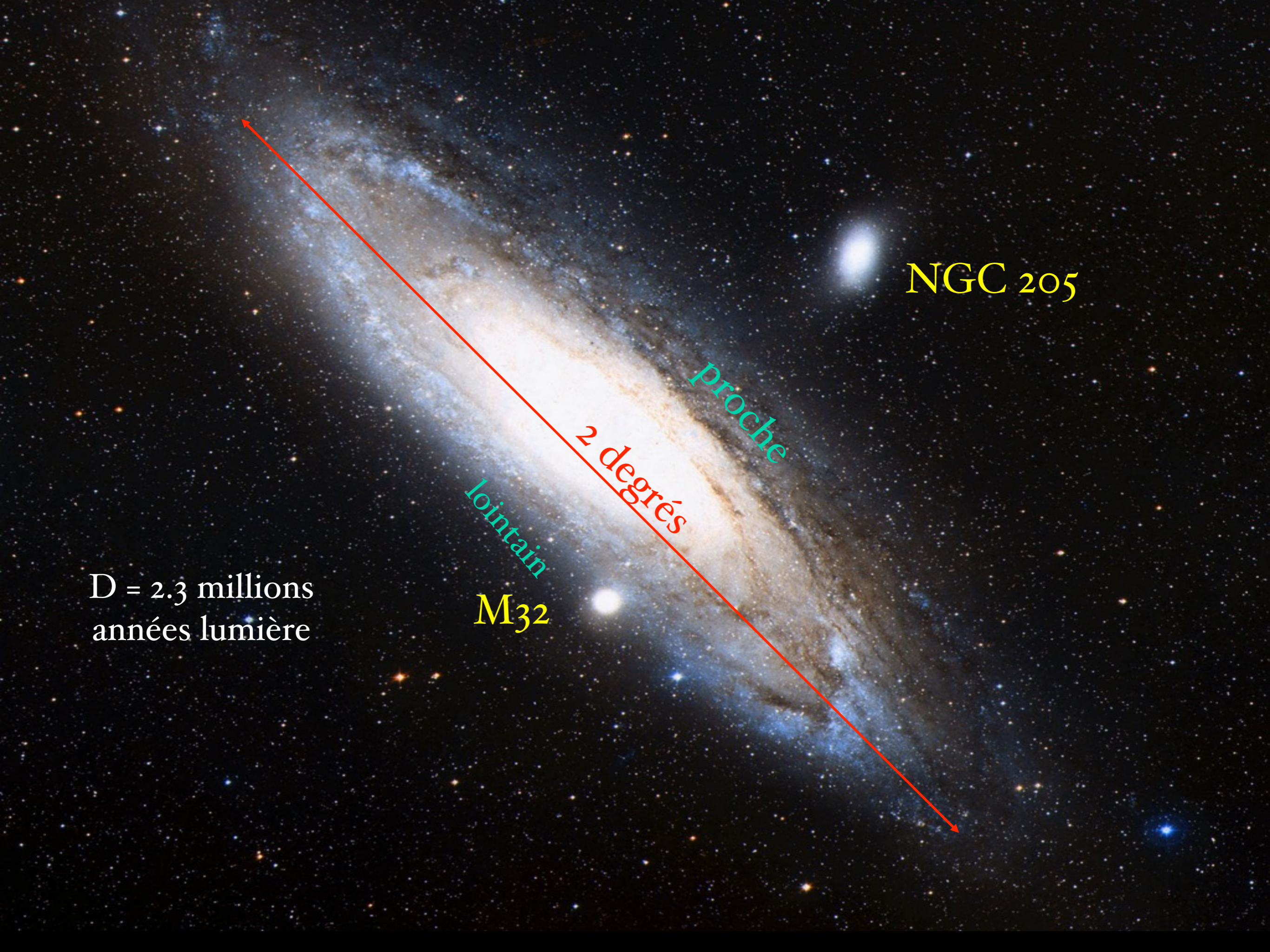


# Le Groupe Local (galaxies très proches)



# La galaxie d'Andromède





NGC 205

proche

2 degrés

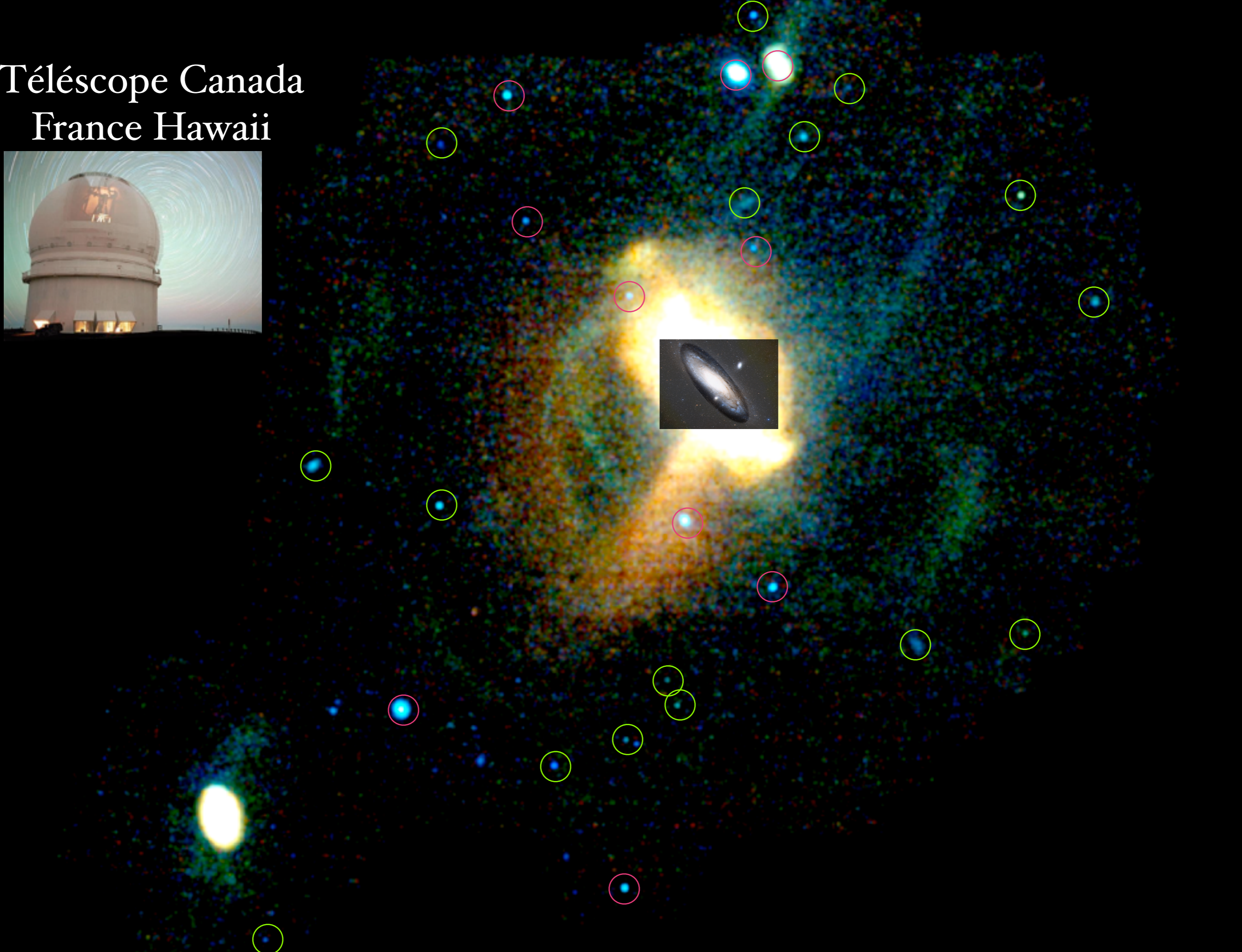
lointain

M32

D = 2.3 millions  
années lumière

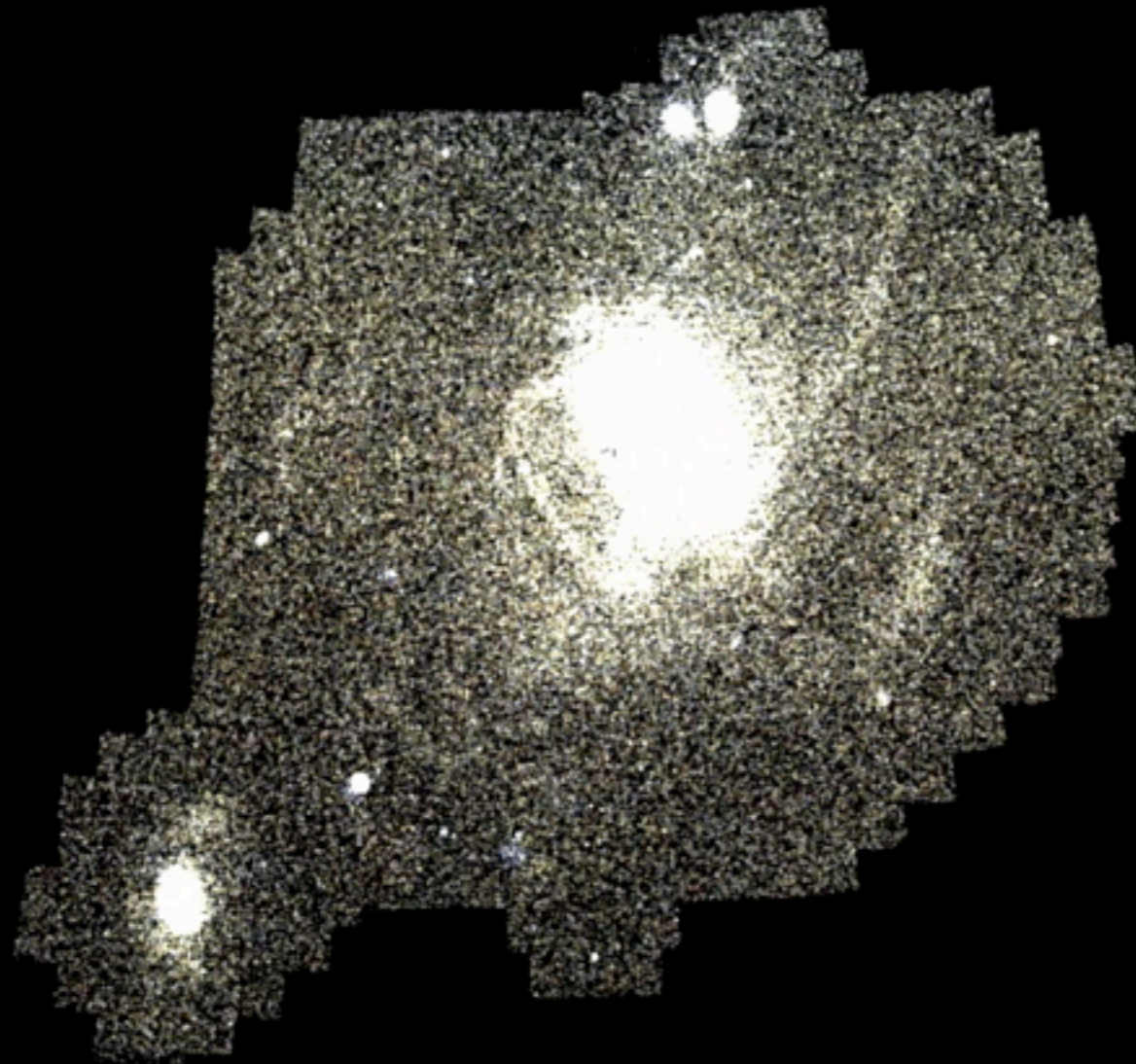


Télescope Canada  
France Hawaii



# Alignement des satellites d'Andromède

- Mesures de position, distance et vitesse radiale pour 27 satellites.
- Il existe un plan préférentiel, d'épaisseur  $37800 \pm 1800$  a.l. et diamètre  $> 10000000$  a.l., qui contient 50% des satellites du relevé.



# Alignement cinématique



vue sur le ciel



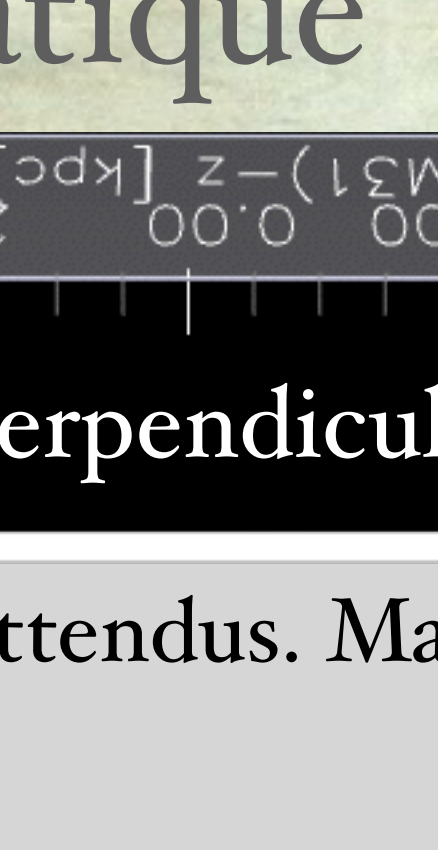
vue perpendiculaire

Des alignements de satellites sont à priori inattendus. Mais on les observe dans:

- La Voie Lactée
- Andromède

Le Groupe Local est-il atypique?

Ibata et al. 2013, Nature



-200 0.00 200  
x [kpc]



100 km/s  
200 0.00 -200  
z(M31)-z [kpc]

Probabilité(13 ou plus/15 avec le même sens de rotation)=0.7%

Significance totale = 99.998%

Peut-on trouver des alignements autour d'autres galaxies?

## Le relevé Sloan (SDSS)

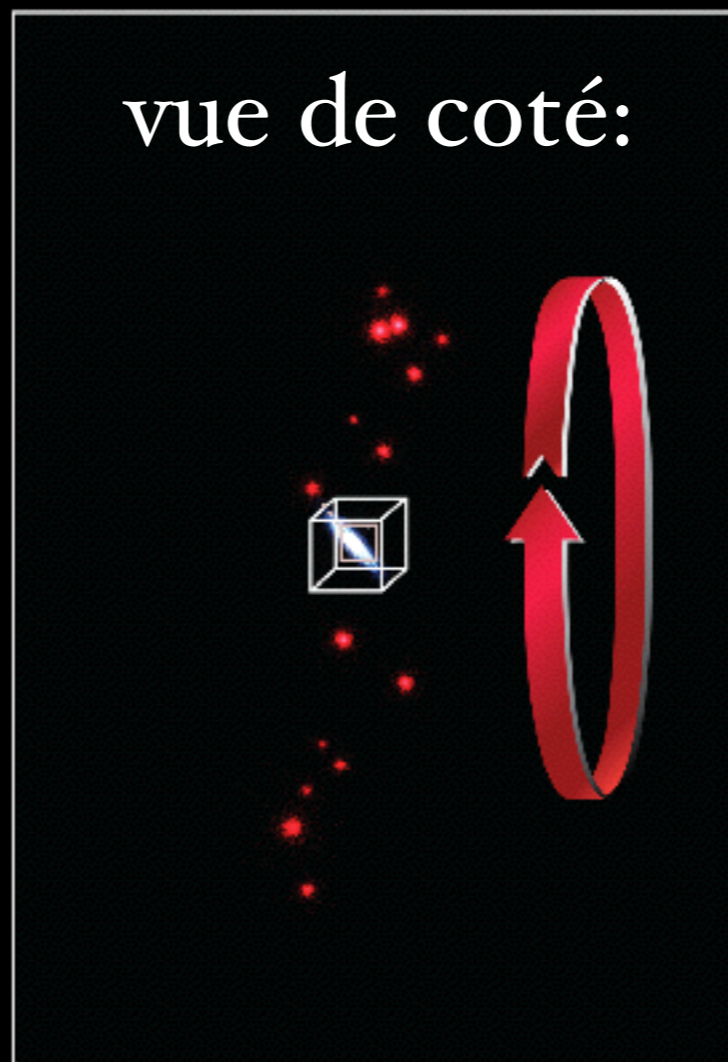
Le plus complet,  
1/4 du ciel, mais  
seulement les satellites  
brillants sont mesurés

# Peut-on trouver des alignements autour d'autres galaxies?

L'idée...



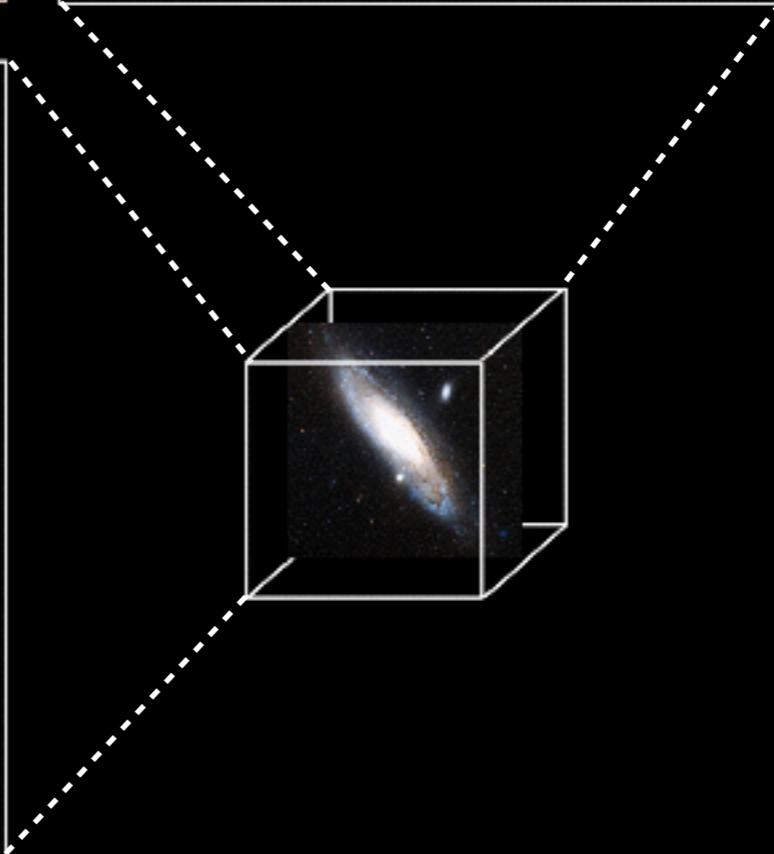
vue de côté:



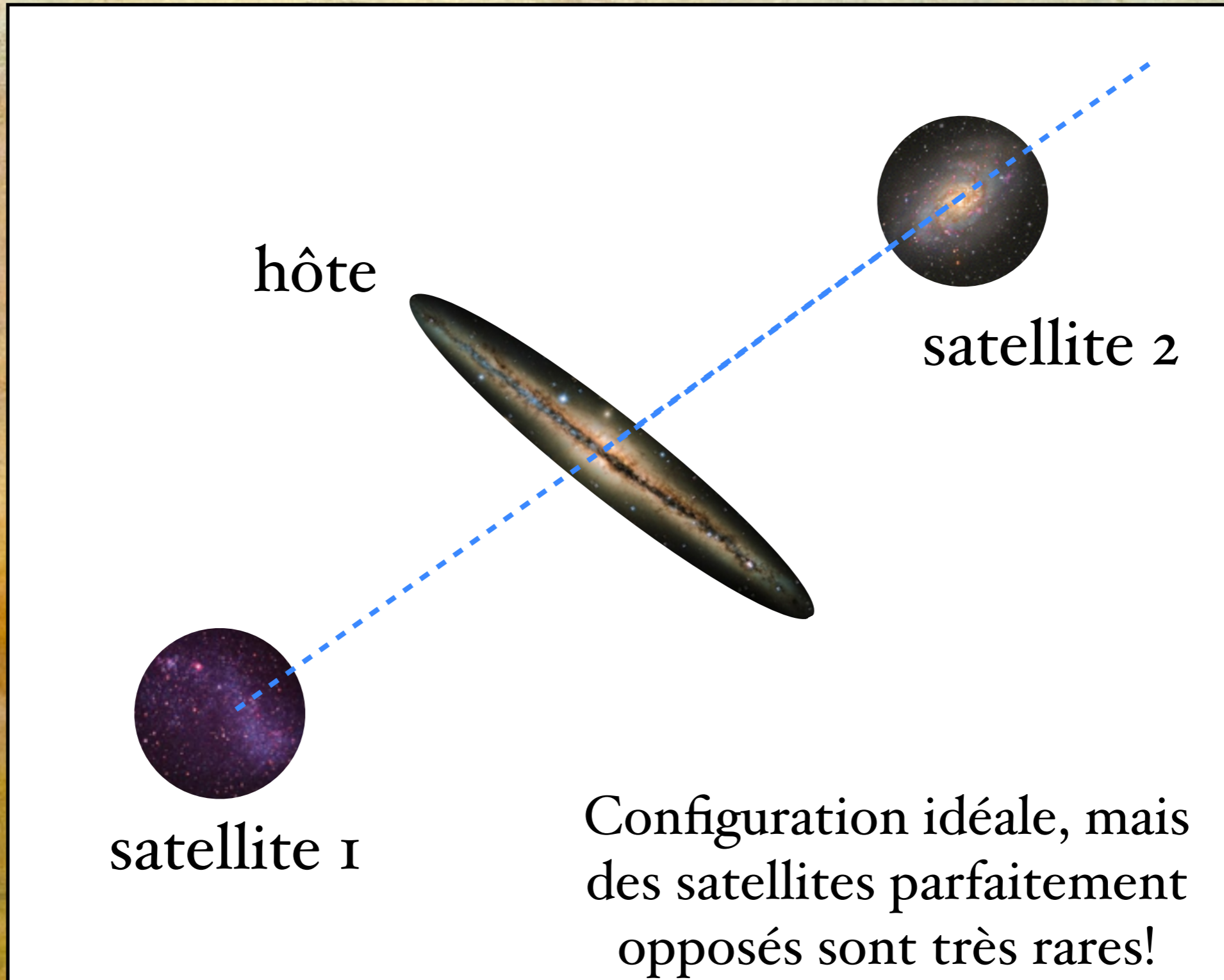
l'effet sera plus prononcé pour des configurations vues par la tranche

les satellites sur des côtés opposés de leur hôte auront des vitesses anti-corrélées

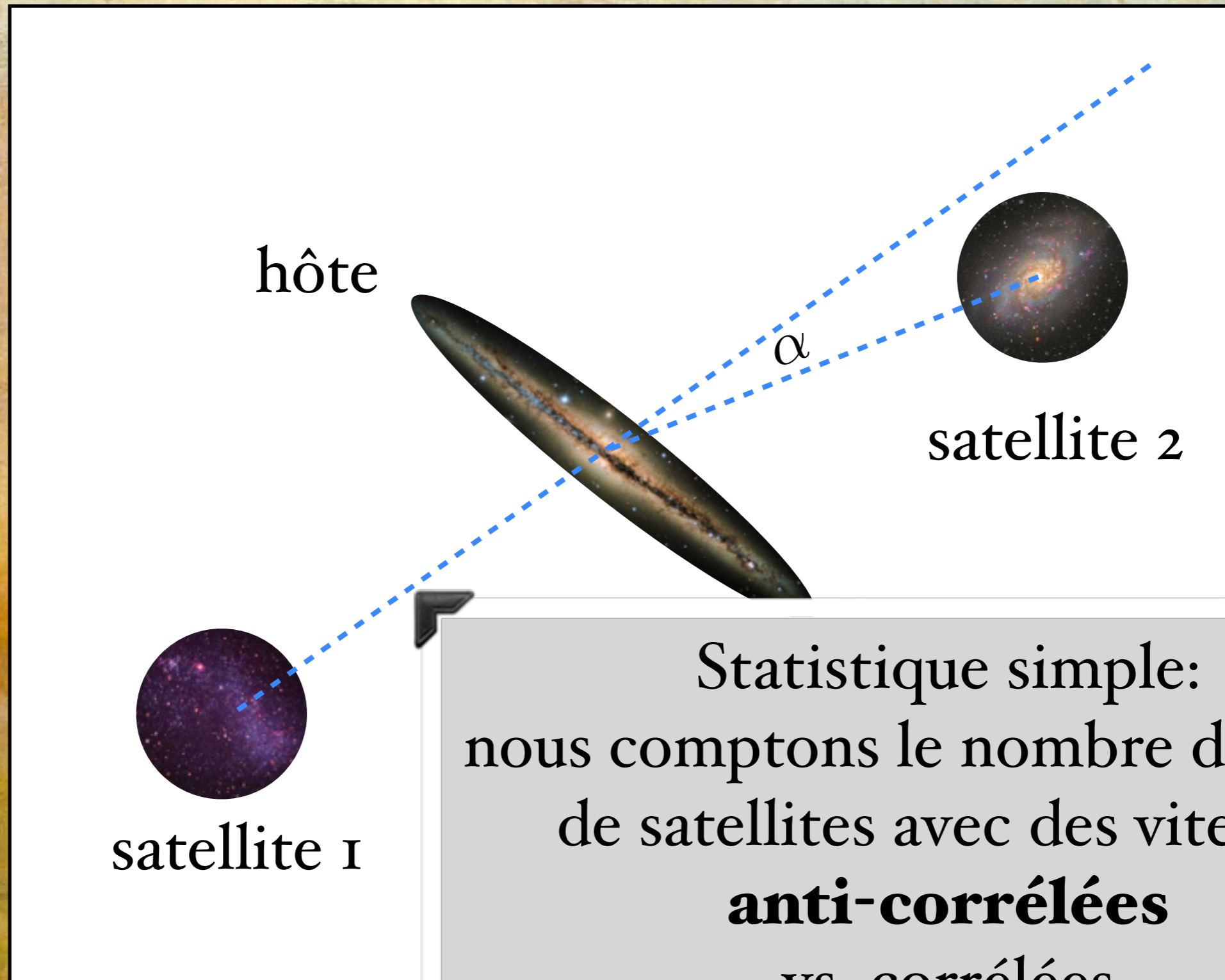
vue de face:



# Pour sélectionner des alignements vus par la tranche



Pour sélectionner des alignements vus par la tranche



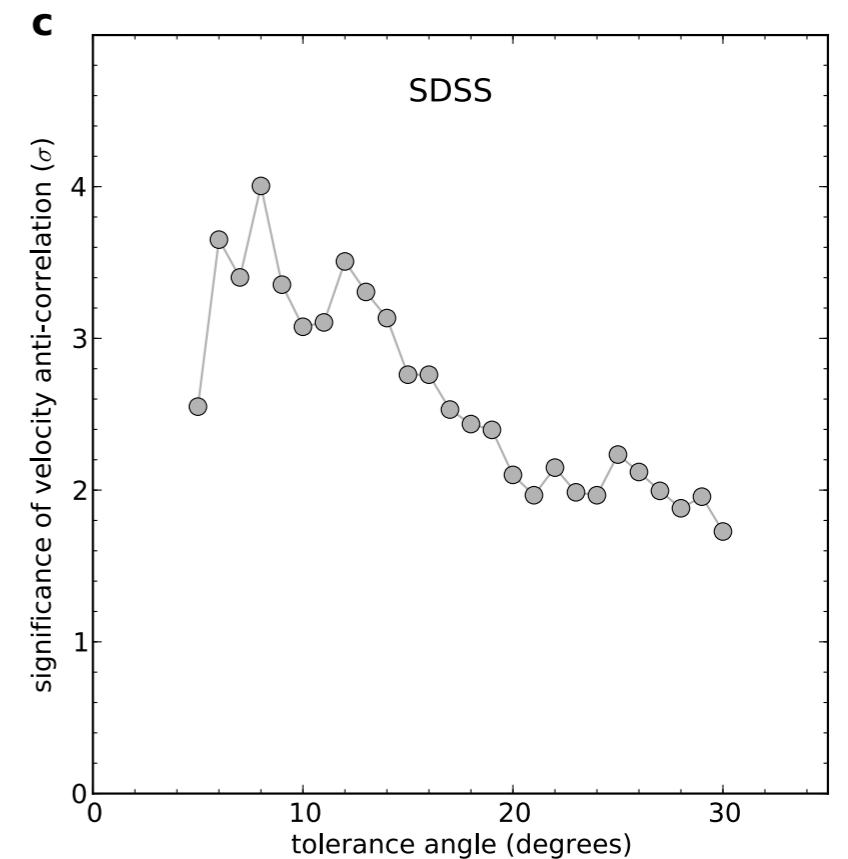
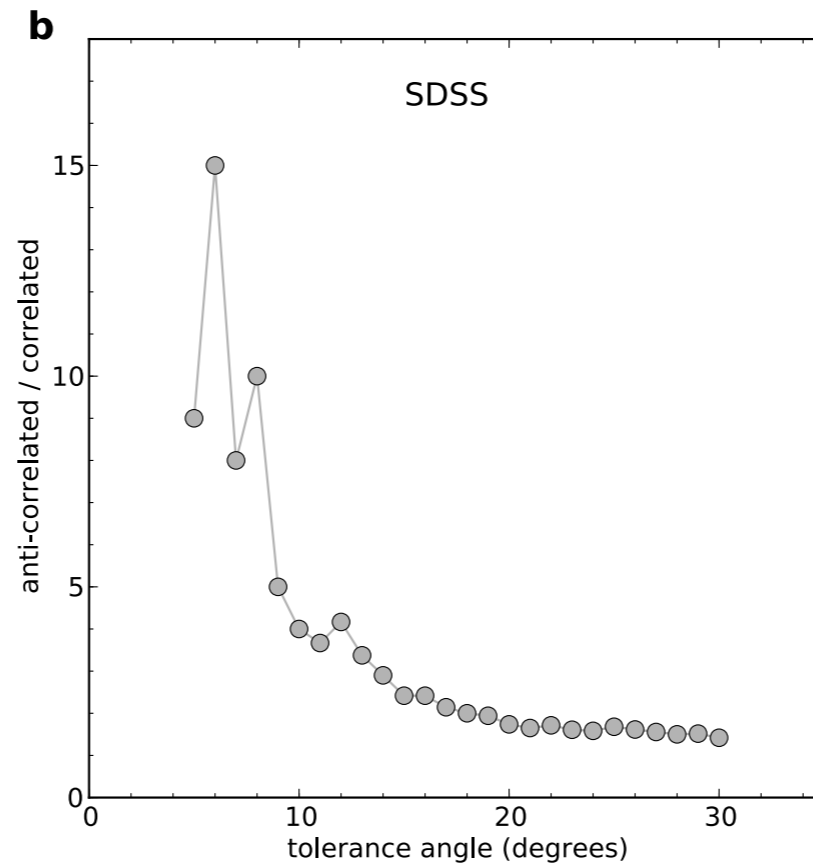
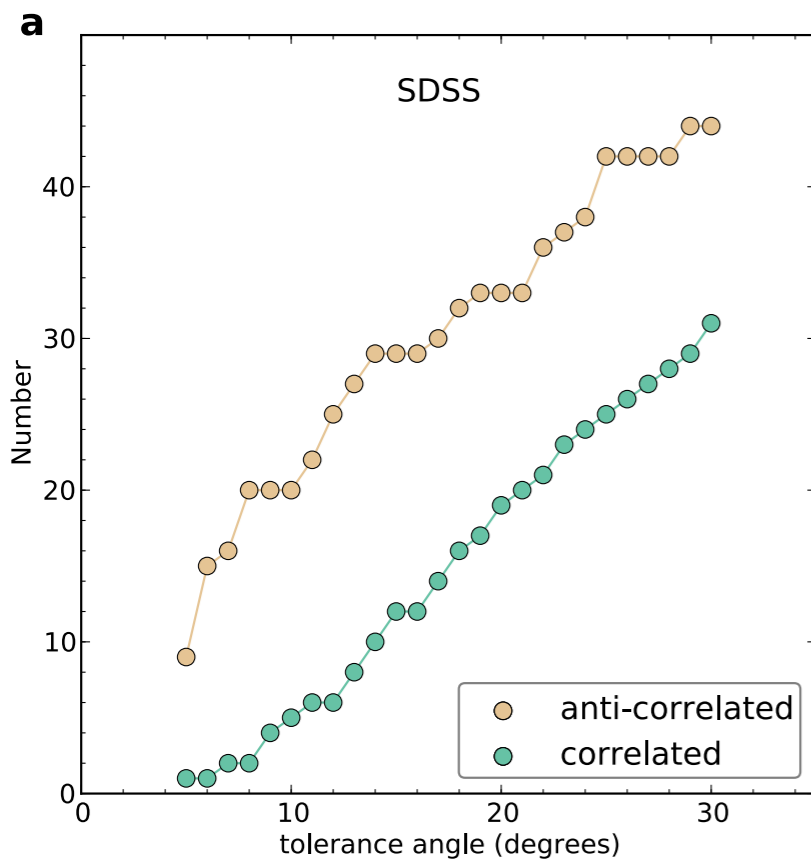
# Paires de satellites dans le relevé Sloan

Les paires de satellites (diamétralement opposés par rapport à leur hôte) ont préférentiellement des vitesses **anti-corrélées**.

Cohérent avec l'existence des alignements planaires.  
Mais inattendu selon la simulation (de matière noire)  
**Millennium II.**

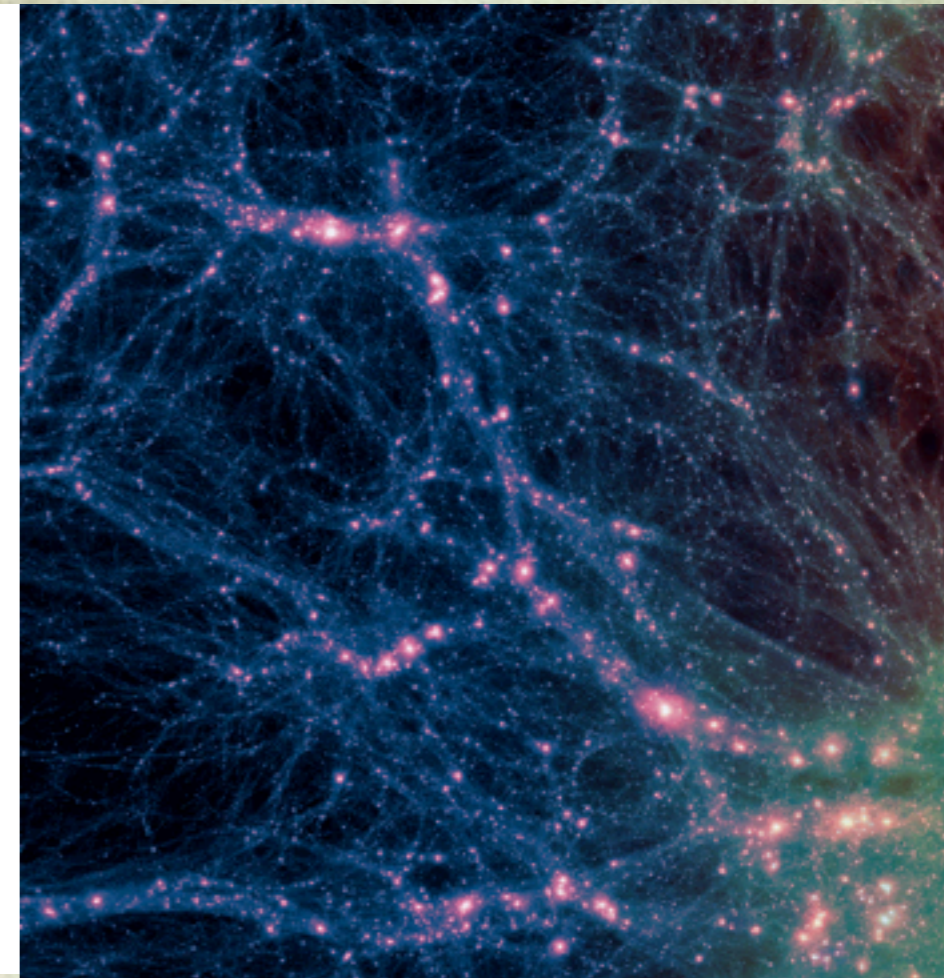
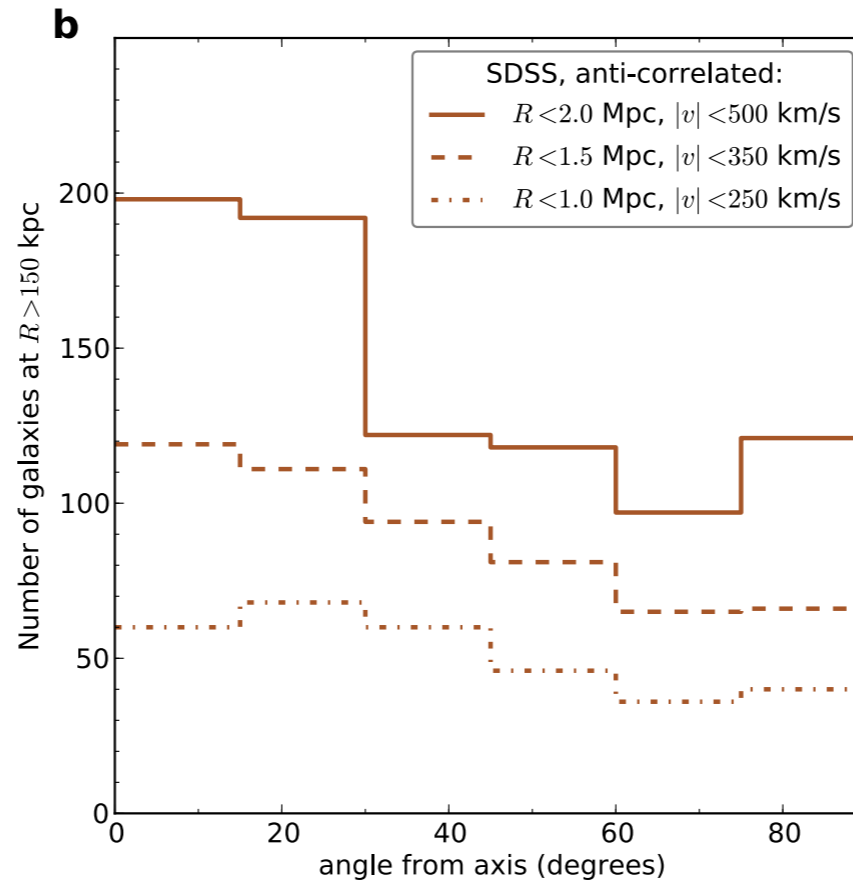
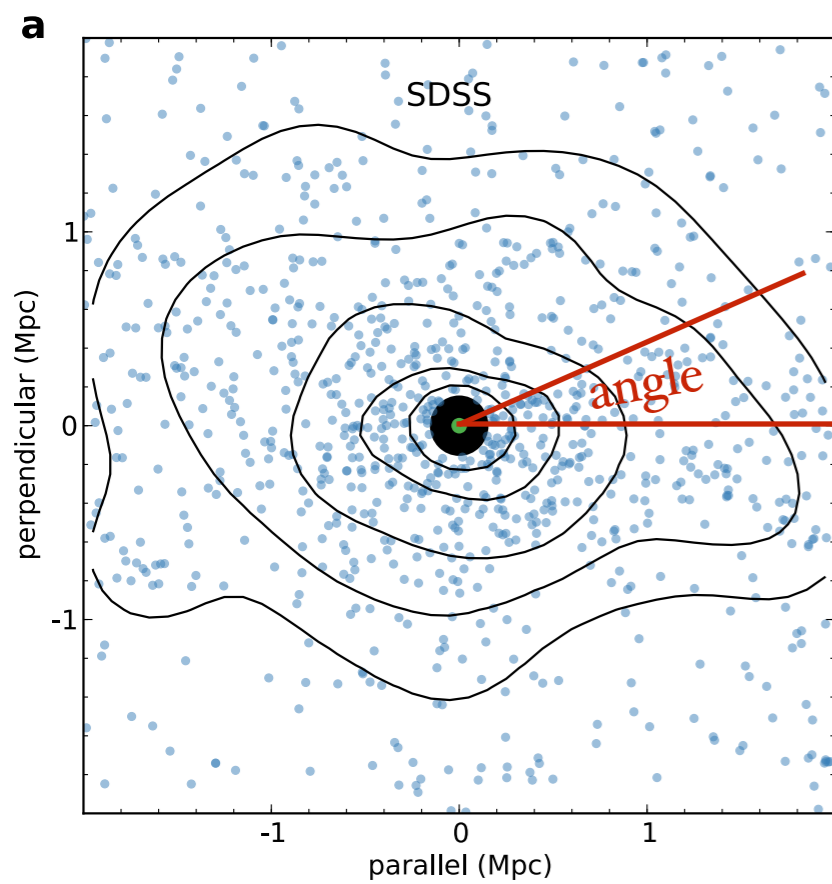
0 10 20 30  
tolerance angle (degrees)

0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0  
fraction of satellites in planar structure





# L'environnement à grande échelle autour des alignements



- Paires anti-corrélées dans relevé Sloan ( $\alpha=15^\circ$ , 30 paires):
  - structure à grande échelle allongée le long de l'axe de la paire (7 sigma)
- Paires corrélées dans Sloan et Millennium:
  - aucun alignement significatif

# Conclusions

- Presque toutes les galaxies proches semblent contenir une quantité de masse bien supérieure à celle de la masse visible, mais il reste encore de grandes incertitudes sur l'importance de cette composante invisible et sa distribution.
- Si cette partie de galaxies est constituée de matière noire ("froide"), les galaxies devraient posséder des milliers de satellites. Des solutions ont été proposées pour expliquer pourquoi seulement quelques dizaines de satellites contiennent des étoiles.
- Nous avons constaté que des alignements de satellites autour des galaxies proches sont réels, et de plus nous avons démontré que ces structures sont répandues dans l'Univers proche. Cela signifie qu'une fraction significative de petites galaxies ne se sont pas formées de façon indépendante.
- Ces corrélations spatiales et cinématiques n'apparaissent pas (encore) dans les simulations cosmologiques. Il est donc possible qu'il nous manque un ingrédient physique dans ces simulations.