

Amas globulaires dans les galaxies naines comme sondes de la matière noire

Stagiaire: Maxime ASSUÉRUS

Tuteur : Pierre BOLDRINI

Observatoire de Paris - LIRA (Laboratoire d'instrumentation et de recherche en astrophysique)

Stage de M2
16 Mars - 10 Juillet 2026



Observatoire
de Paris



Plan

1. *Motivation : Timing problem des amas globulaires dans les galaxies naines*
2. *Mesure des formes de halo des galaxies naines dans la simulation cosmologique TNG50*
3. *Etude théorique/numérique du déclin orbital des amas*
4. *Comparaison avec la littérature*



1. Motivation : Timing problem des amas globulaires dans les galaxies naines

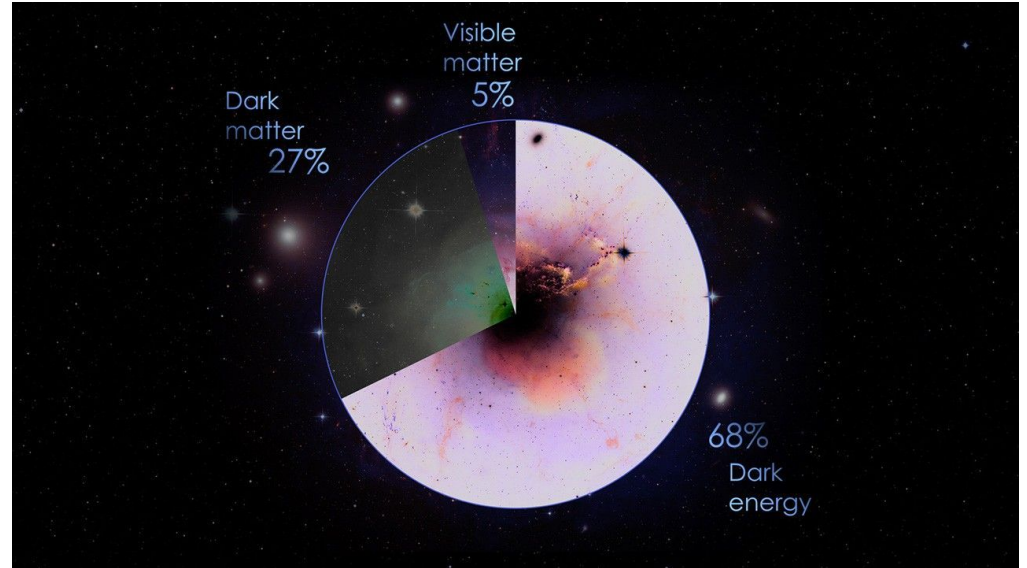


Matière noire ?

- Modèle standard cosmologique Λ CDM : succès à large échelle ($> \text{Mpc}$)
- Modèle incomplet et tensions aux échelles galactiques (1-100 kpc)



Exemple : “Timing problem” des amas globulaires dans les galaxies naines



Modèle standard cosmologique Λ CDM

Amas globulaires de galaxies naines comme sondes de la matière noire

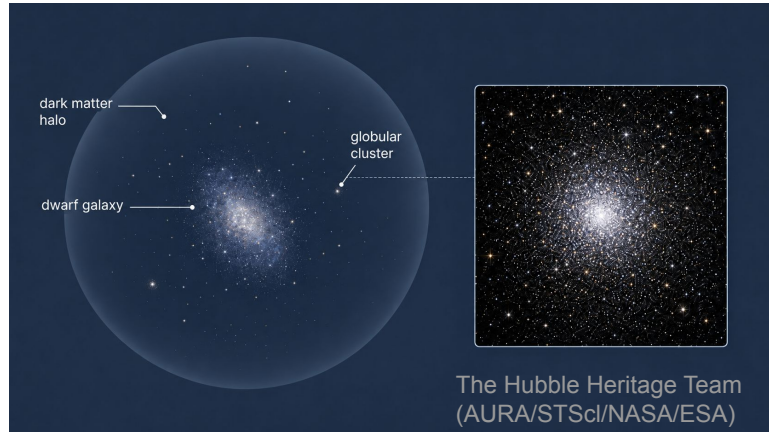
Amas globulaire = système compact d'étoiles liées gravitationnellement 10^5 - $10^6 M_{\odot}$ avec un temps de vie de ~ 10 Gyr $\rightarrow$ mesure de l'âge de l'Univers

Galaxie naine : $10^9 M_{\odot}$ dominée par la matière noire

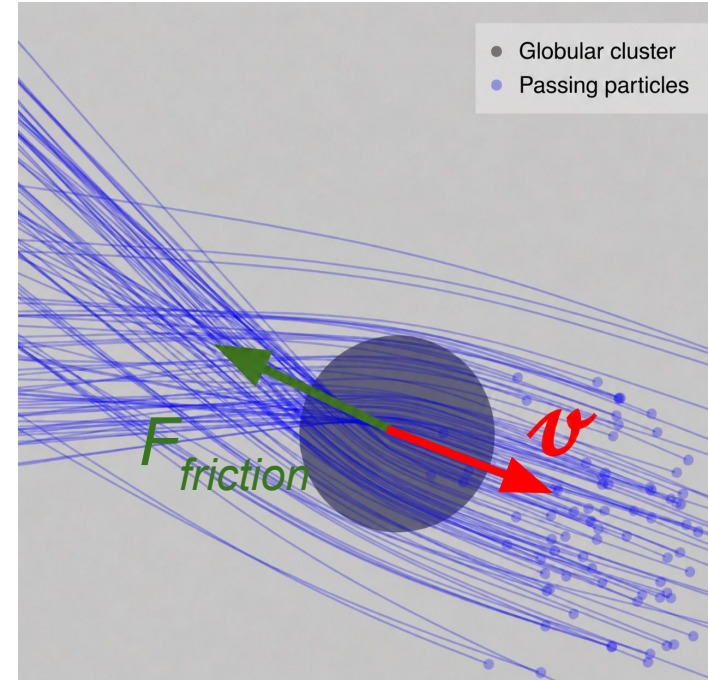
$\simeq 4$ -5 amas par galaxie naine, 200 pour la Voie Lactée

Amas soumis à 2 forces :

- Attraction gravitationnelle
- **Friction dynamique** (étoiles + matière noire)



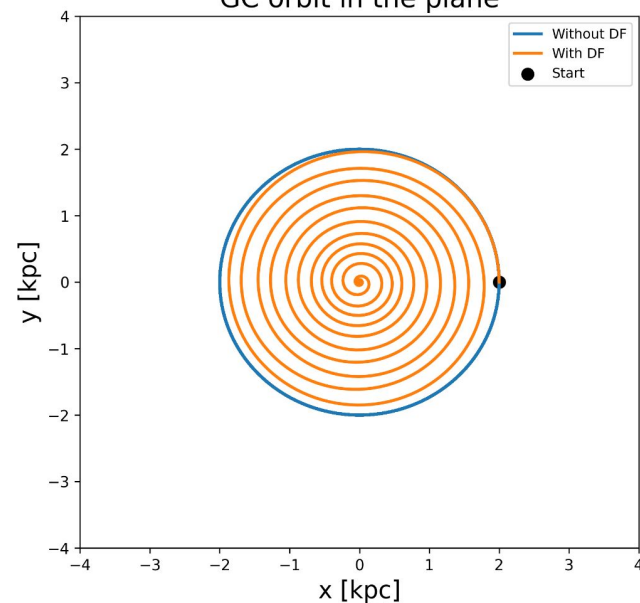
Kipper et al. 2020



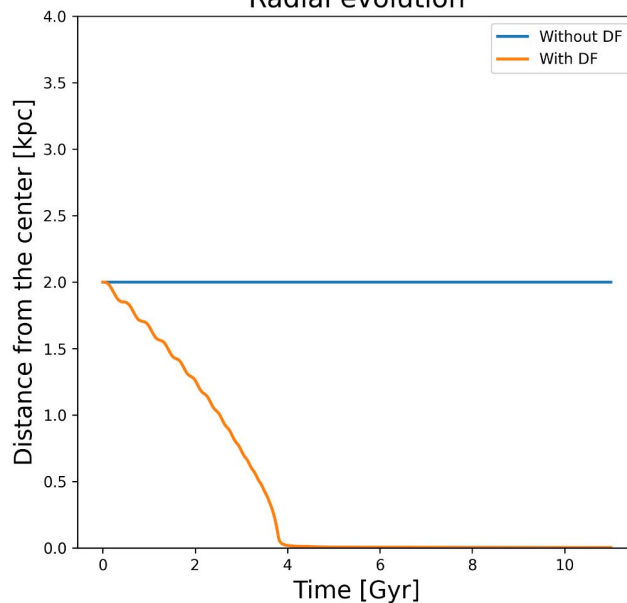
Freinage par friction
dynamique

Friction dynamique

GC orbit in the plane



Radial evolution



- Mécanisme de perte d'énergie
- Astre M_{obj} orbitant dans un champ de particules $m_{\star}$ avec $M_{obj} \gg m_{\star}$

$$\vec{F}_{DF} \propto -\frac{M_{obj}^2 \rho(r)}{v^3} \vec{v}$$

Orbite d'un amas globulaire de $10^6 M_{\odot}$ dans un halo de matière noire de $10^9 M_{\odot}$

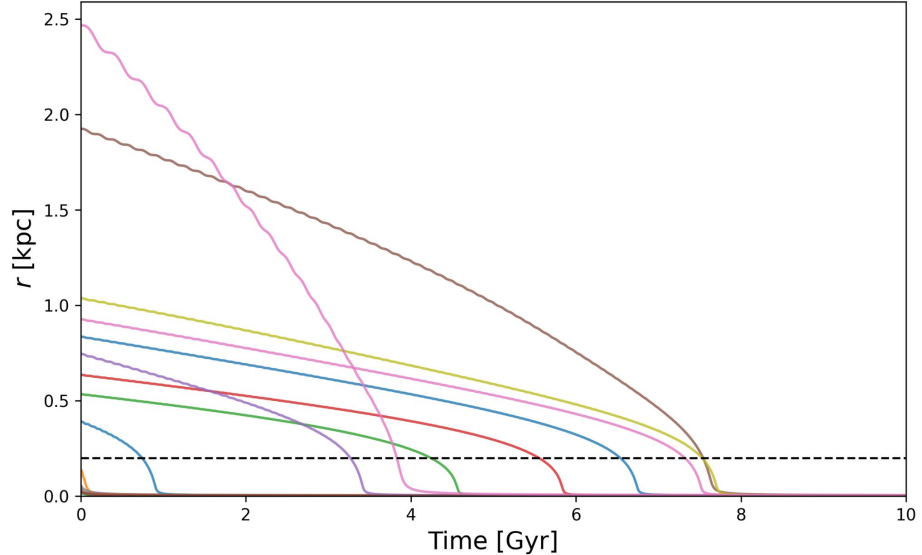
La friction dynamique fait chuter l'amas vers le centre de la galaxie naine

Timing problem : Données *Euclid*



Télescope spatial *Euclid* :

- Etude de la matière noire et de l'énergie noire
- Données sur 500 000 amas globulaires dans 100 000 galaxies naines proches



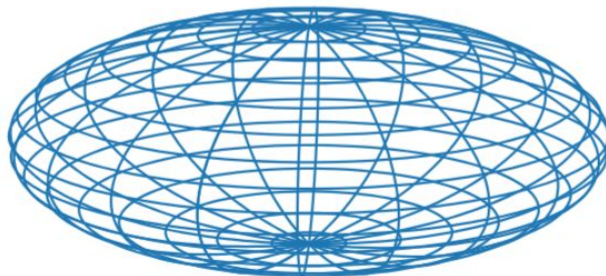
Orbites de 17 amas globulaires dans des galaxies naines (amas de galaxies Fornax et Persée)

Malgré la friction, *Euclid* observe des amas relativement loin du centre des galaxies naines

Contexte et Méthodologie

“Timing problem” : Les amas observés sont loin du centre de la galaxie malgré la friction ! Pourquoi ?

Objectif scientifique : Étudier l’effet de la forme du potentiel de matière noire sur les orbites et les temps de chute



Potentiel elliptique

1. Simulations cosmologiques

- Mesure de l’ellipticité des potentiels avec *Cosmic Profiles* dans Illustris-TNG

2. Dynamique orbitale

- Intégrations d’orbites avec *galpy*
- Potentiels sphériques vs elliptiques

Pipeline *Python* : intégrations d’orbites et analyse de halos

2. Mesure des formes de halo de galaxies naines dans la simulation cosmologique TNG50

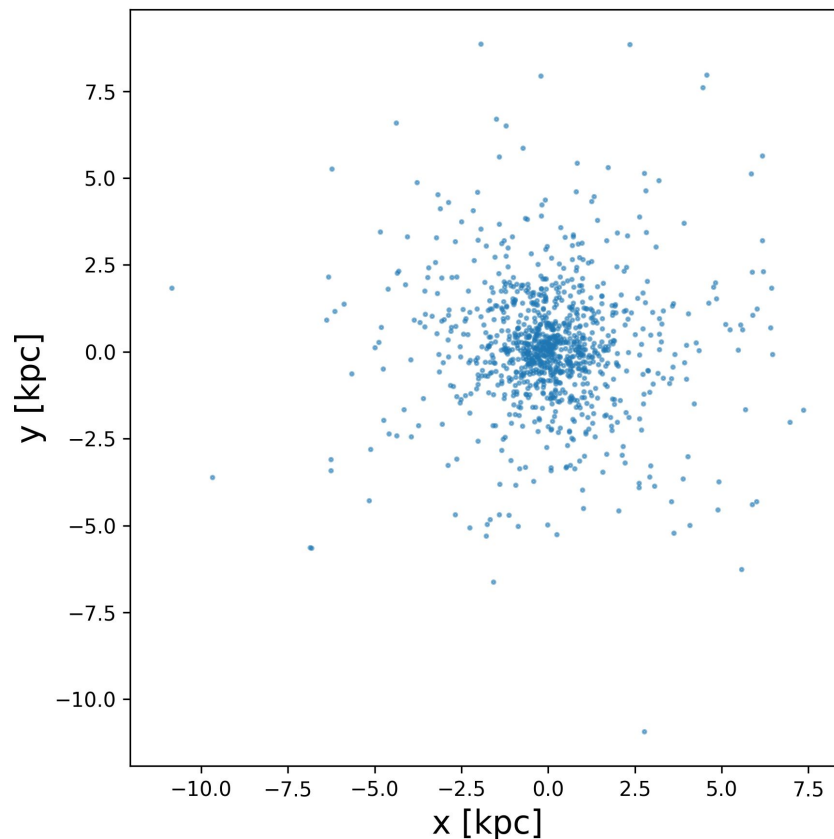
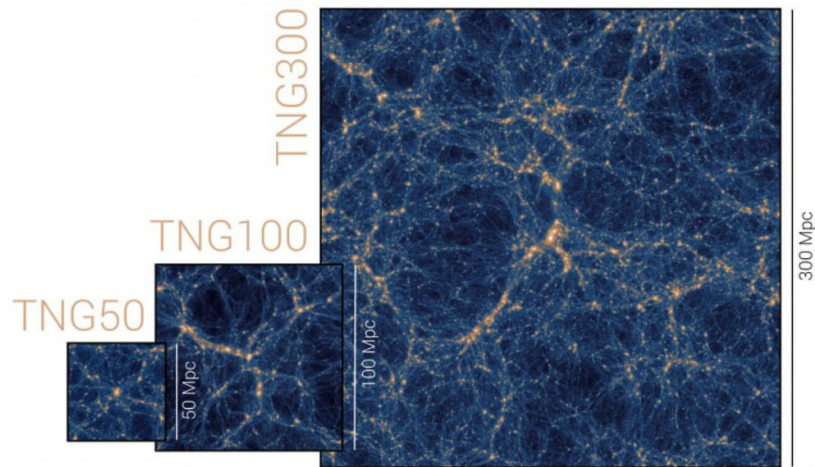


Simulation cosmologique Illustris TNG50

Mesure de la forme de la distribution des
particules de matière noire des galaxies
naines dans TNG50 ($z = 0$)

Résolution :

$$m_{\text{DM}} = 4.5 \times 10^5 M_{\odot}$$



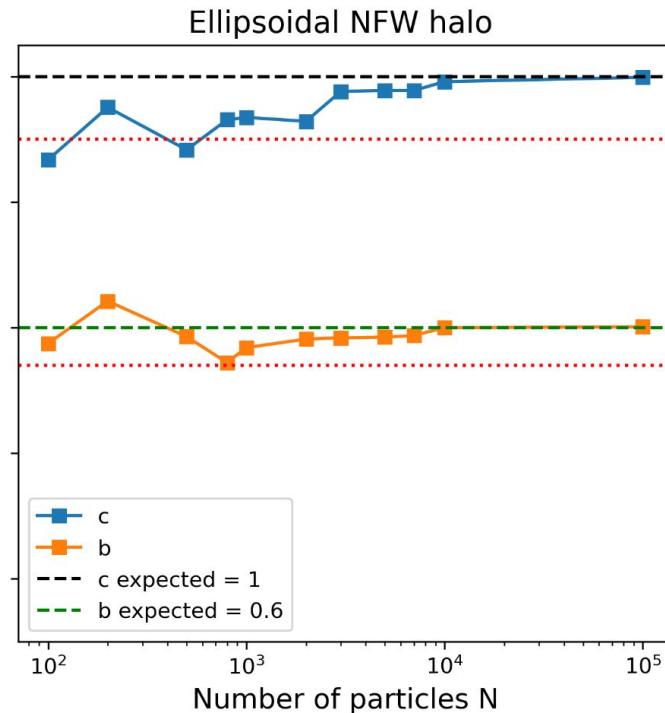
Quelle est la géométrie des halos de galaxies naines réalistes ?

Validation de la méthode de mesure *Cosmic Profiles*

Potentiel NFW (elliptique) ➡ Génération de particules ➡ Mesure de la forme ➡ Comparaison avec ce qui est attendu

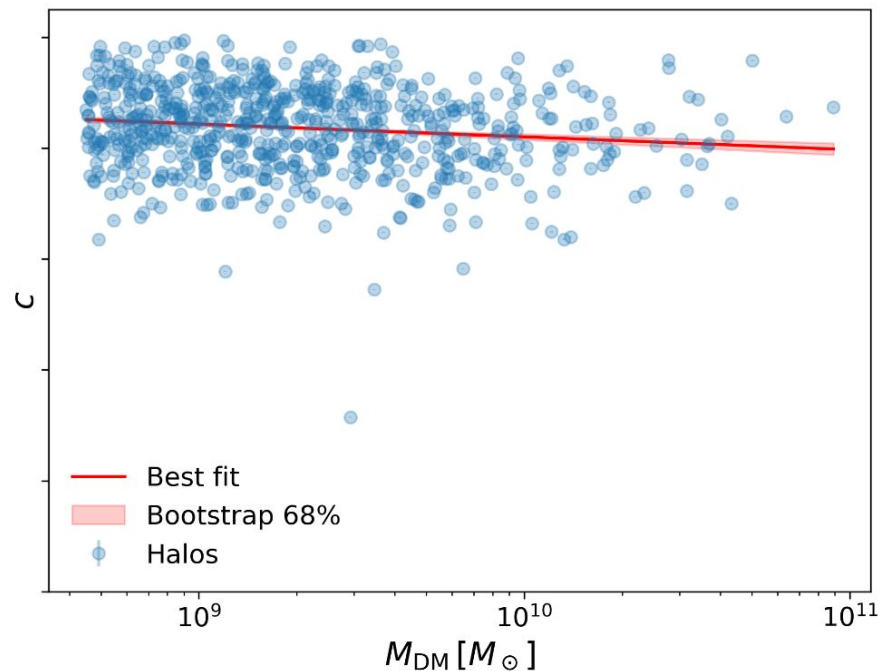
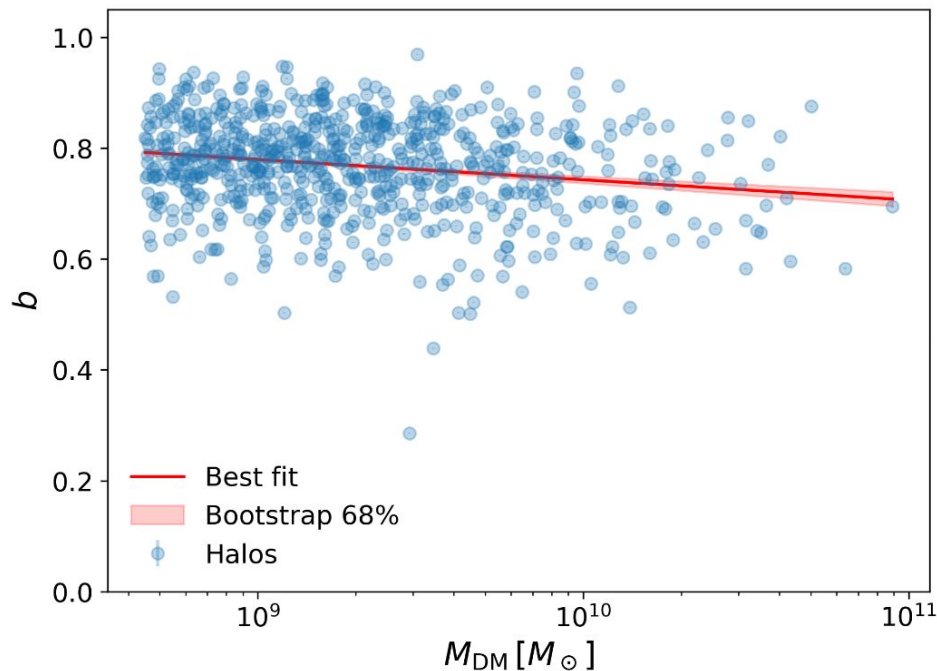
b = petit axe / grand axe ($b \sim 0.6$)

c = axe intermédiaire / grand axe ($c \sim 1$)



On sélectionne les halos de TNG50 avec $N > 1000$ particules

Forme de 700 halos de galaxies naines - Bootstrap sampling



$b \sim 0.75$
 $c \sim 0.85$

- Faible dépendance avec M_{halo}
- Dispersion importante des géométries

Halos triaxiaux !

3. Etude théorique/numérique du déclin orbital des amas



Intégration d'orbites avec galpy

I. Fixer les composantes

- **Halo de matière noire** (masse $M_{\text{halo}} = 10^9 M_{\odot}$, rayon d'échelle r_s)
- **Amas globulaire** (masse $M_{\text{obj}} = 10^6 M_{\odot}$, rayon de demi-masse $r_{hm} = 10 \text{ pc}$)

II. Fixer les conditions initiales

$$v_{T,0} = v_{\text{circ,sph}}(R_0)$$

III. Intégration d'orbites

Dans le halo de matière noire + Friction dynamique sur 10 Gyr

IV. Calcul du temps de chute des amas

Trouver le temps pour lequel l'amas a son dernier apocentre $< 200 \text{ pc}$

Potentiel de matière noire sphérique vs elliptique

$$\rho(r) \propto \frac{1}{(r/r_s)(1 + r/r_s)^2}$$

Potentiel Sphérique NFW

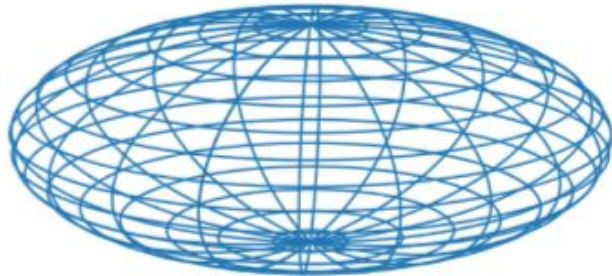
$r \rightarrow m$



$$\rho(m) \propto \frac{1}{(m/r_s)(1 + m/r_s)^2}$$

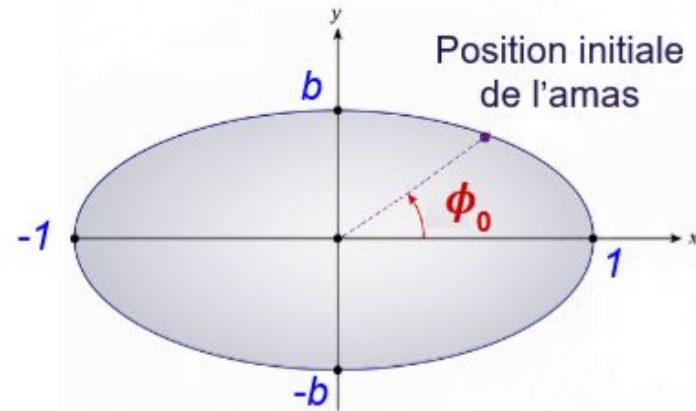
Potentiel elliptique

$$m^2 = x'^2 + \frac{y'^2}{b^2} + \frac{z'^2}{c^2}$$



Potentiel elliptique

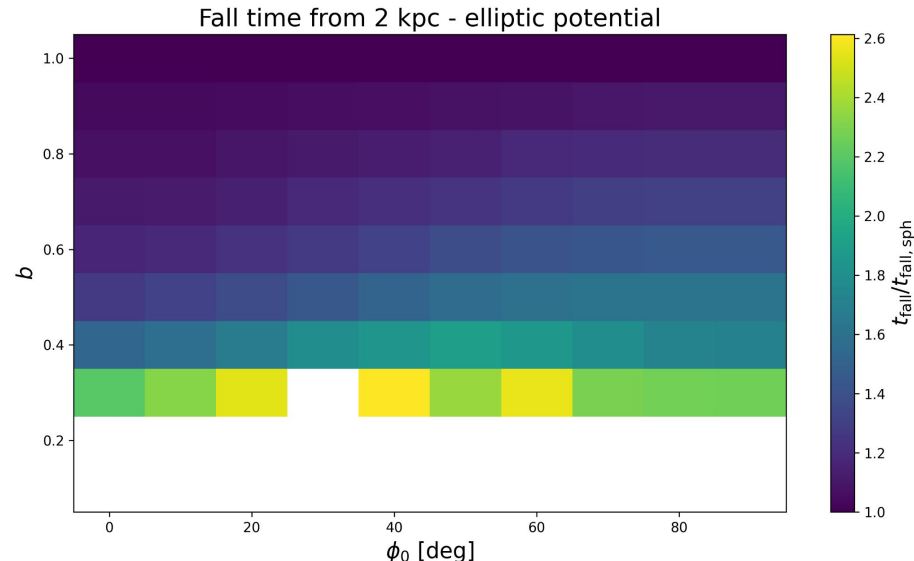
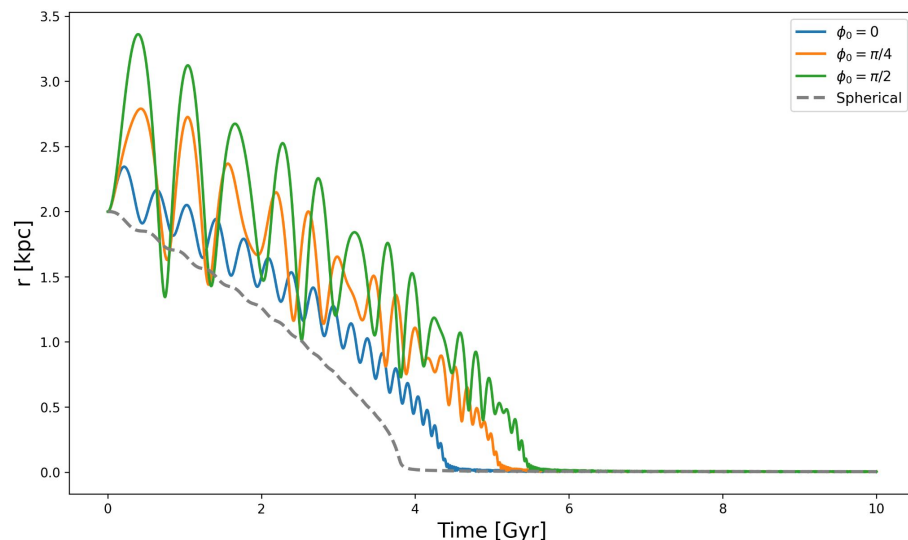
Paramètres libres
 (b, ϕ_0)



Intégration d'orbites et temps de chute

Amas situé à **2 kpc** du centre de la galaxie naine tombe à cause de la friction dans un potentiel **elliptique** $b = 0.6$

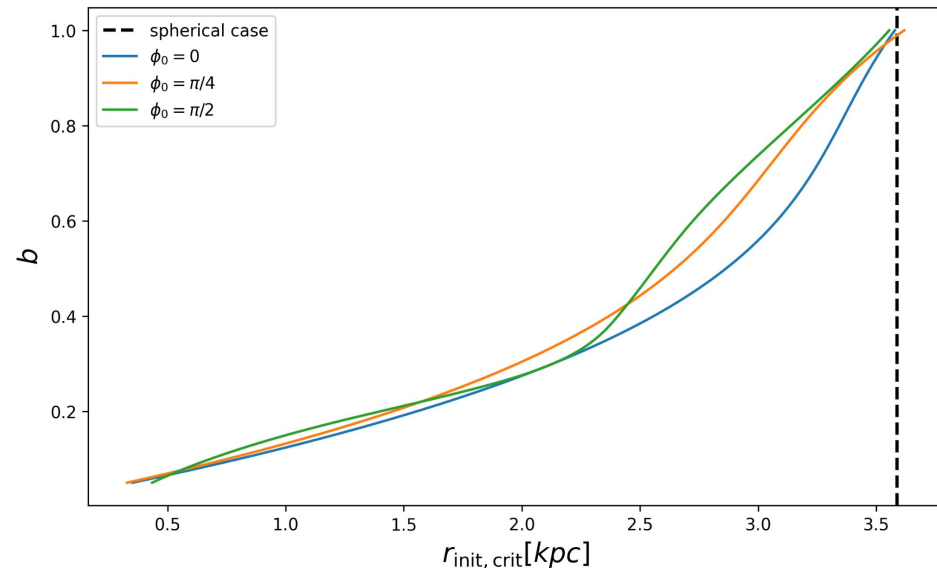
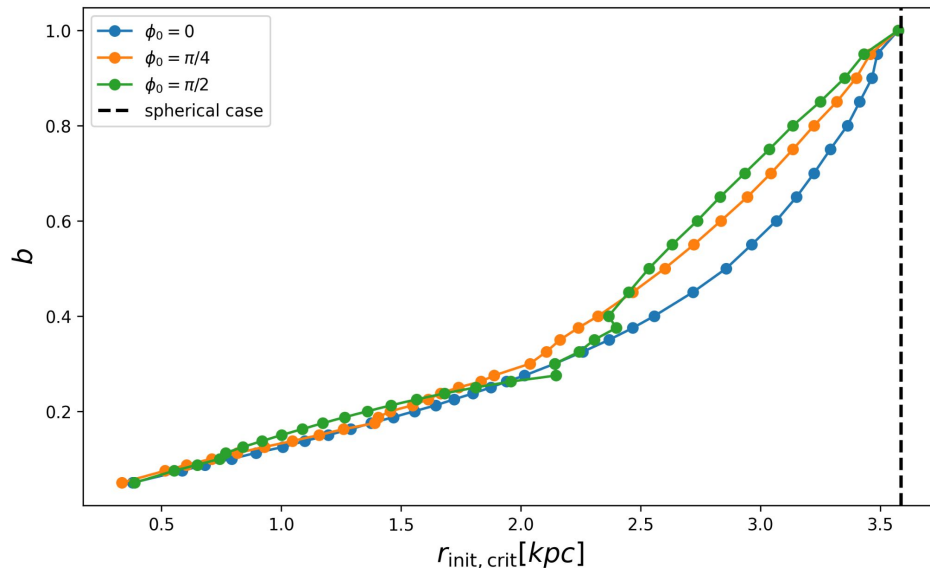
Temps de chute supérieur par rapport au cas sphérique sur **10 Gyr** !



$\vec{F}_{\text{friction}} \propto$ densité locale de matière noire de la galaxie

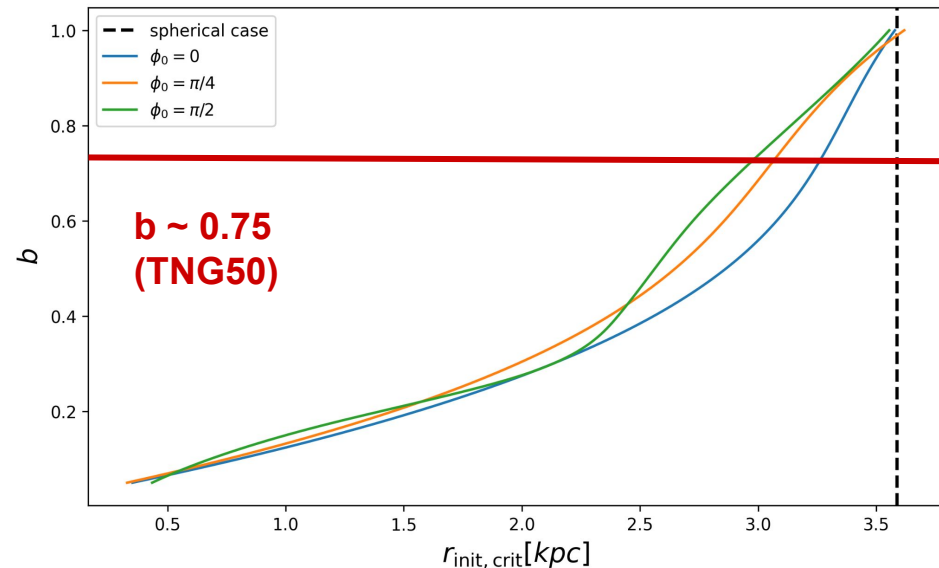
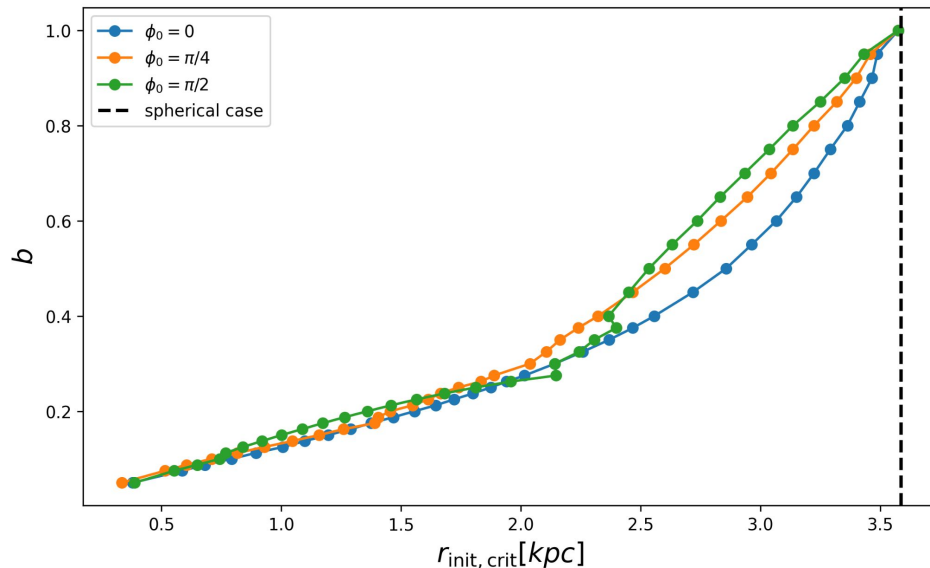
La forme du halo de matière noire peut multiplier par 2 le temps de chute de l'amas

Rayon initial maximal pour un temps de chute en 10 Gyr



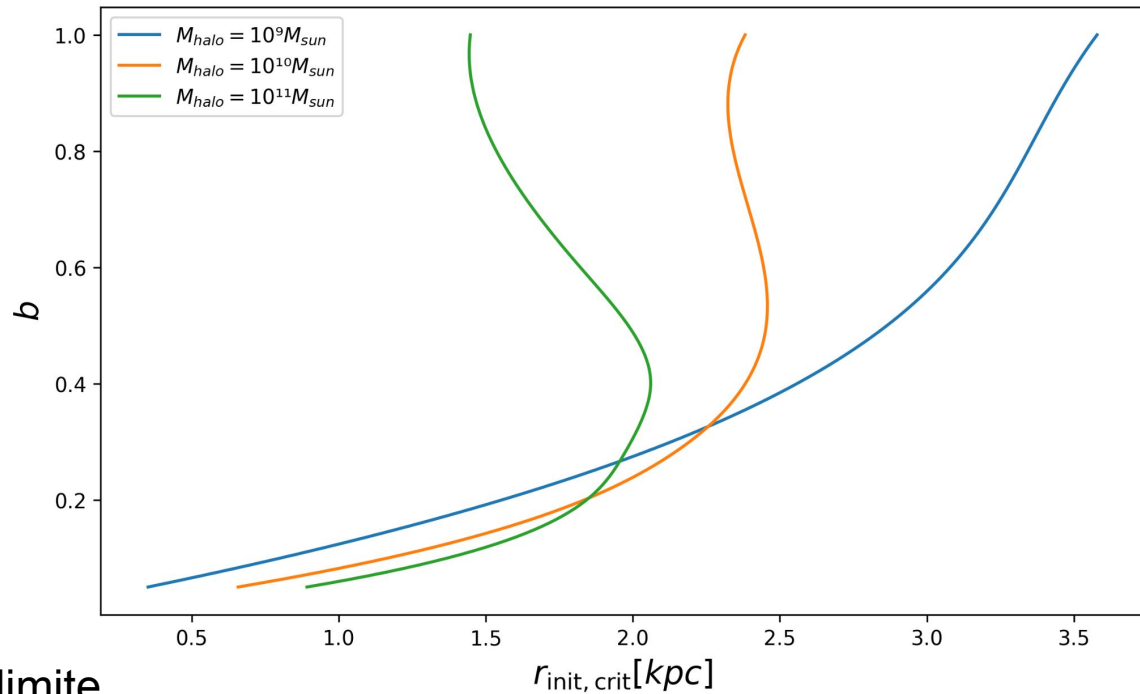
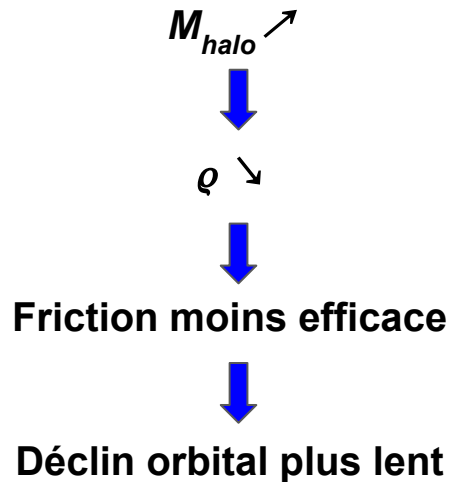
La forme du halo de matière noire et la position initiale affectent le déclin orbital des amas

Rayon initial maximal pour un temps de chute en 10 Gyr



La forme du halo de matière noire et la position initiale affectent le déclin orbital des amas

Influence de la masse du halo de matière noire



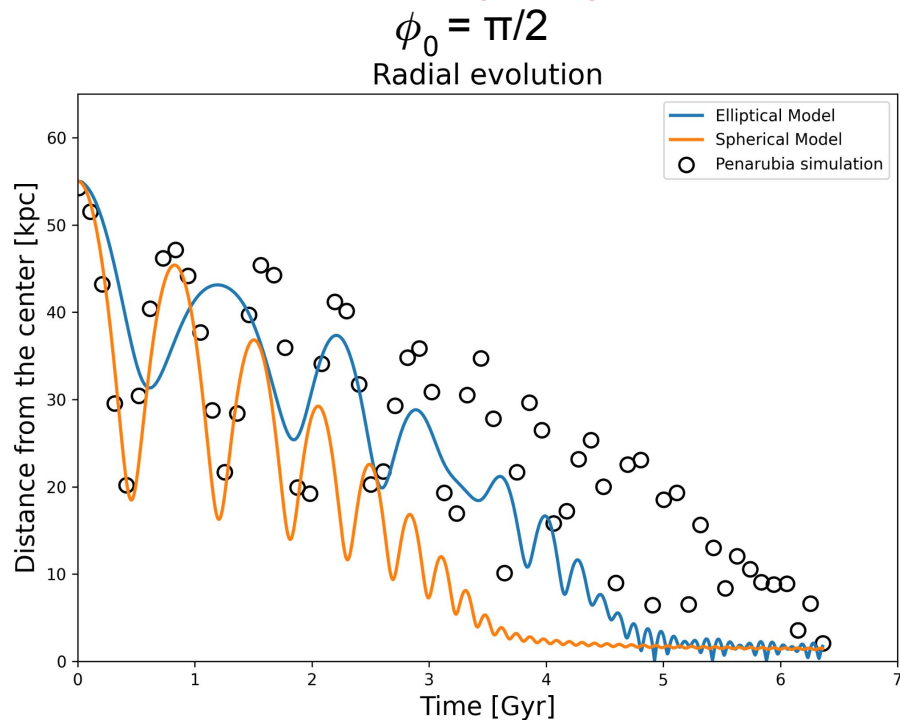
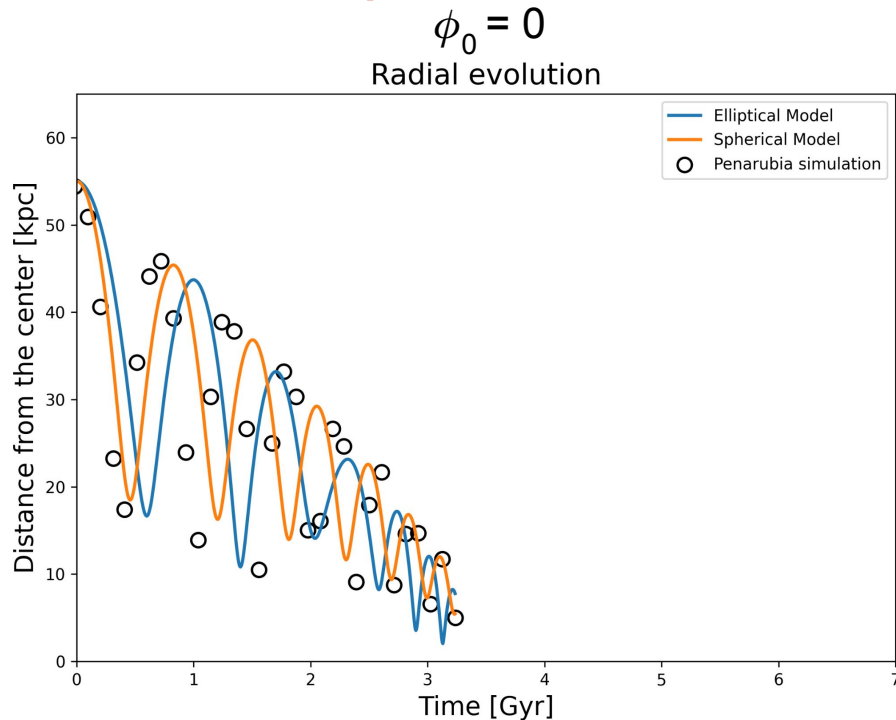
Cas $10^{11} M_{\odot}$ intéressant mais cas limite

Le déclin orbital est moins efficace pour un halo massif !

4. Comparaison avec la littérature



Comparaison avec le déclin orbital de Peñarrubia et al. (2004)

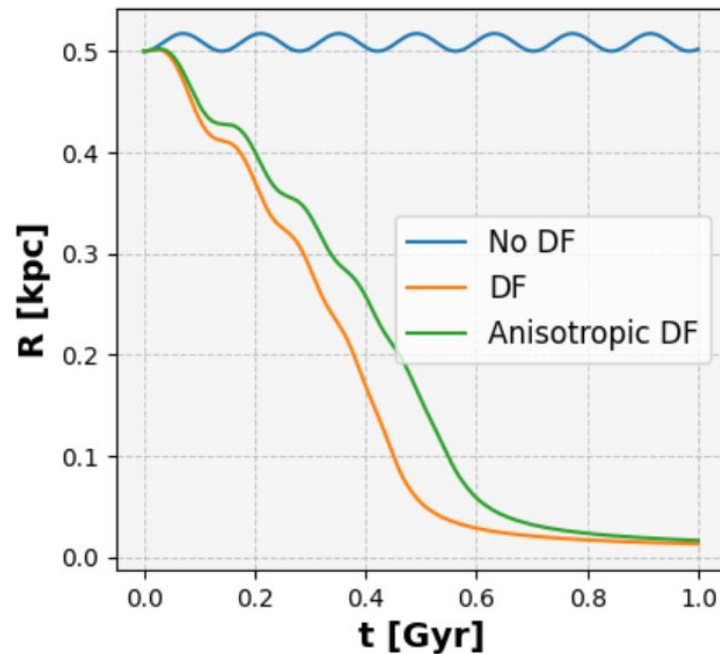
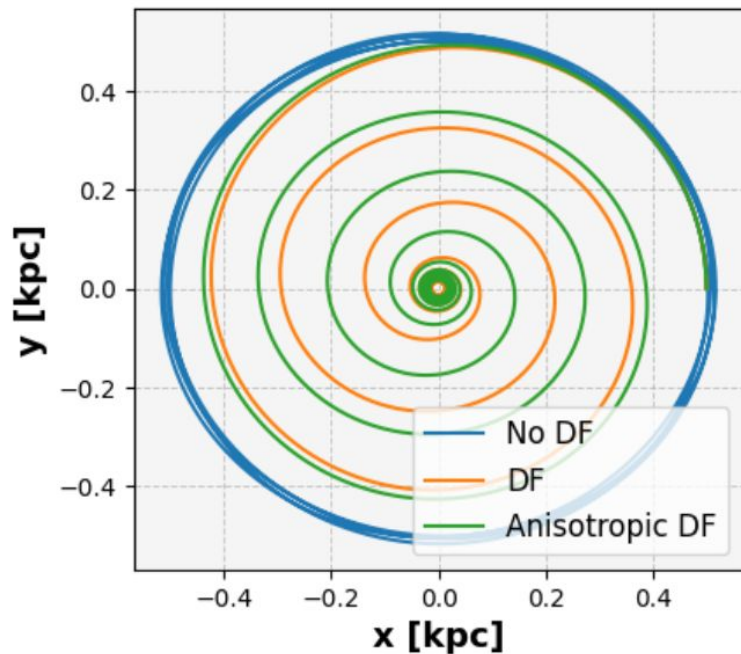


- Comportement général retrouvé : $t_{fall} \nearrow$ lorsque $\phi_0 \rightarrow \pi/2$
- Déviation observée : signe d'une mauvaise modélisation de la friction ?

Implémentation d'une friction dynamique anisotropique dans *galpy*

Friction dynamique anisotrope

Dynamical Friction in NFW halo



Dispersion des vitesses des particules du fond galactique : $\sigma_z \neq \sigma_R$ (en cylindrique)
→ Modifie la forme de la force de friction !

Conclusion

- Le **déclin orbital** des amas globulaires dans les galaxies naines peut être ralenti selon 2 paramètres :
 - **l'aplatissement** du potentiel de matière noire **b**
 - **la position initiale** de l'amas contrôlée par **ϕ_0**
- Simulation cosmologique TNG50 : halos **triaxiaux** avec **$b \sim 0.75$ et $c \sim 0.85$**
- **Nouvelles contributions** : Nouvelle classe *galpy* pour modéliser la friction dynamique anisotrope
- **Perspectives** :
 - Données *Euclid* pour tester l'aplatissement des halos
 - Combinaison de halos aplatis avec une théorie alternative à Λ CDM : *fuzzy dark matter*

Suite de mon parcours

- Ecriture d'un article avec Pierre BOLDRINI sur les résultats du stage
- Poursuite en **thèse** à l'Institut d'Astrophysique de Paris avec Gary MAMON

Sujet : Une recherche approfondie de trous noirs dans les amas globulaires



Vue d'artiste d'un trou noir intermédiaire
B. Kiziltan/T. Karacan.

Annexes

Comparaison avec la littérature - Peñarrubia et al. (2004)

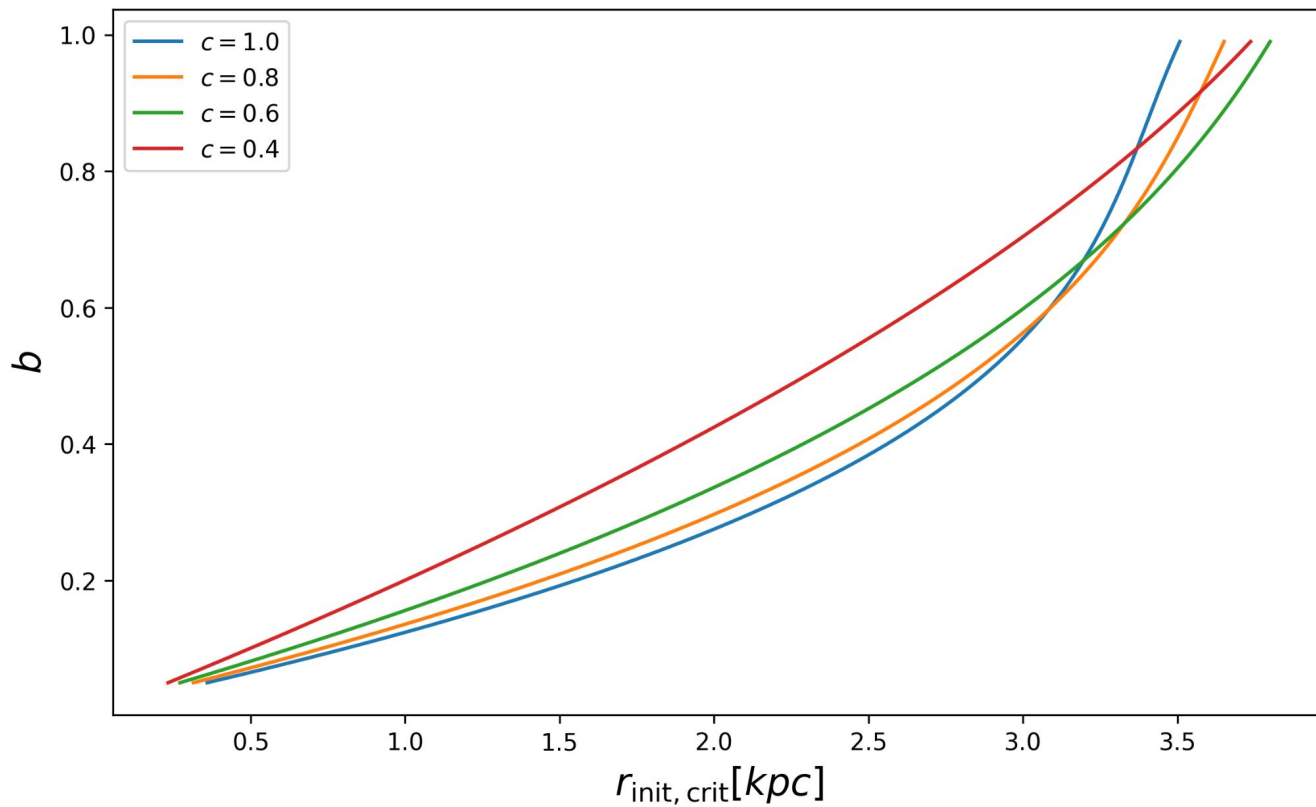
$$\rho(x, y, z) = \frac{M_{\text{halo}}}{A_{\text{NFW}} 4\pi r_s^3} \frac{1}{(m/r_s)^\alpha (1 + m/r_s)^{\beta-\alpha}}$$

$$m^2 = x'^2 + \frac{y'^2}{b^2} + \frac{z'^2}{c^2}$$

DM Halo	Symbol	Value
Peñarrubia 04	M_h	$7.84 \times 10^{11} M_\odot$
	q_h	0.60
	γ	3.5 kpc
Our study	M_{halo}	$7.84 \times 10^{11} M_\odot$
	r_s	7.70 kpc
	b	0.6
	c	1.0
	α	0.0
	β	3.0

Satellite	Symbol	Value
Peñarrubia 04	M_s	$5.60 \times 10^9 M_\odot$
	r_c	0.67 kpc
	r_t	7.24 kpc
	$\langle r \rangle$	1.64 kpc
Our study	M_s	$5.60 \times 10^9 M_\odot$
	r_{hm}	1.5 kpc

Triaxialité ?



La triaxialité peut être raisonnablement négligée