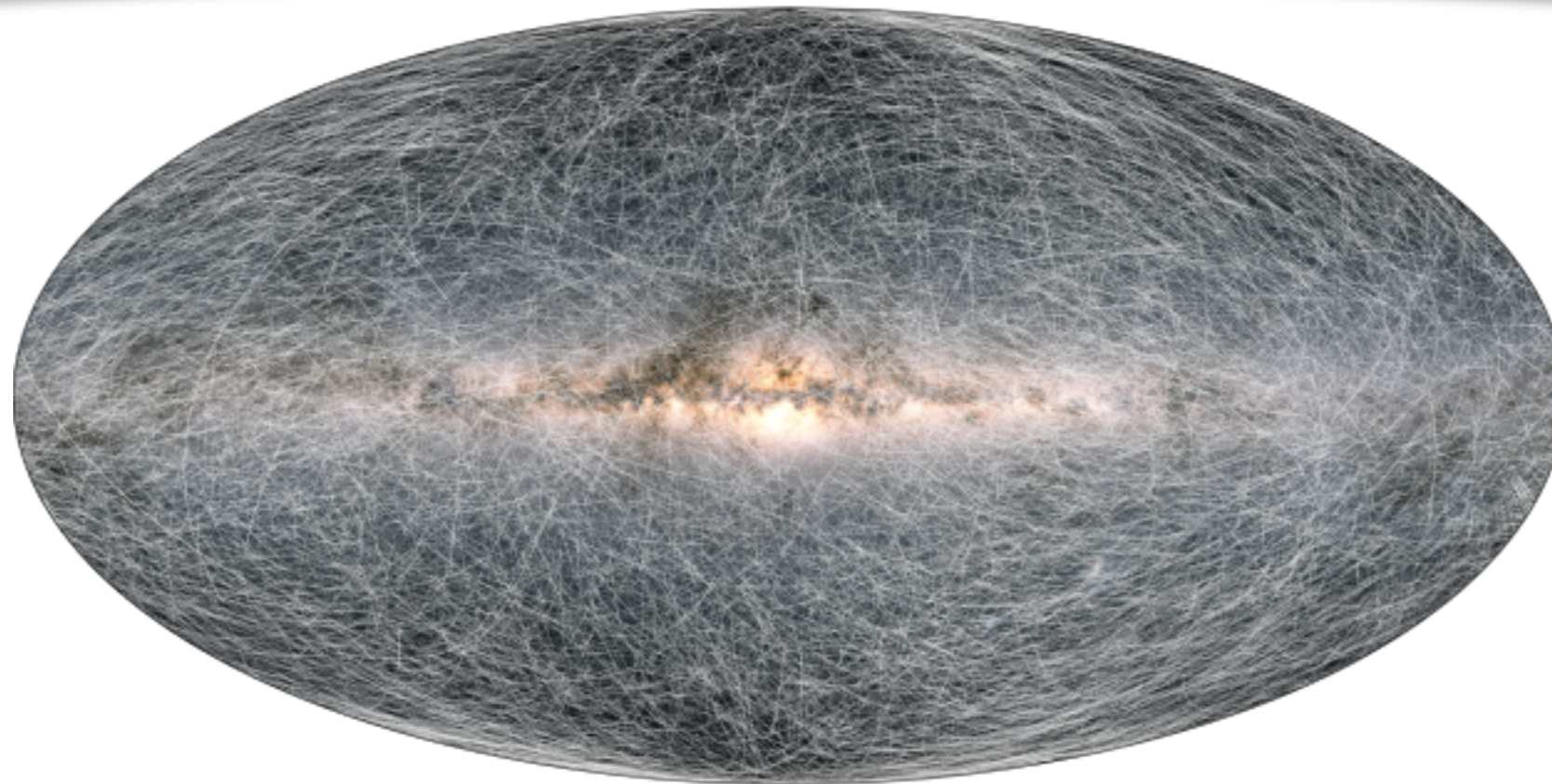


La matière noire dans les amas globulaires de la Voie Lactée à l'ère de Gaia



Pierre Boldrini

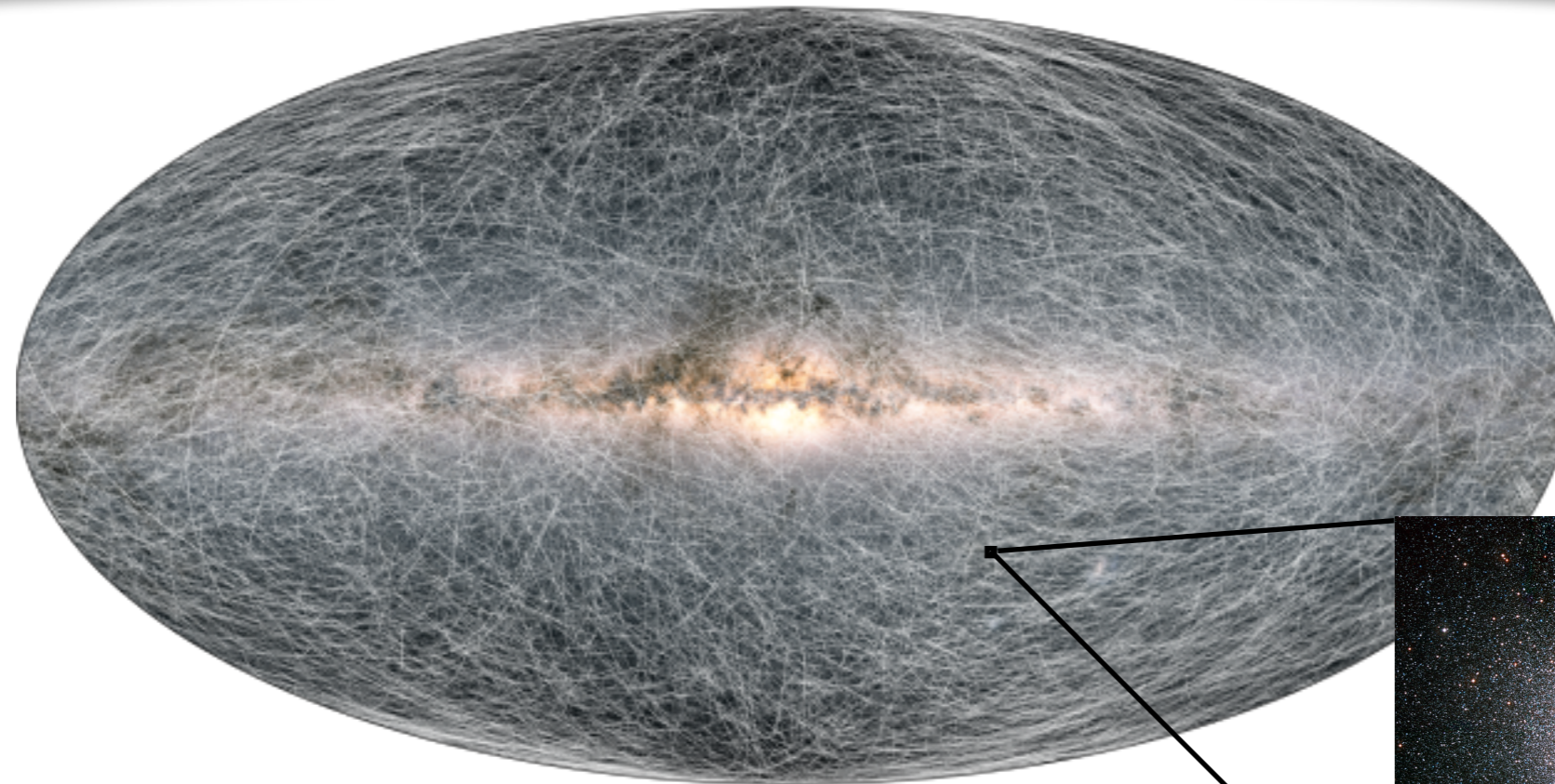
Institut d'Astrophysique de Paris

11 Mai 2021, CNES, Paris



gaia

La matière noire dans les amas globulaires de la Voie Lactée à l'ère de Gaia



Pierre Boldrini
Institut d'Astrophysique de Paris

11 Mai 2021, CNES, Paris



gaia

Parcours académique

Research positions

Institut d'Astrophysique de Paris

Visiting Researcher,

France
2021–Present



Max Planck Institute
for Astrophysics

MPA, Garching

Postdoctoral Researcher, with Prof. Springel,

Germany
2020–2021



Johns Hopkins University, Baltimore

Visiting Researcher, with Prof. Emanuele Berti,

USA
October–November 2019



JOHNS HOPKINS
UNIVERSITY

IPMU, Tokyo

Visiting Researcher, with Prof. Sugiyama,

Japan
March 2018



Institut d'Astrophysique de Paris

PhD student at Sorbonne Université,

France
2017–2020

Education

Institut d'Astrophysique de Paris

○ *PhD in Astrophysics (The cusp-core problem in dwarf galaxies: New solutions),*

Sorbonne Université

Doctoral Advisors: Dr Roya Mohayaee and Prof. Joseph Silk,

France
2017–2020



Ecole Normale Supérieure de Lyon (ENS)

○ *MSc "Physique, concepts et applications",*

France
2014–2017



ENS DE LYON

Publications scientifiques

- *'Absence of obvious tidal tails around the globular cluster NGC 6397,'* ([arXiv:2104.03635](#))
P. Boldrini and Eduardo Vitral, 2021, submitted to MNRAS
- *'Progenitors of loosely bound Galactic globular clusters,'*
P. Boldrini, 2020f, submitted to MNRAS
- *"A dark matter core in M31"*
P. Boldrini, R. Mohayaee, J. Silk, 2020e, Astrophysical Journal (ApJ), accepted, ([arXiv:2002.12192](#))
- *"The origin of the black hole offset in M31,"*
P. Boldrini, 2020d, MNRAS Letters, L137B, ([arXiv:2007.03010](#))
- *"Subhalo sinking and off-center IMBHs in dwarf galaxies,"*
P. Boldrini, R. Mohayaee, J. Silk, 2020c, MNRAS Letters, 495, L12, ([arXiv:2003.02611](#))
- *"Embedding globular clusters in dark matter minihalos solves the cusp-core and timing problems in the Fornax dwarf galaxy,"*
P. Boldrini, R. Mohayaee, J. Silk, 2020b, MNRAS, 492, 3169, ([arXiv:1909.07404](#))
- *"Cusp-to-core transition in low-mass dwarf galaxies induced by dynamical heating of cold dark matter by primordial black holes,"*
P. Boldrini, Y. Miki, A. Wagner, R. Mohayaee, J. Silk, A. Arbey, 2020a, MNRAS, 492, 5218, ([arXiv:1909.07395](#))
- *"Fornax globular cluster distributions: implications for the cusp-core problem,"*
P. Boldrini, R. Mohayaee, J. Silk, 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS), 485, 2546, ([arXiv:1903.00354](#))

Travaux récents

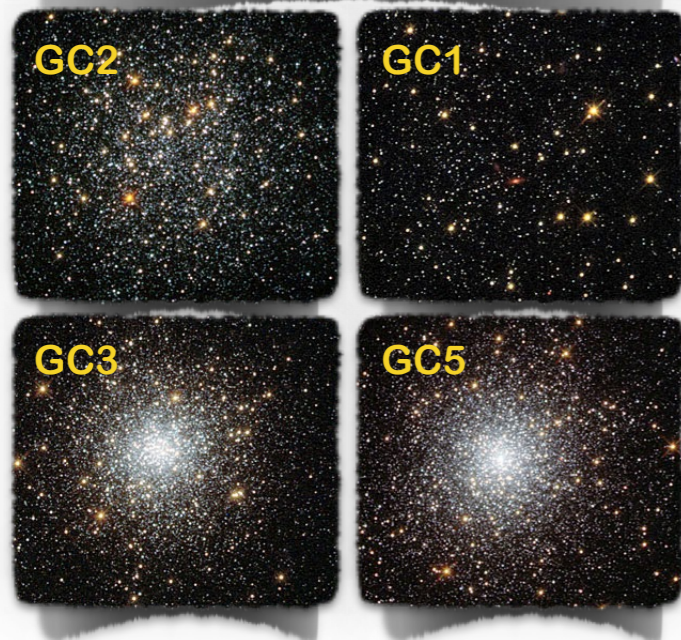
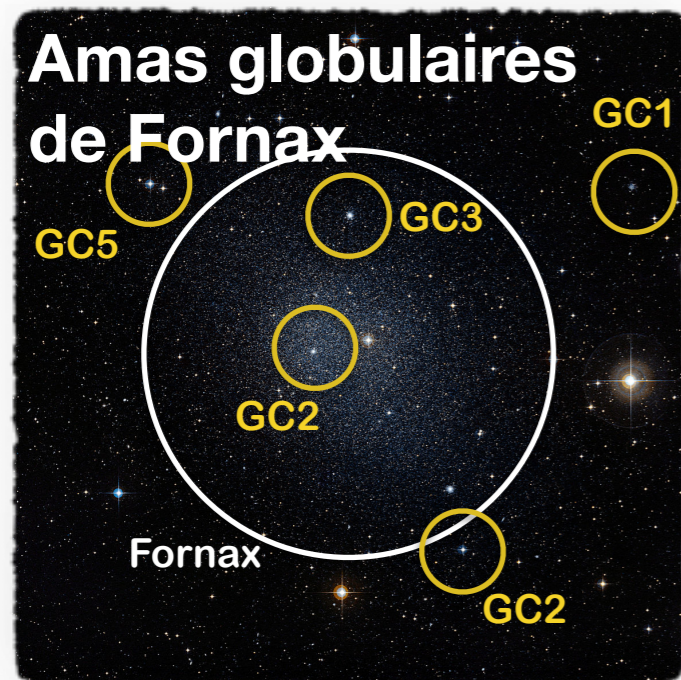
Travaux de thèse

8 publications en premier auteur dans des revues de rang A

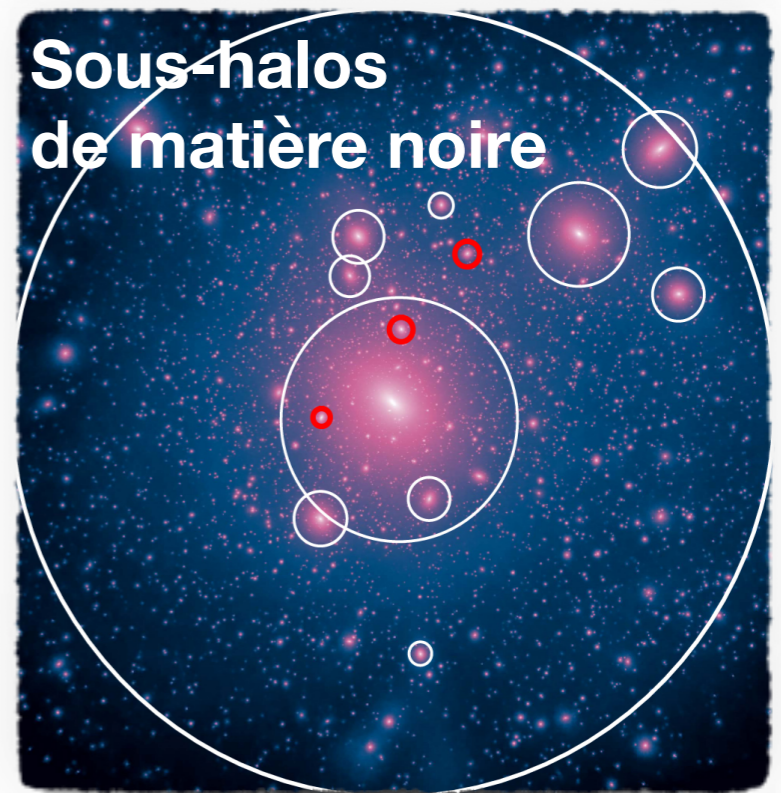
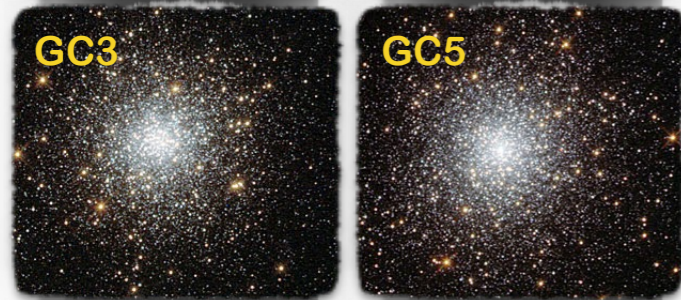
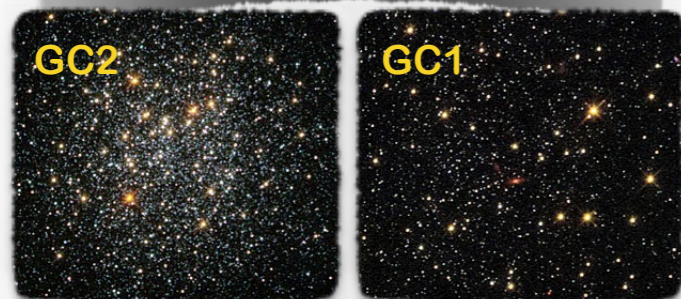
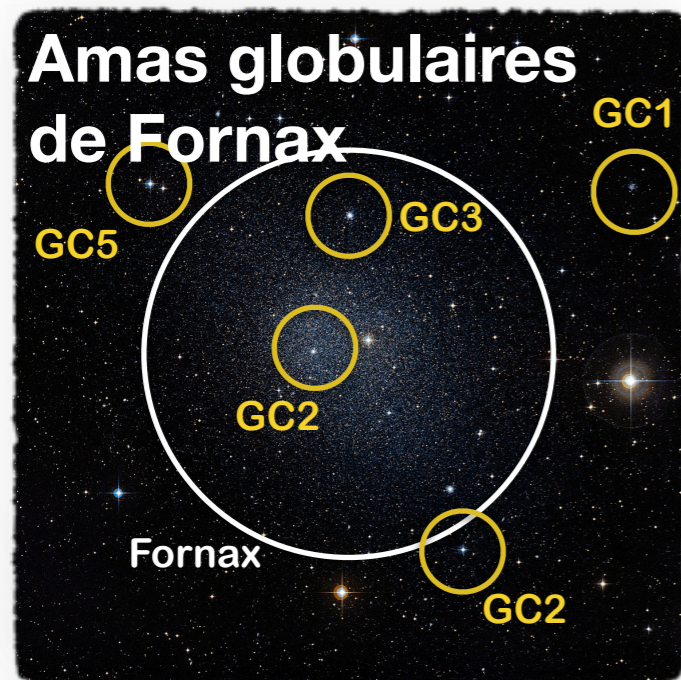
Travaux de thèse



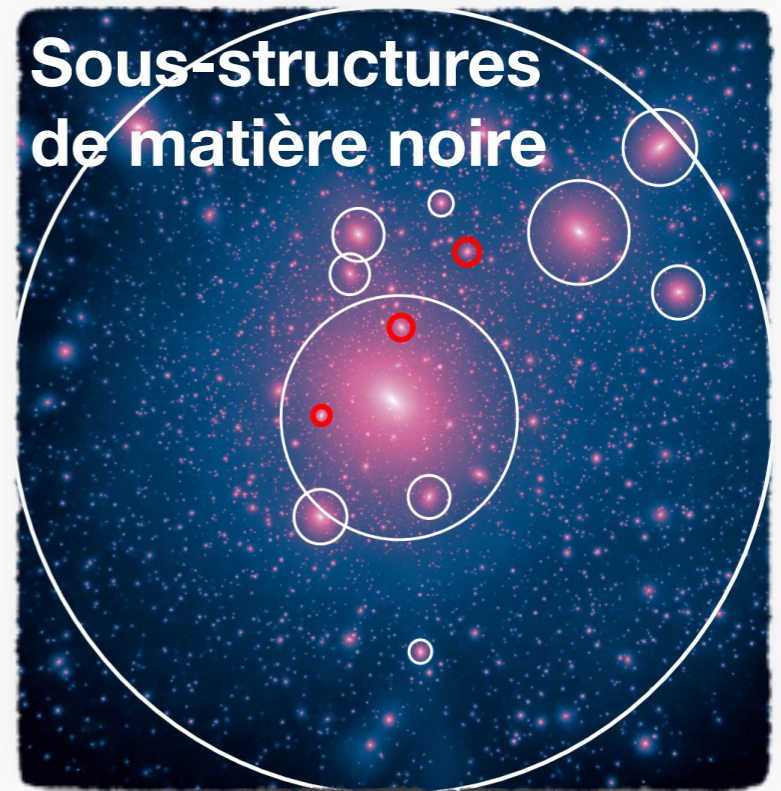
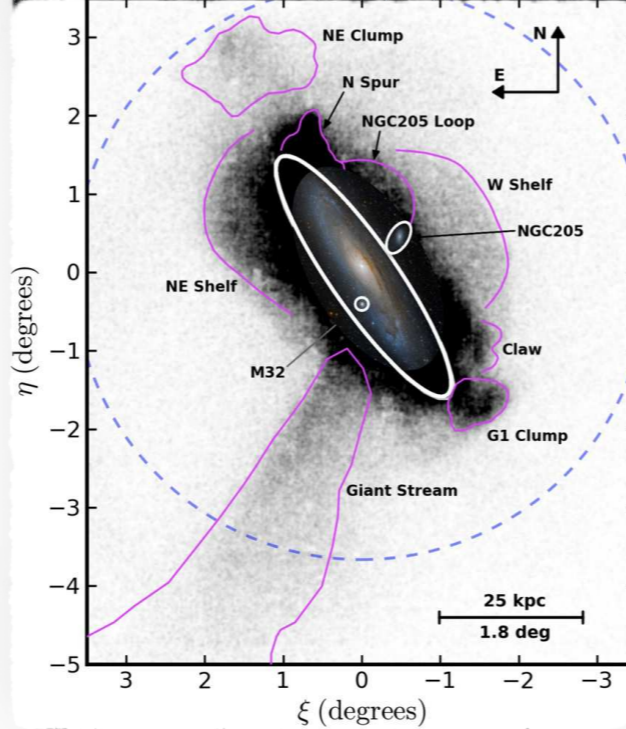
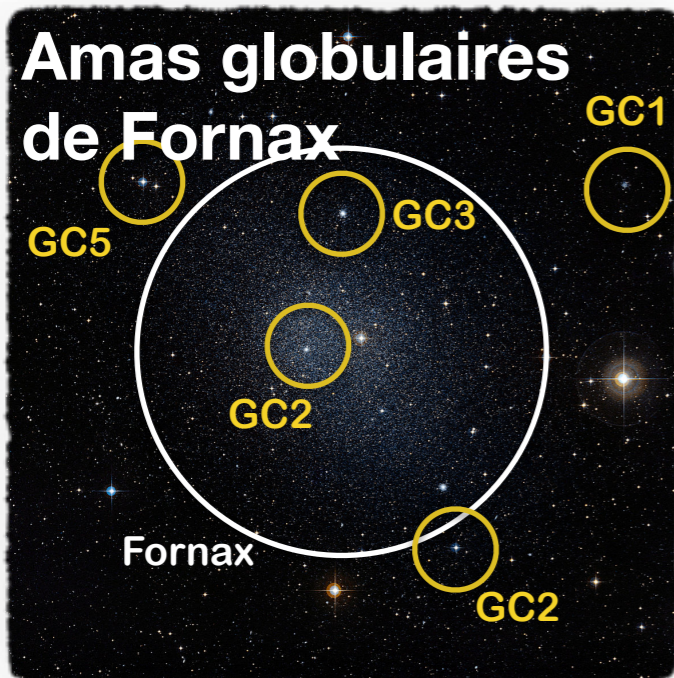
Travaux de thèse



Travaux de thèse



Travaux de thèse



Simulations numériques

- **Simulations N-corps avec GPUs de dernière génération**

Code N-corps
sans collisions

+



Carte
Graphique

=

Gravitational
Oct-
Tree code accelerated by
Hierarchical time step
Controlling

[Miki et al. \(2017\)](#)



Réduire considérablement le temps de calcul



**Simuler à très haute résolution
(100 Millions de particules)**

Travaux récents



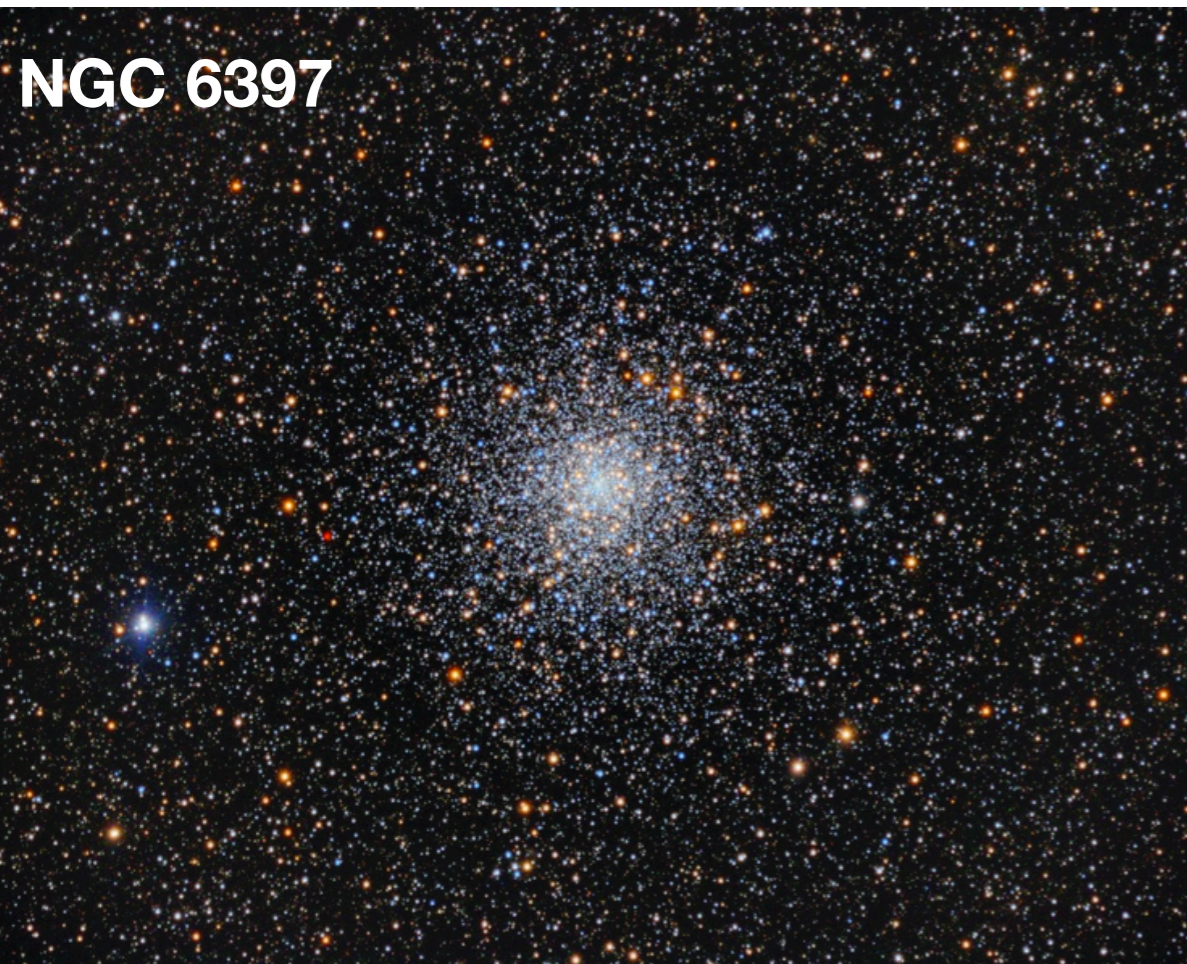
GAIA EARLY DATA RELEASE 3 (GAIA EDR3)

Travaux récents



GAIA EARLY DATA RELEASE 3 (GAIA EDR3)

- **Absence de bras de marées dans NGC 6397**



Boldrini & Vitral (2021)

Projet de recherche

**Les amas globulaires se sont-ils formés
dans des halos de matière noire?**

Projet de recherche

Les amas globulaires se sont-ils formés dans des halos de matière noire?

- Communiqués de presse de l'INSU du CNRS



Accueil > Actualités

De la matière noire dans les amas globulaires ?

R. Ibata

Décembre 2019

RÉSULTAT SCIENTIFIQUE UNIVERS



Accueil > Actualités

La matière noire dans les amas globulaires

P. Boldrini

Janvier 2020

RÉSULTAT SCIENTIFIQUE UNIVERS

L'origine des amas globulaires

Formation des amas globulaires: 2 scénarios

- Nuages de gaz gravitationnellement liés après la recombinaison et se sont formés dans leur galaxie hôte actuelle
- Formés dans des halos de matière noire qui sont accrétés plus tard par leur galaxie hôte actuelle

L'origine des amas globulaires

Formation des amas globulaires: 2 scénarios

- Nuages de gaz gravitationnellement liés dans l'Univers précoce et se sont formés dans leur galaxie hôte actuelle
- Formés dans des halos de matière noire qui sont accrétés plus tard par leur galaxie hôte actuelle

La matière noire dans les amas:

- Pas détectée
- Rapport (matière noire / étoiles) < 1

L'origine des amas globulaires

Formation des amas globulaires: 2 scénarios

- Nuages de gaz gravitationnellement liés dans l'Univers précoce et se sont formés dans leur galaxie hôte actuelle
- Formés dans des halos de matière noire qui sont accrétés plus tard par leur galaxie hôte actuelle

La matière noire dans les amas:

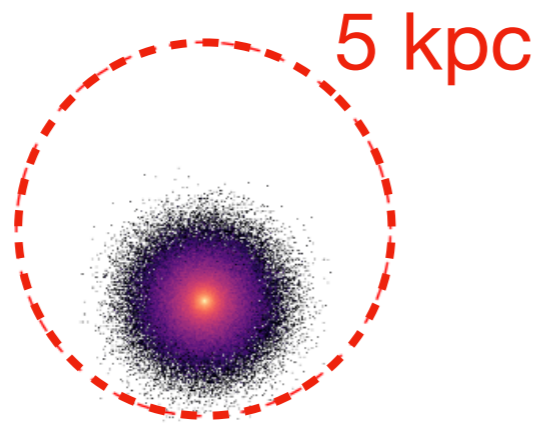
- Pas détectée
- Rapport (matière noire / étoiles) < 1

L'absence de preuve n'est pas une preuve d'absence

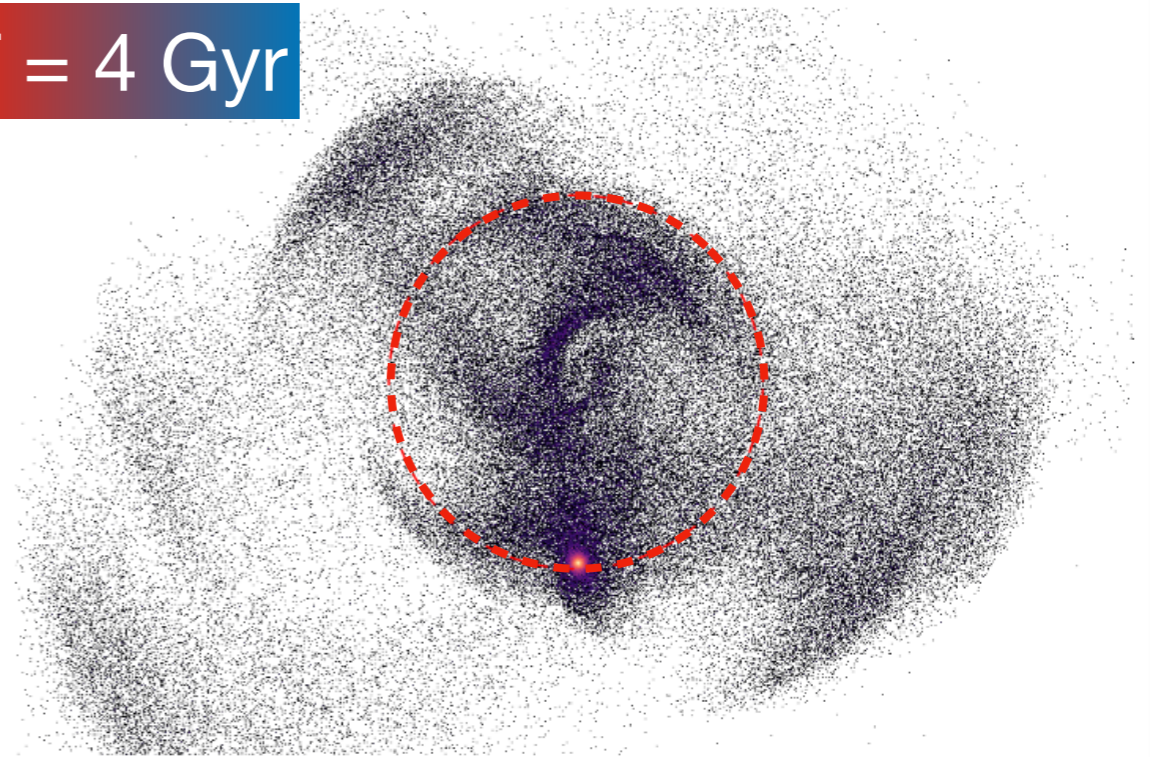
Les amas globulaires baignant dans la matière noire

- Une grande fraction de leur matière noire est perdue au cours de leur décroissance orbitale

T = 0 Gyr



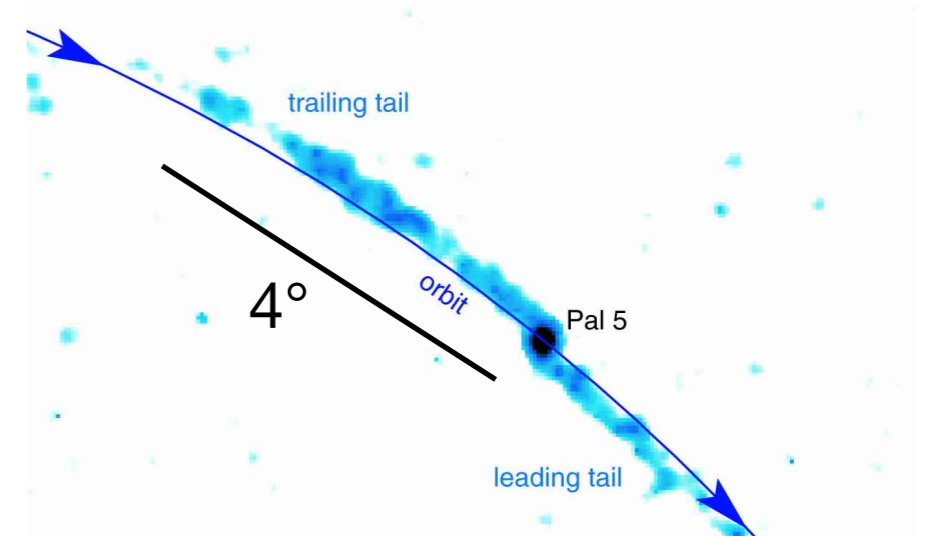
T = 4 Gyr



Signatures observationnelles de la matière noire

Signatures observationnelles de la matière noire

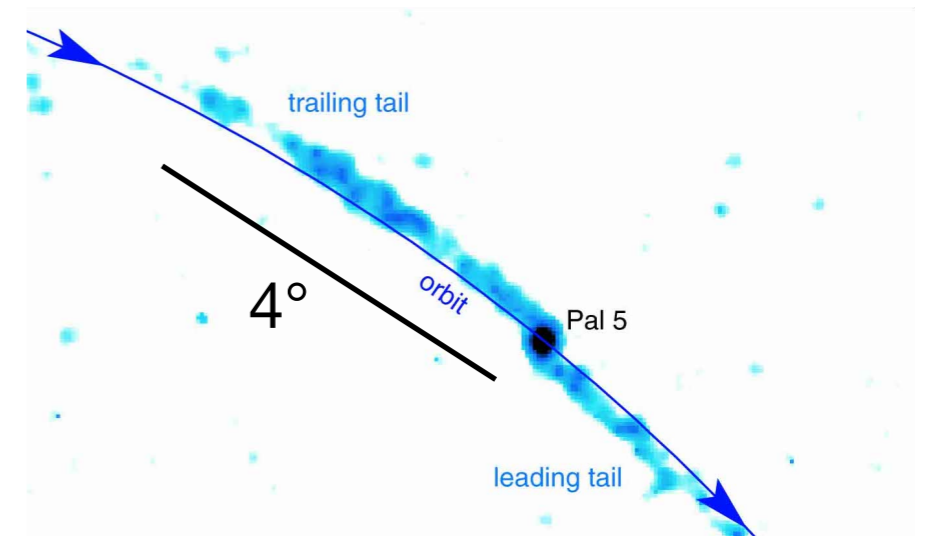
- Absence de bras de marées stellaires
Mashchenko & Sills (2005); Odenkirchen et al. (2003)



Odenkirchen et al. (2002)

Signatures observationnelles de la matière noire

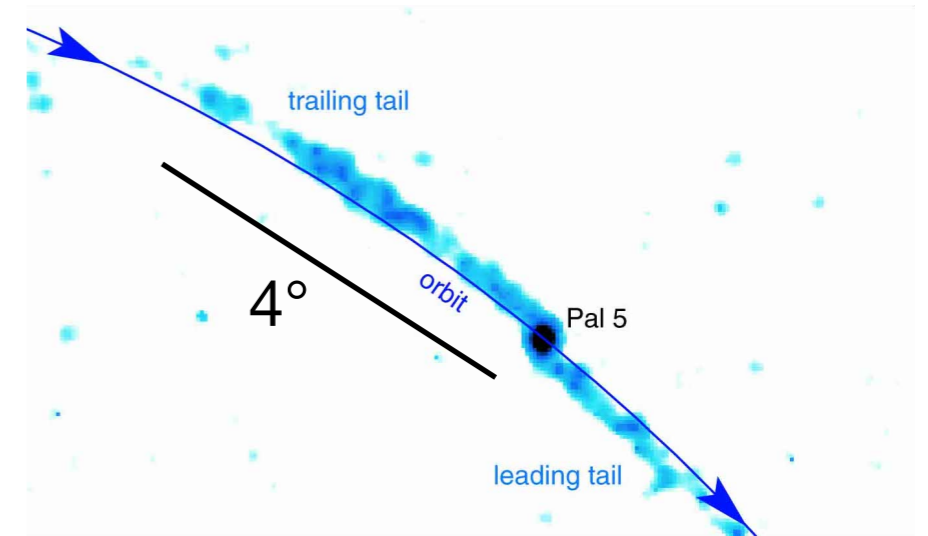
- Absence de bras de marées stellaires
[Mashchenko & Sills \(2005\)](#); [Odenkirchen et al. \(2003\)](#)
- Distribution sphérique des étoiles dans la région centrale de l'amas
[Mashchenko & Sills \(2005\)](#)



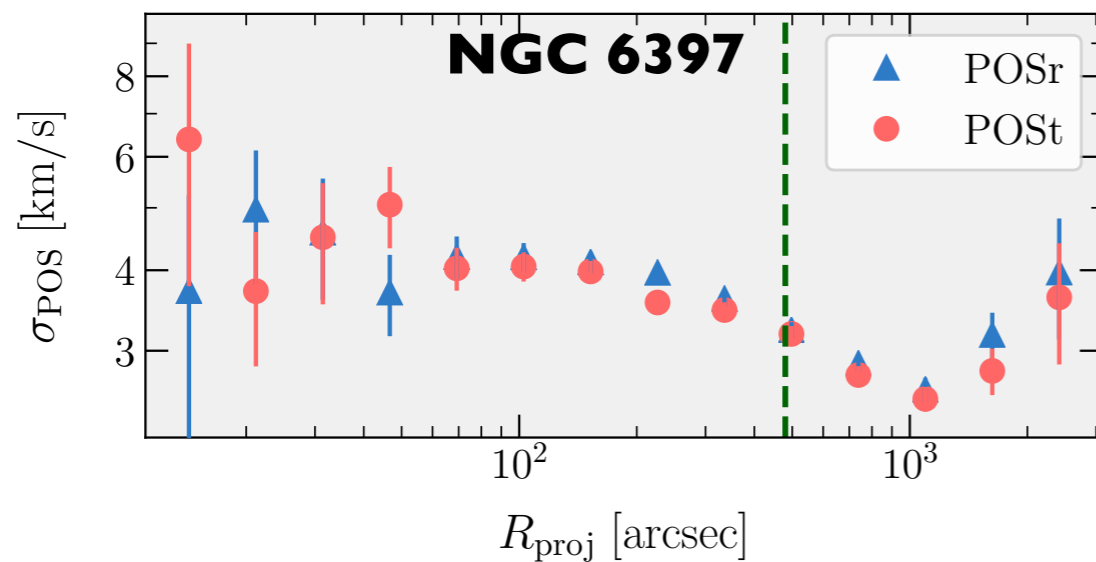
[Odenkirchen et al. \(2002\)](#)

Signatures de la matière noire

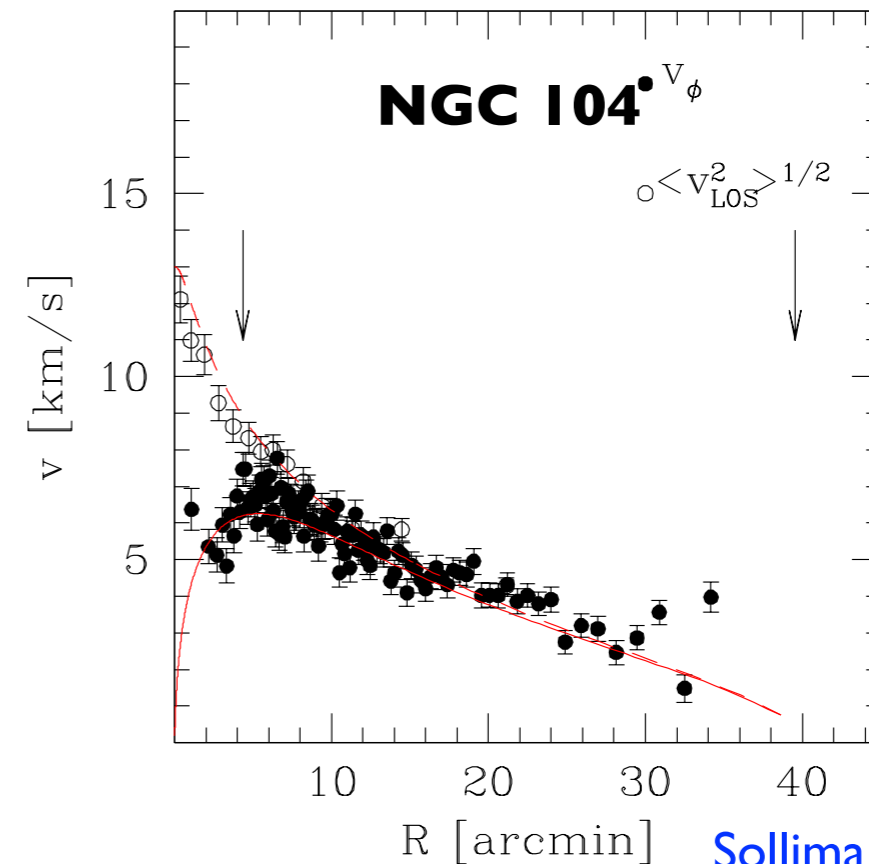
- Absence de bras de marées stellaires
Mashchenko & Sills (2005); Odenkirchen et al. (2003)
- Distribution sphérique des étoiles dans la région centrale de l'amas
Mashchenko & Sills (2005)
- Inflation de la dispersion de vitesses dans les régions extérieures de l'amas
Peñarrubia et al. (2017)



Odenkirchen et al. (2002)

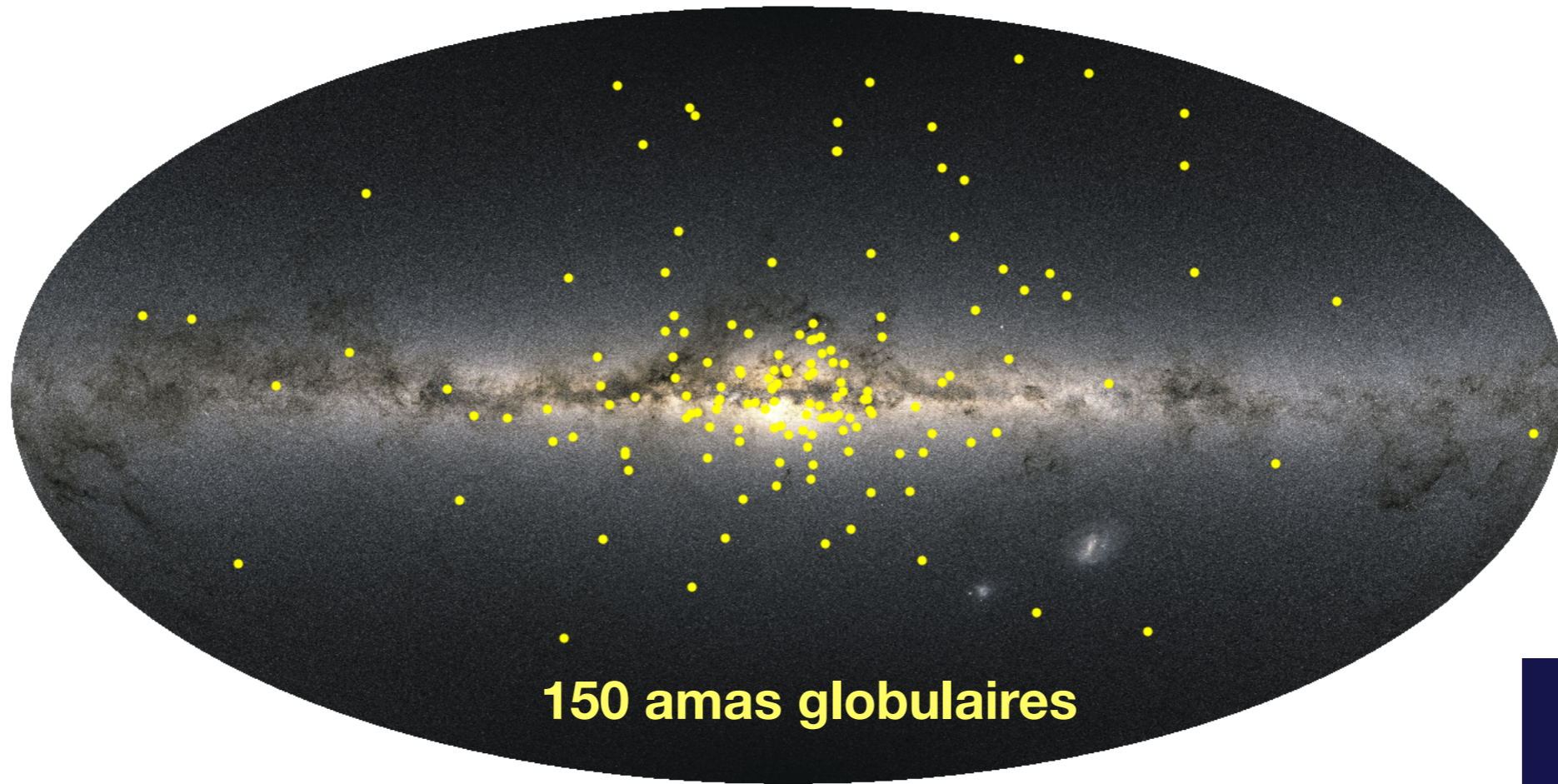


Vitral & Mamon (2021)



Sollima et al. (2019)

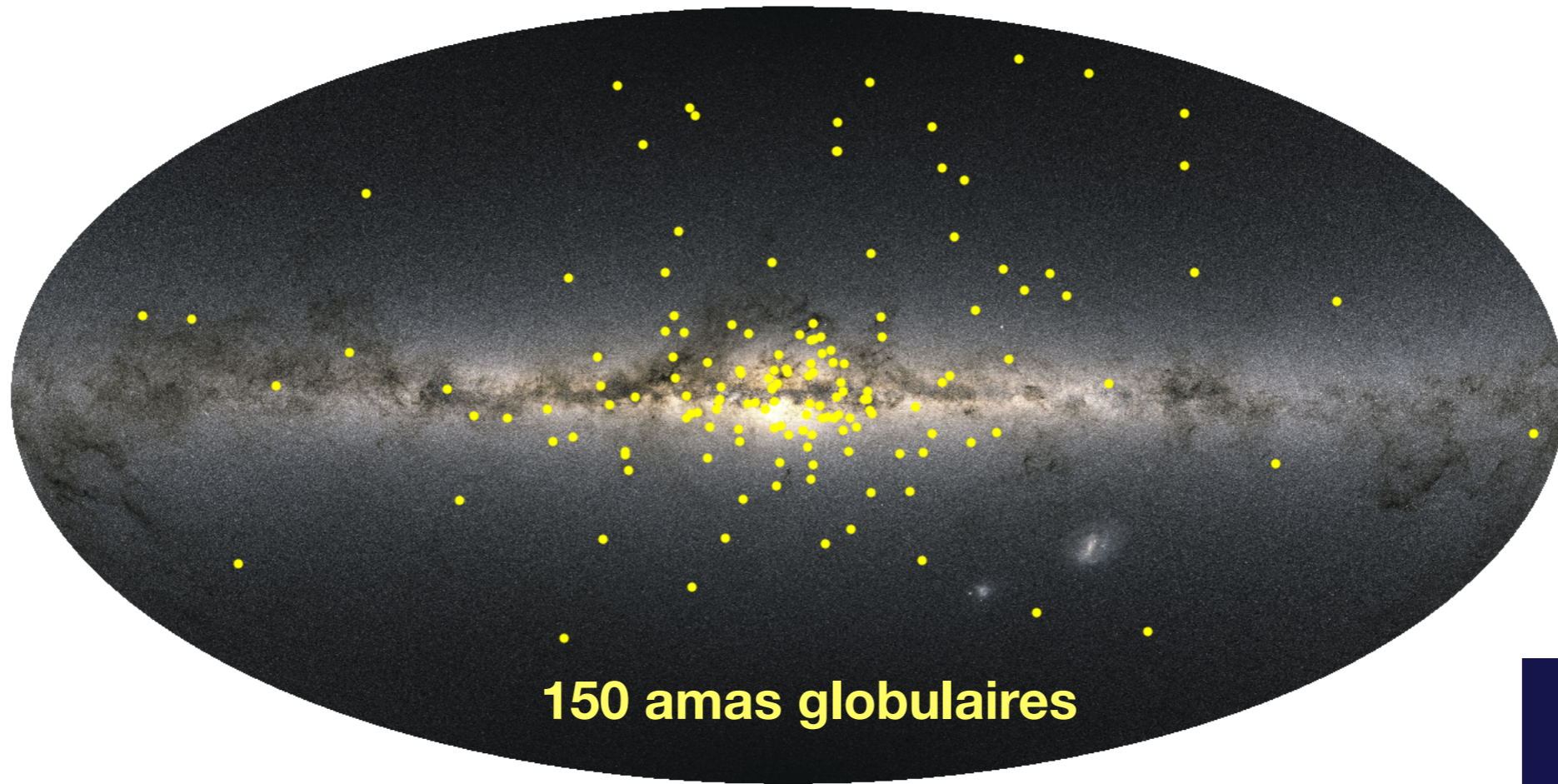
La mission Gaia: opérationnelle



150 amas globulaires



La mission Gaia: opérationnelle



GAIA DATA RELEASE 3 Printemps 2022

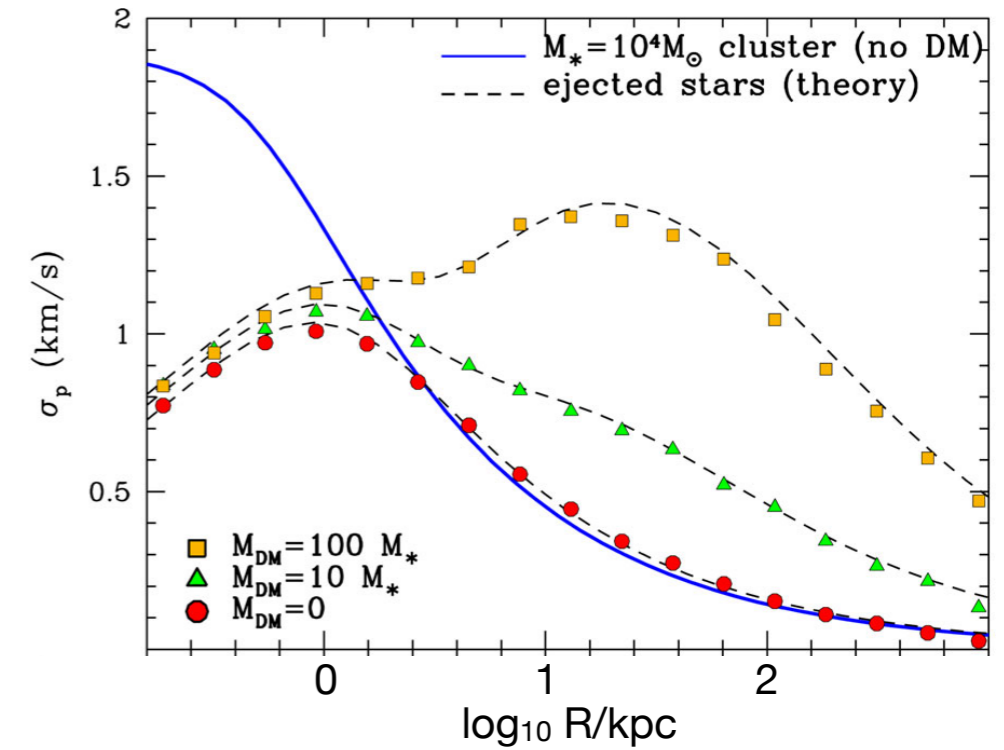
- Amélioration significative de l'astrométrie et la photométrie
- Plus grand nombre d'étoiles par amas (inclusion étoiles binaires et multiples)
- Plus grand nombre de vitesses radiales des étoiles



La détection de la signature de matière noire avec Gaia

La détection de la signature de matière noire avec Gaia

- 1. Prédictions théoriques



Peñarrubia et al. (2017)

La détection de la signature de matière noire avec Gaia

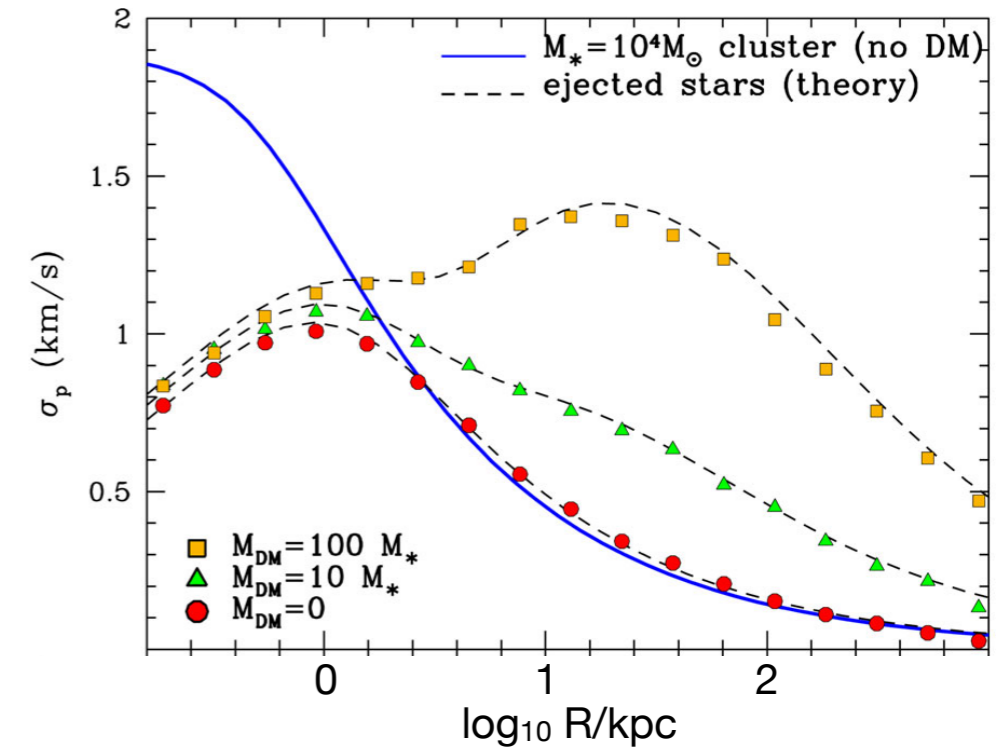
- 1. Prédictions théoriques
- 2. Observations



GAIA EARLY DATA RELEASE 3 (GAIA EDR3)



GAIA DATA RELEASE 3
Printemps 2022



Peñarrubia et al. (2017)

La détection de la signature de matière noire avec Gaia

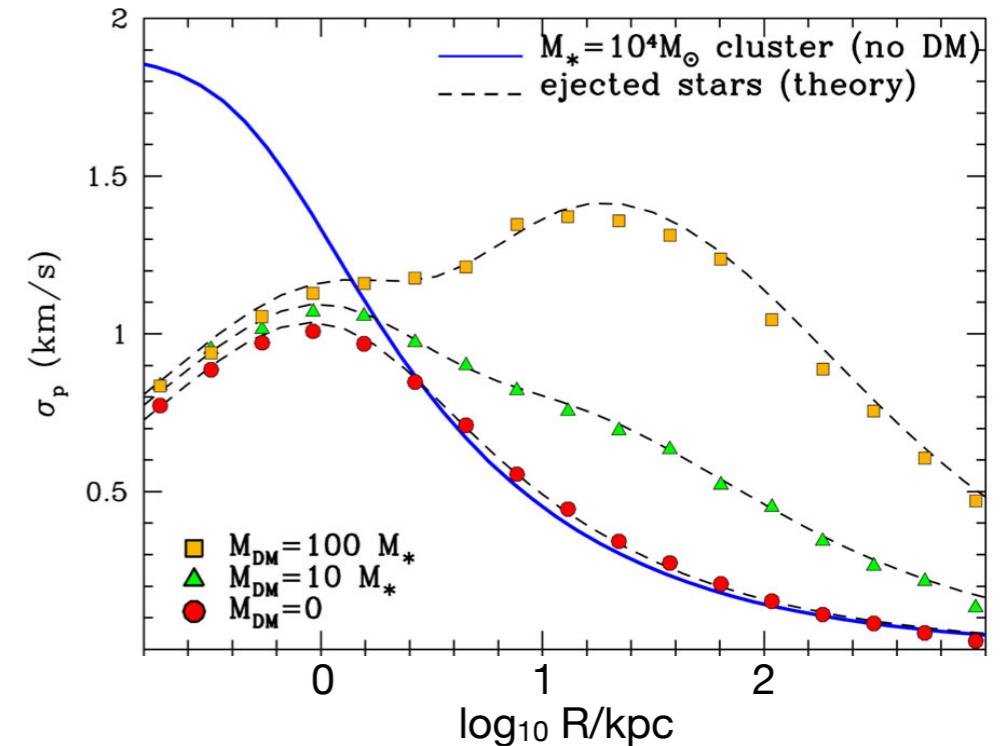
- 1. Prédictions théoriques

- 2. Observations



GAIA EARLY DATA RELEASE 3 (GAIA EDR3)

GAIA DATA RELEASE 3
Printemps 2022



Peñarrubia et al. (2017)

- 3. Simulations N-corps avec GPUs de dernière génération

Code N-corps
sans collisions

+



Carte
Graphique

=

Gravitational
Oct-
Tree code accelerated by
Hierarchical time step
Controlling

Miki et al. (2017)

Laboratoire français et collaborateurs

Laboratoire français et collaborateurs



David Valls-Gabaud

- Données Gaia
- Méthodes statistiques

Laboratoire français et collaborateurs



David Valls-Gabaud

- Données Gaia
- Méthodes statistiques



GEPI

- GAIA DPAC
- Effets systématiques dans les catalogues GAIA

Laboratoire français et collaborateurs



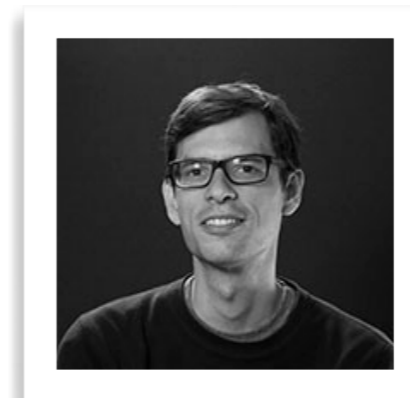
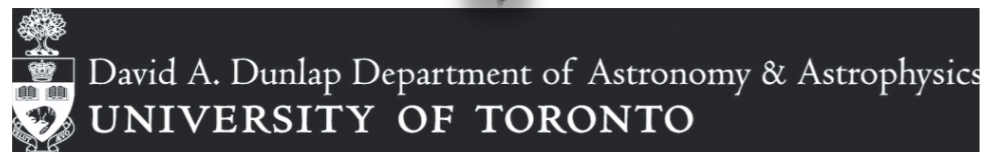
David Valls-Gabaud

- Données Gaia
- Méthodes statistiques



GEPI

- GAIA DPAC
- Effets systématiques dans les catalogues GAIA



Prof. Jo Bovy

- Données Gaia
- Dynamique galactique

Laboratoire français et collaborateurs



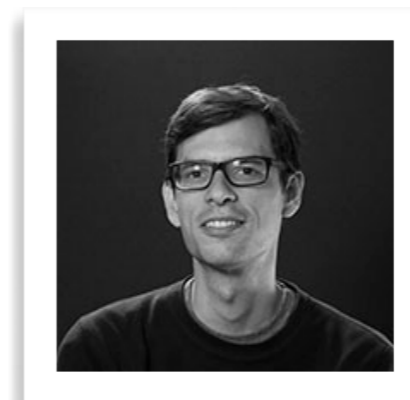
David Valls-Gabaud

- Données Gaia
- Méthodes statistiques



GEPI

- GAIA DPAC
- Effets systématiques dans les catalogues GAIA



Prof. Jo Bovy

- Données Gaia
- Dynamique galactique



Prof. Jorge Peñarrubia

- Données Gaia
- Dynamique galactique
- Prédictions théoriques

Conséquences cosmologiques

Conséquences cosmologiques

- Formation et évolution des sous-halos de matière noire



GALAXIES NAINES

Conséquences cosmologiques

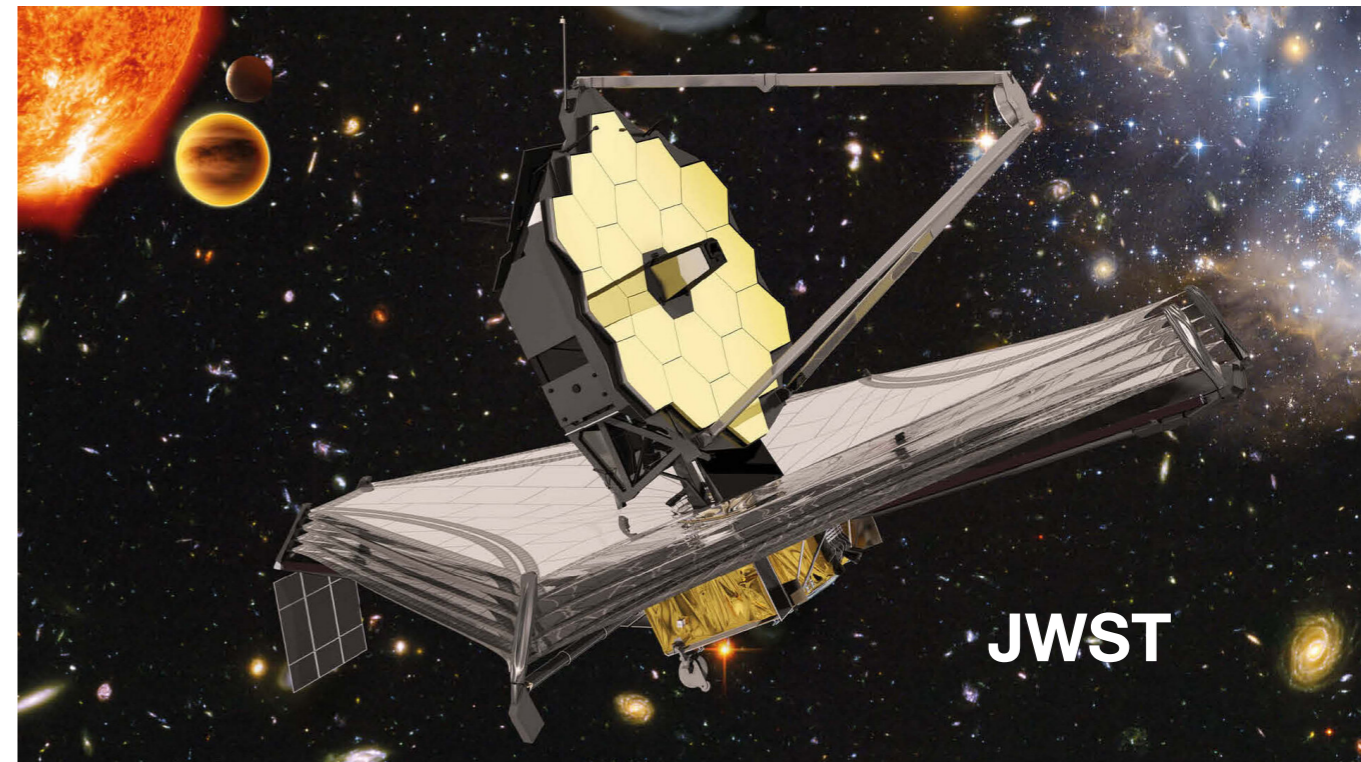
- Formation et évolution des sous-halos de matière noire
- Fossiles de l'univers primordial



GALAXIES NAINES



GALAXIES A HAUT REDSHIFT



Conséquences cosmologiques

- Formation et évolution des sous-halos de matière noire
- Fossiles de l'univers primordial
- Problème d'abondances de galaxies naines dans le modèle matière noire froide



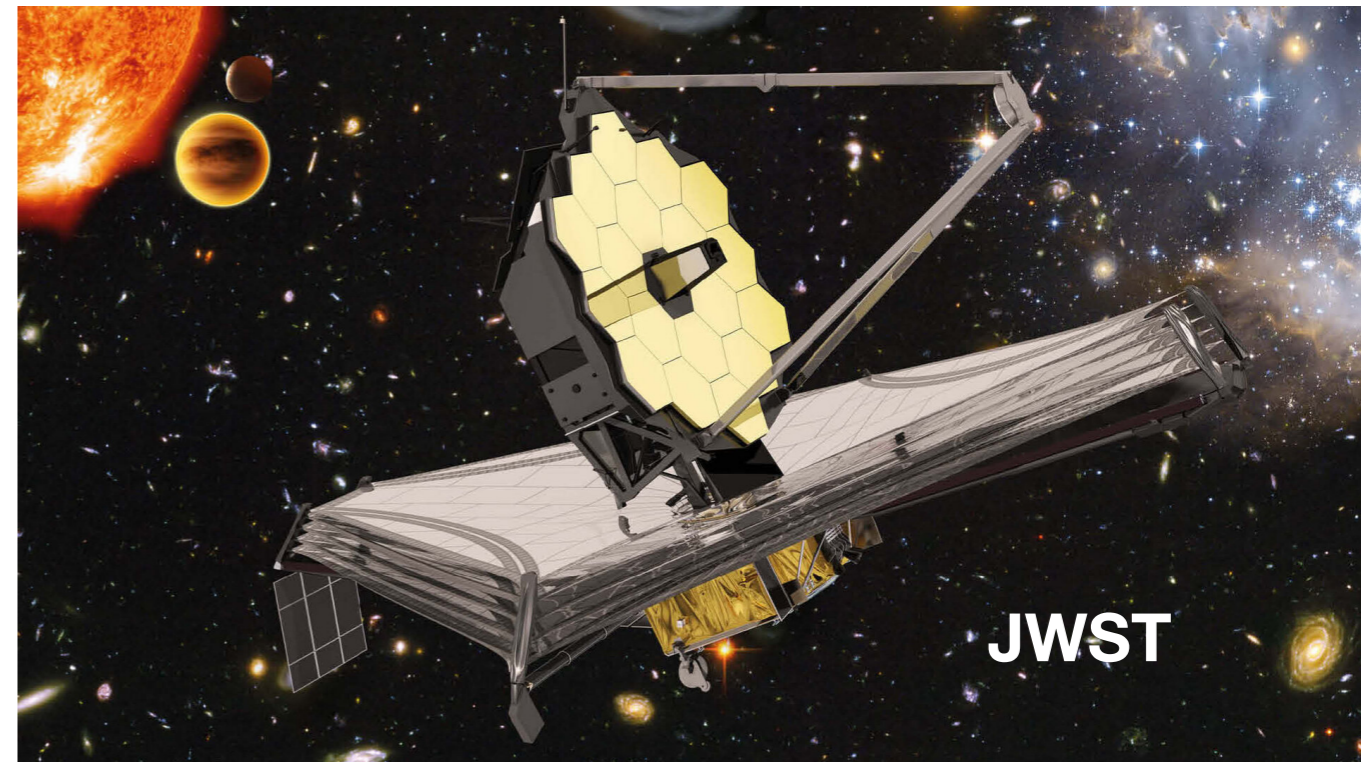
GALAXIES NAINES



GALAXIES A HAUT REDSHIFT



AMAS GLOBULAIRES



Conclusion

- **Objectif:** Détecter la matière noire dans les amas globulaires de la Voie Lactée
- **Méthode:** Allier les données de mission européenne **Gaia**, les prédictions théoriques et des simulations numériques inégalées
- **Retour scientifique:** Première détection de la matière noire dans les amas par un groupe de recherche français avec des conséquences majeures en cosmologie

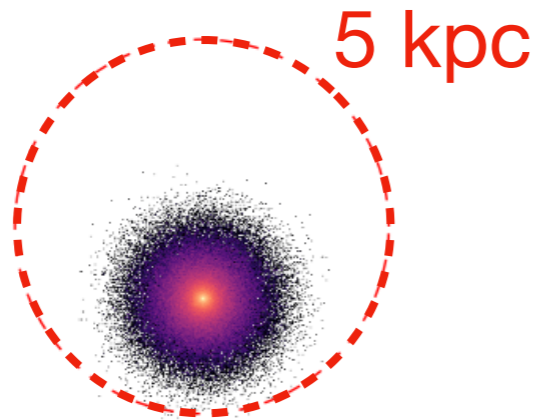


Merci de votre attention

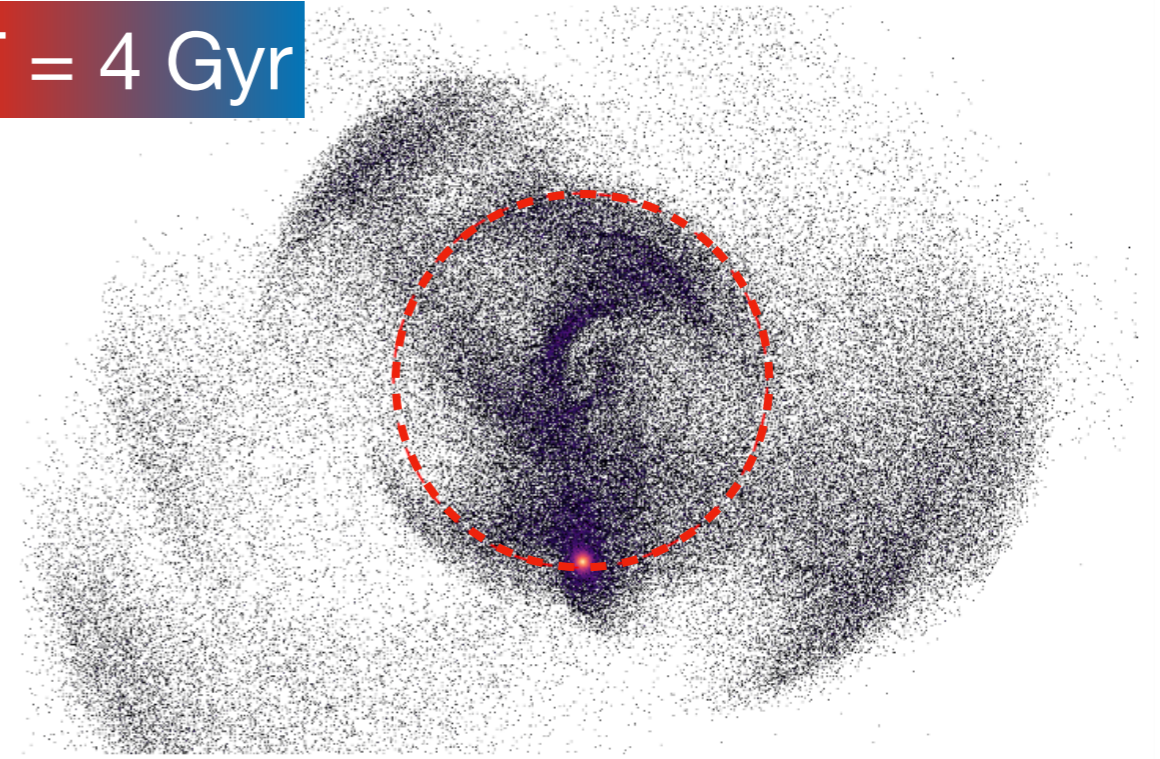
Les amas globulaires baignant dans la matière noire

- Perdu une large fraction de leur matière noire au cours du temps

$T = 0$ Gyr



$T = 4$ Gyr



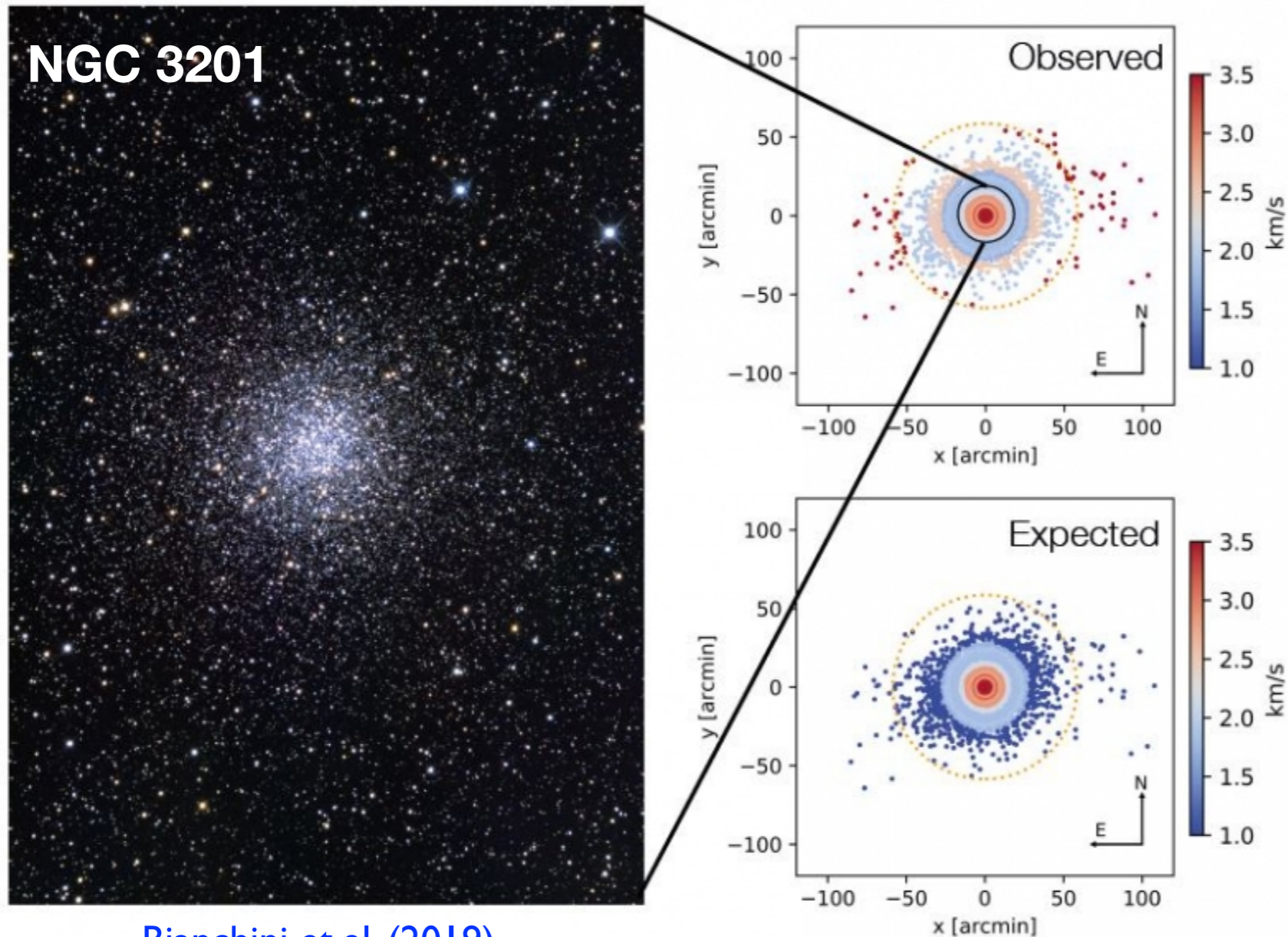
Mécanismes pour éjecter la matière noire

- désintégration de la matière noire
- Processus de feedback
- Effets de marées

- Pas nécessairement un mécanisme de formation unique

Signatures de la matière noire

- Inflation de la dispersion de vitesses dans les régions extérieures de l'amas



Bianchini et al. (2019)