2020/11/12 観測的宇宙論WS 2020

天の川銀河の動力学構造と位置天文観測

- 1. はじめに 天の川銀河研究の意義
- 2. Gaia成果: "quick" review
- 3. 渦状腕構造の動力学
- 4. 棒状構造の動力学
- 5. JASMINE計画の概要

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)

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総括的なレビュー。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。

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
- 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
- 千葉柾司, "銀河考古学", 2015

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....

渦状腕

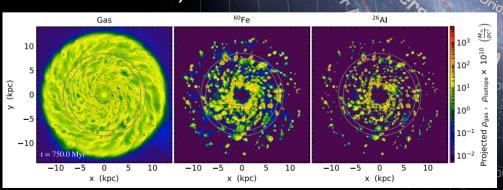
- → 銀河形成進化 (星形成/元素合成)
- → 太陽系・地球・生物の誕生

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

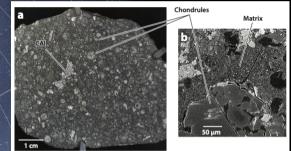
Galactic-scale Hydro. Sim.

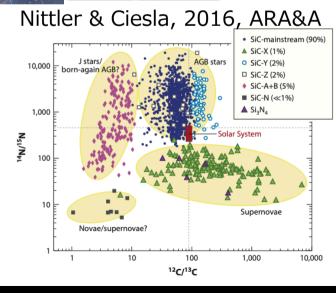


Fujimoto, Krumholz, Tachibana (2018)

• We are here.

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)





太陽系の起源 "3W1H"

Where: どこで誕生したのか?

e.g. *R* ∼ 3 *kpc*, 6 *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?

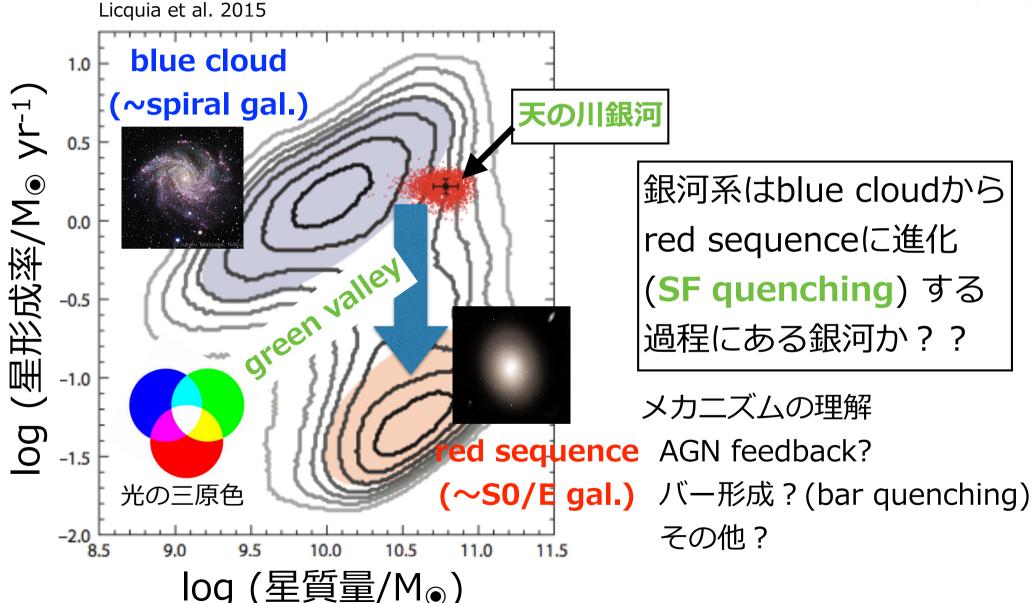
e.g. fast, slow, wander?

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)

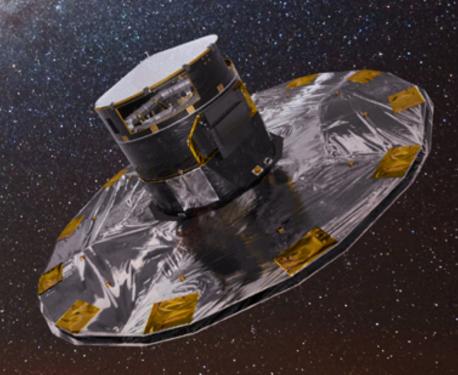
The Galaxy in the Context

Bland-Hawthorn & Gerhard, ARA&A, 54, 529, (2016) 天の川銀河 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



2. Gaia の成果: "quick" review

Astrometric Satellite "GAIA" launched 19th Dec. 2013



Gaia Revolution

— Astrometry (位置天文観測) —

main baryonic component = "Stars" Gaia → 1.3B stars's 6D phase space info. $(a, δ, ω, μ_a, μ_δ, ν_r)$

DR1 (2016/9)

DR2 (2018/4) ← *Now*, here!

⊿অ ~ 40 uas

 $\Delta\mu \sim 60 \text{ uas/yr}$

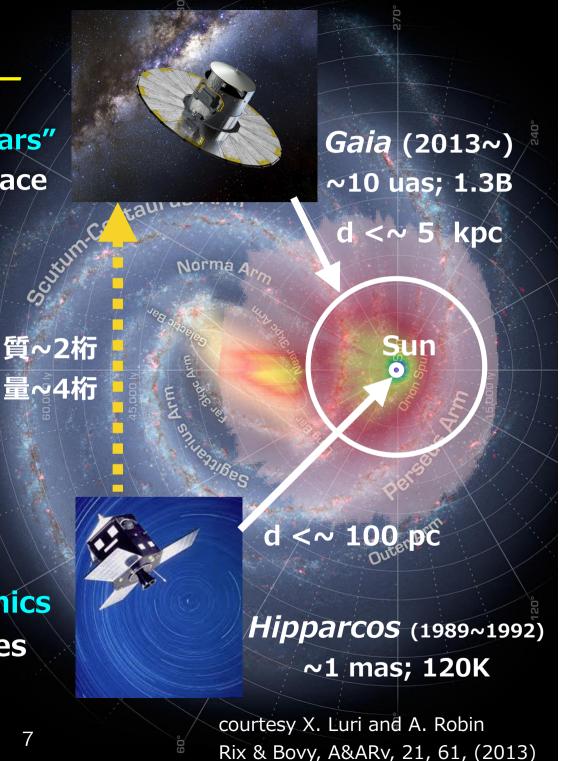
LOS vel. (RVS)

EDR3 (2020/12/3)

DR3 (2022)

Final (TBD)

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





位置天文観測衛星: Hipparcos, Gaia, JASMNE

千葉, "銀河考古学", 2015, 表8.1

	ヒッパルコス	ガイア
稼働期間	1989-1993	2013-2021
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	109
観測精度	~ 1 milliarcsec	$4 \mu arcsec (V = 10 等)$
		$10-15 \mu arcsec (V = 15 等)$
		200-300 μ arcsec ($V = 20$ 等)
視線速度	なし	$15 \mathrm{km}\mathrm{s}^{-1} \;(V < 16 - 17 \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \)$

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

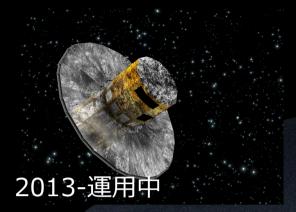
ωケンタウリ (球状星団)

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 <~ 20等級; d <~ 5 kpc

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

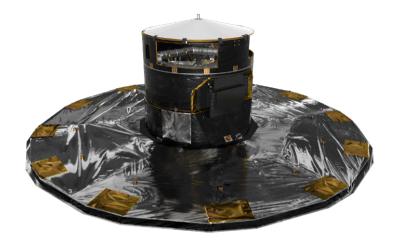
© ESA/Gaia

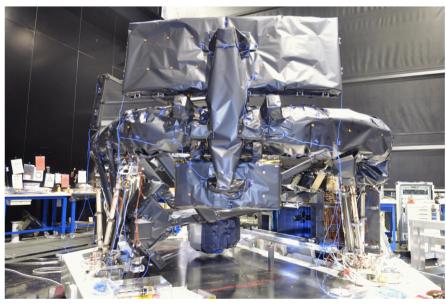
10 Gaia Collaboration, Brown et al., 2018, A&A

from Anthony Brown's slide, 2019/03/08

Gaia

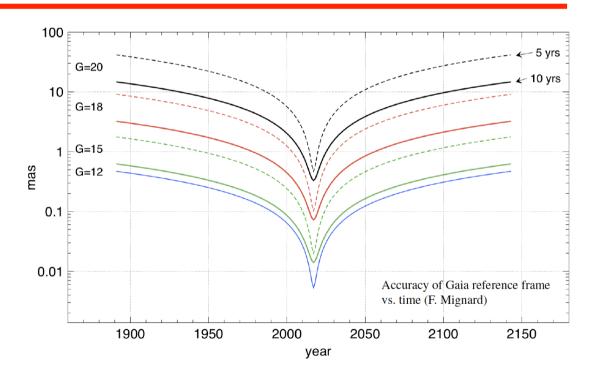
- Astrometry and spectrophotometry for > 1 billion sources
- Radial velocities for > 100 million sources
- Survey
 - ightharpoonup Complete to G = 20.7 (V = 20-22)
 - Quasi-regular time-sampling over 5 years $(\sim 70 \text{ observations})$
- Launch December 2013
- 5 years of nominal operations at L2
 - ▶ mission extended to end 2020 (+1.5 yr)
- Second data release April 25 2018
- Photometric alerts started in 2014
- Alerts on new solar system objects started end 2016





Gaia extension

- Nominal Gaia mission ends mid-2019 after 5 years of measurements
- Hardware in good shape, only limiting factor is micro-propulsion fuel
 - \blacktriangleright mission can continue to end-2024 (± 0.5 yr)
- Proposal submitted to ESA for 5 year extension
 - ▶ approved to end 2020, preliminary approval to end 2022, submit proposal for 2023–2024 in 2020
 - Parallaxes, photometry, radial velocities improve by 40% with respect to DR4
 - Proper motions improve by factor of
 2.8 with respect to DR4
 - ► Improvement of more complex motions (e.g., planets) up to factors of 20
 - Accurate tangential motions over 22.6× larger volume



KITP - 2019.03.08

Gaia Data Release Scenario

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

Early DR3 (third quarter of 2020) ← 今年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) ← 再来年の前半

- 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. 変光星・(位置天文学的)連星
- Non-single stars.
- 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.

from Anthony Brown's slide, 2019/03/08

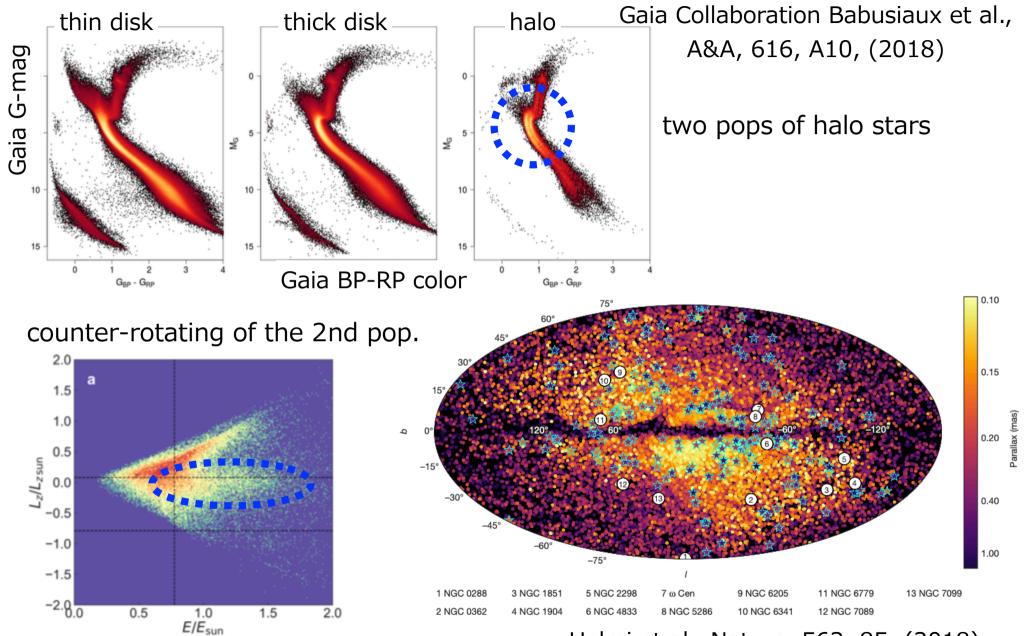
Gaia DR4 ← もともとは"Final"と呼ばれていたもの

- Final release for the nominal mission
 - ► schedule TBD ← 2024頃???
- Foreseen data products
 - ► Full astrometric, photometric, and radial-velocity catalogues
 - All available variable-star and non-single-star solutions
 - Source classifications (probabilities) plus multiple astrophysical parameters (derived from BP/RP, RVS, and astrometry) for stars, unresolved binaries, galaxies, and quasars
 - ► Catalogue of binaries and exo-planets
 - ► All epoch and transit data for all sources, including all BP/RP/RVS spectra

Overall gain in precision for DR3 and DR4: factors 1.2 and 1.7 with respect to DR2

proper motions improve by factors 1.9 and 4.5

quick reviews SMC-sized gal. merger at >10 Gyr ago (Gaia-Enceladus event) → thick disk formation ??



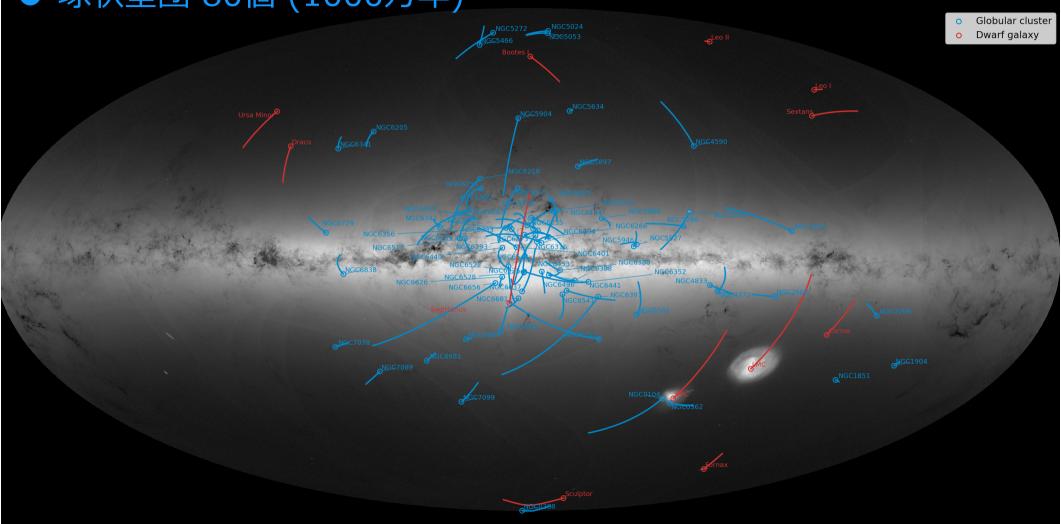
Helmi et al., Nature, 563, 85, (2018) see also Helmi (2020) ARA&A review quick reviews

Gaia Collaboration, Helmi et al., A&A, 616, A12, (2018)

"Gaia Data Release 2: Kinematics of globular clusters and dwarf

● 矮小銀河 11個 (1億年) galaxies around the Milky Way"

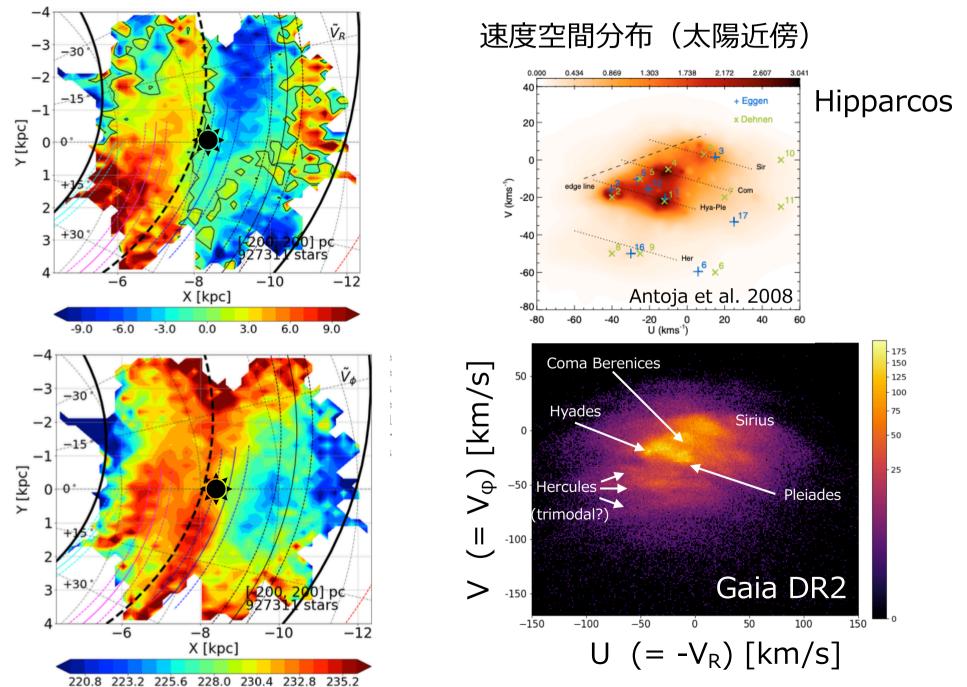
● 球状星団 80個 (1000万年)



Copyright ©2018, Maarten Breddels, Amina Helmi https://www.astro.rug.nl/~ahelmi/research/dr2-dggc/

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

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

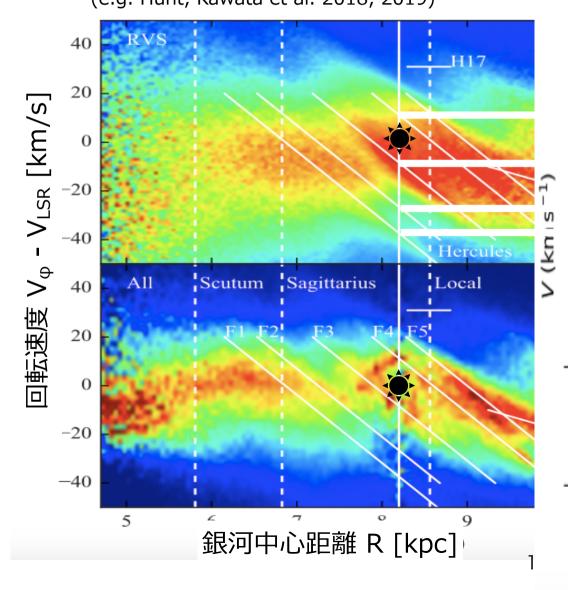


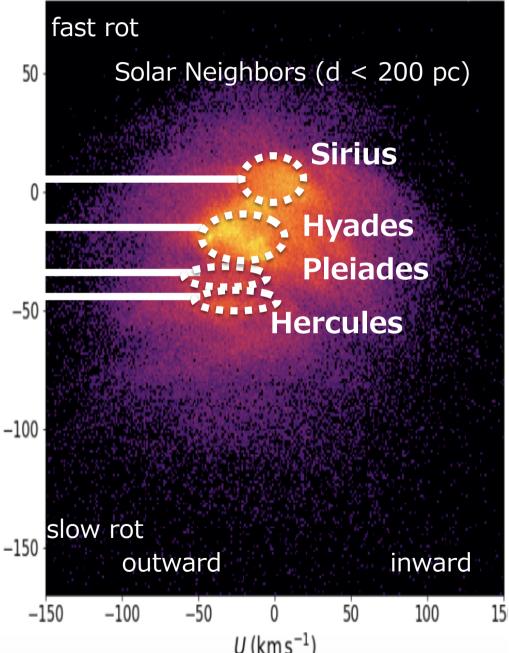
R_{gc}-V_{rot} ridges v.s. local moving groups

Kawata, JB et al. 2018, MNRAS

✓ resonance features related with bar/spiral ?? (e.g. Asano, Fujii, <u>JB</u> et al. 2020)

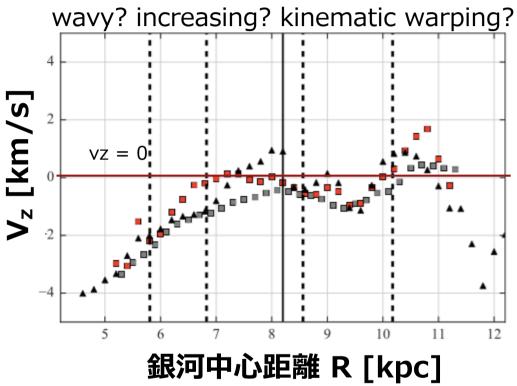
✓ phase wrapping of dynamic spirals ??(e.g. Hunt, Kawata et al. 2018, 2019)





A dynamically young and perturbed Milky Way disk

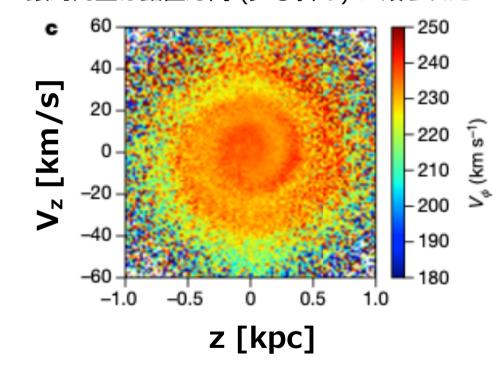
Kawata, <u>JB</u> et al. 2018, MNRAS see also Dehnen & Schonrich 2018



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?



銀河円盤は最近 (<~ 0.5-1 Gyr)、

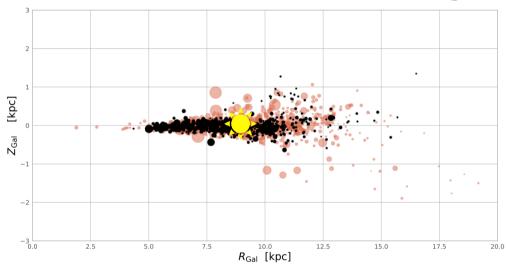
Sgr. Dwarf銀河の近点通過の影響か? (Khoperskov et al. 2018) 棒状構造 (バー) のbucking運動の痕跡か?(e.g. Laporte et al. 2018)

→ 銀震学 (Galactic Seismology)

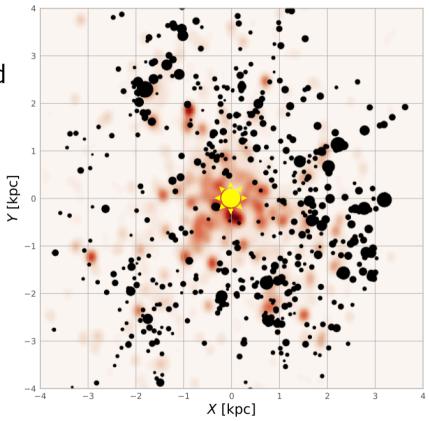
MACHINE-LEARNING TECHNIQUES REVEAL HUNDREDS OF OPEN CLUSTERS IN GAIA DATA

>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)



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

Gaia Collaboration, Eyer et al., A&A, 623, A110, (2019)

"Gaia Data Release 2: Variable stars in the colour-absolute magnitude diagram"

DR3 (2022) で新たに桁違いの数の変光星が発見されてくるはず (高精度の周期-光度関係も決まるはず)

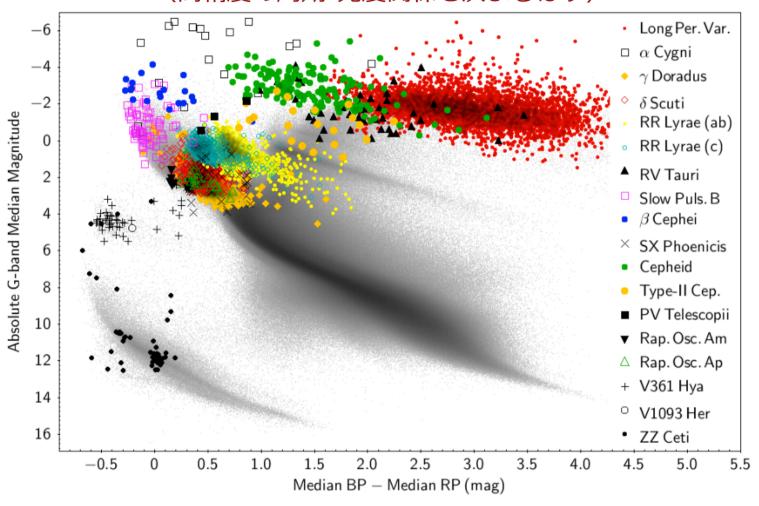
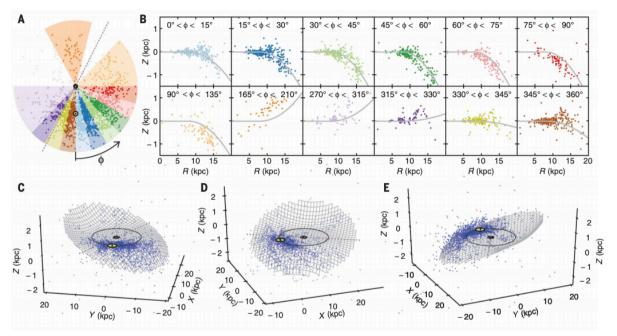


Fig. 3. Known pulsating variable stars retrieved from published catalogues are placed in the observational CaMD, with symbols and colours representing types as shown in the legend (see Table A.1 for the references from the literature per type). All stars satisfy the selection criteria described in Appendix B. The background points in grey denote a reference subset of objects with a stricter constraint on parallax ($\varpi > 1$ mas), which limits the sample size, extinction, and reddening. The effects of interstellar matter and other phenomena (see text) are not corrected for. The condition on the relative precision of $G_{\rm BP}$ measurements introduces artificial cuts in the distributions of low-mass main-sequence stars and red (super)giants.

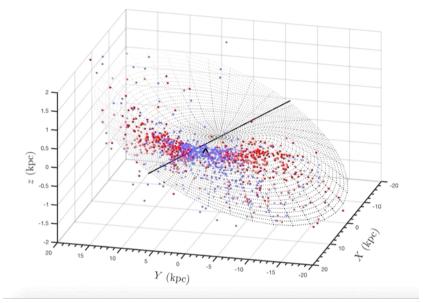
quick reviews

Skowron et al., Sci, 365, 478, (2019) 2431 classical Cepheids w/ OGLE



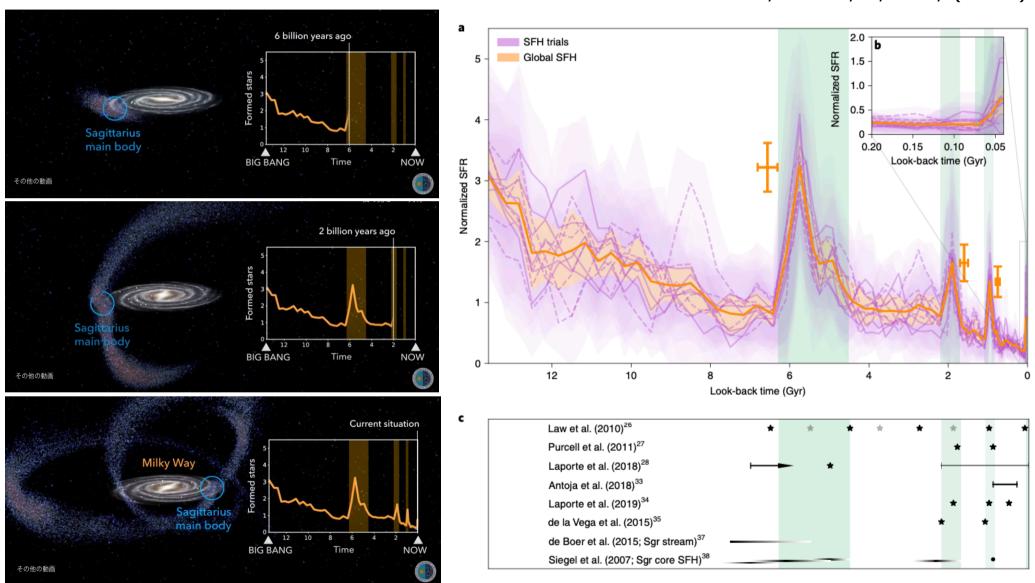
Poggio et al., NatAs, 4, 590, (2020) 12 millions Gaia DR2 giants

Chen et al., NatAs, 3, 320, (2019) 585 + 744 classical Cepheids

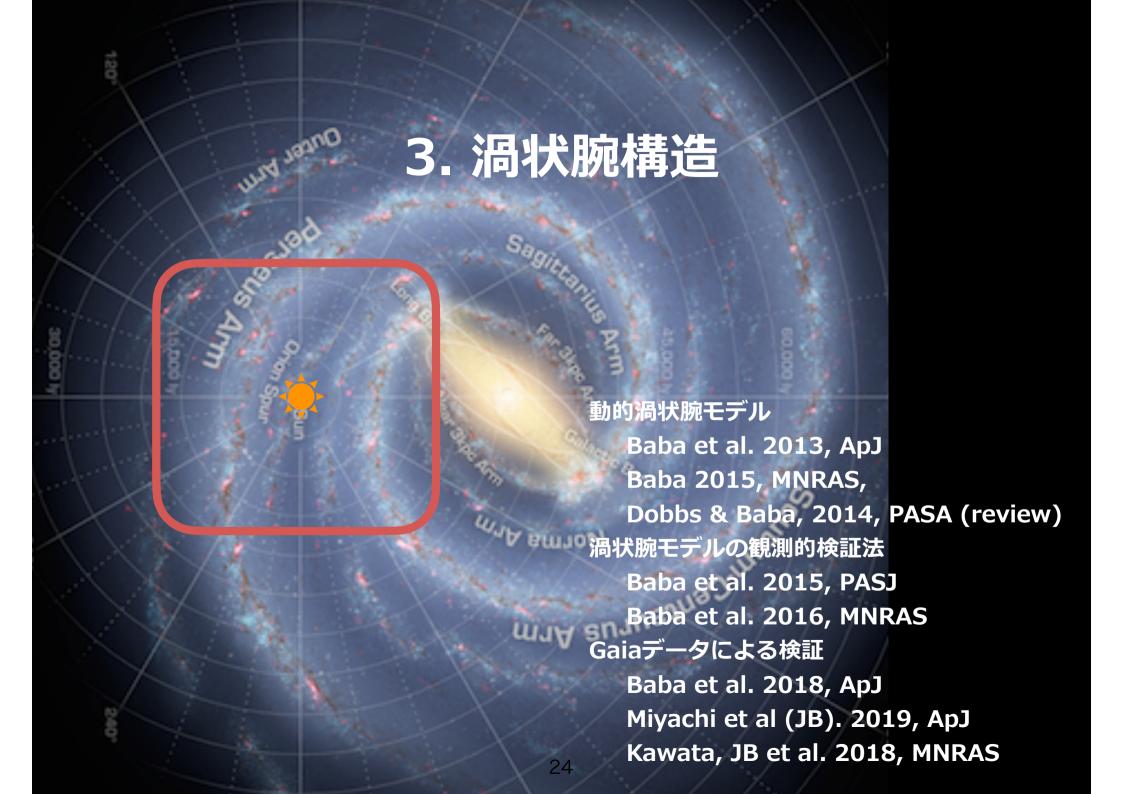


The recurrent impact of the Sagittarius dwarf on the Milky Way star formation history

Ruiz-Lara et al., NatAs, 4, 965, (2020)



動画: https://www.iac.es/en/outreach/news/evolutionary-history-milky-way-determined-more-detail-ever



渦状腕構造論:<u>密度渡</u> vs. <u>動的渦状腕</u>

- 1960年代からの論争 -

density wave

dynamic arm

Dobbs & <u>Baba</u> (2014)

密度波モデル

動的渦状腕モデル

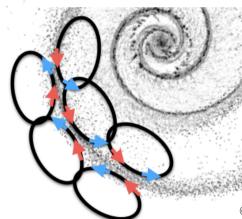
腕に相対的な軌道 (模式図)

腕を横切る運動

 $R > R_{cr}$

腕に収束/発散する運動

(馬蹄型類似軌道)



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)

© Junichi Baha

命: > 1 Gyr

回 転 則 :剛体回転

▶差動回転

radial migration

▶収束・発散 (+ 動径移動)

→ ~100 Myr (recurrent)

Lin & Shu (1964,1966)

Bertin & Lin (1996)

星の運動:通

Shu (2016)

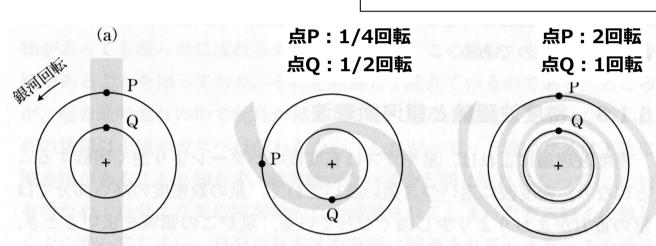
Goldreich & Lynden-Bell (1965); Toomre (1981) Sellwood & Carlberg (1984); Sellwood & Binney (2002)

etc...

教科書的な話 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)





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)

Dobbs & Baba, 2014, PASA, <u>31</u>, 35

Publications of the Astronomical Society of Australia (PASA), Vol. 31, e035, 40 pages (2014). © Astronomical Society of Australia 2014; published by Cambridge University Press. doi:10.1017/pasa.2014.31

Dawes Review 4: Spiral Structures in Disc Galaxies

近年の数値シミュレーションに基づく渦状腕構造の理解の現状

Clare Dobbs1,3 and Junichi Baba2

¹School of Physics and Astronomy, University of Exeter, Stocker Road, Exeter, EX4 4QL, UK

(RECEIVED September 17, 2013; ACCEPTED July 16, 2014)

Abstract

The majority of astrophysics involves the study of spiral galaxies, and stars and planets within them, but how spiral arms in galaxies form and evolve is still a fundamental problem. Major progress in this field was made primarily in the 1960s, and early 1970s, but since then there has been no comprehensive update on the state of the field. In this review, we discuss the progress in theory, and in particular numerical calculations, which unlike in the 1960s and 1970s, are now commonplace, as well as recent observational developments. We set out the current status for different scenarios for spiral arm formation, the nature of the spiral arms they induce, and the consequences for gas dynamics and star formation in different types of spiral galaxies. We argue that, with the possible exception of barred galaxies, spiral arms are transient, recurrent and initiated by swing amplified instabilities in the disc. We suppose that unbarred m = 2 spiral patterns are induced by tidal interactions, and slowly wind up over time. However the mechanism for generating spiral structure does not appear to have significant consequences for star formation in galaxies.

Keywords: galaxies: spiral, galaxies: kinematics and dynamics, galaxies: structure, galaxies: star formation

²Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology 2-12-1-I2-44 Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8551, Japan

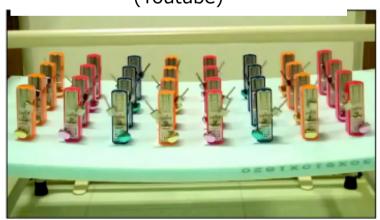
³Email: dobbs@astro.ex.ac.uk

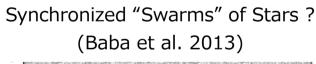
余談

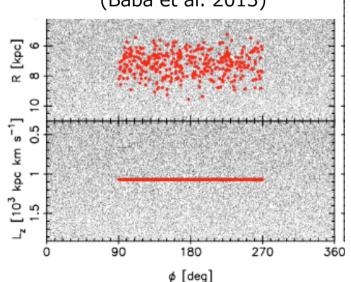
「動的渦状腕」の名称について

- 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)







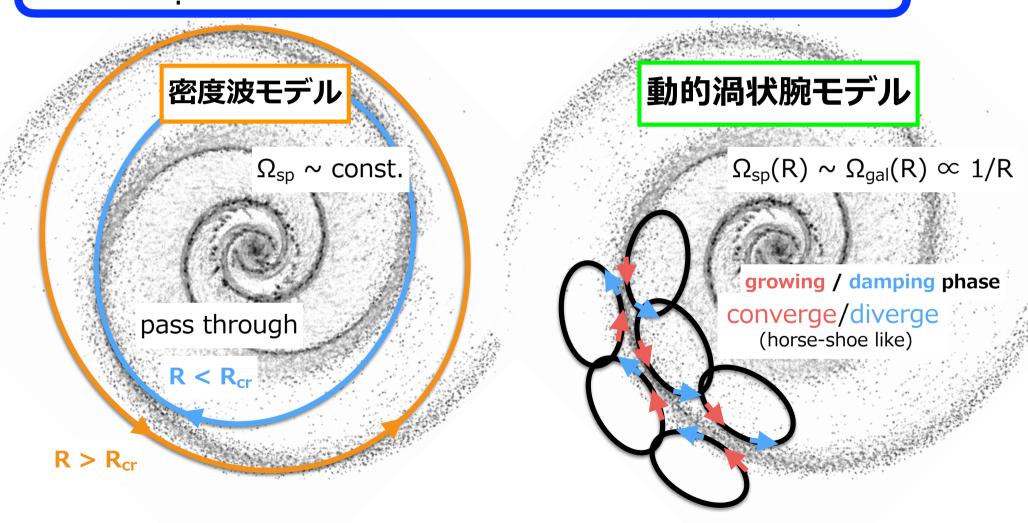




move across or along arms?

LifeTime . Gyr-scale ← → 100 Myr-scale (recurrent)

Stars . pass through ← → converge/diverge



Lin & Shu (1964,1966)

Baba et al. (2013); Grand et al. (2012)

渦状腕理論の観測的検証法の理解も進んだので、 実際のGaiaデータで検証できないか?

Gaiaデータによる検証の例 Baba et al. 2018, ApJ Miyachi et al (JB). 2019, ApJ

"Disrupting" Perseus arm?

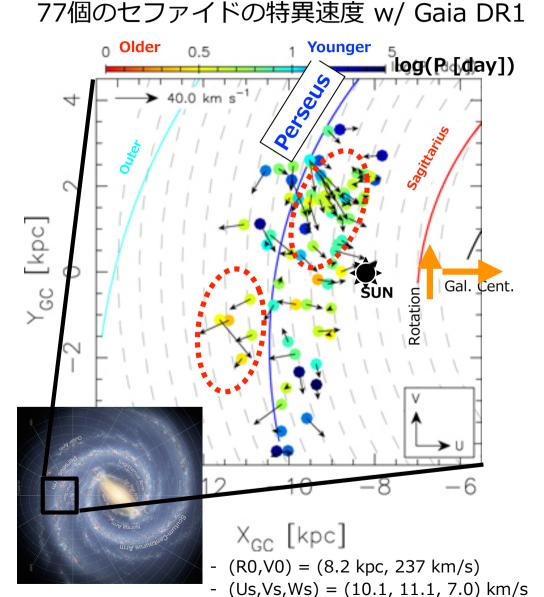
- Spiral arms: Reid et al. 2014 (VLIB astrometry of HMSFRs)

Baba, Kawata, Matsunaga et al. 2018, ApJ

壊れつつあるアーム周辺の

若い星粒子 (~ 100 Myr) の特異速度

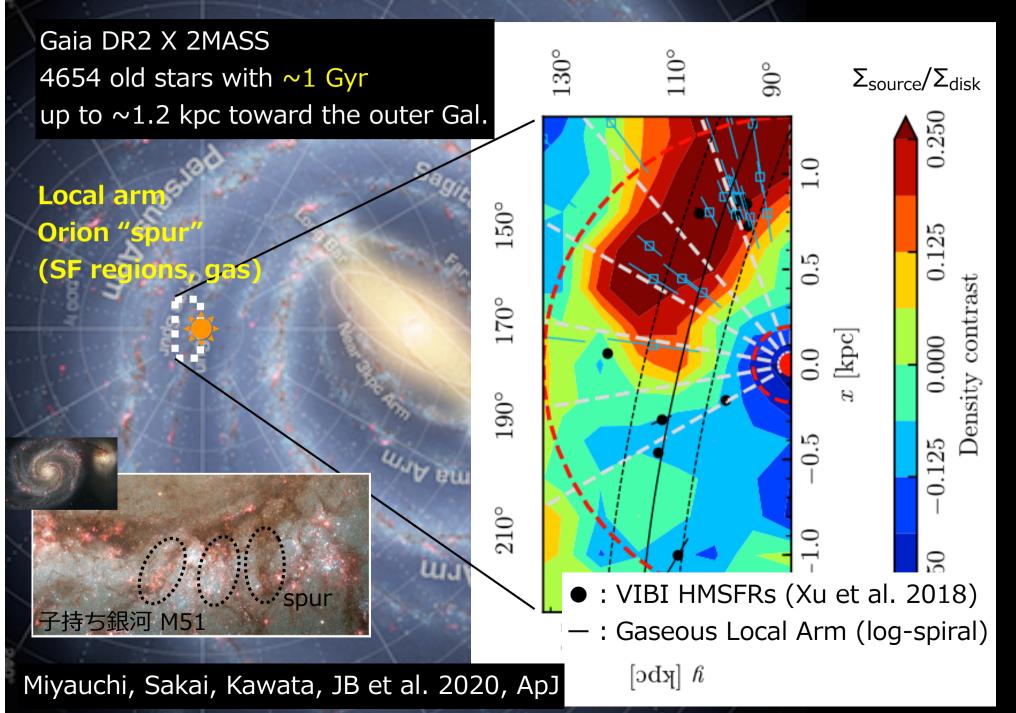
w/ N-body/SPH sim.

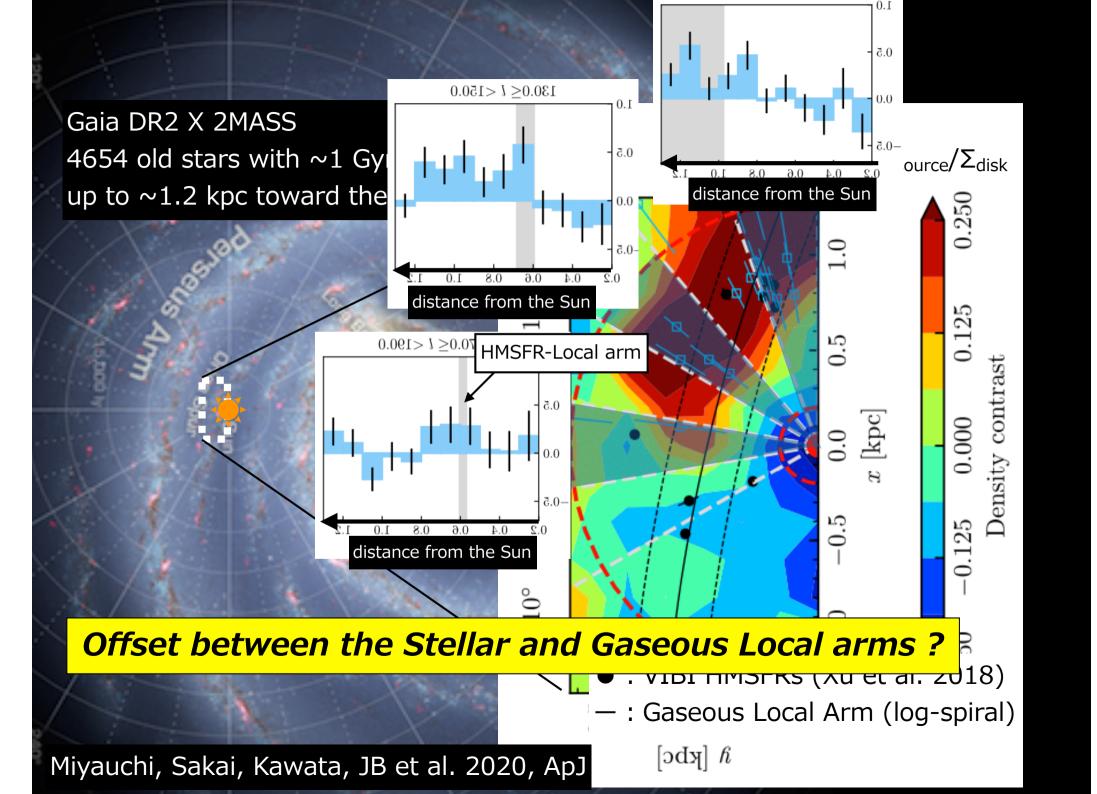


ペルセウス腕周辺の

simulation (Baba 2015)

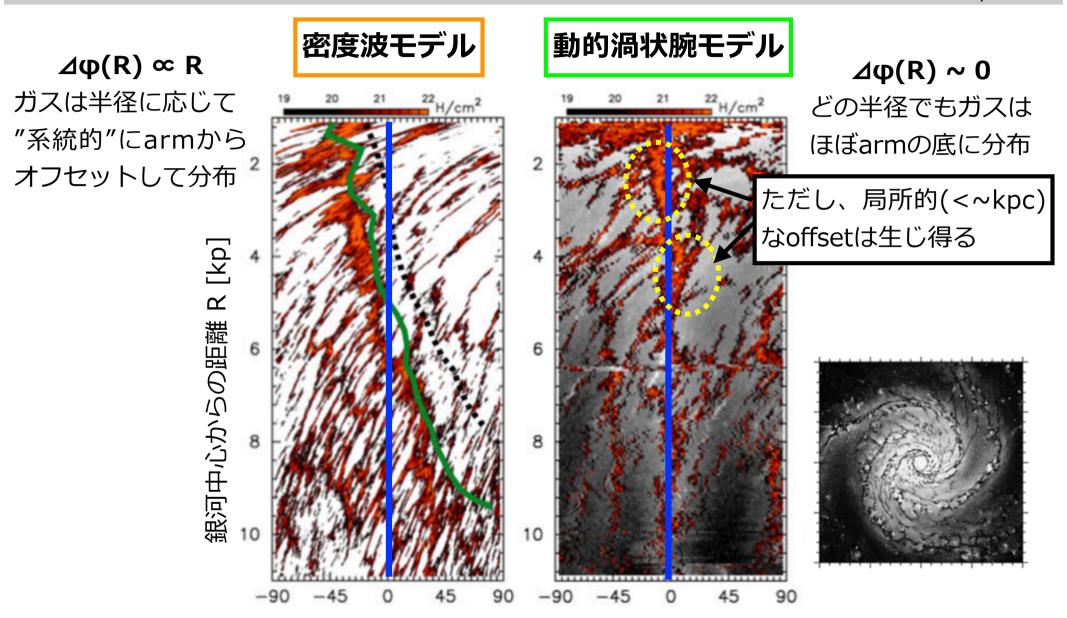
The "Stellar" Local arm?





azimuthal offset star-gas

Baba et al. 2015, PASJ



stellar arm位置を基準とした相対方位角 ⊿φ [°]



Gas spiral map: "Fingers-of-God" structures

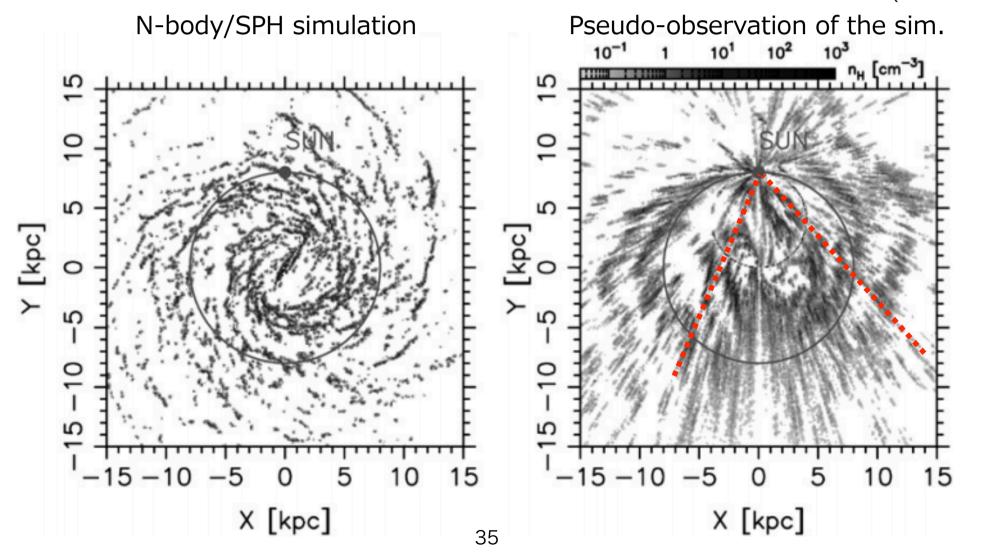
Baba et al. 2009, ApJ

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FoGと類似の現象)

※ 決定精度が銀経に依存すること に依る効果もある (Sofue 2009)



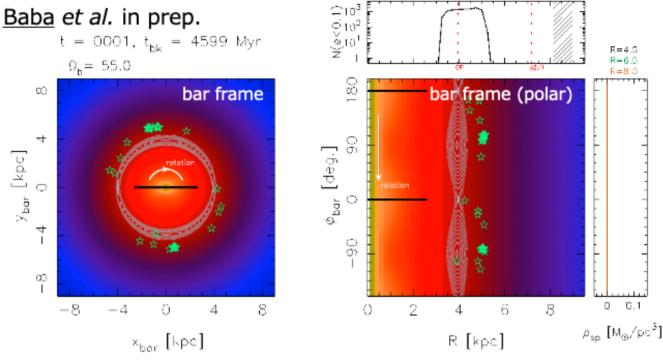
Efficient Migration of the Sun via "Dynamic" Spiral + Slowing Bar

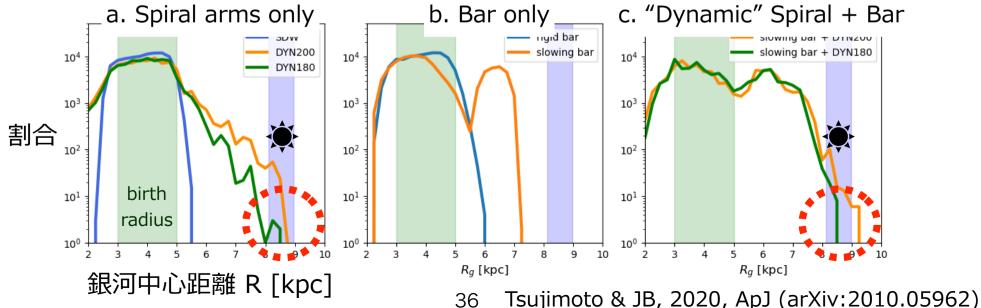
太陽の化学組成

 \rightarrow R_{birth} <~5 kpc << 8.5 kpc (see also Wielen et al. 1996)

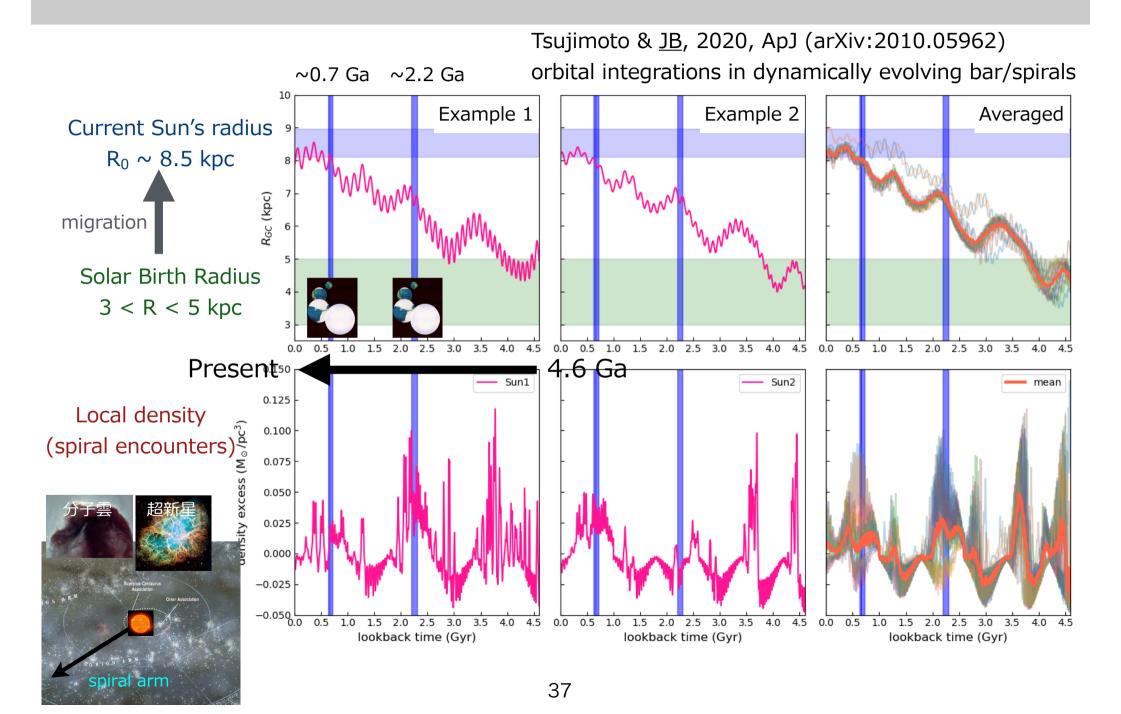
 $R_0 \sim 8.5 \text{ kpc}$ までいかにして辿り着いたのか?

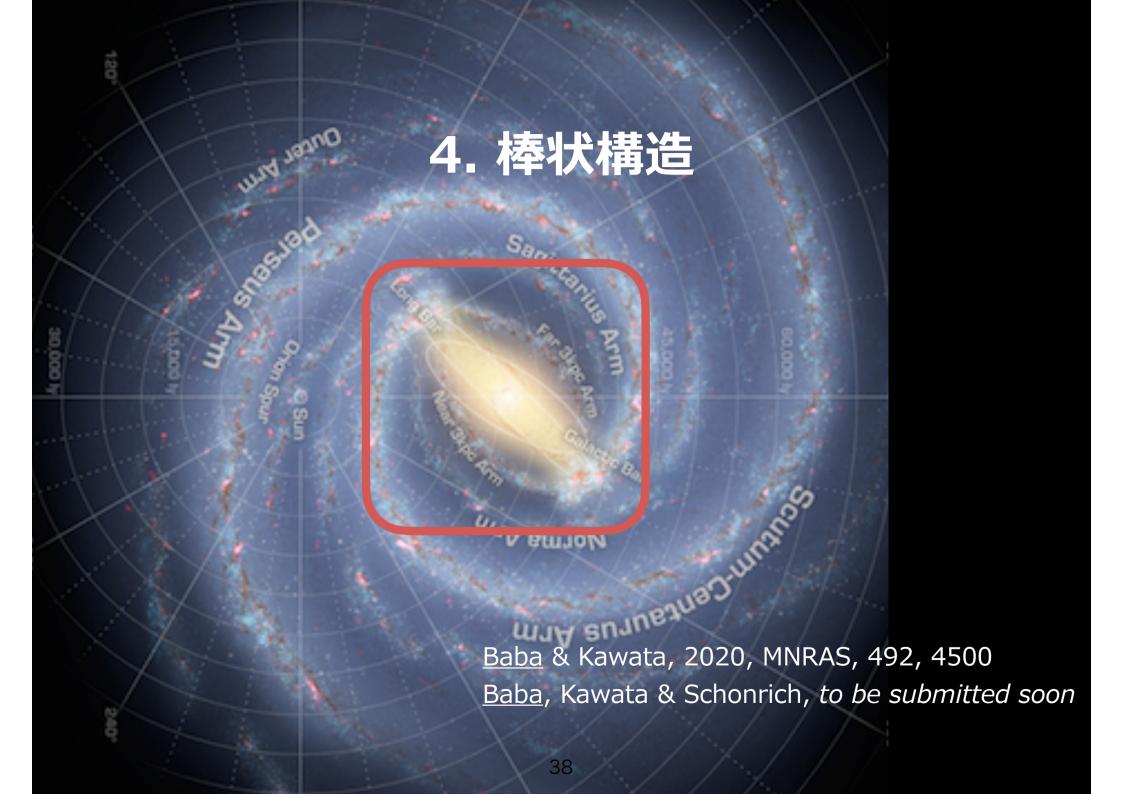
渦状腕の時間変動性の有無 バー構造の有無 バー構造の回転の減速の有無





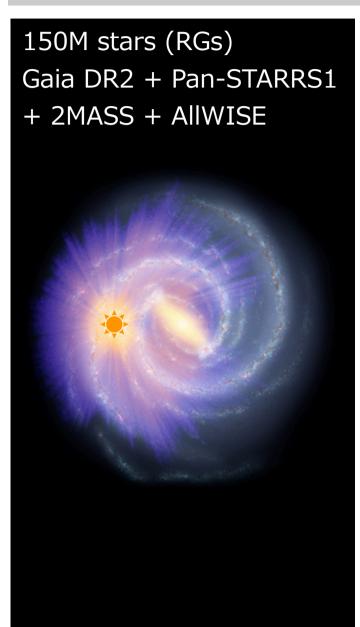
Spiral Encounters & Snowball Earth Events





First "direct" measurement of the Galactic Bar

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



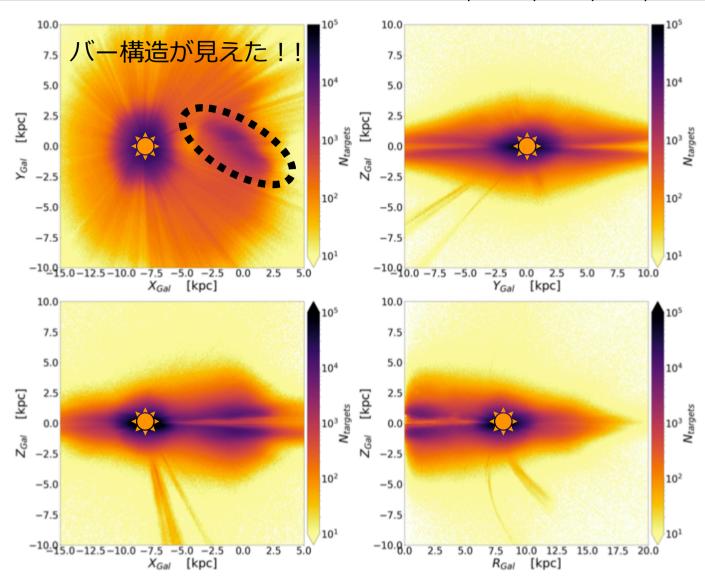


Fig. 7. Left: StarHorse density maps for the SH_GAIAFLAG=="000", SH_OUTFLAG="0000" sample in Galactocentric co-ordinates. Top left: XY map. Top right: YZ map. Bottom left: XZ map. Bottom right: RZ map. These density maps demonstrate that Gaia DR2 already allows to probe stellar populations in the Galactic bulge and beyond.

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:長径~5 kpc、角度~27°

Boxy/Peanut/X-形状

- 角速度:~40 km/s/kpc

(Sanders et al. 2019, Bovy et al. 2019;

Asano, Fujii, JB et al. 2020)

- 形成時期:~2-8 Gyr ago ???

- 進化過程:BPX形状への遷移時期???

角速度减速率???

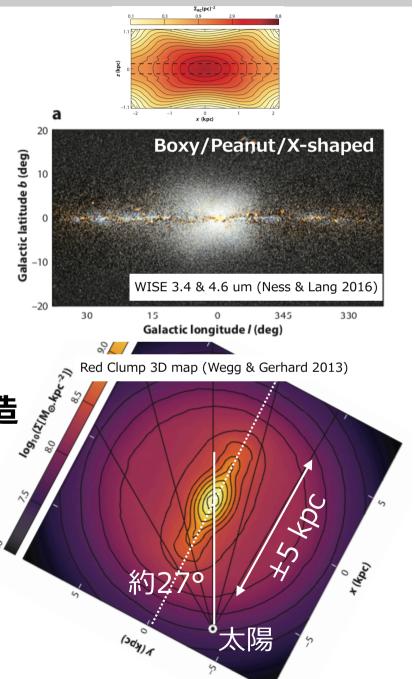
✓ バー = 円盤銀河の最も強い非軸対称構造

- → 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??)

バー形成:

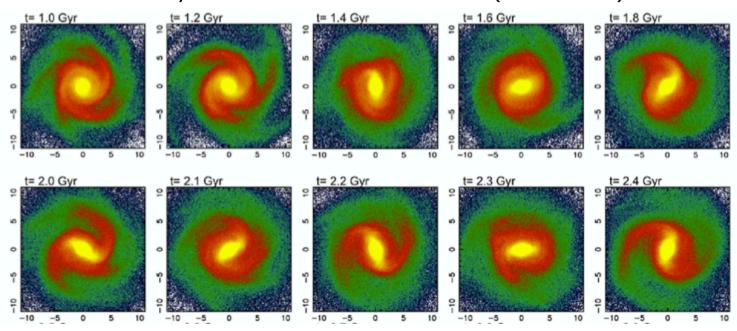
Gaia-Encelauds (銀河合体) イベントに並ぶ 「2大イベント」の一つ



バー形成の「観測的」履歴

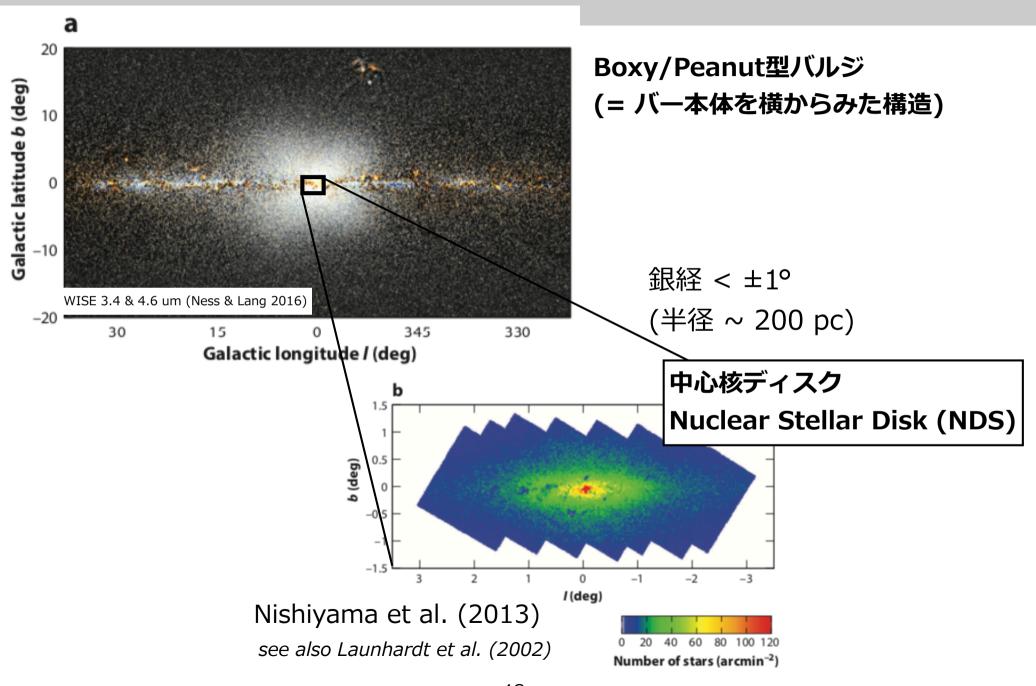
- バー形成:銀河円盤の不安定性などの起因する動力学現象 e.g. Sellwood & Wilkinson, 1993, RPPh, **56**, 173
- → 基本的にはすべての円盤星が寄与する
- → バーの年齢 ≠ バー構造を構成する星 (e.g. Wozniak 2007)

N-body simulation of bar formation (Baba 2015)



バーが形成すると銀河にどういう影響を及ぼすのか? 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?

銀河系の"中心核ディスク" (中心<~200 pc)



銀河系の中心核バルジ (中心<~200 pc)

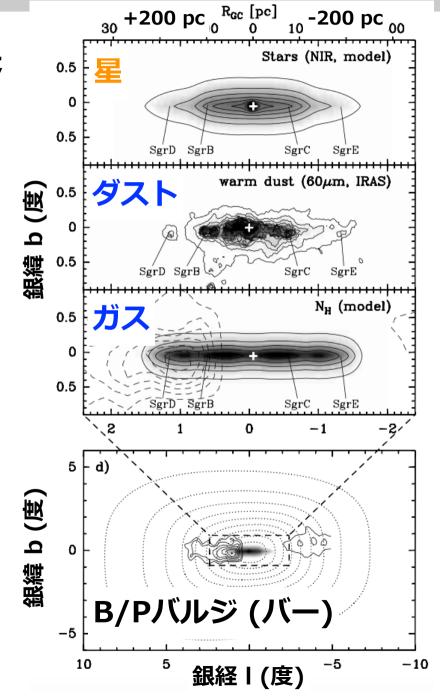
(中心核バルジ = NSD + CMZ)

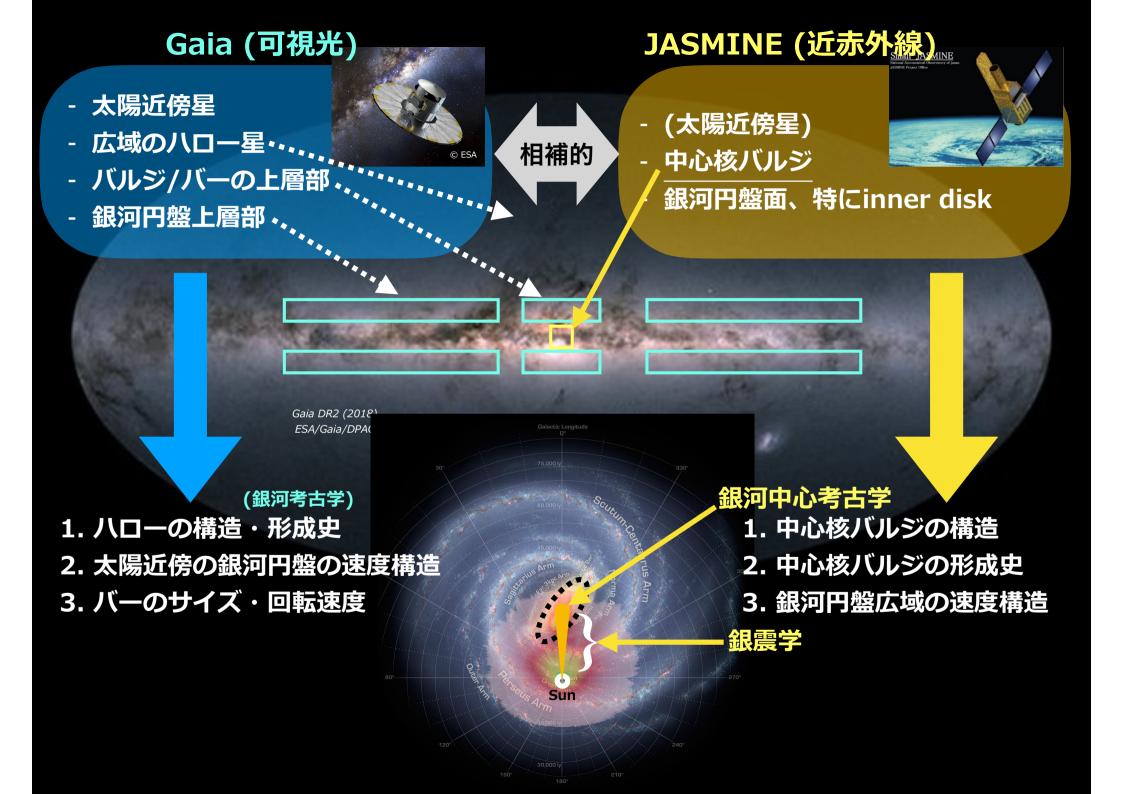
Launhardt et al. (2002)

- ∨赤外線観測で発見された中心の超過領域 (NSD; Launhardt+2002)
 - 半径~200 pcのディスク状の星の分布
 - 星の回転運動 (分光観測; Matsunaga et al. incl. **JB**, 2015; Schonrich+2015)
 - 星の距離・固有運動は測定できていない
 - → 動力学構造 (重力場) が不明 (nuclear bar?)
 - → 位置天文観測が重要
- ∨たくさんの分子ガスなどの星間媒質 (CMZ;

Morris & Serabyn 1996)

- 特徴的な運動 非円運動?磁場? (**JB**+2010; Suzuki+2015; Kakiuchi+2018)
- 星間減光が非常に強い
 - → Gaia (可視光) cannot reach the NSD!
 - → JASMINE (近赤外線) が重要
- ✓若い大質量星団 (Arches, Quintuplet)





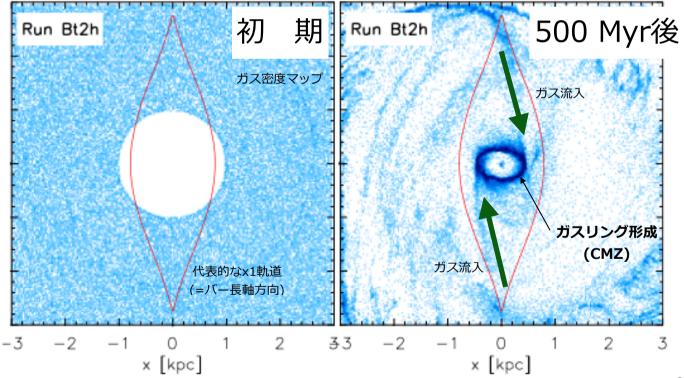
中心核ディスク (NSD) 形成過程

バー (棒状構造) によるバルジ領域 (~数100 pc) へのガス流入 → ガス円盤 (CMZ) → 星形成 (NSD)

※古くから知られている進化過程 (e.g. Athanassoula 1992, Friedli & Benz 1993, 1995)

バー (非軸対称構造) による角運動量輸送 (主にガス)

 $(R < CR \rightarrow inward; R > CR \rightarrow outward)$



Hydrodynamic simulations in a realistic bar potential (J. Shin, S. S. Kim, **JB** et al., 2017, ApJ, 841, 74)



Credit: ESO/R. Gendler

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), **K. Onishi** (SOKENDAI), NASA/ESA Hubble Space Telescope https://alma-telescope.ip/news/press/mt-post 598

Milky Way simulations

(Baba 2015; Baba et al. 2015, 2016, 2017)

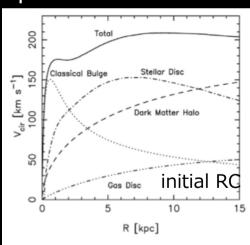
✓ ASURA (ver. 2) (Saitoh & Makino 2009,2010)

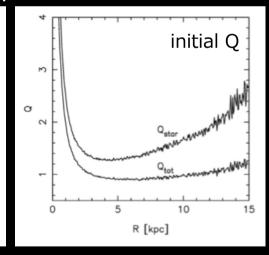
- Self-gravity N-body /SPH
- Baryon Physics (Saitoh+2008; Baba+2017)
 - Star Formation
 - SNII / HII region
 - Radiative Cooling / FUV Heating

✓ Disk Galaxy Model

- DM halo + classical bulge + stellar disk + gas disk

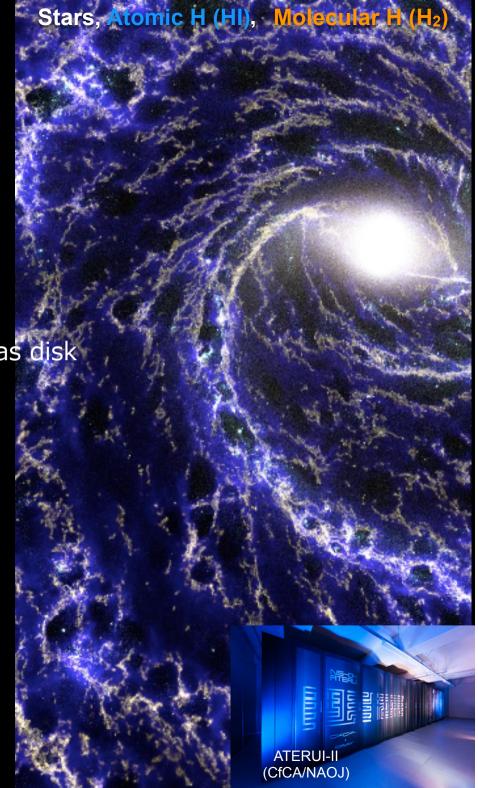
- spontaneous bar & spiral formation



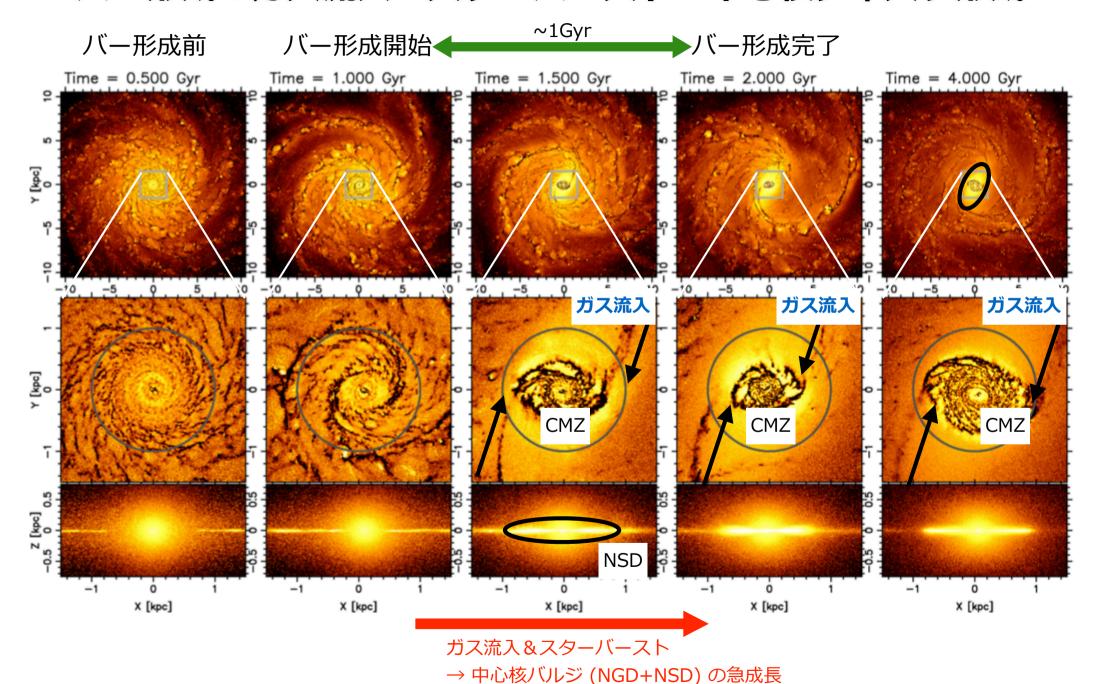


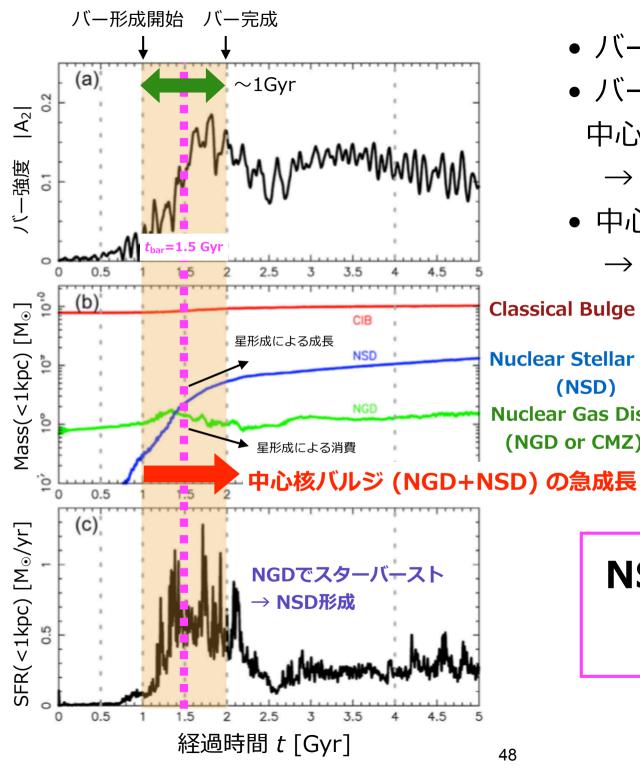
✓ Resolutions

- 10 pc softening
- 5.7million stars + 4.5million SPH



バー形成:ガス流入→スターバースト→中心核ディスク形成





- バー形成時間 <~ 1 Gyr
- バー形成開始と同時にガスが 中心領域に流入
 - → NGD (CMZ) 形成
- 中心領域でスターバースト
 - → NSD形成

Classical Bulge

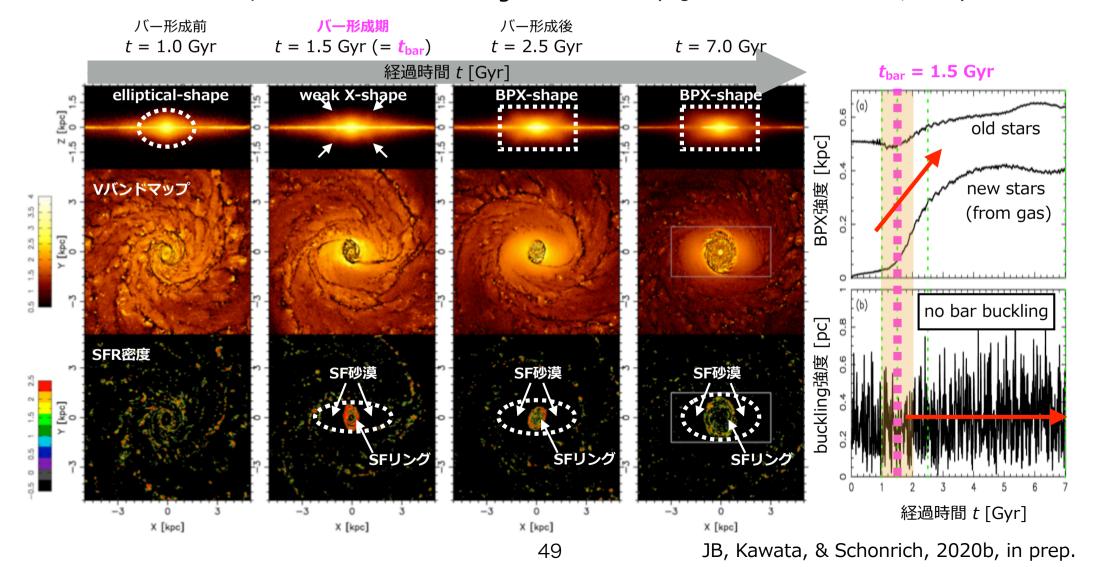
Nuclear Stellar Disk (NSD)

Nuclear Gas Disk (NGD or CMZ)

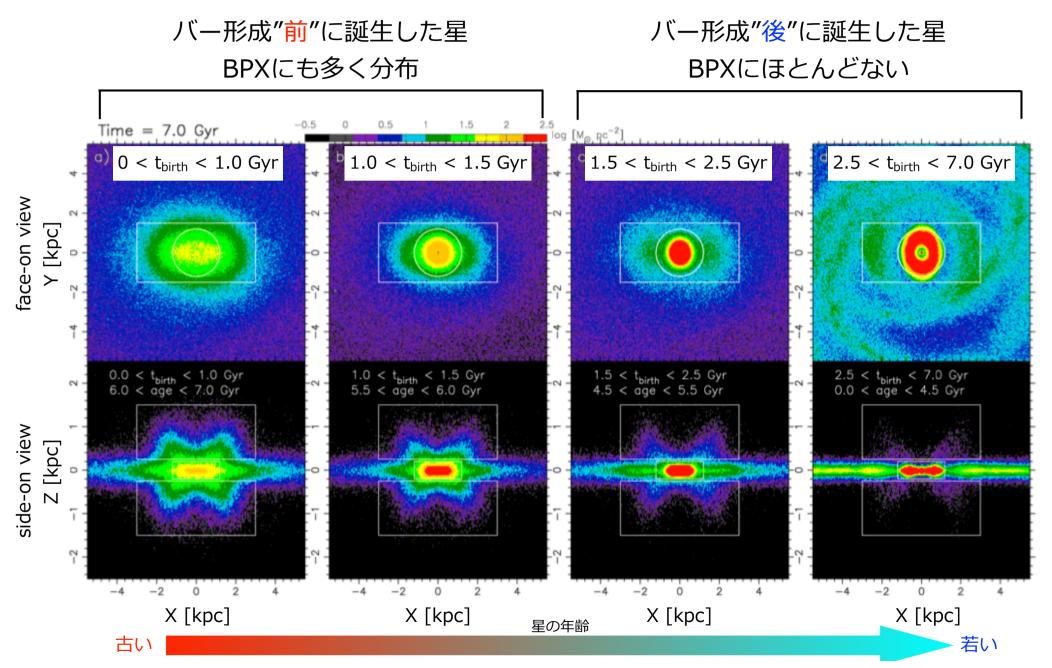
NSD星のピーク時期 ≒バー形成時期

バー形成 (t ~ 1.5 Gyr) 直後からBPXバルジが出現

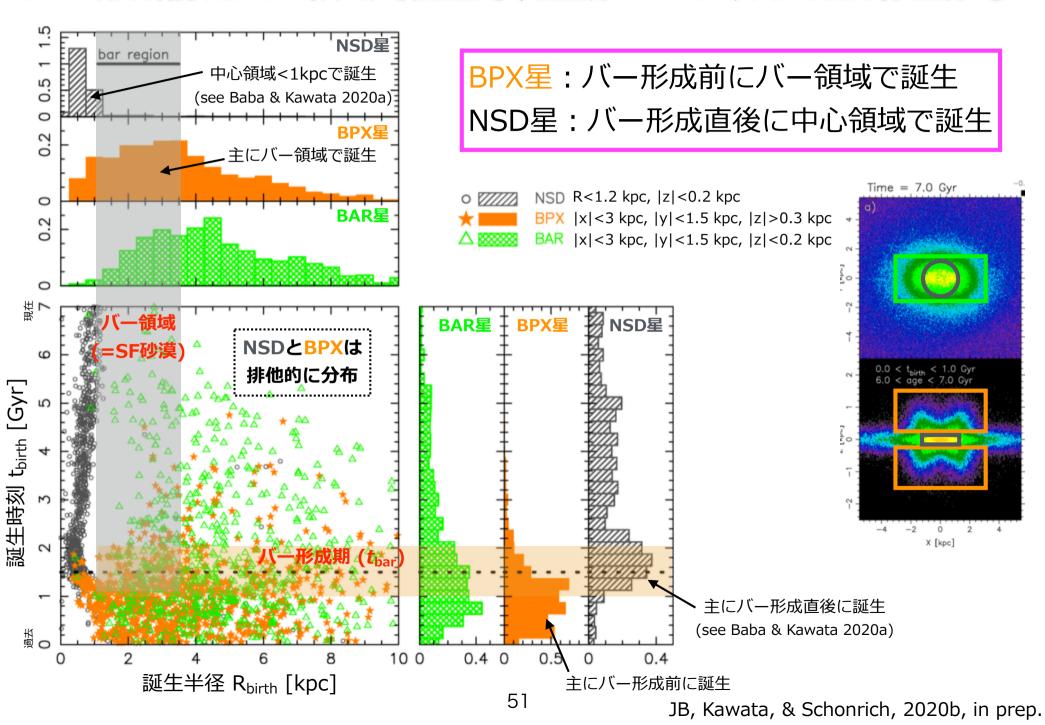
- バー形成"直後"にbar bucklingを経ずにBPXバルジができた ← 早い!
- 鉛直方向の軌道共鳴で跳ね上がっている (e.g. Combes et al. 1990; Quillen 2002; Quillen et al. 2014)
- 通常、bar bucklingでBPXバルジ形成はバー形成から~2-3Gyr後 (e.g. Debattista et al. 2006)
- 先行研究でもN体/ガス系ではbar bucklingが起こらない (e.g. Berentzen et al. 1998, 2007)



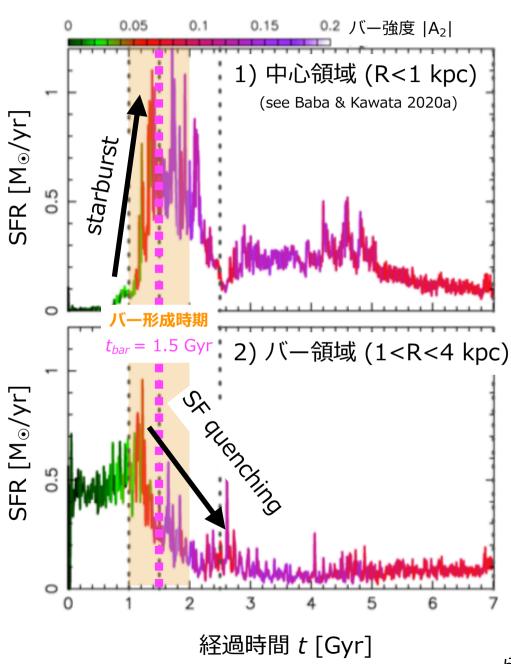
バー形成前に誕生した星が選択的にBPXバルジに分布



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

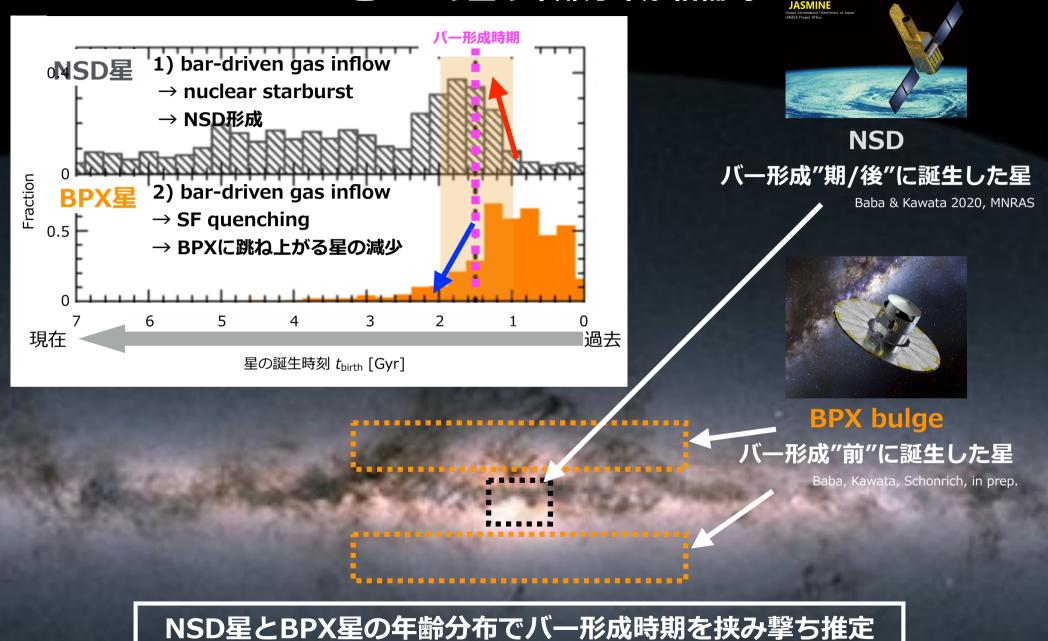


バー領域のガスを中心に落とす



- 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

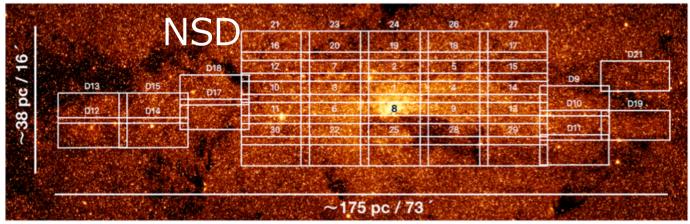
バー形成によるガス分布・星形成活動の変化で NSDとBPXの星の年齢分布が相補的



GALACTICNUCLEUS survey: high-res JHKs imaging

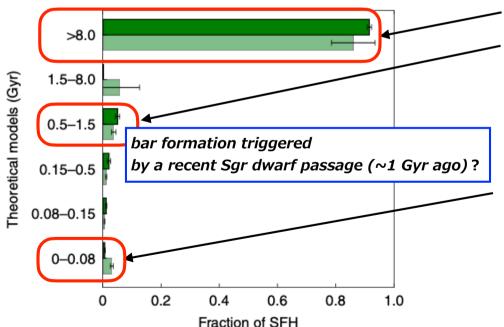
over-plotted on a Spitzer/IRAC 3.6um

Nogueras-Lara et al. 2020, NatAs, 4, 377



photometric distance remove "foreground" disk stars w/o kinematics

SFH of the NSD derived from stellar models



- 1. bulk of its stars formed at least 8 Gyr ago.
- 2. after a long period of quiescence, a starburst event followed about 1 Gyr ago that formed roughly 5% of its mass within ~100 Myr, in what may arguably have been one of the most energetic events in the history of the Milky Way.
- 3. star formation continued subsequently on a lower level, creating a few per cent of the stellar mass in the past ~500 Myr, with an increased rate up to ~30 Myr ago. (see also Matsunaga et al. 2009, Nature)

our Galaxy's bar may not have existed until recently, or that gas transport through the bar was extremely inefficient during a long stretch of the Milky Way's life.

NSDピーク検出:シミュレーションの模擬観測

NSD星年齢分布ピーク ≒ バー形成時期 → NSD年齢分布ピークを検出したい

Contaminationが課題

3パターンのMockデータ 緑: NSD星

赤:CIB星

- background classical bulge (CIB) stars
- (foreground disk stars)
 - → シミュレーション結果を模擬観測 (終状態 t = 5 Gyrで模擬観測)
- Mockデータ生成(3パターン)

1. Mock-Spatial

空間分布のみで星粒子を選出 |/| < 5 deg, |b| < 0.3 deg, 7 < d < 9 kpc

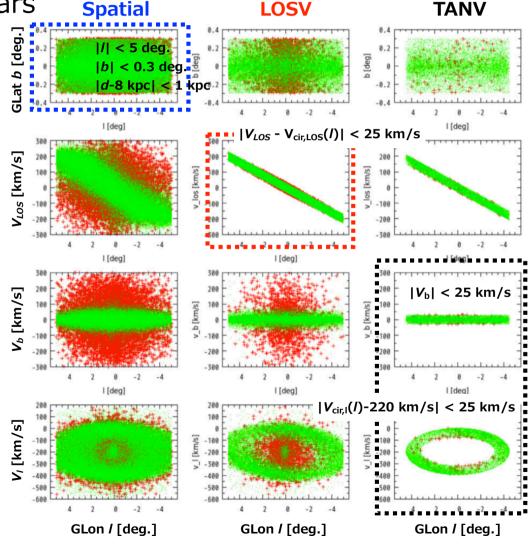
2. Mock-LOSV

空間分布 & **視線速度** (分光観測) で星粒子を選出 $|V_{LOS} - V_{cir,LOS}| < 25 \text{ km/s}$

3. Mock-TANV

空間分布&視線速度&**接線速度** (位置天文観測) で 星粒子を選出

 $|V_{\rm b}|$ < 25 km/s, $|V_{\rm cir,l}(I)$ -220 km/s| < 25 km/s

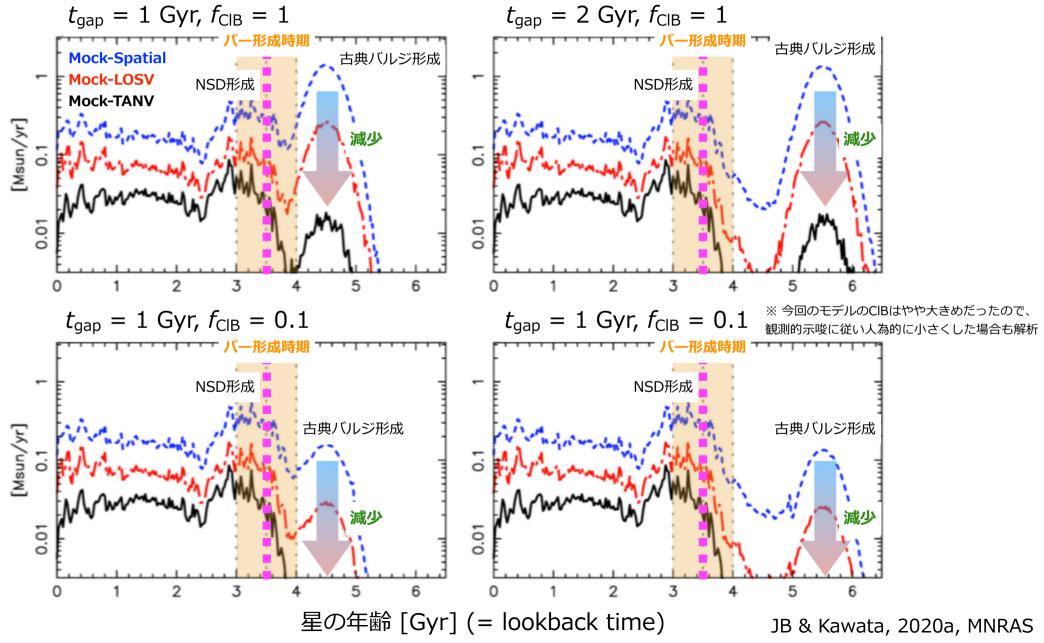


55

接線速度情報 (位置天文観測) があると古典バルジ (hot成分) とNSD (cool成分) を分離できる

 $t_{qap}:$ バー形成と古典バルジ形成時期の差

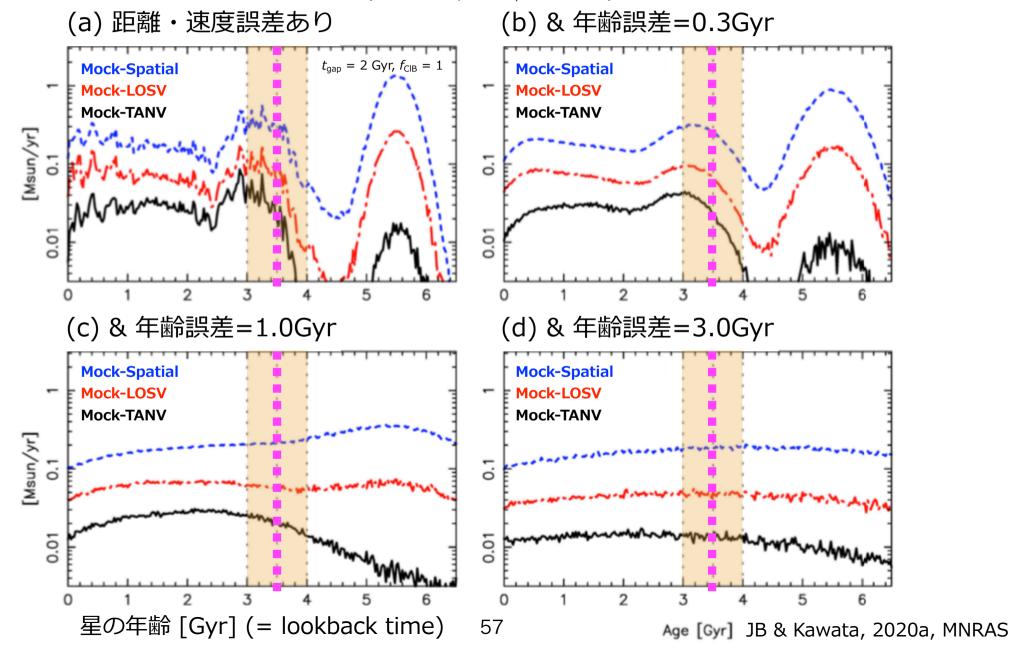
f_{CIB}: 古典バルジ (CIB) 質量割合 (シミュレーション値で規格化)



小型JASMINE精度で分離可能

星年齢精度が課題 → 変光星や星震学による年齢推定の進展に期待

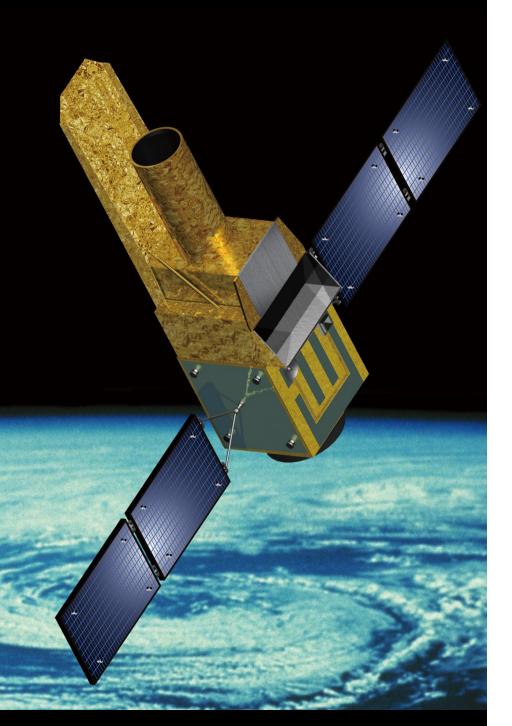
仮定:小型JASMINE精度相当 ($\delta d \sim 1.6$ kpc, $\delta v_{l,b} \sim 1$ km/s)



5. 赤外線位置天文観測衛星

JASMINE

National Astronomical Observatory of Japan JASMINE Project Office



58

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
- ∨ 赤外線波長で観測(1.1 1.7 ミクロンの近赤外線波長 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25µ秒角精度で測定
 - 年周視差<25µas&固有運動<25µas/yr forHw <12.5mag 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<125µas/yr for12.5<Hw <15mag. 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x16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

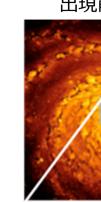
天の川銀河の種が誕生

バー構造の出現

インフレーション ビッグバン

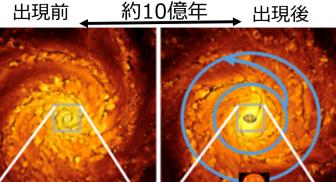
約30億年

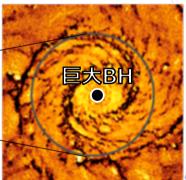
原始銀河の |階層的合体成長



古典的

バルジ







銀河中心考古学イベント①

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?

銀河中心考古学イベント②

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)

天の川銀河全体への影響

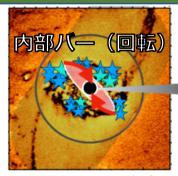
太陽系が内部から外側に大きく移動を開始(!?)

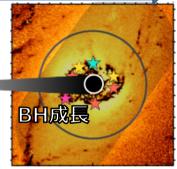
気候変動? 生命進化? 人類誕生?



→ 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③

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。



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<~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)としています。

銀河中心考古学の目標精度は、Hw<12.5 mag の天体で25 μasの年周視差精度、Hw<15 mag の天体で125 μas/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ー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、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。





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

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!

> JASMINE Consortium

> > Aims WGs Join Mtg サイト右端の 「Join」をクリ

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ての準備 (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
- 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 objets,
 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)

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す。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です。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。

JC Meeting 2020

日 時:2020年11月24日/25日 午後1時頃~5時頃

場 所:オンライン(接続先情報は参加登録者向けに連絡)

趣 旨:

JAXA宇宙科学研究所の公募型小型計画3号機に選定された「JASMINE」は、以下の3つの科学目標を達成するために準備を進めています。

- 赤外線による超高精度位置天文観測により、距離2万6千光年に 位置する星の距離と運動を測定し、天の川銀河の中心核構造と 形成史を明らかにする。
- 太陽系や惑星をもつ星の移動を引き起こす原因となる銀河構造 の進化の過程を明らかにし、人類誕生にも関わる天の川銀河全 体の形成史を探求する。
- 赤外線位置天文観測で達成される高精度な測光能力を活かした時間軸天文観測により、生命居住可能領域にある地球に似た惑星を探査する。

特に、JASMINEが行う銀河中心領域の赤外線高精度位置天文観測は、先日発表された2020年ノーベル物理学賞の銀河中心巨大ブラックホールの発見につながった星の動きの観測であり、また、系外惑星探査は2019年ノーベル物理学賞のテーマでもあり、JASMINEは、2つのノーベル賞級のサイエンステーマをカバーすると言えます。また、最近の Gaia 衛星の成果に代表されるように、位置天文観測データは、新たな次元のデータを提供するものであり、上記の主目標以外にもJASMINEの位置天文観測データを多くのサイエンスにも応用できるはずです。また、JASMINEが提供する時間軸天文観測も、系外惑星だけでなく、マイクロレンジングなどへの応用が可能です。

[tennet:19168]参照

参加登録締め切り:11/23 (月)

JASMINEプロジェクトの進捗報告

全体概要と進捗報告(郷田 直輝)

衛星システム (片坐 宏一)

国産センサーの宇宙用化(鹿野良平)

データ解析とソフト開発・WG-Aの活動報告(山田 良透)

観測データの詳細(矢野太平)

White Paperサイエンスケースの紹介

河原 創 (東京大学) exo-JASMINE (exoplanets)

馬場 淳一(国立天文台) Nuclear Stellar Disc

松永 典之 (東京大学) Variable Stars

西山 正吾 (宮城教育大学) Galactic centre / Star Clusters

藤井 通子 (東京大学) IMBH (Intermediate Mass BH)

服部 公平 (統計数理研究所) Hyper Velocity Stars

川中 宣太 (京都大学) BH binaries

浅田 秀樹 (弘前大学) Gravitational Wave

臼井 文彦 (JAXA宇宙研) small solar system body

石垣 美帆 (国立天文台) PFS Galactic archeology survey

鈴木 大介 (大阪大学) PRIME and microlensing

西 亮一(新潟大学) Star-forming regions

議論(lead by 河田大介)

今後のWGの活動体制の方針について

コミュニティからJASMINEへの要望

国内外の計画とのシナジー

日本コミュニティのGaiaNIRへの参加について

など

Summary

- ★ 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) Dynamic spiral and bar are required to migrate the Sun (Tsujimoto & Baba 2020; Baba et al. in prep.)
- ★ Gaiaによる天の川銀河研究の革新

 MW disk is not a smoothly rotating disk, but heavily perturbed!
 - e.g. Gaia-Enceludus (Helmi+2018), perturbed disk (Antoja+2018)
 - rich velocity ridges (Kawata, JB+2018)
 - disrupting Perseus arm? (Baba+2018) → Gaia DR3? (2022?)
 - stellar local arm? (Miyachi incl. JB, 2018) \rightarrow GaiaNIR conceptual mission? NIR astrometry would be required to answer the origin of the spirals.
- ★ JASMINE計画 = 中心核バルジ星の赤外線位置天文観測 銀河中心考古学 = 中心核バルジから天の川銀河の歴史を紐解く 第二イベント「バー形成」の時期を明らかに (Baba & Kawata 2020; Baba+2020b) Let's join JASMINE Consortium!