

天の川銀河のN体シミュレーション

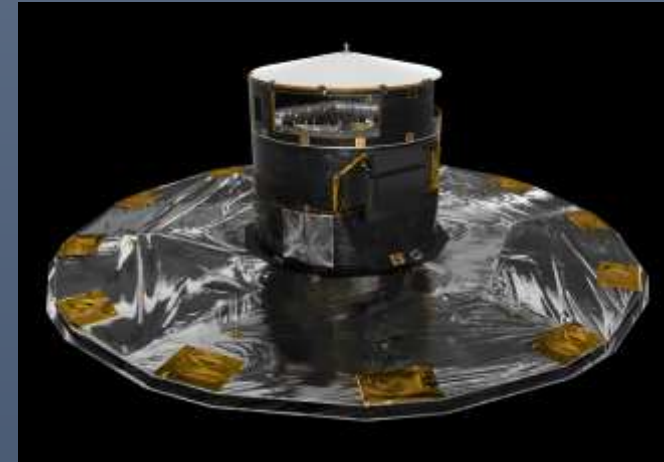
朝野哲郎, 藤井通子 (東京大学),

馬場淳一 (鹿児島大学、NAOJ),

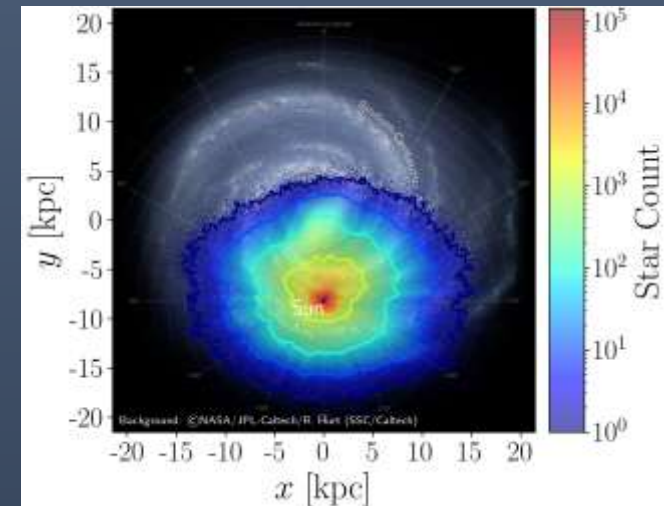
Simon Portegies Zwart, Jeroen Bédorf, Elena Sellentin
(Leiden University)

Gaia mission

- Space Astrometry
- 15億天体に対するアストロメトリ
 - $(\alpha, \delta, \mu_\alpha, \mu_\delta, \varpi)$
- そのうち、3千万天体については視線速度も
- 6次元位相空間分布は、天の川銀河 (MW)の力学構造と進化の歴史が刻まれている
- 観測データだけでは不十分
 - 観測できているのは太陽系近傍のみ
 - 時間進化は直接観測できない ($\frac{2\pi}{\Omega_\phi} \sim 200 \text{ Myr} @ R = 8 \text{ kpc}$)
- Gaiaデータと比較できるような高分解能シミュレーションが必要

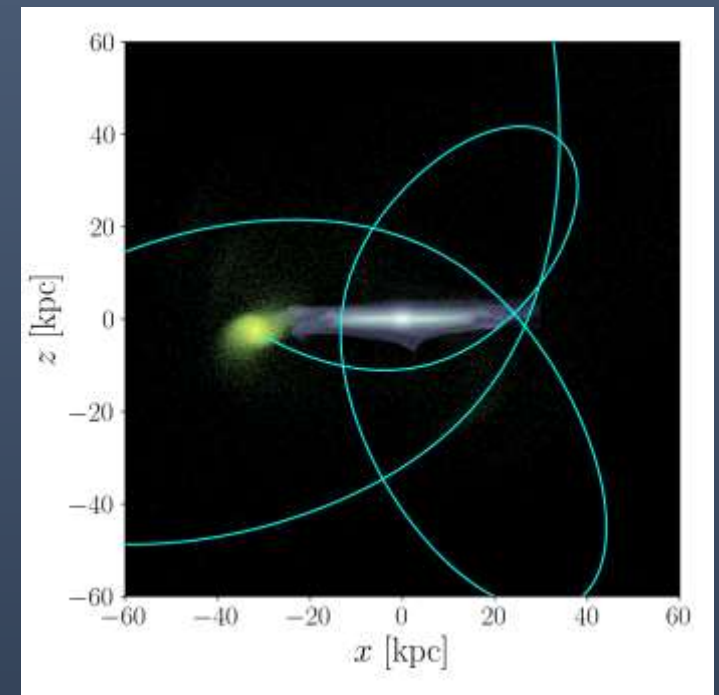
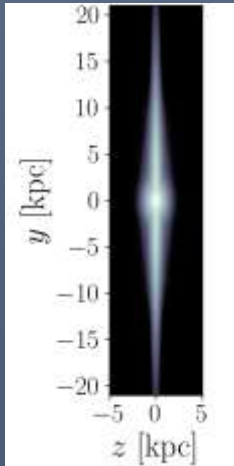
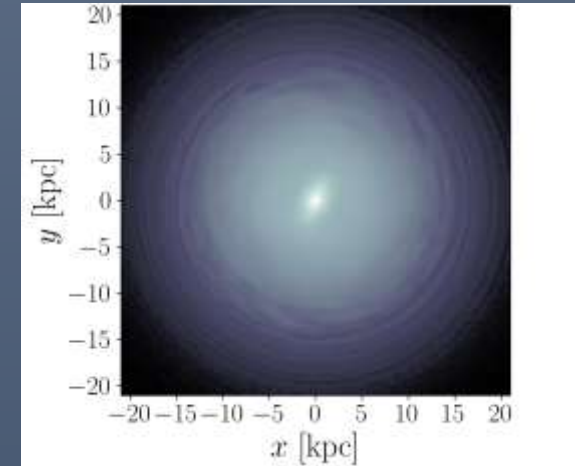


© ESA Gaia



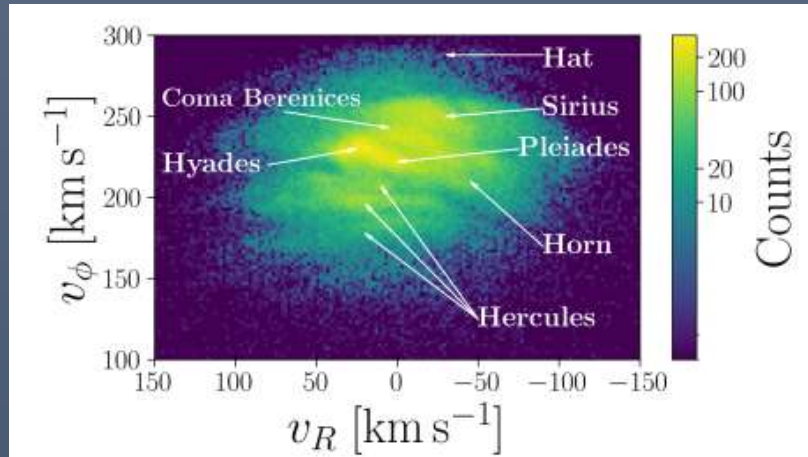
N-body simulations with billions of particles

- Isolated MW model (Fujii et al. 2019, Asano et al. 2020, 2022)
- Perturbed MW model (Asano et al. in prep)
- 粒子数 5×10^9
 - 微細な位相空間を再現するには、円盤の粒子数 $\sim 10^8$ 個
 - ハロと円盤の間の相互作用を正しく取り扱うためには、DMハロも粒子で表現する必要がある。
- 現在のMWを良く再現するモデルを探すためには、大規模なパラメータ探索が必要。
- Parallel GPU tree code Bonsai (Bédorf et al. 2012, 2014)
- 計算時間は、128 GPU (NVIDIA V100, Cygnus CCS U of Tsukuba) を使って、5Gyrの計算に24時間程度

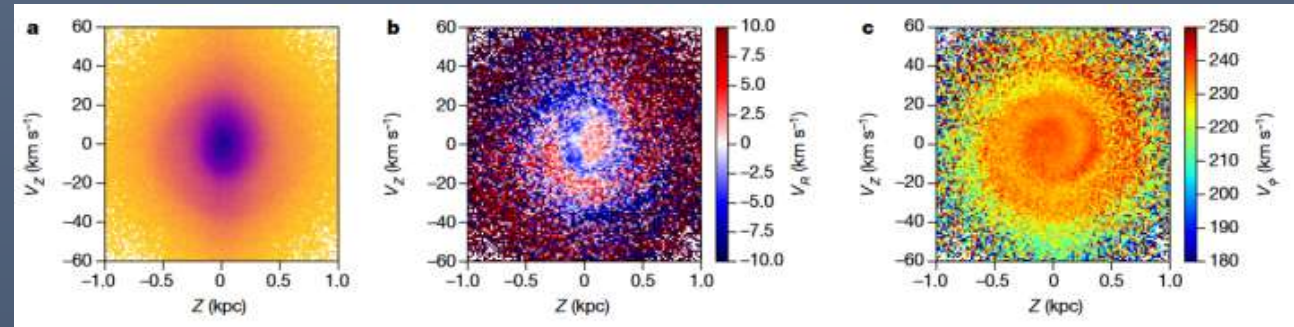


Phase-space substructures in the Gaia data

太陽系近傍の速度空間分布

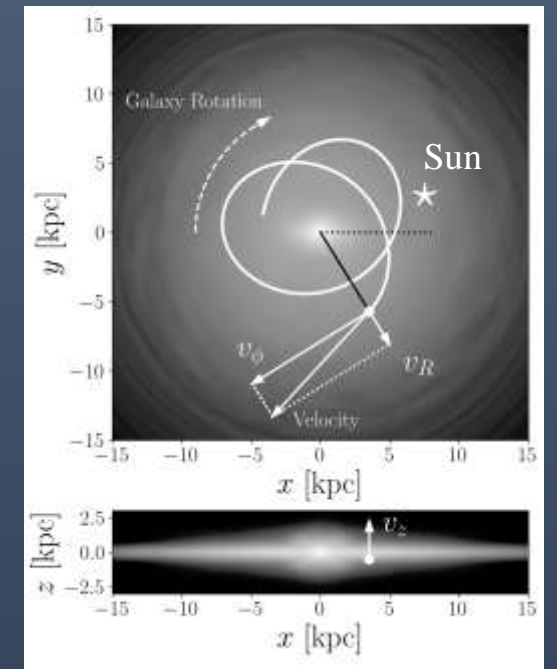


$z - v_z$ 空間分布 (Phase Spiral)



Antoja et al. (2018)

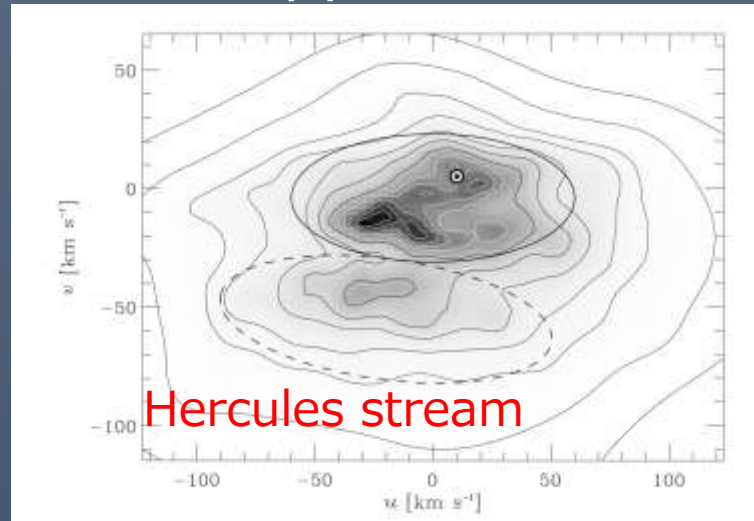
- 太陽系近傍の星の位相空間分布には様々なサブ構造。
- これらは軸対称な銀河モデルでは説明できない
- バーや渦状腕、伴銀河などの外的摂動に起因する。



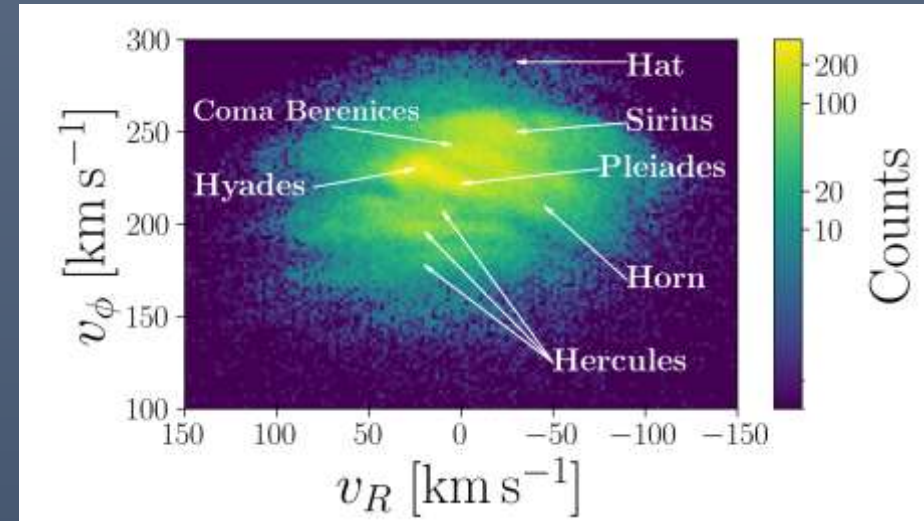
銀河中心原点の円筒座標系

Hercules stream

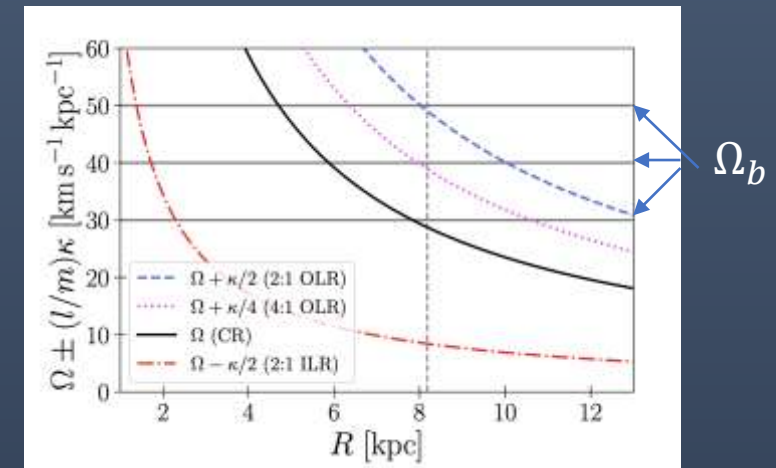
Hipparcos



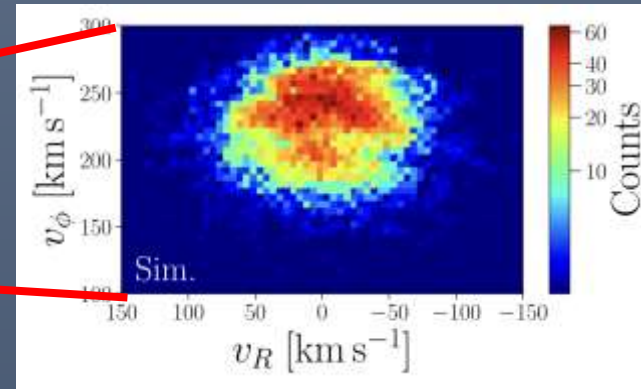
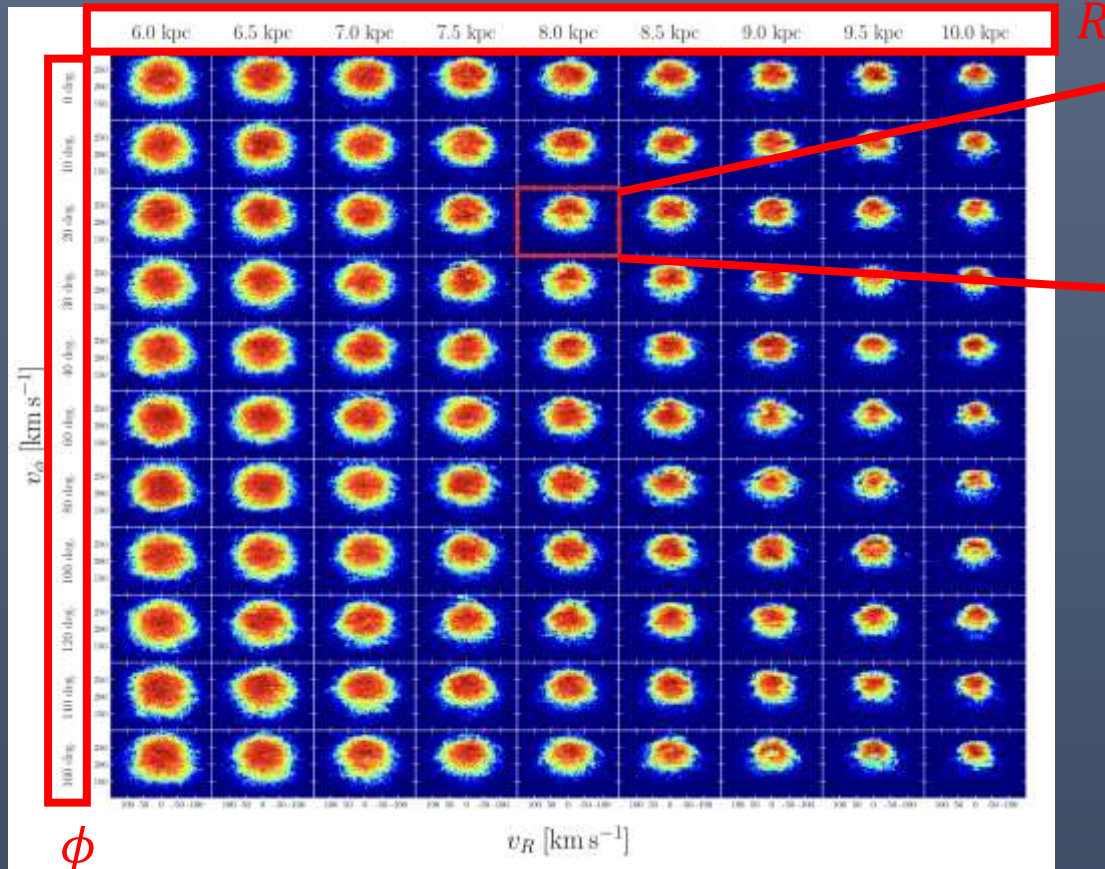
Gaia



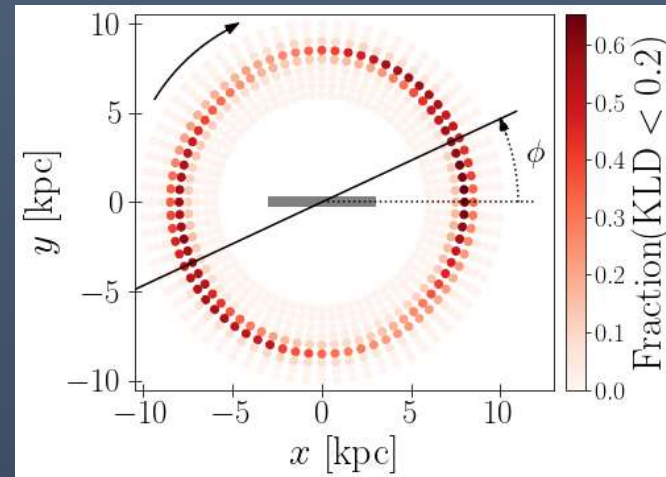
- Hercules streamは、最も大規模な速度空間サブ構造
- Hipparcos衛星の観測で発見
- 発見当初は、バーのOuter Lindblad resonance (OLR)起源だと考えられていた。OLRモデルから要求されるバーのパターン速度 $\Omega_b \gtrsim 50$ km/s/kpc \gg 現在の推定値 ~ 40 km/s/kpc
- Gaiaデータでは、Hercules stream内部構造、その他のサブ構造が見られる。これらの起源は？



Hercules stream in the isolated MW model



最終スナップショットの $(R, \phi) = (8 \text{ kpc}, 20^\circ)$ で Hercules stream のような構造を発見

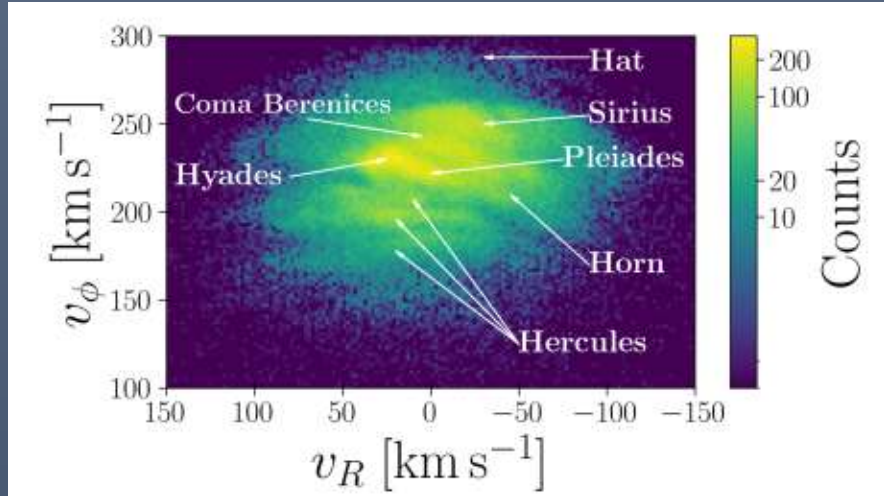


どこで Hercules stream like な構造が見つかりやすいか？

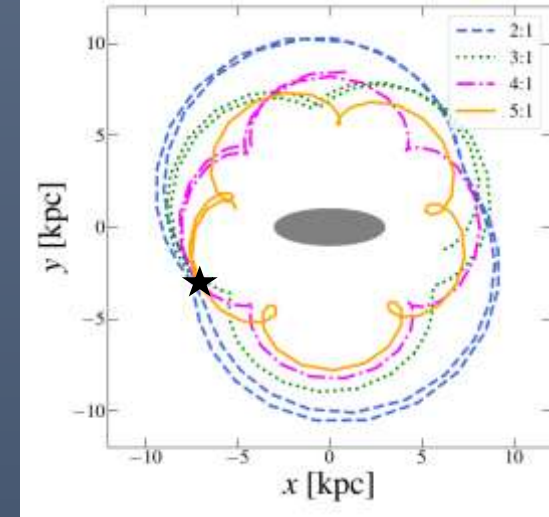
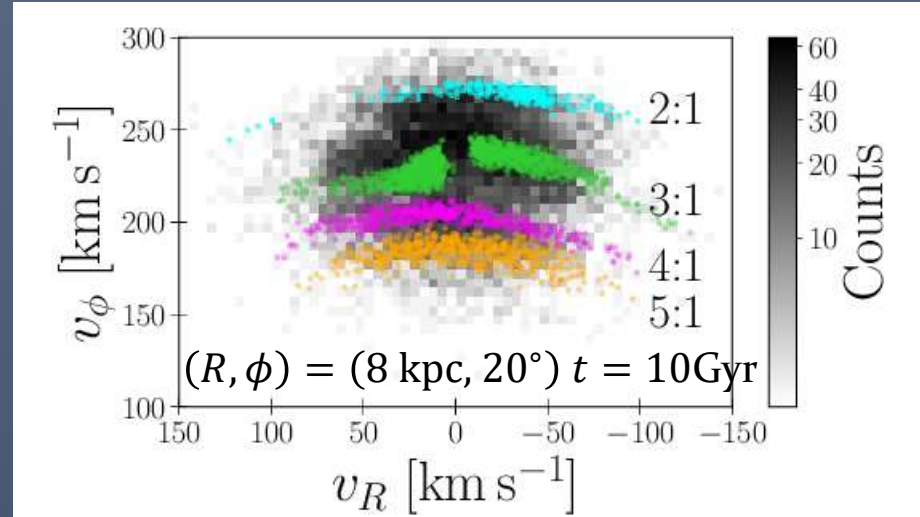
- Kullback Leiber divergence (KLD)を用いて、シミュレーションと観測の間で速度空間分布の類似度を比較。
- Hercules stream like な速度空間構造は、バーに対する相対位置 $(R, \phi) = (8.2 \text{ kpc}, 30^\circ)$ 付近で見つかりやすい。
- C.f. MW内での太陽の位置 : $(R, \phi) = (8.277 \text{ kpc}, 27^\circ)$ (GRAVITY collaboration et al. 2022, Wegg & Gerhard 2013)

速度空間分布サブ構造と共鳴軌道

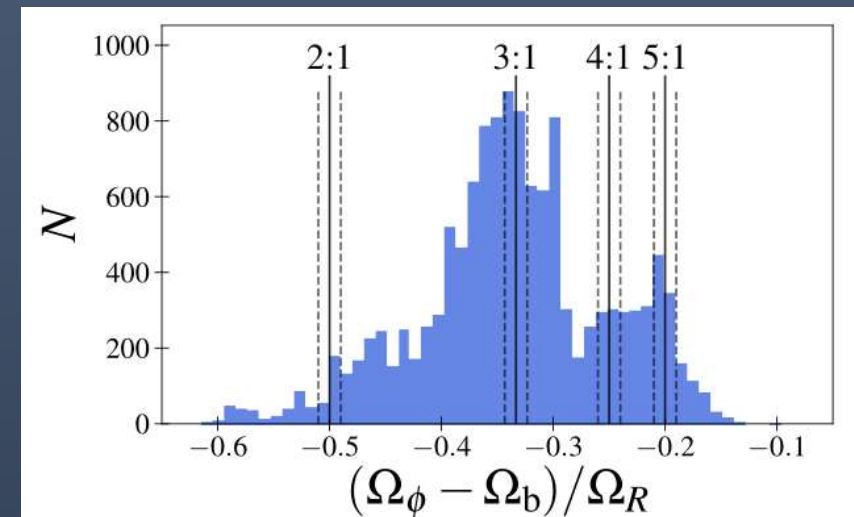
Gaia



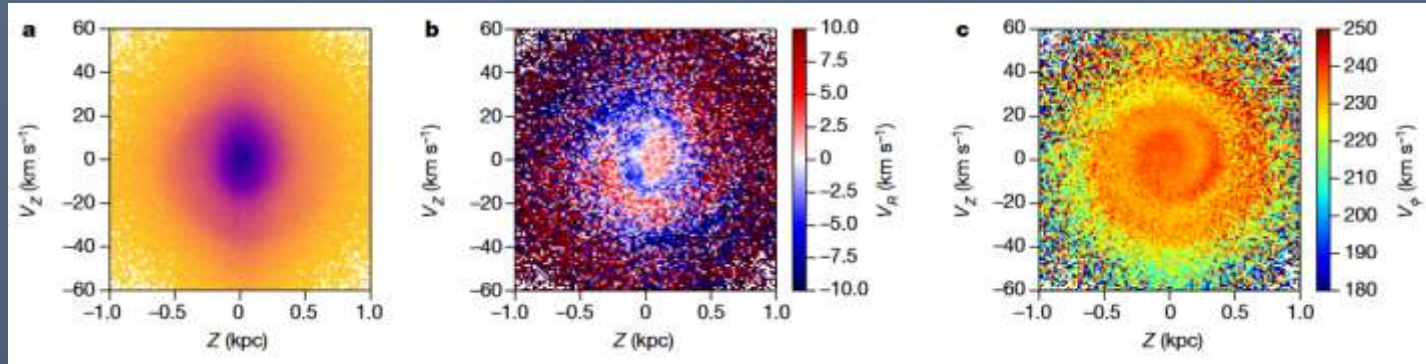
N-body



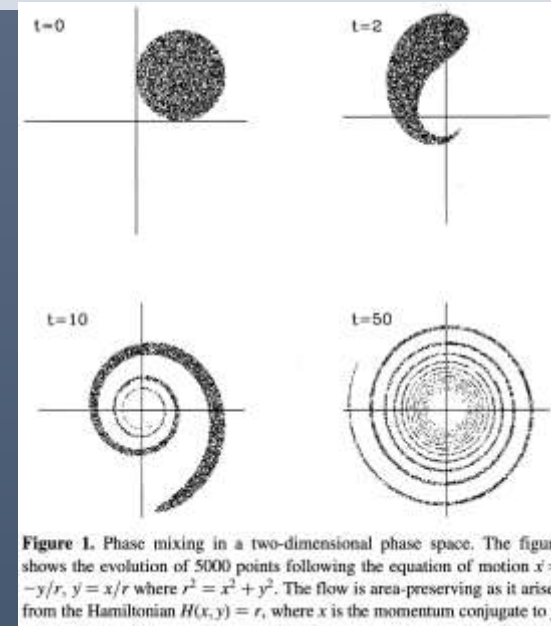
- 軌道周波数解析から共鳴に束縛された粒子を選択。
- 速度空間サブ構造と共鳴軌道の対応
 - Hercules stream \leftrightarrow 4:1 & 5:1
 - Horn \leftrightarrow 3:1
 - Hat \leftrightarrow 2:1 (OLR)
- Hercules streamが4:1 & 5:1から形成されるためには、バーのパターン速度が40-45 km/s/kpc。



Perturbed Simulations

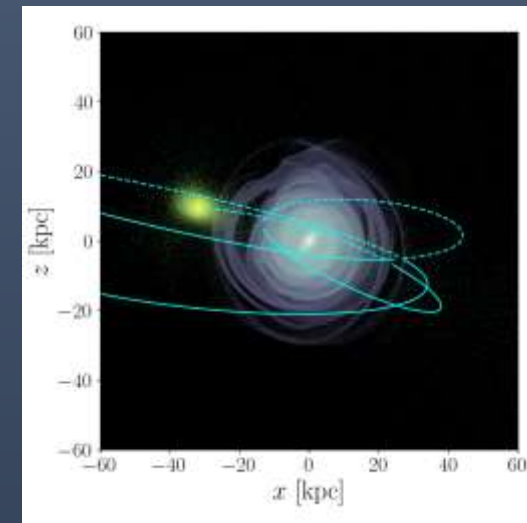
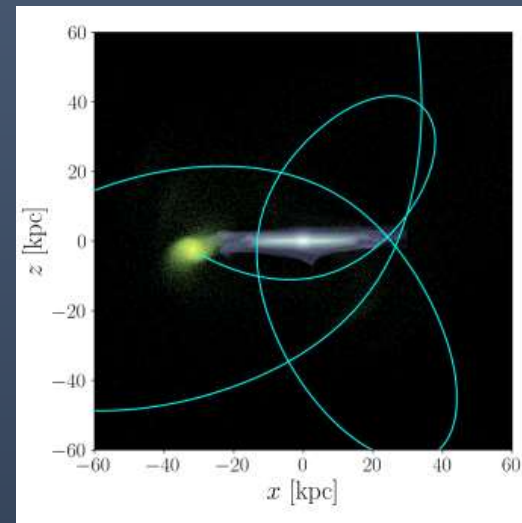


Antoja et al. (2018)

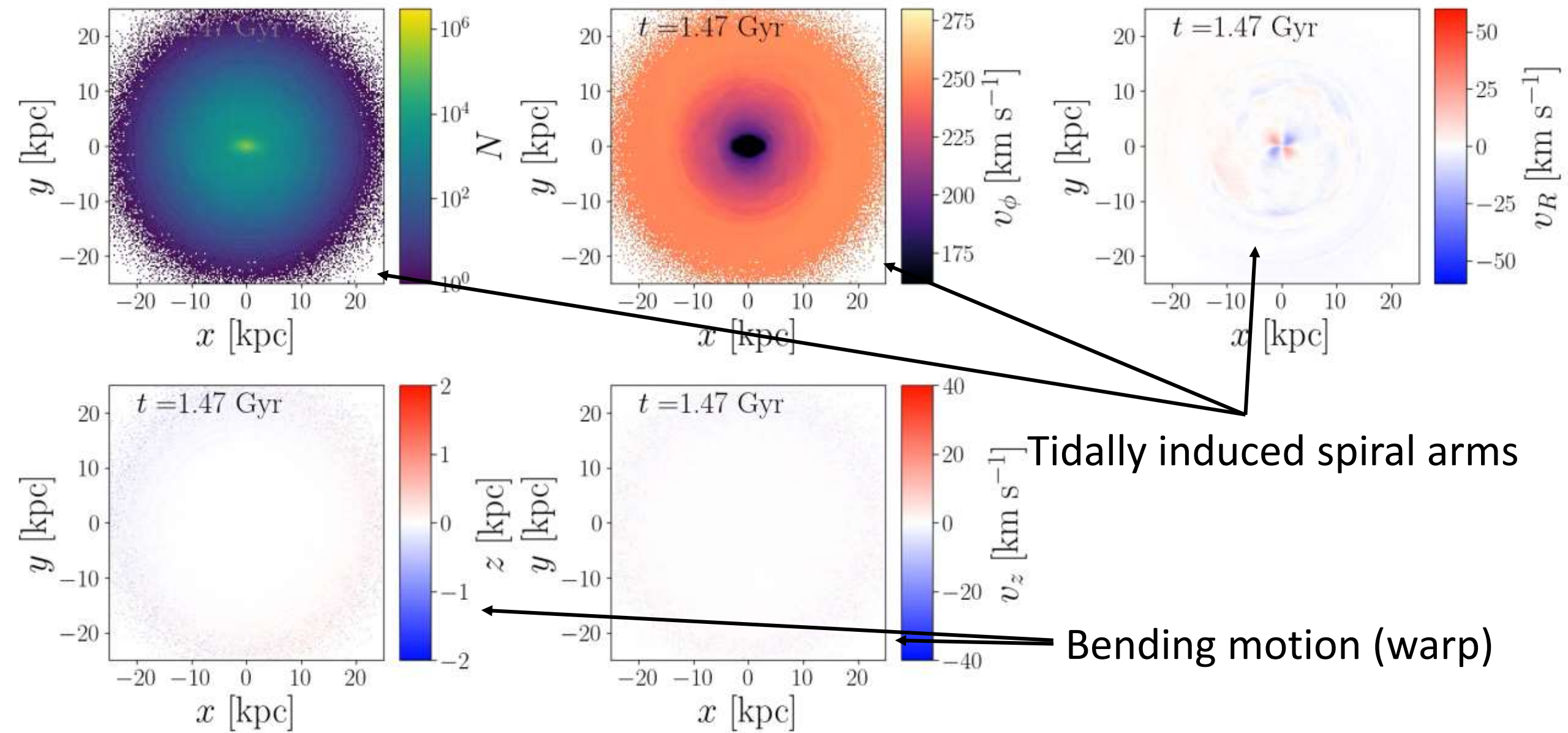


Tremaine (1999)

- Phase spiral z方向の位相混合
- 比較的最近 ($\lesssim 1$ Gyr)、円盤にz方向の振動が加わった。
- 摂動源として最も有力な候補は、いて座矮小銀河 (Sgr)。
- 先ほどの孤立銀河モデルに、Sgr-likeな伴銀河を追加して、再計算。



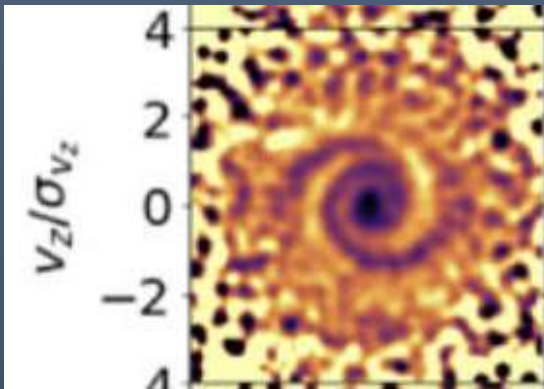
Face-on views



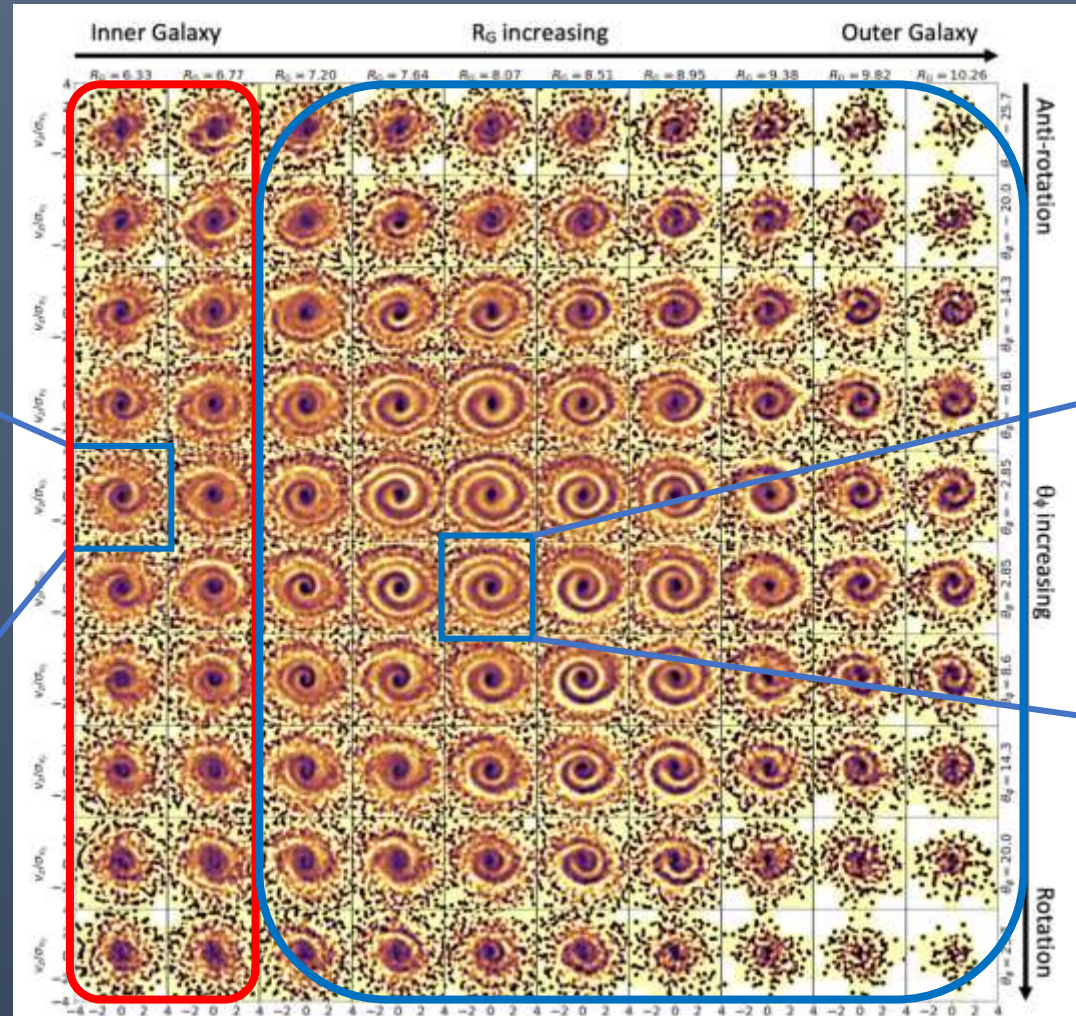
Phase spirals in the Gaia DR3

One-armed phase spirals

$R \sim 6$ kpc

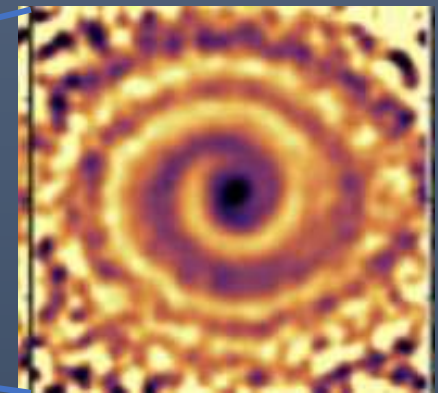


z/h_z



Tow-armed phase spirals

$R \sim 8$ kpc

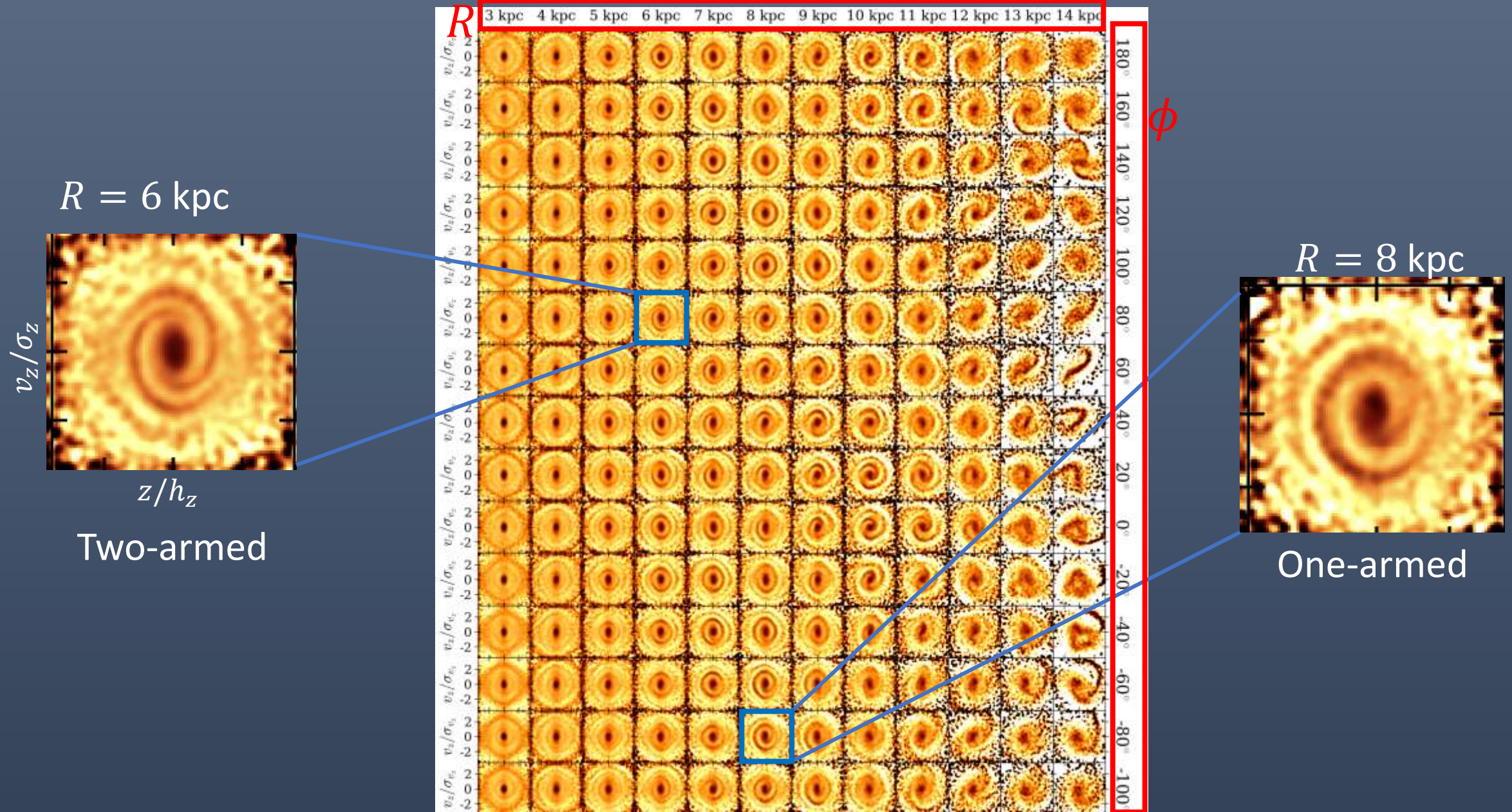


z/h_z

Color: $\frac{n(z, v_z)}{\bar{n}(z, v_z)} - 1$, where $n(z, v_z)$ is a number density and $\bar{n}(z, v_z)$ is a smoothed density

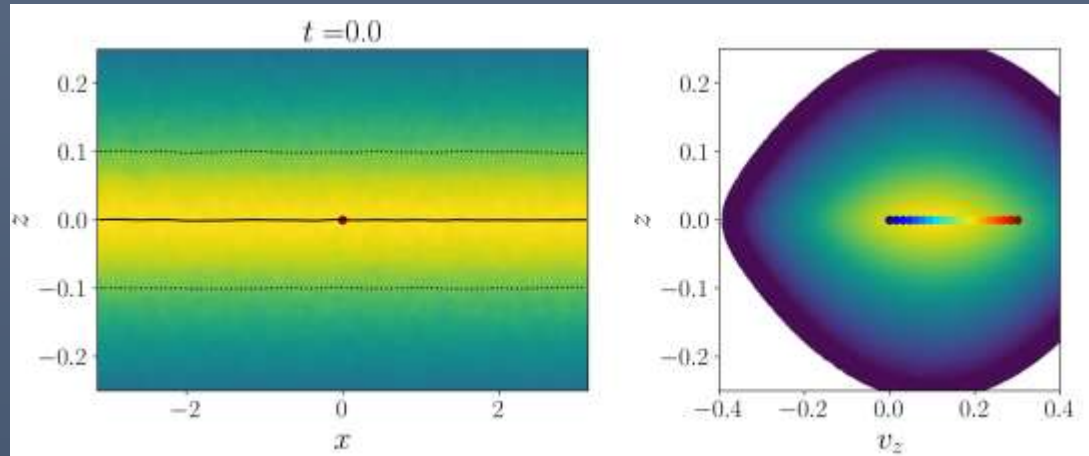
Hunt et al. (2022)

Phase spirals in the N-body model



Two oscillation modes: bending and breathing

Bending mode



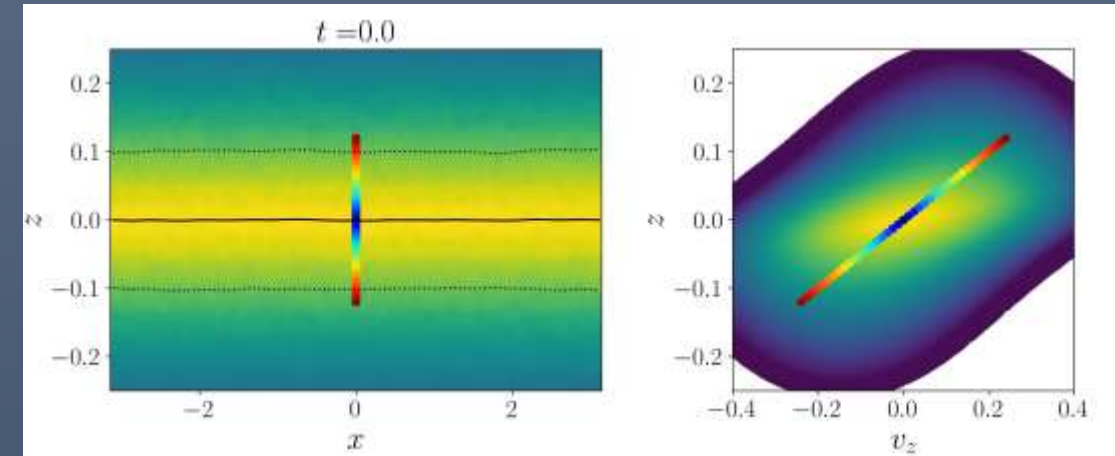
Edge-on view

z - v_z slice at $x = 0$

1本腕のphase spiralは、bending modeに対応

外的摂動によって引き起こされた円盤の歪みが1本腕のphase spiralとして観測される。

Breathing mode

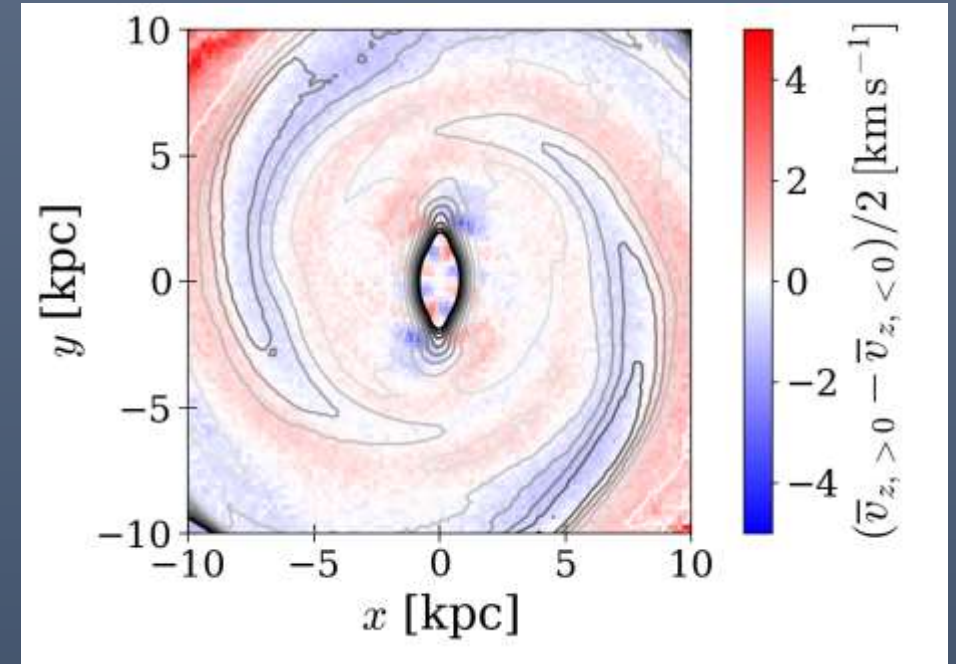


2本腕のphase spiralは、breathing modeに対応

Breathing modeを外的摂動によって直接的に励起させるのは難しい。

Breathing motion excited by the spiral arms

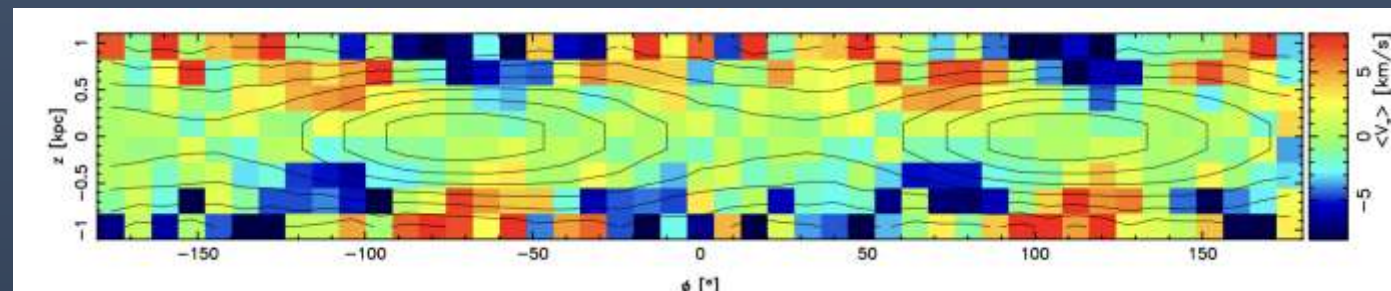
- Tidally induced spiral armによって breathing modeが励起される。
- Tidally induced spiral armは、運動学的密度波 (kinematic density wave) のように振る舞い、長時間持続する。



$\bar{v}_{z,>0}$: mean vertical velocity at $z > 0$
 $\bar{v}_{z,<0}$: mean vertical velocity at $z < 0$
Contour: Density contrast $\Sigma(R, \phi) / \Sigma_0(R)$

Debattista (2014)

渦状腕領域で圧縮のbreathing motion

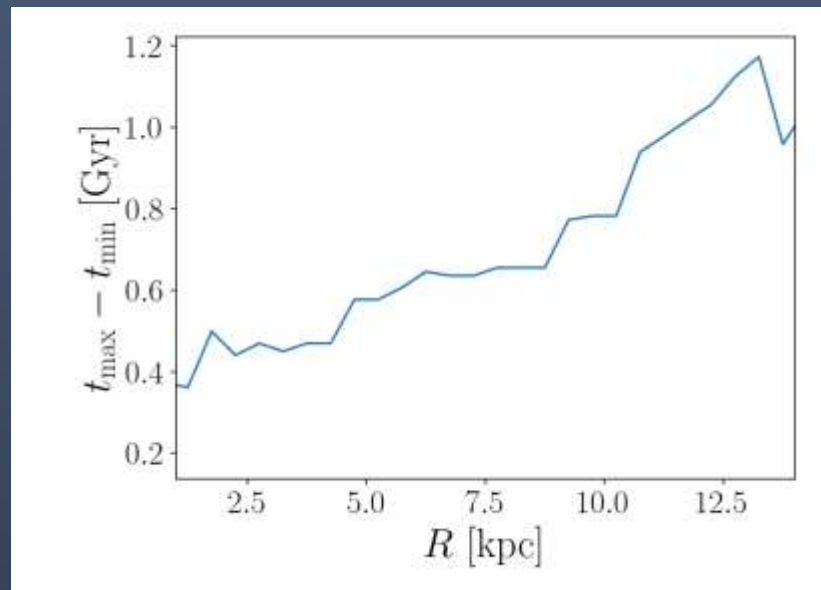


Transition from bending to breathing

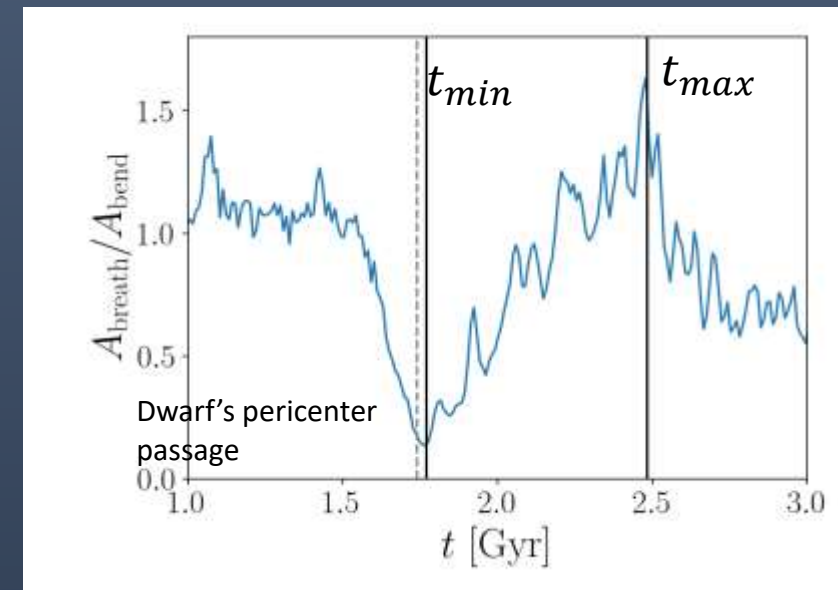
- Bending mode
 - 外的摂動によって直接励起される。
 - 減衰の時間スケールは、銀河中心からの距離 R の増加関数。
- Breathing mode
 - Tidally induced spiral armによって継続的に励起される。
 - 長時間持続する。
- BendingからBreathingの遷移は、円盤の内側から外側に向かって進行する。
- 観測では $R \lesssim 7$ kpc でbreathing dominant→MW円盤が摂動を受けたのは~0.5 Gyr前？

$$V_{bend} = \frac{1}{2} (\bar{v}_{z,>0} + \bar{v}_{z,<0})$$
$$V_{breath} = \frac{1}{2} (\bar{v}_{z,>0} - \bar{v}_{z,<0})$$
$$A_j^2(R, t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_j^2(R, \phi, t) d\phi$$

Bendingからbreathingへ遷移する時間スケール



BendingとBreathingの振幅比



Summary

- Gaiaによって、大規模かつ高精度に天の川銀河の星の位相空間分布が求められている。
- 高速なGPU並列ツリーコードBonsaiを用いて、50億体規模のN体シミュレーションを実行。
- 高分解能シミュレーションは、Gaiaデータで見られるような位相空間サブ構造を良く再現。
- Gaiaデータと比較することで、バーのパターン速度を推定したり、伴銀河との過去の近接遭遇についての示唆が得られる。