

天の川銀河の動力学構造研究の進展

— 位置天文学観測の立場から —

Today's Talk

1. 天の川銀河研究の意義：太陽系起源“3W1H”
2. Gaia成果：シミュレーション研究の貢献
3. 渦状腕構造の新たなパラダイム
4. 銀河円盤の物質混合イベント：棒状構造形成
5. シミュレーション研究への要求

The Gaia's Sky (ESA/DPAC)

The “Simulated” Milky Way

(Baba, Saitoh et al. 2017, MNRAS, 464, 246)

馬場 淳一

(国立天文台 JASMINEプロジェクト)

天の川銀河 = 太陽系と直接的につながる唯一無二の銀河

Big Bang

→ 銀河形成進化 (星形成/元素合成)

→ 太陽系・地球・生物の誕生

太陽系の隕石組成に
銀河化学進化情報が刻まれる
(e.g. Clayton 1997)

銀河考古学・近傍宇宙論
(e.g. Freeman & Bland-Hawthorn 2002)

恒星系円盤
(厚い円盤+薄い円盤)

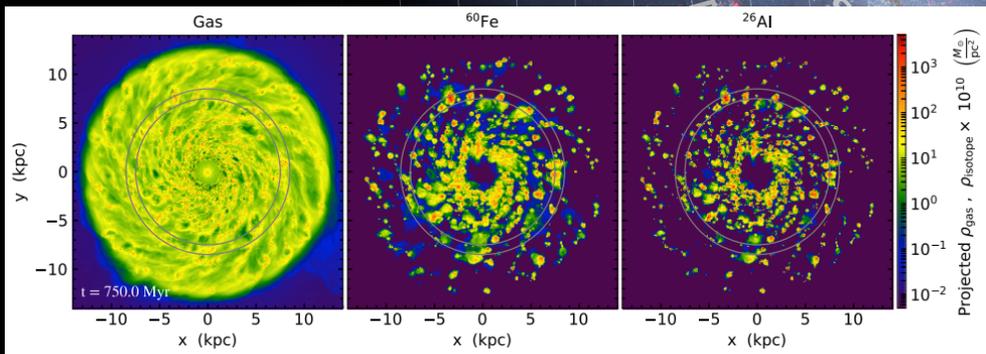
中心核バルジ

渦状腕

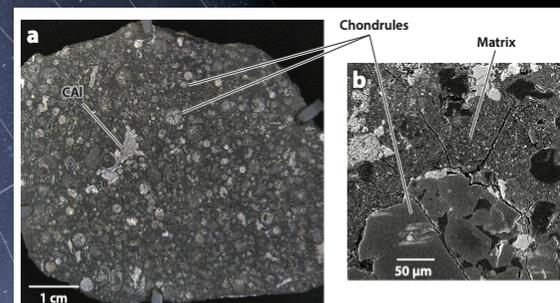
棒状構造 (バー)

☉ We are here.

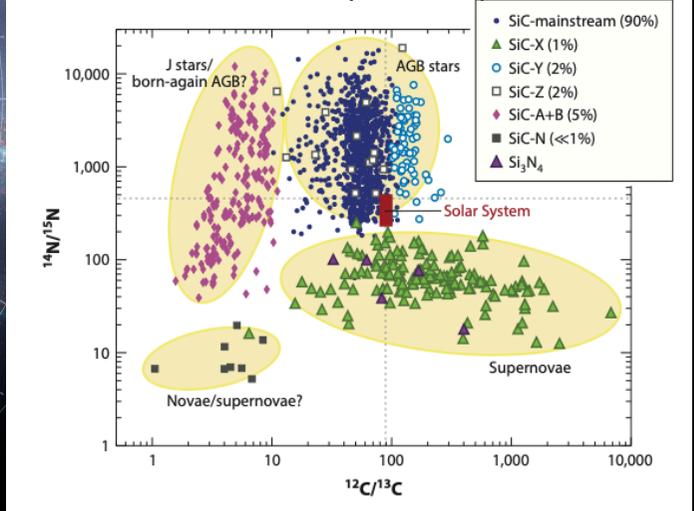
Galactic-scale Hydro. Sim.



Fujimoto, Krumholz, Tachibana (2018)



Nittler & Ciesla, 2016, ARA&A



太陽系の起源 “3W1H”

Where : どこで誕生したのか？

e.g. $R \sim 3 \text{ kpc}, 6 \text{ kpc}$?

What : なにによって移動してきたのか？

e.g. bar / spiral / GMC?

When : いつ移動してきたのか？

e.g. 4.6 Ga, 100 Ma?

How : どのように移動してきたのか？

e.g. fast, slow, wander?

野望：これらの問いに銀河動力学 (+ 化学進化) から答えたい

(そのために、天の川銀河の研究をしている。私は。)

= 銀河系円盤 (恒星系円盤) における大局的な混合過程の理解

Efficient Migration of the Sun via “Dynamic” Spiral + “Slowing” Bar

太陽の化学組成

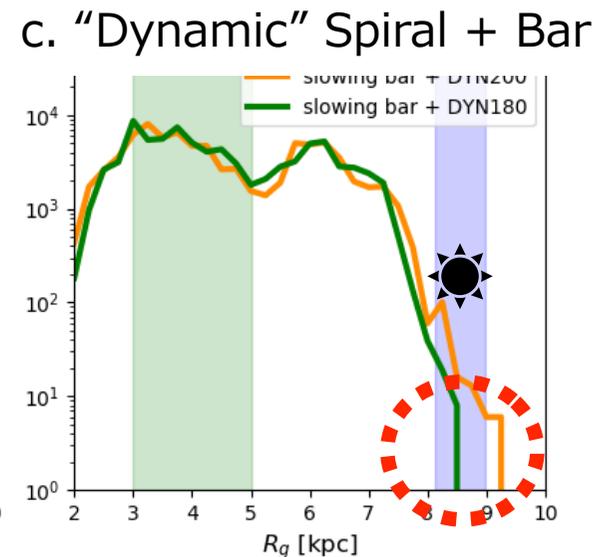
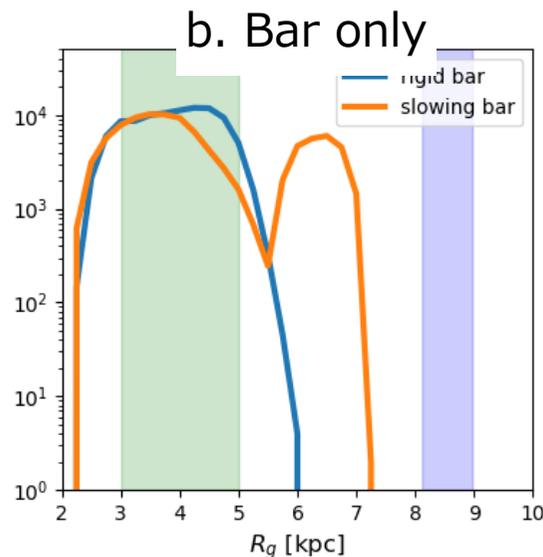
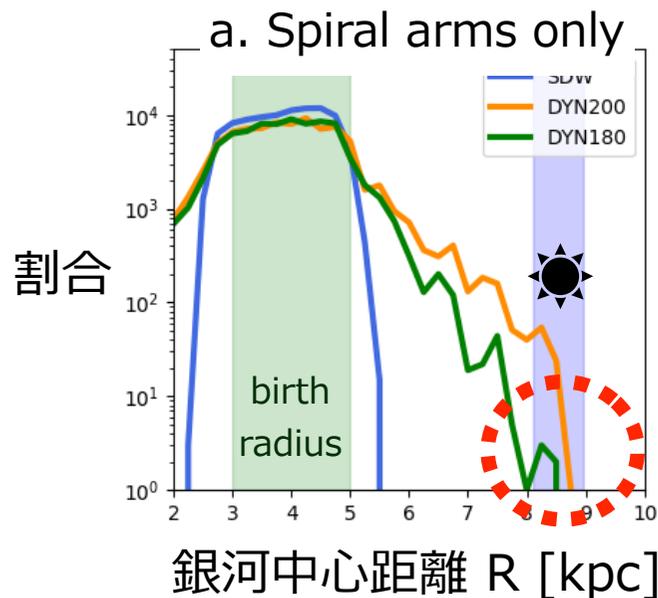
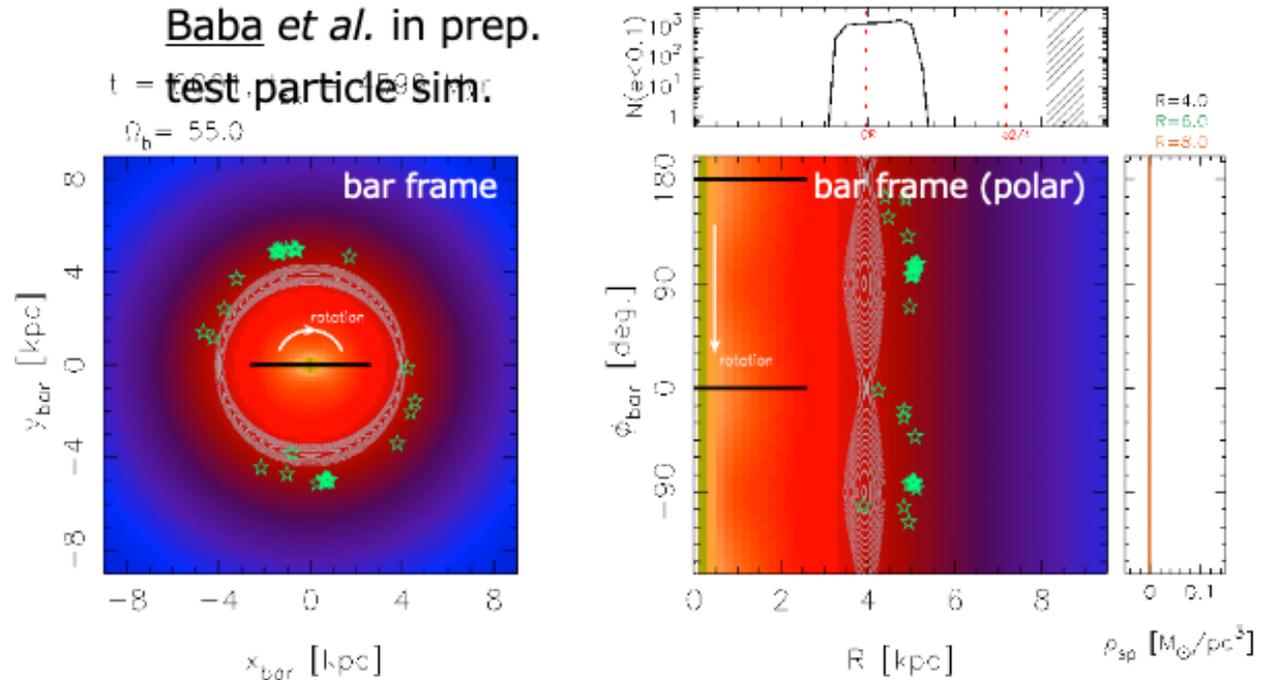
→ $R_{\text{birth}} < \sim 5 \text{ kpc} \ll 8.5 \text{ kpc}$
(see also Wielen et al. 1996)

$R_0 \sim 8.5 \text{ kpc}$ までいかにして辿り着いたのか？

渦状腕の時間変動性の有無

バー構造の有無

バー構造の回転の減速の有無



Spiral Encounters & Snowball Earth Events

Tsujimoto & JB, 2020, ApJ, **904**, 137

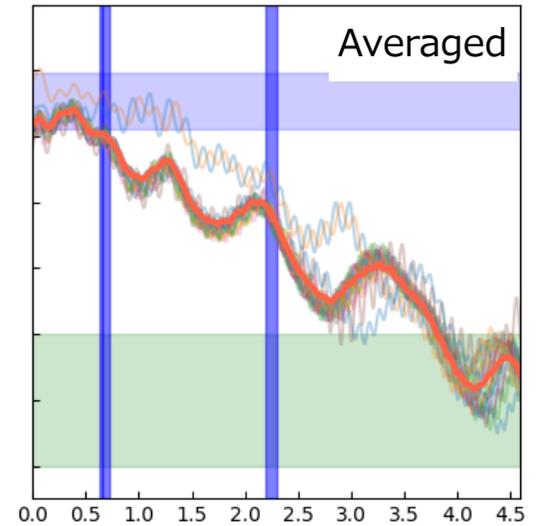
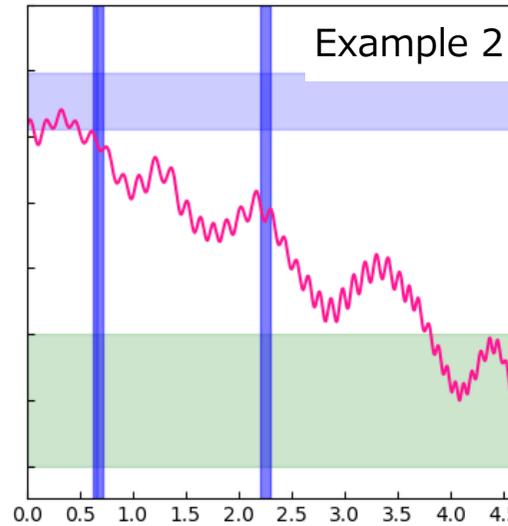
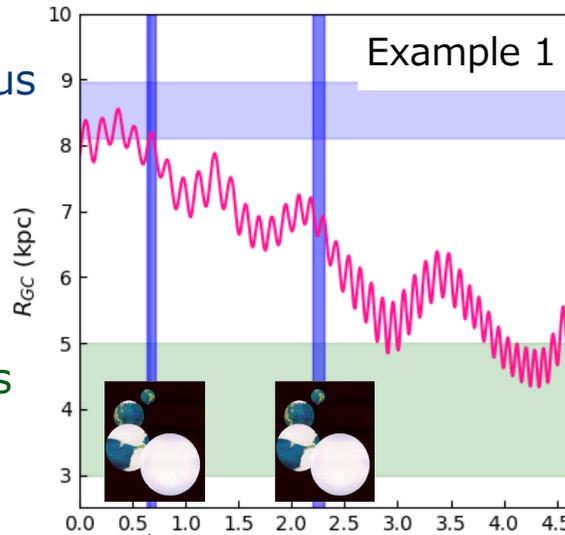
orbital integrations in dynamically evolving bar/spirals

Current Sun's radius
 $R_0 \sim 8.5$ kpc



Solar Birth Radius
 $3 < R < 5$ kpc

~ 0.7 Ga ~ 2.2 Ga

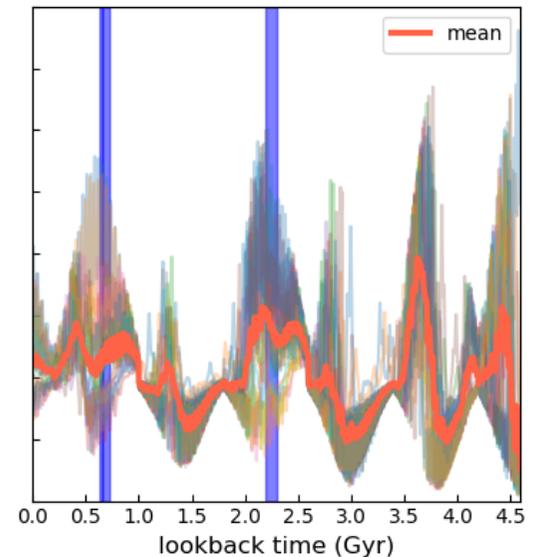
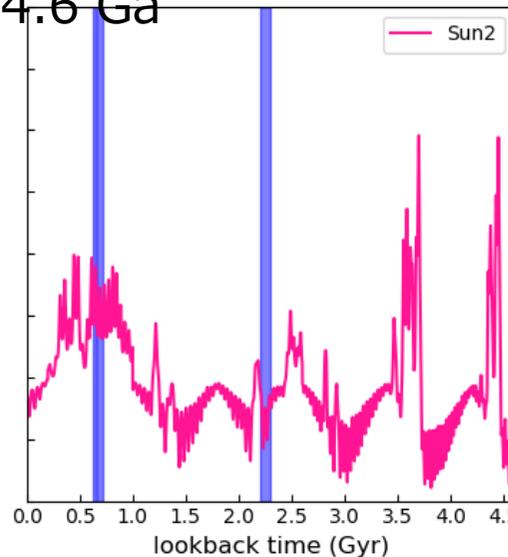
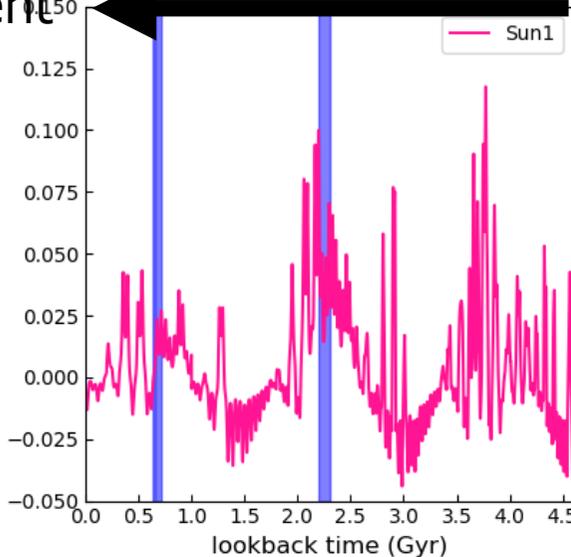


Present

4.6 Ga

Local density
 (spiral encounters)

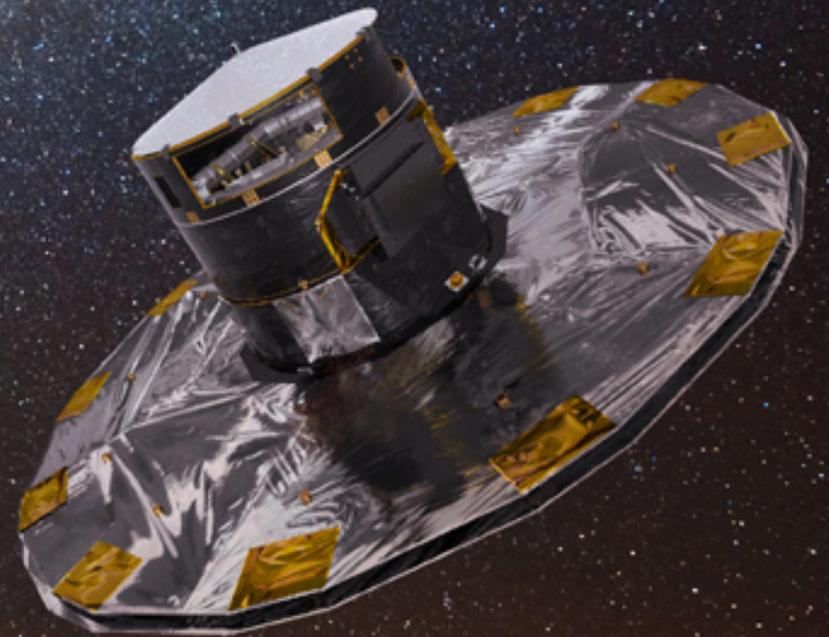
density excess (M_\odot/pc^3)



2. *Gaia* の成果 : “quick” review

*Astrometric Satellite “GAIA”
launched 19th Dec. 2013*

可視光帯・ESA



Gaia Revolution

— Astrometry (位置天文観測) —

main baryonic component = “Stars”
Gaia → 1.3B stars’s 6D phase space
info. ($\alpha, \delta, \varpi, \mu_\alpha, \mu_\delta, v_r$)

DR1 (2016/9)

DR2 (2018/4)

EDR3 (2020/12/3) ← Now, here!

$\Delta\varpi \sim 25 \mu\text{as}$

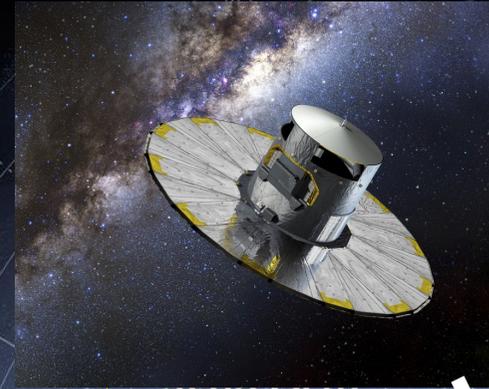
$\Delta\mu \sim 25 \mu\text{as/yr}$

LOS vel. (RVS)

DR3 (2022)

Final (TBD)

→ **global-scale galactic dynamics**
reveal bar / spiral structures
& **stellar evolution**



Gaia (2013~)
 $\sim 10 \mu\text{as}$; 1.3B
 $d < \sim 5 \text{ kpc}$

Galactic Longitude

質 \sim 2桁
量 \sim 4桁



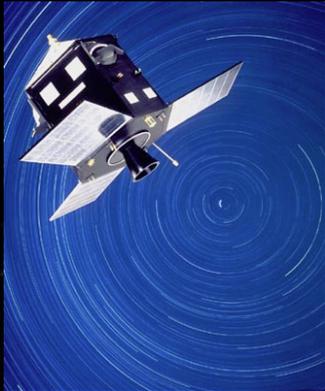
$d < \sim 100 \text{ pc}$

Hipparcos (1989~1992)
 $\sim 1 \text{ mas}$; 120K

courtesy X. Luri and A. Robin
Rix & Bovy, A&ARv, 21, 61, (2013)

Hipparcosが描き出した天の川

世界初のスペース位置天文観測



1989-1993
ESA

118,218 stars
Hw < 12等級
d < 100 pc

ωケンタウリ (球状星団)

アンドロメダ銀河M31
さんかく座銀河M33

47 Tucanae

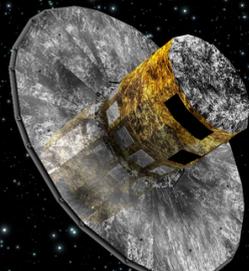
大マゼラン雲
小マゼラン雲

Gaiaが描き出した“動く”天の川

2018年4月データ公開 (Gaia DR2)

約13億の星の位置・速度測定 (精度 0.02 - 2 mas)

$G < \sim 20$ 等級; $d < \sim 5$ kpc



2013-運用中

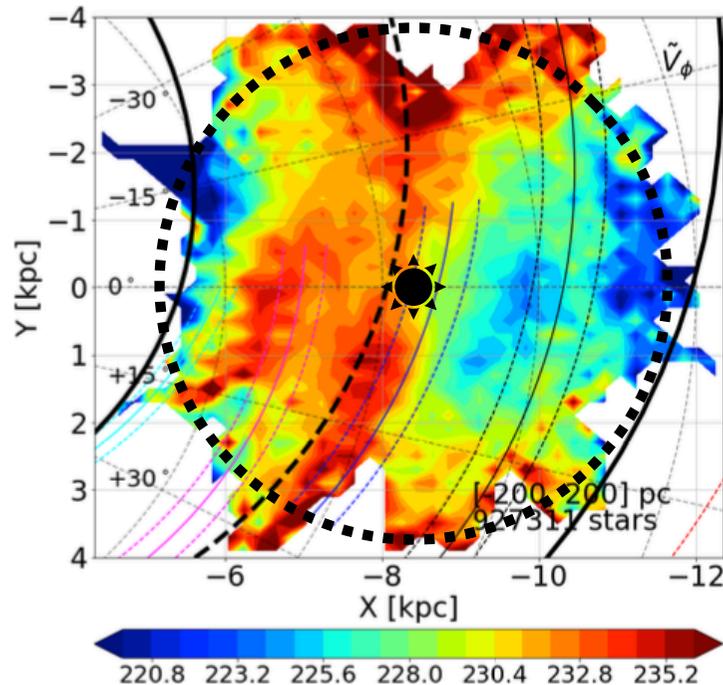
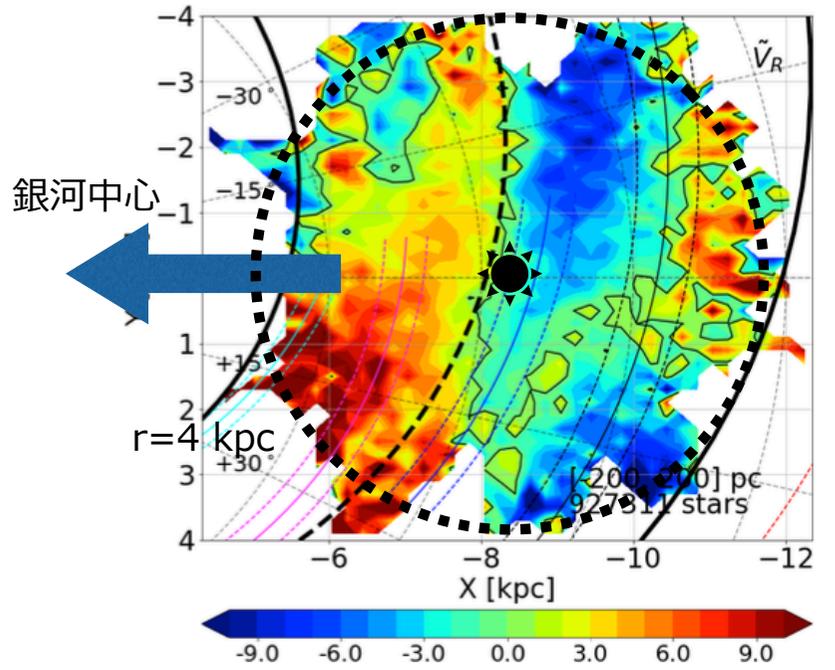
多数の変光星 (候補) の発見

- セファイド：約1万個
- こと座RR型：約14万個
- その他

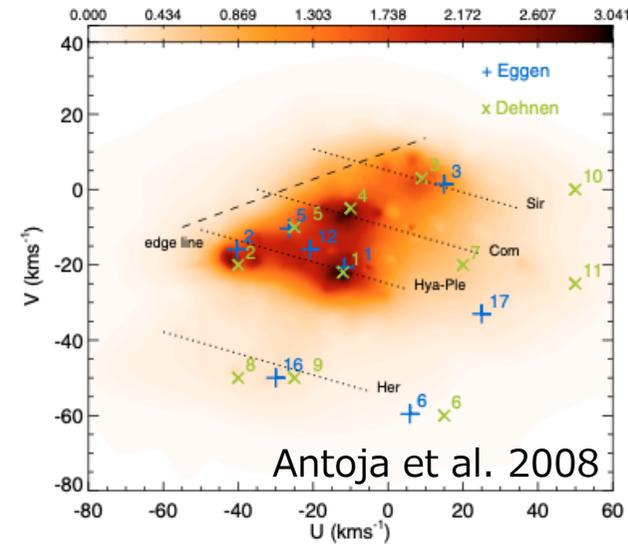
© ESA/Gaia

kpc-scale velocity fields & rich substructures in the local velocity field

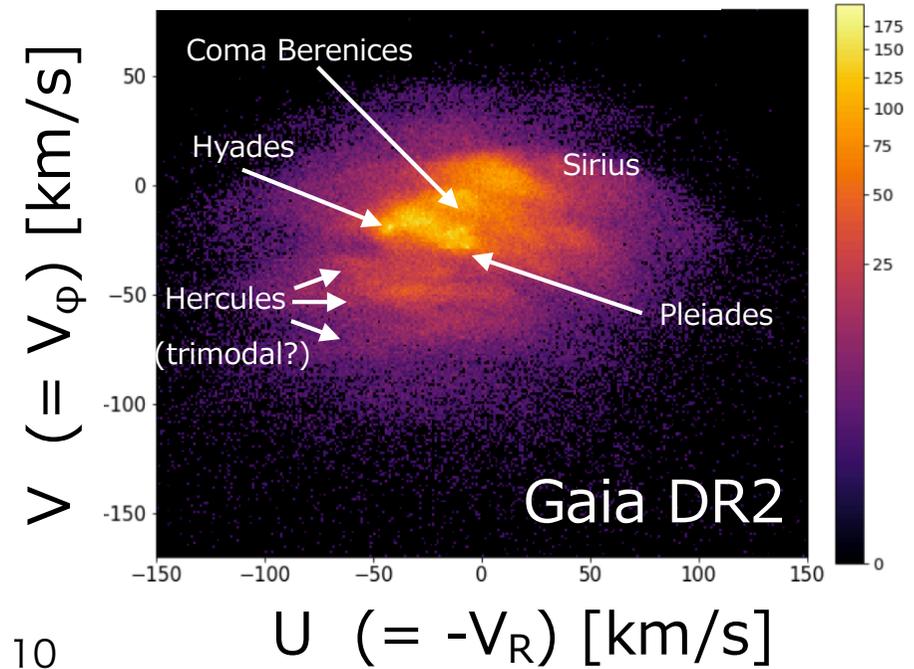
Gaia Collaboration, Katz et al., A&A, 616, A11, (2018)



速度空間分布 (太陽近傍)



Hipparcos



$R_{gc}-V_{rot}$ ridges v.s. local moving groups

✓ resonance features related with bar/spiral ??

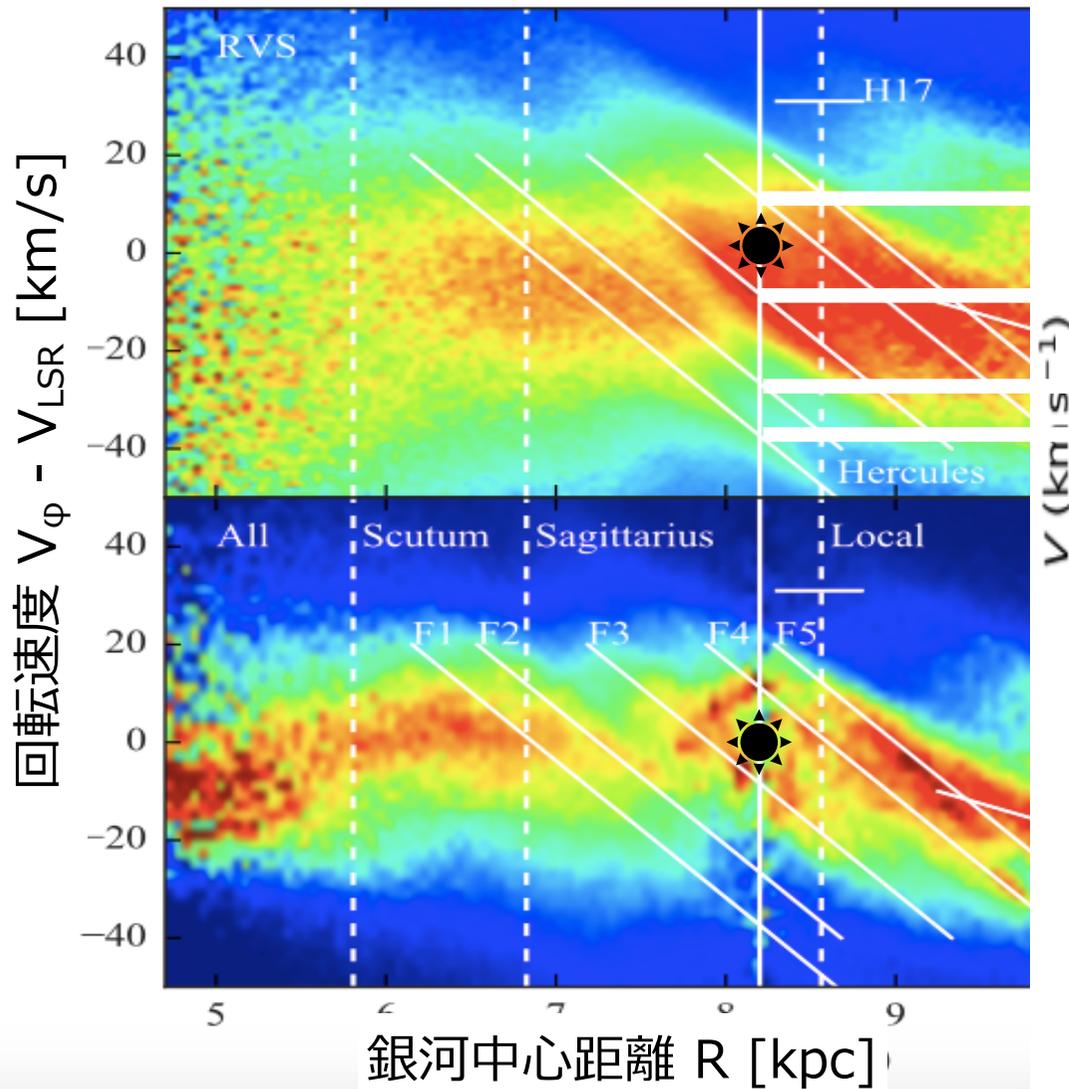
(e.g. Asano, Fujii, **JB** et al. 2020)

✓ phase wrapping of dynamic spirals ??

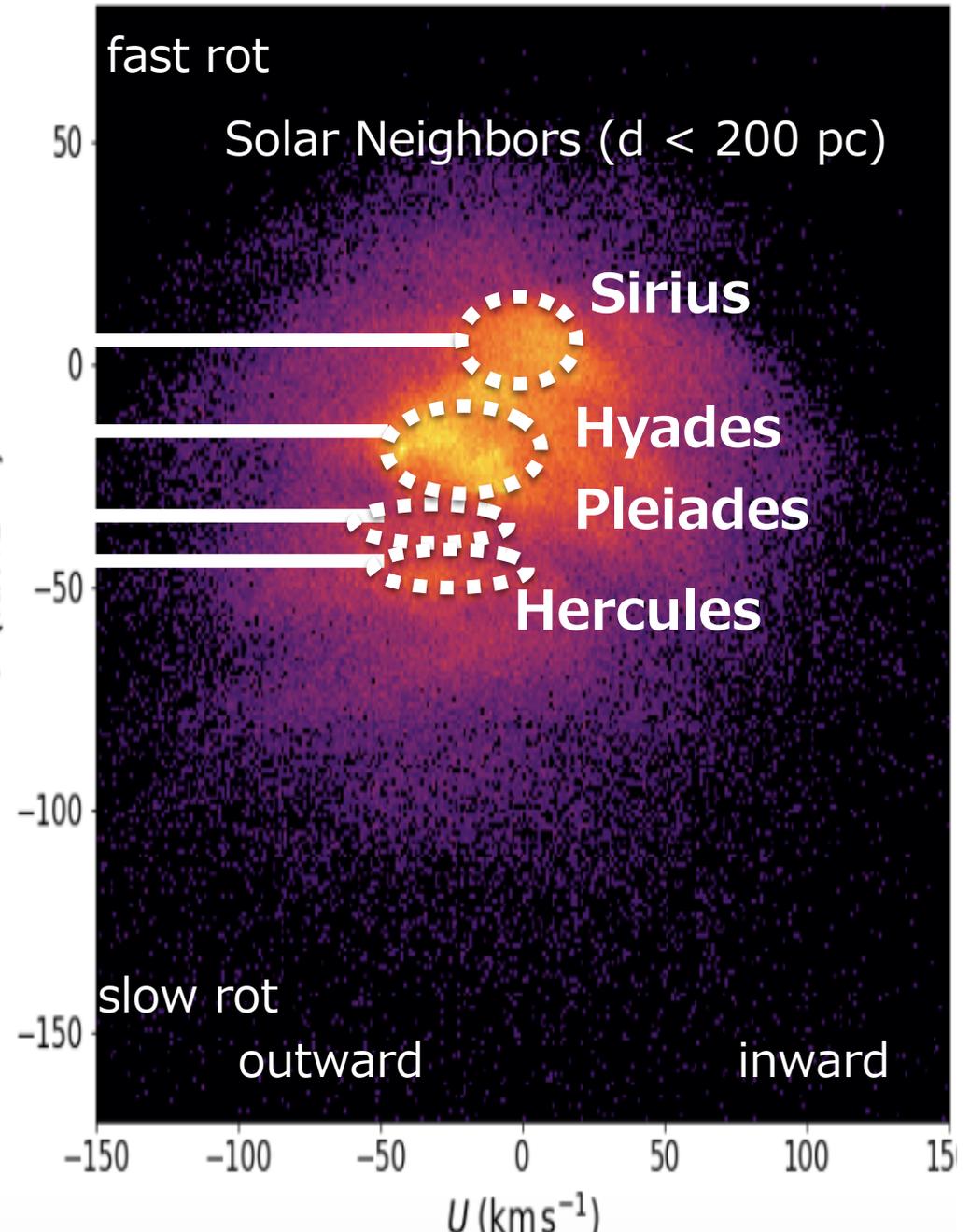
(e.g. Hunt, Kawata et al. 2018, 2019)

Kawata, **JB** et al. 2018, MNRAS

see also Asano, Fujii, **JB**, 2020, MNRAS



11



“Trimodal” Hercules stream due to bar resonances

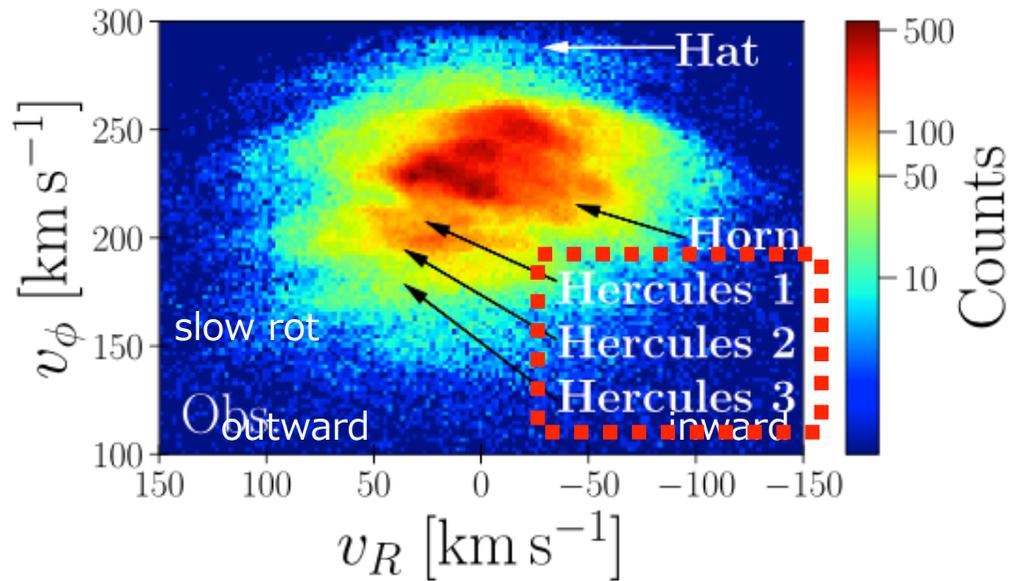
Asano, Fujii, **JB** et al. 2020, MNRAS

reproduced the “faint” substructures of the Hercules stream.

compare Gaia DR2 with N-body sim. $\rightarrow \Omega_{\text{bar}} \sim 40\text{--}45 \text{ km/s/kpc}$

Gaia DR2

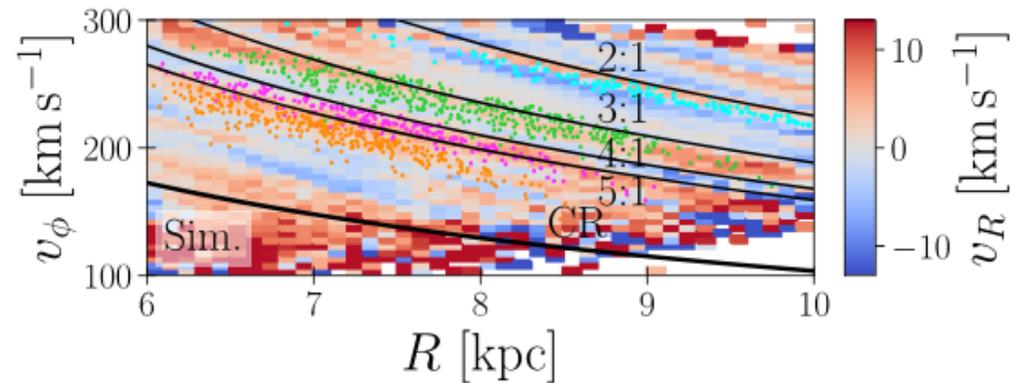
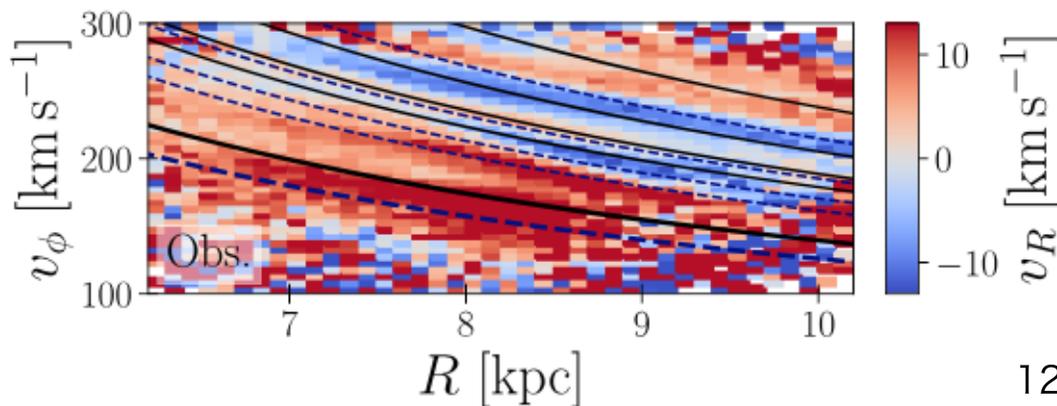
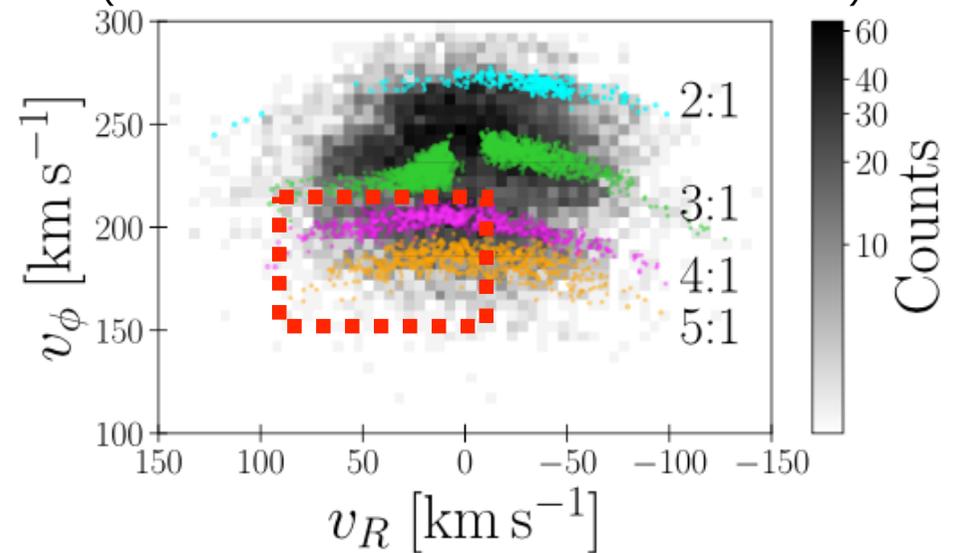
Solar Neighbors ($d < 200 \text{ pc}$)



N-body sim. (5.1 billion)

Fujii, Bedorf, **JB** et al. 2019, MNRAS

(GPU Clusters at U. Tsukuba & Leuden U.)

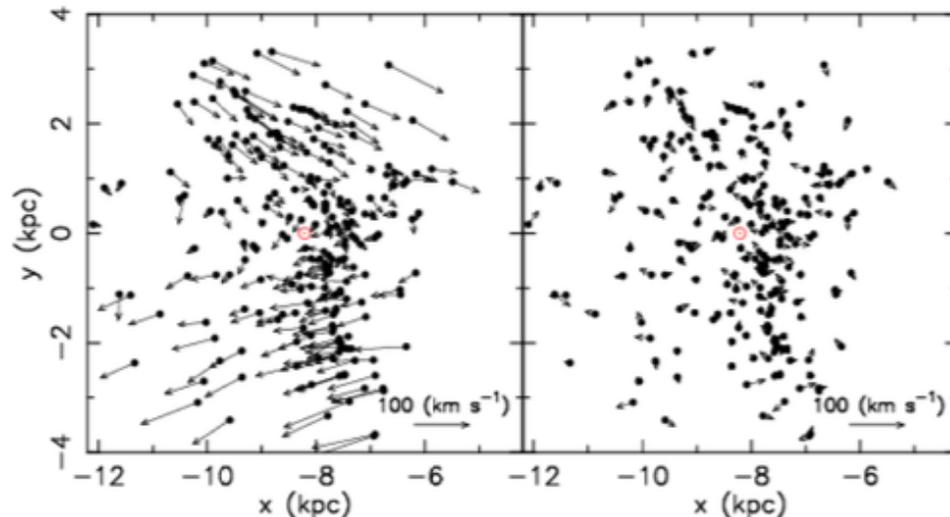


Galactic rotation from Cepheids with *Gaia* DR2 and effects of non-axisymmetry

Kawata, Bovy, Matsunaga, **JB**, 2019, MNRAS

using distance & velocities of 218 Cepheids

MCMC fitting of axisymmetric disk kinematic model (i.e. asymmetric drift eq.)

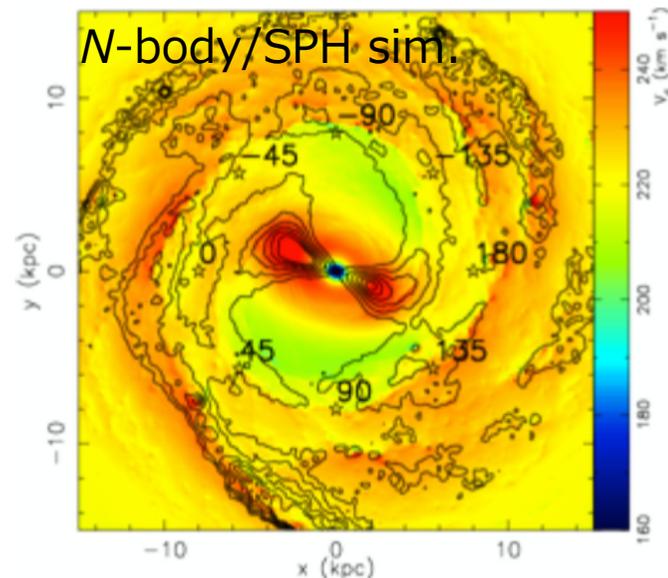


local circular velocity:

$$V_c(R_0) = 236 \pm 3 \text{ km/s}$$

Sun's peculiar velocity:

$$(U_\odot, V_\odot) = (12.4 \pm 0.7, 7.7 \pm 0.9) \text{ km/s}$$



using mock data of N-body/SPH sim.

(Baba+2018, ATERUI-II)

systematic uncertainty of $V_c \sim 6 \text{ km/s}$
due to bar/spiral structures

Galactic Bar Resonances Inferred from Kinetically Hot Stars

Kawata, **JB** et al. arXiv:2012.05890

6D位相空間情報 (Gaia) + 重力場 (仮定) → 星の軌道情報 (作用積分)、軌道共鳴情報

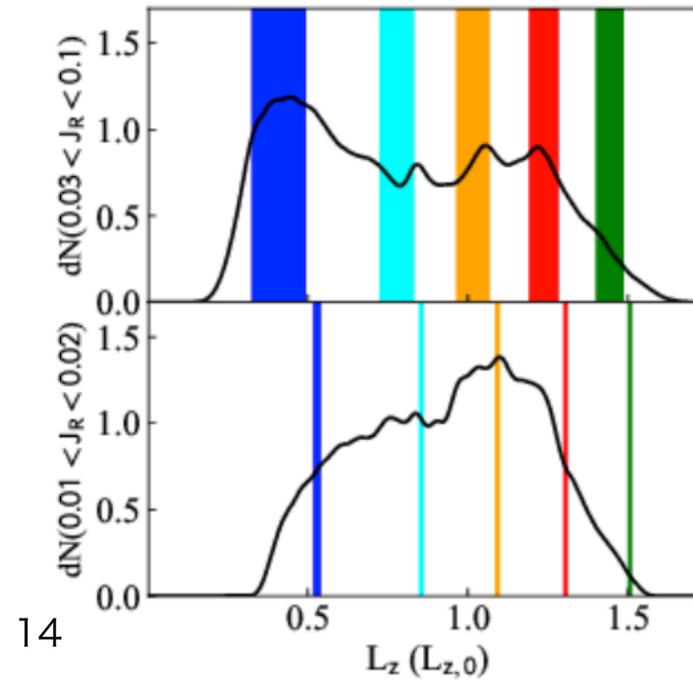
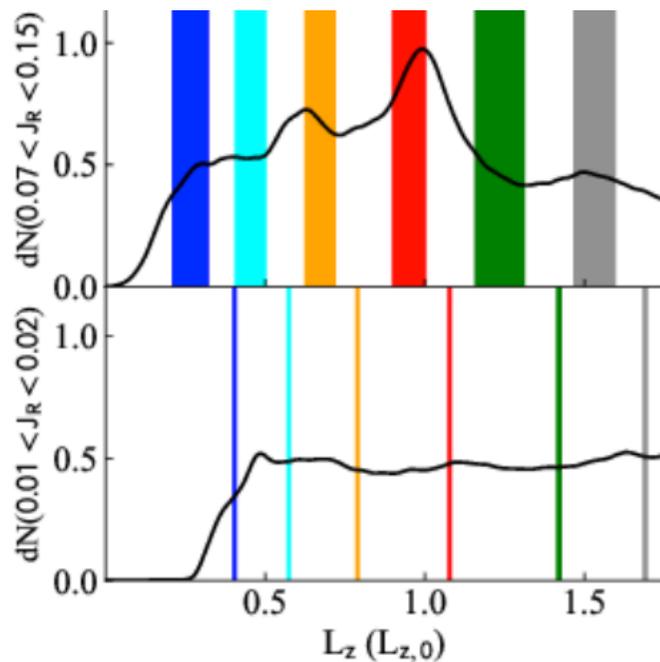
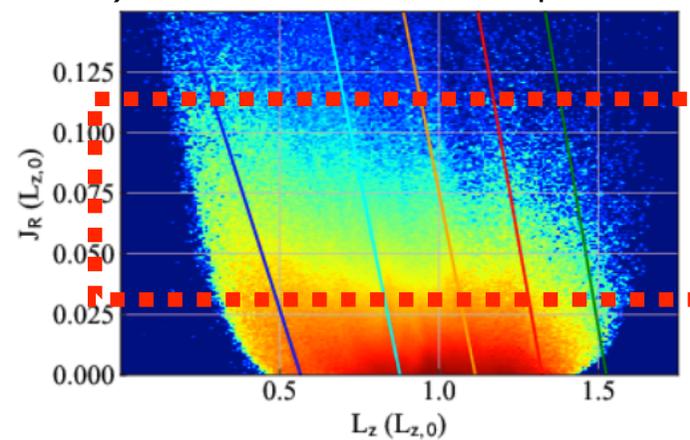
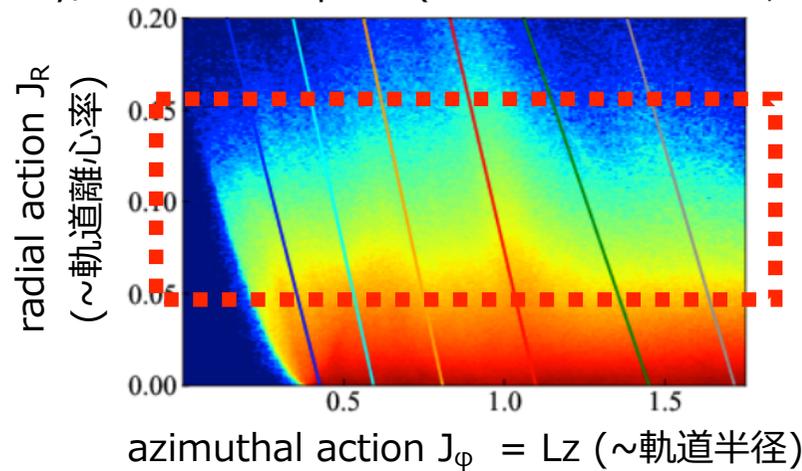
J_R がある程度大きな軌道の星はバーの影響が選択的によく反映される (渦状腕の影響が弱い)

→ バーの力学パラメータ推定が可能, $\Omega_{\text{bar}} \sim 34$ or 42 km/s/kpc

N-body/SPH action space (**JB** & Kawata 2020, ATERUII-II)

Gaia EDR3 action space

Resonance trapping features in action space



Gaia Data Release Scenario

see <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/release>

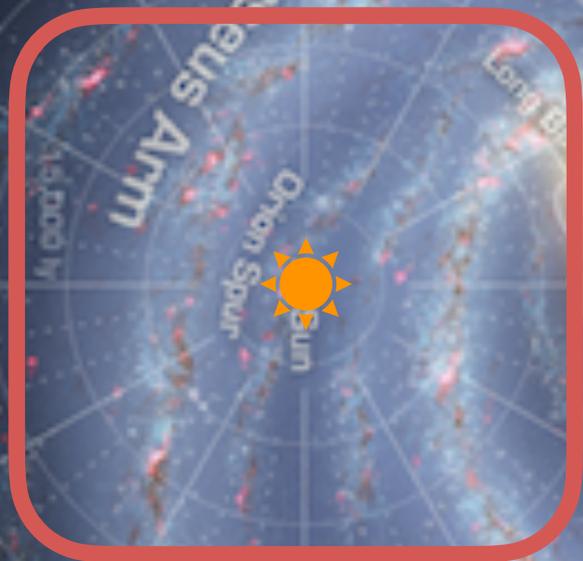
Early DR3 (third quarter of 2020) ← 昨年末12/3!

- Improved astrometry (positions, parallaxes, proper motions)
- Improved photometry (integrated G, GBP, GRP)
- ものすごく新たな観測データというよりは、DR2の精度を向上させたEDR3を公開

DR3 (first half of 2022) ← 来年の前半 (1年半後?)

- Object classification and astrophysical parameters, together with BP/RP spectra and/or RVS spectra they are based on, for spectroscopically and (spectro-)photometrically well-behaved objects.
- Mean radial velocities for stars with available atmospheric-parameter estimates.
- **Variable-star classifications** together with the epoch photometry used for the stars.
- Solar-system results with preliminary orbital solutions and individual epoch observations.
- **Non-single stars.** 変光星・(位置天文学的)連星
- Quasars and Extended Objects results
- An additional data set, called the Gaia Andromeda Photometric Survey (GAPS), consisting of the photometric time series for *all* sources located in a 5.5 degree radius field centred on the Andromeda galaxy.

3. 渦状腕構造



動的渦状腕モデル

Baba et al. 2013, ApJ

Baba 2015, MNRAS,

Dobbs & Baba, 2014, PASA (review)

渦状腕モデルの観測的検証法

Baba et al. 2015, PASJ

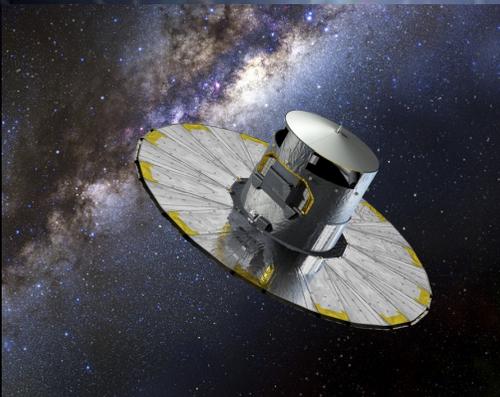
Baba et al. 2016, MNRAS

Gaiaデータによる検証 (w/ ATERUI)

Baba et al. 2018, ApJ

Miyachi et al (JB). 2019, ApJ

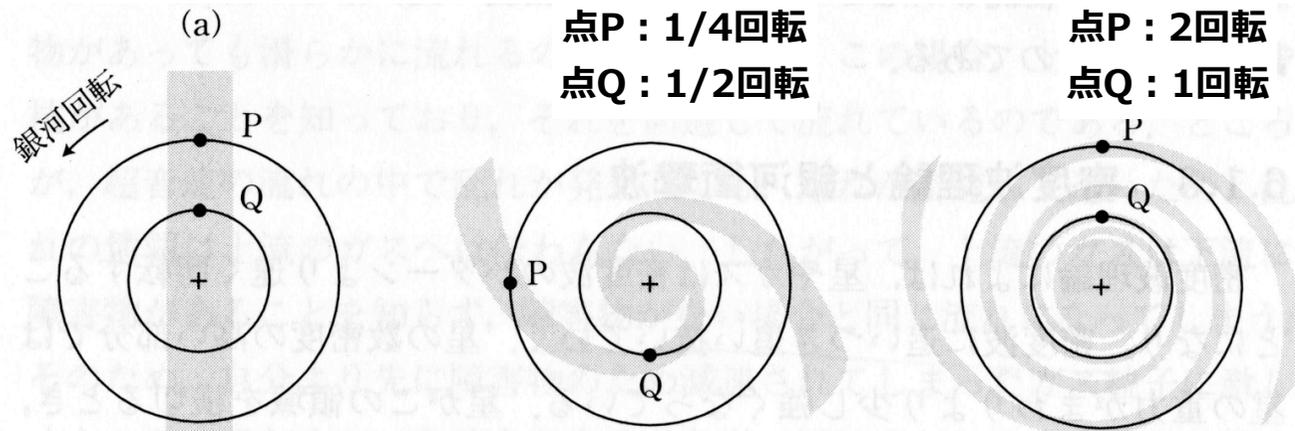
Kawata, JB et al. 2018, MNRAS



巻き込みの困難 (ジレンマ)

- 渦状腕=実体(常に同じ星が渦状腕を構成)をすると
- 差動回転によりぐるぐるに巻き込まれる
(e.g 宇宙年齢の間に~40巻き)
- 現実の渦巻銀河(~1, 2巻き)

渦状腕を実体と考えると、現実の渦巻銀河のゆるい巻き込みを説明できない



※平坦な回転曲線=差動回転 (点Pは点Qの2倍の回転周期)



実際の銀河 : ~1巻

これは「自己重力を無視」した場合の議論

実際には、自己重力と差動回転の影響で、実体的な腕構造は、形成・破壊を繰り返す (Baba et al. 2013) → **動的渦状腕モデル**

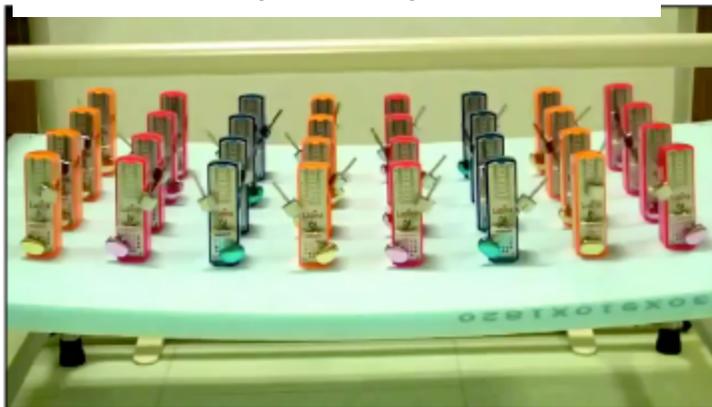
see also Michikoshi & Kokubo (2015,2016,2018,2020)

余談

「動的渦状腕」の名称について

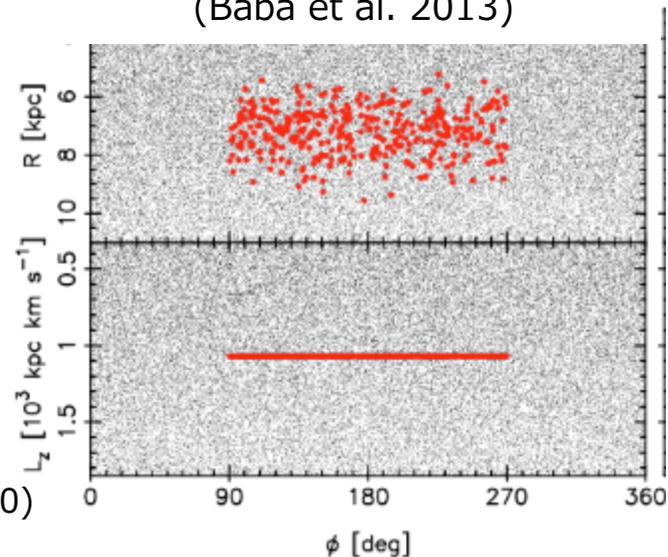
- 国内外で定着しつつある名称
- 伝統的には “transient, recurrent spiral” or “transient spiral” (Sellwood & Carlberg 1984) と呼ばれることが多いが、単なる非定常というよりは、星の運動の集団同期などの協同現象を扱う「非線形科学」的側面を強調したいと、指導教官の和田桂一氏 (鹿児島大) と思索。
 - ※ Baba et al. 2013では “Non-Steady Spiral” としてある
- 「動的平衡」(福岡伸一)に触発され、「動的平衡渦状腕 (dynamic equilibrium spiral)」 (= 非定常平衡状態) と呼ぶことにした。
 - 2013年の夏の学校の招待講演で利用した和訳
 - Dobbs & Baba (2014) review paperで利用
- ただし、最近は単に「動的渦状腕 (dynamic spiral)」と言っている。

メトロノーム (振り子) の集団同期現象
(Youtube)



see also Michikoshi & Kokubo (2018,2020)

Synchronized “Swarms” of Stars ?
(Baba et al. 2013)



渦状腕構造論：密度波 vs. 動的渦状腕

密度波モデル

～Gyrの間、剛体回転する
安定的パターン (“仮説”)

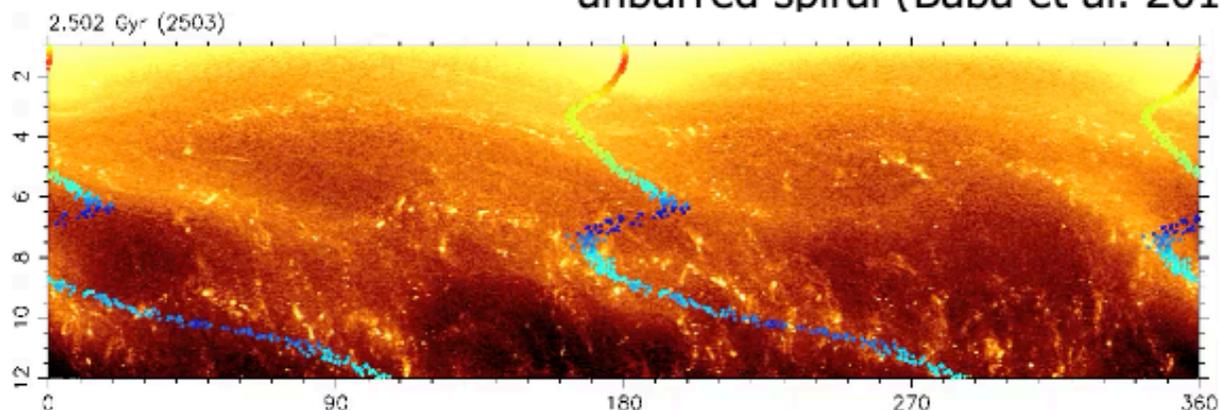
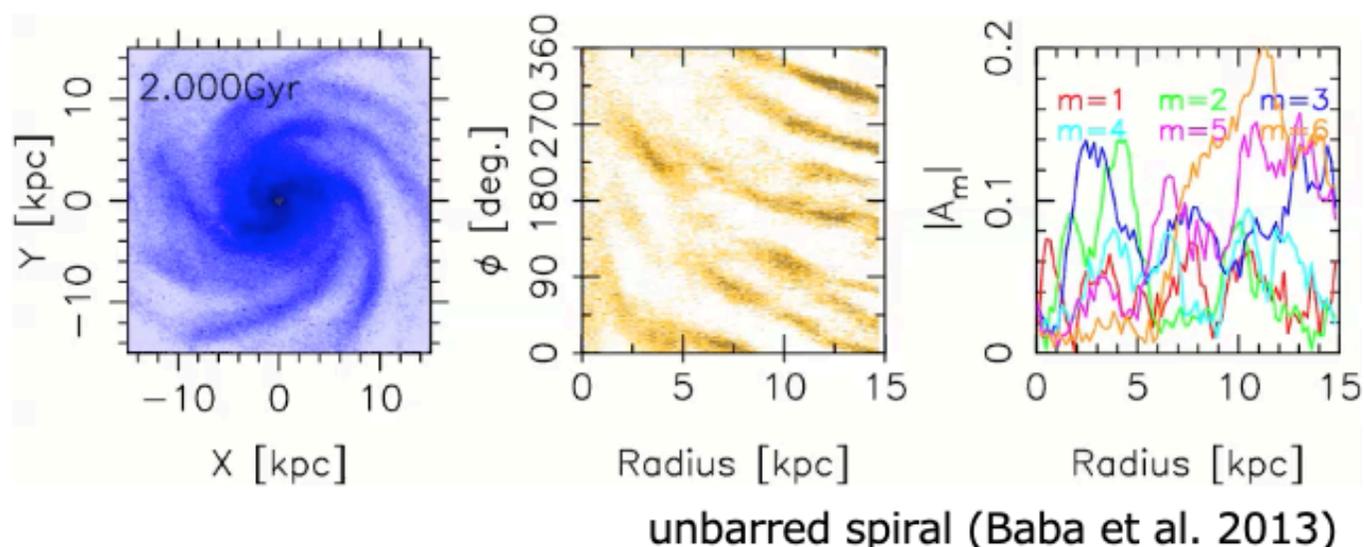


シミュレーションで
再現した研究はない

動的渦状腕モデル

ASURA (T.R. Saitoh)
CfCA XT-4/XC-30

銀河回転周期(～数100Myr)で、
巻き込み、合体-分裂を繰り返す動的構造



barred spiral (Baba 2015)

渦状腕構造論：密度波 vs. 動的渦状腕

— 1960年代からの論争 —

density wave

dynamic arm

レビュー Dobbs & Baba (2014)

密度波モデル

動的渦状腕モデル

腕に相対的な軌道 (模式図)

腕を横切る運動

腕に収束/発散する運動
(馬蹄型類似軌道)

$R < R_{cr}$

$R > R_{cr}$

ここ10年くらいの大きな進展

差動回転により増幅/維持
される動的平衡構造

- Baba et al. (2013); Baba (2015)
- Grand, Kawata et al. (2012a,b,2015)
- Kawata et al. (2014)
- Fujii, JB et al. (2011)
- Michikoshi & Kokubo (2015,2016,2018,2020)

© Junichi Baba

寿命： $> 1 \text{ Gyr}$ \longleftrightarrow $\sim 100 \text{ Myr}$ (recurrent)

回転則： 剛体回転 \longleftrightarrow 差動回転

星の運動： 通過 \longleftrightarrow $\text{収束・発散 (+ migration)}$

- Lin & Shu (1964,1966)
- Bertin & Lin (1996)
- Shu (2016)

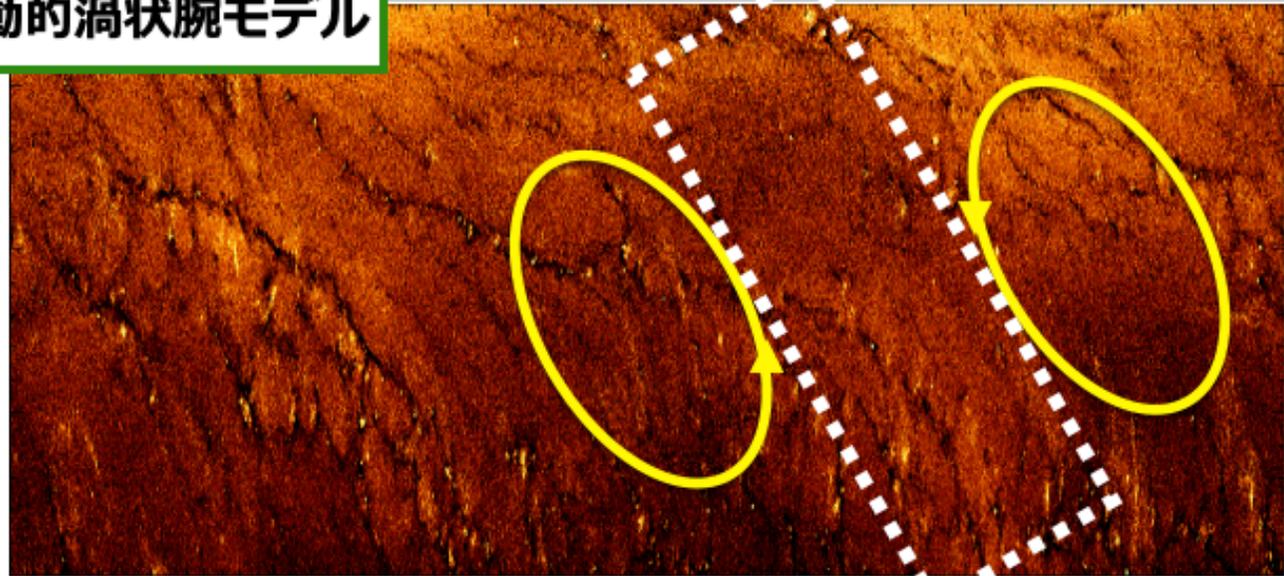
- Goldreich & Lynden-Bell (1965) ; Toomre (1981)
- Sellwood & Carlberg (1984); Sellwood & Binney (2002)
- etc...

Galactic-scale “colliding” flow

動的渦状腕モデル

星の面密度

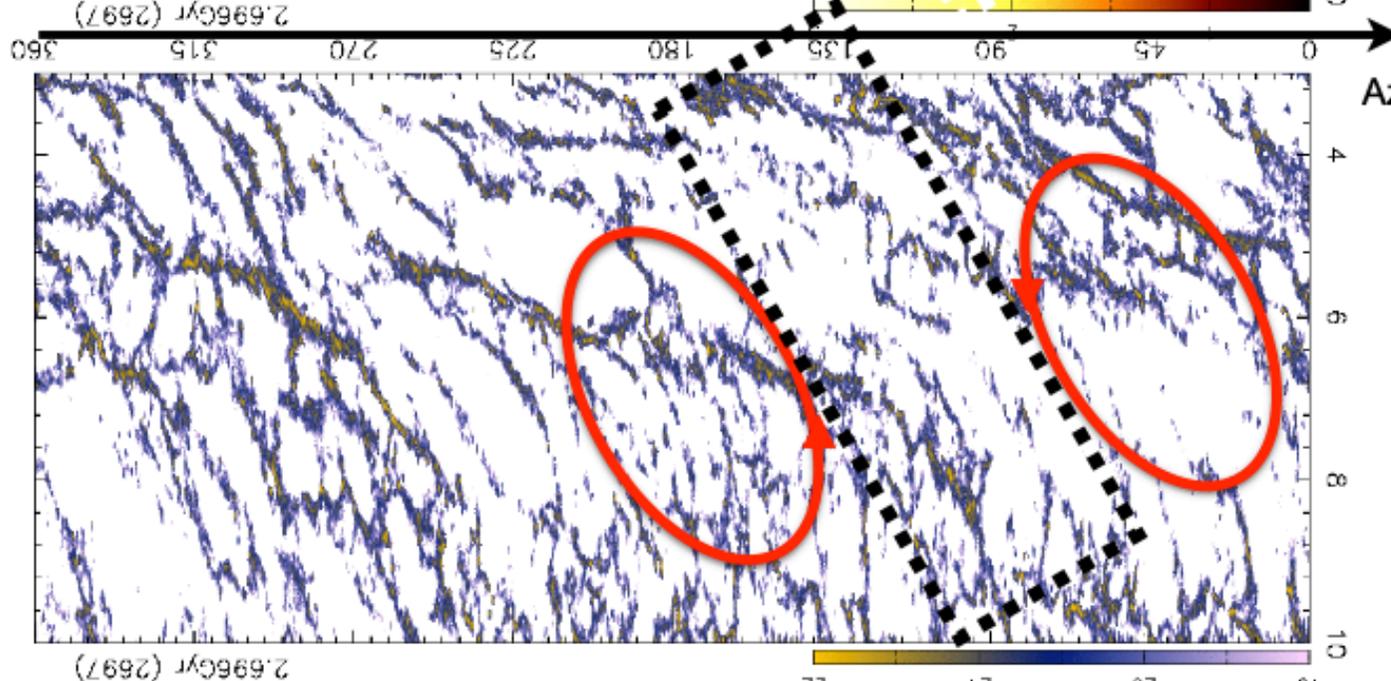
Radius



ASURA (T.R. Saitoh)

CfCA XC-30

低温ガスの
面密度

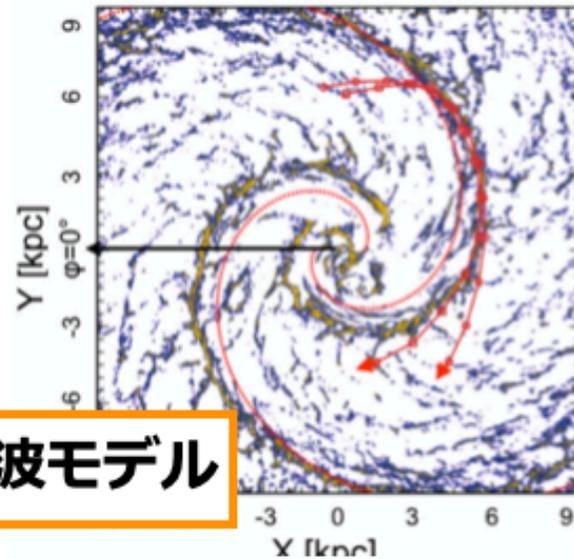


Azimuth Angle Φ

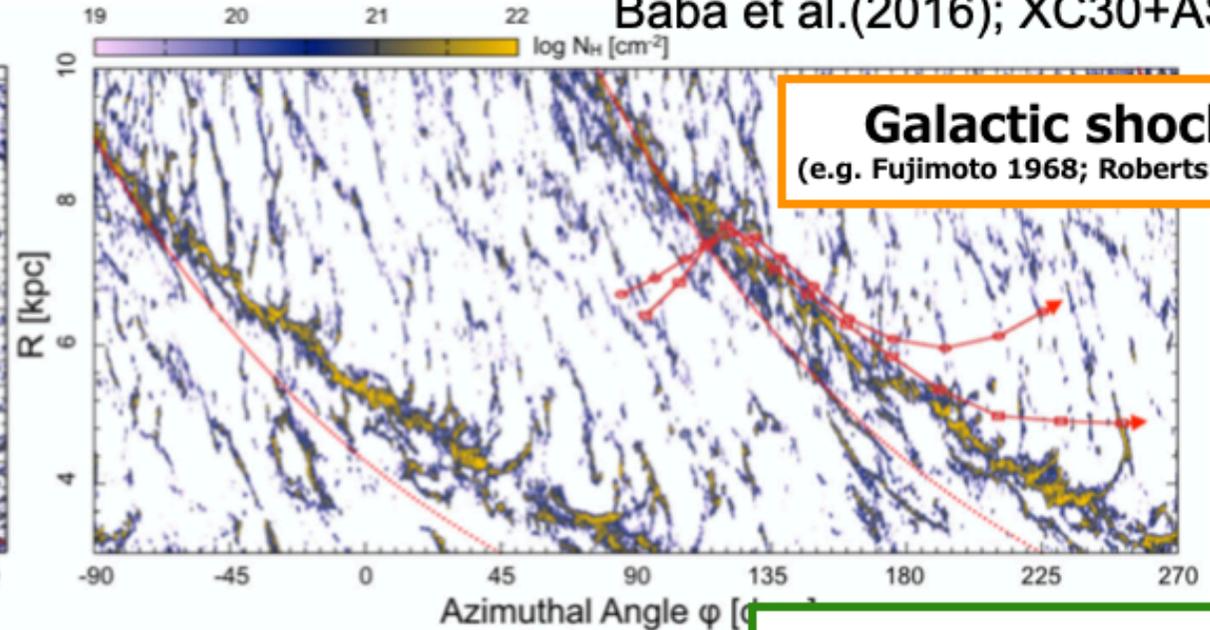
Baba et al.(2016); see also Wada, JB & Saitoh (2011)

Gas flow: move *across* or *along* arms?

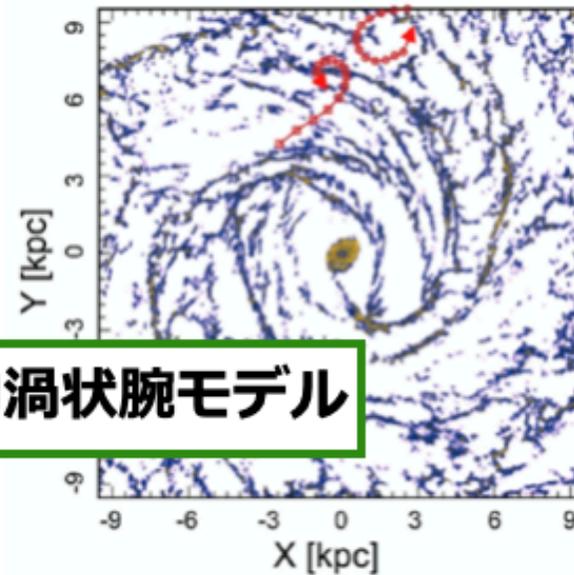
Baba et al.(2016); XC30+ASURA



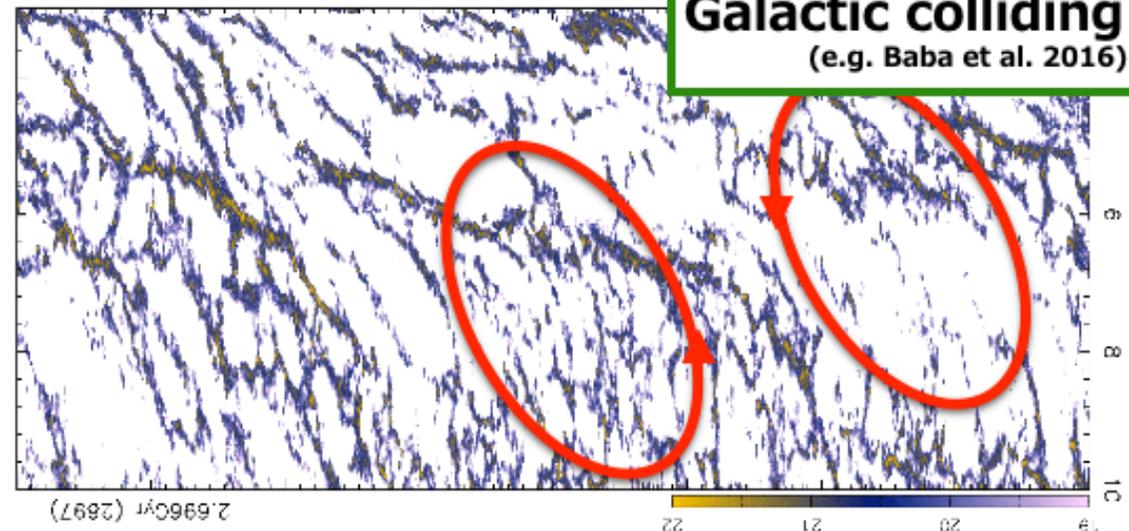
密度波モデル



Galactic shock
(e.g. Fujimoto 1968; Roberts 1969)



動的渦状腕モデル



Galactic colliding flow
(e.g. Baba et al. 2016)

MHD/dynamo sim. で銀河磁場構造の違いが出たら面白い (SKA)

How do *different* spiral models impact the GMC pop.?

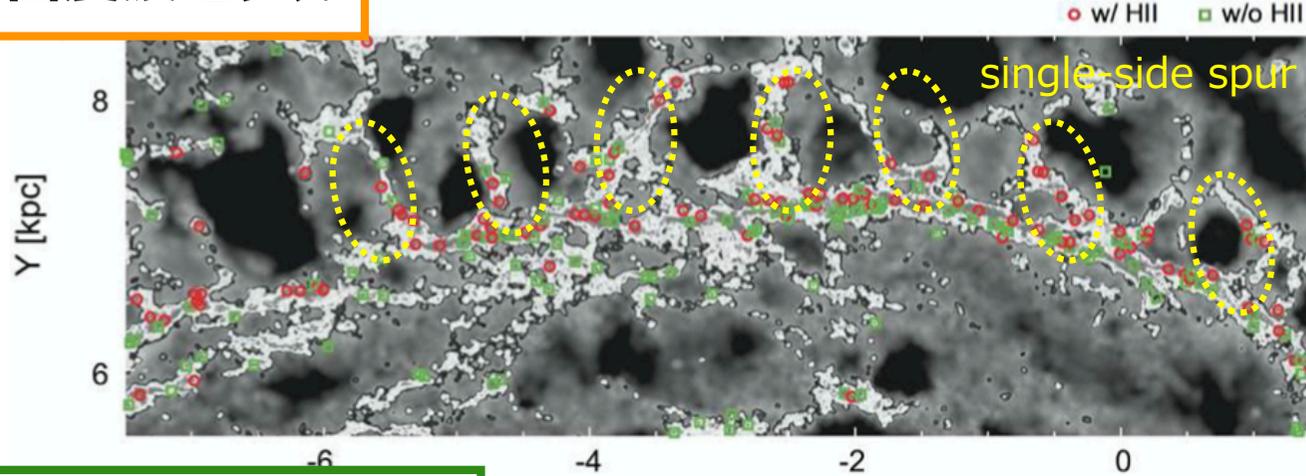
Baba et al.(2017); XC30+ASURA

see also Pettitt et al. 2016 (XC30); Pettitt, Dobbs, **JB** et al. 2020 (XC50);

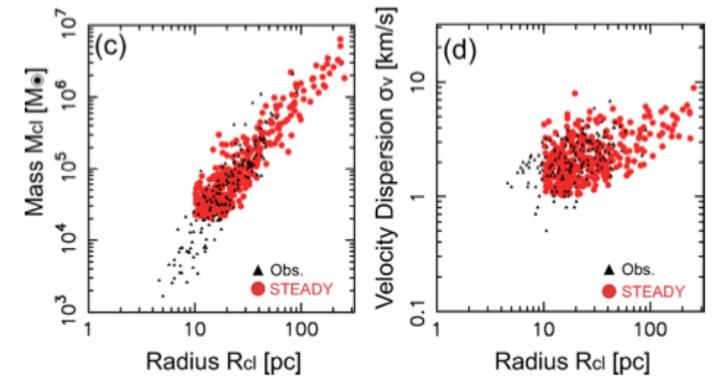
Y. Fujimoto et al. 2016, 2019 (XC30)

密度波モデル

アーム周辺のGMCの星形成活動性

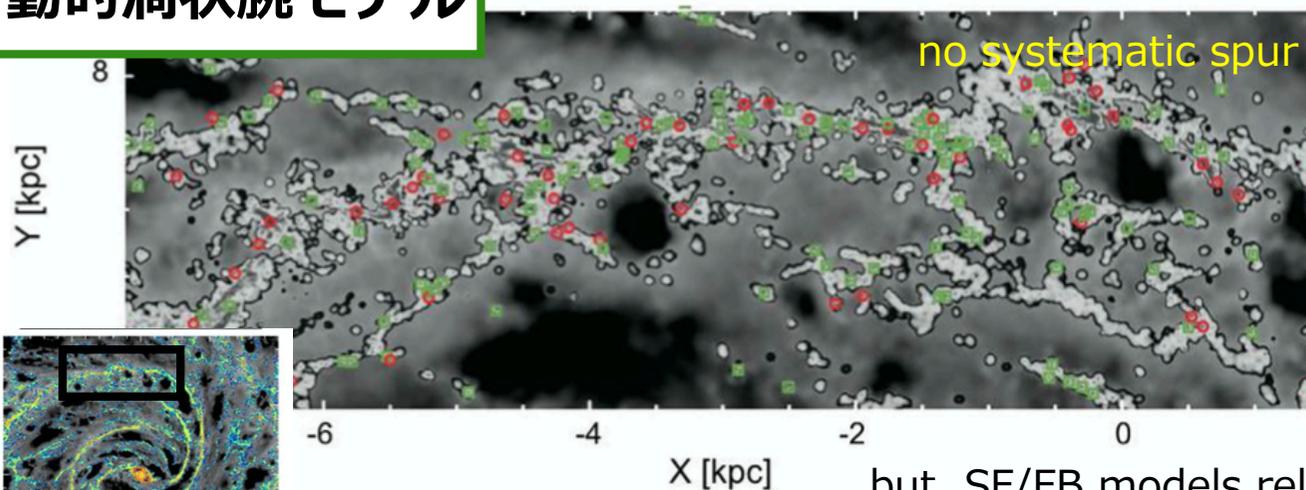


GMCのサイズ・質量・速度分散関係

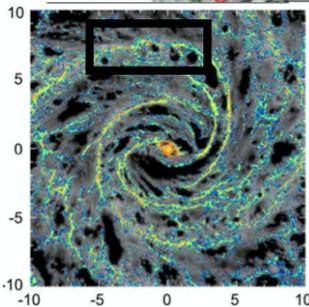
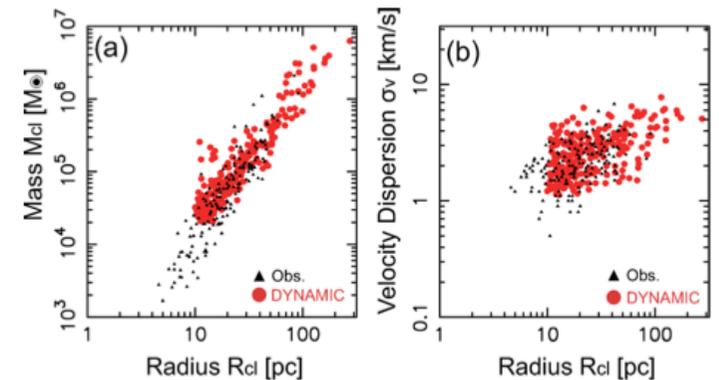


動的渦状腕モデル

difference in spur morphology



No difference.



HIガス+H2ガス

but, SF/FB models rely on “fudged” sub-grid physics.

require realistic physical models

ask 小林さん、岩崎さん

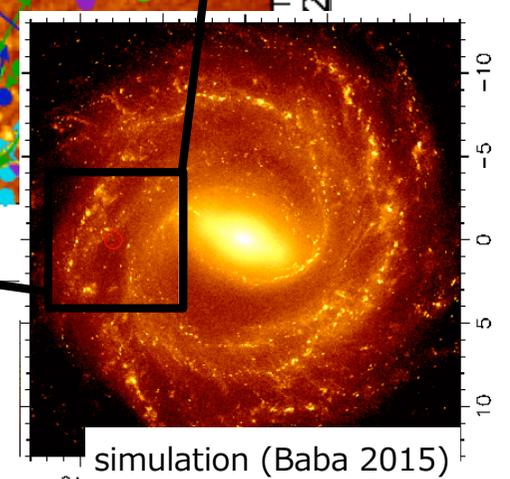
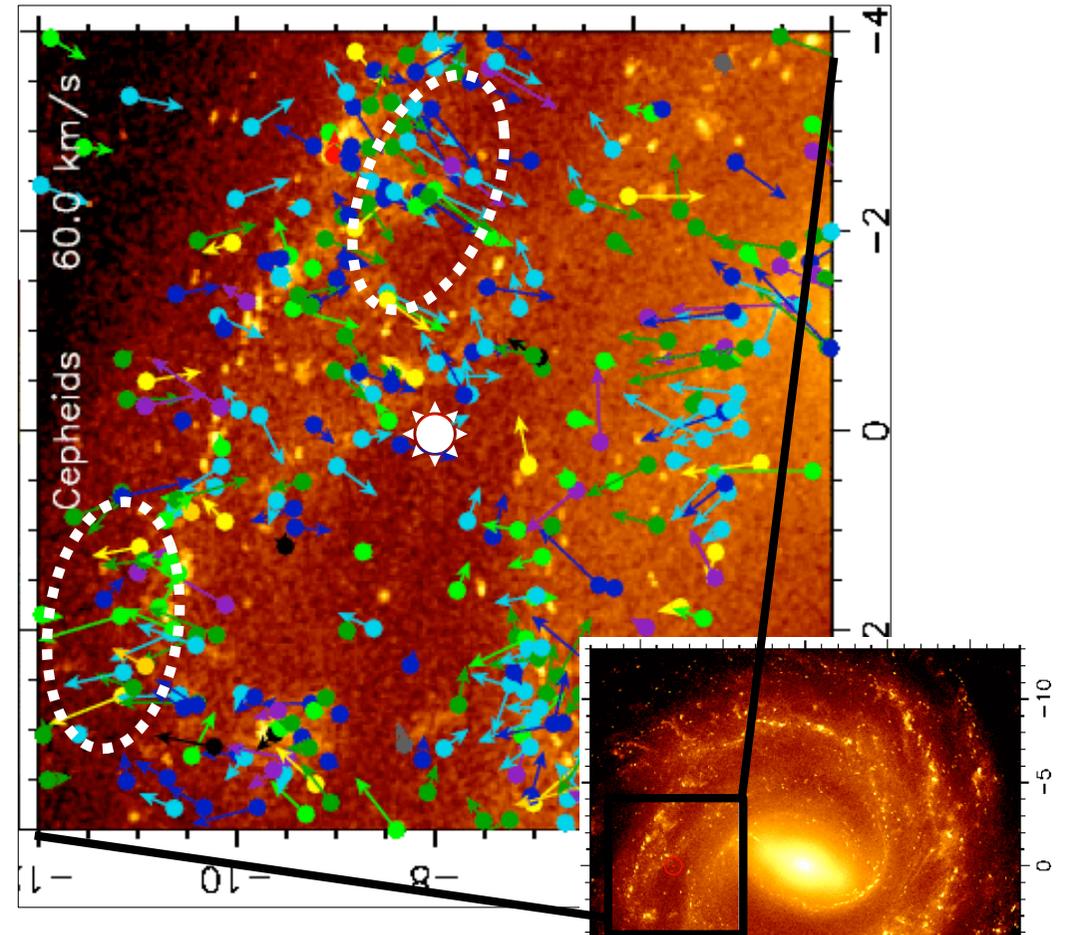
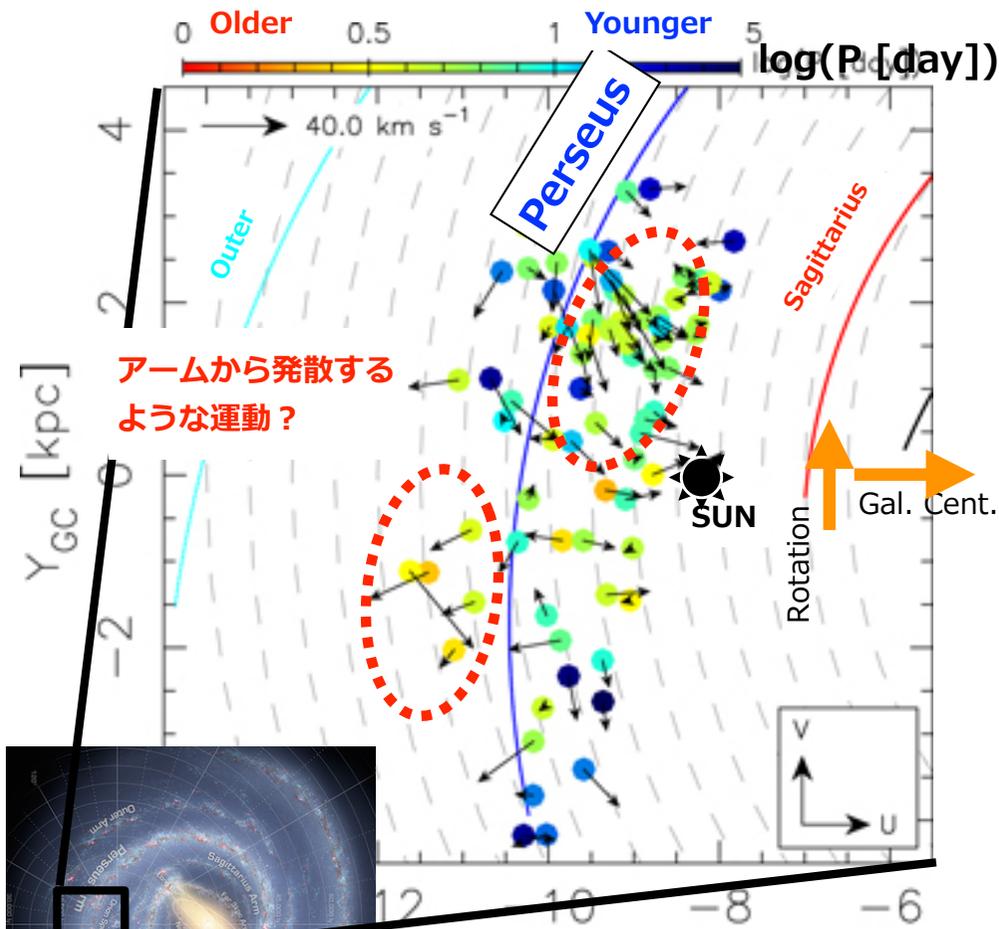
“Disrupting” Perseus arm? (w/ GaiaDR1)

Baba, Kawata, Matsunaga et al. 2018, ApJ

ペルセウス腕周辺の
77個のセファイドの特異速度 w/ Gaia DR1

壊れつつあるアーム周辺の
若い星粒子 (~ 100 Myr) の特異速度

w/ N-body/SPH sim. ASURA + ATERUI

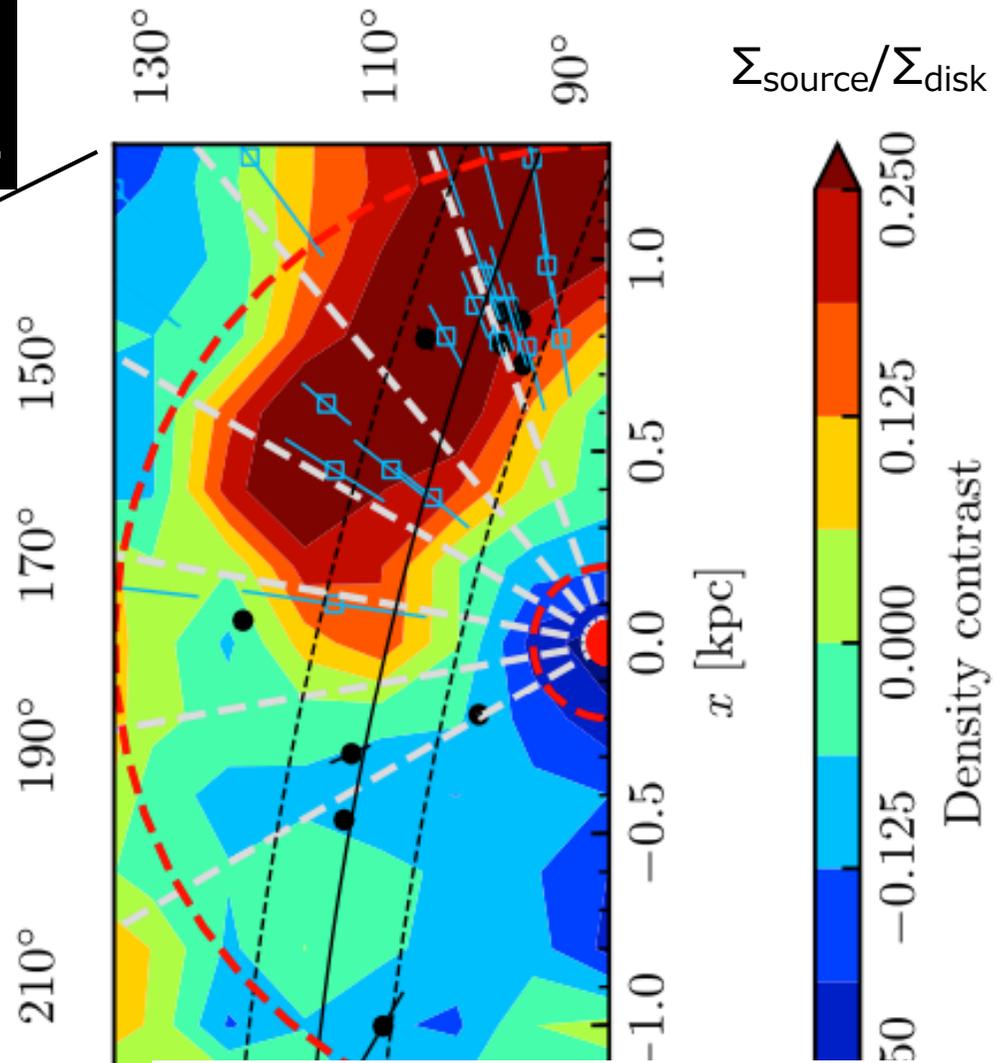


- $(R_0, V_0) = (8.2 \text{ kpc}, 237 \text{ km/s})$
- $(U_s, V_s, W_s) = (10.1, 11.1, 7.0) \text{ km/s}$
- Spiral arms: Reid et al. 2014 (VLIB astrometry of HMSFRs)

The “Stellar” Local arm? (w/ GaiaDR2)

Gaia DR2 X 2MASS
 4654 old stars with ~ 1 Gyr
 up to ~ 1.2 kpc toward the outer Gal.

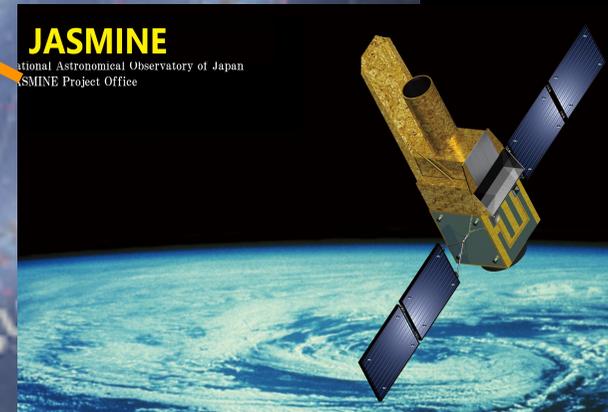
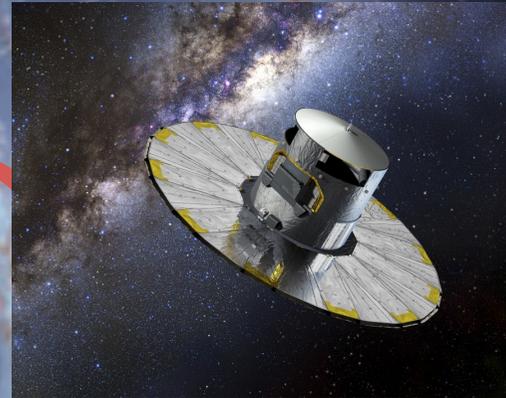
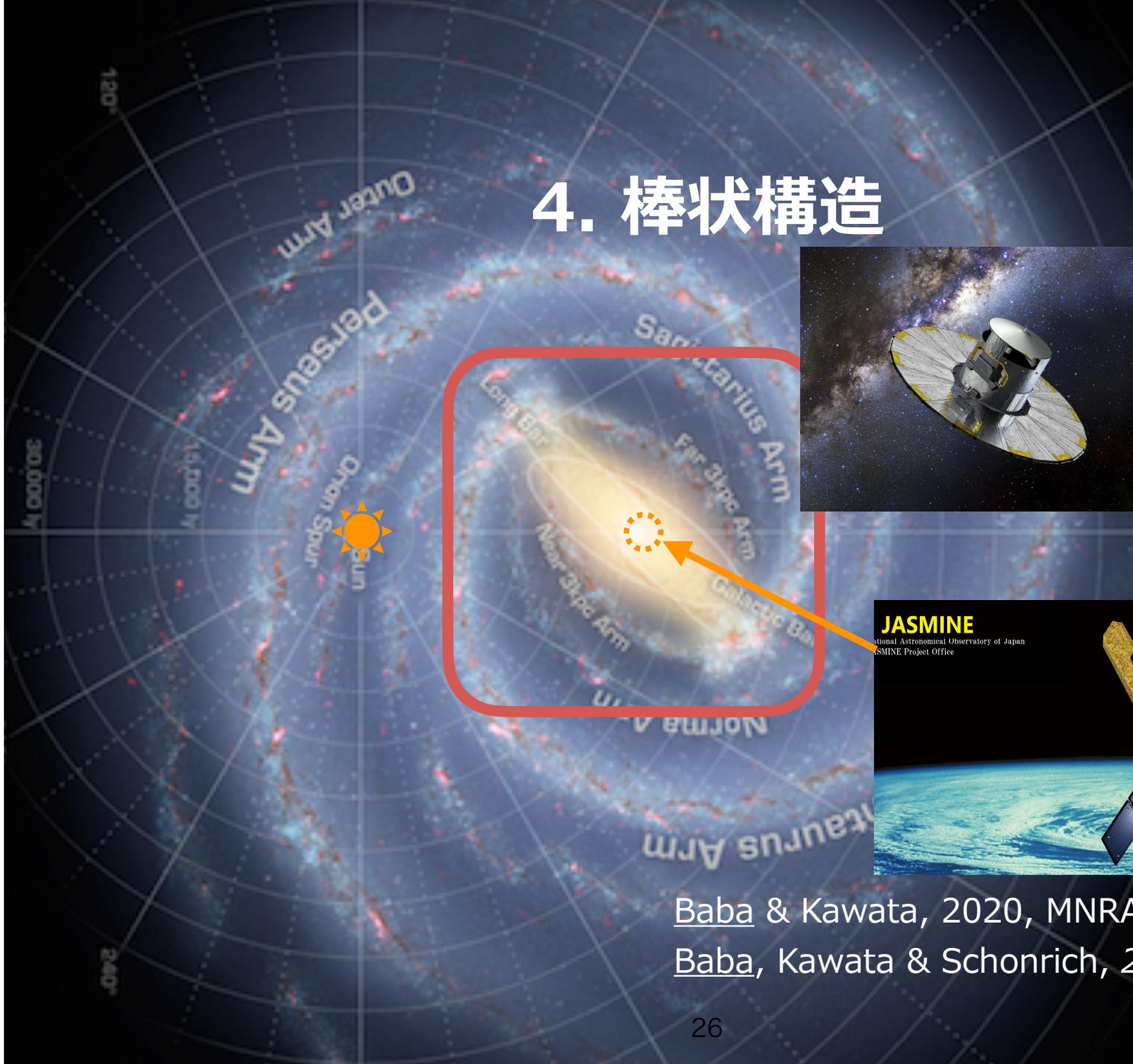
Local arm
 Orion “spur”
 (SF regions, gas)



- : VIBI HMSFRs (Xu et al. 2018)
- : Gaseous Local Arm (log-spiral)

ϕ [kpc]

4. 棒状構造



Baba & Kawata, 2020, MNRAS, 492, 4500
Baba, Kawata & Schonrich, 2020, submitted

First “direct” measurement of the Galactic Bar

Anders et al., 2019, A&A, 628, A94

150M stars (RGs)
Gaia DR2 + Pan-STARRS1
+ 2MASS + ALLWISE

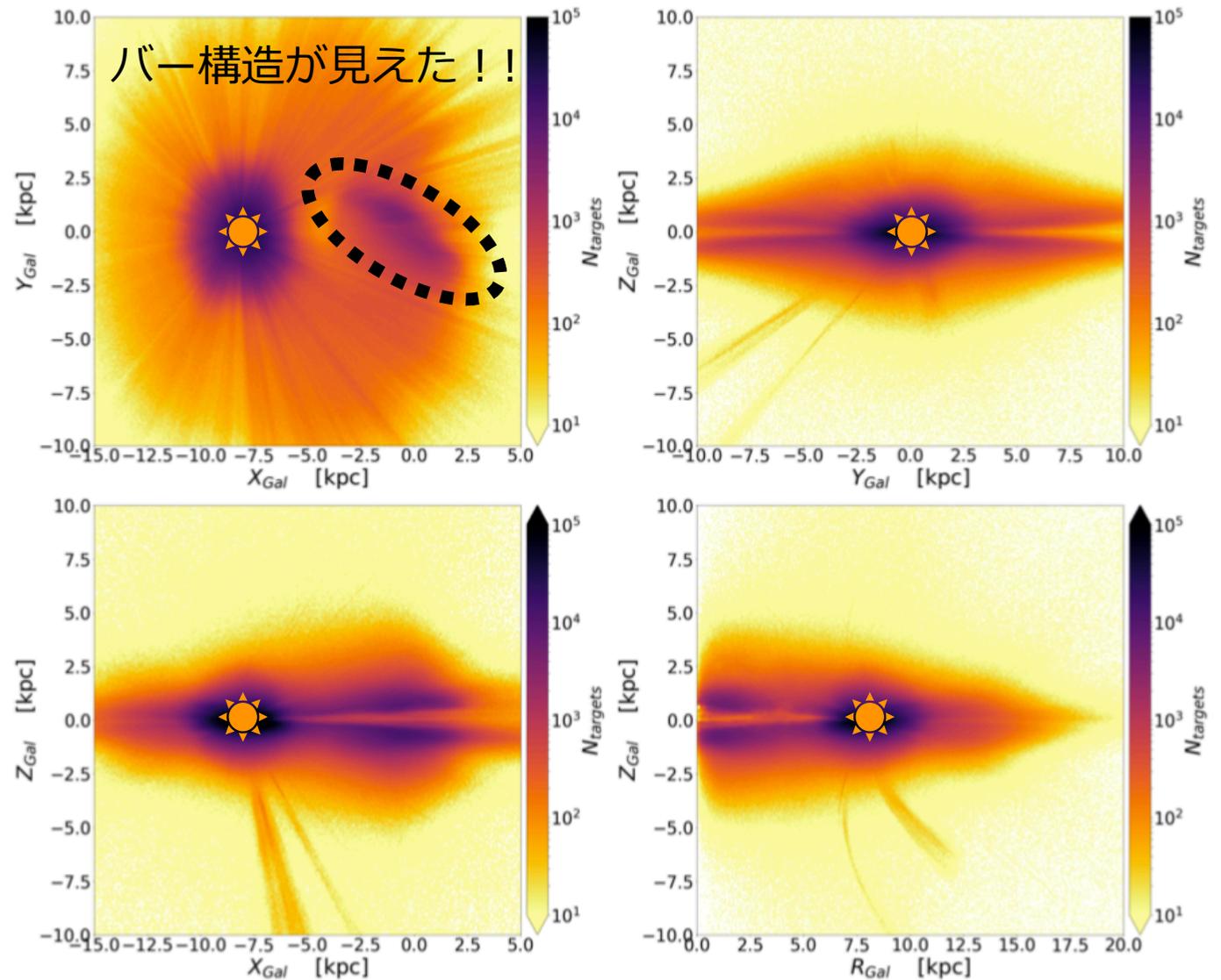


Fig. 7. Left: StarHorse density maps for the SH_GAIAFLAG==“000”, SH_OUTFLAG==“00000” sample in Galactocentric co-ordinates. Top left: XY map. Top right: YZ map. Bottom left: XZ map. Bottom right: RZ map. These density maps demonstrate that *Gaia* DR2 already allows to probe stellar populations in the Galactic bulge and beyond.

<https://sci.esa.int/web/gaia/-/61459-gaia-starts-mapping-our-galaxy-s-bar>

現在の動力学構造は概ねわかってきたが、**形成時期・進化史は不明**

✓ バーの理解の現状と課題：

- 形状：半長径 ~ 5 kpc、角度 $\sim 27^\circ$
Boxy/Peanut/X-形状
- 角速度： $\sim 40 \pm 5$ km/s/kpc
(Sanders et al. 2019, Bovy et al. 2019;
Asano, Fujii, **JB** et al. 2020;
Kawata, **JB** et al. arXiv:2012.05890)
- **形成時期**： $\sim 2-8$ Gyr ago ???
- **進化過程**：BPX形状への遷移時期 ???
角速度減速率 ???

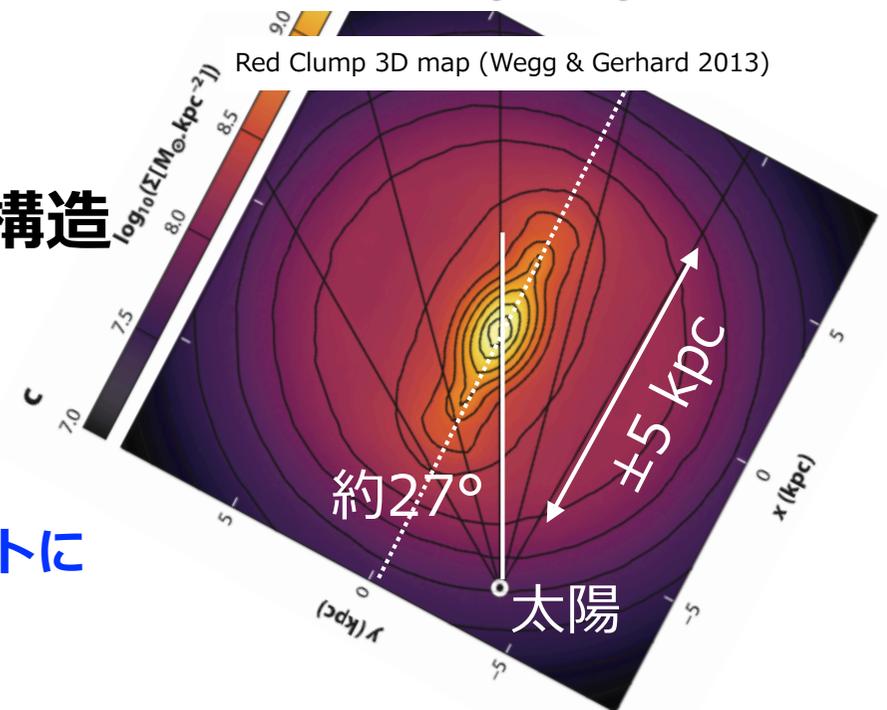
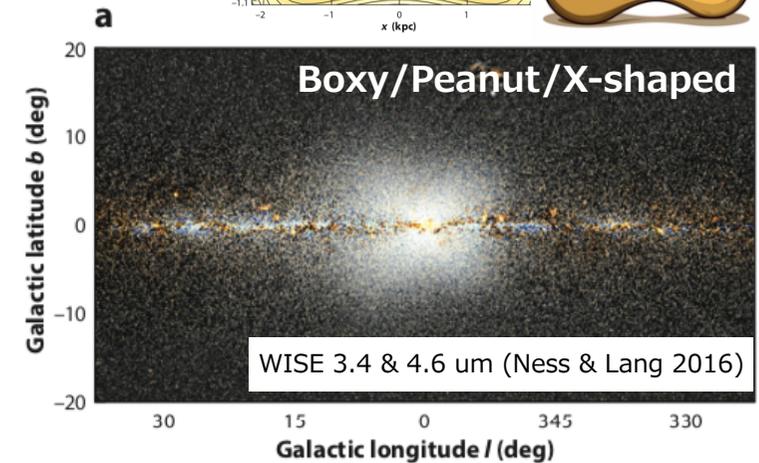
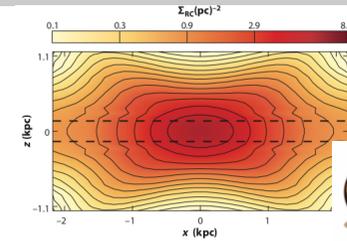
✓ バー = 円盤銀河の最も強い非軸対称構造

→ 銀河円盤の大局的な角運動量輸送

= **銀河円盤進化を支配**

(太陽系の軌道移動にも関連?? Baba in prep.)

バー形成：Gaia-Encelads (銀河合体) イベントに並ぶ「2大イベント」の一つ



天の川銀河の形成進化史 (物質混合史)

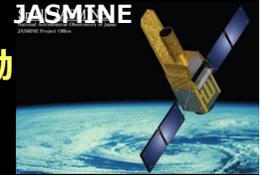
2大物質混合イベント

- 1) Last Major Merger (-> 厚い円盤形成?)
- 2) Bar Formation (-> 太陽系/星の軌道移動?)

ハロー形成
厚い円盤形成

薄い円盤形成進化

棒状構造の形成 → 中心核バルジ形成
棒状構造の進化 → inner diskの非円運動構造
矮小銀河摂動 → 銀河面震動 (銀震)
==> 銀河系円盤内の星・太陽系の大移動



階層的合体成長期
(cold flow)

ガス降着成長期
(hot accretion)

インフレーション
ビッグバン



Gaia-Enceladusイベント
(e.g. Helmi et al. 2018)



~8-10 Ga

バー形成イベント

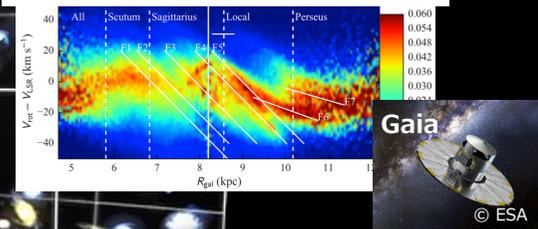
??? Ga

太陽系形成

~4.6 Ga

銀河系円盤内を軌道移動

現在の銀河系円盤の速度構造
(e.g. Kawata, JB et al. 2018)



現在のバーのサイズ・回転速度
(e.g. Sanders et al. 2019)

Quantum
Fluctuations

© NASA/WMAP Science Team

R~6kpcで誕生

R=8kpcに位置

太陽系の進化史

13.8 Gyr

作成 : Junichi Baba

バー形成の「観測的」履歴

バー形成：銀河円盤の不安定性などの起因する動力学現象

e.g. Sellwood & Wilkinson, 1993, RPPh, **56**, 173

→ 基本的にはすべての年齢の円盤星が寄与する

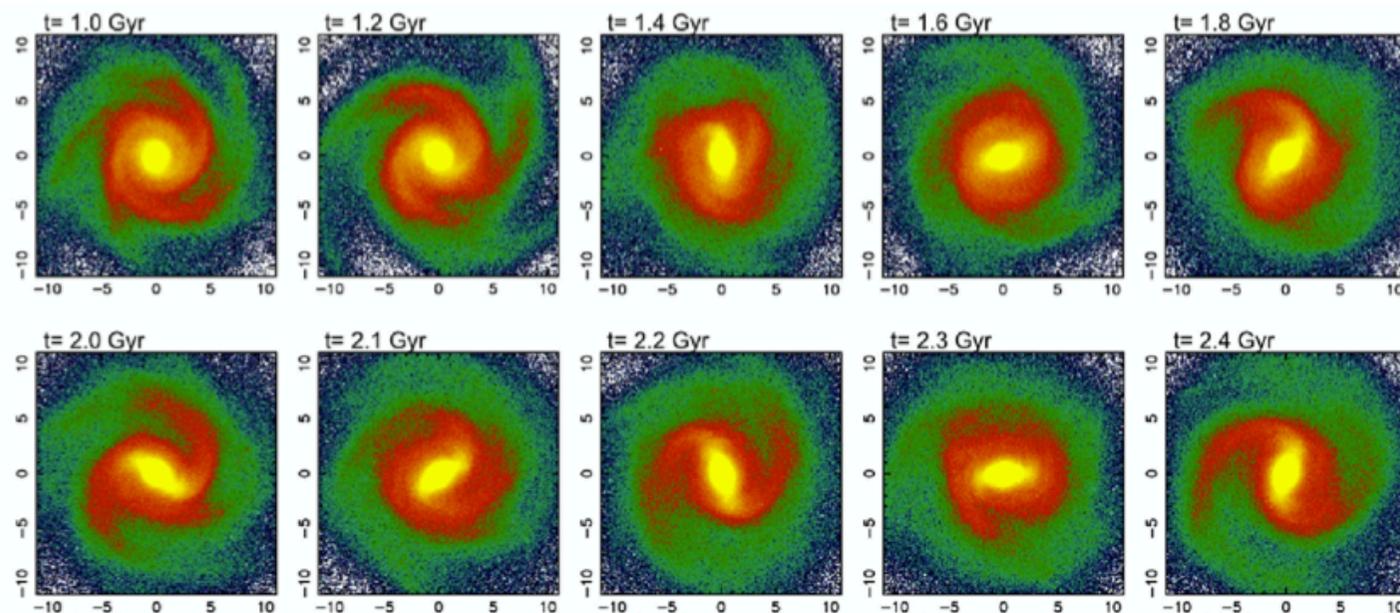
→ バーの年齢 \neq バーを構成する星 (e.g. Wozniak 2007)

バーが形成すると銀河にどのような影響を及ぼすのか？

その影響はどのような観測量にどのような「履歴」を残すのか？

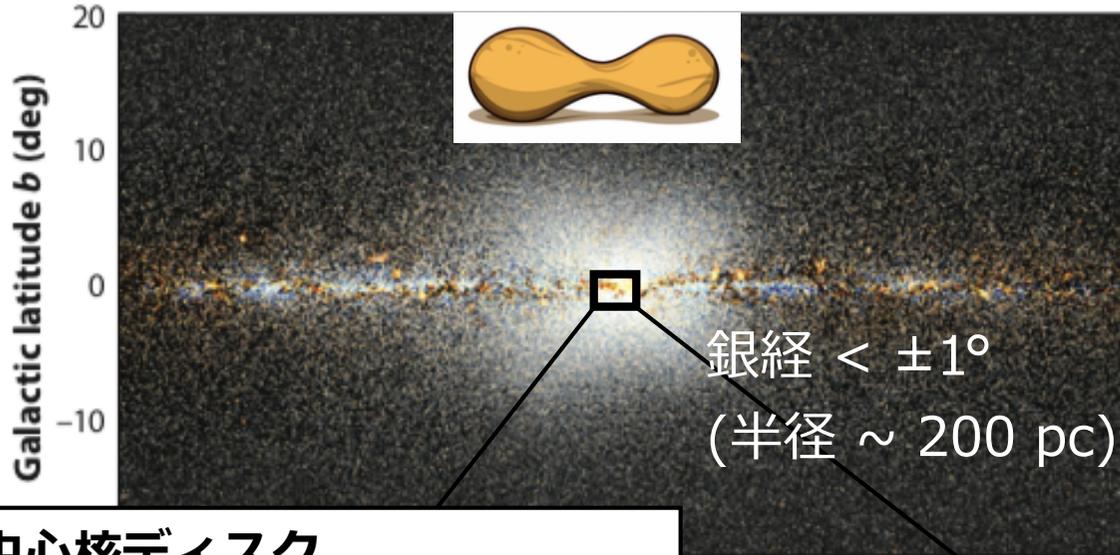
N-body/SPHシミュレーション研究が必須

研究例: Baba & Kawata (2020); Baba, Kawata & Schoenrich, submit.

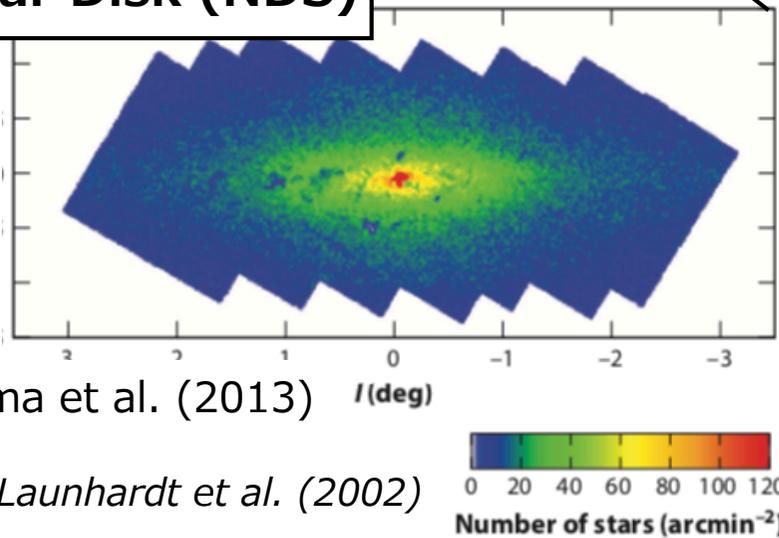


銀河系の“中心核ディスク” (中心 $<\sim 200$ pc)

WISE 3.4 & 4.6 μm (Ness & Lang 2016)

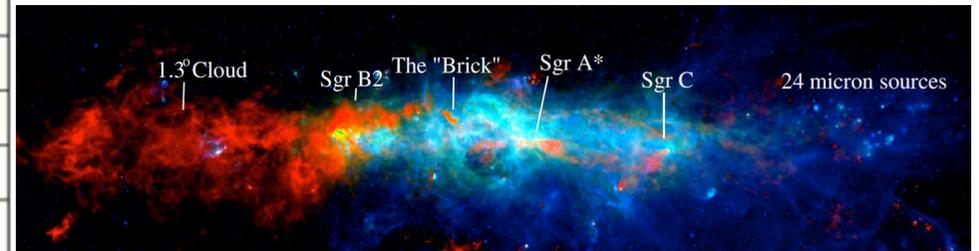


中心核ディスク
Nuclear Stellar Disk (NDS)



Boxy/Peanut型バルジ
(= バー本体を横からみた構造)

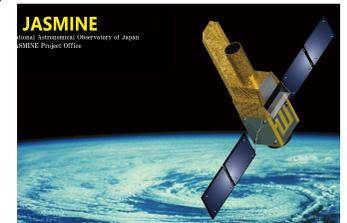
たくさんの分子ガスなどの星間媒質
(CMZ; Morris & Serabyn 1996)



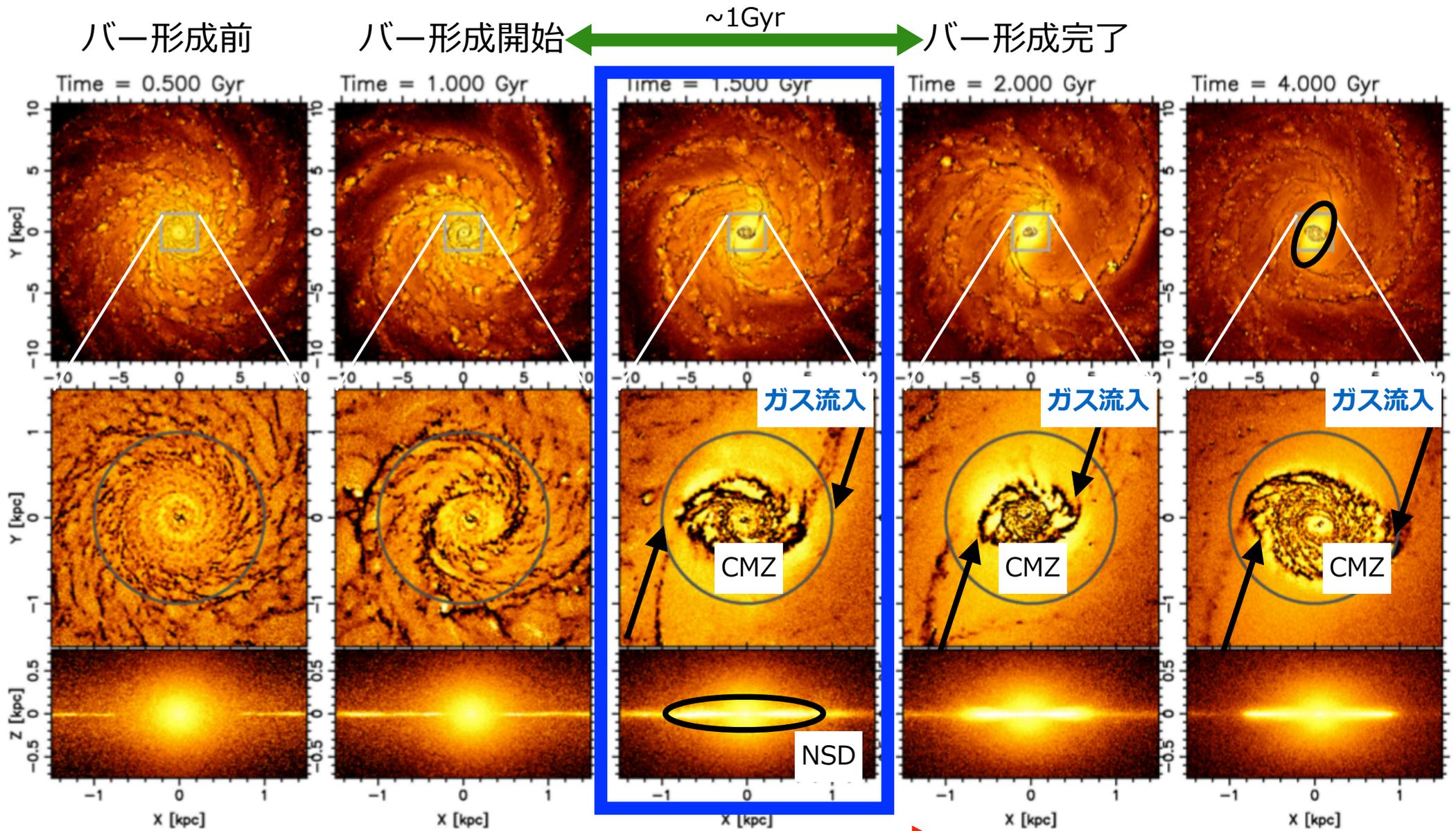
星間減光が非常に強い

→ *Gaia* (可視光) では見えない

→ **JASMINE (近赤外線) が重要**



バー形成：ガス流入→スターバースト→中心核ディスク形成



バー形成時期

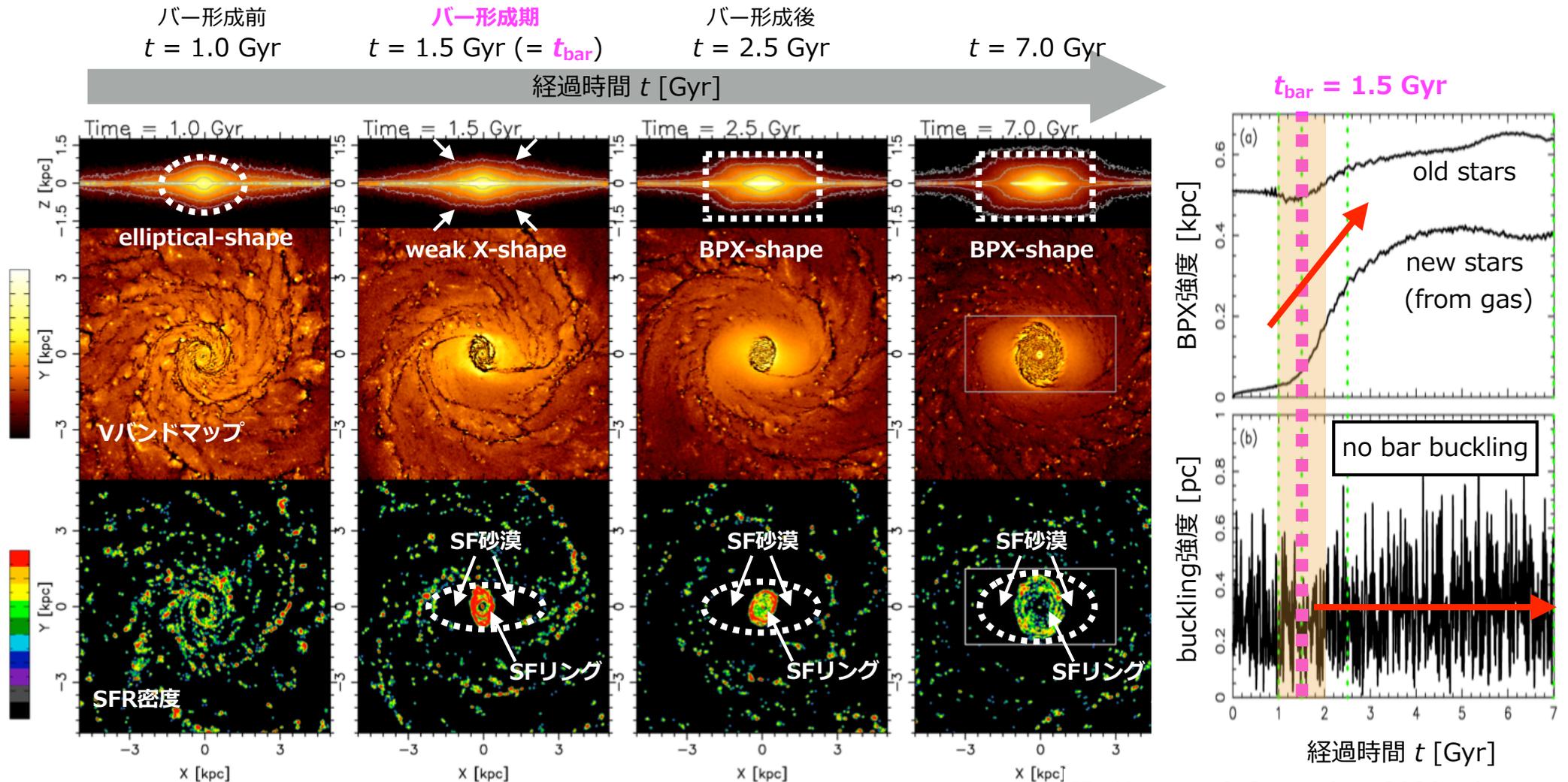
≡ 中心核バルジ形成時期

ガス流入 & スターバースト

→ 中心核バルジ (CMZ+NSD) の急成長

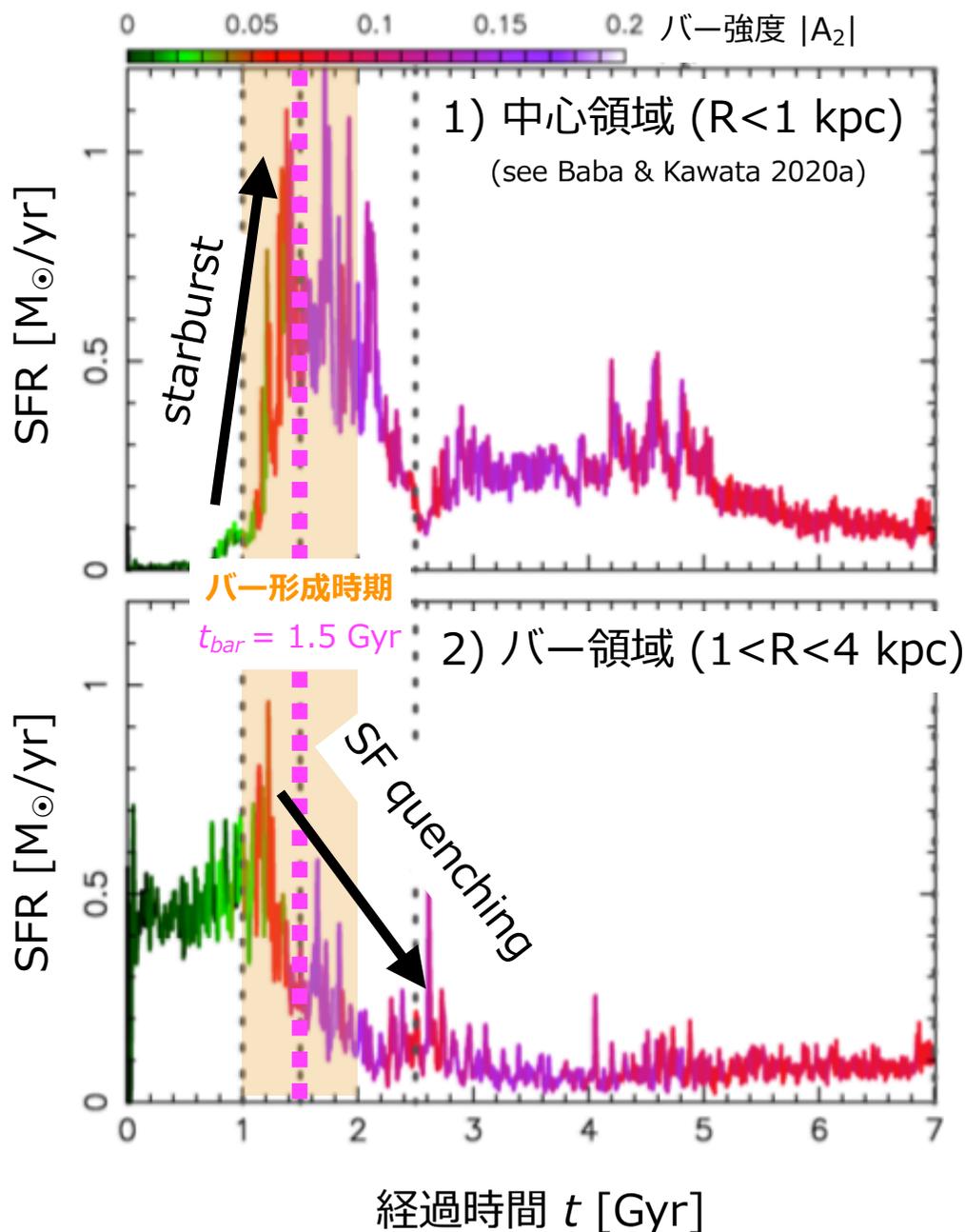
バー形成 ($t \sim 1.5$ Gyr) 直後からBPXバルジが出現

- バー形成“直後”にbar bucklingを経ずにBPXバルジができた ← **速い!**
- 鉛直方向の軌道共鳴で跳ね上がっている (e.g. Combes et al. 1990; Quillen 2002; Quillen et al. 2014)
- 通常、bar bucklingでBPXバルジ形成はバー形成から ~ 2 -3Gyr後 (e.g. Debattista et al. 2006)
- 先行研究でもN体/ガス系ではbar bucklingが起こらない (e.g. Berentzen et al. 1998, 2007)



バー形成後にバー領域の星形成率は急低下

“bar quenching”



see also

Spinoso et al. (2017), Khopeskov et al. (2018)

Donohoe-Keyes et al. (2019)

バー形成



バー領域のガスを中心に落とす



1) 中心スターバースト

→ NSD形成

= バー形成期/後に誕生した星が
NSDを占める

2) バー領域のSF停止

→ **BPXに跳ね上がる星の減少**

= **バー形成前に誕生した星が
BPXバルジを占める**

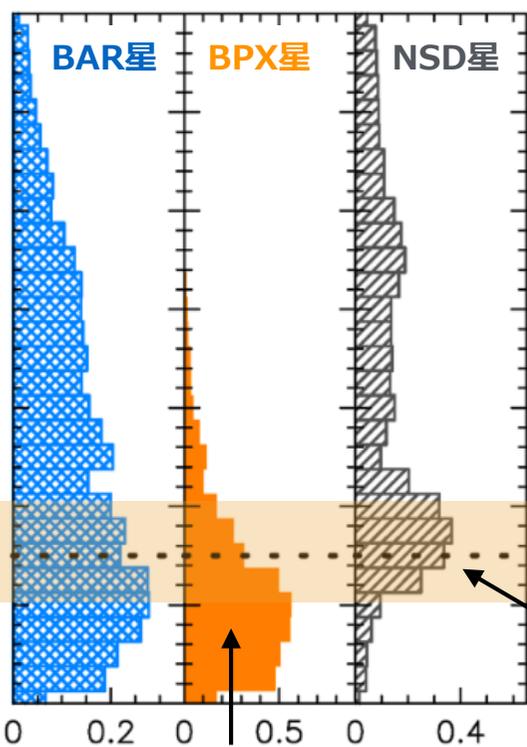
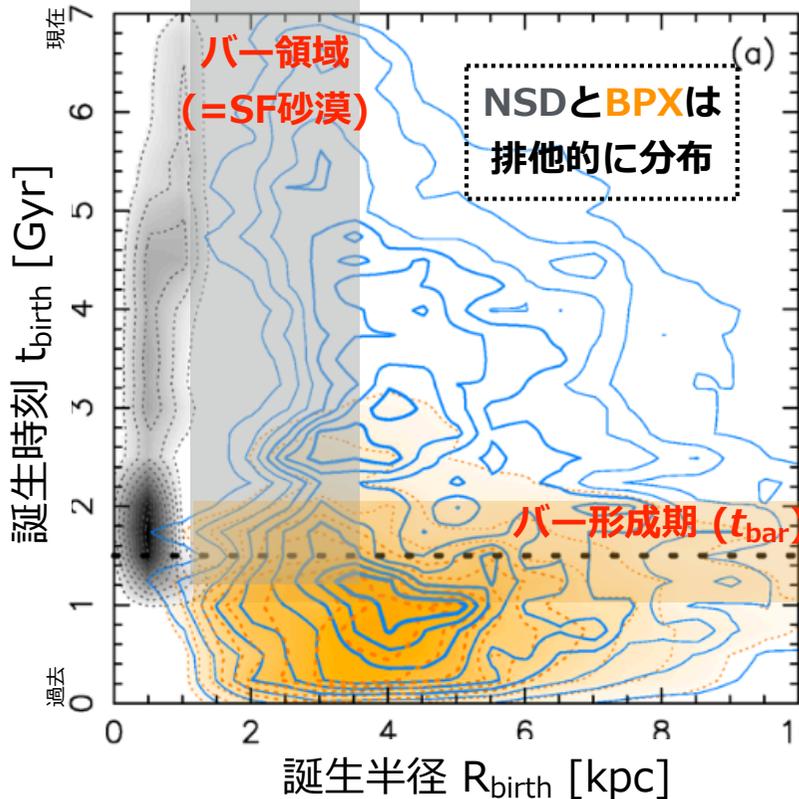
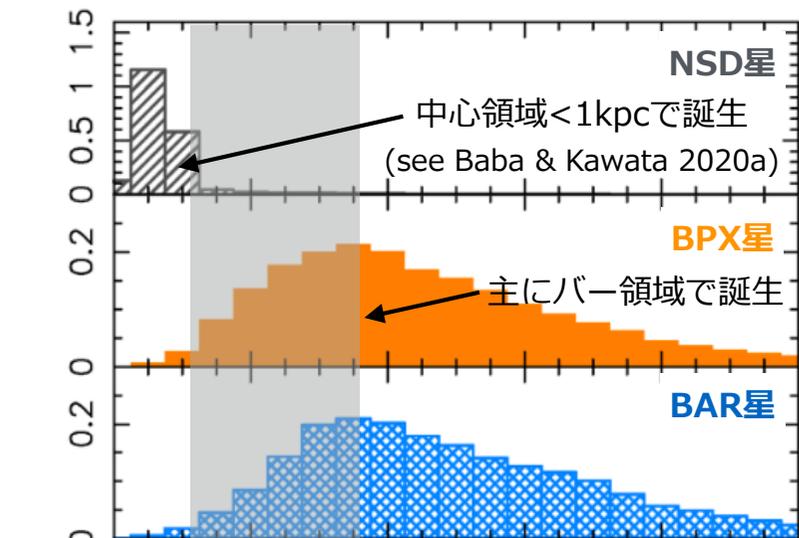
バー形成前にバー領域で誕生した星がBPXバルジに跳ね上がる

バー形成が星形成活動の“分画”を引き起こす

BPX星：バー形成前にバー領域で誕生

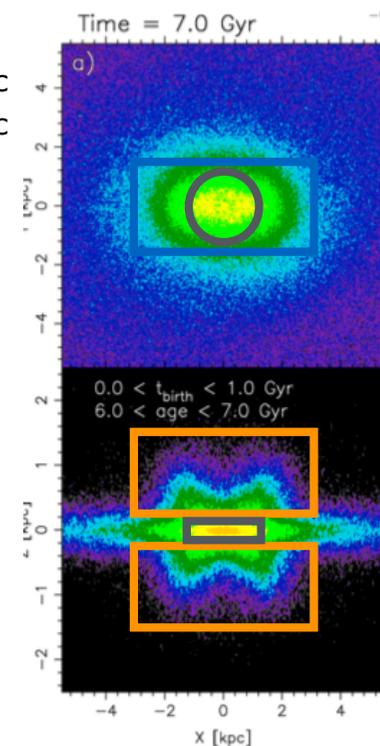
NSD星：バー形成直後に中心領域で誕生

-  NSD $R < 1.2$ kpc, $|z| < 0.2$ kpc
-  BPX $|x| < 3$ kpc, $|y| < 1.5$ kpc, $|z| > 0.3$ kpc
-  BAR $|x| < 3$ kpc, $|y| < 1.5$ kpc, $|z| < 0.2$ kpc

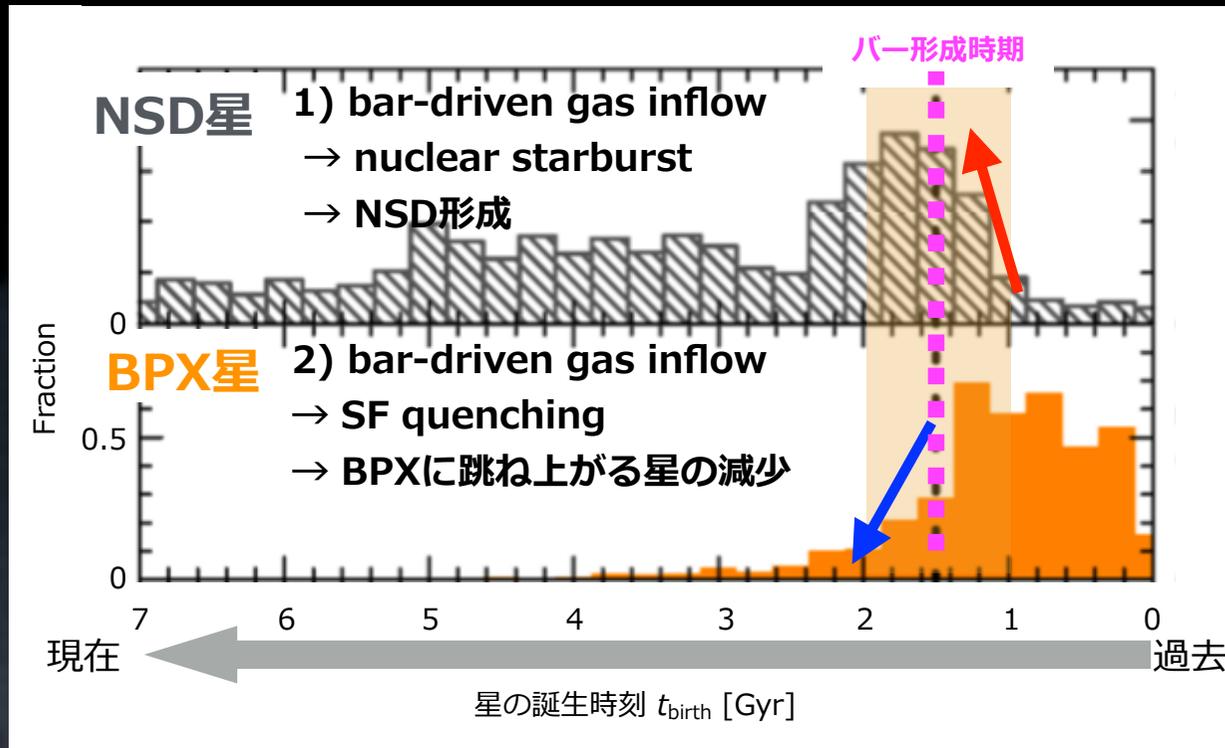


主にバー形成直後に誕生
(see Baba & Kawata 2020a)

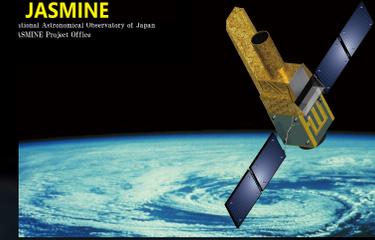
主にバー形成前に誕生
35



バー形成によるガス分布・星形成活動の変化で NSDとBPXの星の年齢分布が相補的



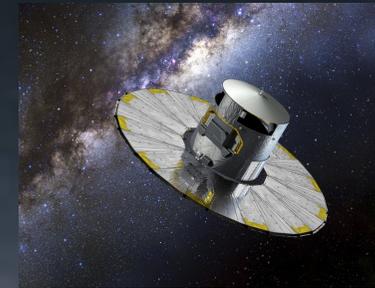
JASMINE
Global Astronomical Observatory of Japan
JASMINE Project Office



NSD

バー形成“期/後”に誕生した星

Baba & Kawata 2020, MNRAS



BPX bulge

バー形成“前”に誕生した星

Baba, Kawata, Schonrich, in prep.

観測した星がどの銀河構造に属するのかを判別するには、位置・速度情報（位置天文観測情報）が必要

NSD星とBPX星の年齢分布でバー形成時期を挟み撃ち推定

ATERUI-II x ASURA x 位置天文観測

Gaia Science: spiral dynamics, bar dynamics

Sim.: 理論予測・データ解釈に活躍

Baba et al. (2018) — Gaia DR1

Kawata, JB et al. (2019) — Gaia DR2

Kawata, JB et al. (2020) — Gaia EDR3

(Kawata, JB et al. (2018) — Gaia DR2)

(Miyachi, DK, JB et al. (2019) — Gaia DR2 & VLBI)

JASMINE Science: bar formation

Sim.: 理論予測

Baba & Kawata (2020)

Baba, Kawata & Schoenrich, submitted

(Baba et al. in prep. — Solar migration)

位置天文観測からシミュレーション研究への要求

N-body sim.: e.g. Fujii, JB et al. (2018, 2019); **ガスなし**

Gaiaの方が多い！！ → ~10億粒子クラス以上の計算

渦状腕が弱い → ガス/SF入り計算

N-body+SPH sim.: e.g. Baba et al. (2017); **DMは外場**

バーの長時間力学進化 (bar-DM相互作用) → DMをN-bodyで計算

観測は限定された星種族

→ SF/FB (e.g. Saitoh & Makino 2009)、ガス降着 (e.g. JB & Kawata 2020)

観測との比較情報次元 (位置・速度・年齢 + 元素組成 = 多次元情報)

→ 化学進化, chemical tagging e.g. CELib (Saitoh 2017; Hirai & Saitoh 2017)

星種族によって運動状態が異なる (年齢-速度分散関係)

→ 分子雲スケール程度を分解する分解能 (Kumamoto, JB, Saitoh 2017)

N-body(+SPH) sim.のデメリット = 特定のターゲットを再現するのが大変

観測から天の川銀河を理解したい → 観測に合う理論 (動力学) モデルがほしい

→ N-body+M2M法 (ただし、ガスいりの計算には適用できない?)

多数のN-body/SPH sim.から機械学習でモデル探査?

Star-by-Star sim.: e.g. "SIRIUS project" (平居、藤井、斎藤)

銀河内での星団形成進化 → 連星分布、星団破壊からフィールド星へ変化

→ 無衝突系-衝突系ハイブリッドスキーム ASURA+BIRDGE (Fujii+2021)

Star-by-StarのSF/FBレシピ (e.g. Hirai+2020)

渦状腕動力学：星-ガス相互作用の理解は不十分

see also レビュー論文 Dobbs & Baba, 2014, PASA, 31, 35

© Junichi Baba

arm type	起源	パターン速度	寿命	ガスの運動と 渦状腕維持への役割
unbarred m=2 	バー形成直前 (Fujii et al.2018)	$\Omega_{\text{spiral}} \sim \text{const.}$	$\sim 100 \text{ Myr}$??
barred m=2 	星円盤のSWA+バー駆動 (e.g. Baba 2015)	$\Omega_{\text{spiral}} = \Omega$ for $R > 1.5R_{\text{bar}}$ (e.g. Baba 2015)	$\sim 100 \text{ Myr}$ (e.g. Baba 2015)	渦状腕ポテンシャルの底に集積 (Baba et al. 2016). 渦状腕維持に冷却として重要?? (Schwarz 1981)
tidal m=2 	潮汐相互作用 (e.g. Pettitt et al. 2016)	$\Omega_{\text{spiral}} < \sim \Omega$ (e.g. Dobbs et al. 2010; Oh et al. 2015; Pettitt et al. 2016)	$\sim 1 \text{ Gyr}$ (e.g. Oh et al. 2008; Struck et al. 2011; Pettitt et al. 2016)	渦状腕の片側から流入し銀河衝撃 波(e.g. Pettitt+2016). 渦状腕維持に重要??
multi-armed 	星円盤の局所SWA成長 (e.g. Fujii et al. 2011; Baba et al. 2013)	$\Omega_{\text{spiral}} = \Omega$ every radius (e.g. Baba et al. 2013)	$\sim 100 \text{ Myr}$ (e.g. Fujii et al. 2011; Baba et al. 2013)	渦状腕ポテンシャルの底に集積 (Dobbs & Bonnell 2008; Wada et al. 2011). 渦状腕維持に重要 ではない (Fujii, Baba et al. 2011).
flocculent 	ガスの局所的重力不安定? (Mueller & Arnett 1976; Gerola & Seiden 1978)	$\Omega_{\text{spiral}} = \Omega (?)$	$< 30 \text{ Myr} ?$	渦状腕形成に本質的?

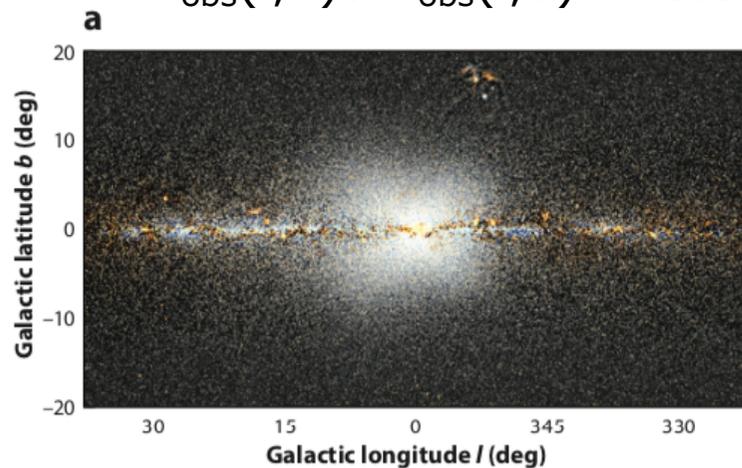
N-body + M2M法

(made-to-measure)

対象の観測量 (e.g. 密度分布、視線速度分布) に合うように、N-body simの各粒子の重み (質量) を計算中に徐々に調整する方法
(Syer & Tremaine 1996; see also de Lorenzi+2007; Hunt & Kawata 2013)

観測量 (e.g. BRAVA, APOGEE, Gaia)

$\Sigma_{\text{obs}}(l,b)$ 、 $v_{\text{obs}}(l,b)$... etc



N-body sim. :

$\Sigma_{\text{model}}(l,b)$ 、 $v_{\text{model}}(l,b)$... etc

χ^2 を比較

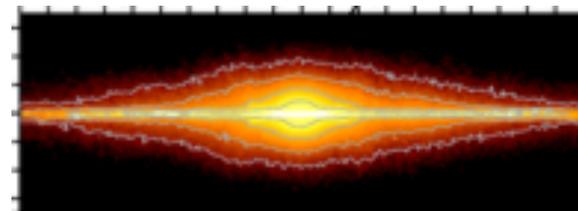
初期条件

standard N-body

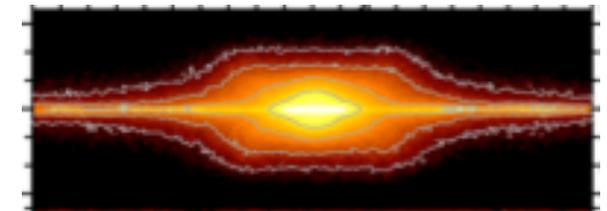
$$m_i(t) = m_{i,0}$$

N-body + **M2M**

$$m_i(t) = w_i(t) m_{i,0}$$



$\chi^2 \sim 10$



$\chi^2 \sim 1$

観測にあう動力学モデル

バー構造に対しては応用済み
(Portail+2015,2017)
→ 中心核バルジ (JASMINE)
銀河円盤広域への適用は今後

Machine learning of gaseous l-v features

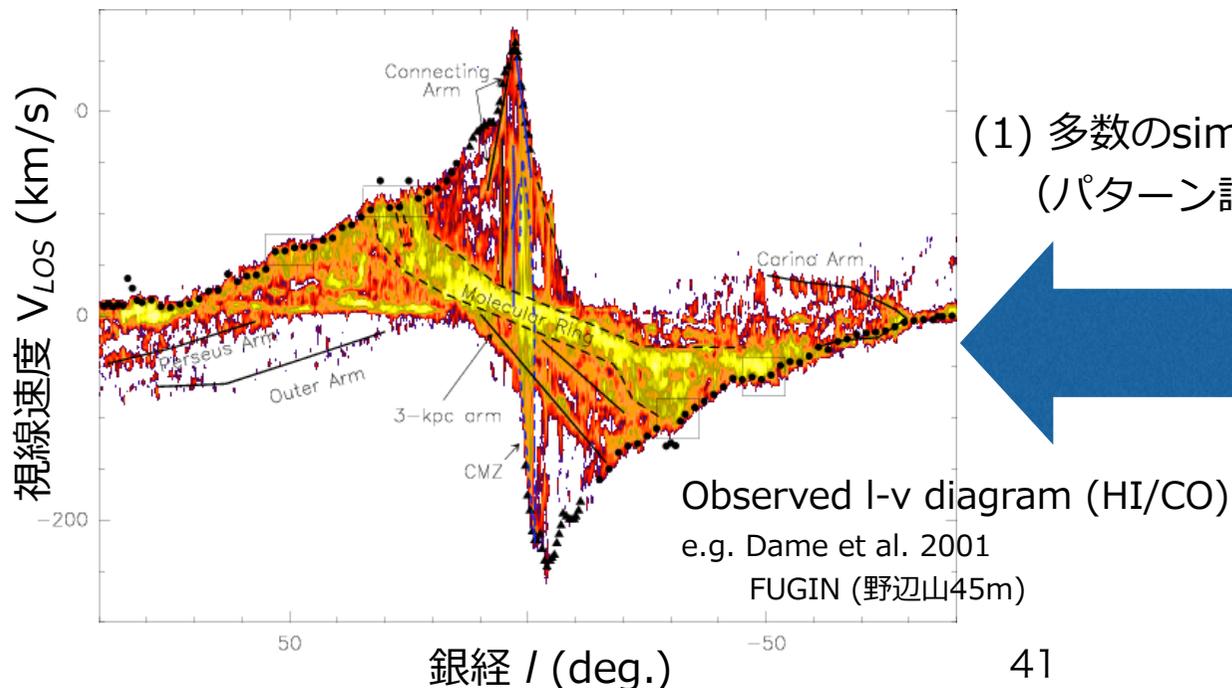
(1) 観測にシミュレーションをフィットする

- 10年前、大量の時系列データを眺め主観できめた。。。 (Note: This text is likely a typo for '主観' or '主観' in the original image)
- 観測のl-v図とシミュレーションのl-v図からパターン認識
- どのシミュレーションデータが観測に合うかを判別

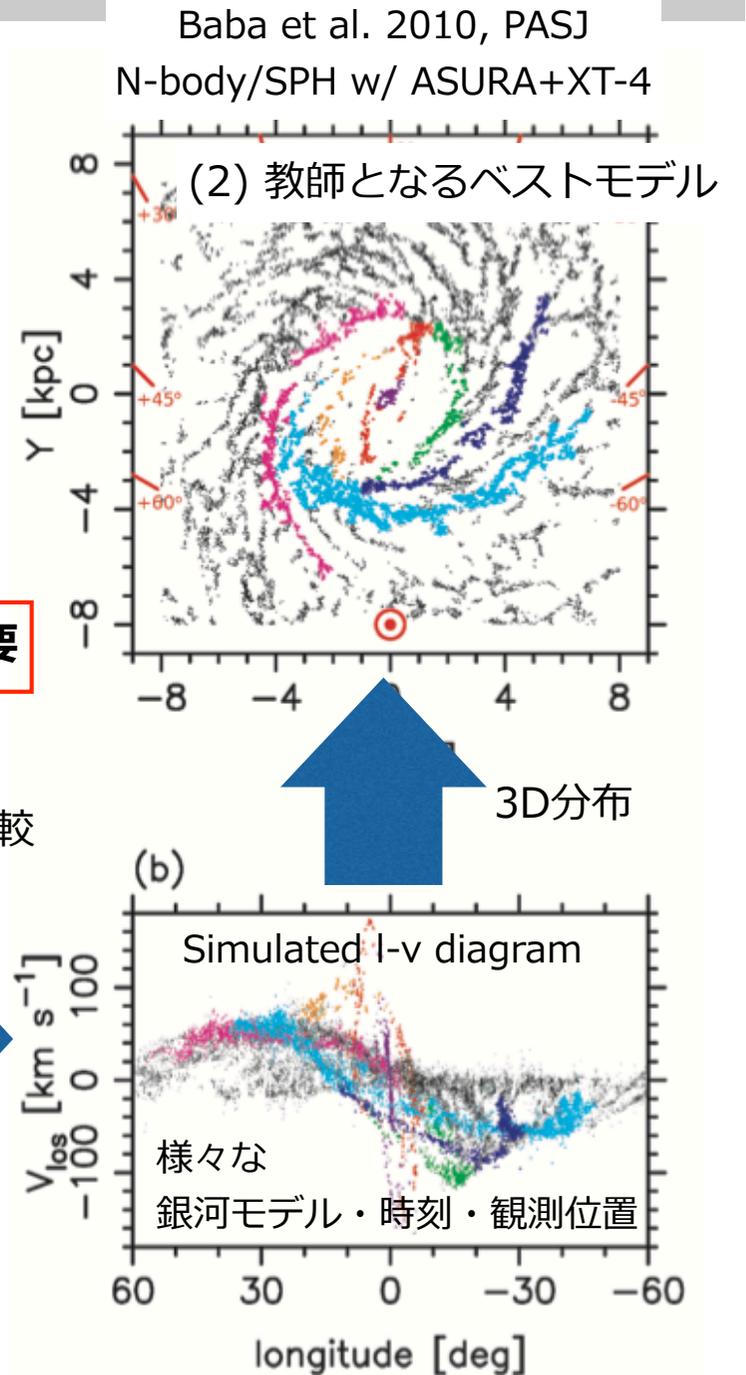
(2) ベストモデルを教師として機械学習

- 運動学的距離と実際の距離の関係を学習
 - 観測データに適用し、ガス運の距離を推定
- 分子雲の3Dマップ (→ 3D星間減光マップ)

多くの良質なN-body/SPH sim.データが必要



(1) 多数のsim.と比較
(パターン認識)

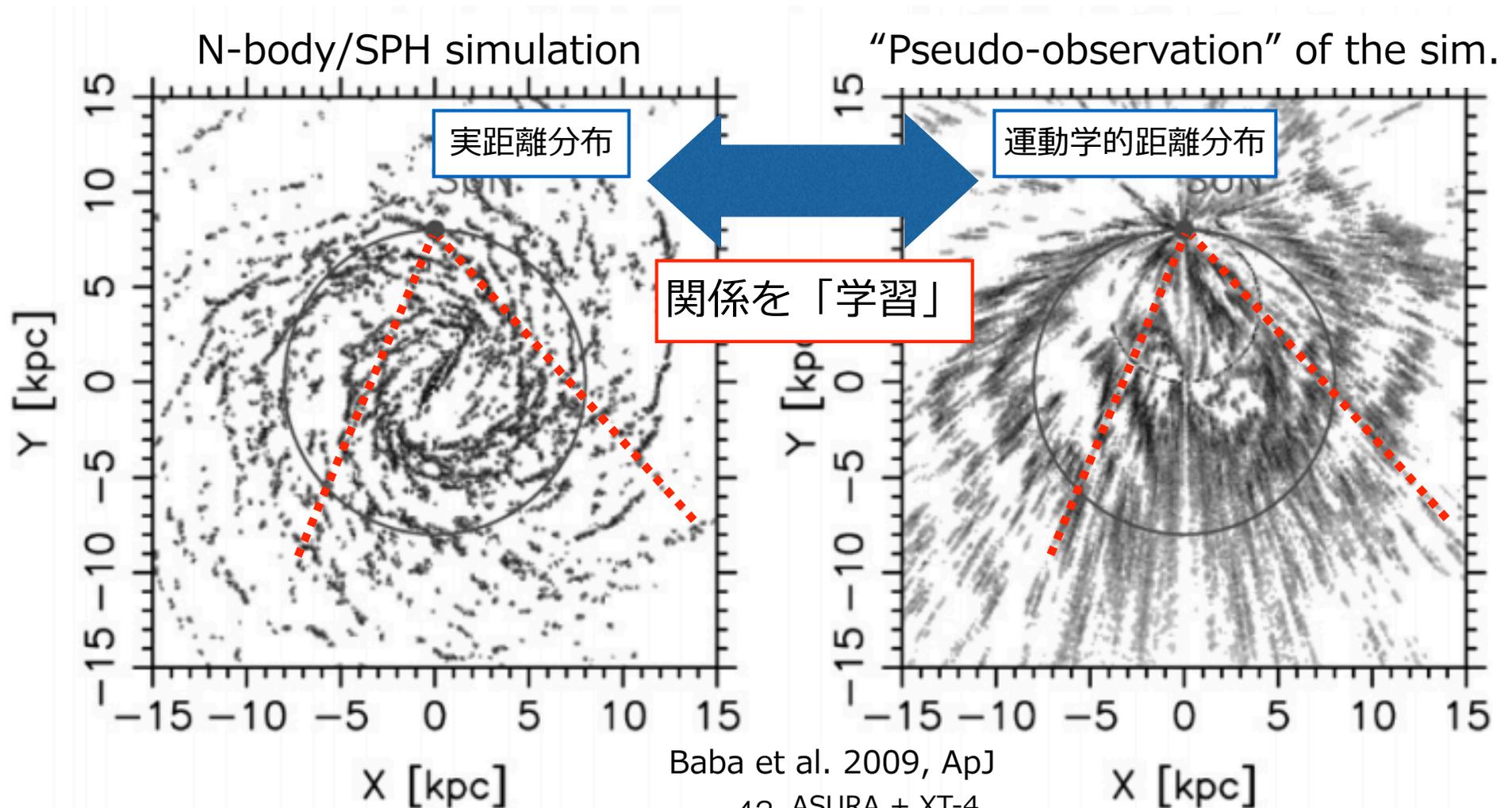


Machine learning of gaseous I-v features (2)

天体が円運動をすると仮定して距離を推定（運動学的距離法）

→ 運動学的距離は非円運動などにより～kpcの系統誤差を生じる可能性

（観測的宇宙論の赤方偏移空間の“Finge-of-God”と類似の現象; Baba+2009）



Baba et al. 2009, ApJ

まとめ – 位置天文学観測の立場から

★ 科学的意義：天の川銀河 = 太陽系と直接的につながる唯一無二の銀河

太陽系の起源 “3W1H” (*Where, What, When, How*) = 銀河円盤の「物質混合」問題

→ 渦状腕・棒状構造などの非軸対称動力学の理解が本質的に重要

★ Gaia+大規模分光サーベイによる天の川銀河研究の革新

広域 (>5 kpc) に亘る数億個の星の6D位相空間情報 = “*observed*” *N-body data*!

→ 星の軌道推定 (e.g. action-angle)、年齢推定精度の向上、高精度元素組成情報 (多次元)

★ Powers of ATERUI x ASURA

渦状腕構造の新たなパラダイム構築 (動的渦状腕モデル; Baba+2013) に貢献

→ 「定常・平衡」から「非定常・非平衡」へ (“複雑系”銀河物理学!?)

Gaiaの “*observed*” *N-body*の予測・解釈に貢献

JASMINE銀河中心考古学の開拓 = 「中心核バルジ」から天の川銀河の歴史を紐解く

(= Gaiaで観えない領域)

★ シミュレーション研究への期待

すべての星種族を観測できない; 星団形成→破壊→field星・連星分布の予測

→ SF/FB/化学進化/ガス降着を考慮した超高分解能 (<1 pc; ~1 Msun) 計算

ASURA x BRIDGE; SIRIUS Project (Hirai, Fujii, Saitoh) に期待

観測データにシミュレーションをフィットする (観測から動力学モデルを構築する)

→ *N-body*+M2M法

機械学習法などによるモデル探査 (多数の良質なシミュレーションが必須)

補足資料

渦状腕研究の“再”ブーム

~1960s: 渦状腕構造論黎明期 (B. Lindblad, J. Oort)

1960s~70s: 線形理論 (密度波理論1964/銀河衝撃波理論 1969)

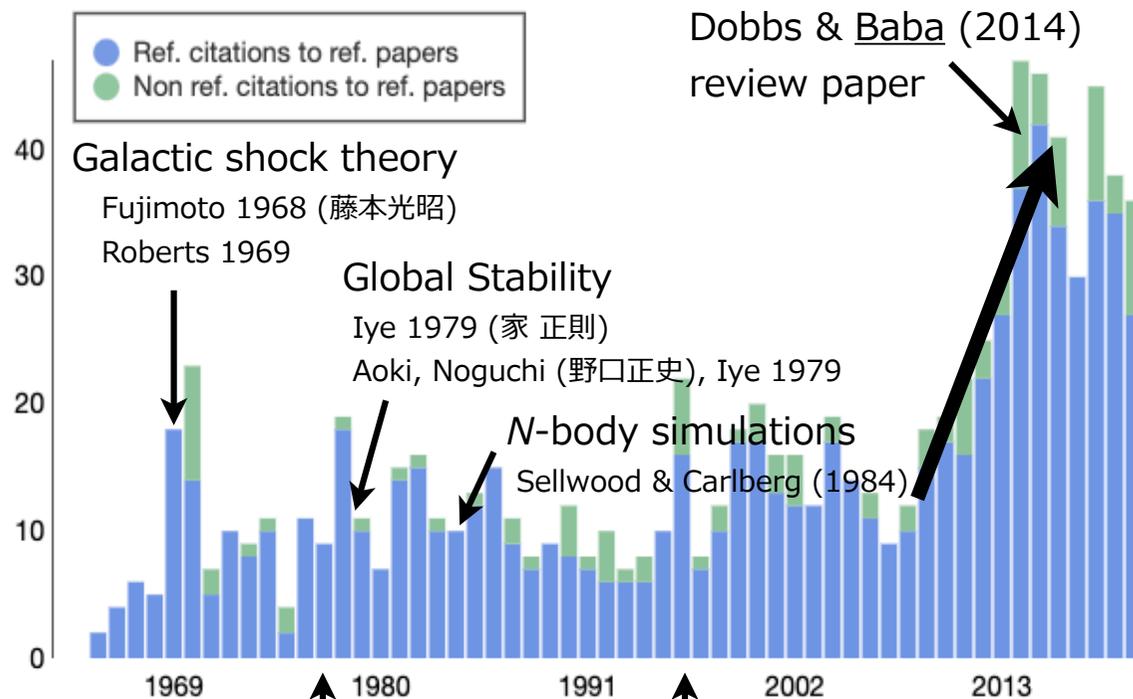
※ 70s日本でも多くの理論研究 (藤本、祖父江、土佐…/家、野口、青木…)

1980s: 先駆的なN体計算 (J. Sellwood)

1990s~2000s: 渦状腕研究 (銀河力学研究) の氷河期?

2010s: N体/流体計算による再ブーム

“準定常”密度波理論 (Lin & Shu 1964) の被引用数 (907件 2020/11/07)



Toomre (1977)'s review paper
 before I was born

Bertin & Lin (1996)'s
 text book

45

2010年頃以降の主な論文

Hydrodynamic simulations

Wada & Koda 2004; Wada 2008 (和田桂一)
 Kim, W-T. & Ostriker 2002,2006,
 Dobbs & Bonnell 2006, 2007, 2008
 Dobbs & Pringle 2009, 2010
 Dobbs et al. 2011a, 2011b, 2012, 2014
 Pettitt, Dobbs, JB, et al. 2020
 ...etc

N-body/hydrodynamic simulations

Baba et al. 2009,2010,2013,2015,2016
 Fujii, JB et al. 2011 (藤井通子)
 Wada, JB et al. 2011
 Grand et al. 2012a,b,2013,2014
 D'Onghia et al. 2013
 Kumamoto & Noguchi 2016
 Sellwood 2010,2011,2012...
 Sellwood & Carlberg 2014, 2019, 2020
 ...etc

Observational tests

Baba et al. 2018 (w/ Gaia)
 Miyachi, incl. JB 2019 (w/ Gaia)
 many papers.

expected azimuthal offset **star-gas**

Baba et al. 2015, PASJ

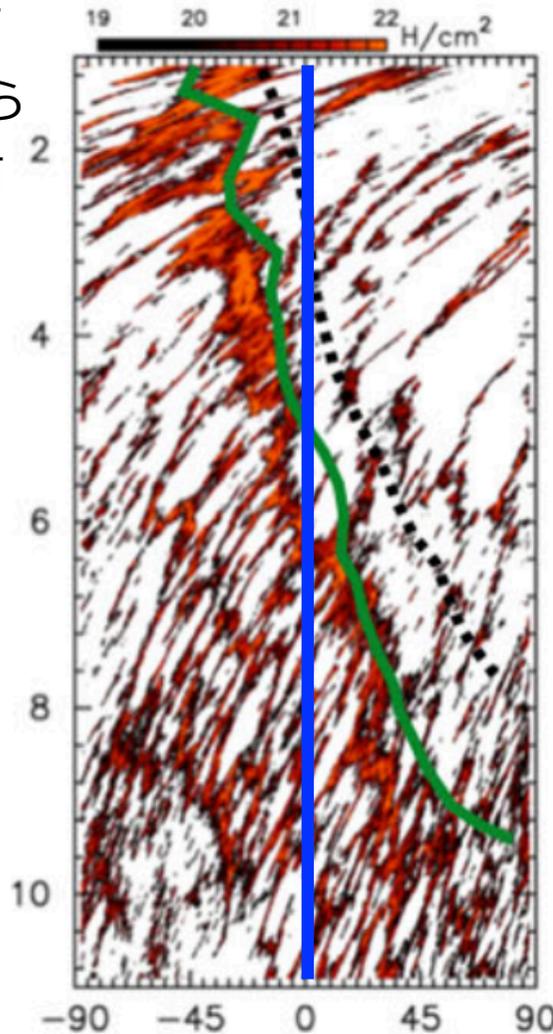
ASURA + ATERUI

密度波モデル

$$\Delta\phi(R) \propto R$$

ガスは半径に応じて
"系統的"にarmから
オフセットして分布

銀河中心からの距離 R [kpc]

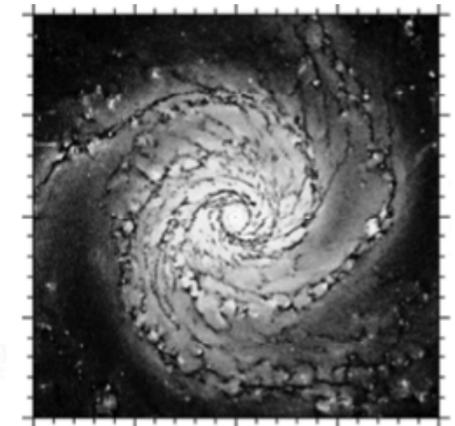
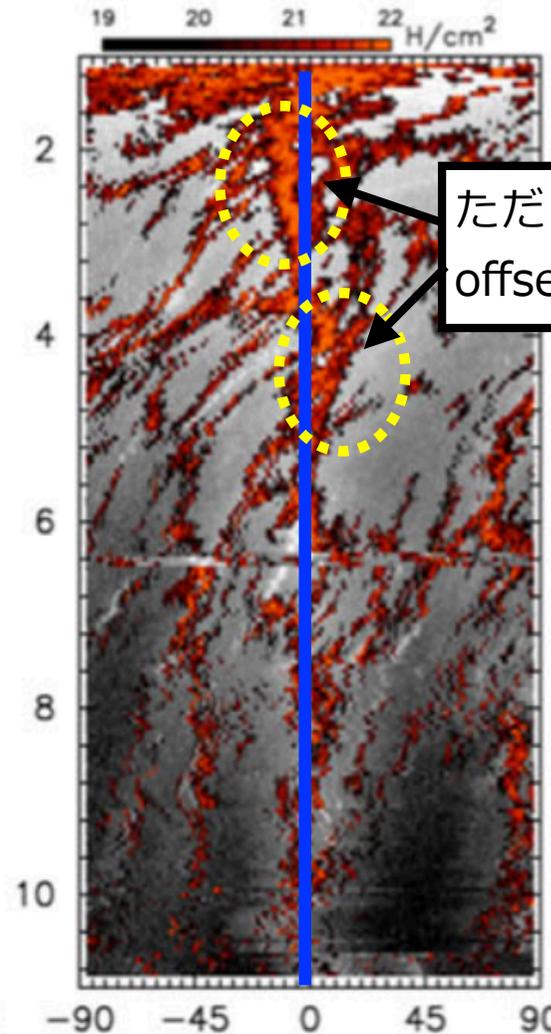


動的渦状腕モデル

$$\Delta\phi(R) \sim 0$$

どの半径でもガスは
ほぼarmの底に分布

ただし、局所的(<~kpc)な
offsetは生じ得る



stellar arm位置を基準とした相対方位角 $\Delta\phi$ [°]

位置天文観測衛星: Hipparcos, Gaia, JASMNE

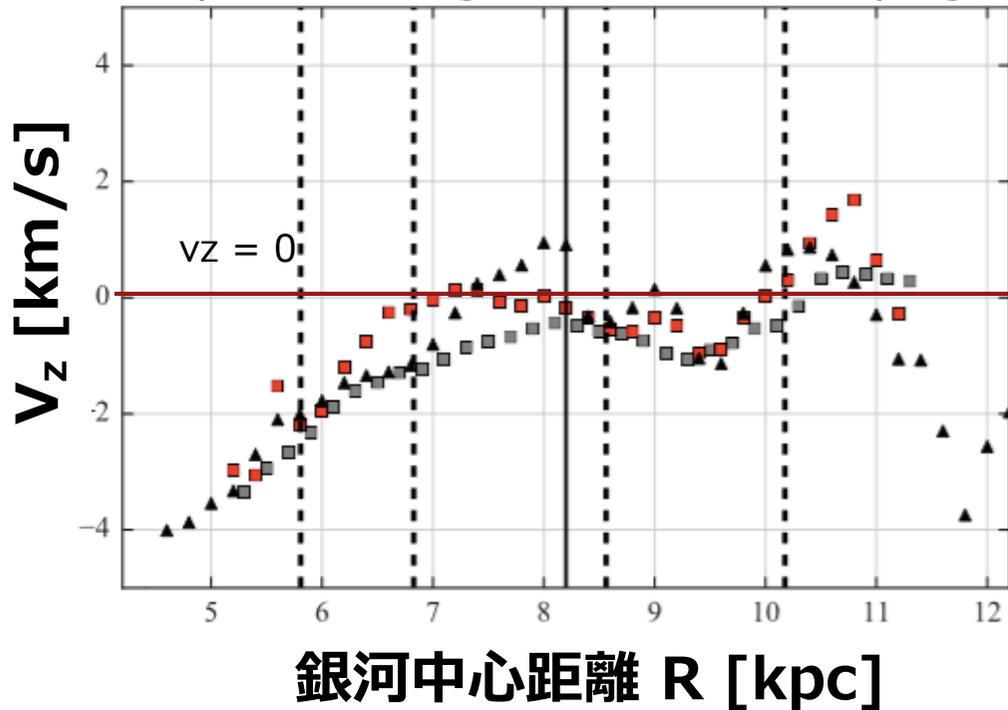
表 8.1 ヒッパルコスとガイアの主な比較.

	ヒッパルコス	ガイア
稼働期間	1989–1993	2013–2021 → end 2022 (approved) → end 2025 (indicative)
等級限界	12 等	20 等
コンプリートネス	7.3–9.0 等	~20 等
天体数	120,000	10^9
観測精度	~ 1 milliarcsec	4 μ arcsec ($V = 10$ 等) 10–15 μ arcsec ($V = 15$ 等) 200–300 μ arcsec ($V = 20$ 等)
視線速度	なし	15 km s ⁻¹ ($V < 16$ –17 等)

A dynamically young and perturbed Milky Way disk

Kawata, JB et al. 2018, MNRAS

see also Schonrich & Dehnen 2018; Fricke & Schonrich 2019
 wavy? increasing? “kinematic” warping?



銀河円盤は最近 (<~ 0.5-1 Gyr)、

Sgr. Dwarf銀河の近点通過の影響か? (e.g. Laporte et al. 2018)

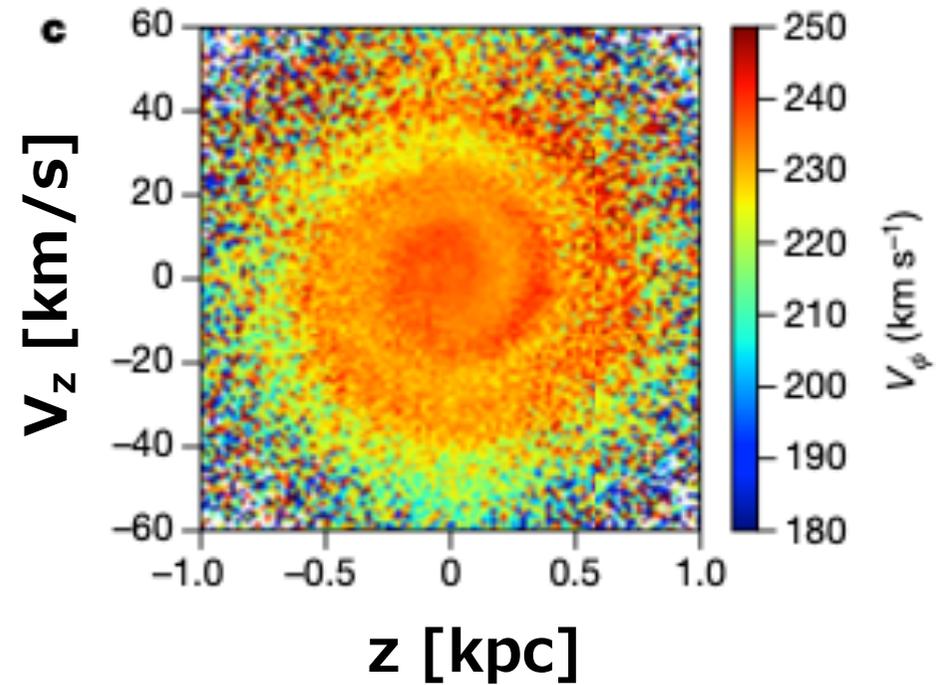
棒状構造 (バー) のbuckling運動の痕跡か? (Khoperskov et al. 2018)

→ **銀震学 (Galactic Seismology)**

Antoja et al., Nature, 561, 360, (2018)

Phase snail (Phase spiral)

z方向の星の振動にコヒーレントな運動の痕跡
 → 銀河円盤は鉛直方向 (少し斜め) に殴られた?



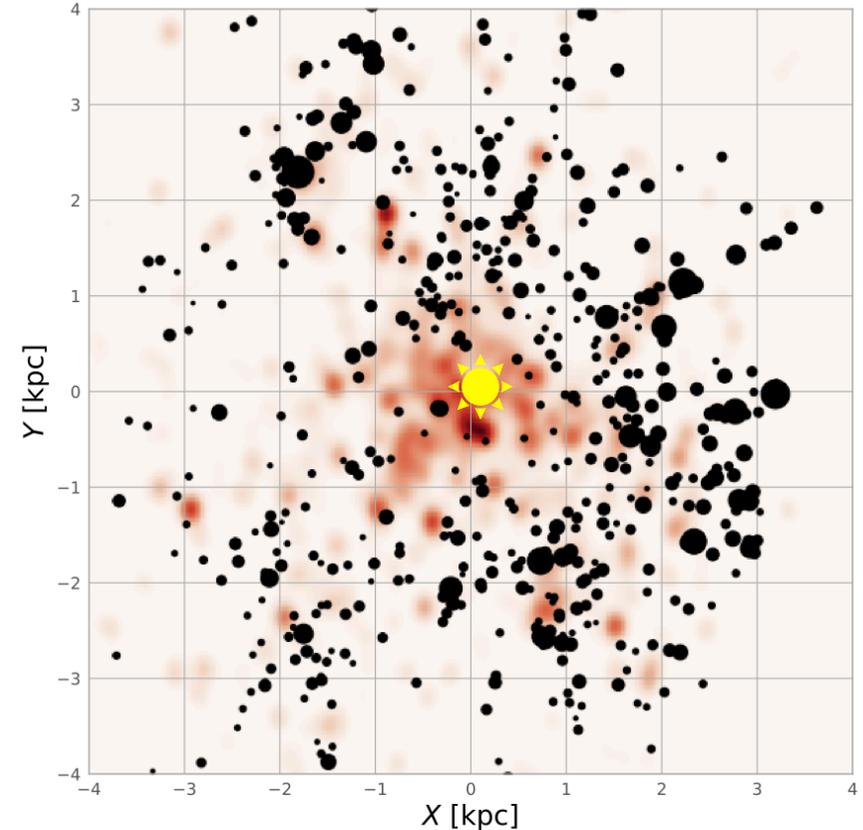
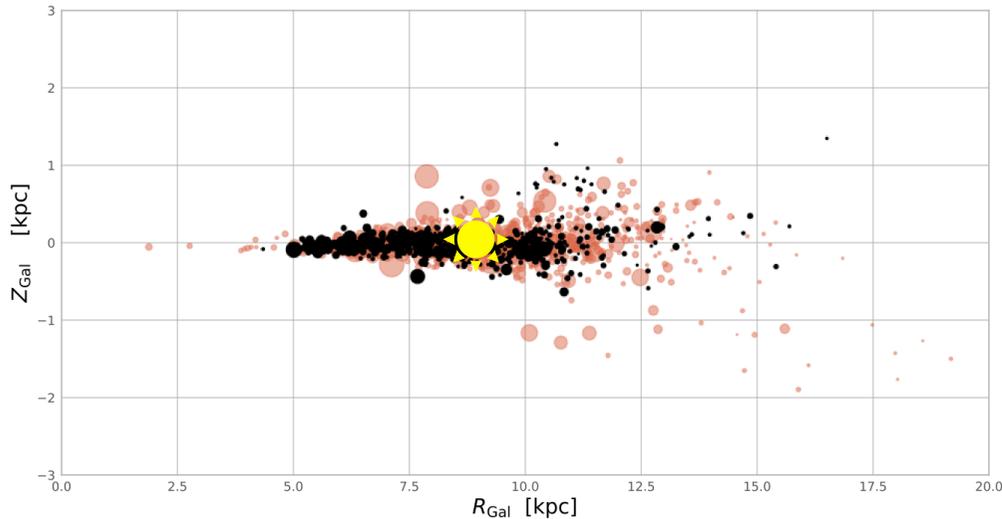
MACHINE-LEARNING TECHNIQUES REVEAL HUNDREDS OF OPEN CLUSTERS IN GAIA DATA

>2,000 open clusters:

~1,200 open clusters confirmed by Gaia

582 "new" open clusters identified via a machine learning method

Previously known open clusters are shown with red dots (left) or with the density map in red (right) (Cantat-Gaudin et al. 2018, 2019a and Castro-Ginard et al 2018, 2019). The black dots represent the newly found open clusters (Castro-Ginard et al. 2020)



JASMINEプロジェクトでの研究：

運動の積分 (作用積分) 空間でのクラスタリング探査で、
より時間が破壊から経過した星団も探査できるはず

- GRAPEで星団破壊シミュレーション (2019年度修論) 49
- 作用積分空間でのクラスタリングの機械学習探査 (進行中)
- 太陽系母星団 (太陽兄弟星) の残骸が見つかるか??
- 銀河中心領域へも応用できるか??

Castro-Ginard et al., A&A, 618, A59, (2018)

Castro-Ginard et al., A&A, 627, A35, (2019)

Castro-Ginard et al., A&A, 635, A45, (2020)

https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20200514

5. 赤外線位置天文観測衛星

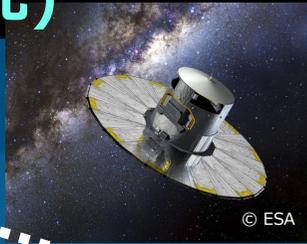
JASMINE

星の距離と運動の超高精度測量で
天の川銀河の歴史の核心に迫る

公式ページをリニューアルしました!! (2021/1/15)

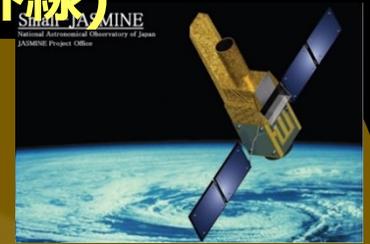
<http://jasmine.nao.ac.jp/>

Gaia (可視光)



- 太陽近傍星
- 広域のハロー星
- バルジ/バーの上層部
- 銀河円盤上層部

JASMINE (近赤外線)



- (太陽近傍星)
- 中心核バルジ
- 銀河円盤面、特にinner disk

相補的



Gaia DR2 (2018)
ESA/Gaia/DPAK

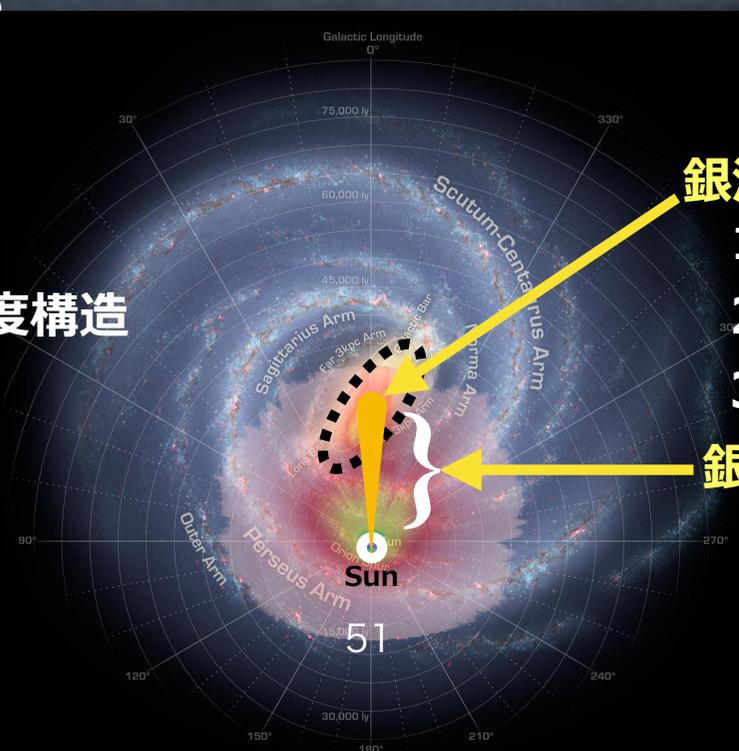
(銀河考古学)

1. ハローの構造・形成史
2. 太陽近傍の銀河円盤の速度構造
3. バーのサイズ・回転速度

銀河中心考古学

1. 中心核バルジの構造
2. 中心核バルジの形成史
3. 銀河円盤広域の速度構造

銀震学



赤外線位置天文観測衛星「JASMNE」

PI: 郷田直輝 (国立天文台)

日本独自の衛星計画 & 日本初の位置天文観測衛星

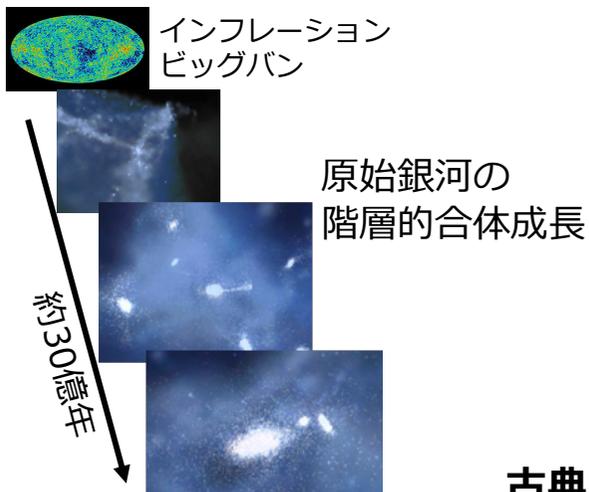
概要:

- ✓ 宇宙空間に天文観測衛星を打ち上げて3年間の観測 (2020年代後半打ち上げ)
- ✓ 赤外線波長で観測 (1.1 - 1.7 μm の近赤外線波長 Hwバンド TBD)
 - **Gaia (ESA) が不得意な星間減光の強い銀河中心領域や銀河円盤面の観測に優位**
- ✓ 銀河系中心部 (銀河中心核バルジ) の星までの25 μ 秒角精度で測定
 - 年周視差 $<25\mu\text{as}$ & 固有運動 $<25\mu\text{as/yr}$ for Hw < 12.5 mag
約12,000 個のうちバルジ星 7,000個 (5,000 in Region-1, 3,000 in Region-2)
 - 固有運動 $<125\mu\text{as/yr}$ for $12.5 < \text{Hw} < 15$ mag.
約86,000 個のうちバルジ星 67,000個 (45,000 in Region-1, 26,000 in Region-2)
 - 多数枚の撮像データを合成し星の位置精度を向上
一日で 320回の撮影 \times 16領域、1シーズン90日間で約 46 万枚
- ✓ 観測結果を位置天文カタログとして広く一般公開 (2030年頃) ← 10年後

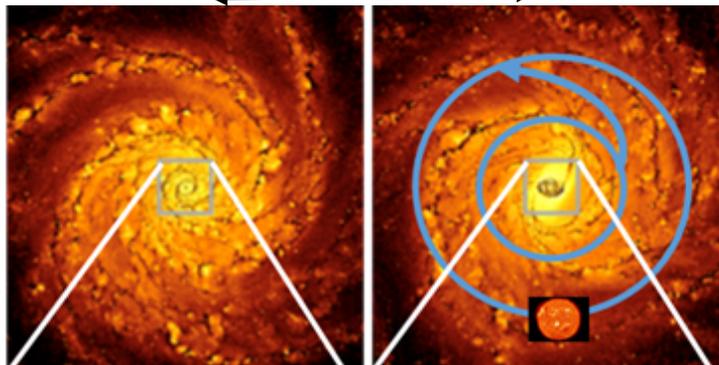
天の川銀河の種が誕生

バー構造の出現

天の川銀河全体への影響

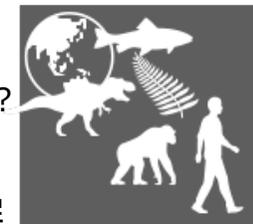


出現前 ← 約10億年 → 出現後



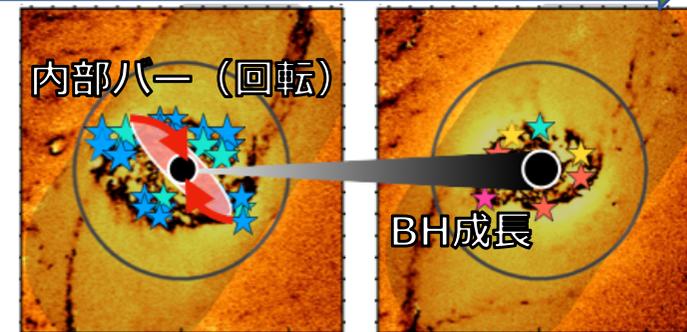
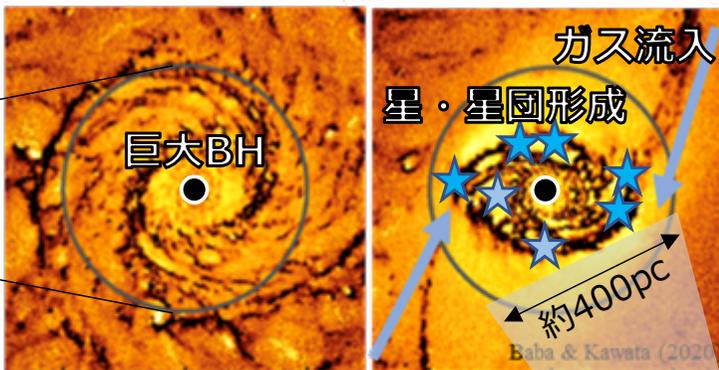
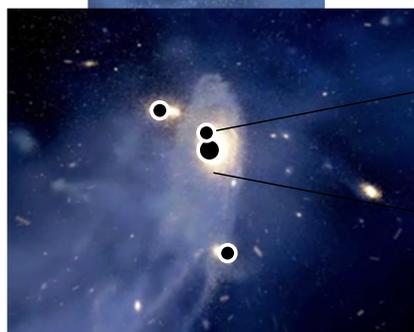
太陽系が内部から外側に大きく移動を開始 (!?)

気候変動?
生命進化?
人類誕生?



→ 分野横断型
学際研究へ発展

内部バー形成⇒巨大BH成長⇒内部バー消失?



銀河中心考古学イベント①

銀河中心考古学イベント②

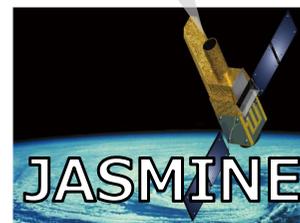
銀河中心考古学イベント③

中心部での最初の星形成
→ **古典的バルジ形成**
(現在も中心部に残存?)
巨大BHの合体成長?

バー形成による急激なガス流入
→ 爆発的星形成 (スターバースト)
→ **中心核ディスク形成**
(バーの年齢 ≒ 中心核ディスク年齢)

中心核ディスクの不安定性
→ **内部バー形成**
→ 巨大BHへのガス供給
→ 内部バーの破壊? (共進化?)

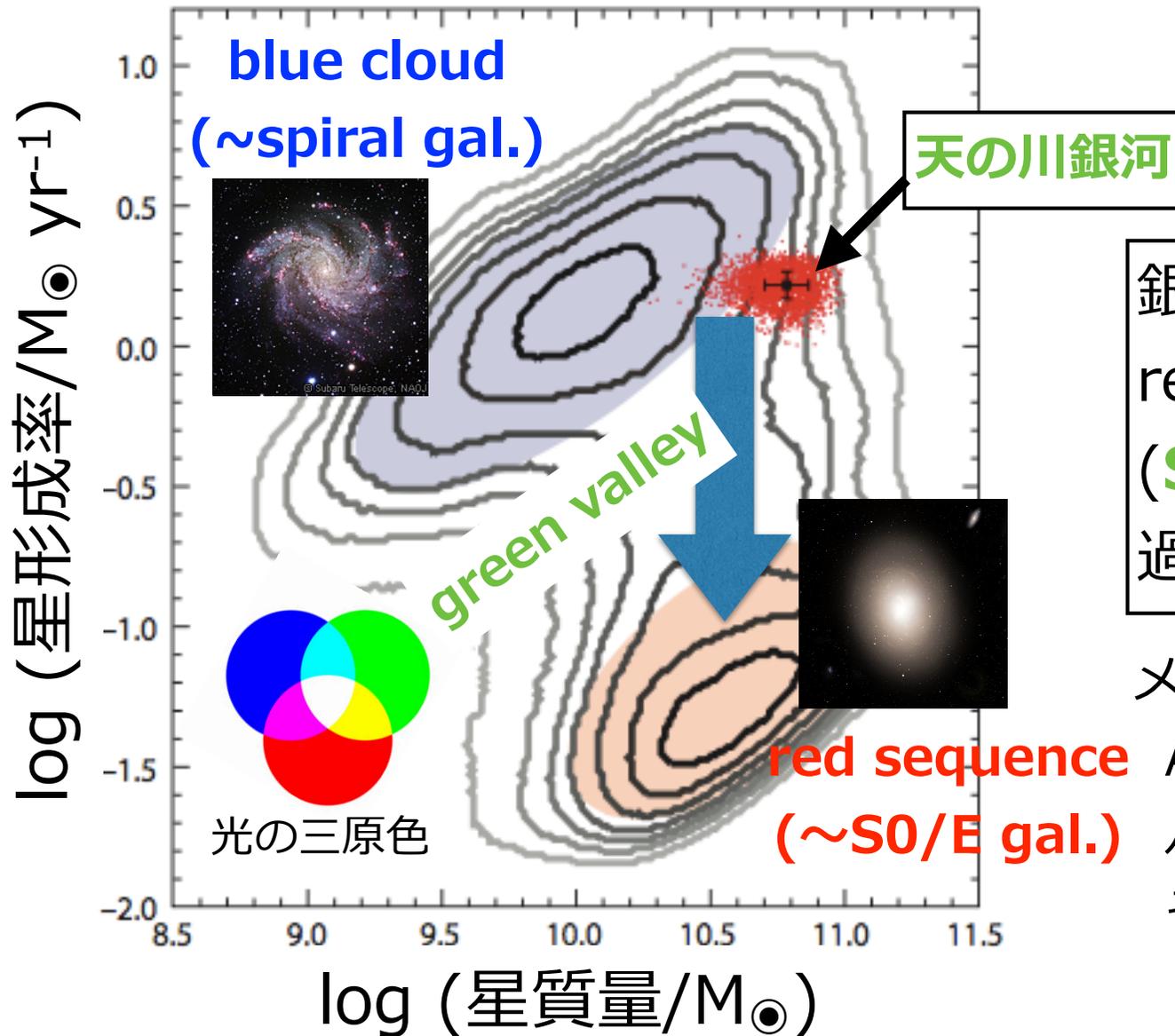
中心核バルジの星の位置・速度の観測から 3大イベントの解明を目指す。



The Galaxy in the Context

Bland-Hawthorn & Gerhard, ARA&A, 54, 529, (2016)

Licquia et al. 2015



銀河系はblue cloudから
red sequenceに進化
(**SF quenching**) する
過程にある銀河か??

メカニズムの理解

AGN feedback?

バー形成? (bar quenching)

その他?

JASMINE Consortium

2019年8月立ち上げ

Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration
(赤外線位置天文観測衛星)

<https://sites.google.com/site/smalljasmineconsortium2019/home>

この度、JAXA宇宙科学研究所により「**JASMINE (小型JASMINE)**」が公募型小型計画宇宙科学ミッション3号機(2020年代半ば打ち上げ予定)に選定されました。JASMINEは、世界で初めて近赤外線(Hw-band)での位置天文測定を宇宙で行う衛星で、**銀河中心核バルジ領域($R < \sim 200$ pc)**の様々な年齢の星の分布と運動を詳細に測定することにより、銀河系全体の進化形成史を理解する上での核となる銀河中心領域の進化の歴史を読み解くことと、低温星周りの生命存在可能領域の惑星の探査を主な科学目標(キープロジェクト)としてしています。

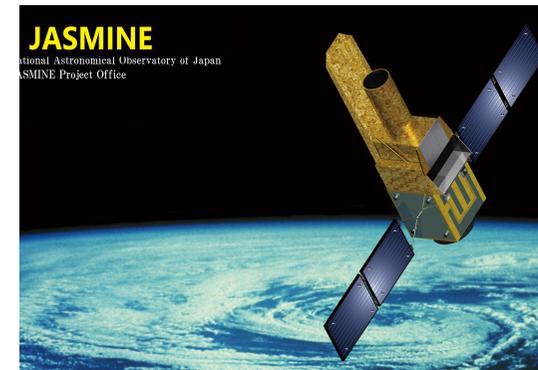
銀河中心考古学の目標精度は、 $H_w < 12.5$ magの天体で $25 \mu\text{as}$ の年周視差精度、 $H_w < 15$ magの天体で $125 \mu\text{as/yr}$ の固有運動精度です。最近のGaia衛星の成果に代表されるように、位置天文データは、新たな次元のデータを提供するものであり、主な目標以外にもデータを多くのサイエンスにも応用できるはずで、さらに銀河中心領域方向以外の興味深い天体をターゲットにすることも可能です。このように国内の多くのサイエンスコミュニティにとって有益なデータを提供していきたいと考えております。

JASMINEプロジェクトでは、JASMINEの科学目標を達成し、創出されるデータをより多くの科学者にとって有益なものとするためには、⁵⁵その目標を共有するコンソーシアムが必要ということで、JASMINE Consortium (JC)を発足することにしました。



Google 検索

I'm Feeling Lucky



JC Website



Constats:
milkyway.bulge.ws@gmail.com
(Daisuke Kawata, Junichi Baba)

JC Working Groups

Working Groupに参加して活動したい人は、
オフィシャルサイトにアクセスし、参加登録を！

ミッション目標に向けたより多くのサイエンスに有益なカタログ作りの準備 (**WG-A**)、科学目標達成に向けてのシミュレーションデータなどを使った準備 (**WG-B**)、JASMINEの成果を広く社会に還元するためのアウトリーチ活動 (**WG-C**) を目的とします。

- **WG-A Data Analysis (lead by Yoshiyuki Yamada)**
 - WGA-1: System Architecture **JASMINE end-to-end simulation**
 - WGA-2: Data Analysis and Validation (end-to-end simulation working group)
 - Input Catalogue, Image Simulator, Astrometry and Time Series Photometry
 - WGA-3: Data Archive
 - Including collecting spectroscopic data, Cross-match, Stellar Parameters
- **WG-B Science Validation and Preparation (lead by Daisuke Kawata)**
 - WGB-1: Galactic Center Archaeology **銀河中心考古学**
 - Galaxy formation and evolution, IMBHs, Star-forming regions, Compact objects, Variable stars, Binaries, Microlensing, Seismology
 - WGB-2: Exoplanets **系外惑星探査**
 - Transit, microlensing, astrometry exoplanet detection + Solar system objects.
- **WG-C Outreach (lead by Elizabeth Tasker)**

JASMINE
Consortium

Aims
WGs
Join
Mtg

 サイト右端の
「Join」をクリック

衛星打ち上げ後は、準備した体制を元に、データ公開に向けて、データカタログ、Science Validation の論文などの作成に携わって頂きます。打ち上げ前の準備の段階でも、シミュレーションデータや、Gaia などのすでに存在するデータを使って科学的検証をする必要があるので、多くの論文が発表できるはずで、アーリーキャリアの方達にも多く参加して頂いて、衛星プロジェクトへの貢献を通して、キャリア形成に繋げていただきたいと思います。また、その支援もコンソーシアムとして行なっていきたいと思います。

Review Papers

Dynamics/Formation/Evolution of the Milky Way

- Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016, ARA&A, **54**, 529
 - 天の川銀河構造に関する包括的なレビュー。ただし、Gaia以前の結果。
- Barbuy, Chiappini & Gerhard, 2018, ARA&A, **56**, 223
 - バルジの化学動力学進化に関するレビュー。近年の大規模サーベイによる進展を含む。
- Helmi, 2020, ARA&A, **58**, 205
 - ハロー (streams/substructures) に関するレビュー。Gaia DR2による進展を含む。
- Shen & Zheng, 2020, RAA, **20**, 10
 - 天の川銀河の棒状構造・渦状腕の動力学に関するレビュー。

Galactic Dynamics (Bars/Spirals; in general)

- Sellwood & Wilkinson, 1993, RPPH, **56**, 173
 - バーの動力学に関するレビュー。やや古いが本質的。
- Sellwood, 2014, RvMP, **86**, 1
 - バー不安定とsecular evolutionの包括的レビュー。
- Dobbs & Baba, 2014, PASA, **31**, 35
 - 近年の数値計算に基づく渦状腕の動力学に関するレビュー。

教科書

- Binney & Tremaine, "Galactic Dynamics", 2007
- 千葉 柁司, "銀河考古学", 2015