

Les amas globulaires

Paola Di Matteo
GEPI, Observatoire de Paris-PSL



Credits (de gauche à droite) :

M 4: ESO.

Omega Cen: ESO/INAF-VST/OmegaCAM.

M 80: The Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA/ESA).

M 53: ESA/Hubble & NASA.

NGC 6752: ESA/Hubble & NASA.

M 13: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

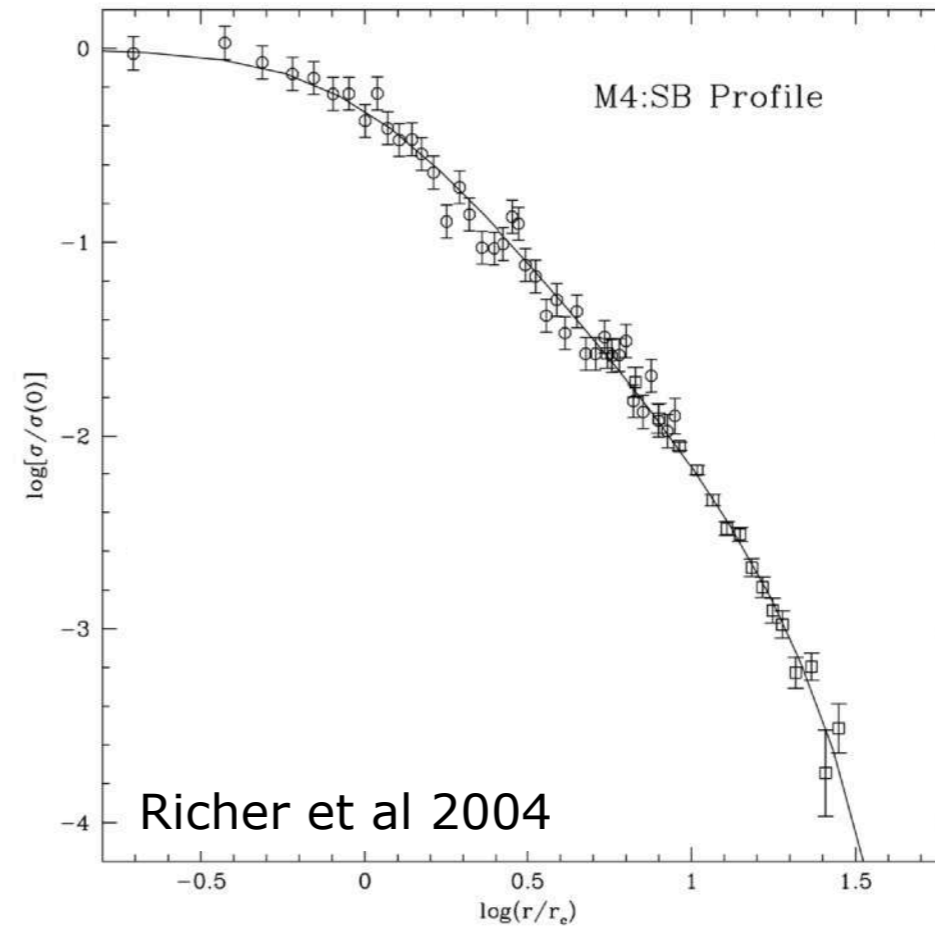
M 4: ESA/Hubble & NASA.

Collège de France, 5 février 2024

AMAS GLOBULAIRES : UNE SIMPLE DÉFINITION

Un amas globulaire est un système stellaire constitué d'un ensemble d'étoiles liées entre elles par la force de gravité, avec une plus forte concentration d'étoiles en son centre.

L'amas globulaire M4 (NGC6121), à gauche et son profil de densité de surface (à droite)



Leur forme est sphérique, en première approximation, et c'est leur forme qui a motivé leur nom (petite sphère, *globulus* en latin).

AMAS GLOBULAIRES GALACTIQUES

Les amas globulaires de notre Galaxie contiennent typiquement des centaines de milliers d'étoiles et leur masse stellaire, en moyenne, est d'environ 3×10^5 masses solaires.

Cependant on trouve dans notre Galaxie aussi des amas globulaires significativement moins massifs (par ex, Palomar 5, dont la masse stellaire est $1.34 \pm 0.24 \times 10^4$, Baumgardt & Hilker 2018) ou plus massifs (par ex, Omega Centauri, dont la masse stellaire est $3.94 \pm 0.02 \times 10^6$ Msun, Baumgardt & Hilker 2018).

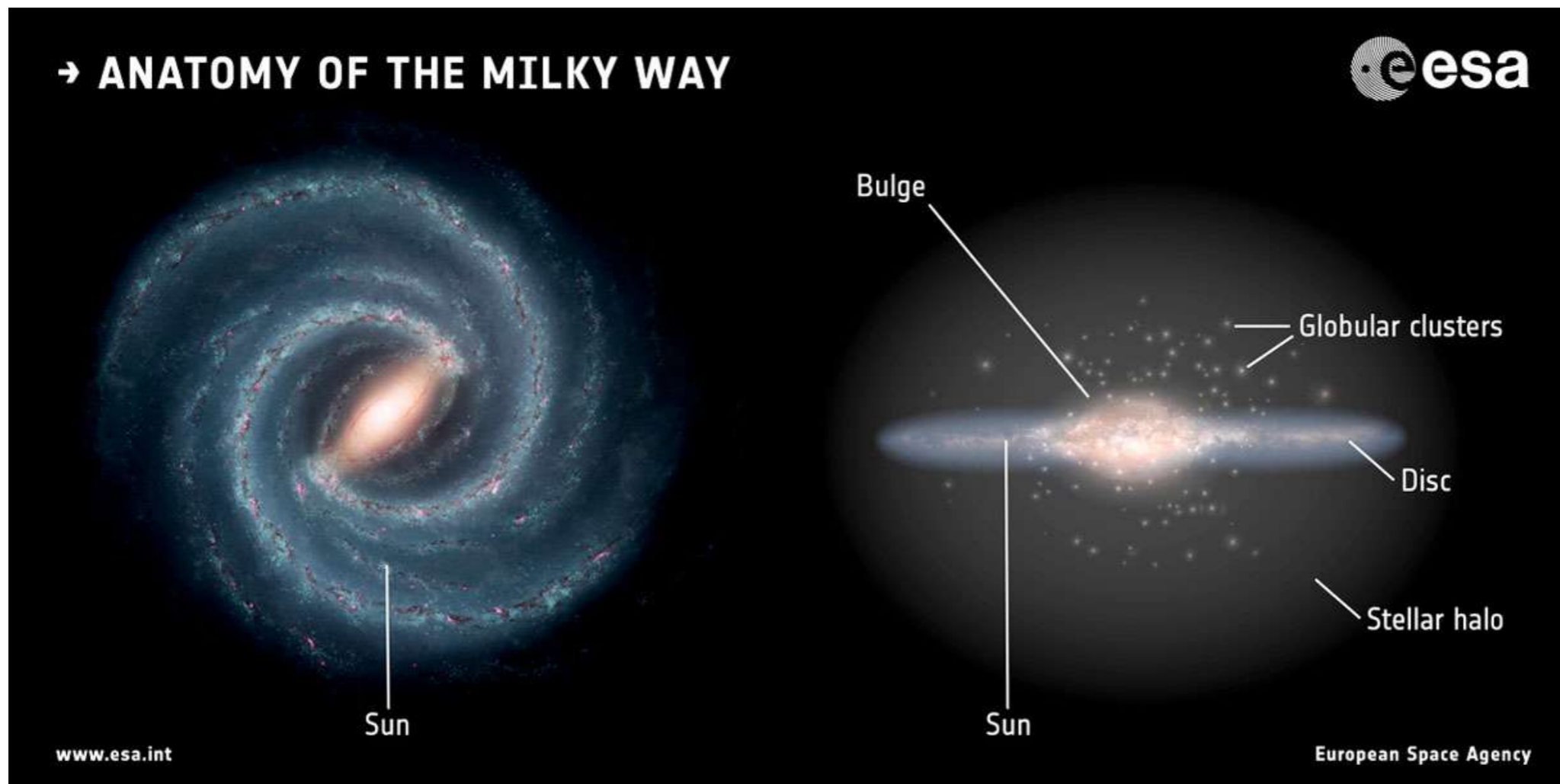
Pour connaître les paramètres fondamentaux des amas globulaires galactiques (masse, taille, position) :

<https://physics.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat>

<https://people.smp.uq.edu.au/HolgerBaumgardt/globular/>

AMAS GLOBULAIRES GALACTIQUES

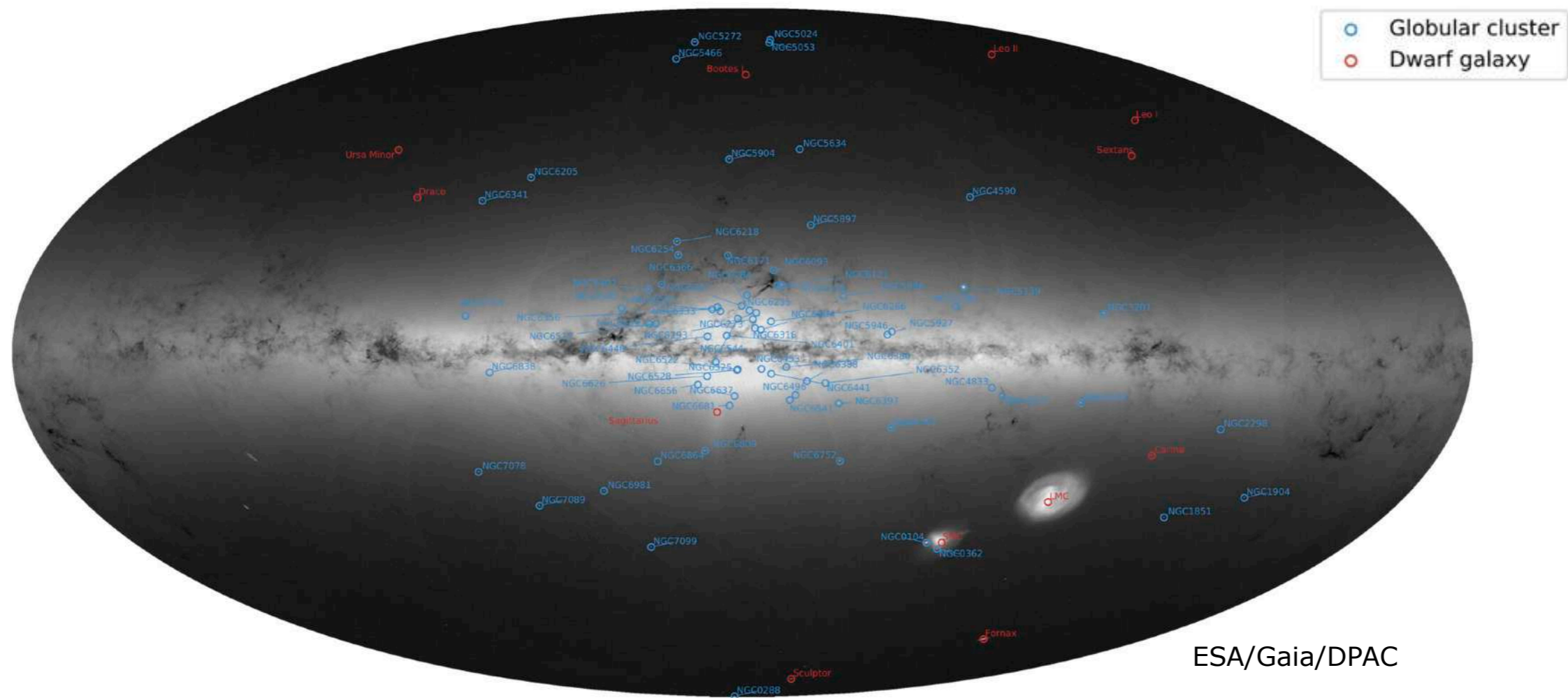
Environ 170 amas globulaires sont connus aujourd'hui dans la Galaxie et ils sont principalement distribués dans les régions centrales (bulbe et disque épais) ainsi que dans le halo stellaire.



AMAS GLOBULAIRES GALACTIQUES

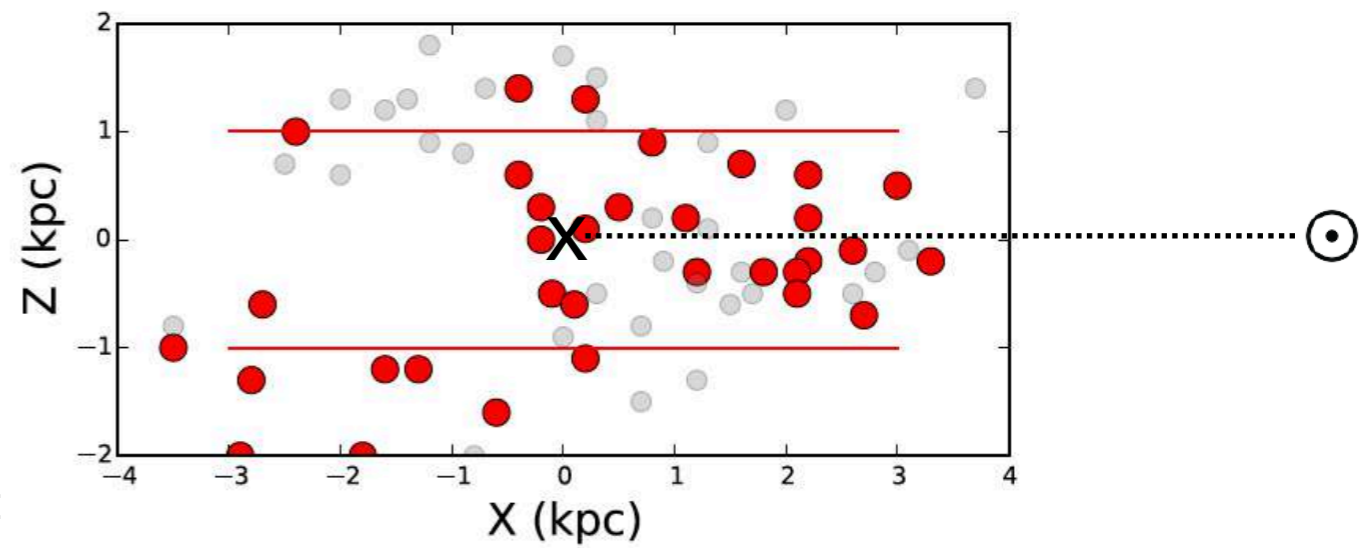
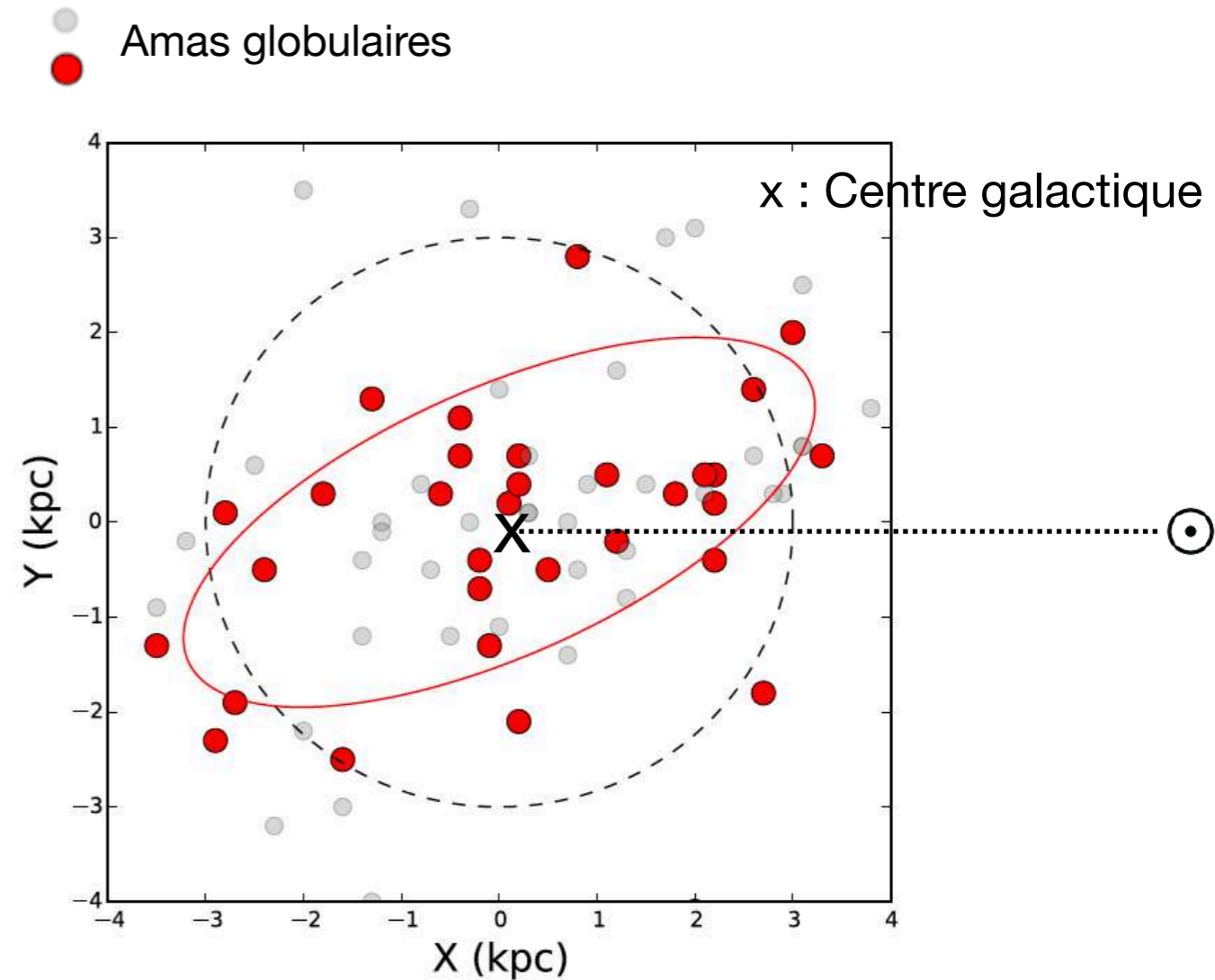
Environ 170 amas globulaires sont connus aujourd'hui dans la Galaxie et ils sont principalement distribués dans les régions centrales (bulbe et disque épais) ainsi que dans le halo stellaire.

Grâce à la mission astrométrique Gaia de l'ESA nous connaissons leur positions et mouvements dans la Galaxie et pouvons ainsi reconstruire leurs orbites.



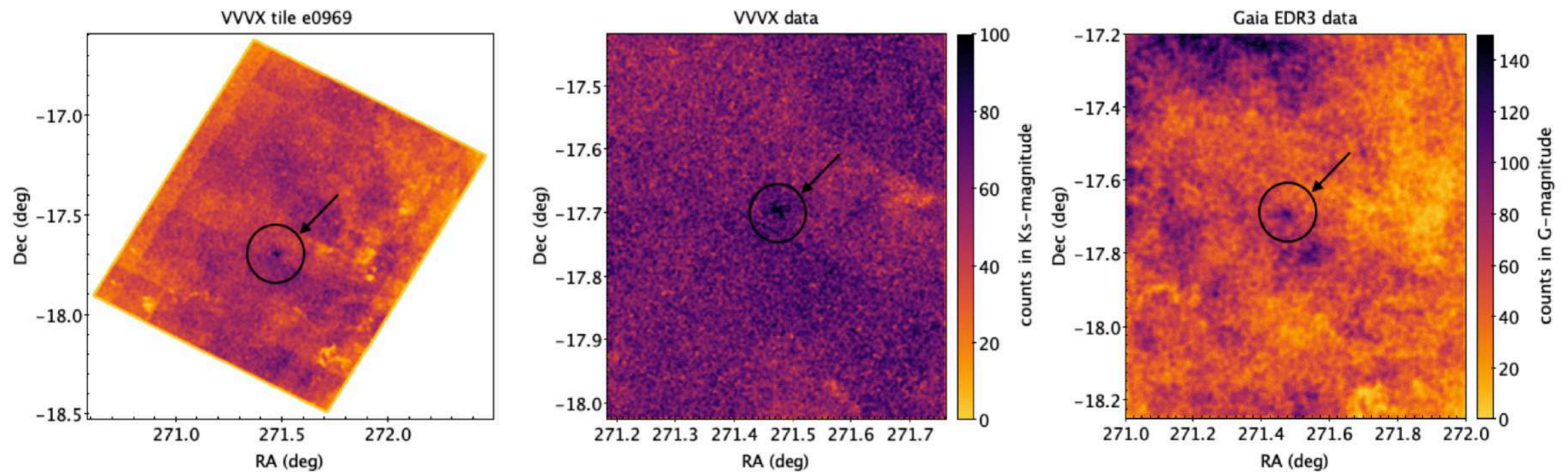
AMAS GLOBULAIRES GALACTIQUES

Probablement le census des amas globulaires dans notre Galaxie est encore incomplet, à cause surtout des effets d'extinction qui limitent l'observation des régions centrales de la Voie lactée.



AMAS GLOBULAIRES GALACTIQUES

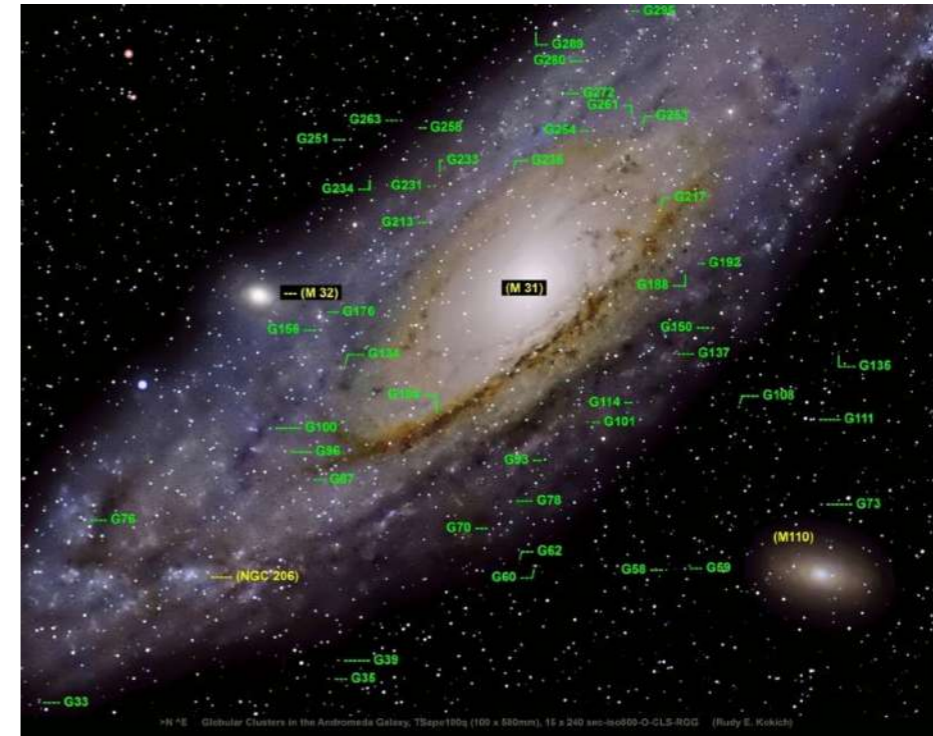
Probablement le census des amas globulaires dans notre Galaxie est encore incomplet, à cause surtout des effets d'extinction qui limitent l'observation des régions centrales de la Voie lactée. De nouveaux amas ont été récemment découverts (Gran et al 2021, 2023), comme Garro 02 (Garro et al 2022), un amas globulaire dans les régions de bulbe/barre.



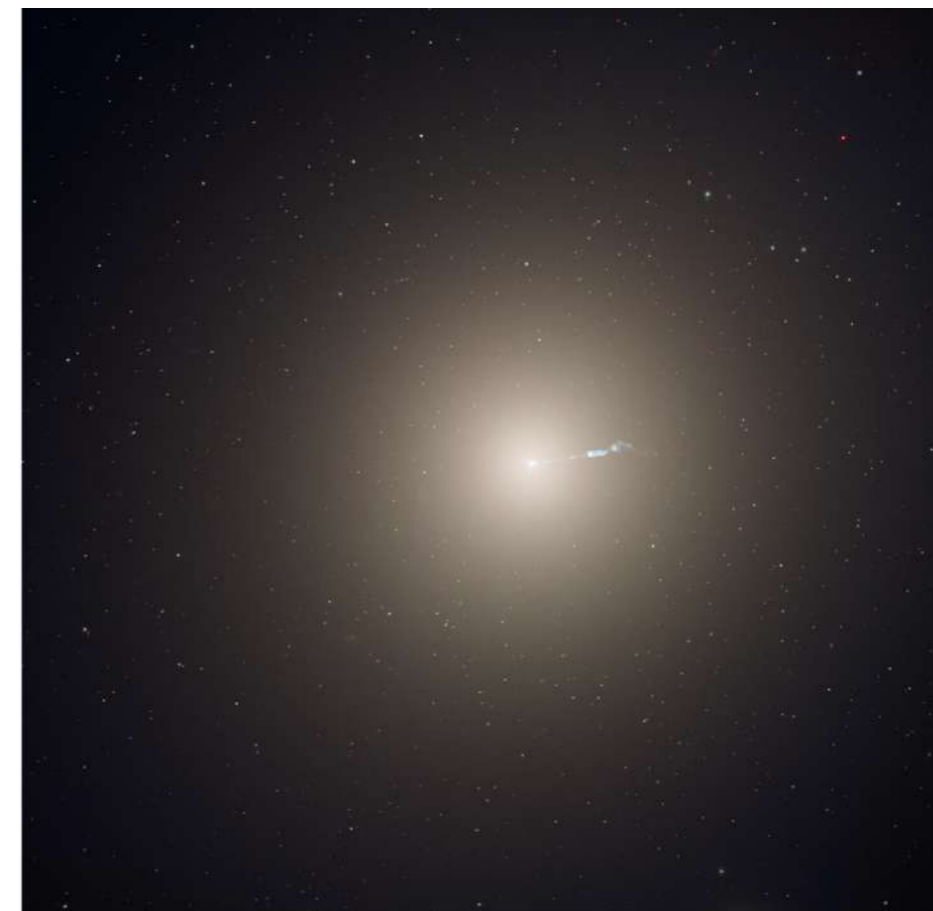
Garro et al 2022, A&A

AMAS GLOBULAIRES EXTRA-GALACTIQUES

M31, la galaxie d'Andromède, la galaxie la plus massive du Groupe Local, dont notre Galaxie fait partie, contient potentiellement plus de 300 amas globulaires (Huxor et al 2014)



M87, la galaxie au centre de l'amas de galaxies de Virgo, en contiendrait environ 13 000 (Tamura et al 2006).



AMAS GLOBULAIRES : PREMIÈRES DECOUVERTES

AMAS GLOBULAIRES, UN PEU D'HISTOIRE

L'étude des amas comme systèmes constitués d'étoiles commence essentiellement au 18ème siècle, avec les observations de Charles Messier et William et Caroline Herschel. C'est à Herschel qu'on doit le terme "amas globulaires" (*globular clusters*) pour décrire ces systèmes.

C'est d'après le catalogue de Messier et celui de John Louis Emil Dreyer, qui compile une nouvelle version (*New General Catalogue*) du catalogue d'Herschel environ un siècle plus tard, que la plupart des amas globulaires galactiques sont encore nommés aujourd'hui :

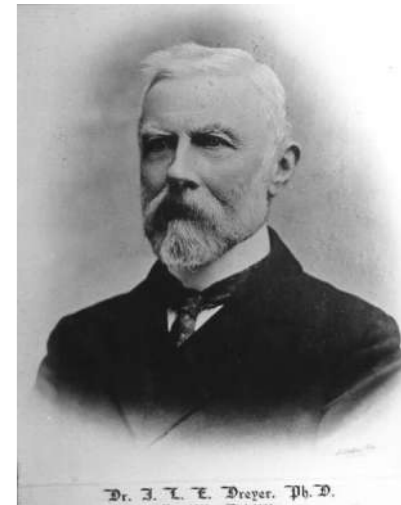
M4 = NGC 6121

M10 = NGC 6254

M19 = NGC 6273

M22 = NGC 6656

...



William Herschel, de Lemuel Francis Abbott, 1785.
Caroline Herschel, de Melchior Gommard Tieleman, 1829

AMAS GLOBULAIRES, UN PEU D'HISTOIRE

Parmi les amas globulaires galactiques les moins lumineux, il y a ceux connus comme les amas globulaires Palomar, en nombre de 15, et qui furent découverts dans les années 50 du siècle dernier grâce aux observations conduites au Palomar Observatory, en Californie.



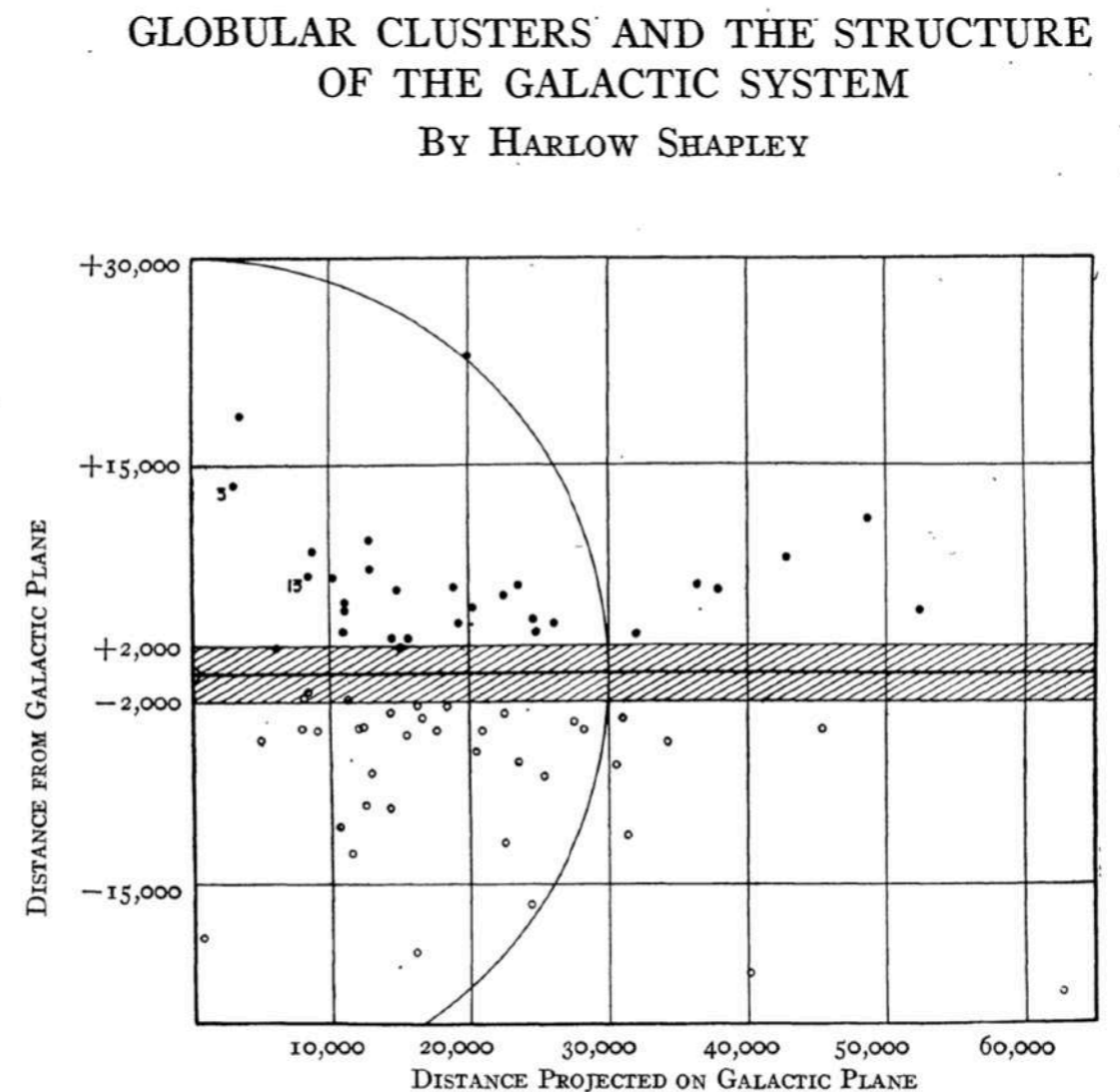
(Photo Credit: Palomar Observatory)

Ces amas ont été découverts assez tardivement parce qu'ils sont très faibles, fortement obscurcis, éloignés ou car ils ont peu d'étoiles membres.

AMAS GLOBULAIRES, UN PEU D'HISTOIRE

La première utilisation des amas globulaires pour comprendre notre Galaxie dans son ensemble est due à Harlow Shapley.

En 1918, il publie une étude basée sur l'estimation des distances au Soleil de 69 amas globulaires. A partir de ces distances et des positions de ces amas dans le ciel, il situe le centre de leur distribution dans la direction de Sagittaire, à environ 20 kpc du système solaire.



AMAS GLOBULAIRES, UN PEU D'HISTOIRE

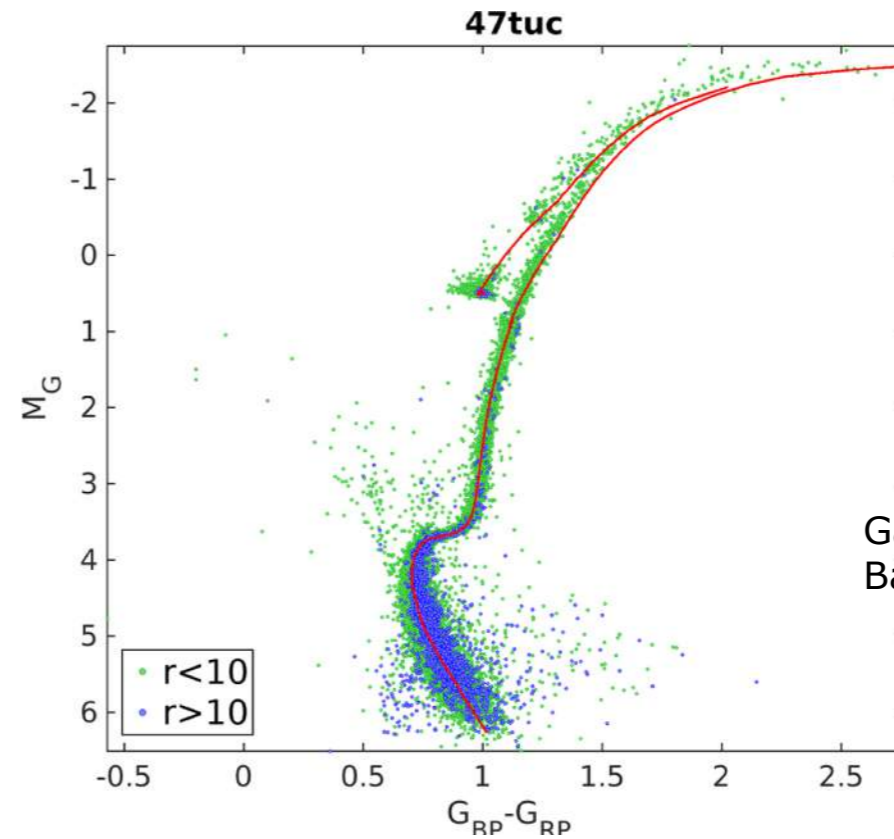
Pour longtemps, après leur découverte, les amas globulaires ont été considérés comme des systèmes vieux, pauvres en métaux et simples, c'est-à-dire :

1. chaque amas constitué d'étoiles ayant toutes le même âge et métallicité
2. sans rotation
3. à symétrie sphérique

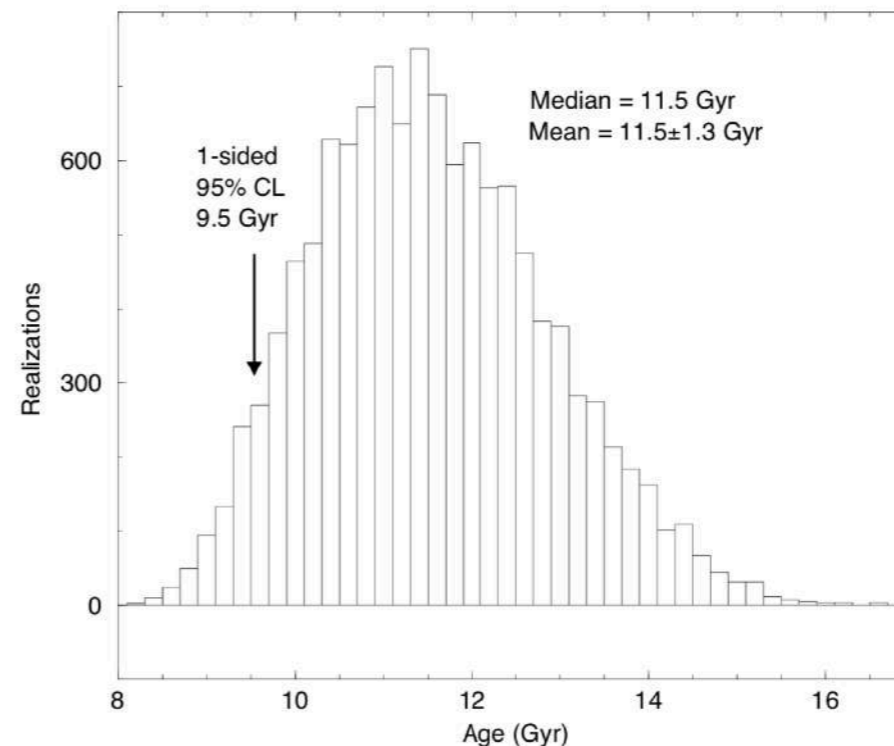
AMAS GLOBULAIRES : ÂGES

Les diagrammes couleur-magnitude des amas globulaires galactiques montrent qu'il s'agit de systèmes vieux, avec des âges > 9 -10 milliards d'années.

Parce que toutes les étoiles d'un amas décrivent une isochrone, on en déduit que, en général, les amas sont constitués d'étoiles ayant toutes le même âge et la même métallicité.



Gaia collaboration,
Babusiaux et al 2018, A&A

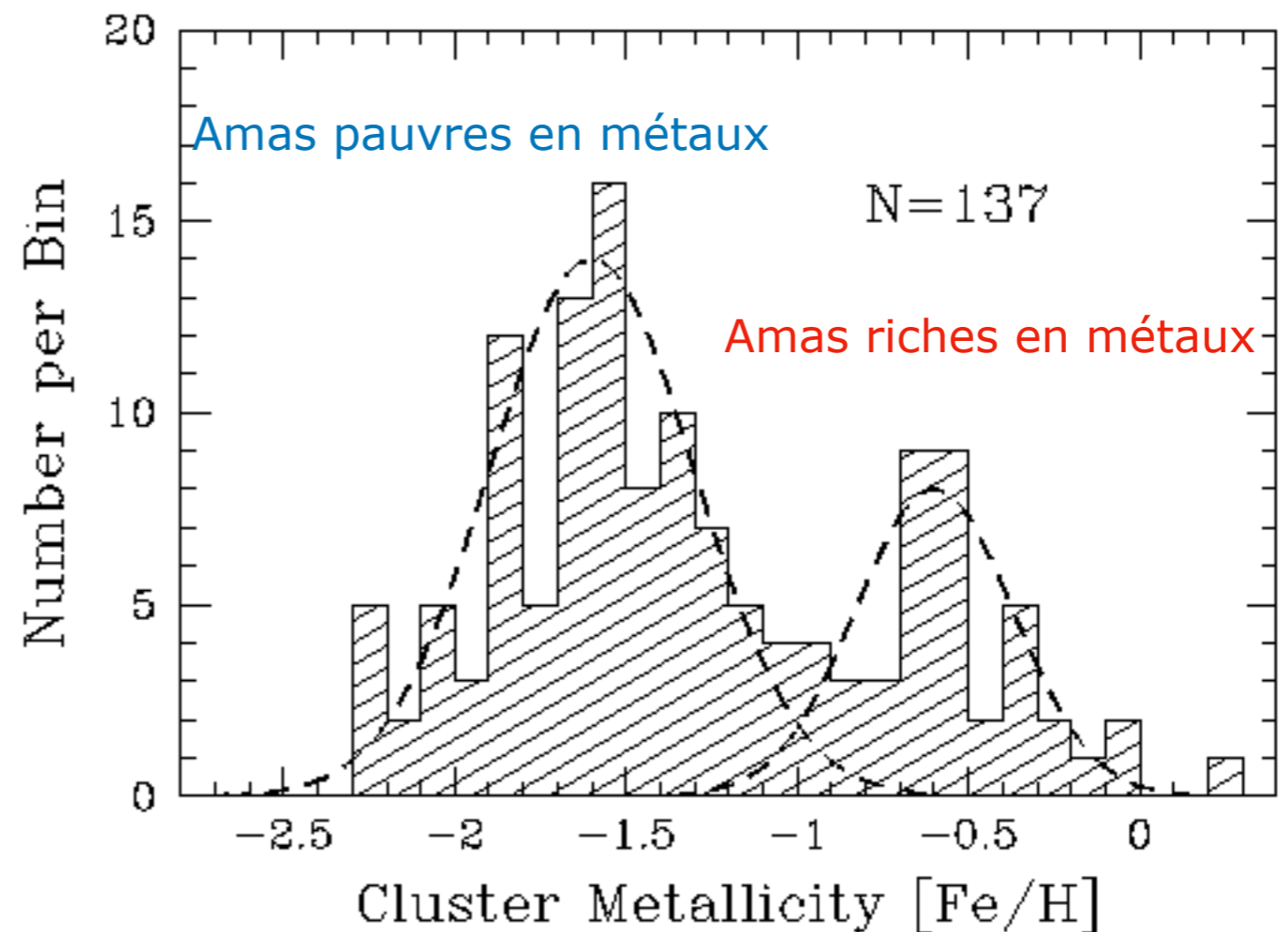


Chaboyer et al 1998, ApJ

AMAS GLOBULAIRES : MÉTALLICITÉS

Les amas globulaires galactiques ont pour la plupart des métallicités, $[\text{Fe}/\text{H}]^{(*)}$, inférieures à -1. Les amas avec $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$ sont pour la plupart distribués dans le bulbe et disque de la Galaxie.

La distribution de métallicités des amas est bimodale (deux pics dans l'histogramme ci-dessous), ce qui peut-être suggère une origine différente de ces deux groupes.

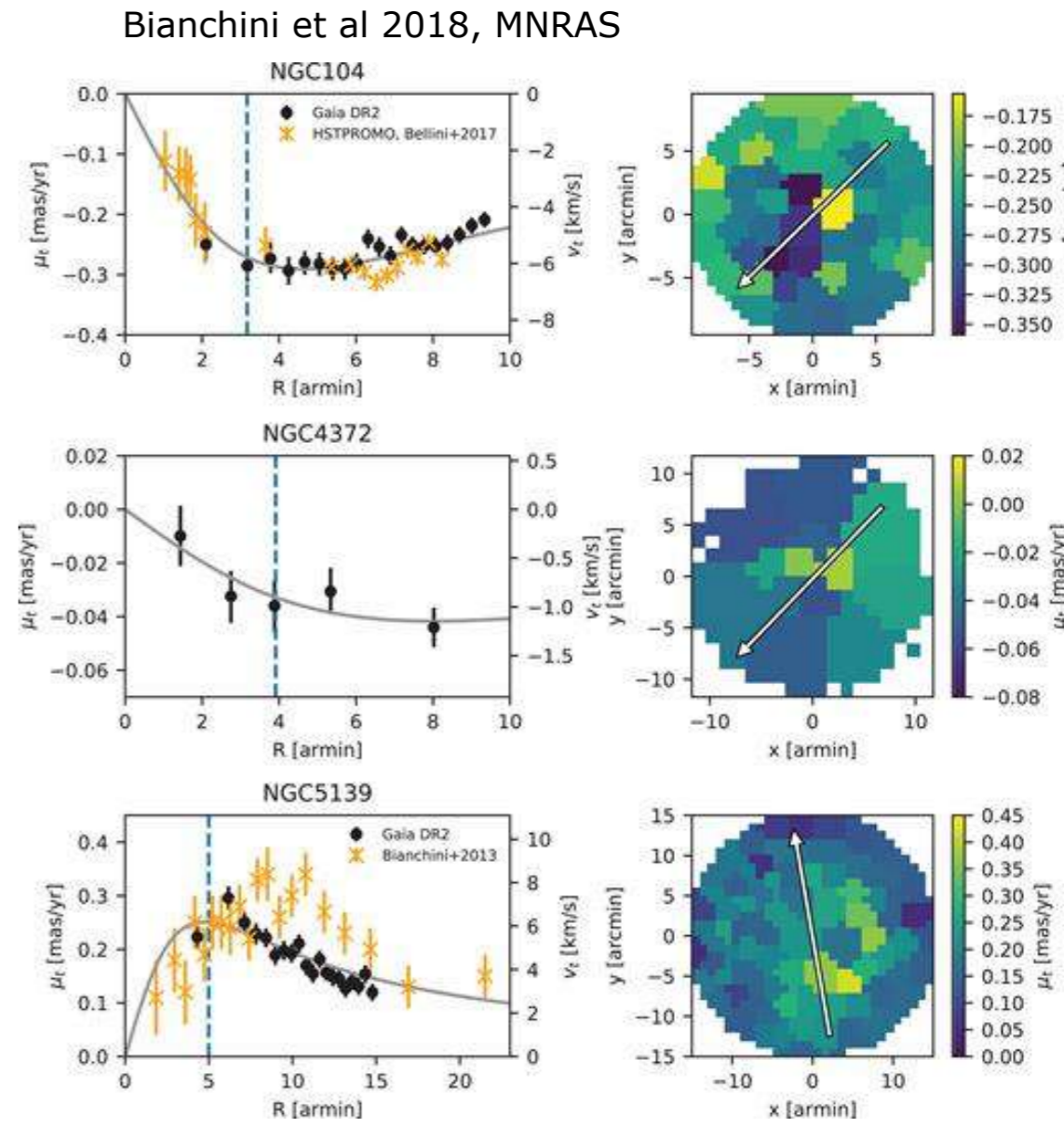
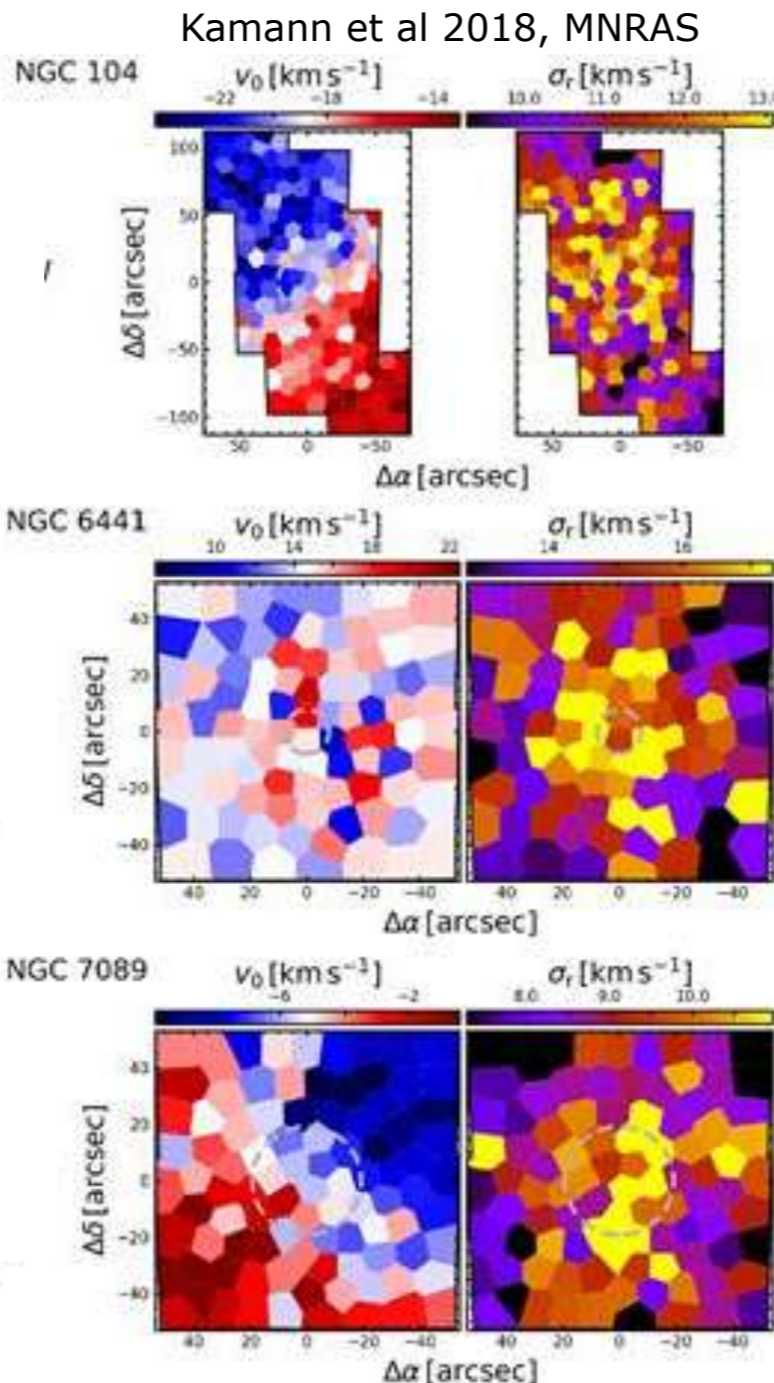
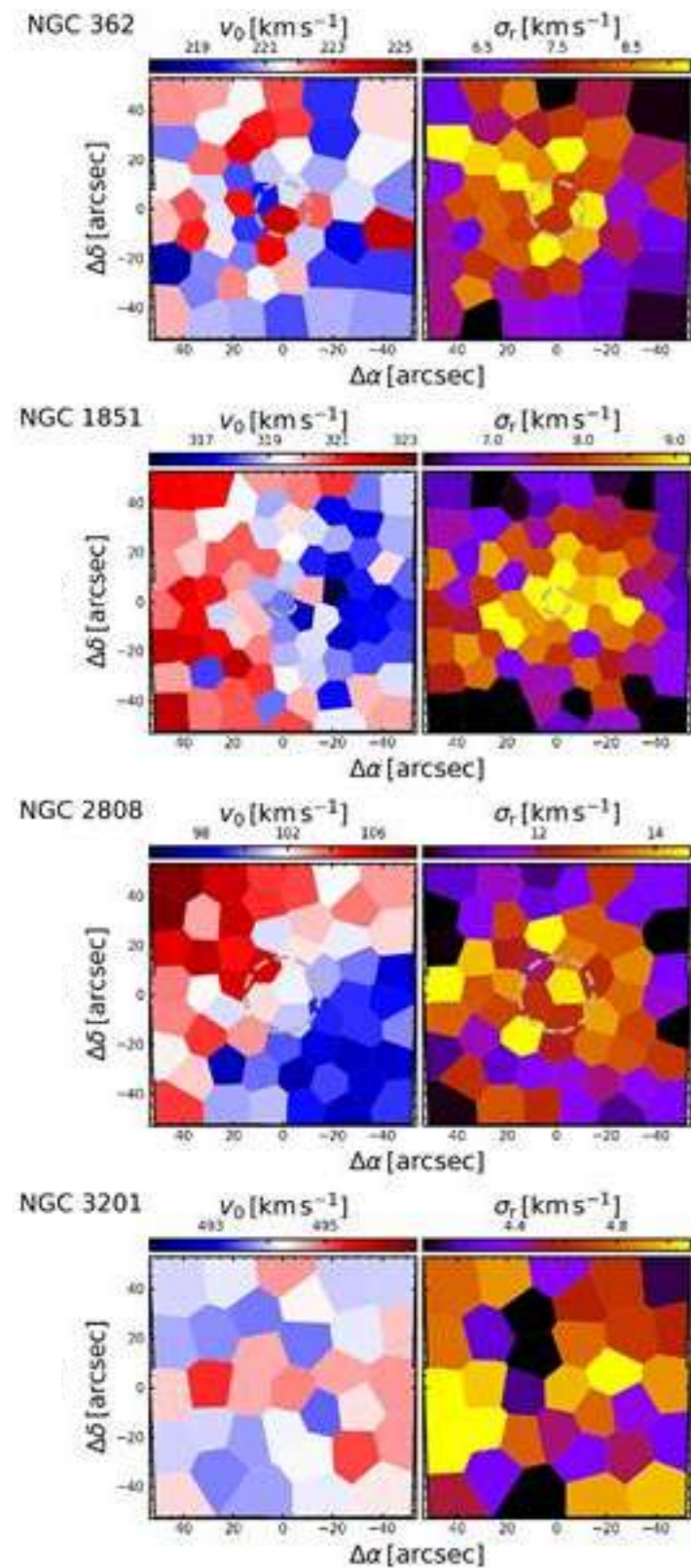


$$(*)[\text{Fe}/\text{H}] = \log_{10}\left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}}\right)_{*} - \log_{10}\left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}}\right)_{\text{Sun}}$$

AMAS GLOBULAIRES : DES SYSTÈMES PLUS COMPLEXES QUE PREVUS

AMAS GLOBULAIRES : ROTATION

Longtemps considérés des systèmes sans rotation, les mesures les plus récentes des vitesses spectroscopiques (effet Doppler) et des mouvements propres montrent que plus de la moitié des amas globulaires tournent autour de leur centre.



AMAS GLOBULAIRES : SPREAD EN METALLICITÉ

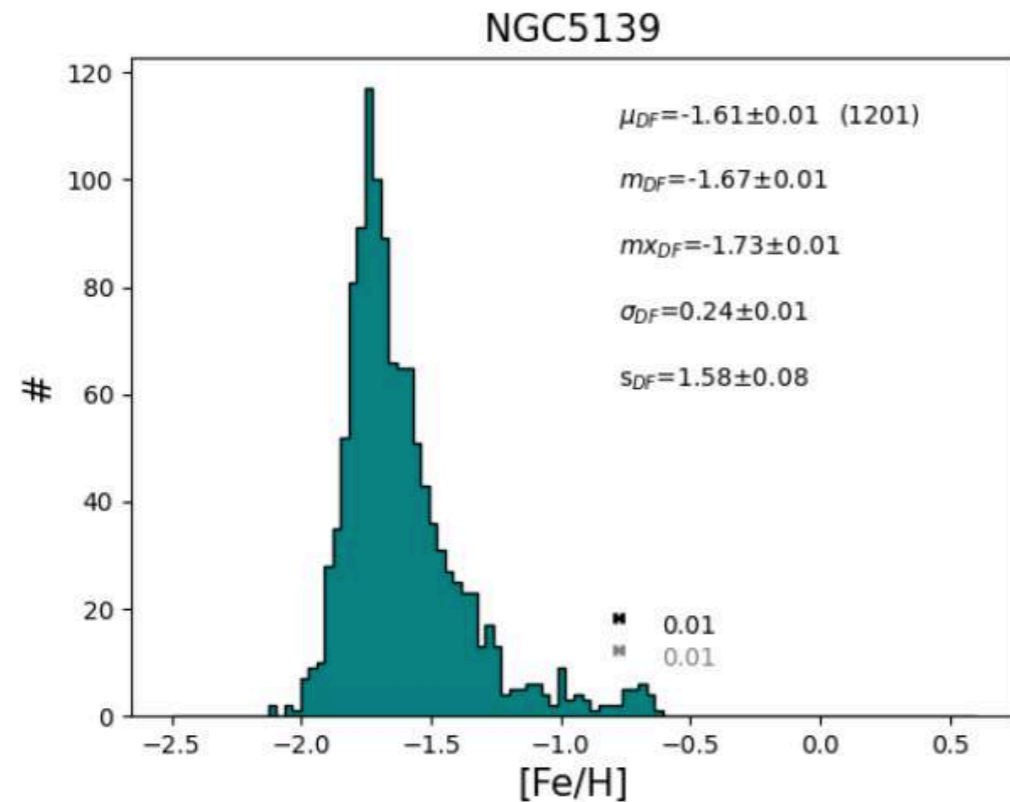
Certains amas contiennent des étoiles qui n'ont pas toutes les mêmes métallicités. On observe une dispersion (*spread*) significative en métallicité pour les amas suivant (Da Costa 2016) :

Table 1. Globular clusters with intrinsic [Fe/H] spreads

Cluster	M_V ¹	R_{gc} ¹ (kpc)	[Fe/H] Spread	Reference
NGC 1851	-8.33	16.6		Carretta <i>et al.</i> (2011)
NGC 5139 (ω Cen)	-10.26	6.4		Johnson & Pilachowski (2010)
NGC 5286	-8.74	8.9		Marino <i>et al.</i> (2015)
NGC 5824	-8.85	25.9		Da Costa <i>et al.</i> (2014)
NGC 6273 (M19)	-9.13	1.7		Johnson <i>et al.</i> (2015)
NGC 6656 (M22)	-8.50	4.9		Marino <i>et al.</i> (2009)
NGC 6715 (M54)	-9.98	18.9		Carretta <i>et al.</i> (2010)
NGC 6864 (M75)	-8.57	14.7		Kacharov <i>et al.</i> (2013)
NGC 7089 (M2)	-9.03	10.4		Yong <i>et al.</i> (2014)

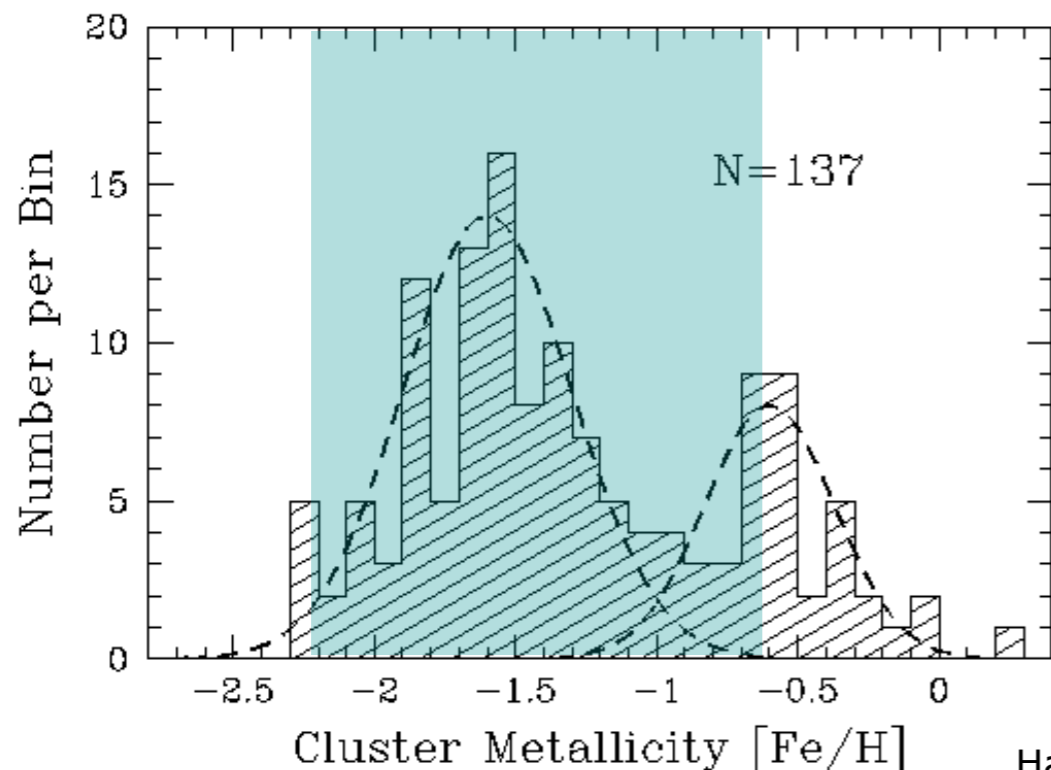
AMAS GLOBULAIRES : SPREAD EN METALLICITÉ

Pagnini et al, 2024, to be submitted



Omega Centauri (NGC 5139) contient des étoiles avec une dispersion en métallicité unique, avec des valeurs de [Fe/H] qui vont de -2.2 à -0.6 dex.

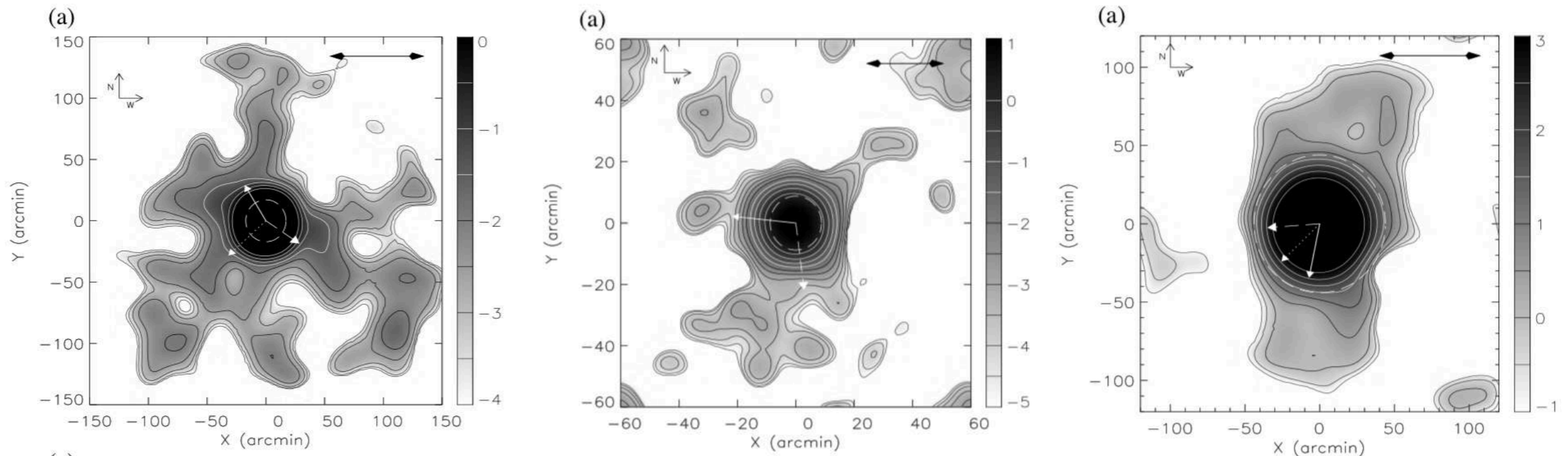
L'intervalle de métallicité couvert par Omega Cen représente une partie significative de l'intervalle de métallicité couvert par le système d'amas globulaires dans son ensemble (cfr Fig du haut et bas) !



AMAS GLOBULAIRES : MORPHOLOGIE ET QUEUES DE MARÉE

Dès le début des années 2000, on commence à avoir des evidences que certains amas montrent des étoiles au-delà de leur rayon de marée, le rayon qui défini la taille maximale du système.

Ces étoiles se redistribuent le long de structures complexes, qu'on appelle "queues de marée" ou "courants stellaires"

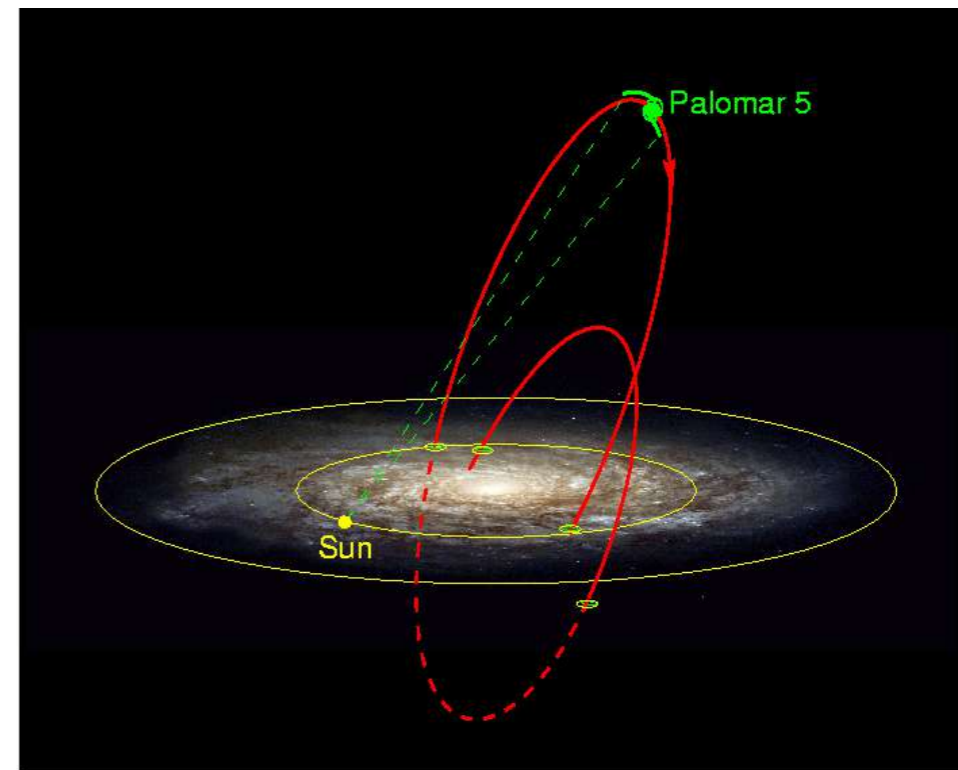
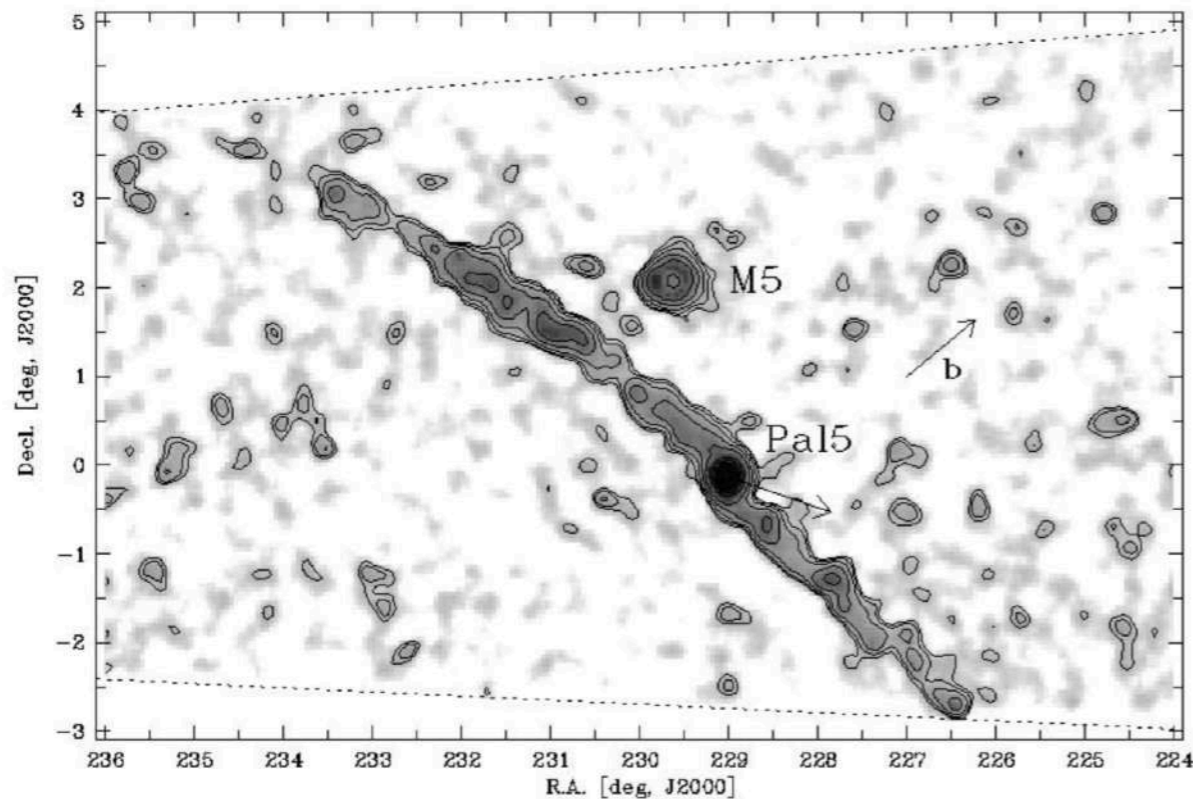


Leon et al 2000, A&A

AMAS GLOBULAIRES : MORPHOLOGIE ET QUEUES DE MARÉE

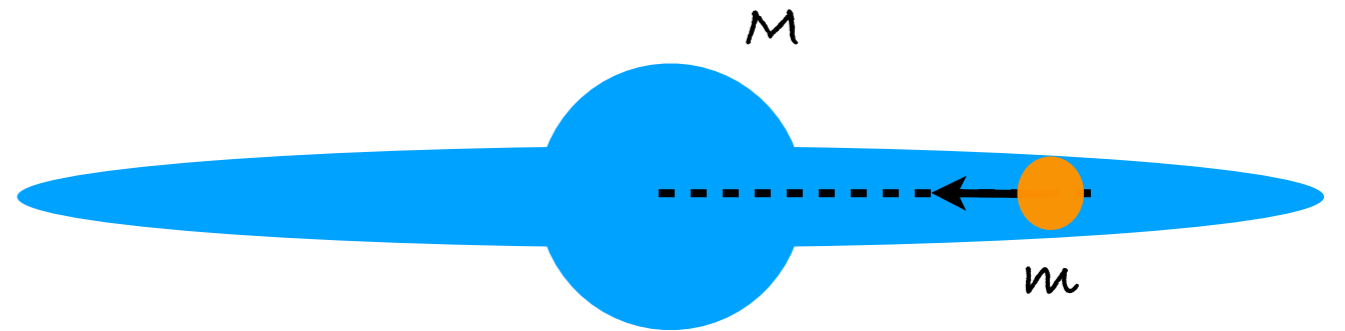
La découverte la plus extraordinaire d'un ensemble de queues de marée autour d'un amas globulaire reste, pour longtemps, associée à l'amas globulaire Palomar 5.

Les queues sont plus massives que l'amas dans son état actuel.
Pal 5 est dans les phases finales de destruction dans la Galaxie.

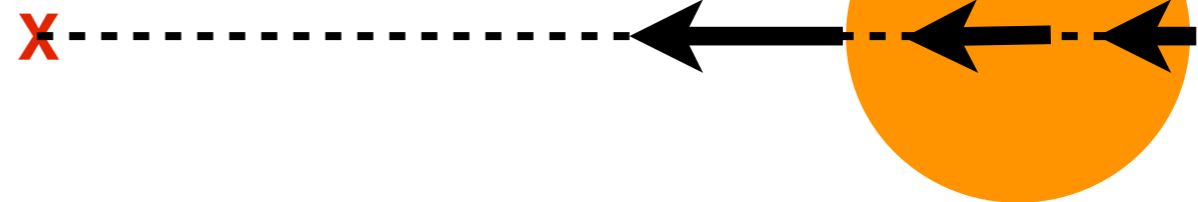


AMAS GLOBULAIRES : QUEUES DE MARÉE ET LEUR FORMATION

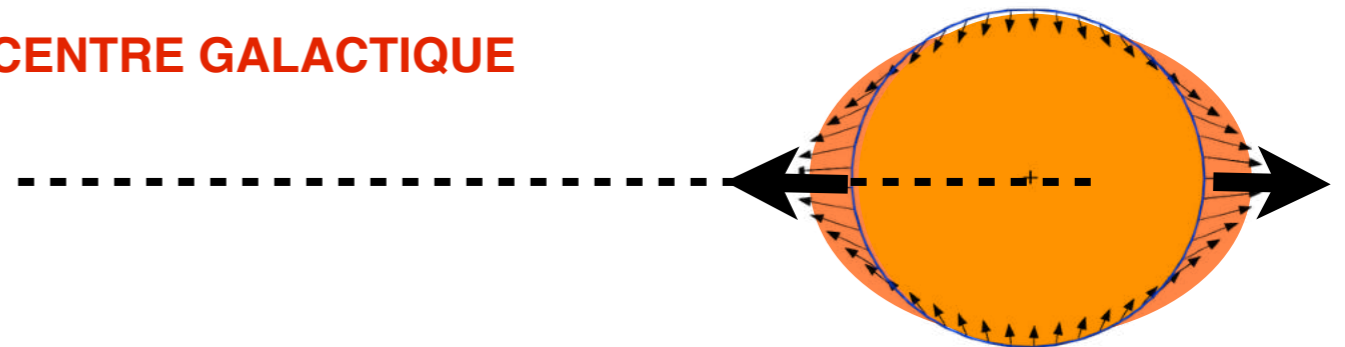
Ces structures se forment par effets de marée, auxquels tout corps de taille finie qui subit l'attraction gravitationnelle d'un autre corps est sujet.



CENTRE GALACTIQUE



CENTRE GALACTIQUE

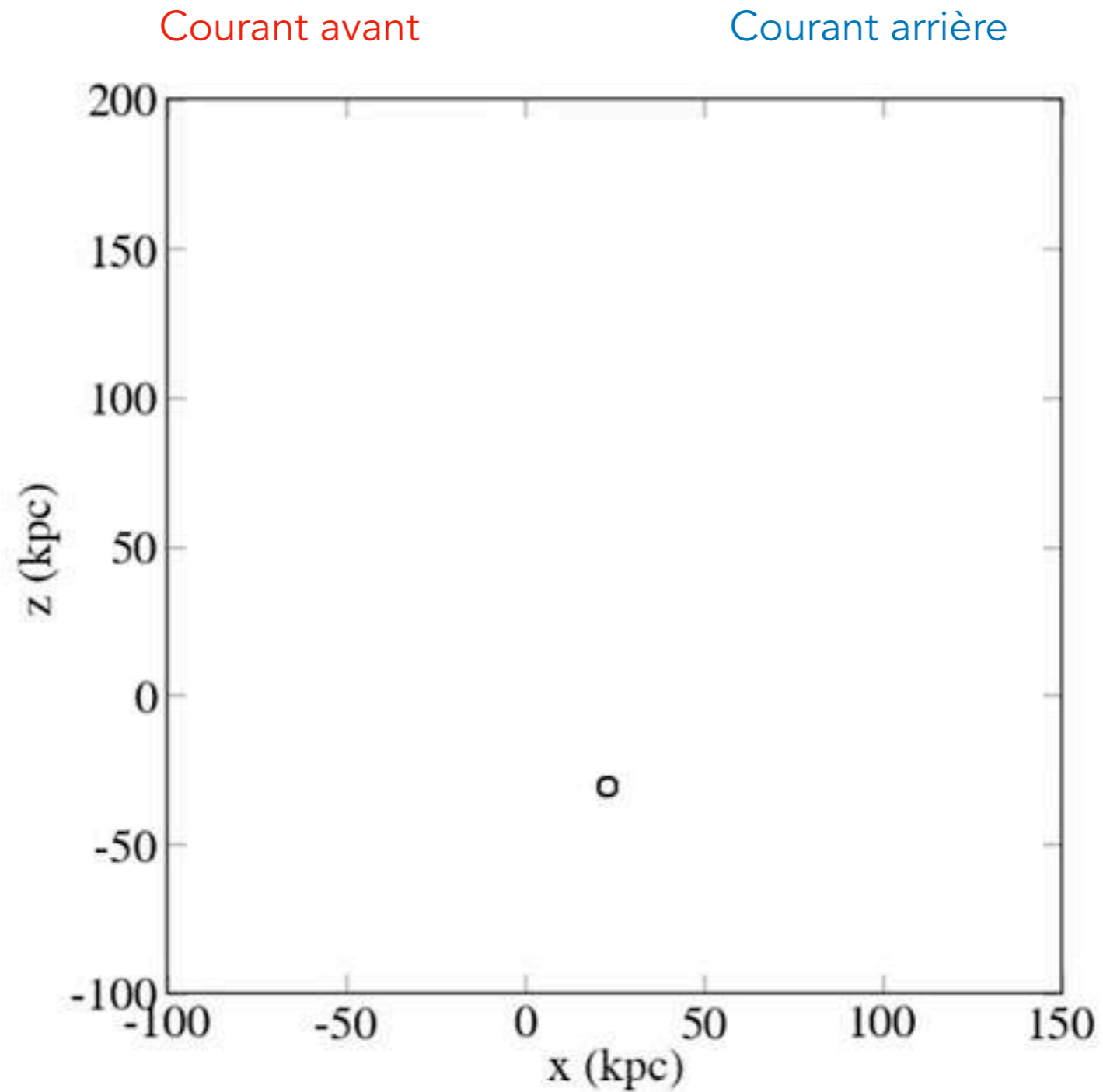


Effet de marée :

Variation de la force de gravitation en deux points d'un même corps de masse m et taille ΔR , exercée par un corps de masse M à la distance R

$$a_T \propto \frac{GM\Delta R}{R^3}$$

AMAS GLOBULAIRES : QUEUES DE MARÉE ET LEUR FORMATION

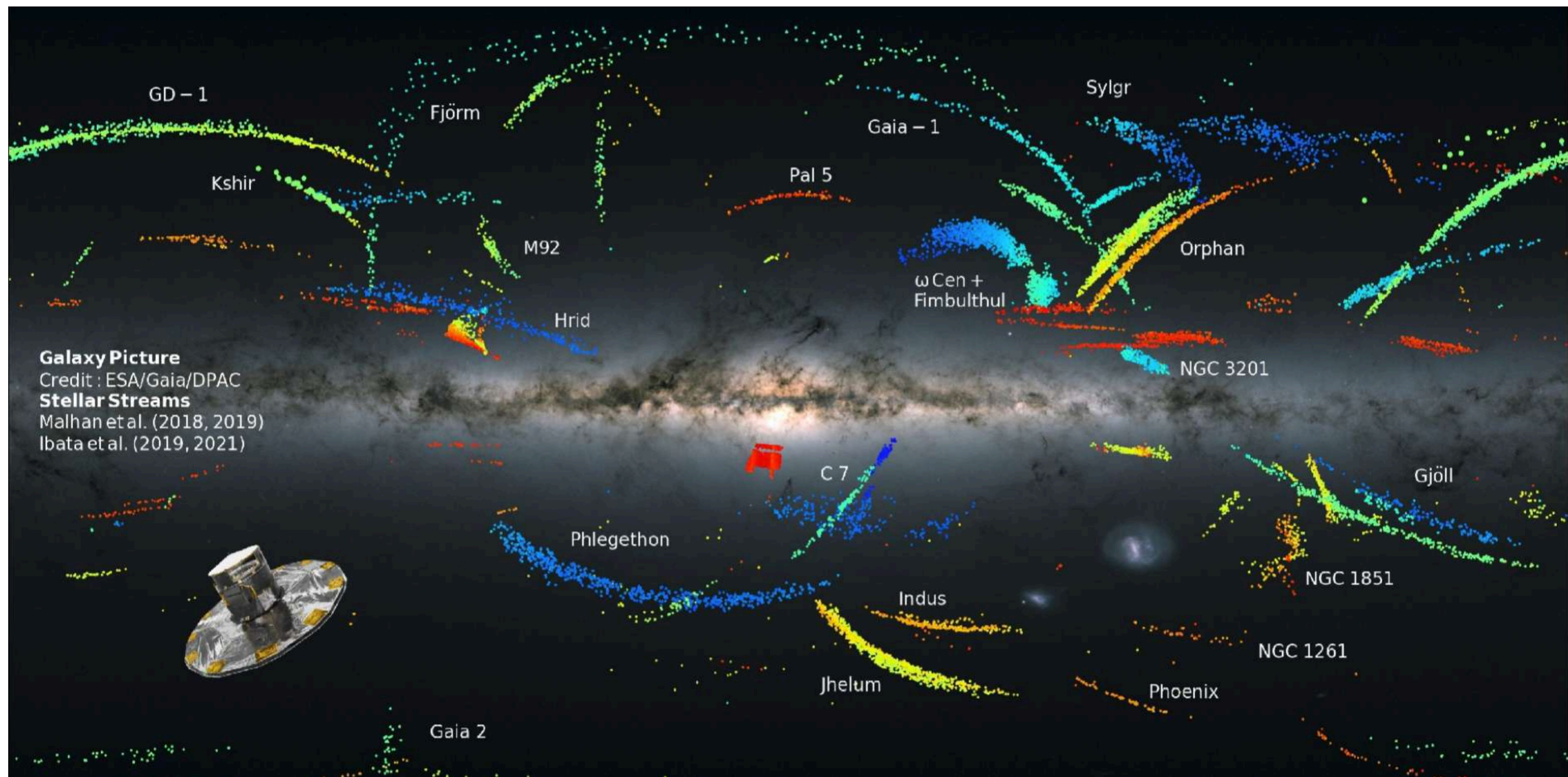


Credit : A. Bonaca

http://www.astro.yale.edu/abonaca/research/potential_recovery.html

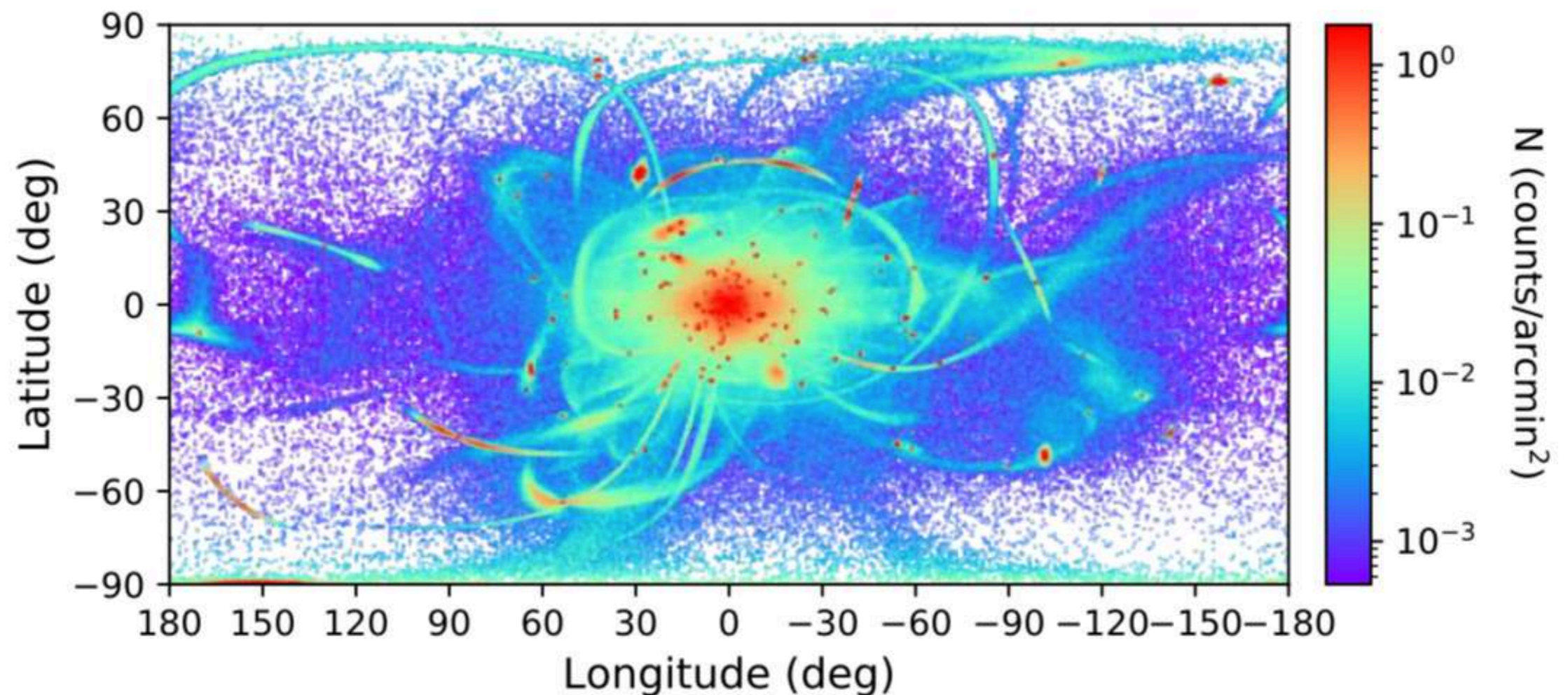
AMAS GLOBULAIRES : MORPHOLOGIE ET QUEUES DE MARÉE

Le courant de Palomar 5 a été pour longtemps l'un des rares exemples connus dans la Galaxie de courants "fins". Depuis la publication des données de la mission astrométrique Gaia de l'ESA, des dizaines de nouveaux courants stellaires ont été découverts.



AMAS GLOBULAIRES : MORPHOLOGIE ET QUEUES DE MARÉE

Les simulations numériques suggèrent que la Voie lactée devrait être “remplie” de ces structures, issues de la perte de masse de tous les amas globulaires galactiques.



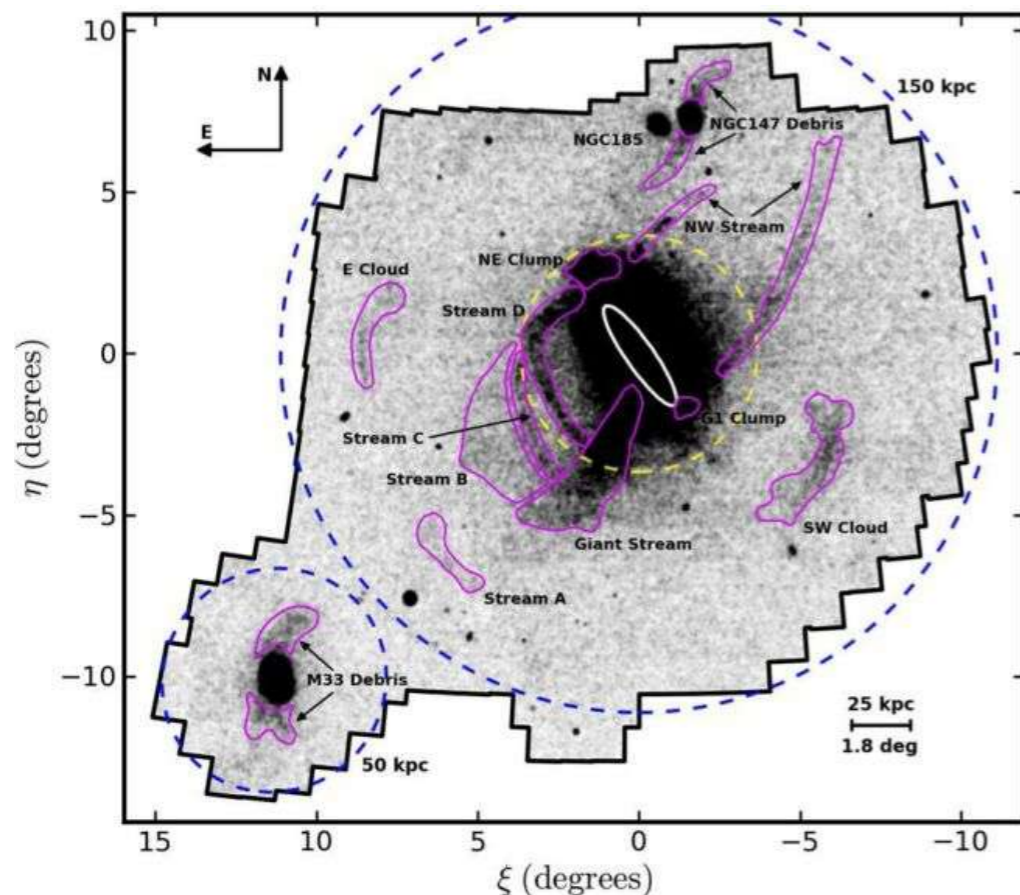
AMAS GLOBULAIRES GALACTIQUES : OÙ SE SONT-ILS FORMÉS ?

AMAS GLOBULAIRES : IN-SITU OU ACCRÉTÉS ?

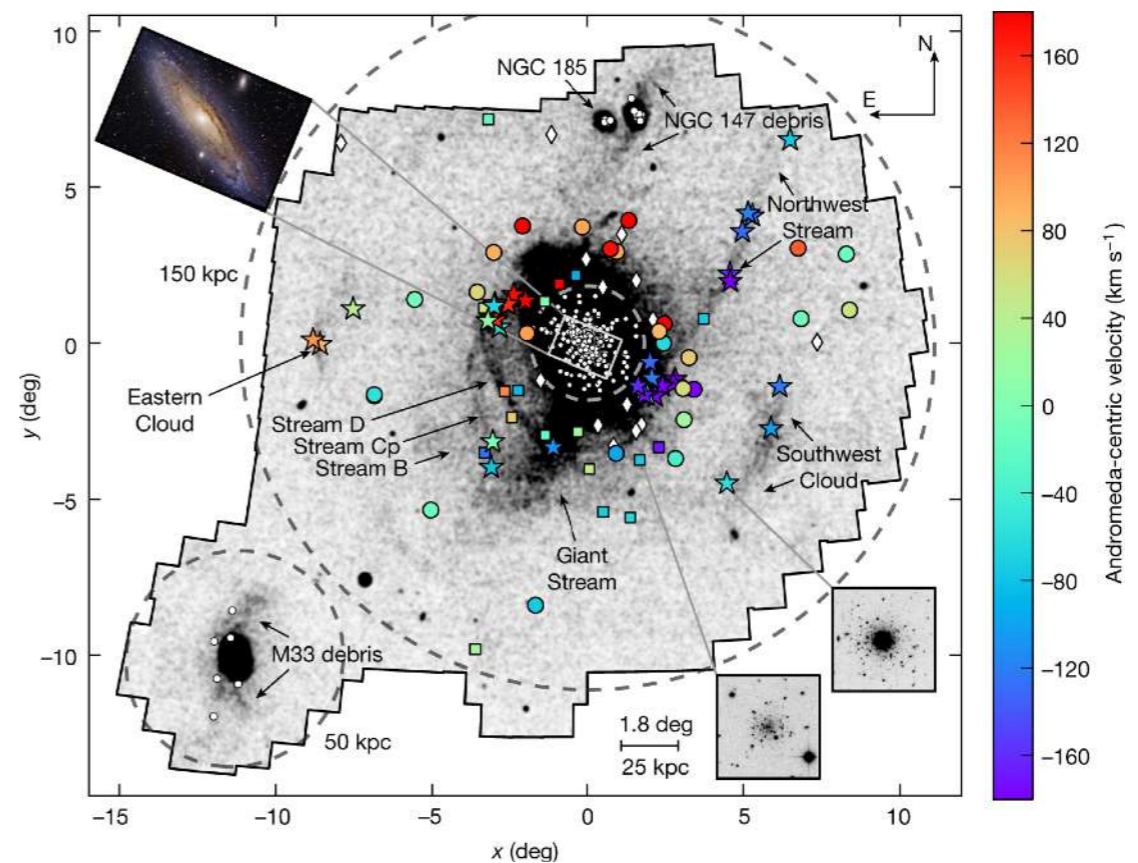
Le cas de la galaxie d'Andromède

Les régions externes de la galaxie d'Andromède sont perturbées (présence de courants stellaires géants, arcs,..) signe des anciennes accrétions subies par M31 au cours du temps.

De façon remarquable, une partie des amas globulaires dans Andromède se superpose à ces structures, signe que pas tous les amas globulaires aujourd'hui dans M31 se sont formés dans cette galaxie. Certains ont été apportés à M31, lors de fusions avec d'autres galaxies.



Ferguson & Mackey, 2016



Mackey et al 2019, Nature

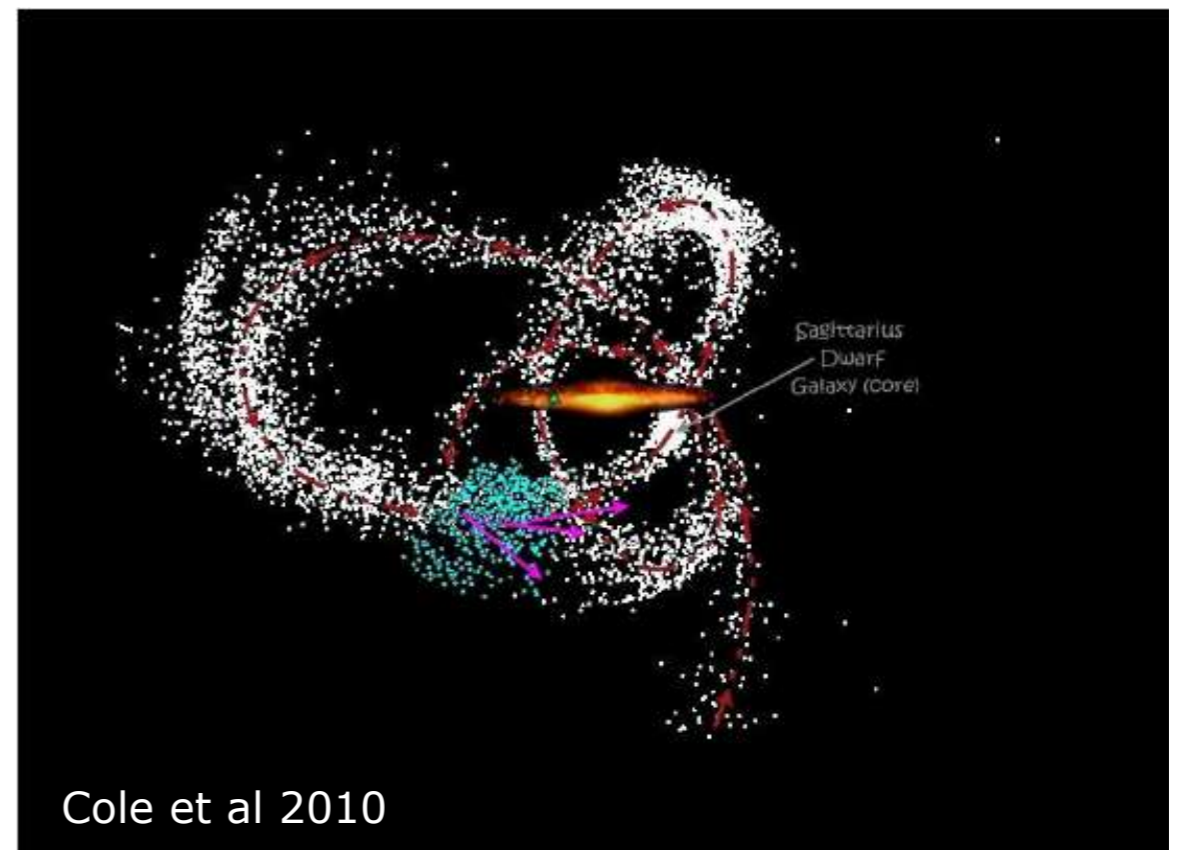
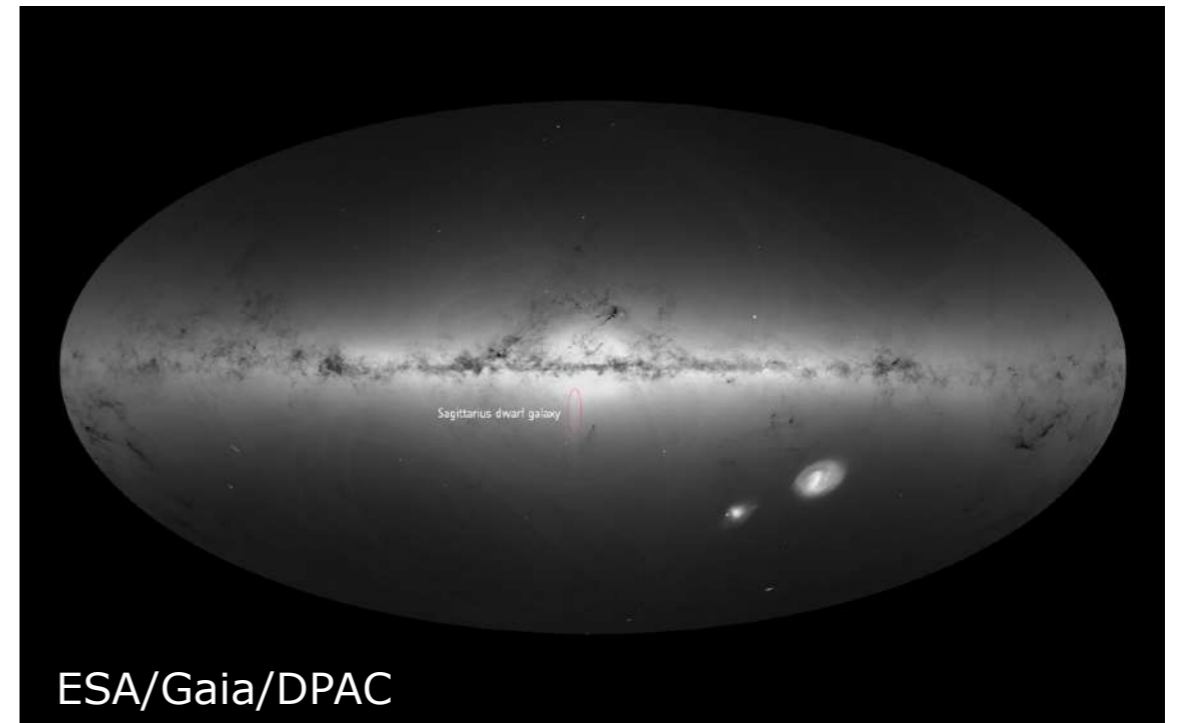
AMAS GLOBULAIRES : IN-SITU OU ACCRÉTÉS ?

Le cas de notre Galaxie et de Sagittaire

La Voie lactée est en train d'accréter une galaxie naine sphéroïdale, la galaxie du Sagittaire (Ibata et al 2004).

Le cœur de Sagittaire (la partie encore gravitationnellement liée) est actuellement au dessous du plan galactique.

De longs courants - formés d'étoiles qui ont été arrachées à Sag à cause des effets de marée exercés par notre Galaxie - partent du coeur de Sagittaire et enveloppent tout le disque galactique, jusqu'à des distances d'une centaine de kpc.

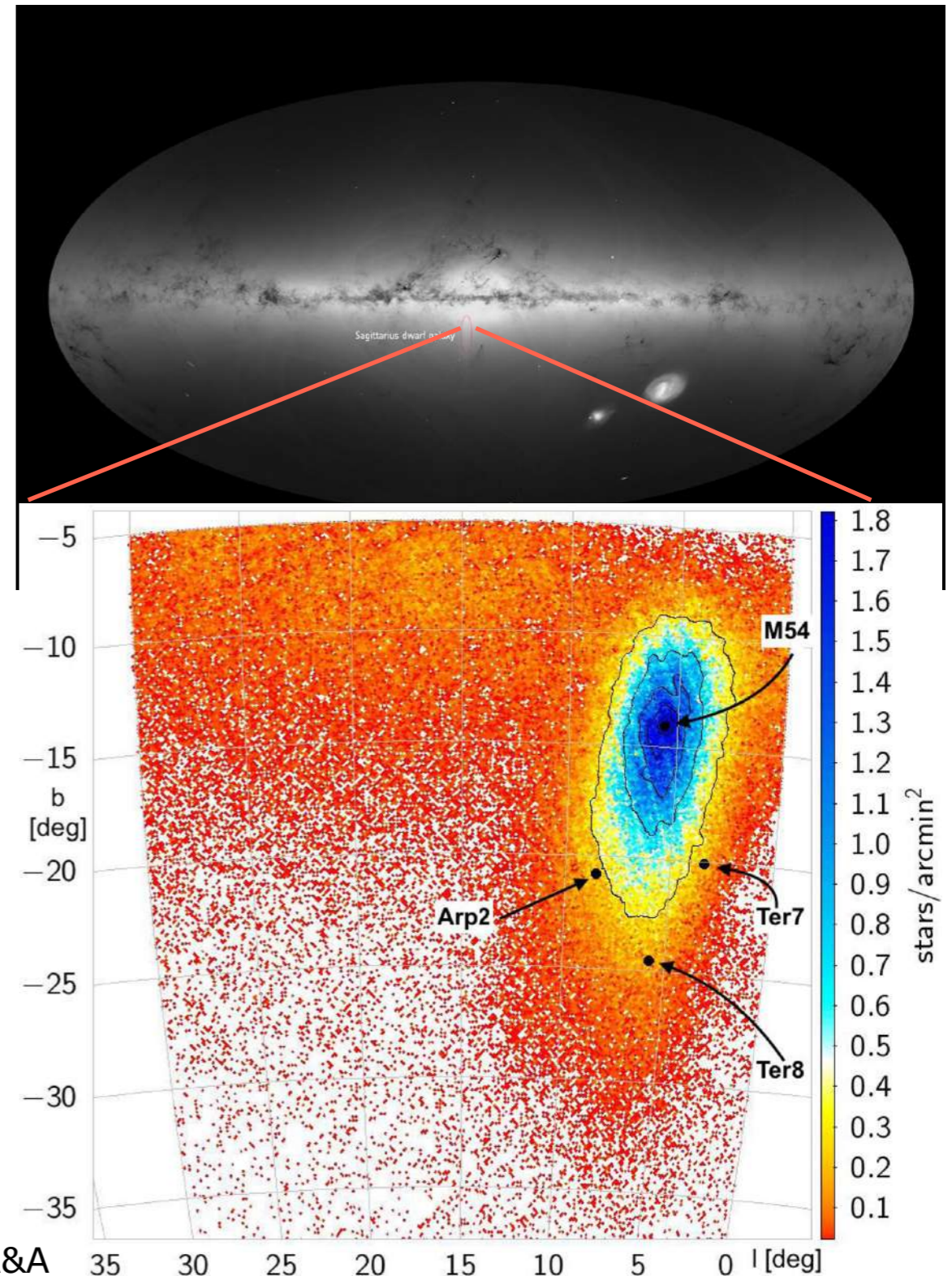


AMAS GLOBULAIRES : IN-SITU OU ACCRÉTÉS ?

Le cas de notre Galaxie et de Sagittaire

Il n'y a pas de doute que les amas M54 (NGC 6715), Arp2, Ter 7 et Ter 8, qui sont catalogués comme amas globulaires de notre Galaxie, sont en fait associés au cœur de Sagittaire. Leurs distances, vitesses spectroscopiques et mouvements propres sont cohérents avec ceux de Sagittaire.

Il s'agit donc d'amas qui sont en train de suivre Sagittaire dans son orbite autour de la Voie lactée.



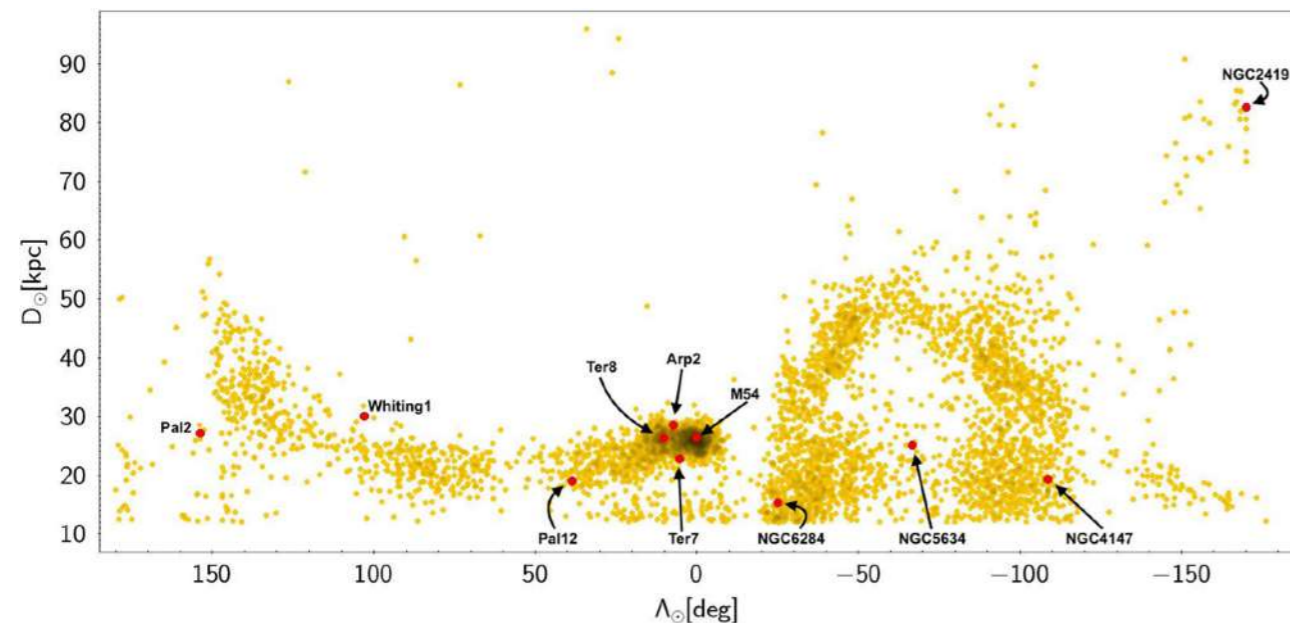
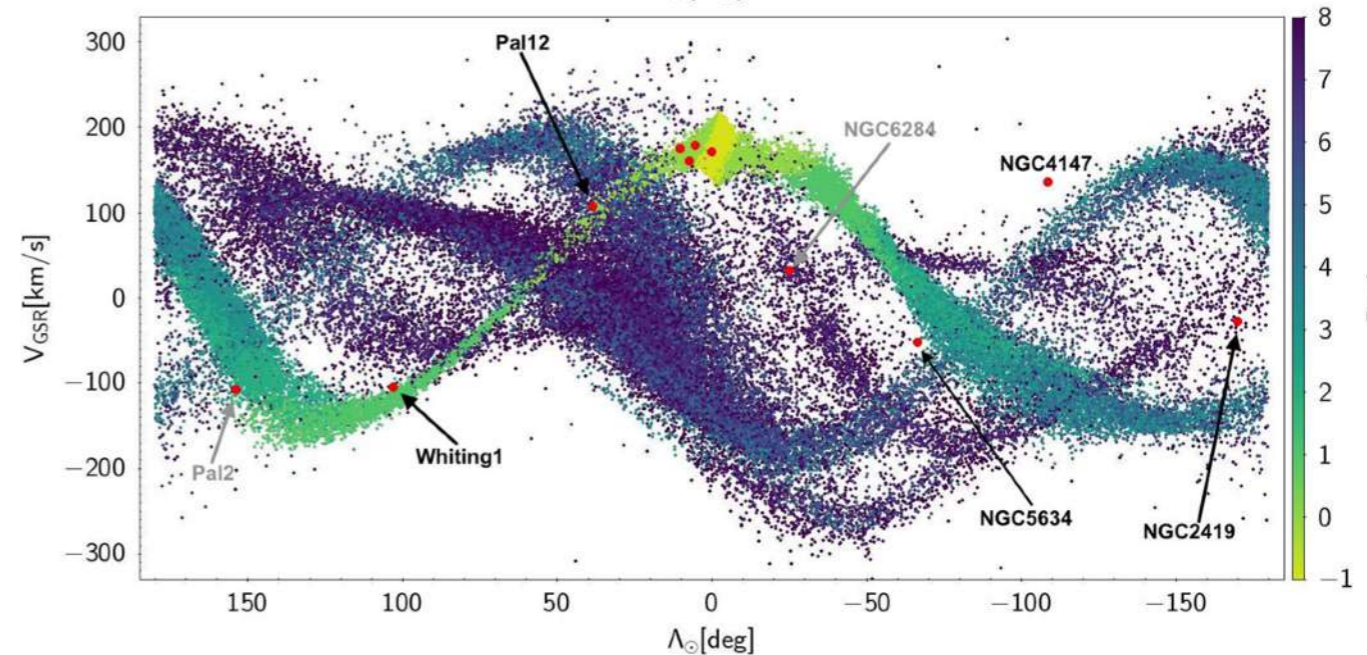
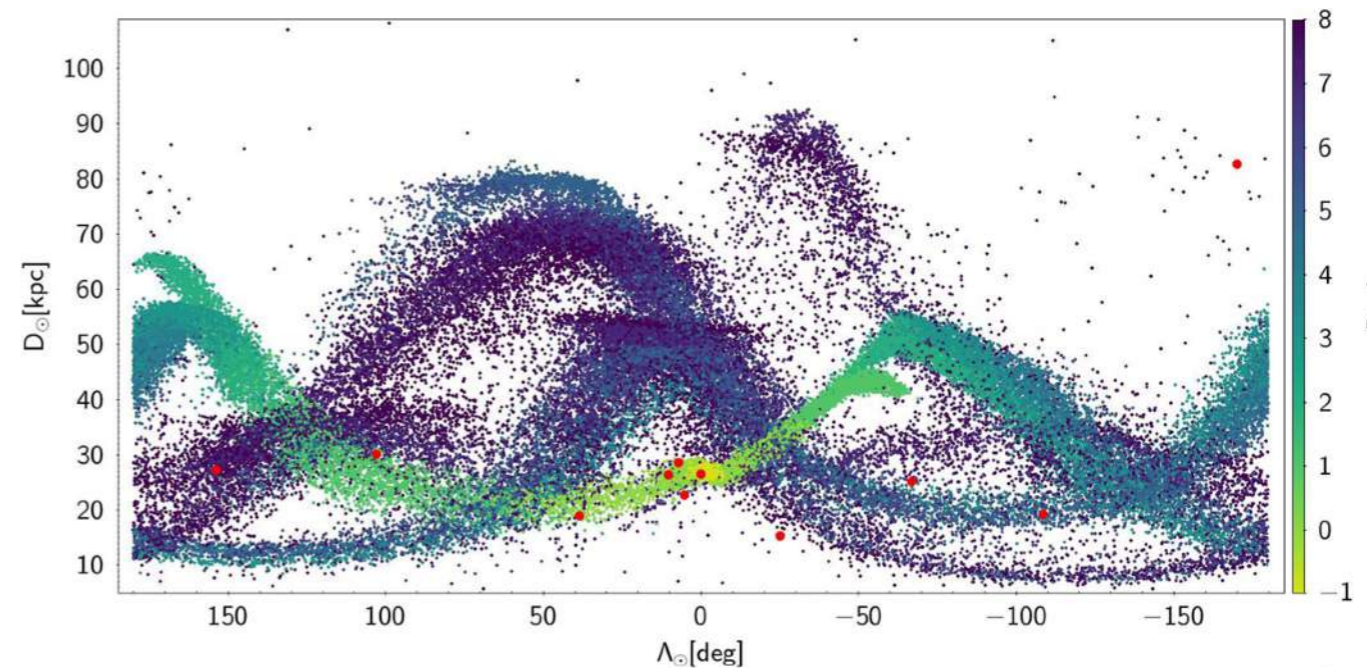
AMAS GLOBULAIRES : IN-SITU OU ACCRÉTÉS ?

Le cas de notre Galaxie et de Sagittaire

D'autres amas comme Pal 12, Pal2, Whiting 1, NGC 6284, NGC 5634 et NGC 4147 ont des propriétés cinématiques compatibles avec celles des étoiles dans les courants stellaires de Sagittaire.

Il s'agit donc d'amas perdus par Sagittaire lors des précédents péricentres de son orbite, et plus gravitationnellement liés à Sagittaire.

Bellazzini et al 2020, A&A



AMAS GLOBULAIRES : IN-SITU OU ACCRÉTÉS ?

Le cas de notre Galaxie

La galaxie de Sagittaire fournit donc une preuve claire qu'une partie des amas de notre Galaxie a une origine externe à la nôtre.

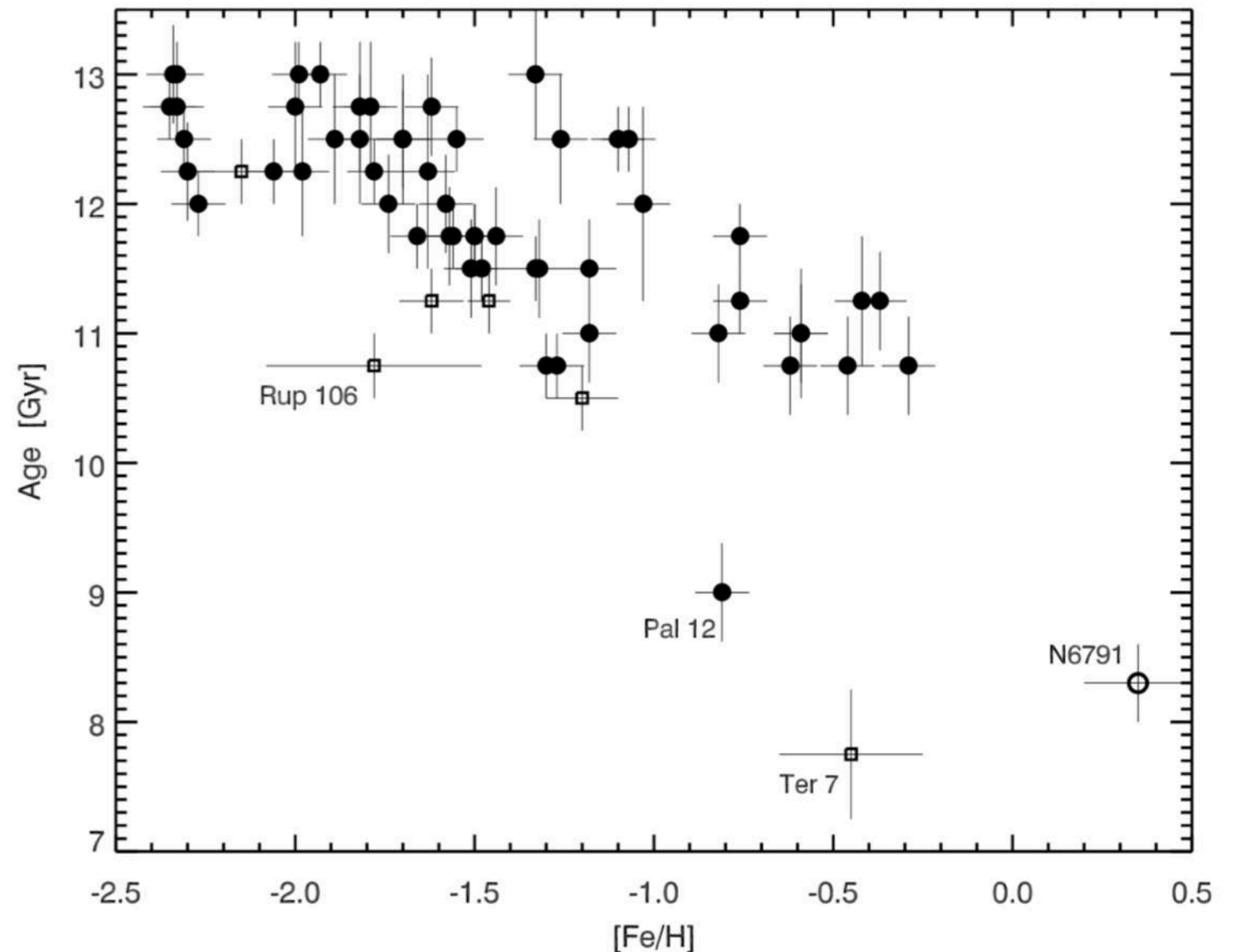
Il s'agit d'amas non pas formés dans la Voie lactée (i.e. in-situ) mais accrétés par la Galaxie au cours du temps.

Y-a-t-il d'autres évidences de cette double nature (in-situ/accrétés) des amas globulaires dans la Galaxie ?

AMAS GLOBULAIRES : IN-SITU OU ACCRÉTÉS ?

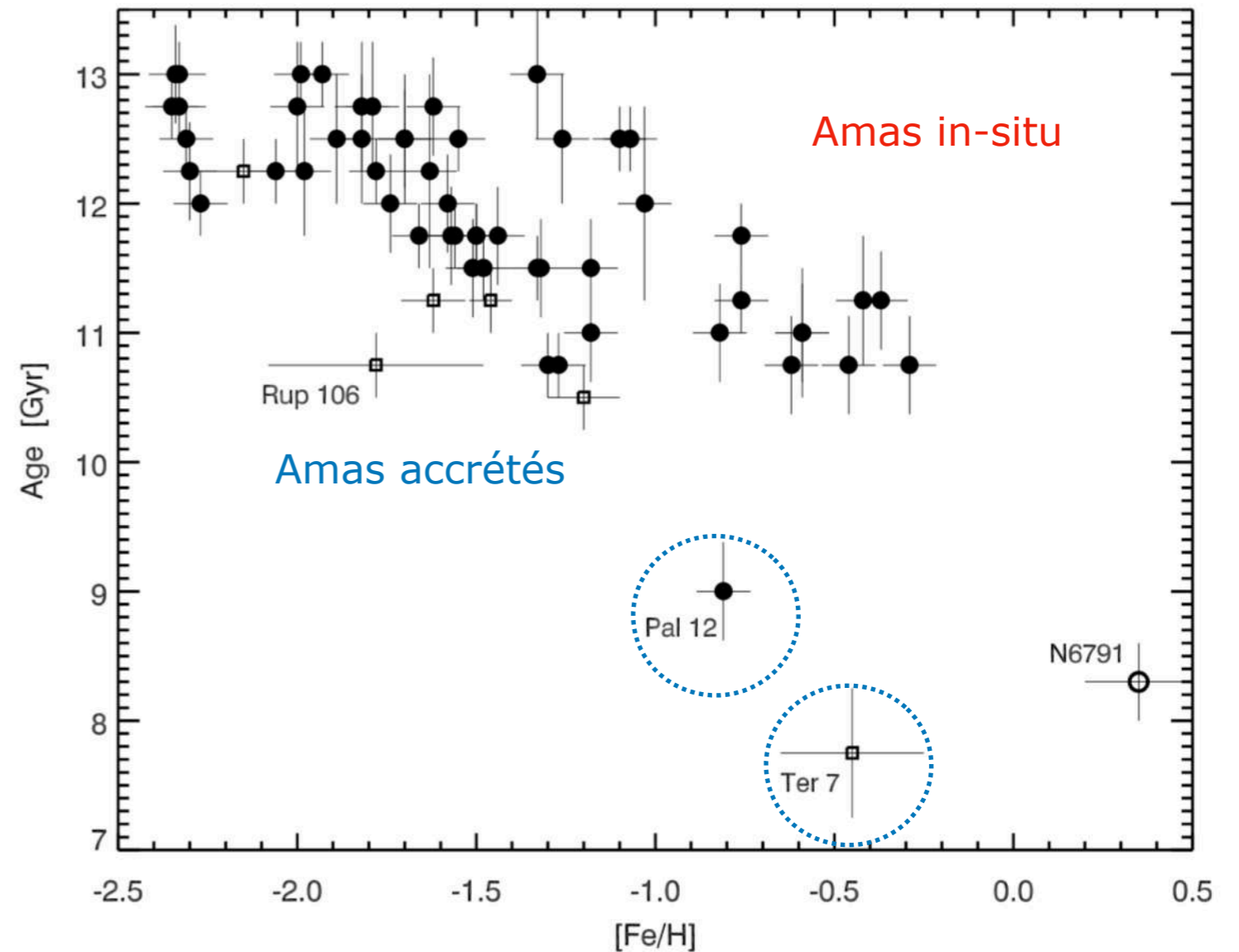
Si on reporte dans une figure les âges et les métallicités des amas globulaires galactiques, on voit que leur distribution présente une bifurcation, à $[Fe/H] > \sim -1.5$.

Pour $[Fe/H] > \sim -1.5$, on trouve une séquence constituée d'amas pauvres en métaux et vieux et une autre constituée d'amas pauvres en métaux mais plus jeunes.



AMAS GLOBULAIRES : IN-SITU OU ACCRÉTÉS ?

On interprète les deux branches comme dues, respectivement, à des amas formés in-situ (c-a-d dans la Voie lactée même) et à des amas accrétés lors de l'accrétion de leurs galaxies hôtes par la Voie lactée.



À LA RECHERCHE DES ACCRETIONS PASSÉES

À LA RECHERCHE DES ACCRÉTIONS PASSÉES

Nous avons vu que la Galaxie contient un certain nombre d'amas globulaires accrétés.

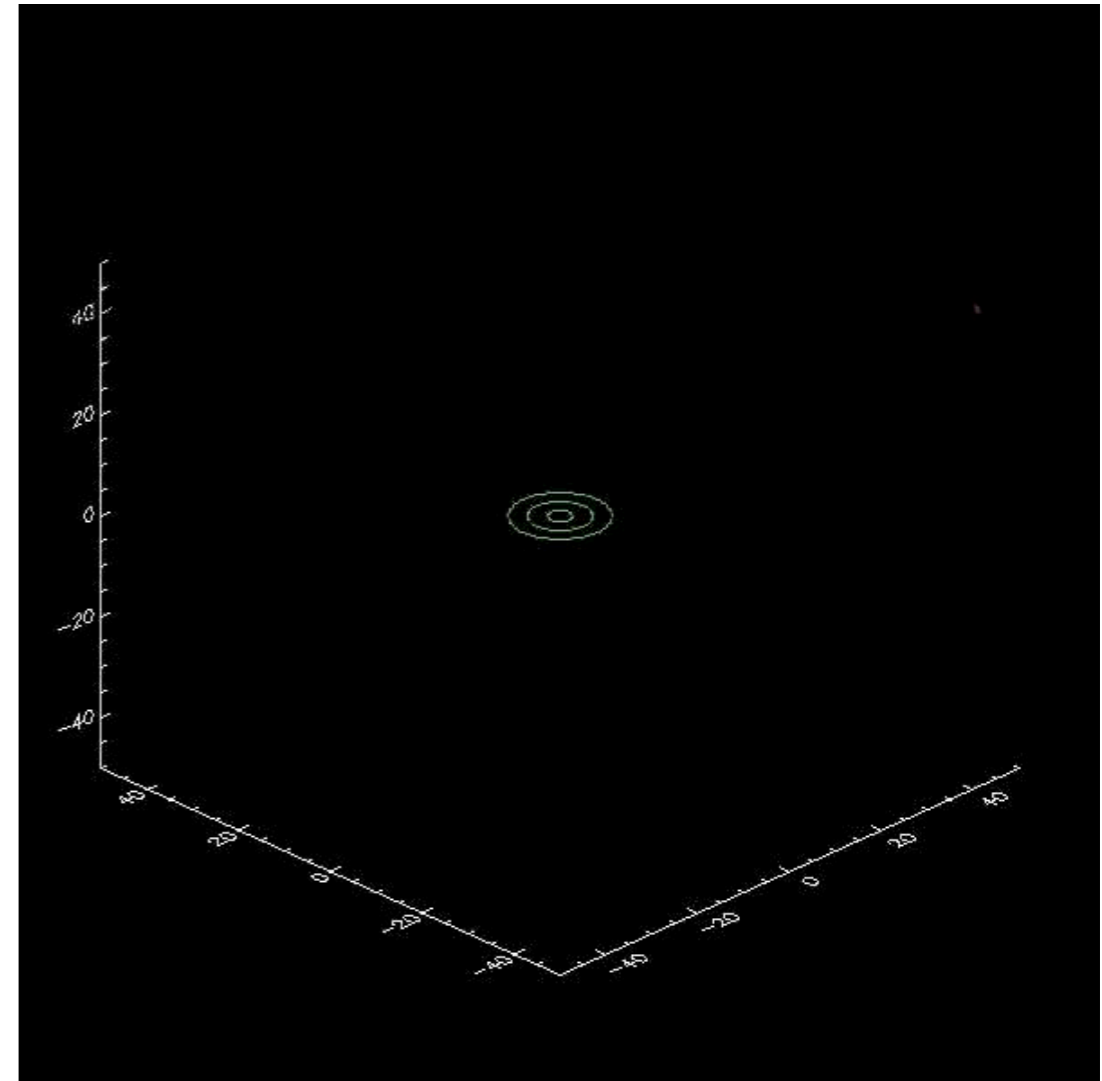
Mais de combien de différentes galaxies ces amas sont issus ? Et quand ont-elles été accrétées ?

À LA RECHERCHE DES ACCRÉTIONS PASSÉES

Les accrétions anciennes, c'est-à-dire celles qui se sont produites il y a plus de quelques milliards d'années, devraient avoir perdu leur cohérence spatiale (les échelles de temps dynamiques sont de ~ 250 Myr pour une étoile au rayon solaire).

Il n'est donc pas possible de retrouver ces accrétions anciennes en recherchant des surdensités spatiales ou cinématiques dans des régions spécifiques du ciel, comme on peut faire pour la galaxie de Sagittaire, dont l'accrétion est encore en cours.

Nous avons besoin d'autres traceurs.



Bullock & Johnston 2005

À LA RECHERCHE DES ACCRÉTIONS PASSÉES

Temps initial

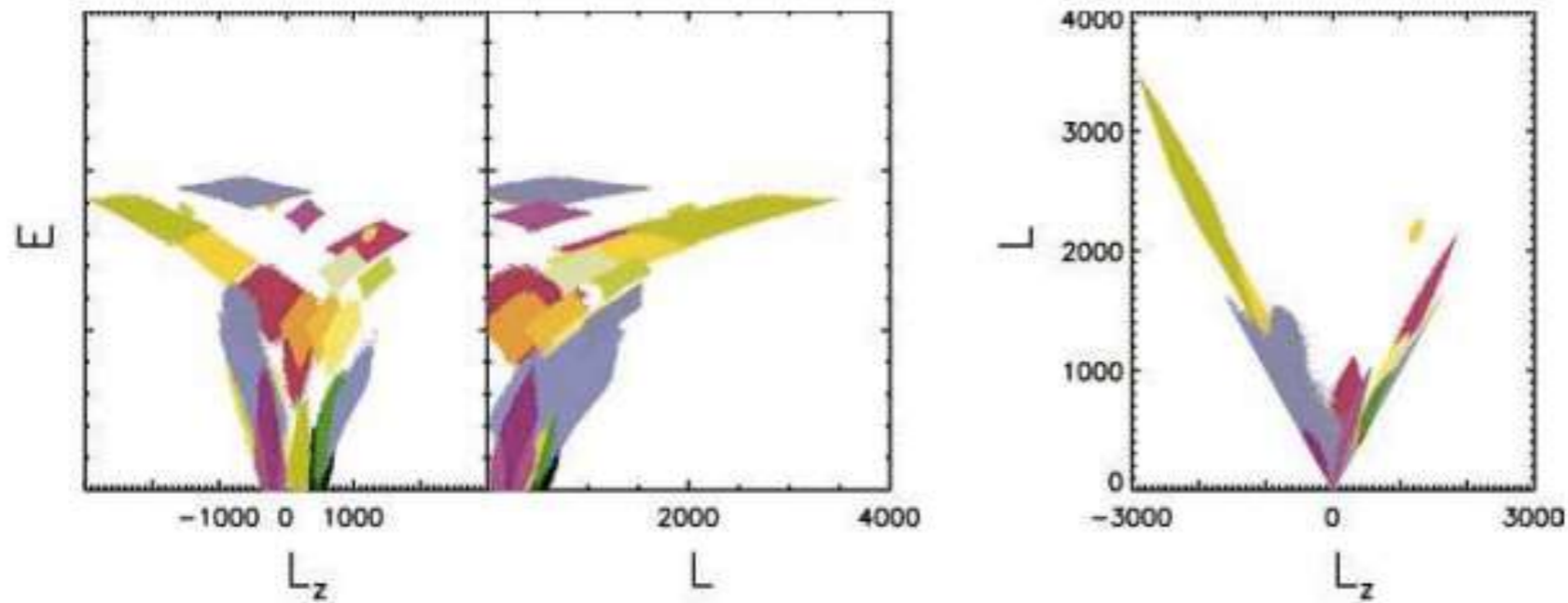
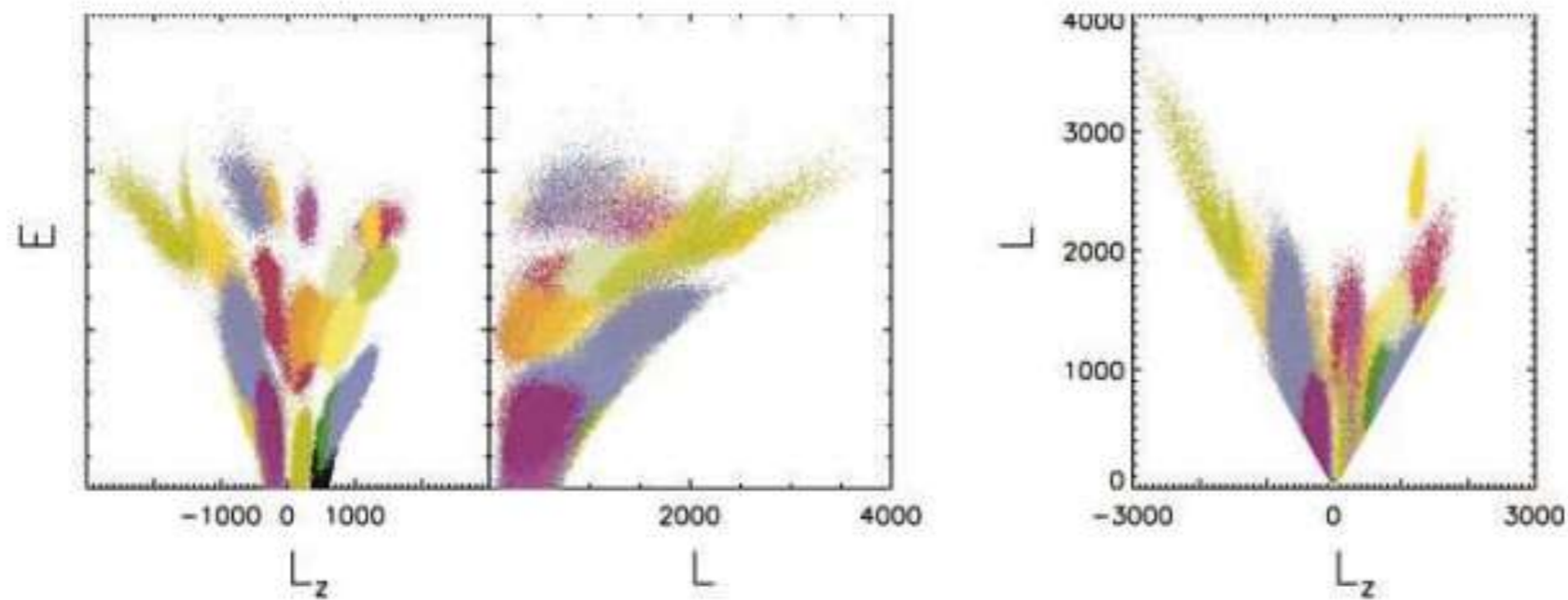


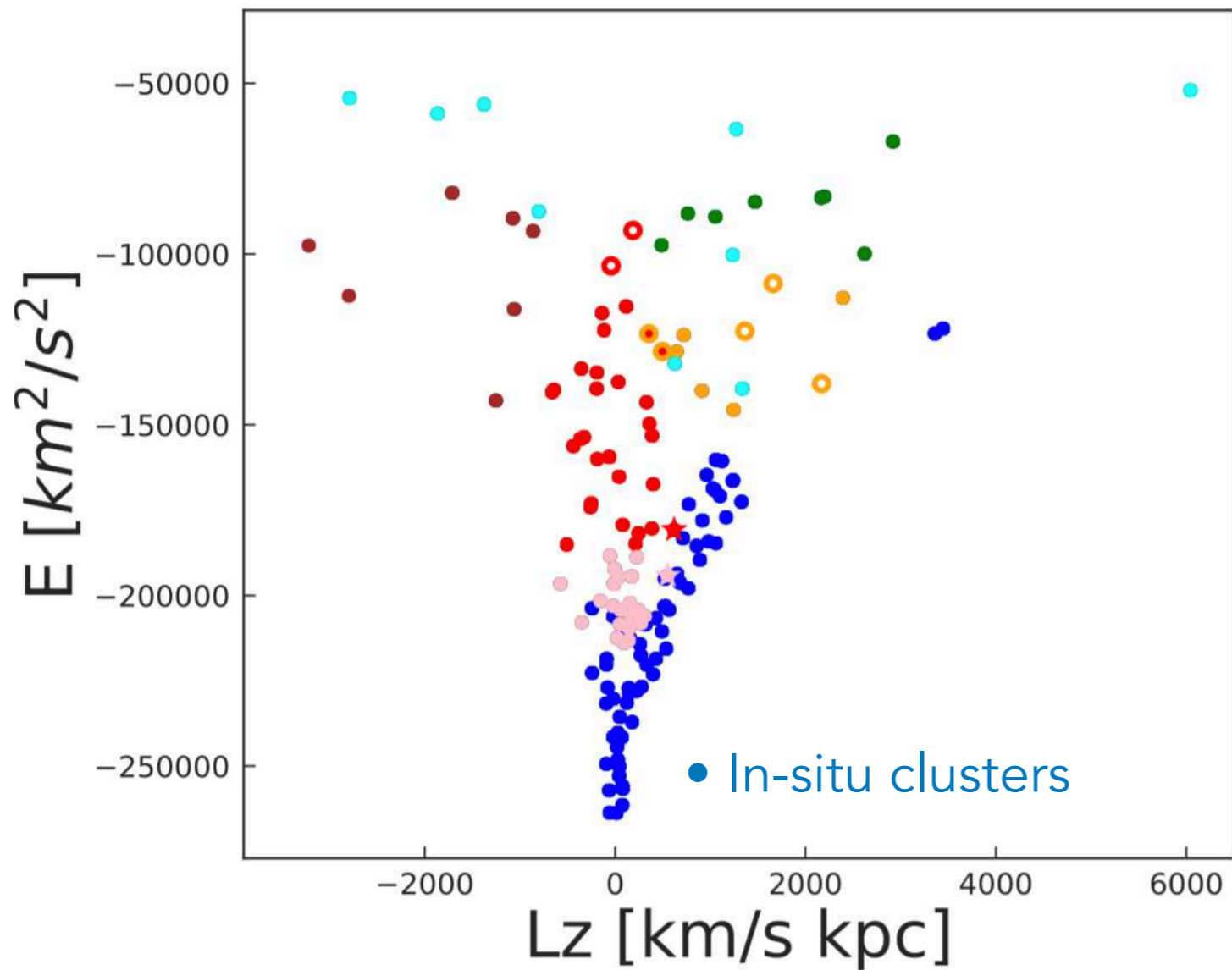
Figure 3. Initial distribution of particles in the integrals of motion space. The different colours represent different satellites.

Temps final



Recherche des accrétions passées dans les espaces des "intégrales du mouvements" dans l'hypothèse qu'ils soient conservés pendant une accrétion.

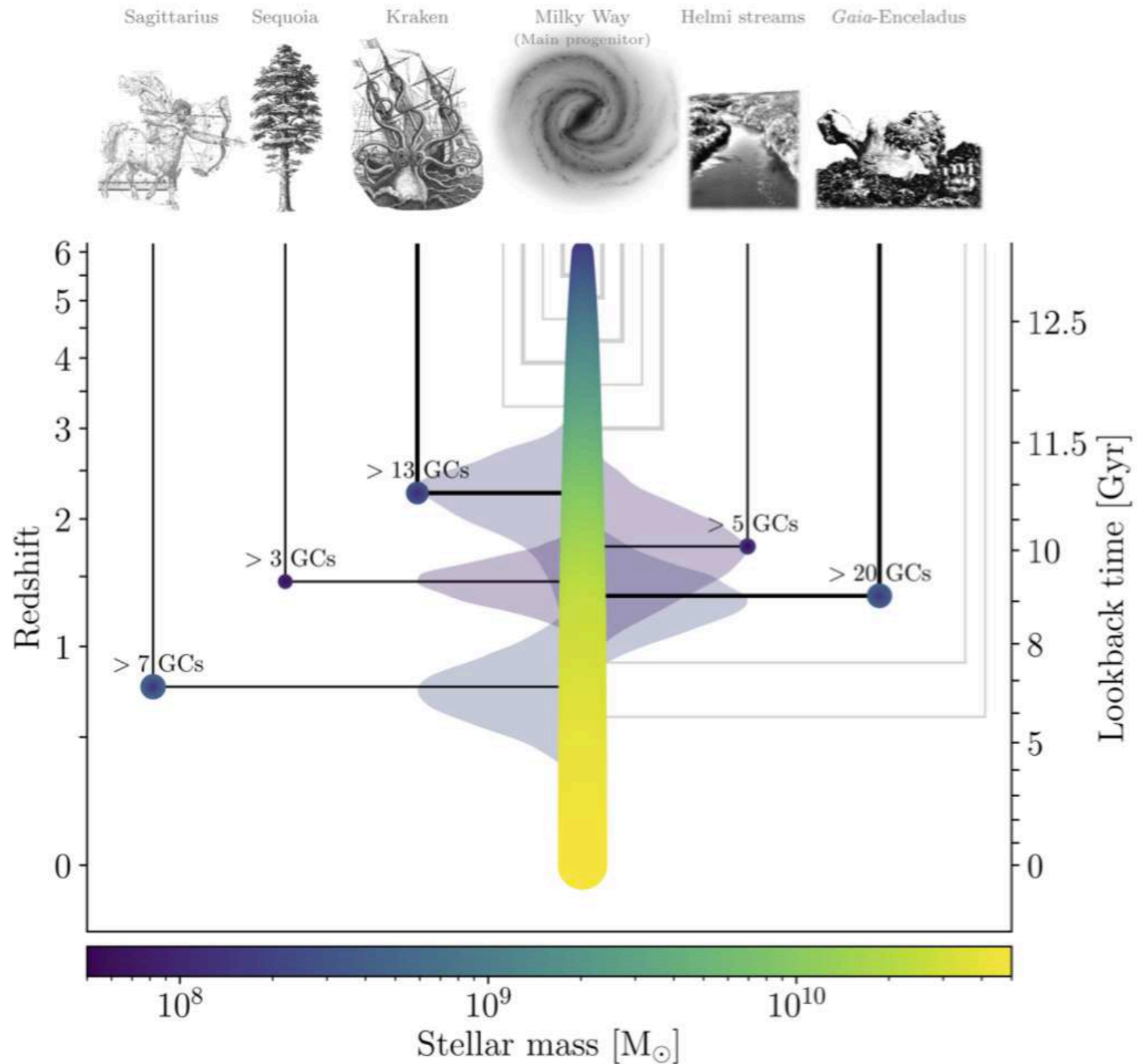
À LA RECHERCHE DES ACCRÉTIONS PASSÉES



C'est en se basant sur l'hypothèse que l'énergie et le moment angulaire des amas globulaires soient conservés pendant leur accrétion dans la Voie lactée qu'il a été suggéré d'associer les amas globulaires de la Voie lactée à plusieurs galaxies accrétées.

- Sagittarius
- Gaia Sausage-Enceladus
- Sequoia
- Helmi stream
- Low energy clusters
- High energy clusters

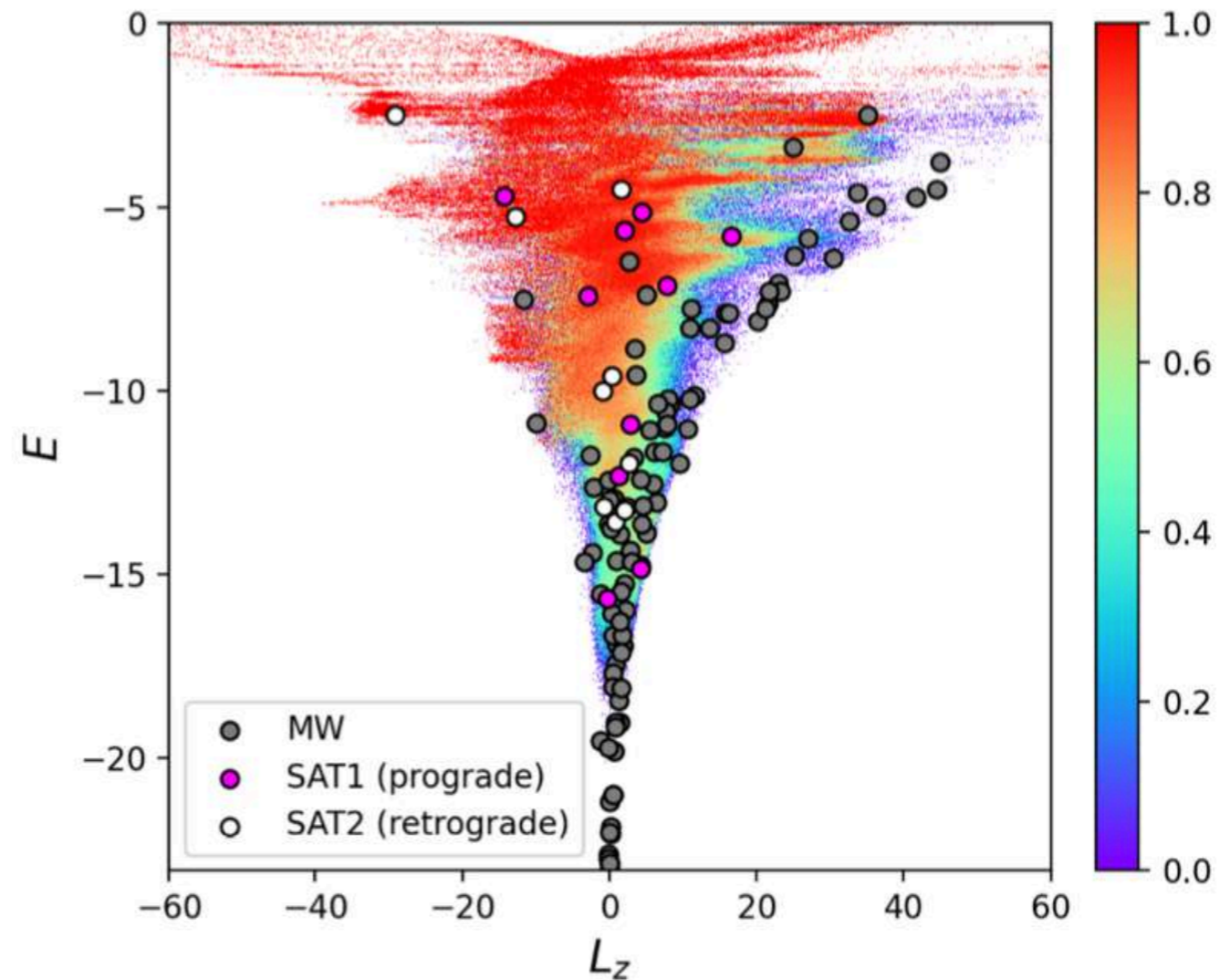
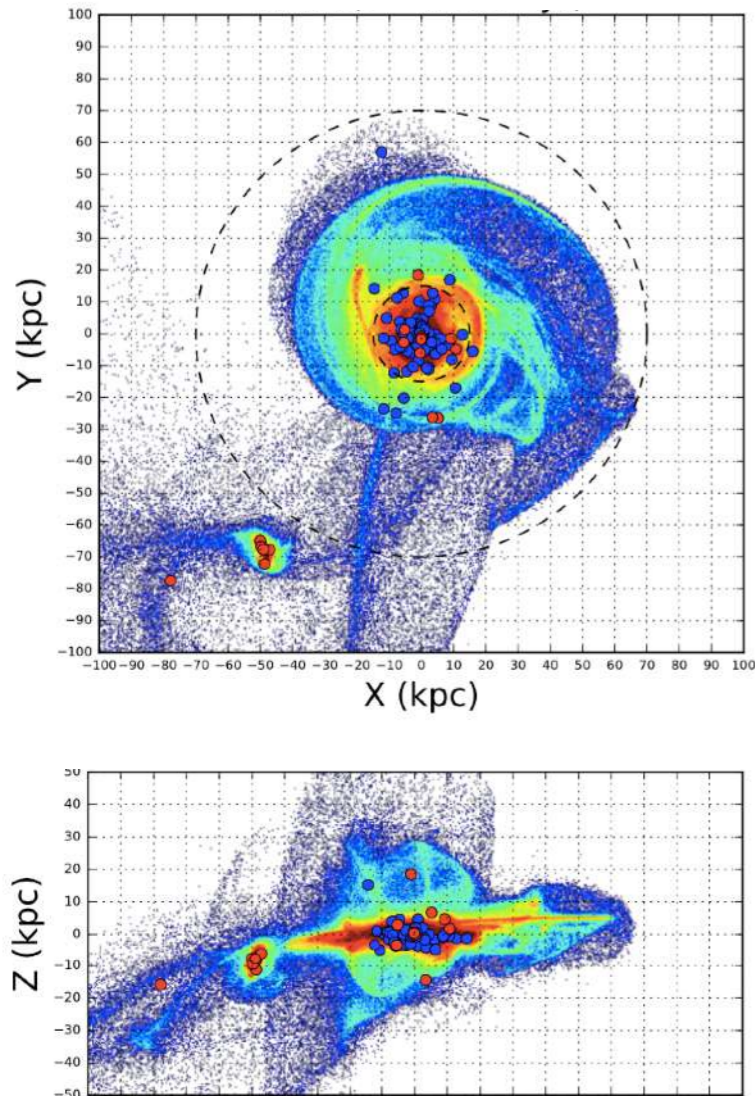
À LA RECHERCHE DES ACCRÉTIONS PASSÉES



A gauche, une possible arborescence d'accrétions de galaxies que la Voie lactée aurait subi au cours du temps.

À LA RECHERCHE DES ACCRÉTIONS PASSÉES

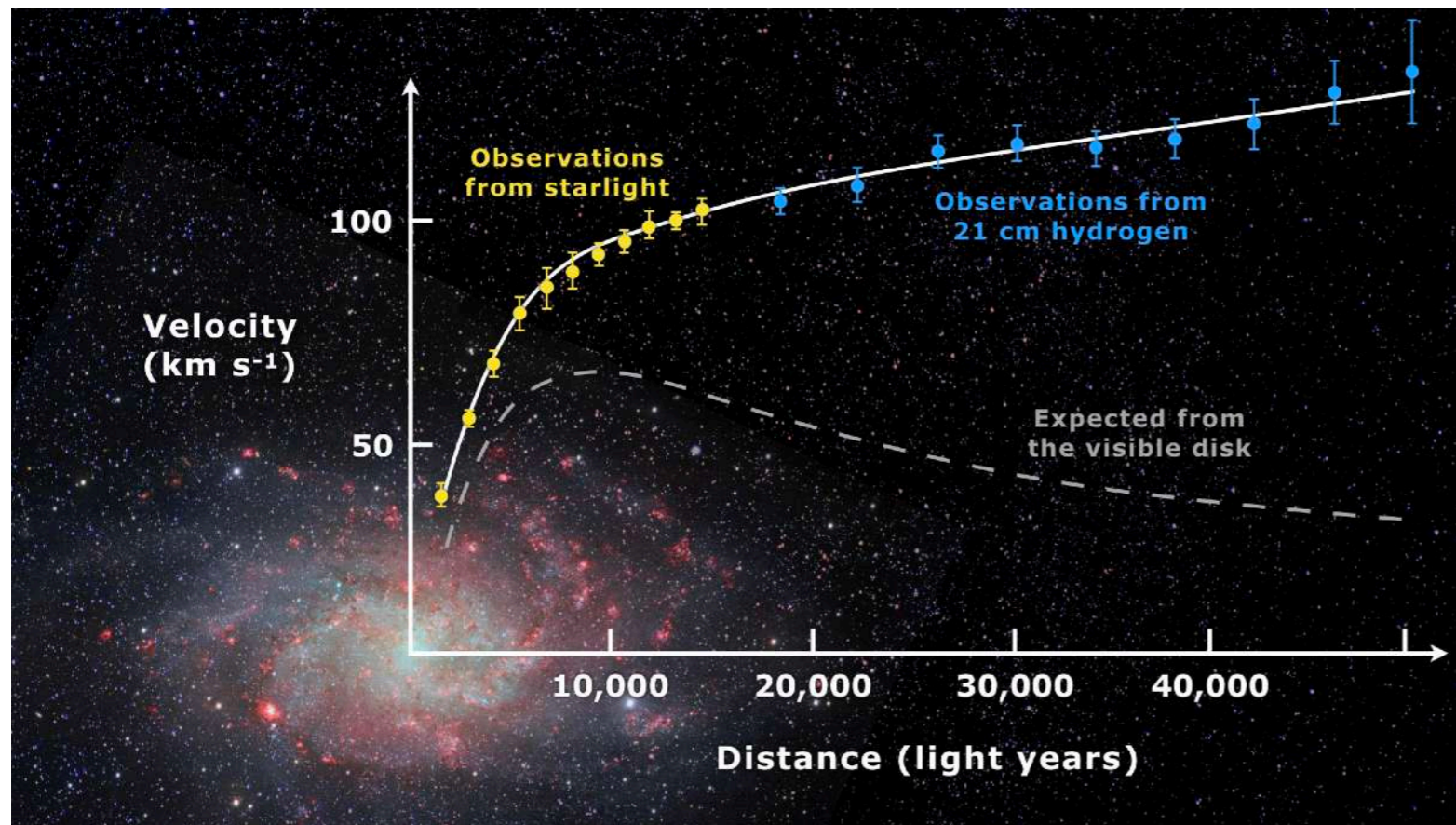
Cependant, l'énergie et le moment angulaire ne sont pas, en général, conservés pendant une accretion. L'interprétation de ces espaces est donc complexe.



AMAS GLOBULAIRES ET MATIÈRE NOIRE

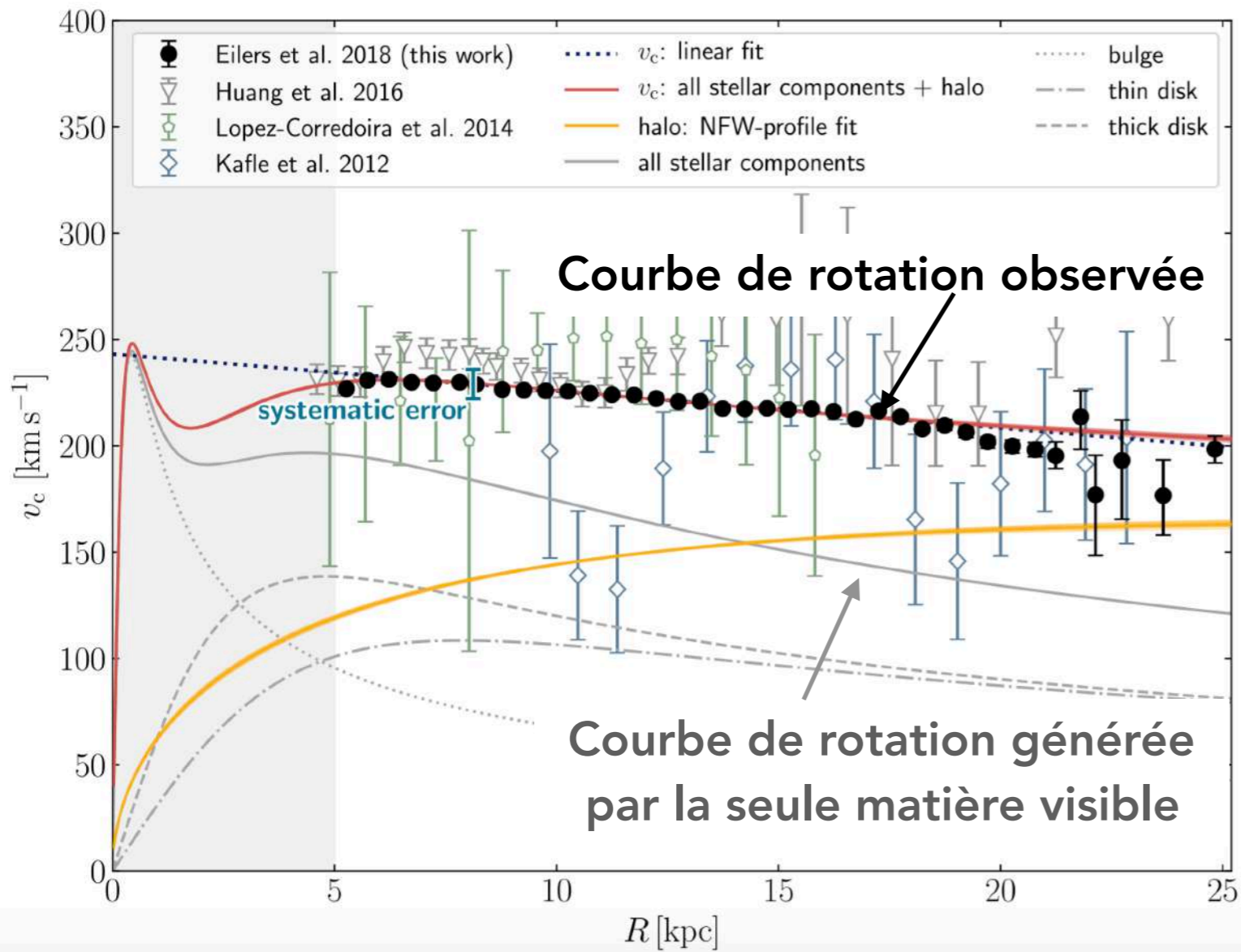
COURBE DE ROTATION ET HALO DE MATIÈRE NOIRE

Une petite excursion. Dans le régime de gravité newtonien, la première évidence de la présence de matière noire (non visible) à l'échelle galactique est donnée par la courbe de rotation, c-a-d la courbe qui montre la vitesse de rotation du gaz et/ou des étoiles en fonction de leur distance au centre de la galaxie.



A grande distance du centre, la rotation est trop élevée par rapport à ce qu'on s'attendrait en prenant en compte la seule matière visible (étoiles et gaz).

COURBE DE ROTATION ET HALO DE MATIÈRE NOIRE

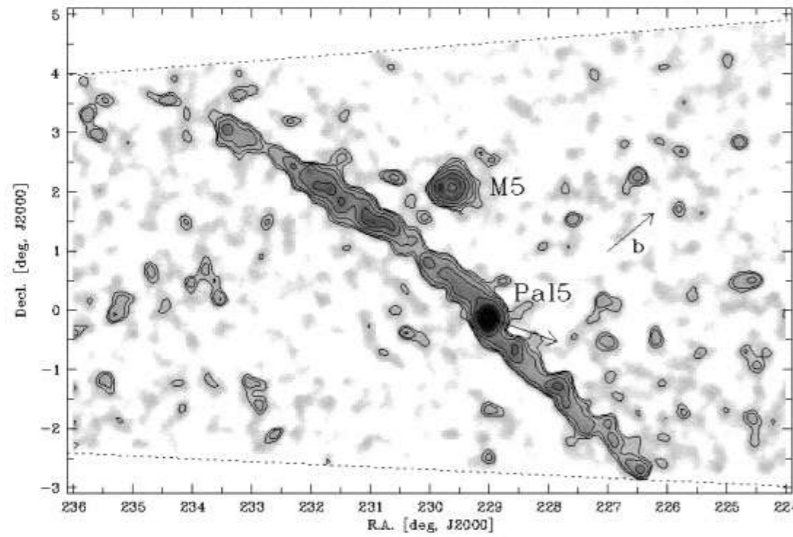


Ceci est valide aussi pour notre Galaxie, où la courbe de rotation ne peut pas être expliquée en prenant en compte la seule distribution de matière visible.

COURBE DE ROTATION ET HALO DE MATIÈRE NOIRE

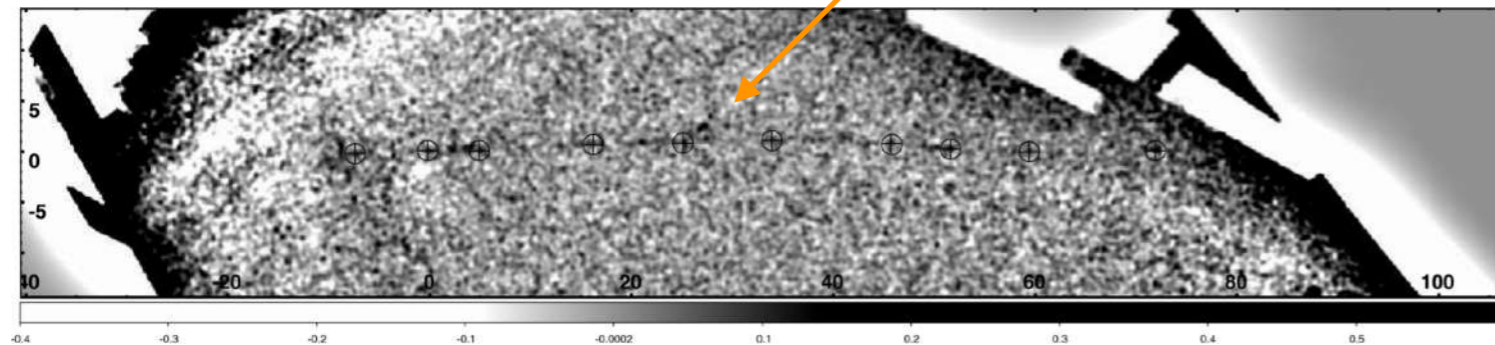
Pour nous renseigner sur la distribution de la matière noire à grandes distances et hors du plan galactique, nous avons besoin d'autres traceurs, comme les courants stellaires.

COURANTS STELLAIRES ET HALO DE MATIÈRE NOIRE



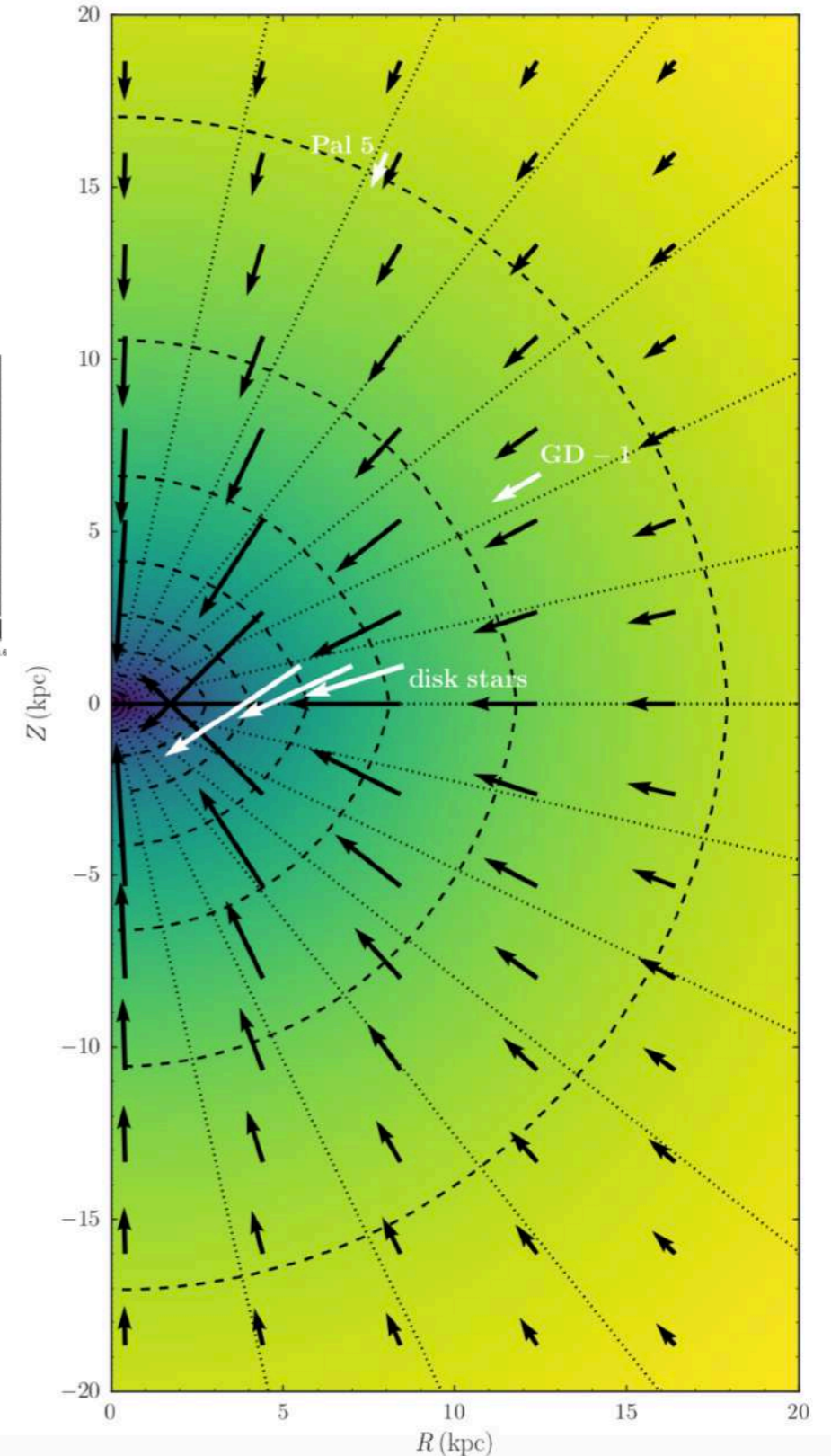
Courant de Palomar 5 -
Odenkirchen et al 2003

Courant de GD1 -
Carlberg & C. J. Grillmair, 2013



En utilisant les courants de marée de Palomar 5 et GD-1, il résulte que le halo de matière noire devrait avoir une forme presque sphérique à la distance de GD-1 et Pal 5.

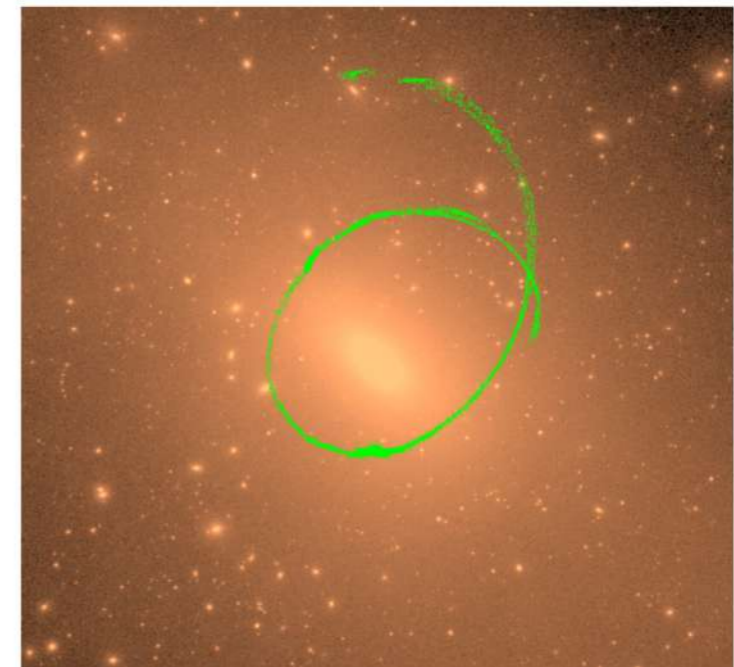
Champ de force le mieux adapté pour la Voie Lactée, à partir de l'analyse des courants de marée de Pal 5 et GD-1. Bovy et al 2016



COURANTS STELLAIRES ET HALO DE MATIÈRE NOIRE

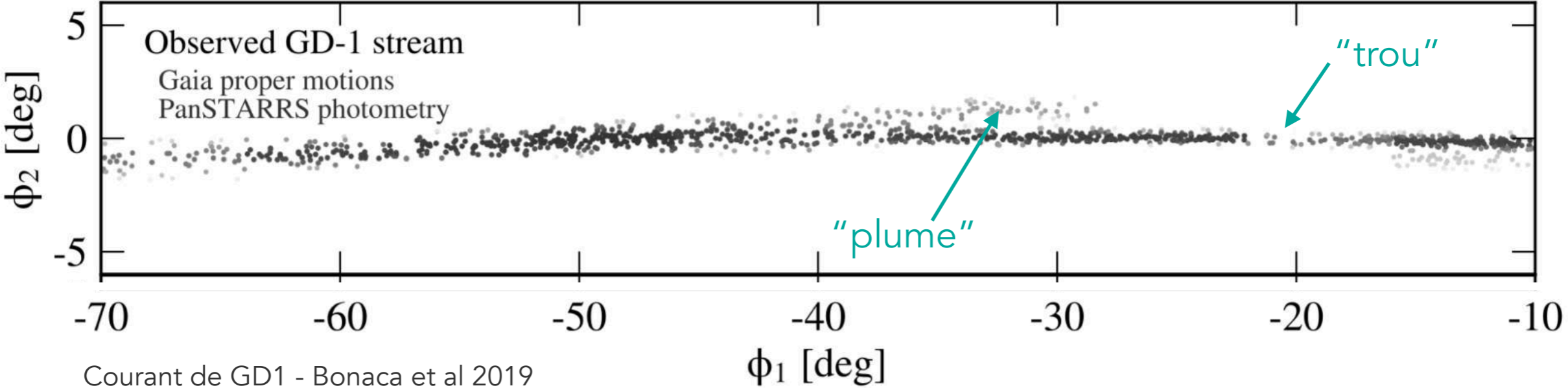
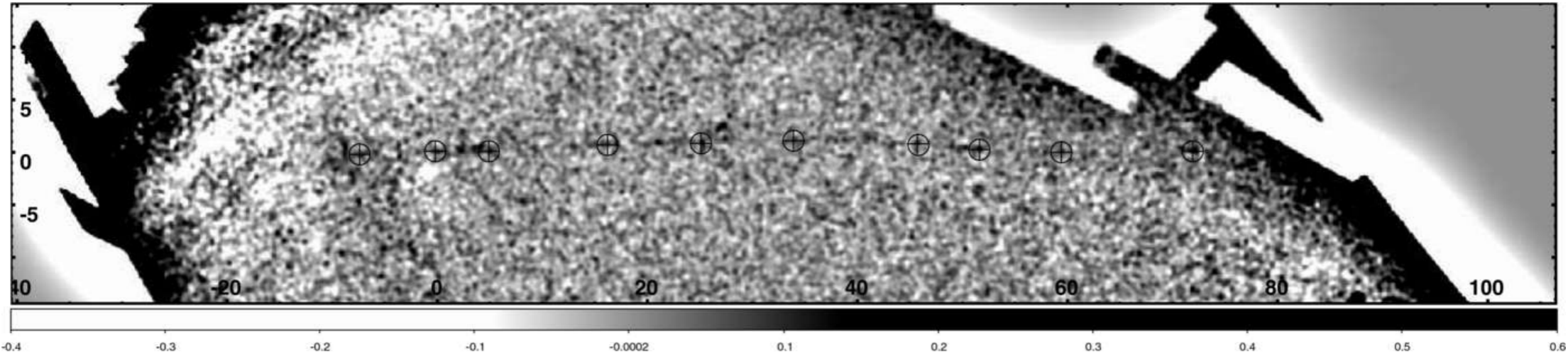
A part être utilisés pour contraindre la forme du halo de matière noire, les courants stellaires (en particulier les plus fins entre eux) peuvent nous renseigner aussi sur la granularité du halo, c-à-d sur le nombre, masse et taille des milliers de sous-halo de matière noire gravitationnellement liés à notre Galaxie.

Le passage d'un sous-halo de matière noire près d'un courant stellaire perturbe la morphologie de ce dernier, en y créant des régions de surdensité et des "trous".



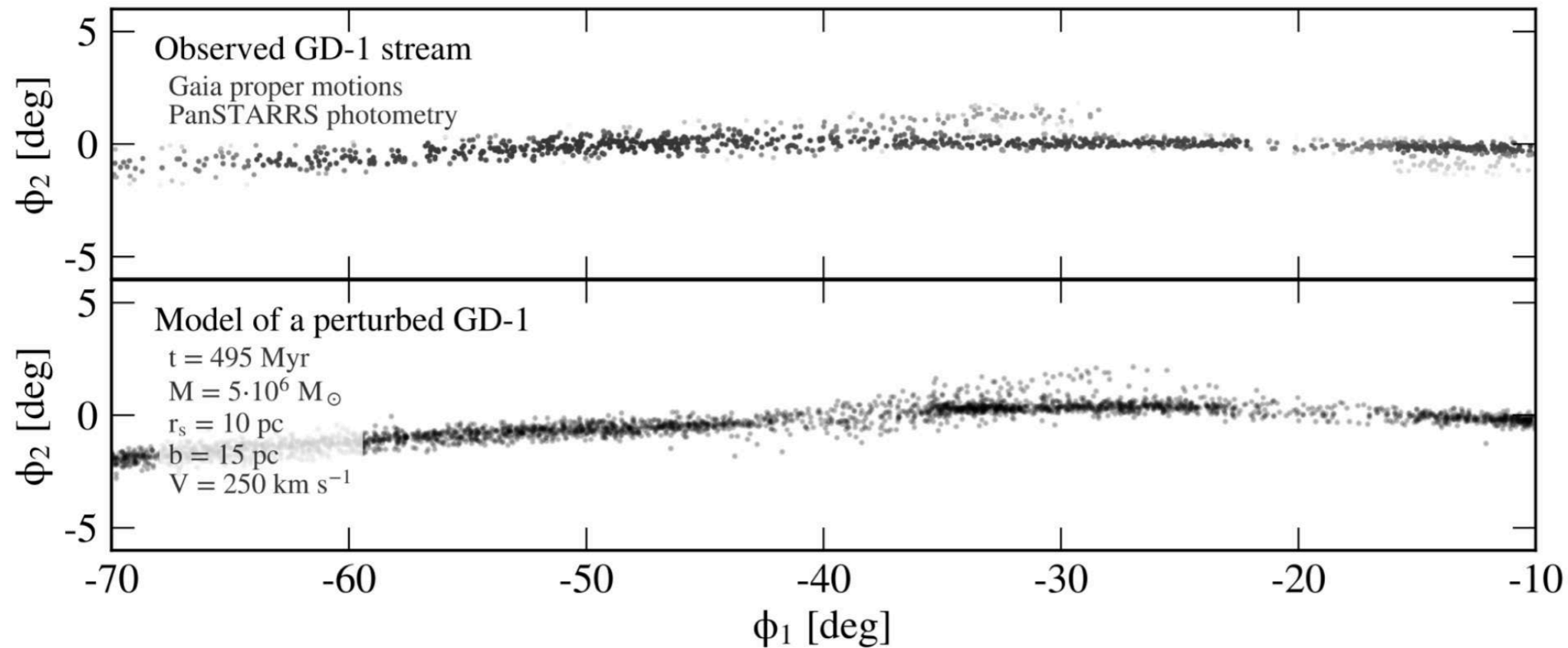
COURANTS STELLAIRES ET GRANULARITÉ DU HALO DE MATIÈRE NOIRE

Courant de GD1 - Carlberg & C. J. Grillmair, 2013



Courant de GD1 - Bonaca et al 2019

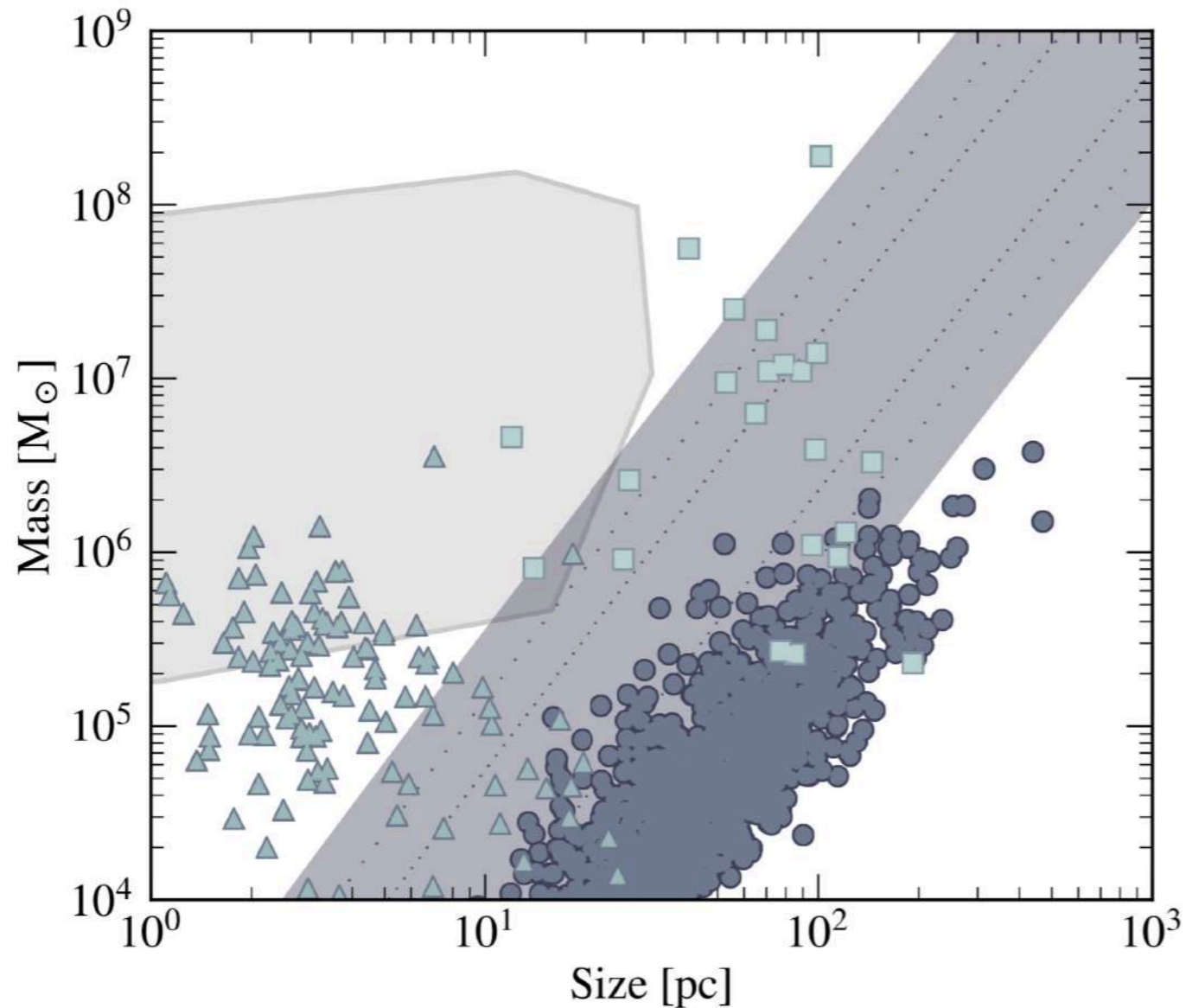
COURANTS STELLAIRES ET GRANULARITÉ DU HALO DE MATIÈRE NOIRE



Bonaca et al 2019

Ces travaux indiquent la possibilité que des observations détaillées des courants puissent mesurer le spectre de masse des sous-structures de matière noire et même identifier des sous-structures individuelles et leurs orbites dans le halo galactique.

COURANTS STELLAIRES ET GRANULARITÉ DU HALO DE MATIÈRE NOIRE



Bonaca et al 2019

- GD-1 perturber (Bonaca et al. 2019)
- Outer disk molecular clouds (Miville-Deschênes et al. 2017)
- Globular clusters (Baumgardt & Hilker 2018)
- Dwarf galaxies (McConnachie 2012)
- Λ CDM subhalos (3σ scatter) (Moliné et al. 2017)

Cependant, attention au fait que la masse et la taille d'un possible perturbateur du courant de GD-1 restent compatibles avec ceux des amas globulaires les plus massifs de notre Galaxie.

DE LA MATIÈRE NOIRE DANS LES AMAS GLOBULAIRES ?

DE LA MATIÈRE NOIRE DANS LES AMAS GLOBULAIRES ?

Les études dynamiques des amas globulaires galactiques ont permis d'établir que, contrairement aux galaxies naines sphéroïdales qui entourent la Voie lactée, les amas semblent contenir peu ou pas de matière noire en dehors des restes stellaires normaux tels que les naines blanches et les étoiles à neutrons, ou (potentiellement) des trous noirs de masse intermédiaire.

Cependant, la question de la présence de matière noire au sein des amas globulaires reste et elle est strictement liée à la question de comment ces systèmes se sont formés.

Certains scénarios de formation prévoient que les amas se forment à l'intérieur de leur propre mini-halo de matière noire, comme si les amas étaient les contreparties plus petites des galaxies.

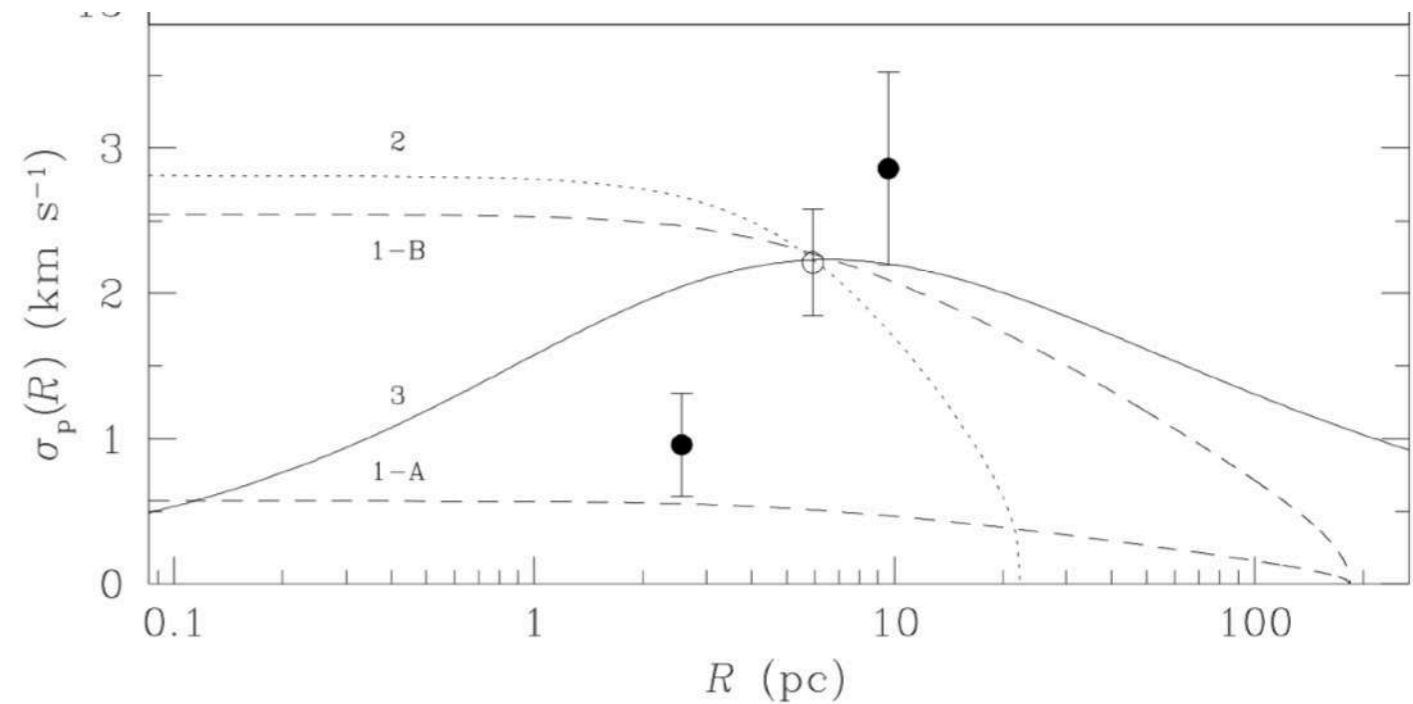
Certains autres scénarios ne prévoient pas la présence de matière noire pour la formation des amas, qui se seraient formés à partir de nuages de gaz, dans des conditions de pressions et densités extrêmes.

DE LA MATIÈRE NOIRE DANS LES AMAS GLOBULAIRES ?

Il y a une vingtaine d'années, il a été suggéré que les étoiles de l'amas globulaire Palomar 13, un amas peu massif dans le halo de notre Galaxie, à une distance du Soleil de 23 kpc, avaient une dispersion de vitesse trop élevée (4 fois la valeur attendue) pour pouvoir être expliquée par la seule masse visible de l'amas (Côté et al 2002).

Possible présence de matière noire ?

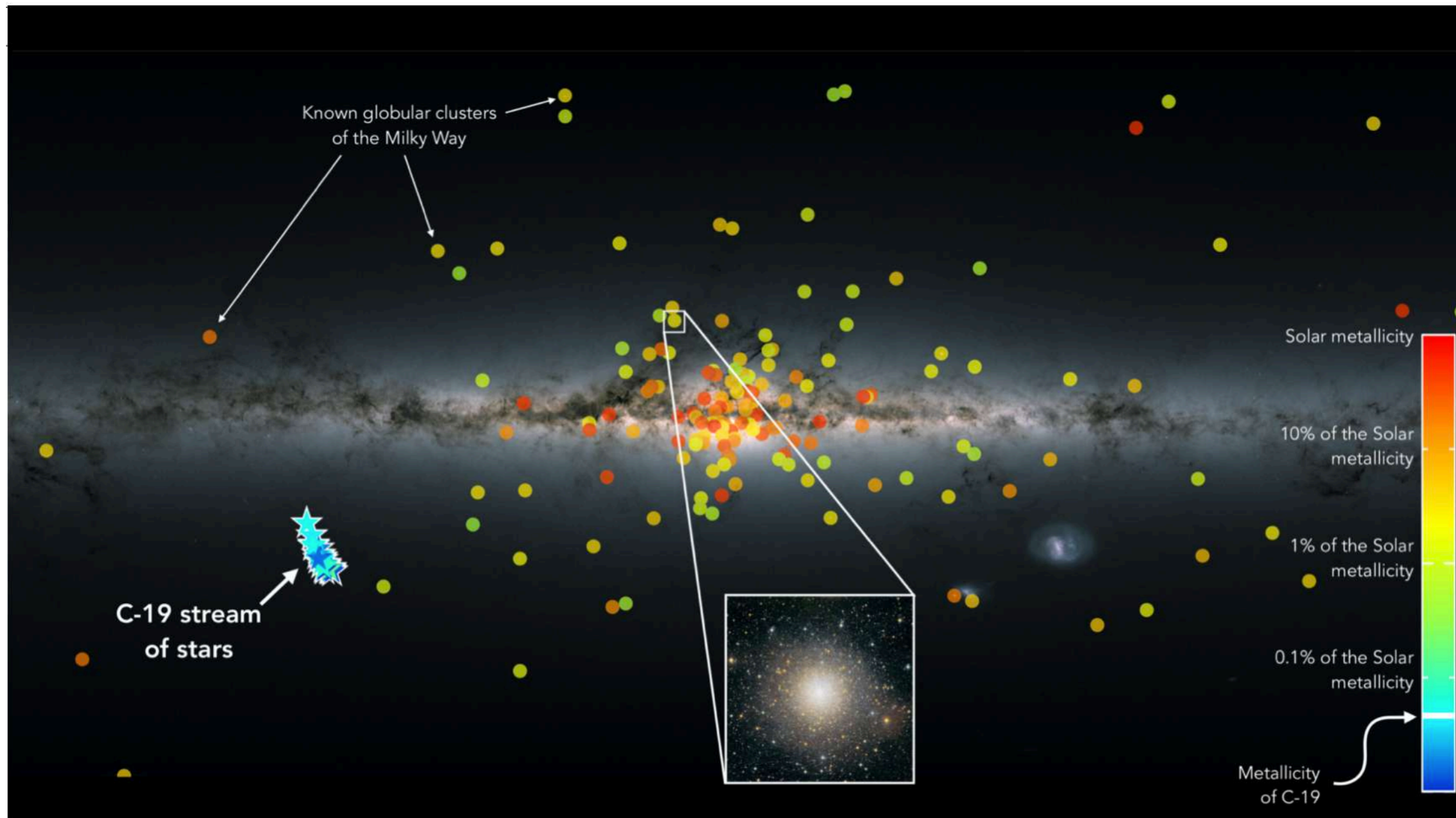
Dans le cas de cet amas cette possibilité a été écartée quand des études conduites ensuite ont démontré que la haute dispersion de vitesses observée dans cet amas était due à la présence d'étoiles binaires non résolues dans la première étude (Blecha et al 2004).



Côté et al 2002

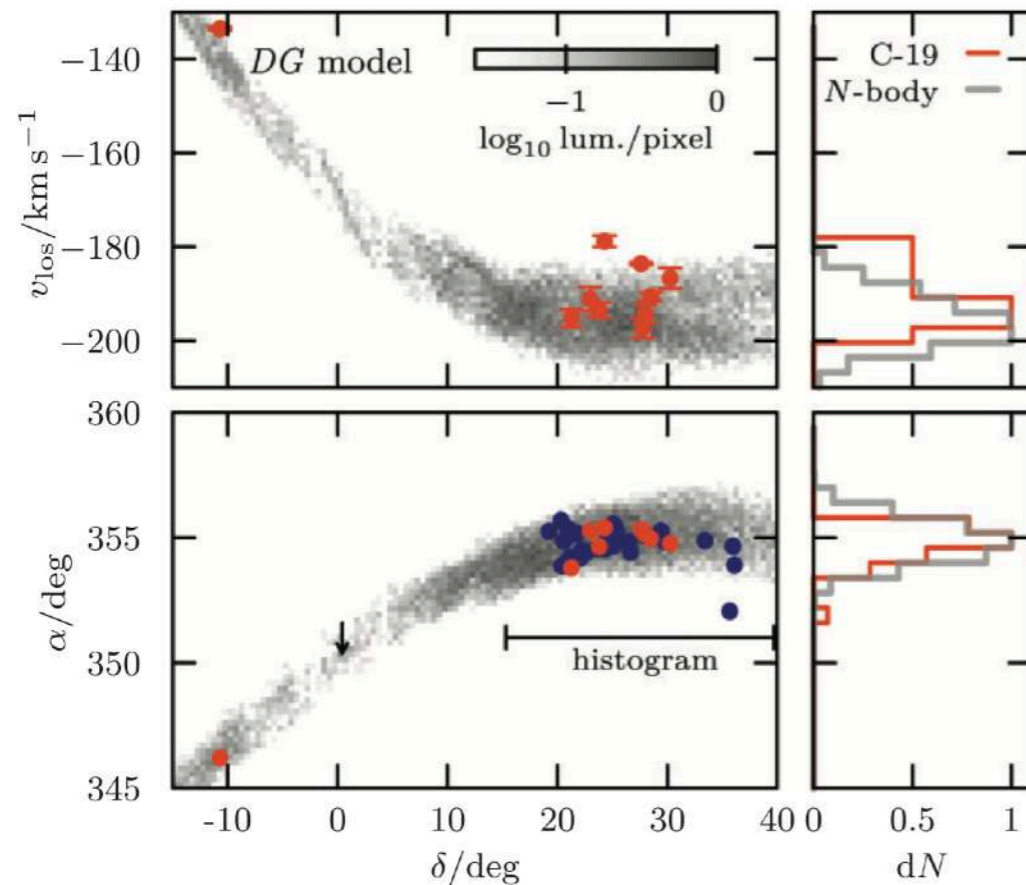
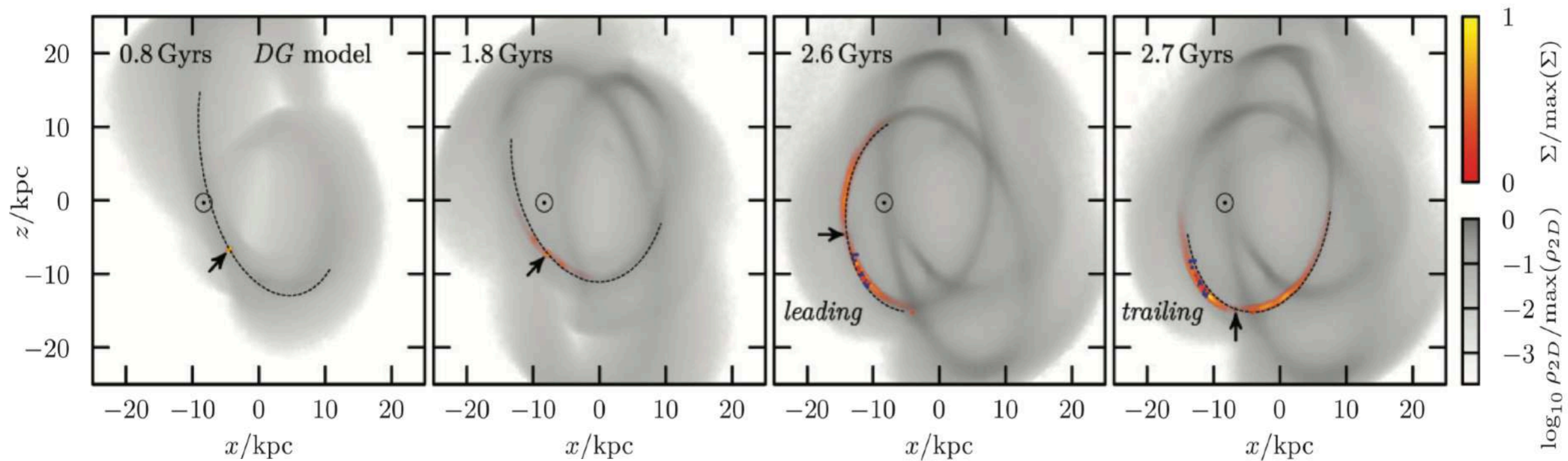
DE LA MATIÈRE NOIRE DANS LES AMAS GLOBULAIRES ?

En 2022, un courant d'étoiles très pauvres en métaux est découvert dans notre Galaxie (Martin et al 2022). Son nom est C-19 et il est actuellement le courant d'étoiles le plus pauvre que l'on connait dans la Galaxie.



Credits: N. Martin & Observatoire Astronomique de Strasbourg;
Canada-France-Hawaii Telescope / Coelum; ESA/Gaia/DPAC

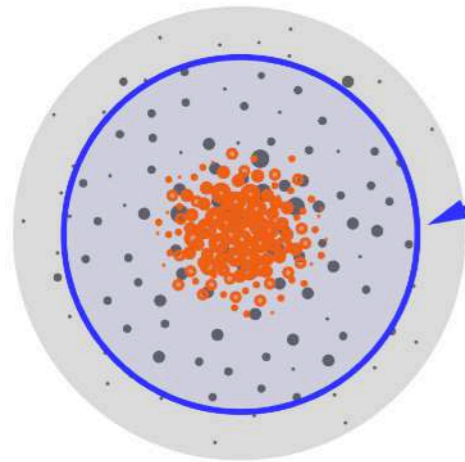
DE LA MATIÈRE NOIRE DANS LES AMAS GLOBULAIRES ?



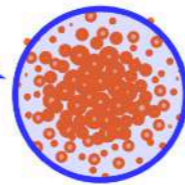
Ces dispersions sont par contre reproduites si C-19 est issu de la disruption d'un amas globulaires dominé par la matière noire (Errani et al 2022).

DE LA MATIÈRE NOIRE DANS LES AMAS GLOBULAIRES ?

Globular cluster + Dark matter

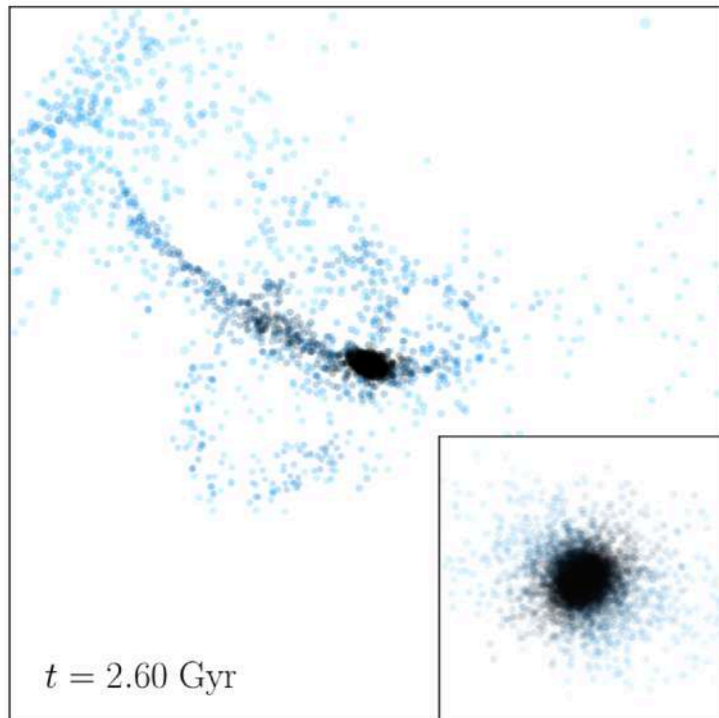


Globular cluster alone

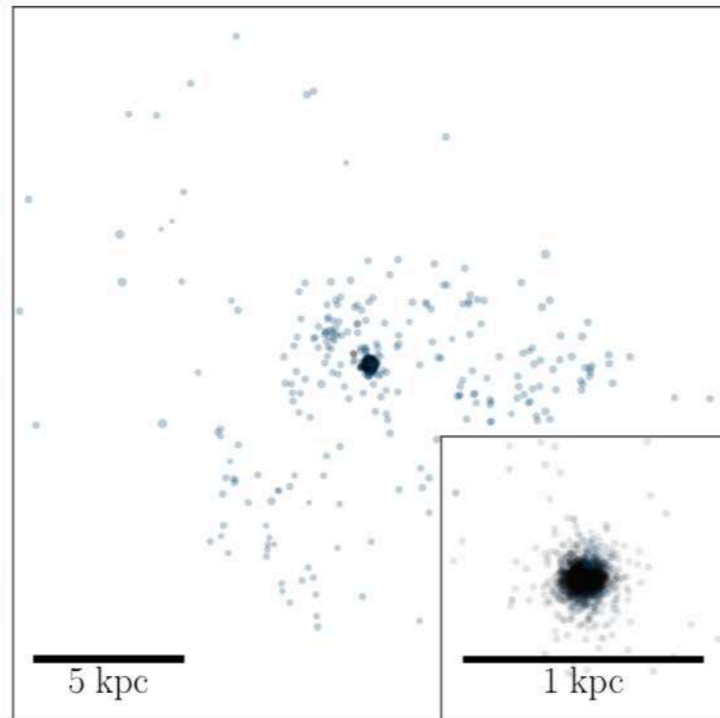


Tidal radius

Globular cluster **without** a dark matter mini-halo

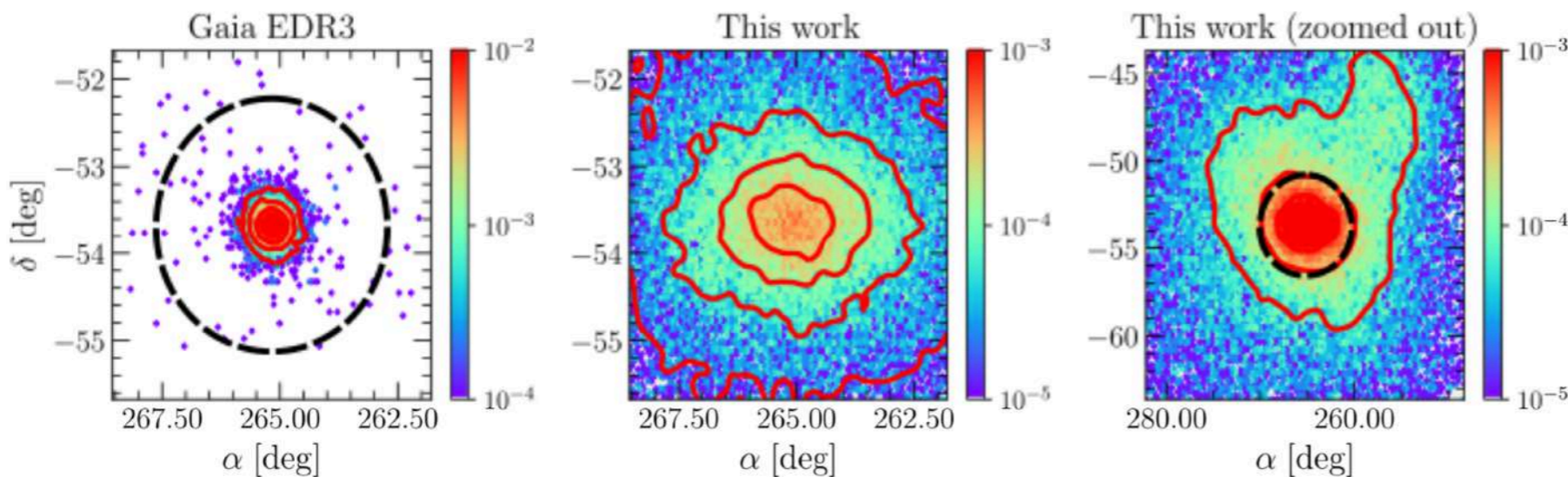
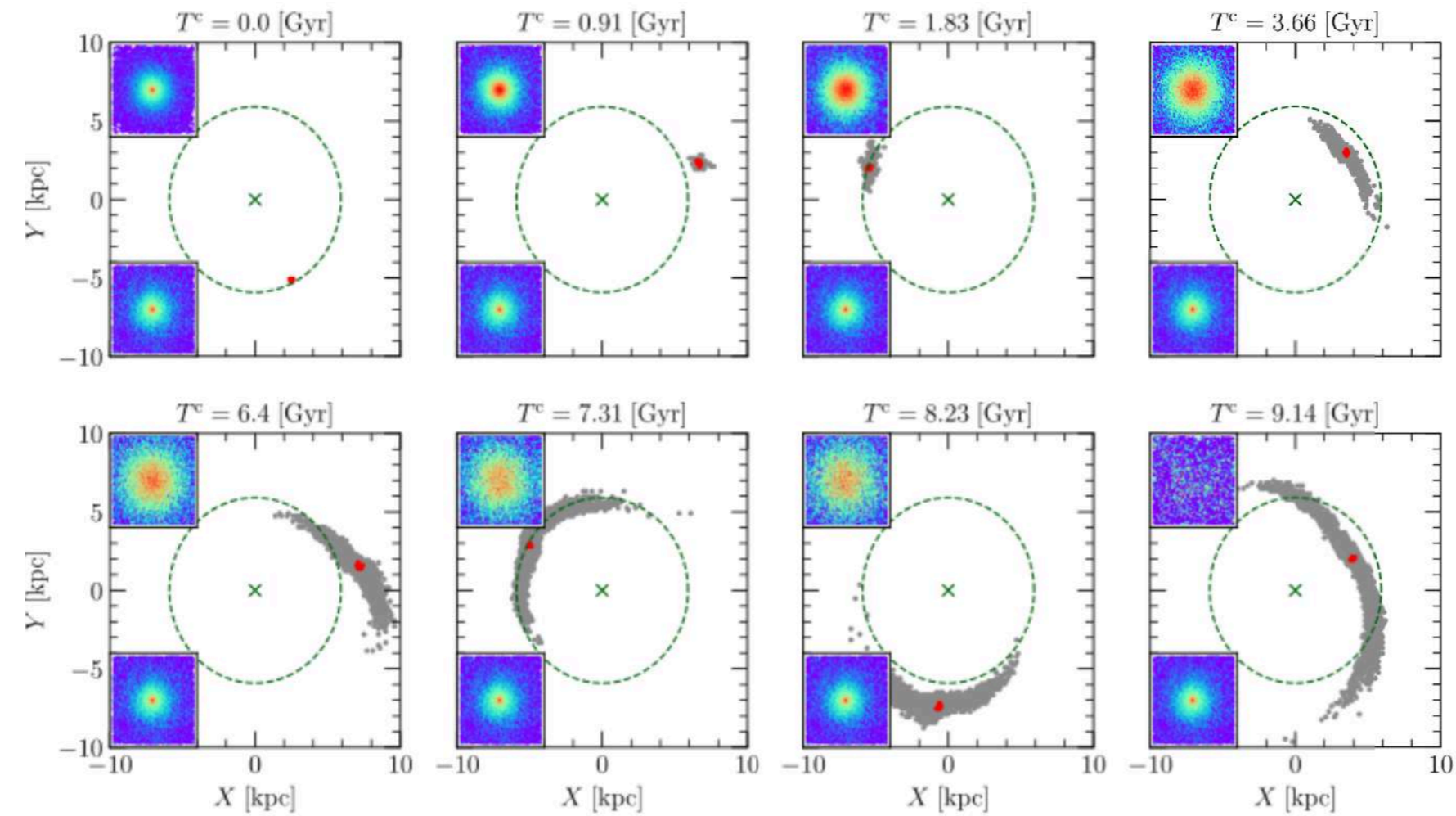


Globular cluster **with** a dark matter mini-halo



Si un halo de matière noire était présent autour d'un amas globulaire, il limiterait la perte de masse de ce dernier causée par les effets de marée exercés par la Galaxie.

DE LA MATIÈRE NOIRE DANS LES AMAS GLOBULAIRES ?



En utilisant ce résultat, il a été récemment suggéré que l'amas globulaire NGC 6397 pourrait contenir (ou avoir contenu) de la matière noire. Cet amas ne montre pas des queues de marée évidentes dans les données Gaia, alors que - selon les simulations - l'amas aurait du être entouré de queues de marée significativement longues, s'il avait évolué dans le potentiel de la Galaxie, sans la protection d'un mini-halo de matière noire.

LES AMAS GLOBULAIRES .. CONCLUSIONS

CONCLUSIONS

Les amas globulaires, systèmes stellaires à l'apparence simple, sont en train de révéler une nature plus complexe qu'attendue : queues de marée, rotation, et, pour certains, dispersions en métallicité.

La compréhension de leur caractéristiques, ainsi que de leur propriétés orbitales et abondances chimiques, est en train de nous aider à contraindre la formation et l'évolution de notre Galaxie et de son histoire d'accrétion, ainsi que de la distribution de matière noire en son sein.

De nombreuses questions sur la nature de ces systèmes restent encore ouvertes, et l'analyse des données issues de la mission astrométrique Gaia, ainsi que de relevés spectroscopiques complémentaires (APOGEE-SDSS, MOONS@VLT), complétée par des modèles numériques, permettra d'y répondre dans le futur.