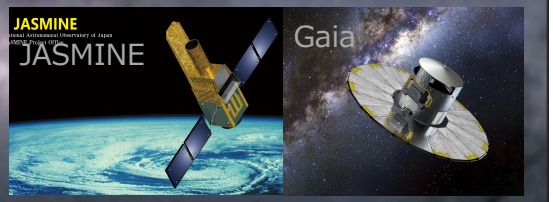
Z315r講演 (20分+4分) :

位置天文観測による
天の川銀河バルジの複合構造の理解の現状と展望



The Gaia's Sky (ESA/DPAC)

The "Simulated" Milky Way
(Baba, Saitoh et al. 2017, MNRAS, 464, 246)

1. 位置天文観測とJASMINEの概要
2. バルジの複合構造の理解の現状
3. バー形成による複合バルジの形成：理論
4. JASMINEによる検証

国立天文台CfCA
スーパーコンピュータ アテルイ/アテルイ II

馬場 淳一

国立天文台 JASMINEプロジェクト

企画セッション Z2「JASMINE」9/13 (火) ~ 14 (水)

郷田直輝 (r講演)　JASMINE計画
片坐宏一 (a講演)　JASMINEのシステム概要
山田良透 (a講演)　JASMINEのデータ解析
矢野太平 (c講演)　JASMINE の観測波長と観測データについての見直し検討
鹿野良平 (c講演)　JASMINE・カメラシステムの開発検討
鹿島伸悟 (c講演)　JASMINE 望遠鏡光学系:変遷と現在ノミナルモデル
磯部直樹 (c講演)　JASMINE衛星の運用・地上系の概念検討

JASMINEプロジェクトの進捗報告の講演スライド

スペース位置天文観測による天の川銀河研究の進展

実際の観測データに基づき天の川銀河広域の詳細な科学研究が可能な時代に

Hipparcos **(1989~1992)**

30年前

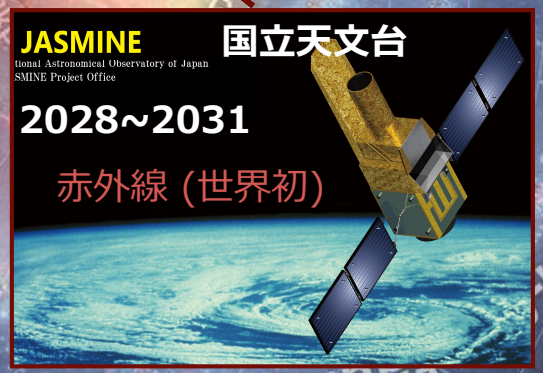
質~100倍

量~10000倍

Gaia **(2013~2025?)**

DR1 (2016/9)
DR2 (2018/4/25)
EDR3 (2020/12/3)
⊿ϖ ~ 25 μas; ⊿μ ~ 25 μas/yr
LOS vel. (RVS)
DR3 (2022/6/12) ← 今ココ
Final (TBD)

Sun

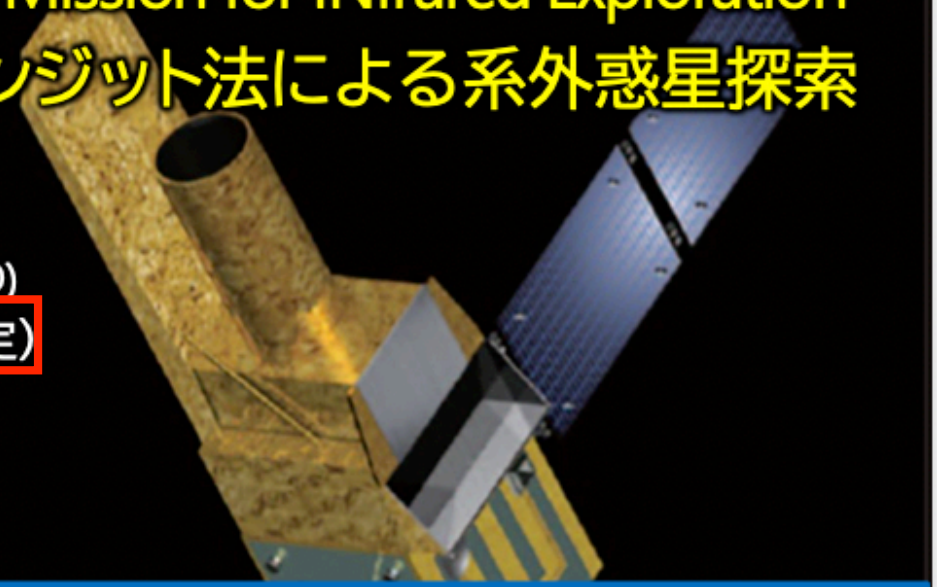


courtesy X. Luri and A. Robin
Rix & Bovy, A&ARv, 21, 61, (2013)

1.JASMINEの ミッションコンセプト

JASMINE：Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration

超高精度位置天文観測およびトランジット法による系外惑星探索



- 口径36cm程度 超高安定望遠鏡
- 国産赤外線検出器(InGaAs)
  - 観測波長：1.0-1.6μm, 2k×2k画素 ×4(TBD)
- イプシロンSロケットによる打ち上げ(2028年予定)
  (JAXA宇宙研の公募型小型計画3号機)
- 衛星重量550kg (打上げ重量・燃料込み) 程度
- 太陽同期軌道・高度550km以上, 3年間観測

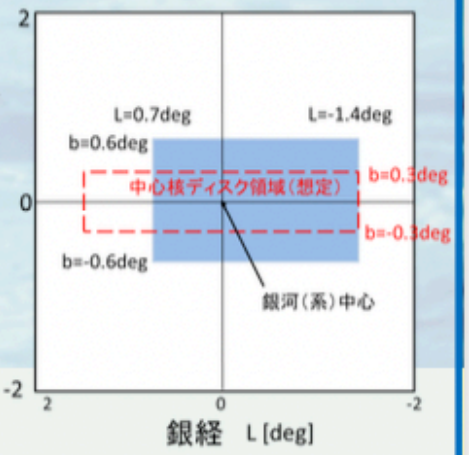
★JASMINEのアウトプットデータ

＊銀河系中心核構造方向において観測した星の天球面上の位置変動の時系列データおよびそこから導出される星の年周視差、固有運動等をカタログとして作成し、世界の研究者へ恒久的に公開する。 **銀河系中心核構造方向の領域サーベイ** (TBD) 春と秋に観測

～9.5等級<Hw(1.0～1.6μm)<～14.5等級の約10万個以上の星を10秒(TBD)に1回ダウンロード **20回程度(TBD)に1回の割合で1視野の全画面もダウンロード** ***Hw~0.9J+0.1H-0.06(J-H)^2**

年周視差精度：25マイクロ秒角～125マイクロ秒角
(25μ秒角＝＞銀河中心での距離の誤差が20%に相当)
固有運動精度：25マイクロ秒角/年～125マイクロ秒角/年
(銀河中心での接線速度の誤差が1km/s～5km/s)

矢野氏の講演(Z207c)参照



＊系外惑星探査を目的としたターゲット天体の時系列測光データを公開する
10個以上の対象天体に対して、測光精度が0.3%以内の時系列測光データ(1つの対象に対して合計観測期間が3週間以上)

JASMINE "White Paper"

To be submitted in 2022

authors: D. Kawata, H. Kawahara, N. Gouda *et al*. (JASMINE team + science community)

銀河系中心考古学（位置天文観測）

2. **Galactic Center Survey (GCS): Galactic Center Archaeology**
   - 2.1 Kinematics and History of the Nuclear Star Cluster
   - 2.2 SMBH Formation History
   - 2.3 The Nuclear Stellar Disk, Inner Bar and young star clusters
   - 2.4 Nuclear Stellar Disk: The formation epoch of the Galactic Bar and the Sun's birth radius
   - 2.5 Nuclear Stellar Disk: A Link to the high redshift progenitors
   - 2.6 Inner disk: spiral arms and Galactoseismology

系外惑星探査（高精度測光観測）

3. **Exoplanet Survey (EPS)**
   - 3.1 Transiting Planet Survey around Late-type Stars
   - 3.2 Follow-up Characterization from Space
   - 3.3 Searching for Young Planets
   - 3.4 Stellar spin-down relations from young cluster observations
   - 3.5 Photometric Variability of Brown Dwarfs
   - 3.6 NIR Photometry by JASMINE
   - 3.7 Exoplanet Microlensing
   - 3.8 Astrometric Planet Survey
4. Mission and Instrument Concept

   …

星形成領域サーベイ

5. Other Potential Science Cases X線連星 など
   - 5.1 Galactic Mid-Plane Survey (GMPS)
   - 5.2 X-ray Binaries
   - 5.3 Complementary Sciences with the GCS data
6. Synergies with the other projects

   …

JASMINE "White Paper"

To be submitted in 2022

authors: D. Kawata, H. Kawahara, N. Gouda *et al*. (JASMINE team + science community)

銀河系中心考古学（位置天文観測）

2. **Galactic Center Survey (GCS): Galactic Center Archaeology**
   - 2.1 Kinematics and History of the Nuclear Star Cluster
   - 2.2 SMBH Formation History
   - 2.3 The Nuclear Stellar Disk, **Inner Bar and young star clusters**
   - **2.4 Nuclear Stellar Disk: The formation epoch of the Galactic Bar** and **the Sun's birth radius**
   - 2.5 Nuclear Stellar Disk: A Link to the high redshift progenitors
   - 2.6 Inner disk: spiral arms and Galactoseismology

今回の馬場の講演
はここがメイン

時間があれば
この話題も少し

個人的にはここがメインだが、
話題が違うので割愛

系外惑星探査（高精度測光観測）

3. **Exoplanet Survey (EPS)**
   - 3.1 Transiting Planet Survey around Late-type Stars
   - 3.2 Follow-up Characterization from Space
   - 3.3 Searching for Young Planets
   - 3.4 Stellar spin-down relations from young cluster observations
   - 3.5 Photometric Variability of Brown Dwarfs
   - 3.6 NIR Photometry by JASMINE
   - 3.7 Exoplanet Microlensing
   - 3.8 Astrometric Planet Survey
4. Mission and Instrument Concept

…

星形成領域サーベイ
X線連星 など

5. **Other Potential Science Cases**
   - 5.1 Galactic Mid-Plane Survey (GMPS)
   - 5.2 X-ray Binaries
   - 5.3 Complementary Sciences with the GCS data
6. Synergies with the other projects

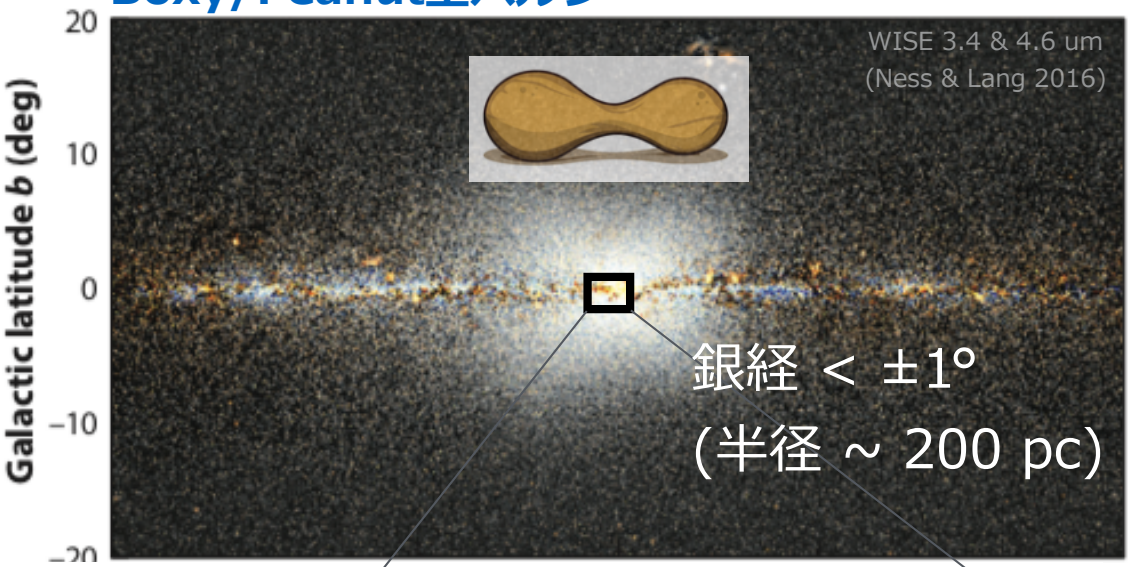
…

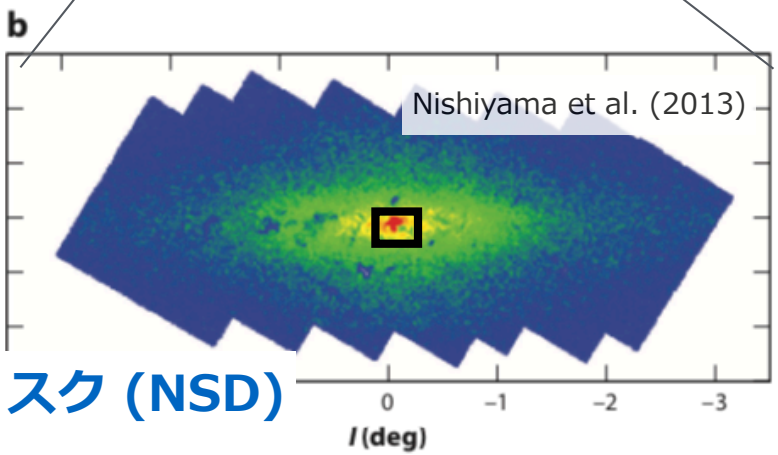
天の川銀河「バルジ」の複合構造

BPバルジ = バルジ。実質的にバーの3D構造
中心核ディスク = R<200 pcの円盤状バルジ
古典バルジ = 楕円銀河のミニチュアのバルジ
観測的には未確認（< 8%xディスク質量）

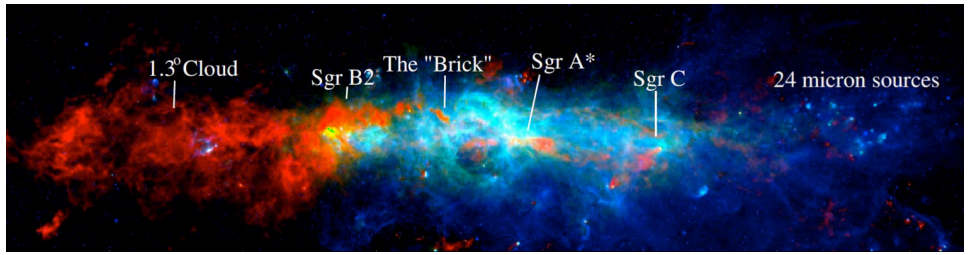
バルジ領域の種族合成モデル (Z321b 越本)

Boxy/Peanut型バルジ





午後のセッション



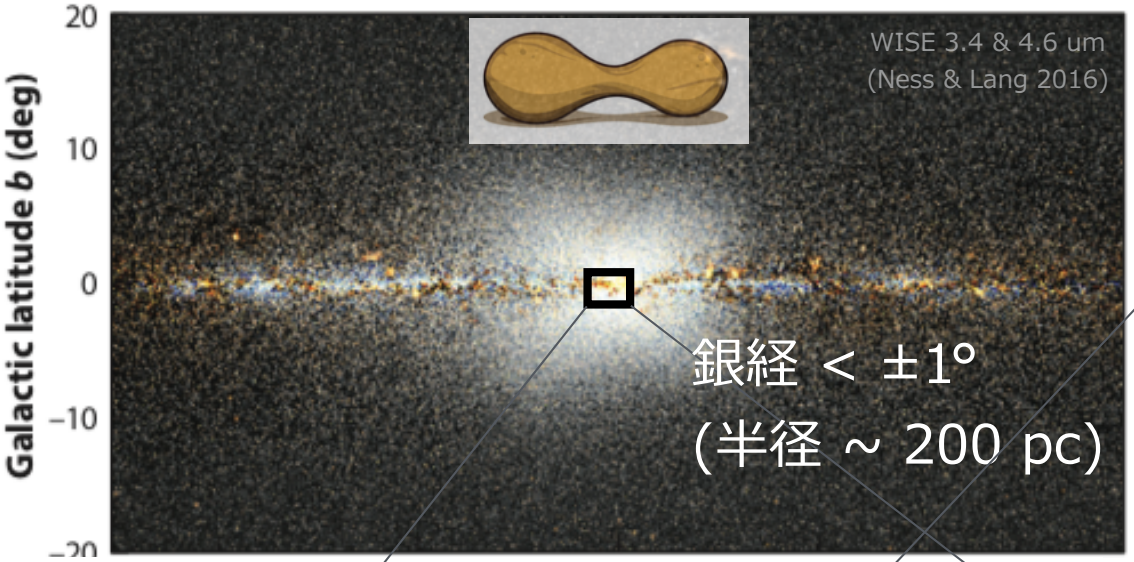
中心核ディスク (NSD)

質量～10^9 M_{sun} (e.g. Sormani et al. 2020, 2021)
半径～250 pc (Laundhardt et al. 2002)
厚さ～45 pc (Nishiyama et al. 2013)
回転運動 (Matsunaga et al. 2015; Schoenrich et al. 2015)
金属量～0.1 dex (Schultheis et al. 2021)
年齢～8 Gyr??? (e.g. Nogueral-Lara et al. 2020, 2021)

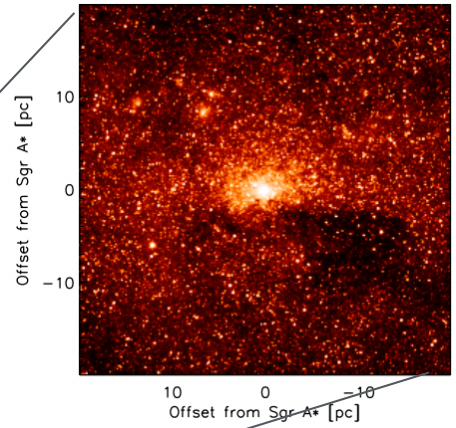
中心分子雲帯 (CMZ)

質量～4×10^7 M_{sun} (e.g. Ferriere et al. 2007)
半径～300 pc (Morrison & Serabyn 1996)
SFR～0.07 M_{sun}/yr (Henshaw et al. arXiv:2203.11223)
降着率～0.8 M_{sun}/yr (Hatchfield et al. 2021)

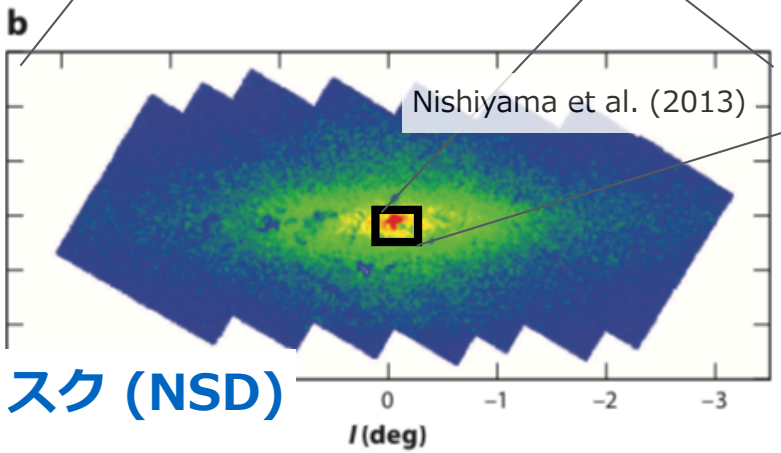
中心核星団 (Nuclear Star Cluster; NSC) ~ 5 pc



中心核星団 (NSC)



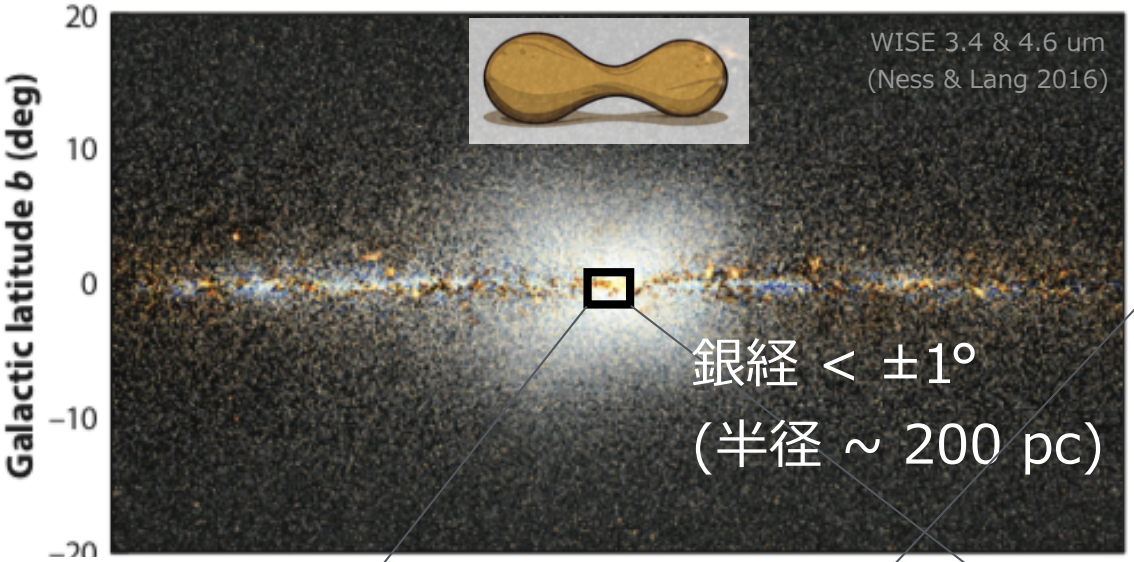
質量～$1.8 \times 10^7 M_{sun}$
(Chatzopoulos et al. 2015)
半径～4.2 pc
(Schodel et al. 2014)

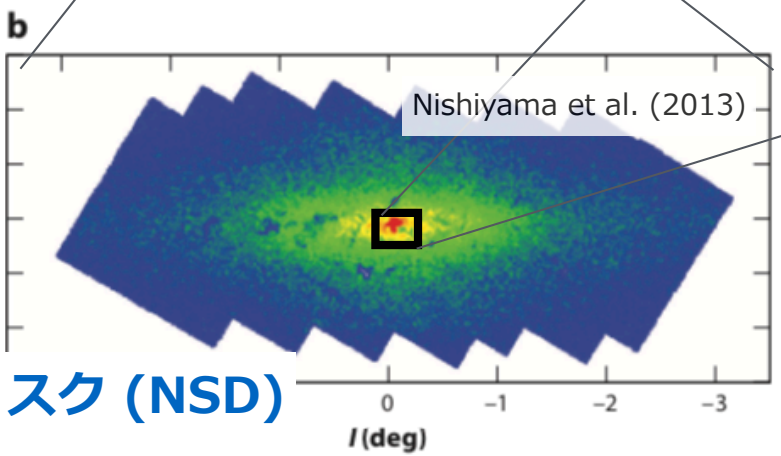


中心核ディスク (NSD)

質量～10^9 M_{sun} (e.g. Sormani et al. 2020, 2021)
半径～250 pc (Laundhardt et al. 2002)
厚さ～45 pc (Nishiyama et al. 2013)
回転運動 (Matsunaga et al. 2015; Schoenrich et al. 2015)
金属量～0.1 dex (Schultheis et al. 2021)
年齢～8 Gyr??? (e.g. Nogueral-Lara et al. 2020, 2021)

Sgr A*周辺 < 5 pc

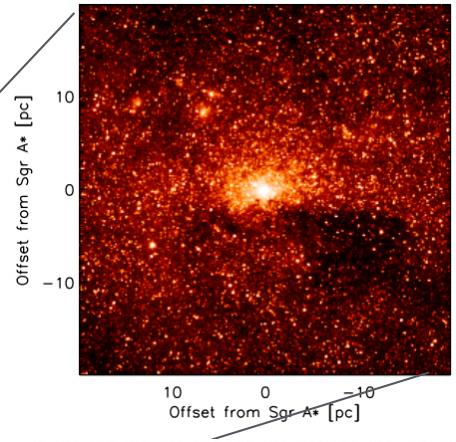




中心核ディスク (NSD)

質量～10^9 M_{sun} (e.g. Sormani et al. 2020, 2021)
半径～250 pc (Laundhardt et al. 2002)
厚さ～45 pc (Nishiyama et al. 2013)
回転運動 (Matsunaga et al. 2015; Schoenrich et al. 2015)
金属量～0.1 dex (Schultheis et al. 2021)
年齢～8 Gyr??? (e.g. Nogueral-Lara et al. 2020, 2021)

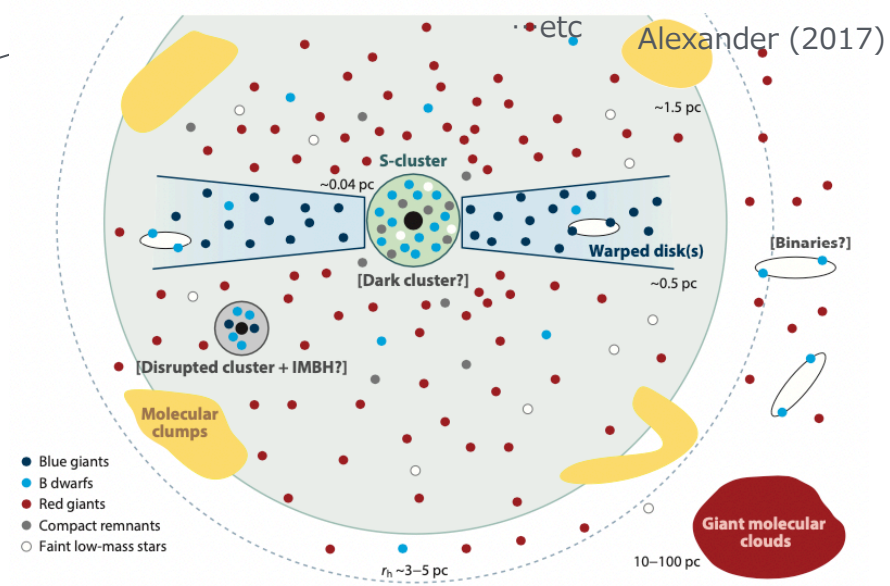
中心核星団 (NSC)



質量～$1.8 \times 10^7 M_{sun}$
(Chatzopoulos et al. 2015)
半径～4.2 pc
(Schodel et al. 2014)

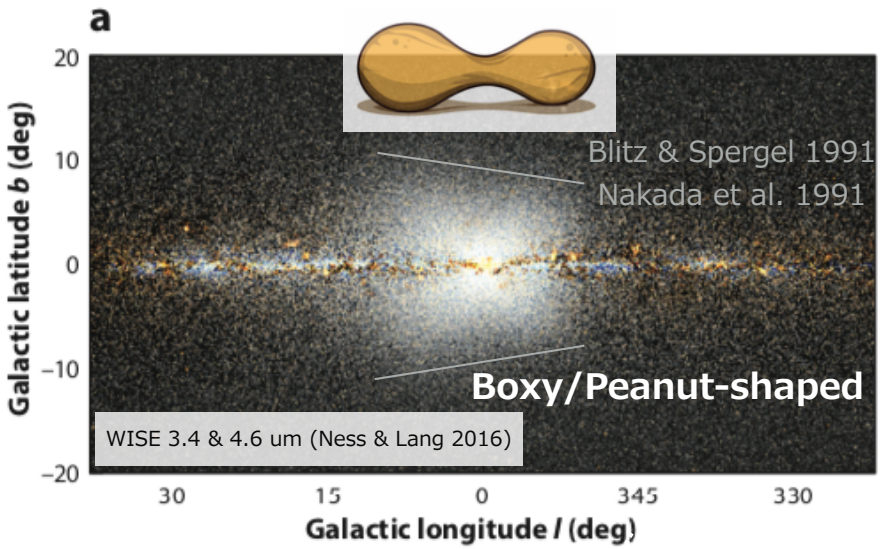
銀河系中心

R<5 pc
Sgr A* (SMBH)
Circum Nuclear Disk (CND)
・・etc



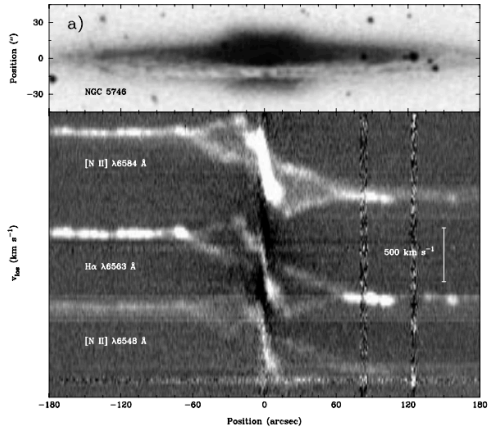
Sgr A*周辺の恒星系力学の理論 (Z317a 船渡; Z320b 堀口)
Sgr A*周辺の星の運動の観測 (Z318a 鈴木竜二; Z319b 西山)

3D Structure of the Galactic “Bulge”

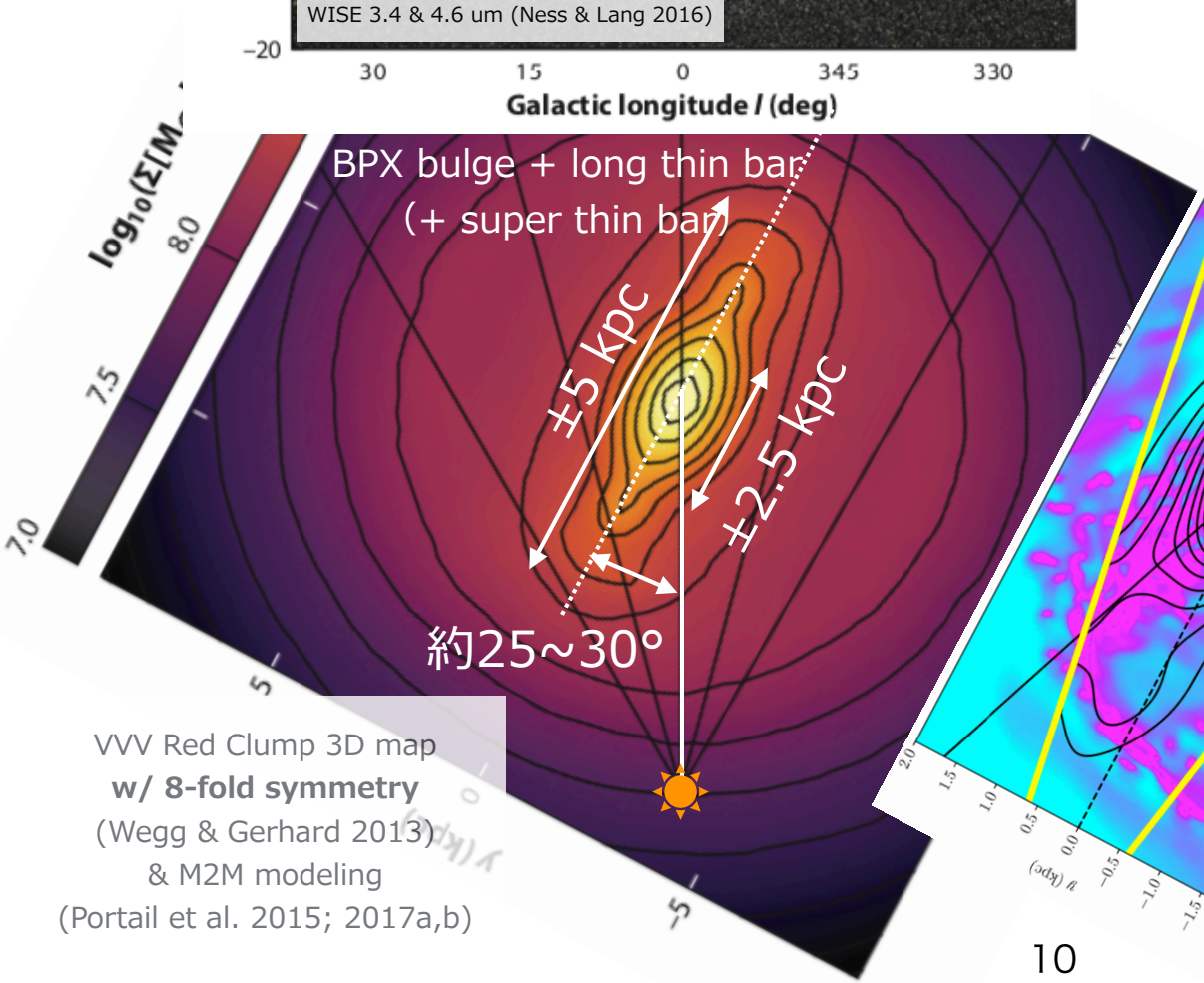


Boxy/Peanut型バルジ
= バー構造（の一部）が膨らんだ力学構造

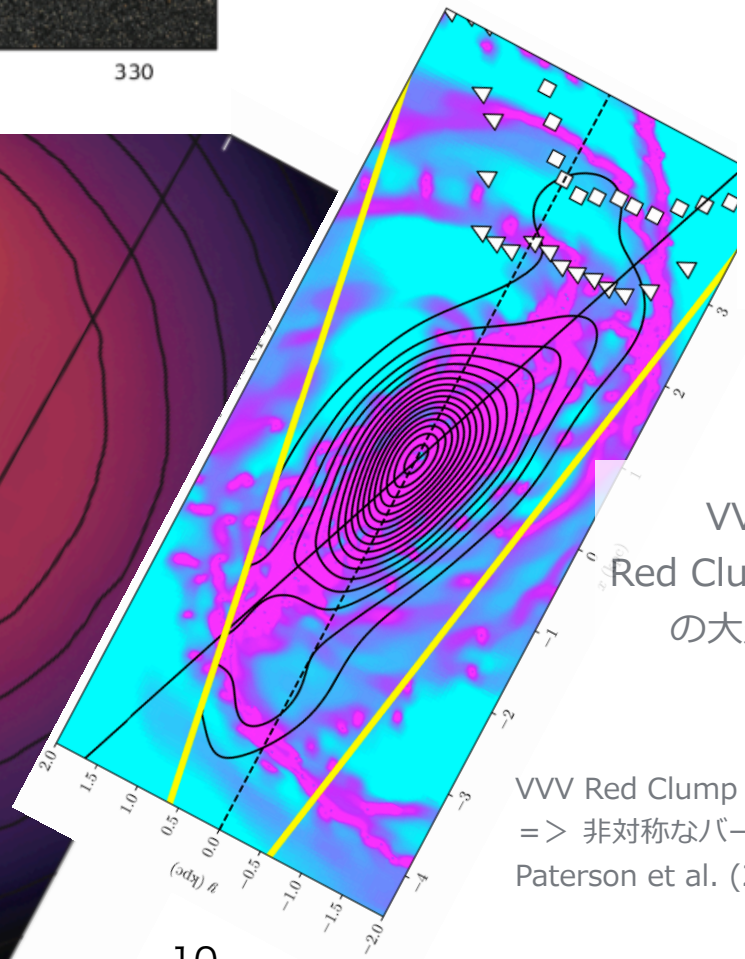
e.g. Combes & Sanders (1981); Bureau & Freeman (1999)



NGC5746



VVV Red Clump 3D map
w/ 8-fold symmetry
(Wegg & Gerhard 2013)
& M2M modeling
(Portail et al. 2015; 2017a,b)



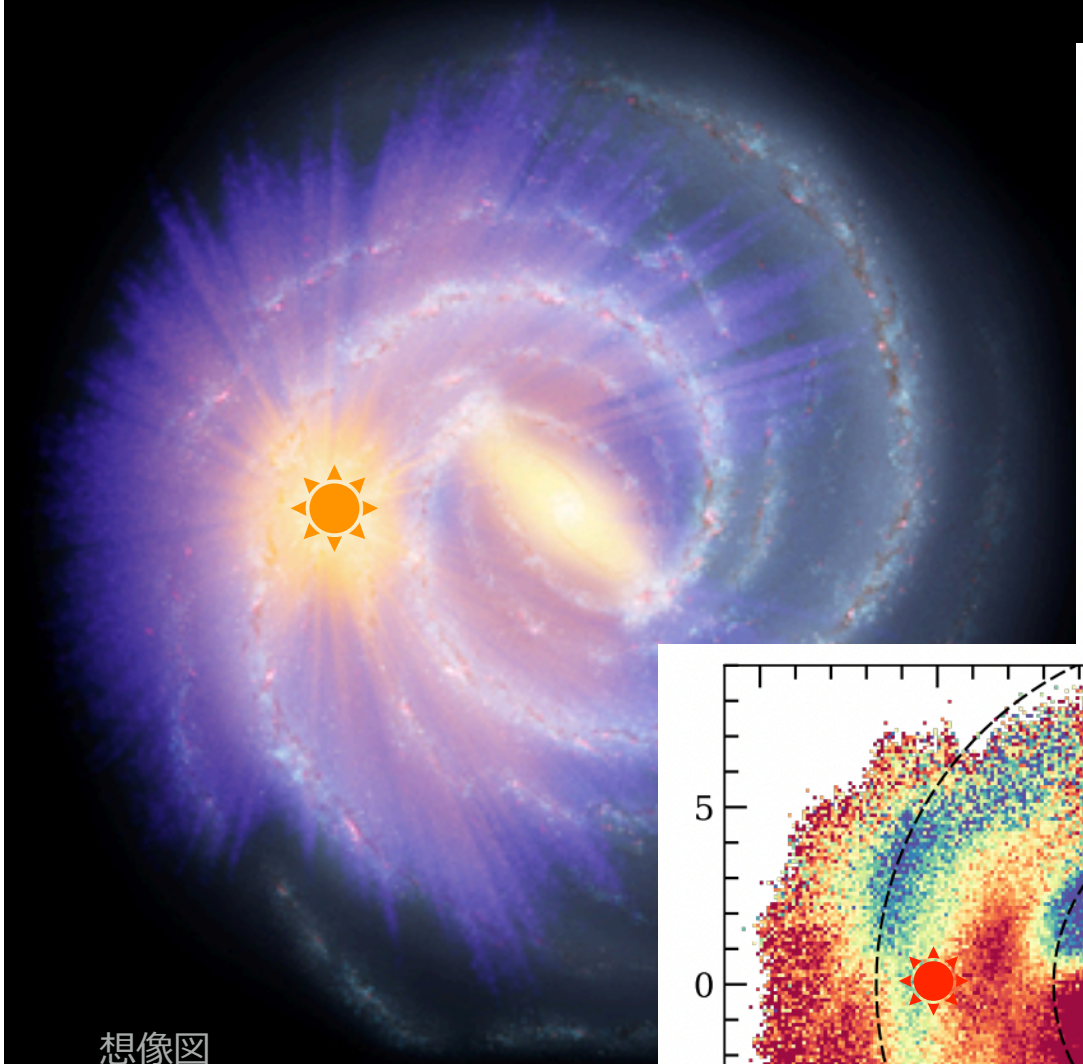
VVVサーベイなどによる
Red Clump星 (=Standard candle)
の大規模な高精度測光データ

VVV Red Clump 3D map **w/o any symmetry**
=> 非対称なバー構造 (=> 奇数モードの共鳴)
Paterson et al. (2020); Coleman et al. (2020)

天の川銀河は「棒状」渦巻銀河である

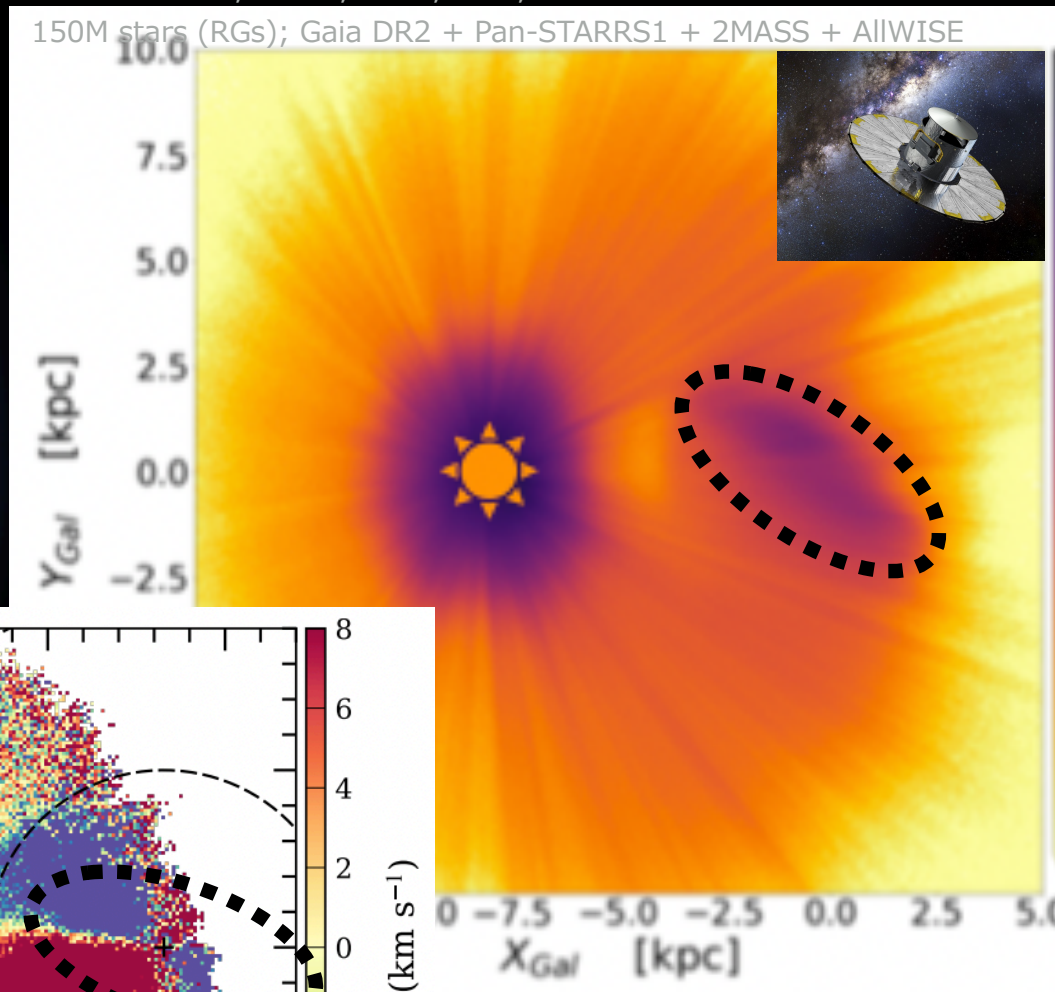
Anders et al., 2019, A&A, 628, A94

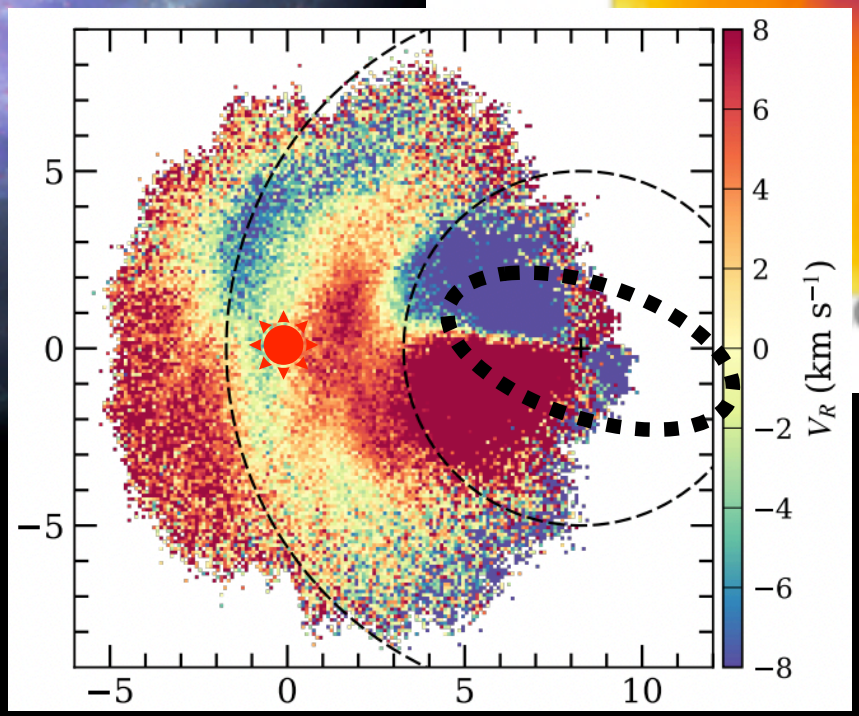
150M stars (RGs); Gaia DR2 + Pan-STARRS1 + 2MASS + AllWISE



想像図

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



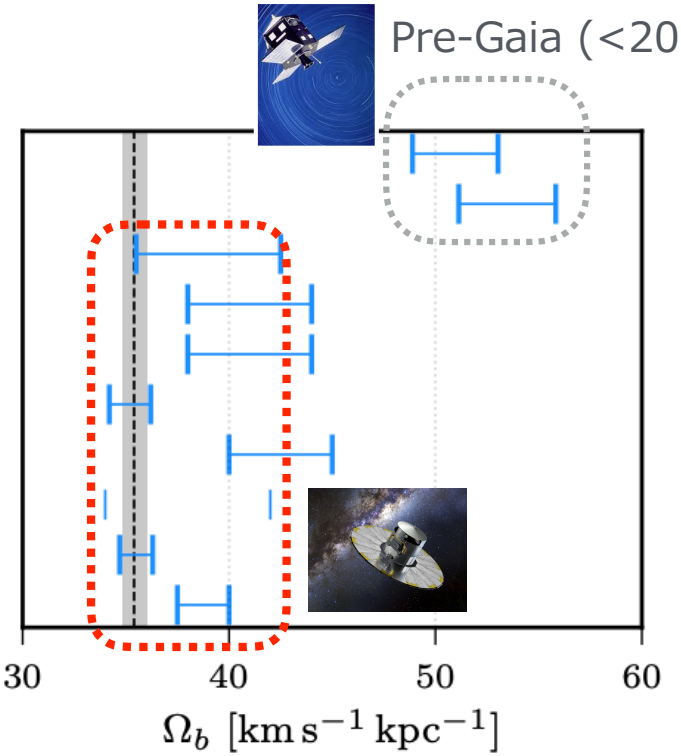


a remarkable “bisymmetric” feature on both sides of the GC, with negative and positive values on each side of the apparent bar’s major axis.

Gaia Colab., Drimmel et al., 2022, A&A (in press)

RGB stars

Kinematics of the Galactic Bar: Current Pattern Speed



Clarke & Gerhard (2022) MNRAS, 512, 2171

Dehnen (1999, 2000)
Minchev et al. 2010
Antoja et al. 2014
太陽近傍星の運動 (Lindblad共鳴)

Portail et al. 2017 ← バルジ星視線速度のM2Mモデリング

Bovy et al. 2019
Sanders et al. 2019
バルジ星のTremaine-Weinberg法

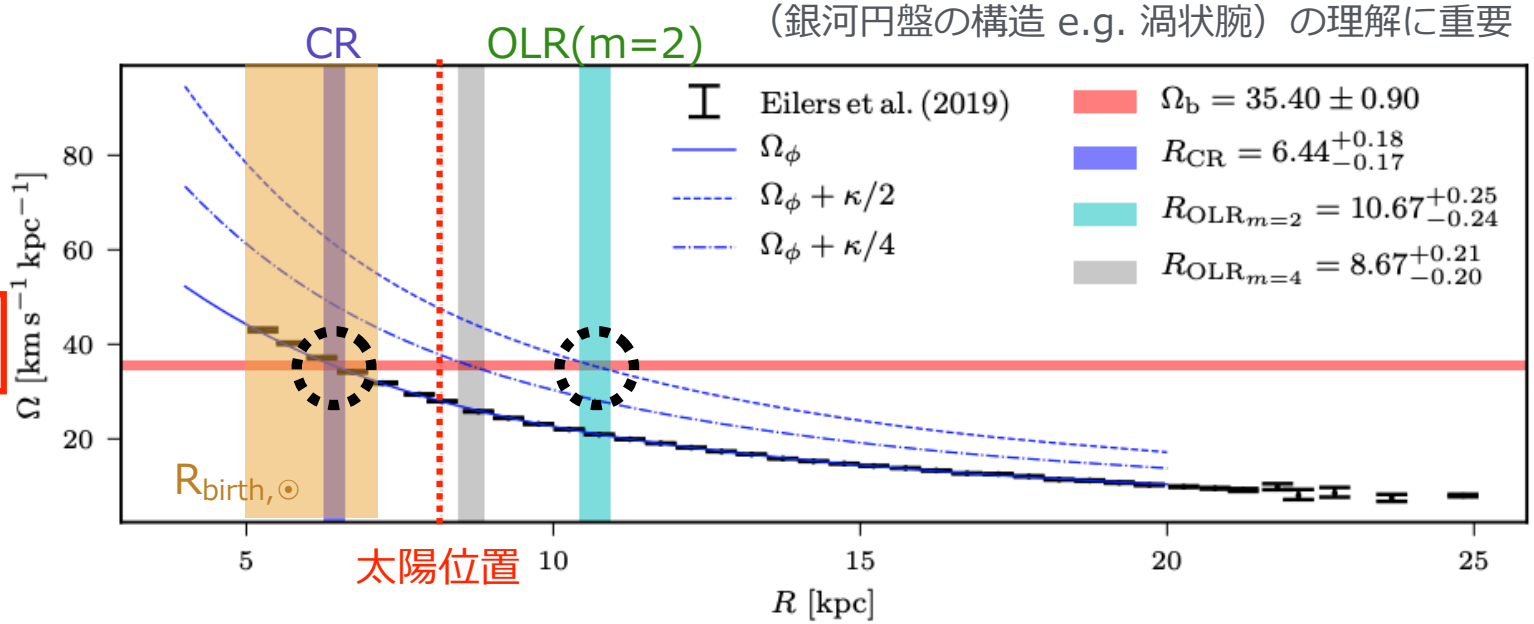
Binney 2020
Asano. Fujii. **JB** et al.2020 朝野哲郎 (東大)
Kawata, **JB** et al.2021
Chiba & Schönrich 2021 千葉凜平 (Oxford)
ディスク星の運動 (共鳴)

Li et al. 2021 ← Portail et al. 2017 (M2M) ポテンシャルでの流体計算

バーのLindblad共鳴位置はディスク星の運動（銀河円盤の構造 e.g. 渦状腕）の理解に重要

Ω_b～35 km/s/kpc

i.e. 回転周期～180 Myr



棒状構造（バー）：銀河円盤広域の力学変動に影響

ホーム

国立天文台CfCAからのWEBプレスリリース (9/9金)

スーパーコンピュータが見つけた天の川銀河の変動史を知る鍵

【概要】

国立天文台 JASMINE プロジェクトの馬場淳一 特任助教らの国際研究チームは、国立天文台の天文学専用スーパーコンピュータ「アテルイ II」※を用いたシミュレーションによって、私たちが住む天の川銀河の中心付近に存在する棒状構造の形成が引き起こした変動の歴史について、新しいシナリオを打ち出しました。棒状構造が形成後まもなく、ガスが銀河の中心領域に流れ込み、そこで爆発的な星形成が起こり、新たに「中心核バルジ」が形成される一方、棒状構造ではガスが枯渇し星形成が急停止するということが明らかになりました。このような棒状構造の形成に伴う星形成活動の領域による違いの影響は、星の年齢構成の違いとして情報が刻まれるため、位置天文観測機「Gaia（ガイア）」(注1) や 2028 年打ち上げ予定の赤外線位置天文観測衛星「JASMINE（ジャスミン）」(注2) の観測データによって棒状構造の形成時期の解明に向けた研究に役立てられます。本研究成果は、Junichi Baba et al. "Age distribution of stars in boxy/peanut/X-shaped bulges formed without bar buckling" として、2022 年 3 月に英国王立天文学会発行の Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 誌に掲載されました。（2022 年 9 月 9 日プレスリリース）

図1：スーパーコンピュータ「アテルイ II」のシミュレーションによって描き出された天の川銀河の姿。（クレジット：馬場淳一、中山弘敬、国立天文台 4 次元デジタル宇宙プロジェクト）

バーはいつ形成されたのか？
バーはどのように進化（e.g. 減速）してきたのか？
バー形成時期、減速率を観測データから得るには？
→ 数値シミュレーションで調べる

国立天文台CfCA
スーパーコンピュータ
「アテルイ II」
X
並列N体/SPH法コード**「ASURA」**
(神戸大 斎藤貴之; e.g. Saitoh et al. 2008)

動画：スーパーコンピュータ「アテルイII」のシミュレーションによって描き出された天の川銀河の棒状構造の進化の様子。映像中の「1 Gyr」は「10 億年」を表す。
（クレジット：馬場淳一、中山弘敬、国立天文台４次元デジタル宇宙プロジェクト）

可視化：中山弘敬 (4D2U)

acknowledge：CfCA広報 福士さん

現象① バー形成→ガス降着→中心核ディスクの形成

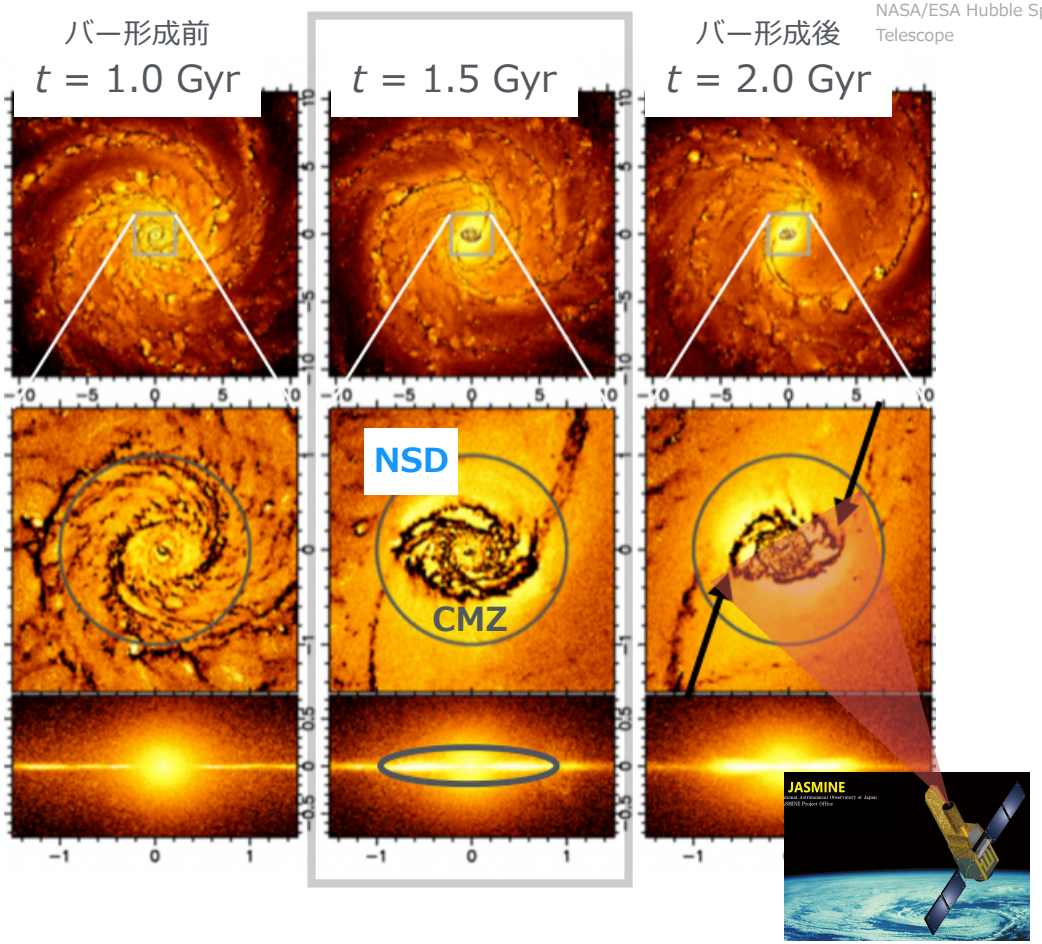
SMBHへのガス降着過程
（Z316a 松井講演）

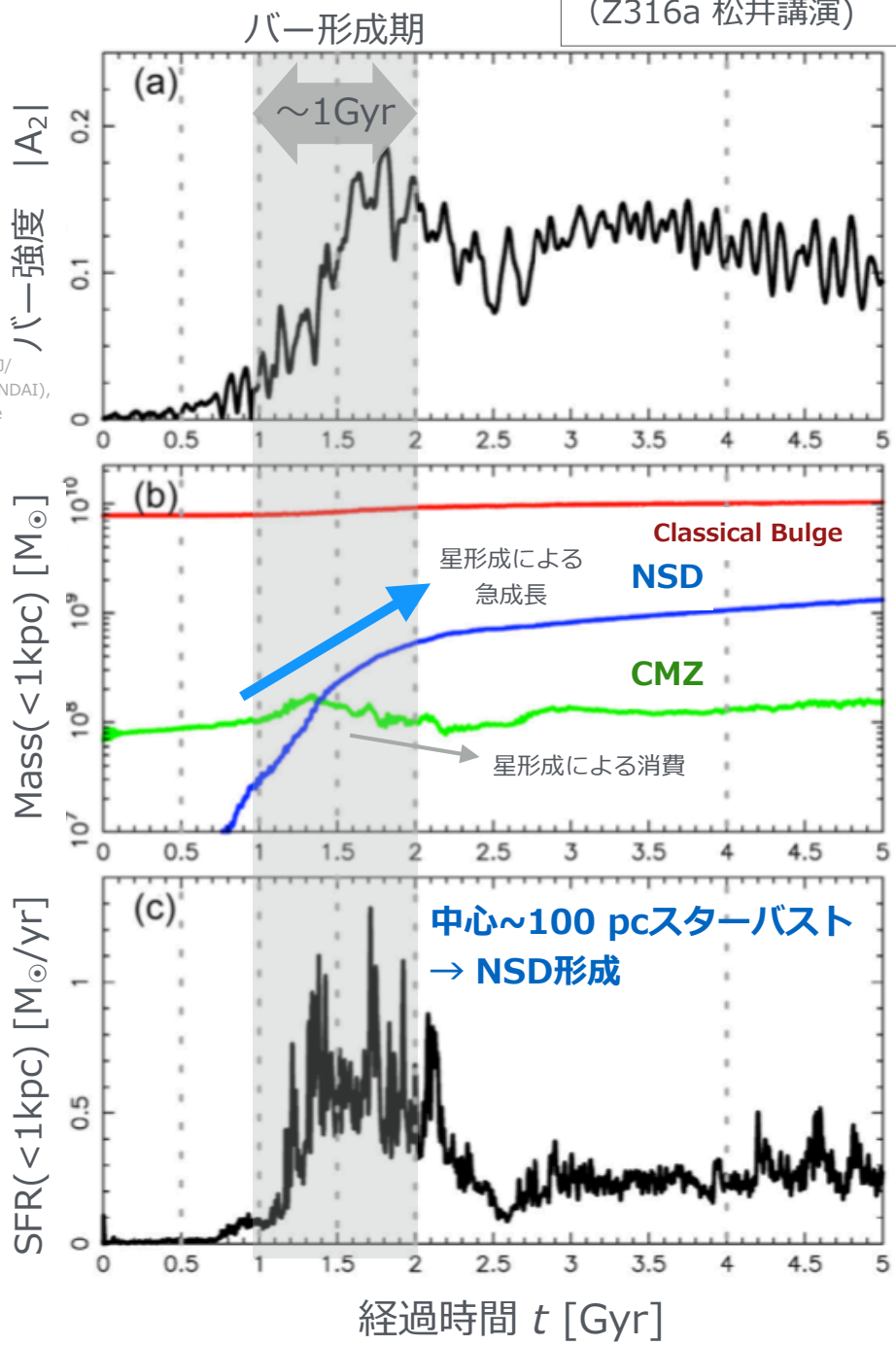
Baba & Kawata, 2020, MNRAS
see also e.g. Friedli & Benz (1993)

バー形成
→ 中心~100pcにガス流入 (CMZ形成)
→ 活発な星形成 (星形成リング)
→ 中心核ディスク形成

バー形成期に最もガス流入・星形成

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), K. Onishi (SOKENDAI), NASA/ESA Hubble Space Telescope

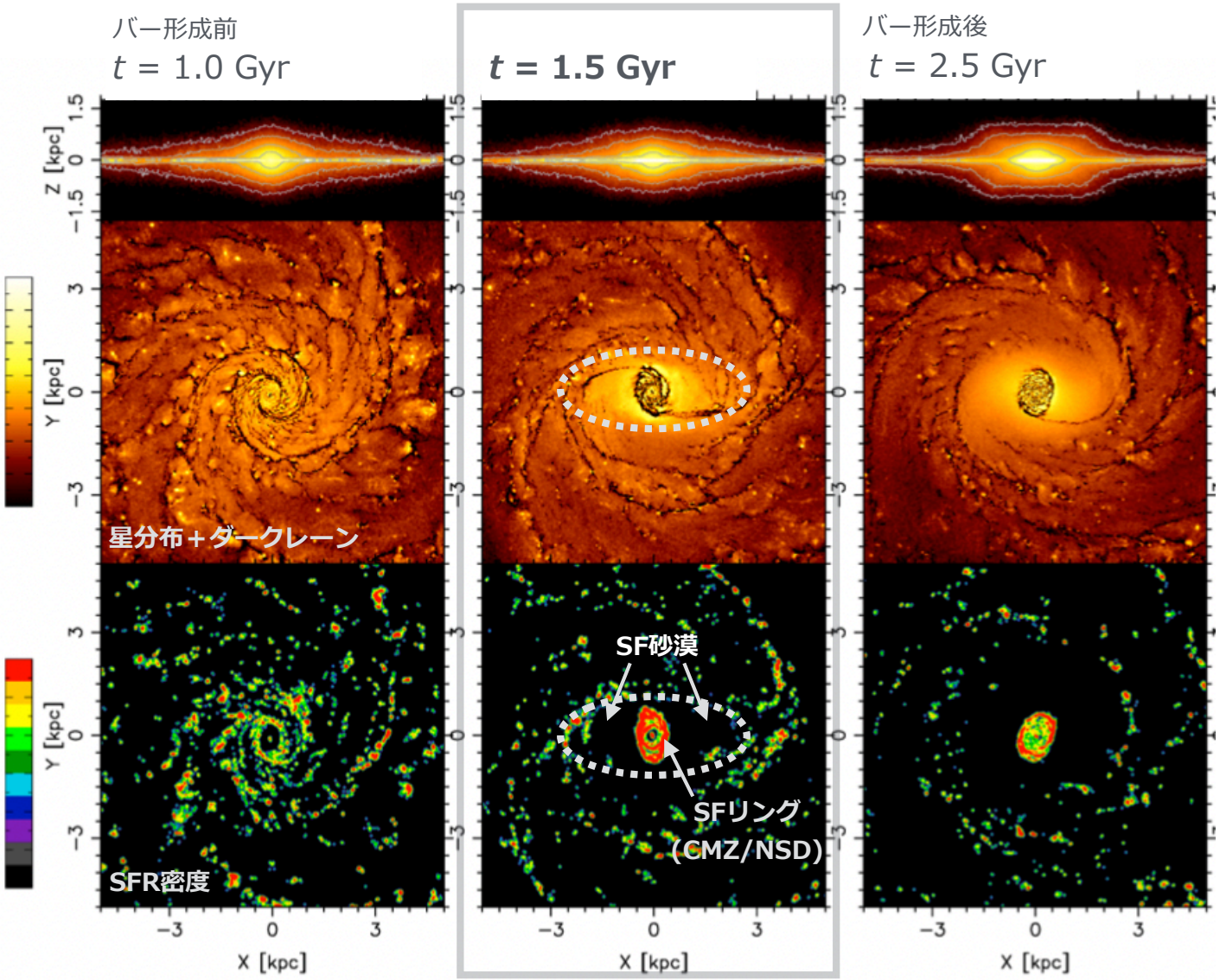




現象②：バー領域のガス枯渇によるSF停止

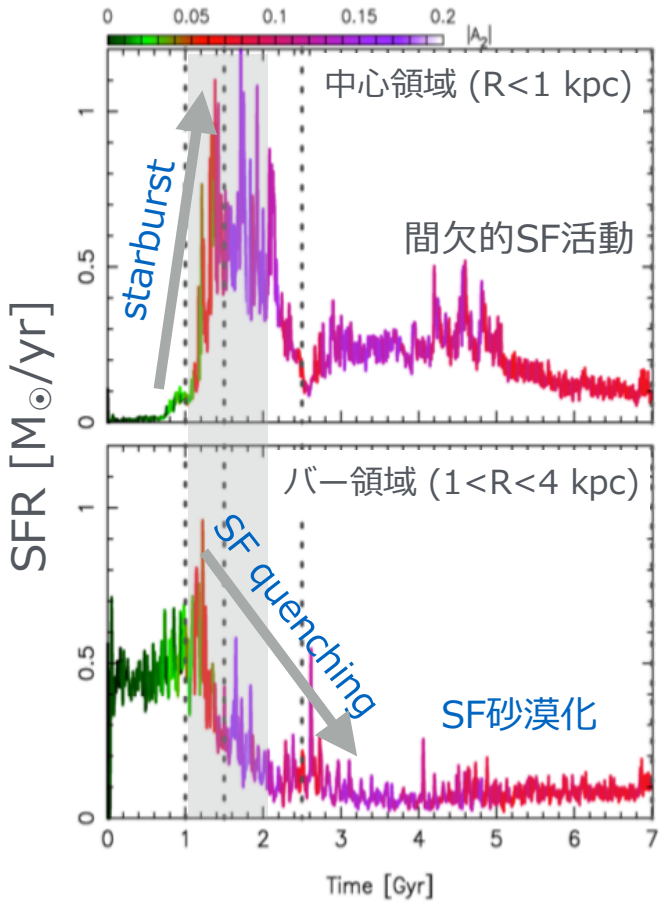
Baba, Kawata & Schoenrich (2022)

see also Martin & Friedli (1997); Donohoe-Keyes et al. (2019)



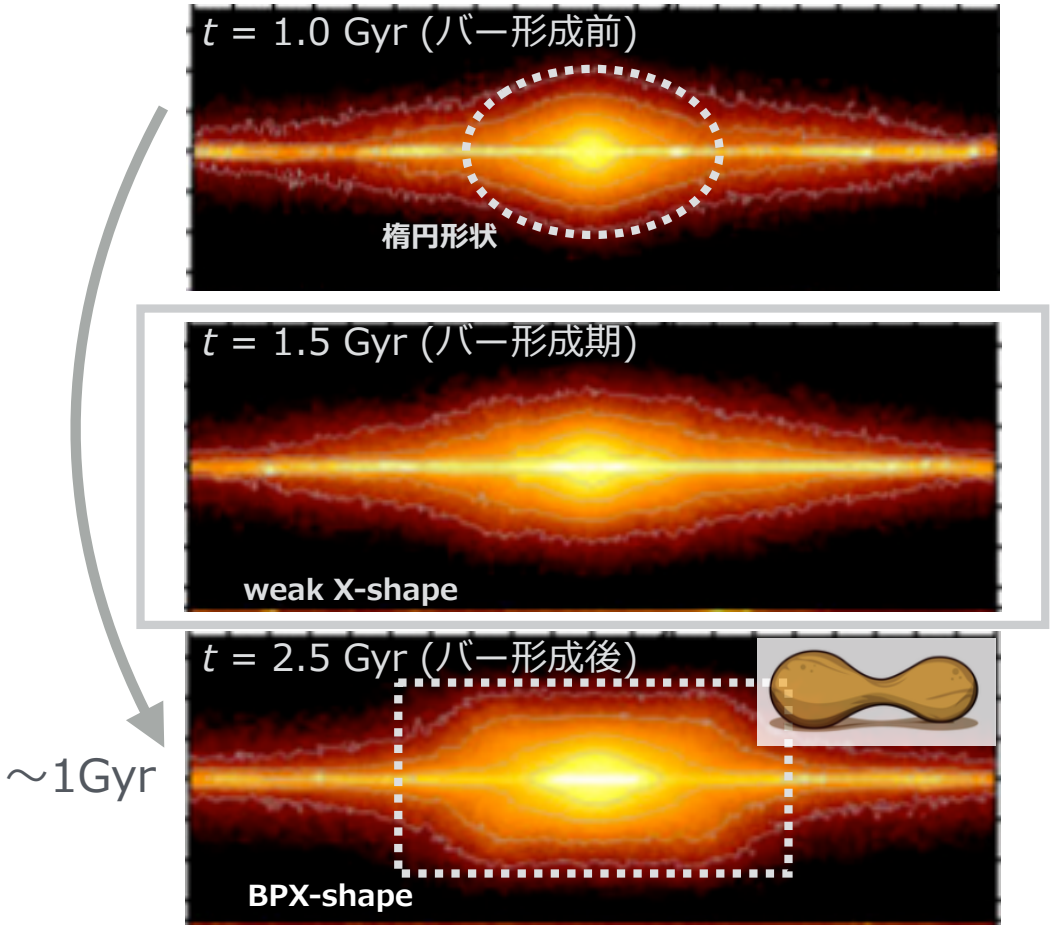
ガス分布の再分配

星形成活動領域の"**分画化**"



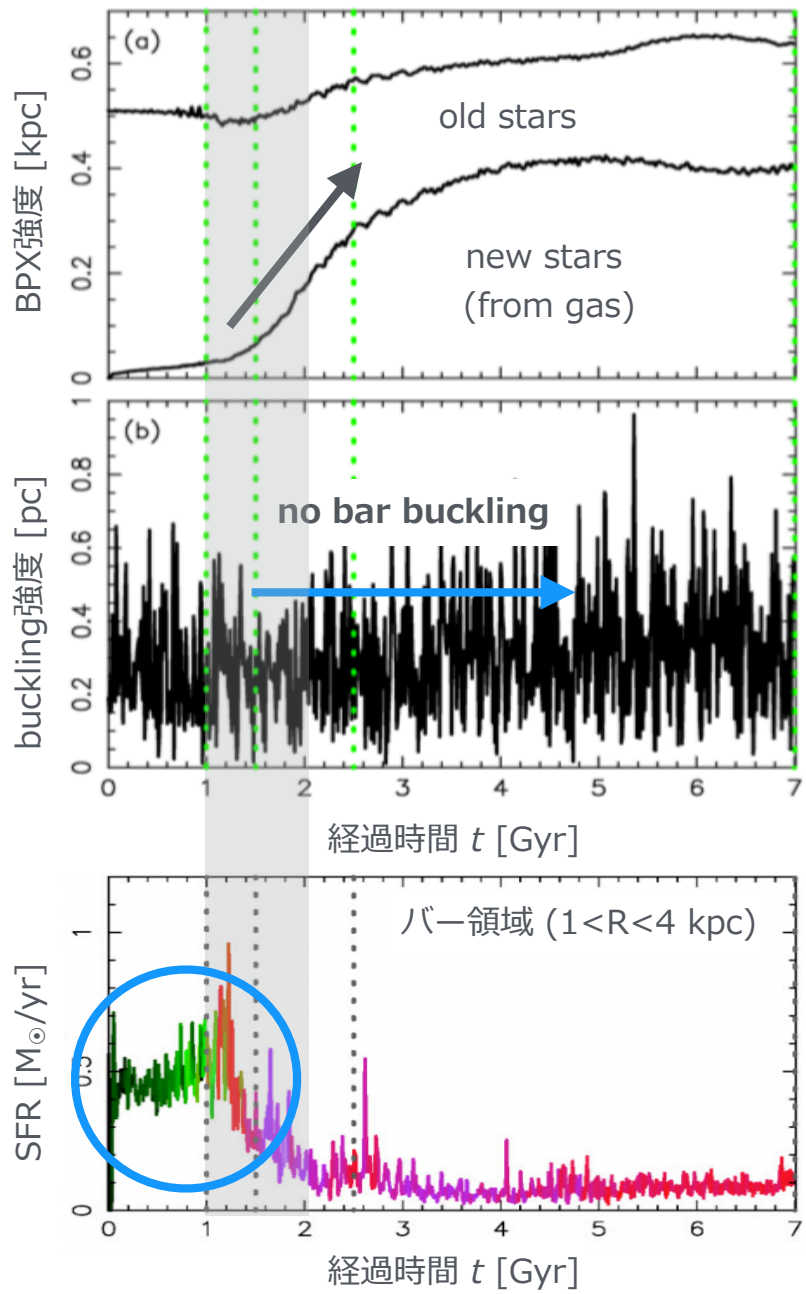
現象③：バー領域の鉛直軌道共鳴によるバルジ化

バー形成期/直後に**上下対称**にピーナッツ化



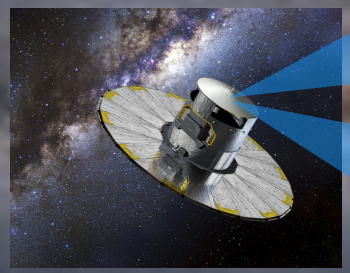
バー領域で誕生した星が
バーとの鉛直Lindblad共鳴に散乱
(vertical Inner Lindblad resonance)

Buckling を経ずにBPバルジ化



Baba, Kawata & Schoenrich (2022)

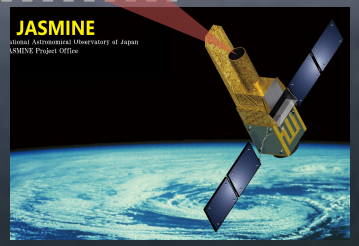
BPバルジとNSDの相補的な星の年齢頻度分布（予測）



BPX bulge

バー形成期/前に
誕生した星

Baba, Kawata, Schonrich (2022)



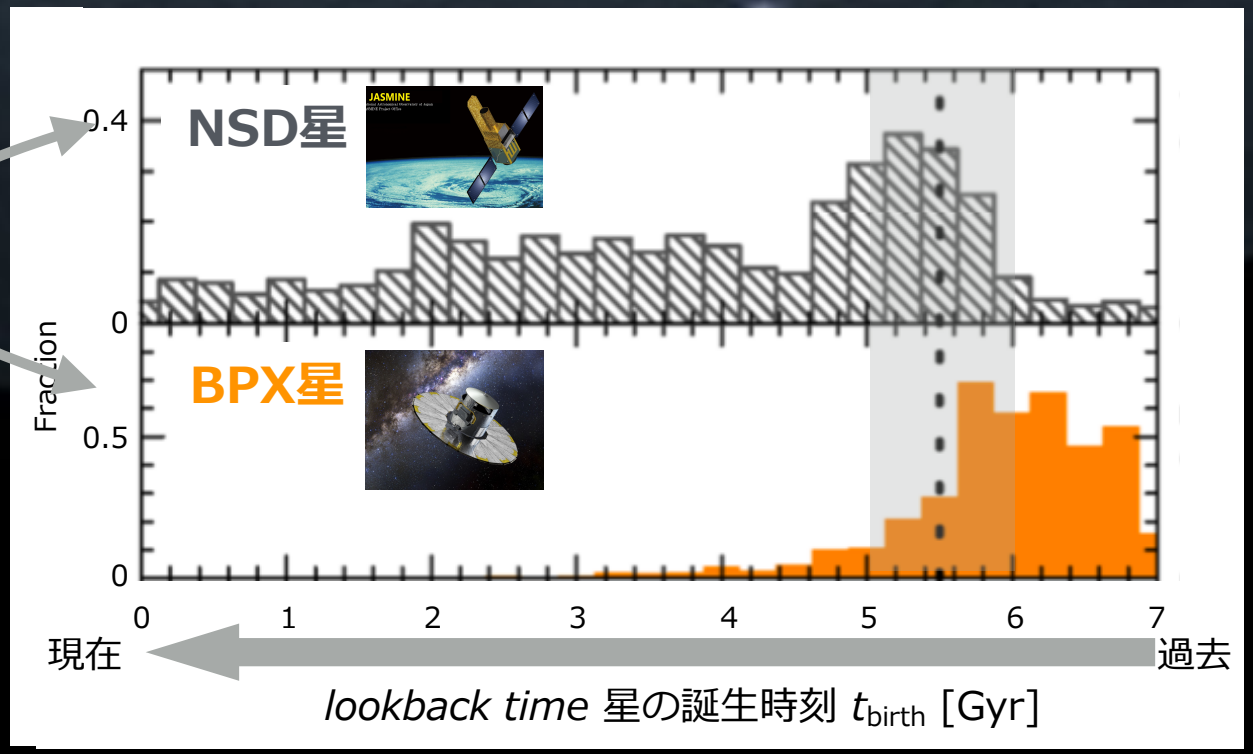
NSD

バー形成期/後に
誕生した星

Baba & Kawata 2020, MNRAS

観測的にどのように
切り分けるのかが課題

e.g. 全景の銀河円盤星、NSD
とオーバラップする古いディス
ク成分・古典バルジ成分



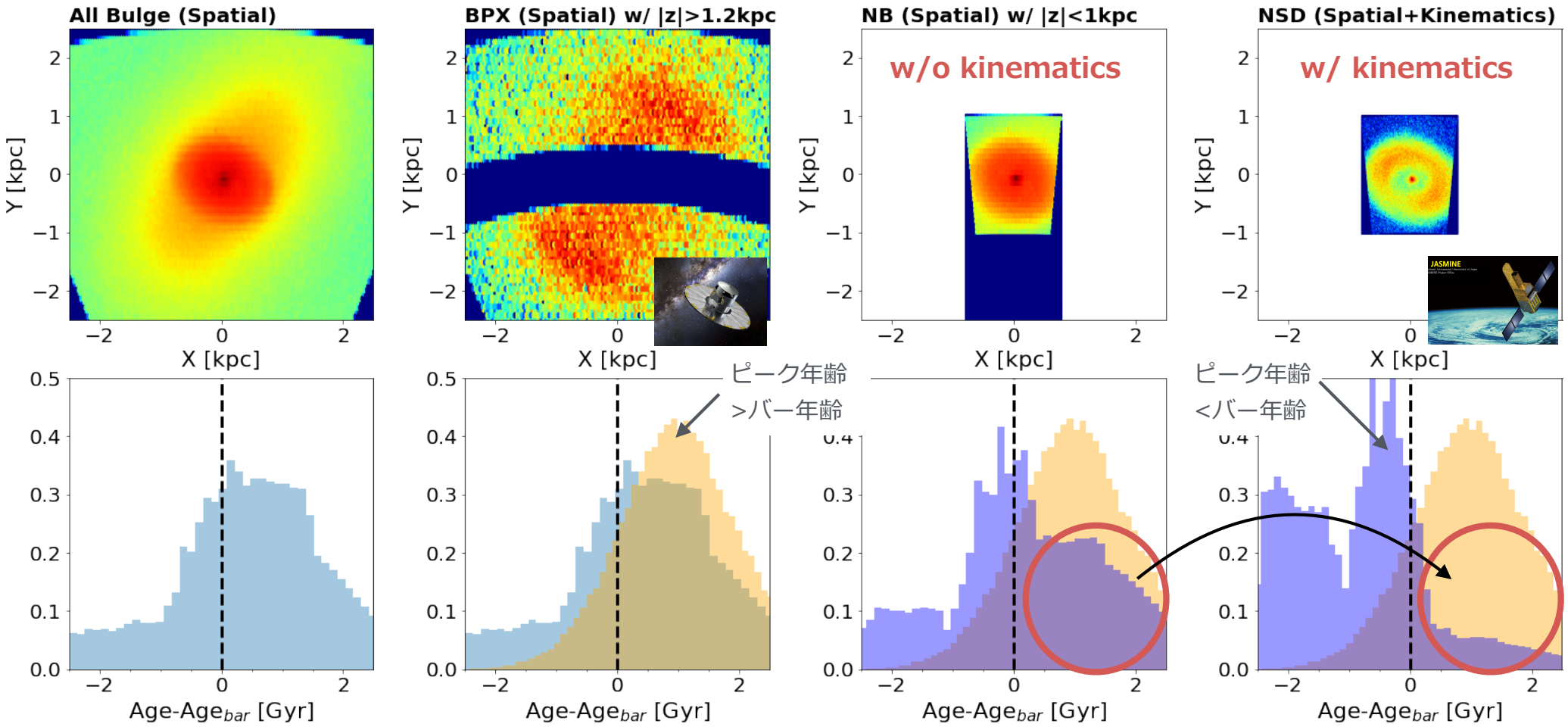
Mock Observation：BPバルジとNSDの相補的年齢分布

バルジ領域の星
|GLon|<20 deg.
$|D-R_0|<2.5$ kpc

BPバルジ領域の星
& $|D-R_0|>0.5$ kpc
& $|z|>1.2$ kpc

中心核バルジ領域の星
|GLon|<5 deg.
$|D-R_0|<0.5$ kpc

中心核ディスクの星
& $|V_{los}-V_{cir}|<70$ km/s
& $|V_z|< 30$ km/s



バー形成前に中心核バルジ領域に存在した力学的に熱い恒星系成分が落ちる

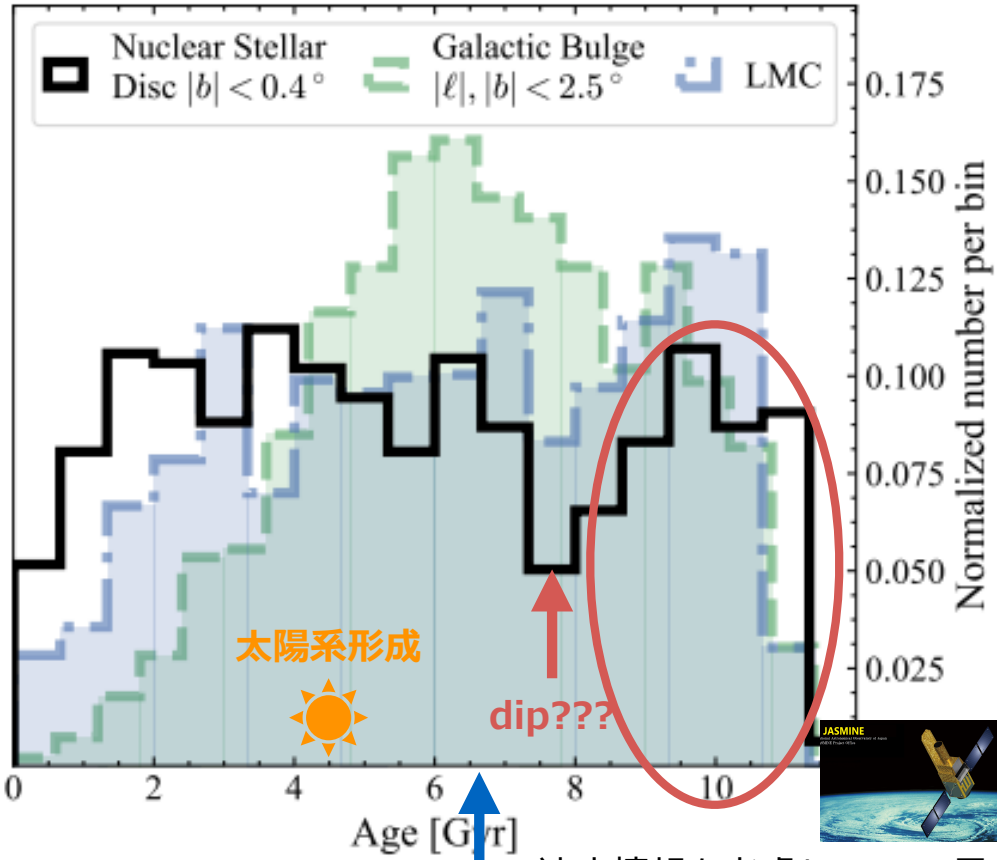
MW bar formed around ~7 Gyr ago?

ミラ型変光星の周期年齢関係→NSD星の年齢分布

PRIME望遠鏡によるミラ探査 (Z205a 松永講演)
PRIME望遠鏡 (Z322b 鈴木大介)

NSD Mira variables **w/o** kinematics

Sanders, Matsunaga, Kawata et al. (2022)

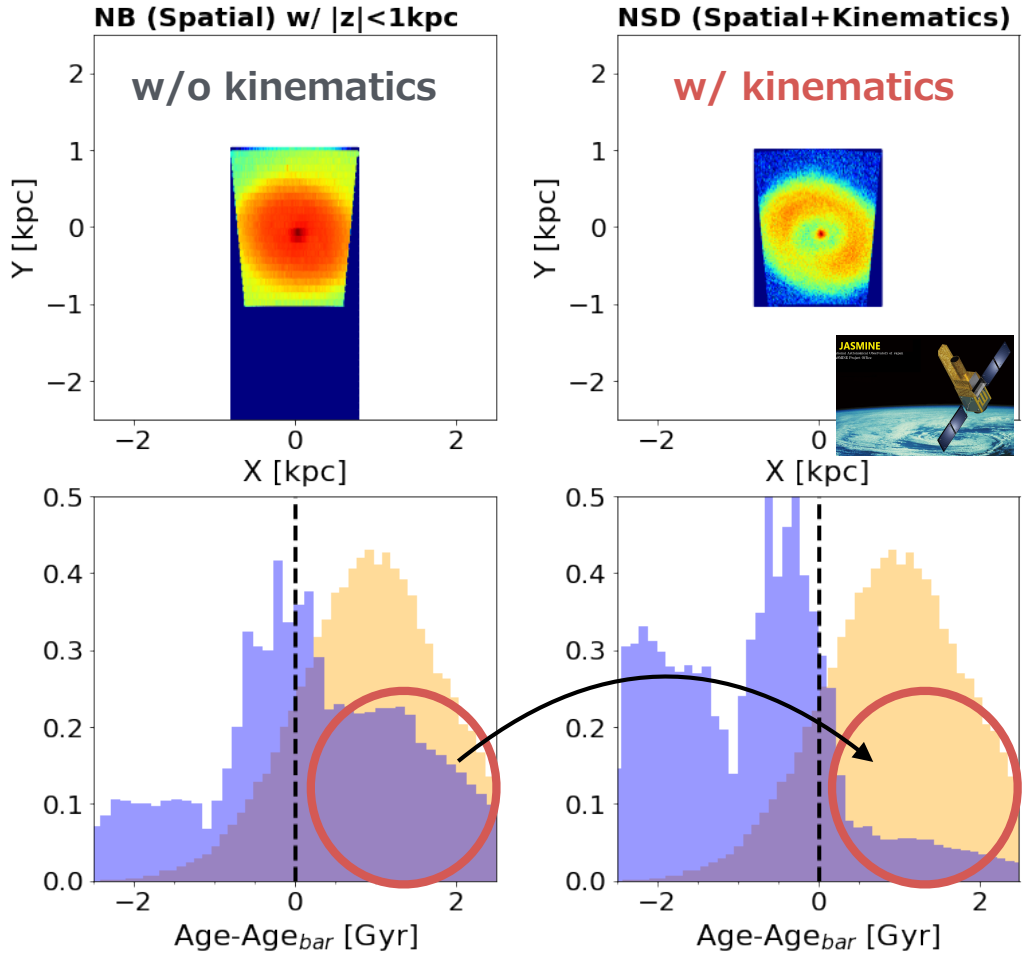


速度情報を考慮してNSD星を選ぶと消えるのでは？

バー形成???

中心核バルジ領域の星
|GLon|<5 deg.
$|D-R_0|$<0.5 kpc

中心核ディスクの星
& $|V_{los}-V_{cir}|$<70 km/s
& $|v_z|$< 30 km/s

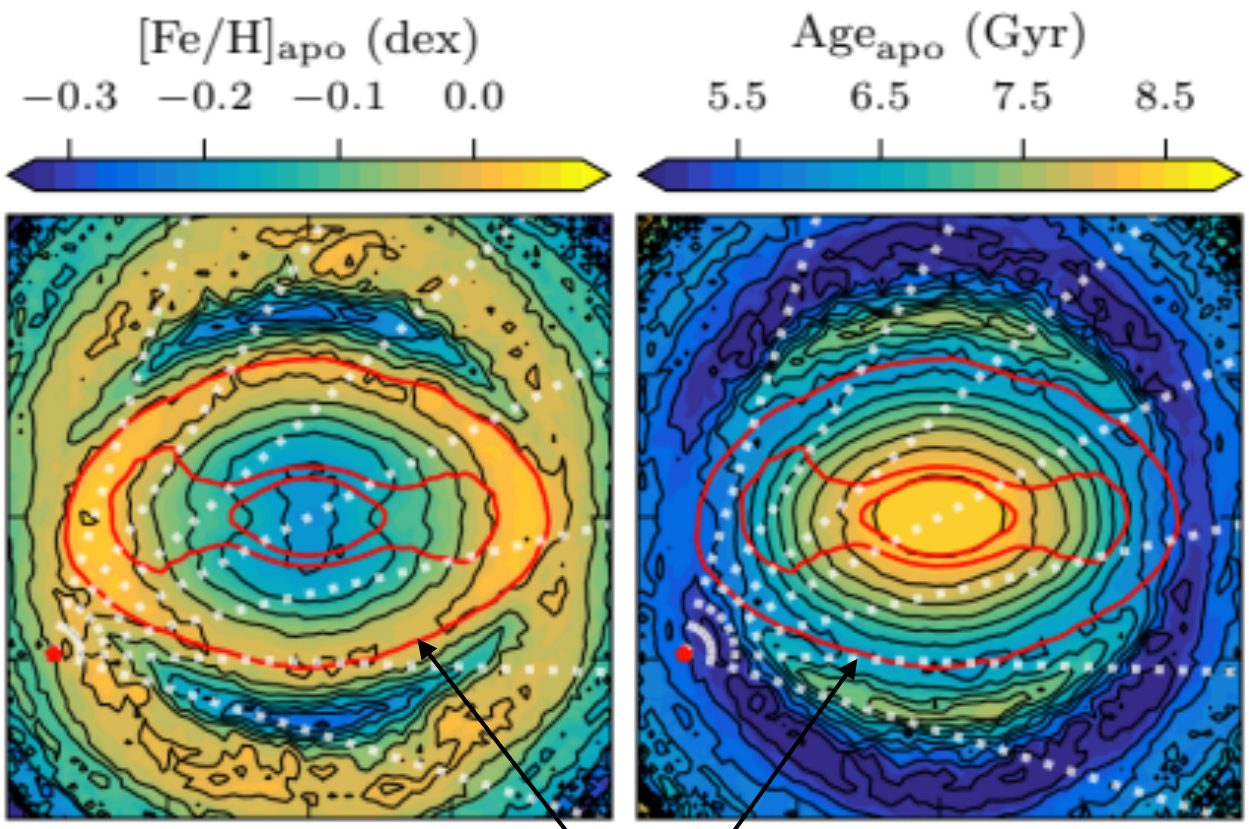


バー形成前に中心核バルジ領域に存在した力学的に熱い恒星系成分が落ちる

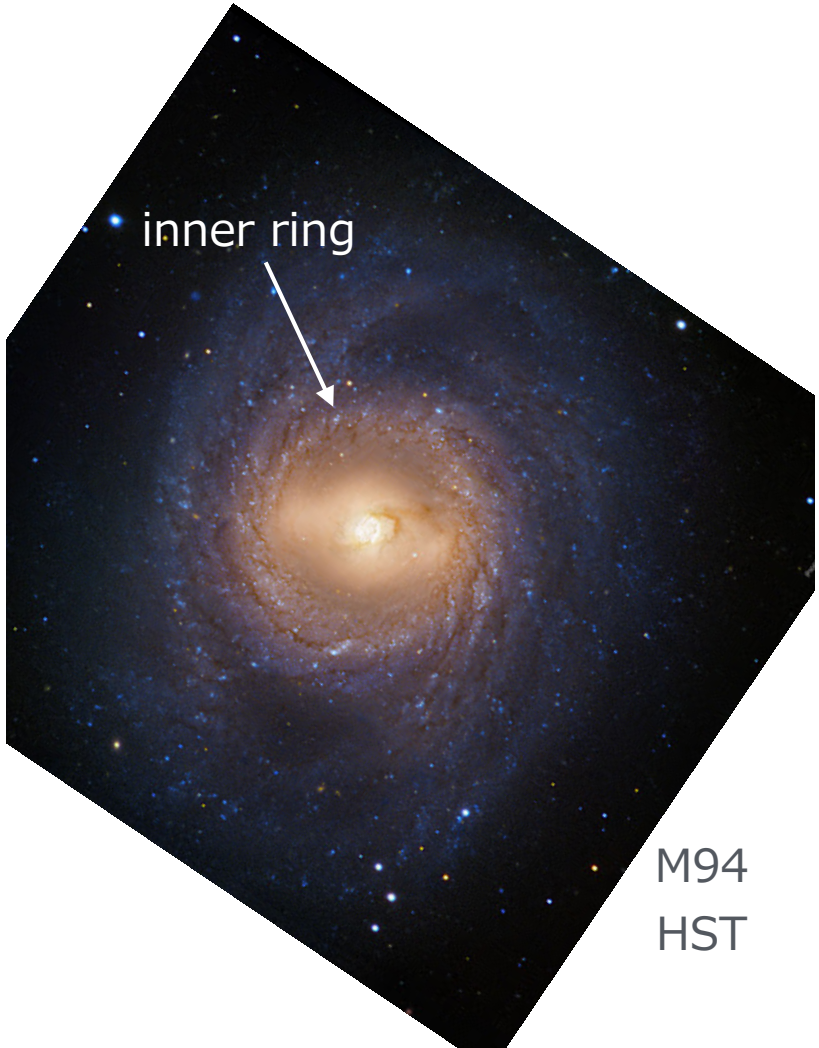
~6 Gyr aged MW inner ring ??

Wylie, Clarke & Gerhard (2022)

APOGEE starsをM2M barred potential (Portail et al. 2017) で軌道計算
1Myr刻みの軌道出力をプロット → bar end付近にリング構造 (inner ring) が見えた
inner ring = バーによって生じる構造 → バー年齢の指標 (Fragkoudi et al. 2020)
MW's bar age >~ inner ring age ~ 6 Gyr



MW's inner ring??



M94
HST

JASMINE "White Paper"

To be submitted in 2022

authors: D. Kawata, H. Kawahara, N. Gouda *et al*. (JASMINE team + science community)

銀河系中心考古学（位置天文観測）

2. **Galactic Center Survey (GCS): Galactic Center Archaeology**
   - 2.1 Kinematics and History of the Nuclear Star Cluster
   - 2.2 SMBH Formation History
   - 2.3 The Nuclear Stellar Disk, **Inner Bar and young star clusters**
   - **2.4 Nuclear Stellar Disk: The formation epoch of the Galactic Bar** and **the Sun's birth radius**
   - 2.5 Nuclear Stellar Disk: A Link to the high redshift progenitors
   - 2.6 Inner disk: spiral arms and Galactoseismology

今回の馬場の講演はここがメイン

この話題も少し

系外惑星探査（高精度測光観測）

3. **Exoplanet Survey (EPS)**
   - 3.1 Transiting Planet Survey around Late-type Stars
   - 3.2 Follow-up Characterization from Space
   - 3.3 Searching for Young Planets
   - 3.4 Stellar spin-down relations from young cluster observations
   - 3.5 Photometric Variability of Brown Dwarfs
   - 3.6 NIR Photometry by JASMINE
   - 3.7 Exoplanet Microlensing
   - 3.8 Astrometric Planet Survey
4. Mission and Instrument Concept

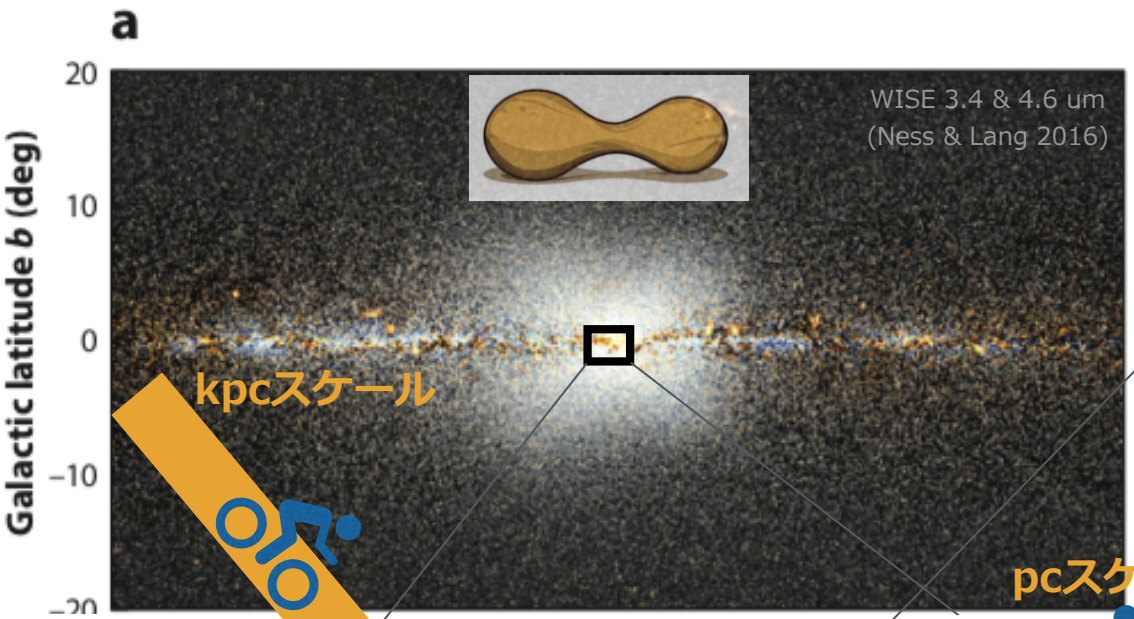
   …

5. Other Potential Science Cases
   - 5.1 Galactic Mid-Plane Survey (GMPS)
   - 5.2 X-ray Binaries
   - 5.3 Complementary Sciences with the GCS data
6. Synergies with the other projects

   …

銀河スケールからSMBHへのガス降着：内部バーが必要？

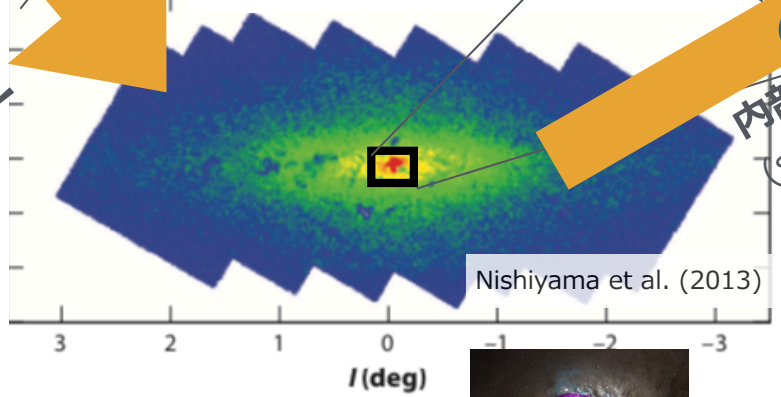
SMBHへのガス降着過程
（Z316a 松井講演）



kpcスケール

バーで余裕！

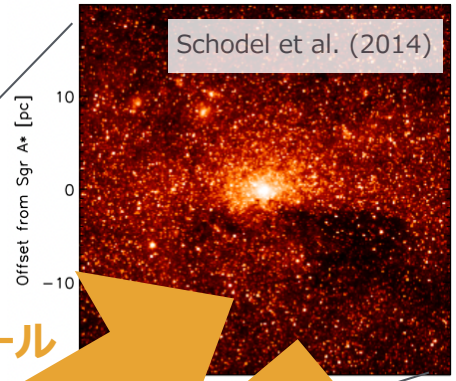
中心核ディスク R~200 pc



pcスケール

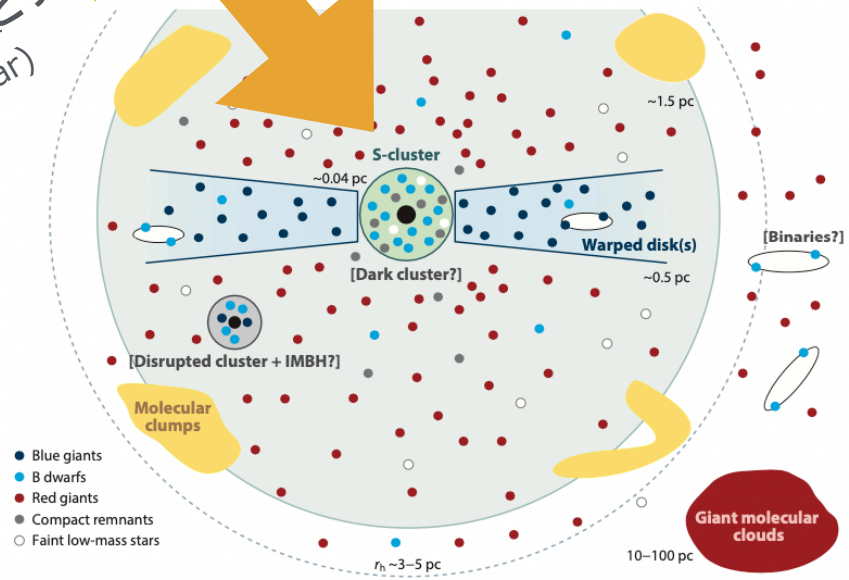
内部バーで落とす？？
(secondary bar)

中心核星団 R~5pc



銀河系中心 R<5 pc

auスケール

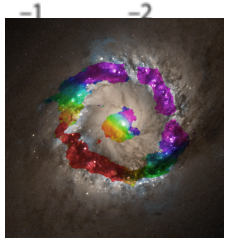


Alexander (2017)

R~100 pcスケールに溜まる

ガスリング (CMZ)

星形成リング (NSD?)

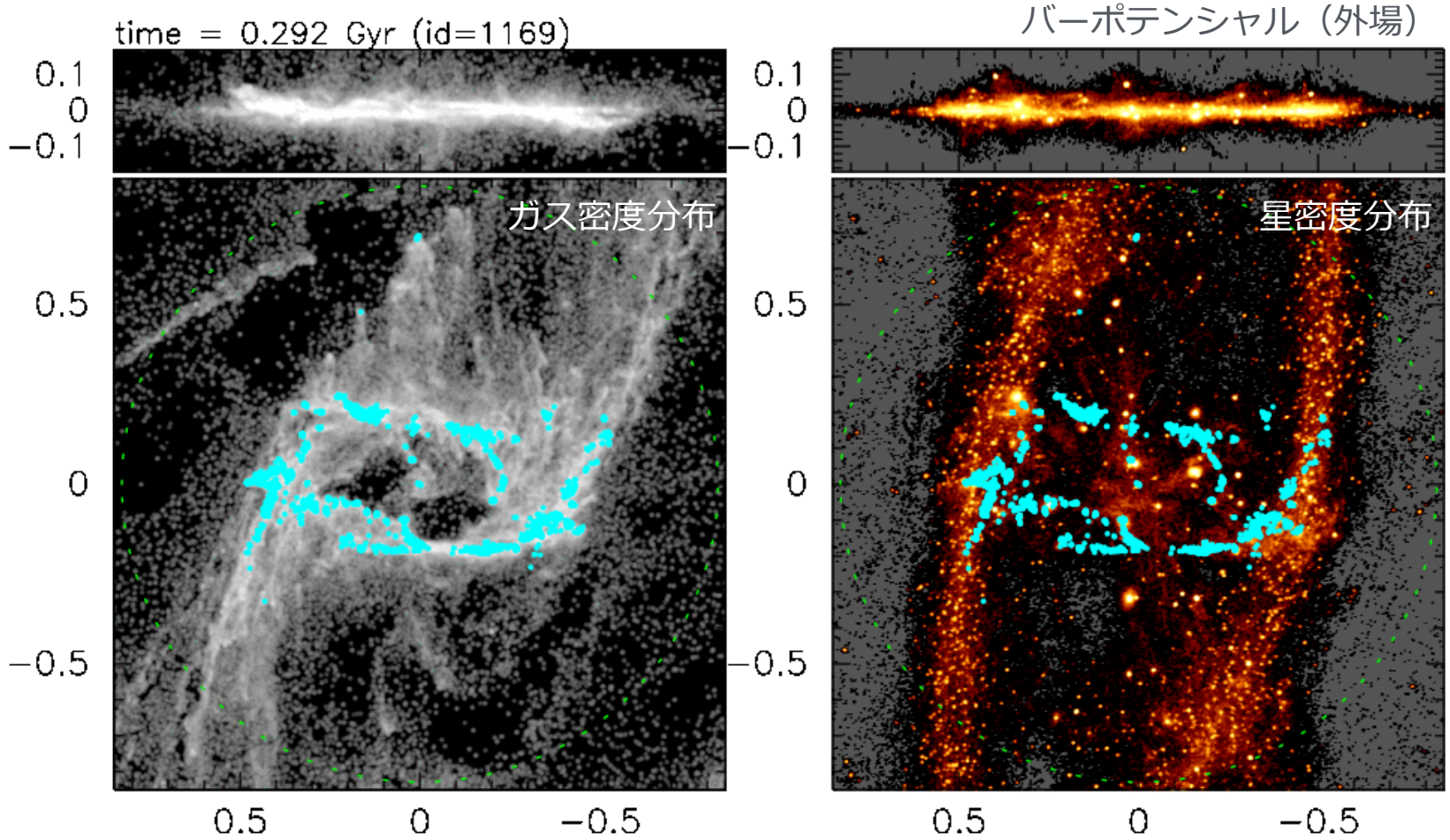


Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), K. Onishi (SOKENDAI), NASA/ESA Hubble Space Telescope

バー形成期のCMZのガス・星団の運動

Preliminary

バー形成期には一気にガスが流れ込み、活発な星形成 → フィードバックが起こる
激しいガス流入と**活発な星形成フィードバック**によるCMZは**激しい乱流状態**、複雑な空間構造
内部バーが存在しなくても簡単にR<10 pcまでガスが落ちる (e.g. Wada et al. 2009)



現在：ASURAコードでSSP近似限界の300M$_\odot$質量分解能計算 (アテルイII 256コア、~2 days)
今後：SMBH (sink粒子) 計算、**ASURA+Bridge**コードで**<10M$_\odot$質量分解能**計算
→ CMZ/NSD領域の大質量星団形成・破壊の理解 w/ 藤井通子 (東大)、斎藤貴之 (神戸大) *et al.*

まとめ

天の川銀河の「バルジ」とは？

= 「ピーナッツ型バルジ (BPX)」 + 「中心核バルジ (NSD)」（+ 「古典バルジ」）の複合構造

基本的にバー起源の構造 → バー形成進化の理解が必須

バー形成は銀河系円盤の大局的な進化を支配する重要なイベント

バー形成による複合バルジ形成 (Baba & Kawata 2020; Baba et al. 2022)

現象①：バー形成 → ガス流入・スターバスト → 中心核ディスク形成
現象②：バー形成 → バー領域のガス枯渇 → 星形成の急停止
} 星形成活動領域の分画化

現象③：バー形成 → バー領域の星の鉛直軌道共鳴 → ピーナッツ型バルジ形成

（現象④：バー形成 → 銀河系円盤の星・太陽系の軌道移動）

バー形成時期の推定

BPXとNSDの星の年齢分布から制限

クリーンなNSDサンプル選びのために「速度情報」が必須 → JASMINEの重要性

ガス降着過程 (kpc→pc)

バー形成期には内部バーなしでもpcスケールまで落ちる

JASAMINEプロジェクト

2028年打ち上げ目標の世界初の赤外線位置天文観測衛星 (1.0~1.6 um)

Gaiaでは観測できない中心核バルジ領域 (R<~200 pc) の星の位置天文カタログを公開

銀河系中心考古学（位置天文観測） + 系外惑星探査（トランジット法）

(注) 本講演は「JASMINE銀河系中心考古学」のサイエンスを矮小化している。より広いサイエンスに関してはJASMINE White paper (2022年内の投稿予定）を参照してください。

APPENDIX

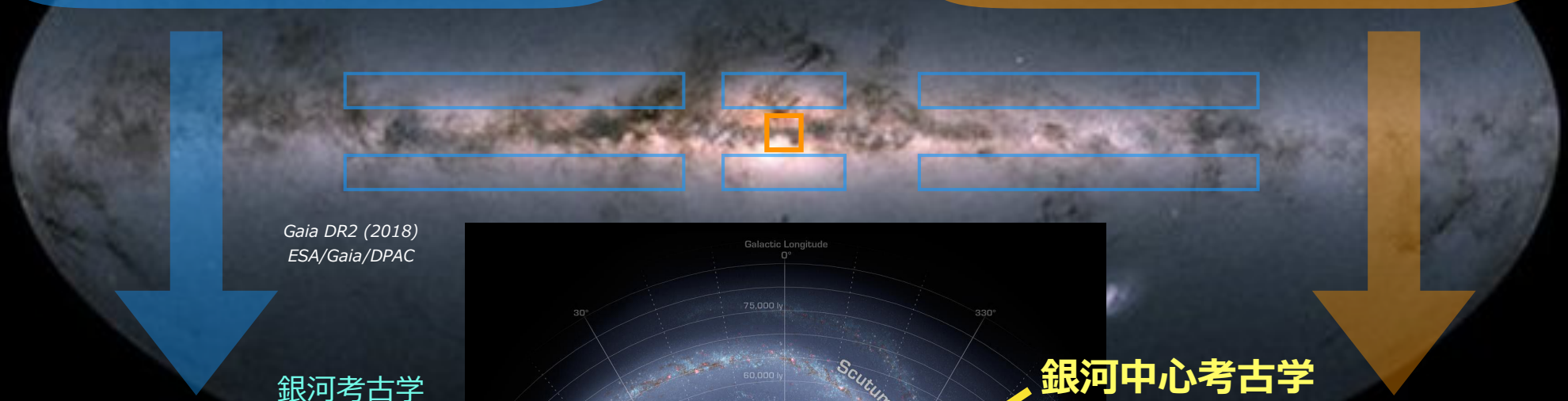
Gaia (可視光)

- 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

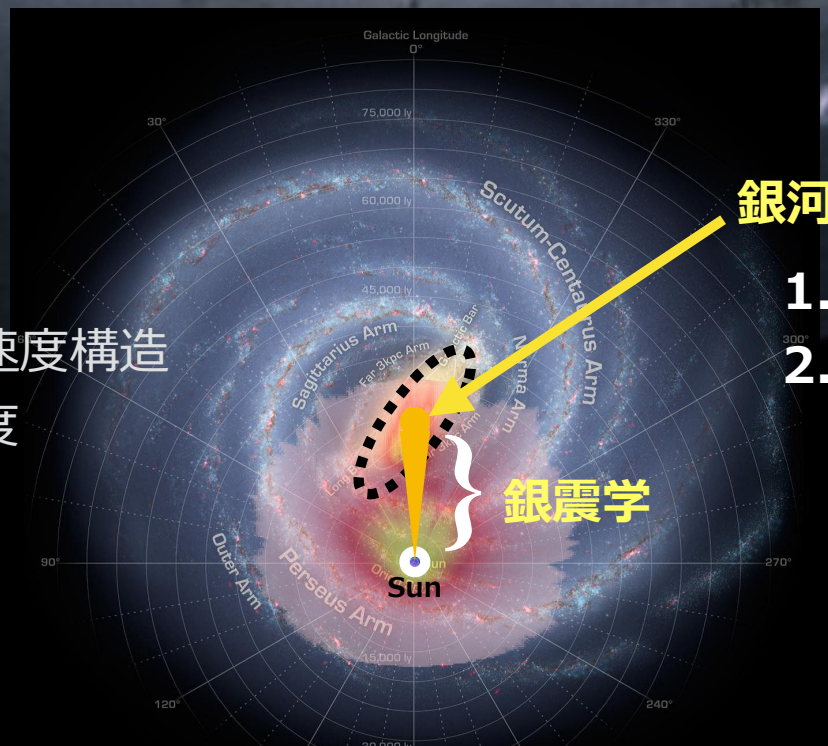
相補的

JASMINE (近赤外線)

- **中心核バルジ**
- 銀河円盤面、特にinner disk
- 星間ガスに覆われた星形成領域
- ハビタブル系外惑星探査



Gaia DR2 (2018)
ESA/Gaia/DPAC



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**

JC Working Groups

Google

JASMINE Consortium

Google 検索　I'm Feeling Lucky

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」をクリック

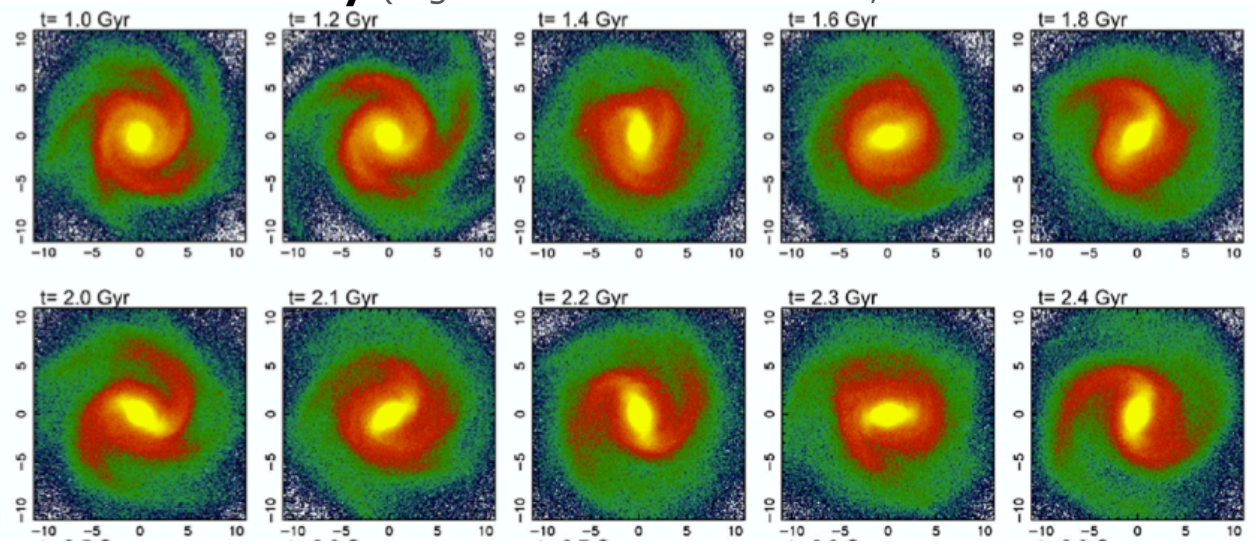
ミッション目標に向けたより多くのサイエンスに有益なカタログ作りの準備（**WG-A**）、科学目標達成に向けてのシミュレーションデータなどを使っての準備　(**WG-B**)、JASMINEの成果を広く社会に還元するためのアウトリーチ活動 (**WG-C**) を目的とします。

- **WG-A Data Analysis**
  - 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**
  - 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**

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。

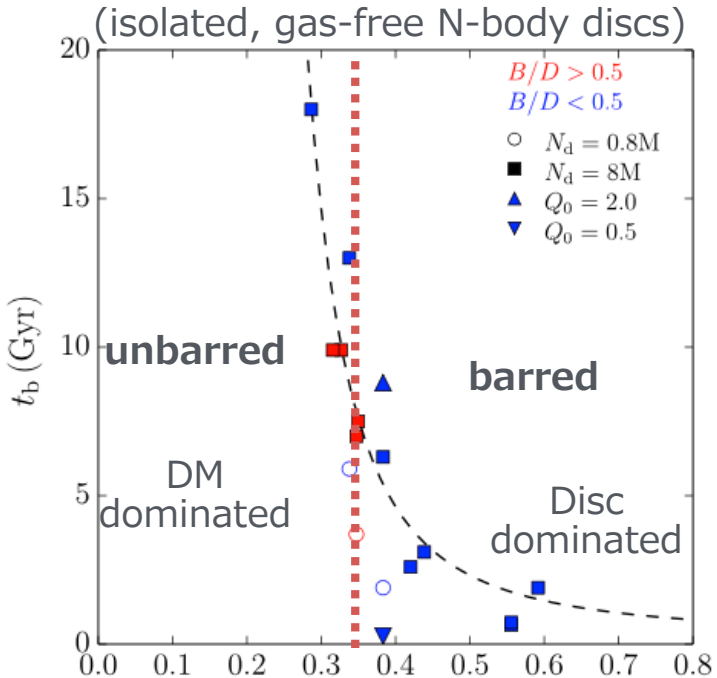
Formation/Evolution of Bars: Theory

bar instability (e.g. Ostriker & Peeled 1973; Efstathiou et al. 1982)



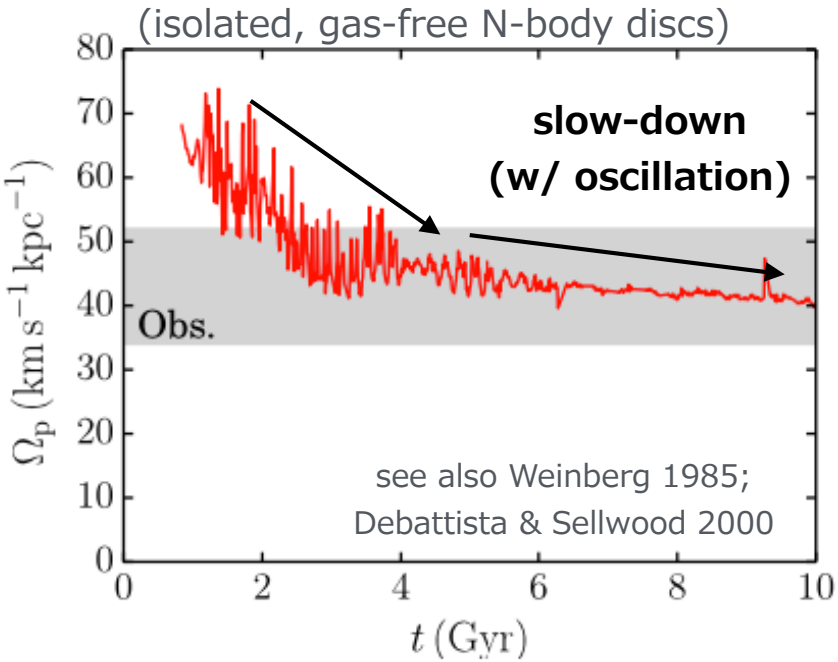
(e.g. N-body/SPH sim. **Baba** 2015)

Fujii, **JB** et al. 2018
(isolated, gas-free N-body discs)



$$f_d \equiv \left(\frac{V_{c,d}(R)}{V_{c,tot}(R)}\right)^2_{R=2.2R_d}$$

Fujii, **JB** et al. 2019
(isolated, gas-free N-body discs)



バー形成

- 重い恒星系円盤ほどバー不安定 (e.g. OP73; E82; Fujii+2018)
- 近接潮汐作用でもバー形成 (e.g. Noguchi 1989)

バー進化

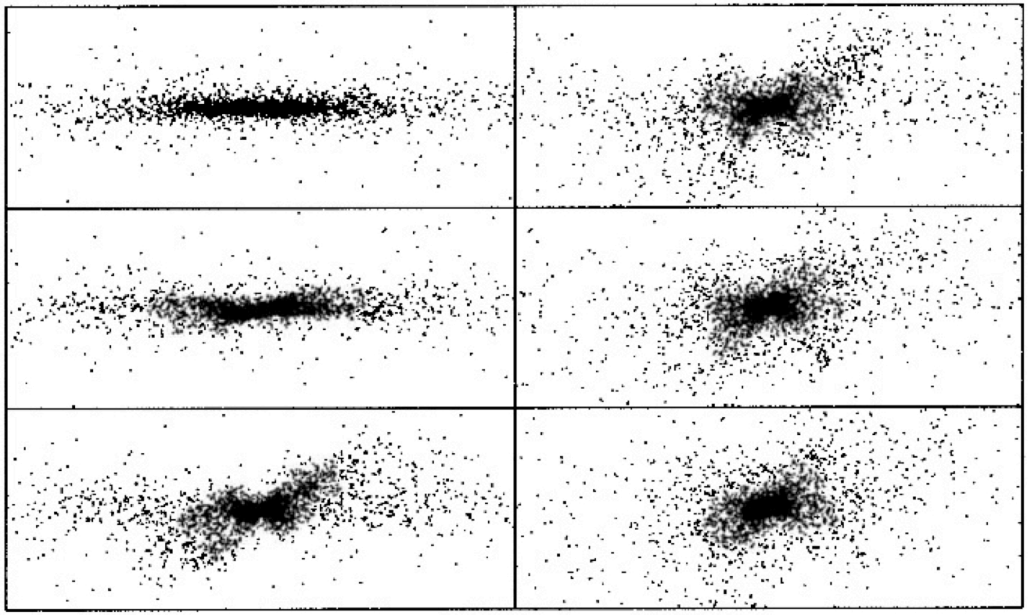
- DMからの動的摩擦で減速 (e.g. W85, DS00, Fujii+2019)
- buckling不安定/鉛直共鳴で立体化 (e.g. **Baba** et al. 2021)

buckling不安定 (座屈不安定)

= 流体系のKH不安定に近い現象

不安定条件 : σ_z/σ_R<~0.3

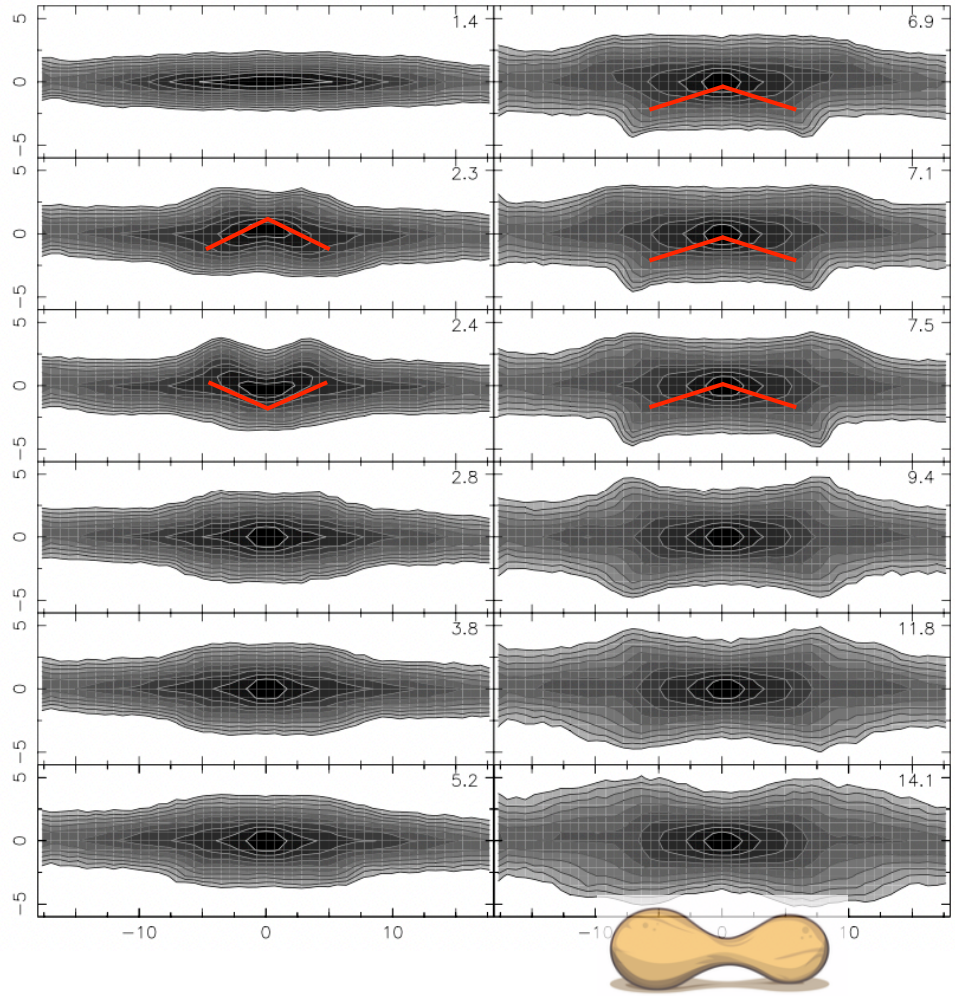
(e.g. Toomre 1966; Sellwood 1996)



Raha, Sellwood et al. (1991), "A dynamical instability of bars in disk galaxies", *Nature*, 352 (6334): 411–412,

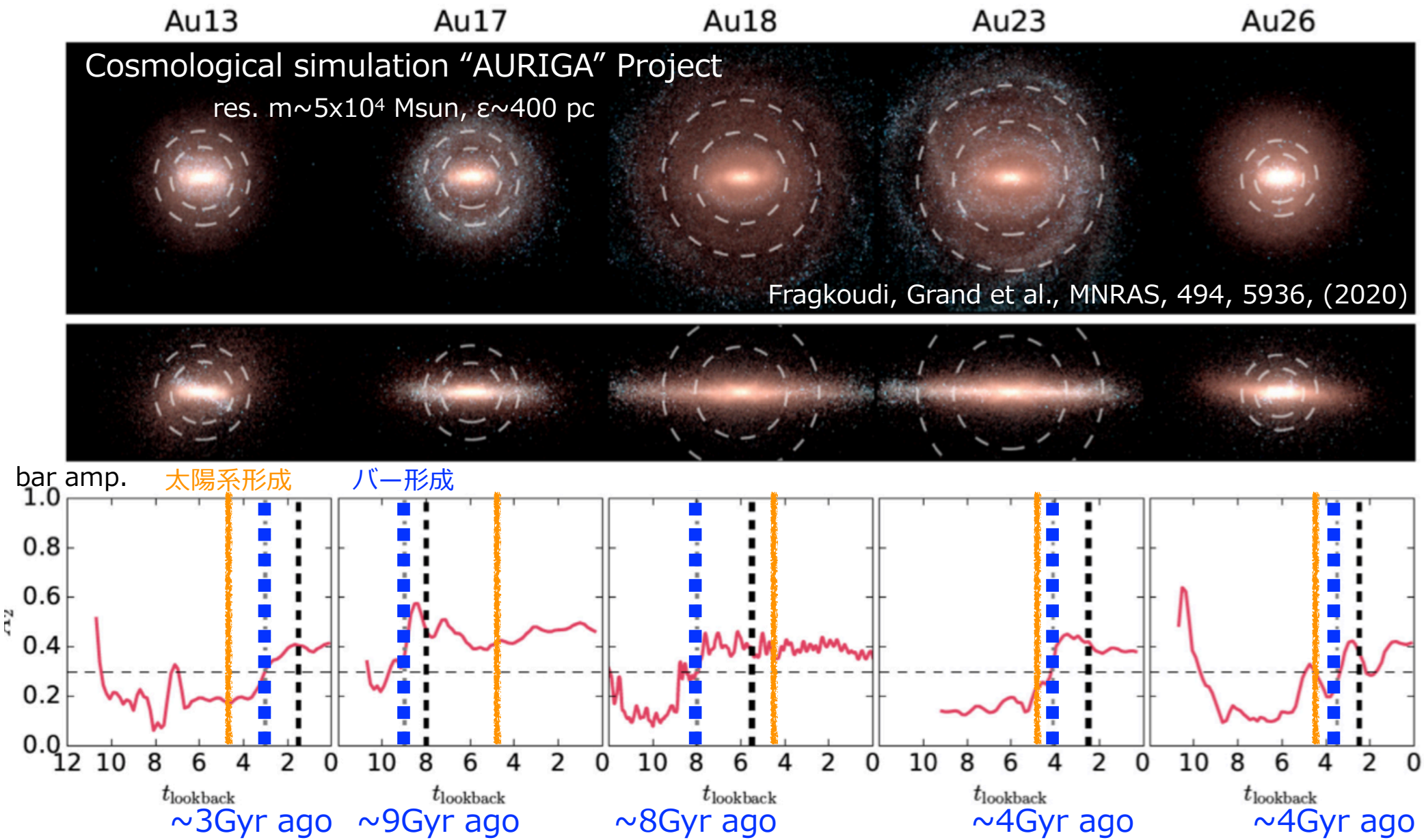
これらはすべてガスなしの計算 (=非現実的銀河)
ガスありだとbucklingが起きないという指摘もある
(e.g. Berentzen et al. 1998, 2007)
本研究でも同様にbucklingは起きていない
現実の銀河ではbucklngでピーナッツ化したわけではないのでは？？

バーが銀河面鉛直方向に”への字型”に振動
(鉛直方向に”非対称”に変形)
→ 立体化 (ピーナッツ型)



Martinez-Valpuesta et al., ApJ, 637, 214, (2006)
“Evolution of Stellar Bars in Live Axisymmetric Halos: Recurrent Buckling and Secular Growth”

バー形成時期は個々別別。太陽系形成後にできることも

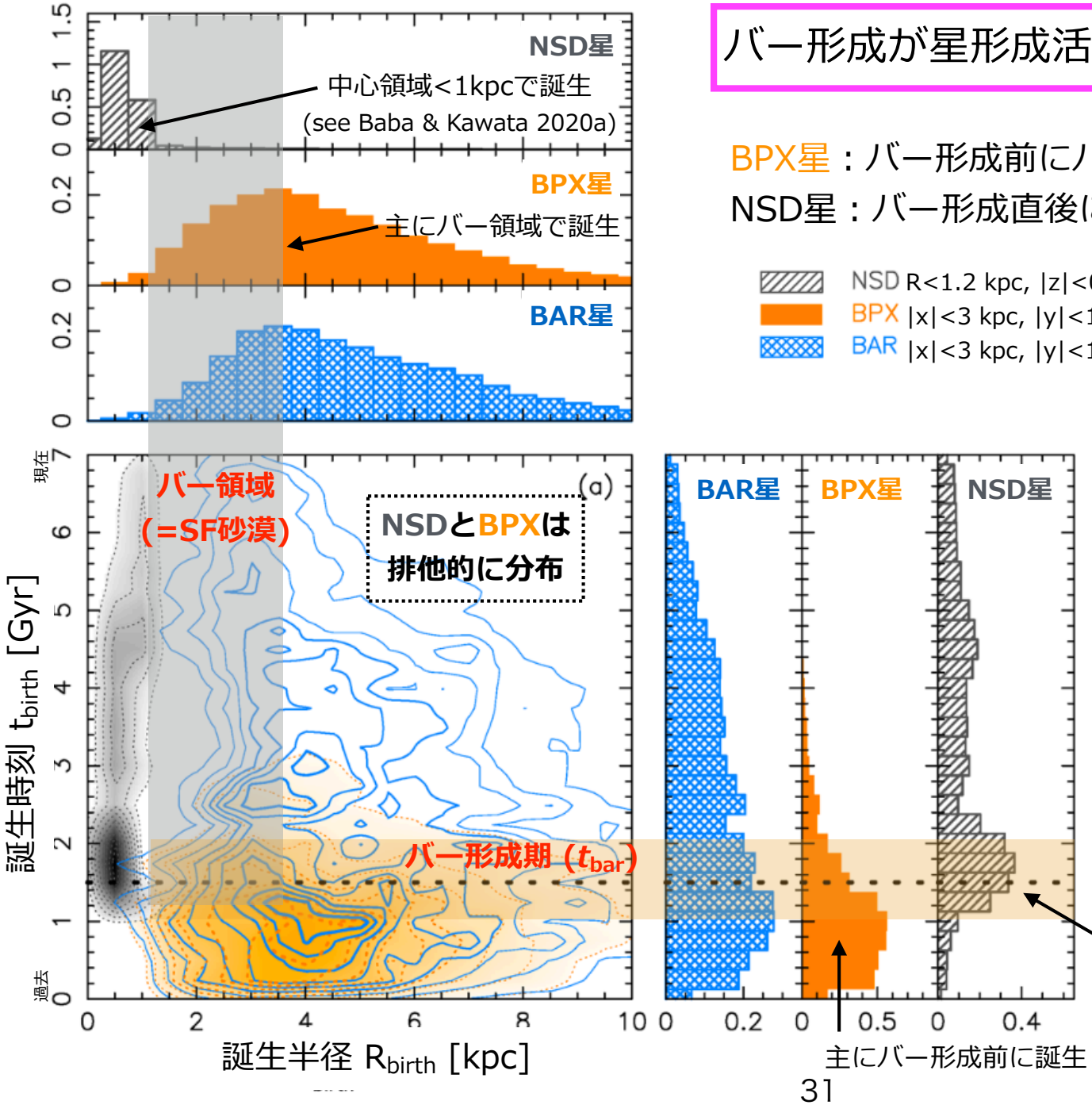


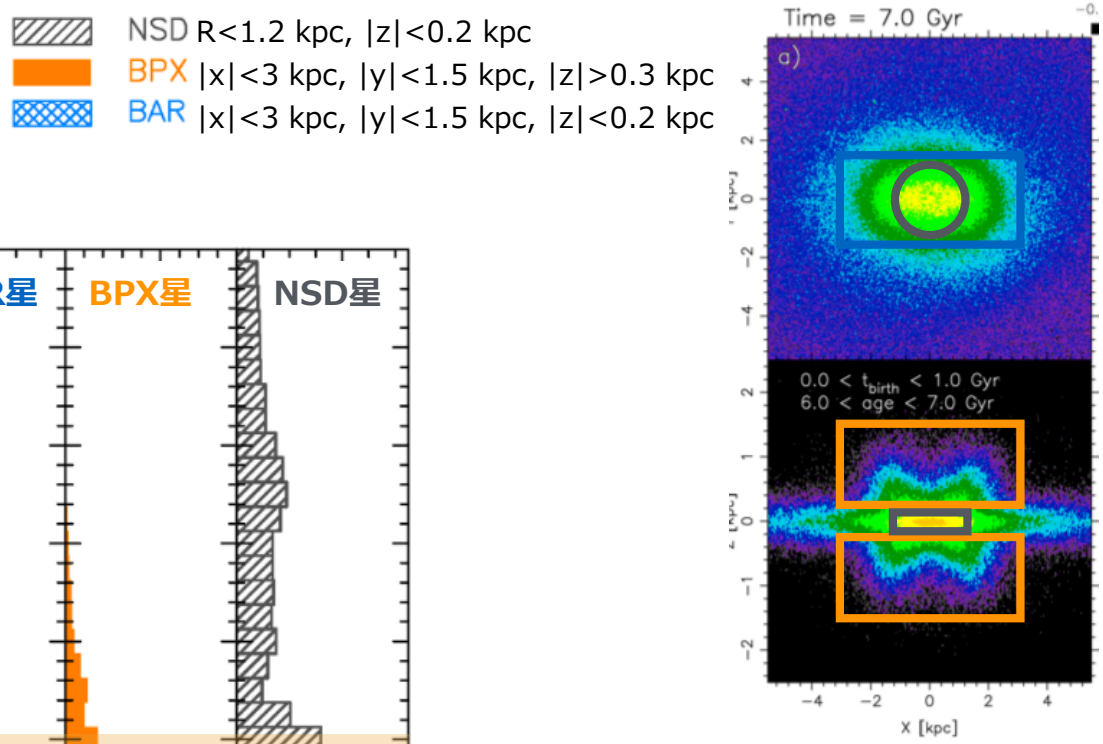
→ 太陽系の軌道移動にも関係するかも (Tsujimoto & Baba 2020; Baba+in prep.)

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





JB, Kawata, & Schonrich (2022)
ASURA+ATERUI-II

NSD dynamical modeling I

Sormani et al. (2020), MNRAS, 499, 7

cylindrical Jeans modelling

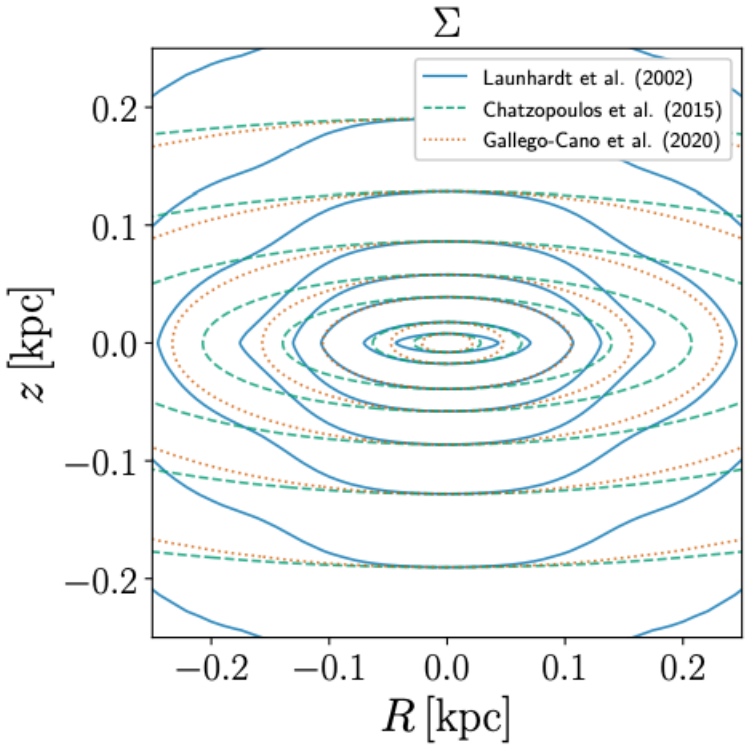
- NSD密度係数 α $\Phi(R,z) = \alpha\Phi_{\rm NSD}(R,z) + \beta\Phi_{\rm NSC}(R,z)$
- 速度分散非等方性 b $\overline{v_R^2} = b\overline{v_z^2}$

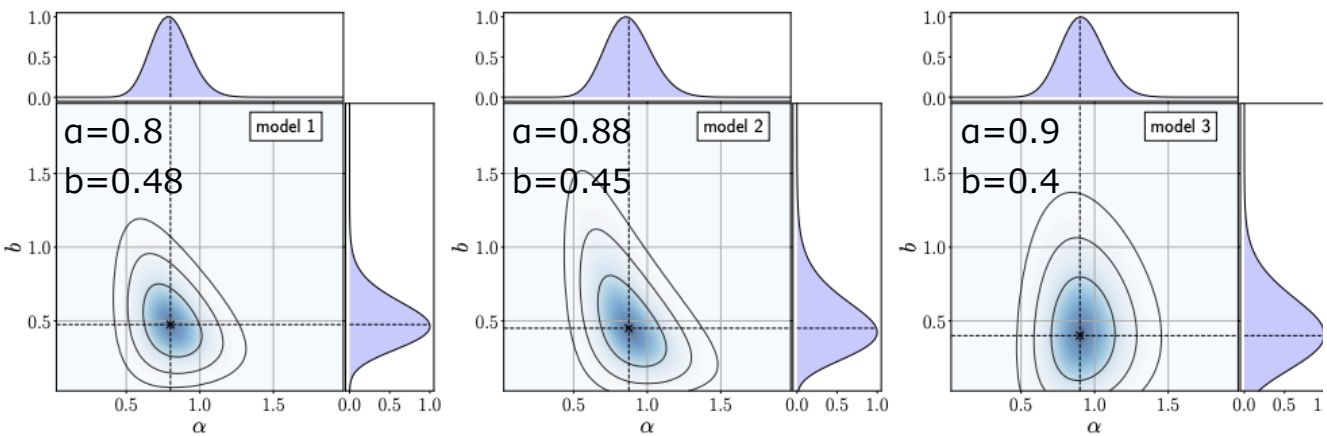
NSD 密度分布モデル (観測)

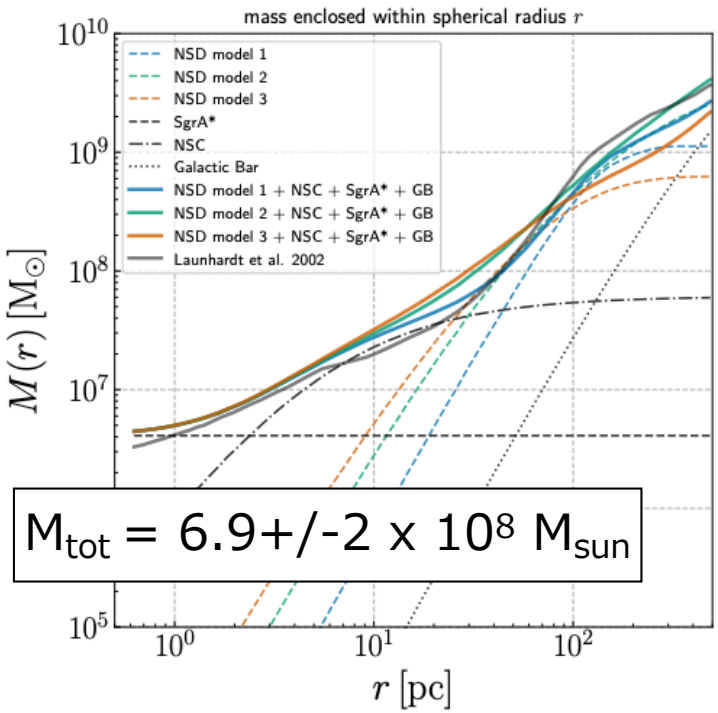
- model 1: Launhardt et al. (2002)
- model 2: Chatzopoulos et al. (2015)
- model 3: Gallego-Cano et al. (2020)

視線速度観測データ

- APOGEE DR16 (Ahumada+2020)
- SiO masers (Messineo+2002,2004,2005)







M_{tot} = 6.9+/-2 x 10^8 M_{sun}

NSD dynamical modeling II

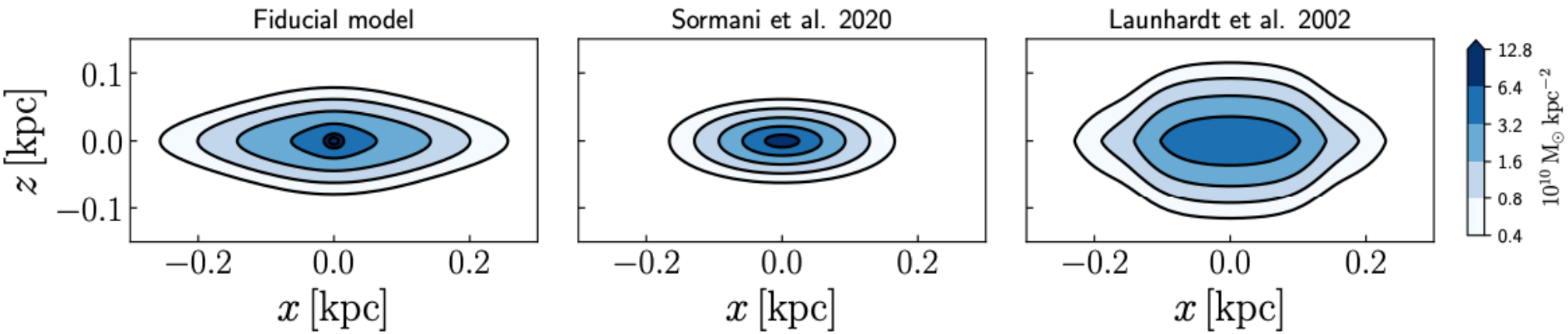
Self-consistent DF

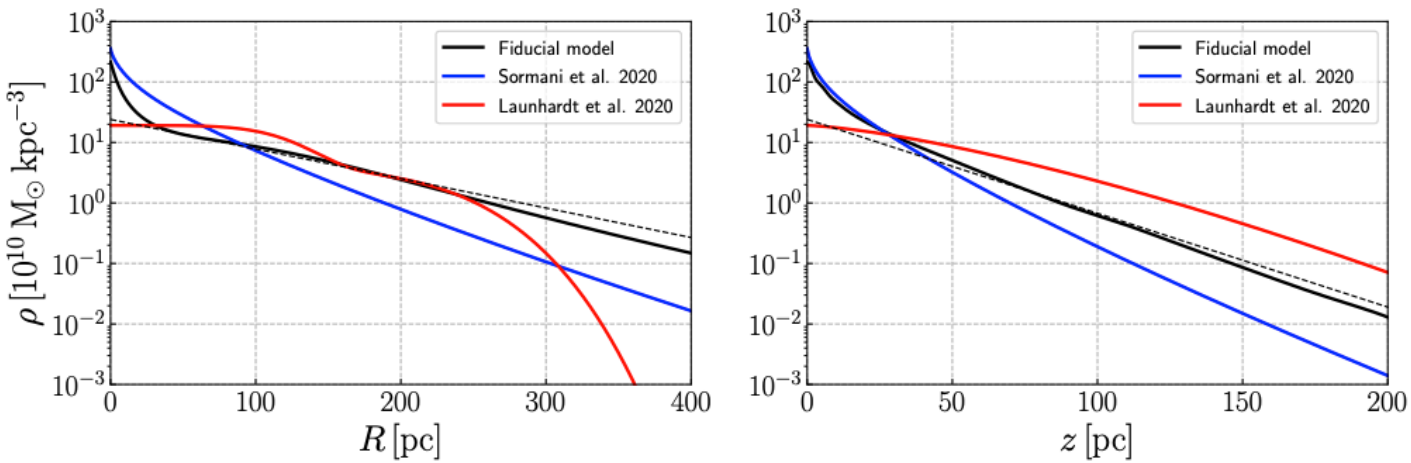
Sormani et al. (2022), MNRAS, 512, 1857

- quasi-isothermal DF (Binney 2010; Binney & McMillan 2011)
- 5 params $\{M_{NSD}, R_{disc}, H_{disc}, \sigma_{r,0}, R_{\sigma,r}\}$

3D運動データ

- KMOS/VLT los (Fritz et al. 2021) + VIRAC p.m. (Smith et al. 2018)



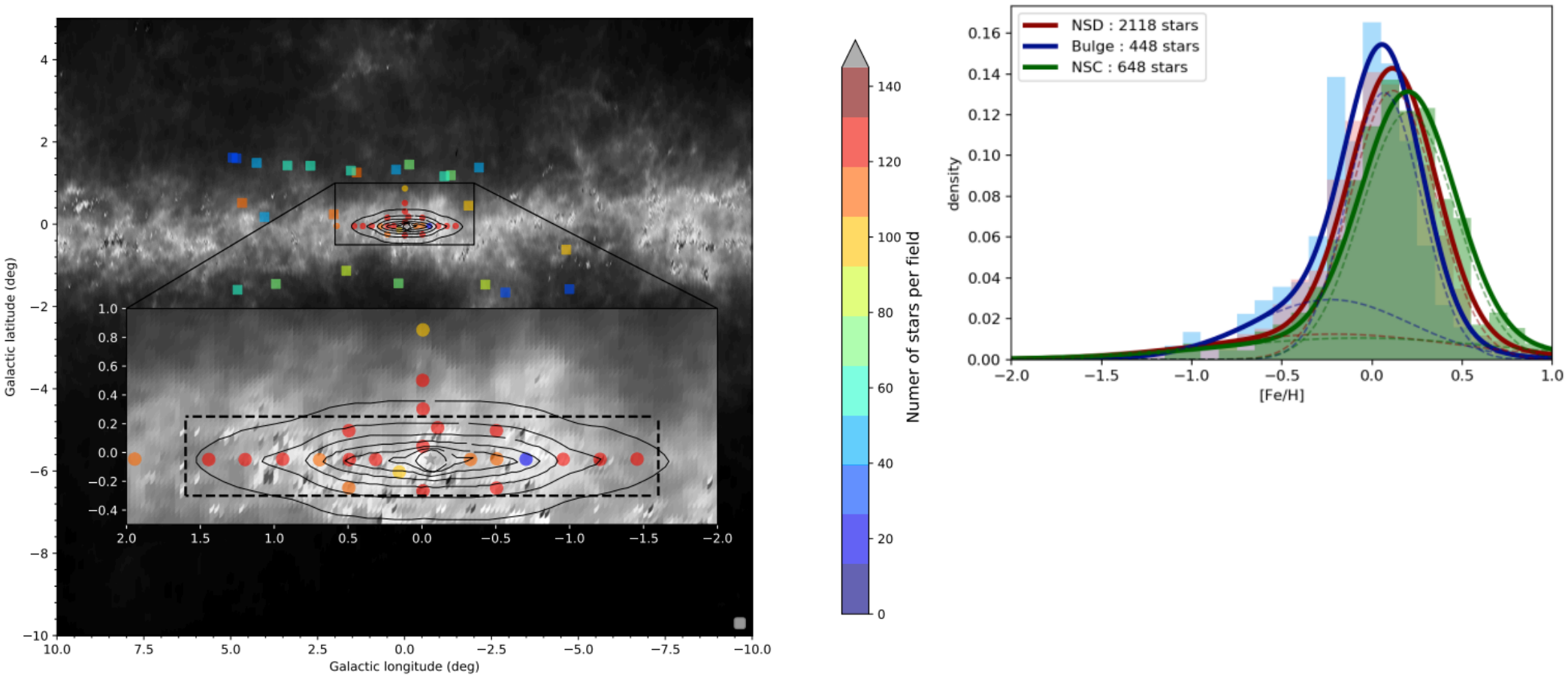


M_{NSD} = 10.5 x 10^8 M_{sun}
R_{disc} = 88.6 pc
H_{disc} = 28.4 pc
$\sigma_{r,0}$ = 67.7 km/s
$R_{\sigma,r}$ = 3.7 pc

NSD Stellar Pop.

Schultheis et al. (2021) A&A, 650, A191

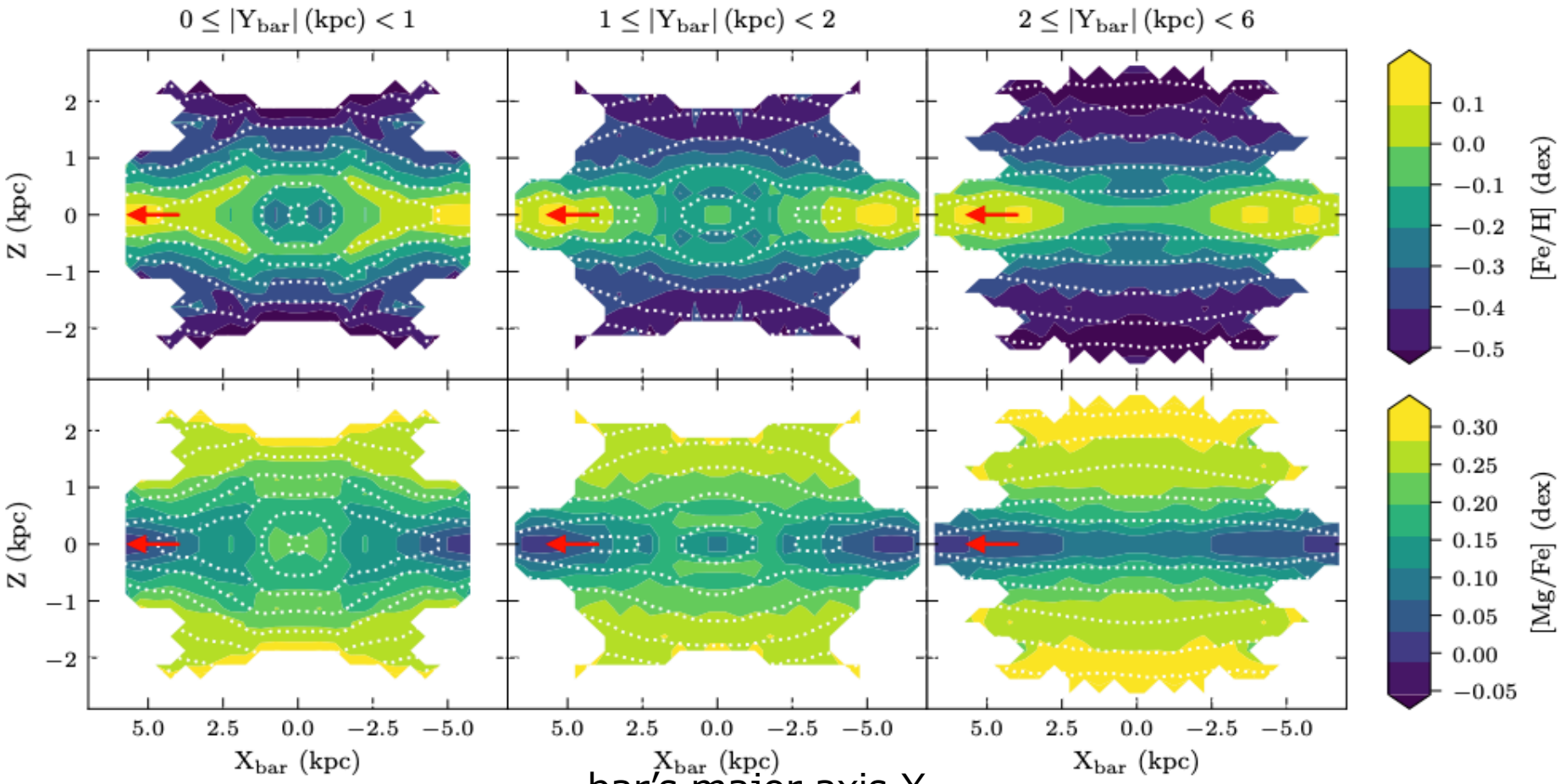
K/M giants spec. w/ VLS/KMOS
compare with the bulge (APOGEE) and NSC stars
NSD: dynamically cool, metal-rich; formed from the CMZ



Stellar Pop. in the Galactic Bar

Wylie et al. (2021) A&A, 653, A143

A2A survey: ARGOS survey re-scaled to APOGEE
AstroNN (w/ DNL) distance (for APOGEE) + RC distance (for A2A)
The mean abundance along the major axis of the bar : the stars are more [Fe/H]-poor and [Mg/Fe]-rich near the Galactic centre than in the outer bulge and the long bar region



bar's major axis X_{bar}

Mira Variables in the Galactic Bar/Bulge

Grady et al. (2020) *MNRAS*

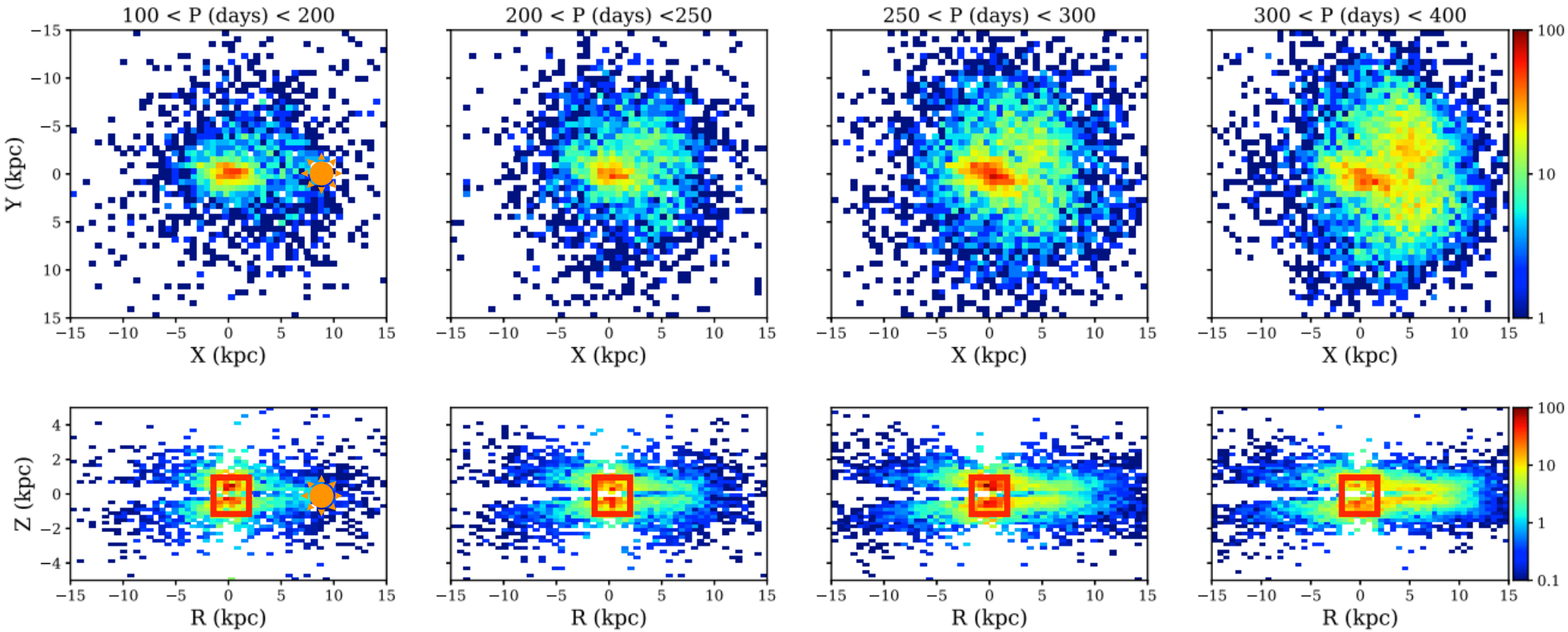
Gaia DR2 long-period variables x 2MASS

Period-Luminosity & Period-Age relations -> distance & age estimations

w/o kinematic info.

中心核バルジ領域のMiraはGaiaで見えていない

older Miras (>~ 10 Gyr)　　younger Miras (~5–7 Gyr)

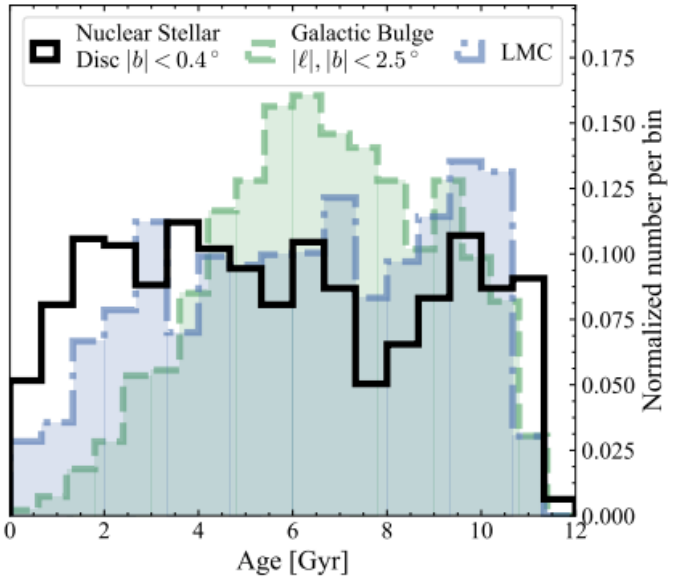


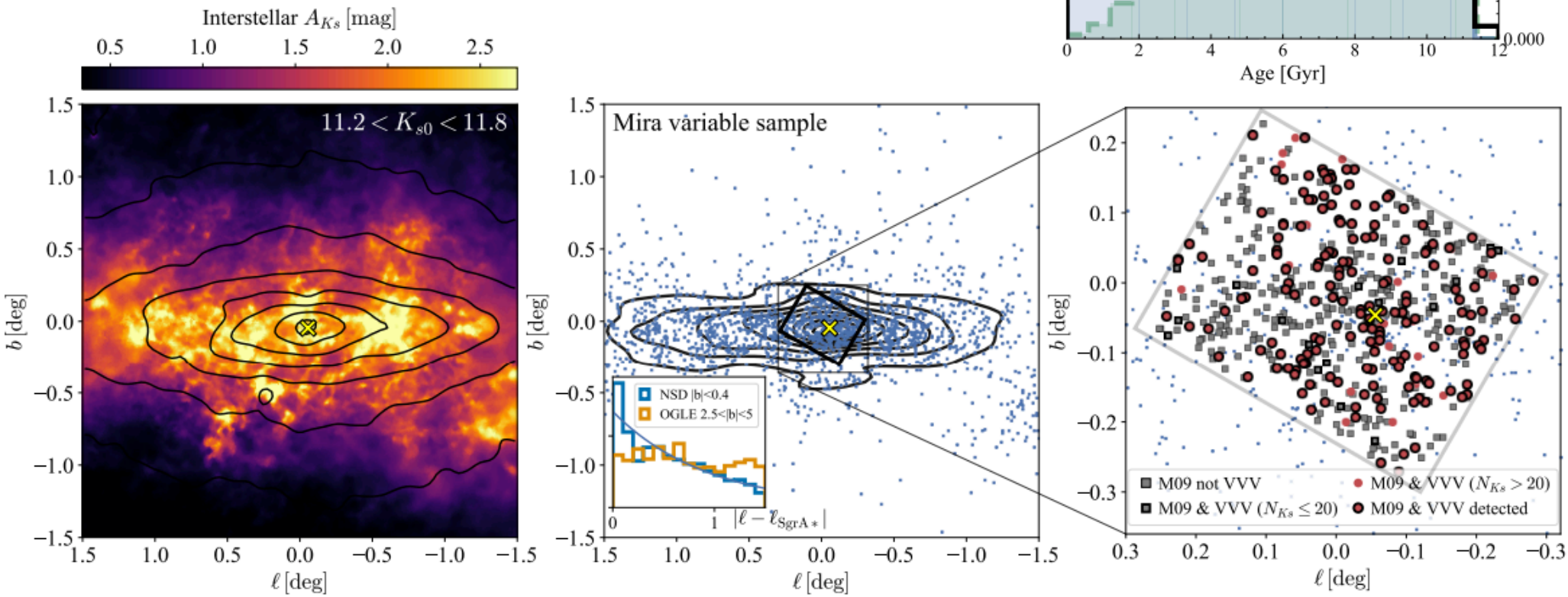
Mira Variables in the Galactic NSD

Sanders, Matsunaga, Kawata et al. (2022) in press

- multi-epoch NIR photometry in VVV survey
- ~1800 Miras (O-rich)
- Period-age relation

$$\tau = 13\,\mathrm{Gyr}\,\frac{1}{2}\left(1+\tanh\left[\frac{330\,\mathrm{day}-P}{250\,\mathrm{day}}\right]\right).$$





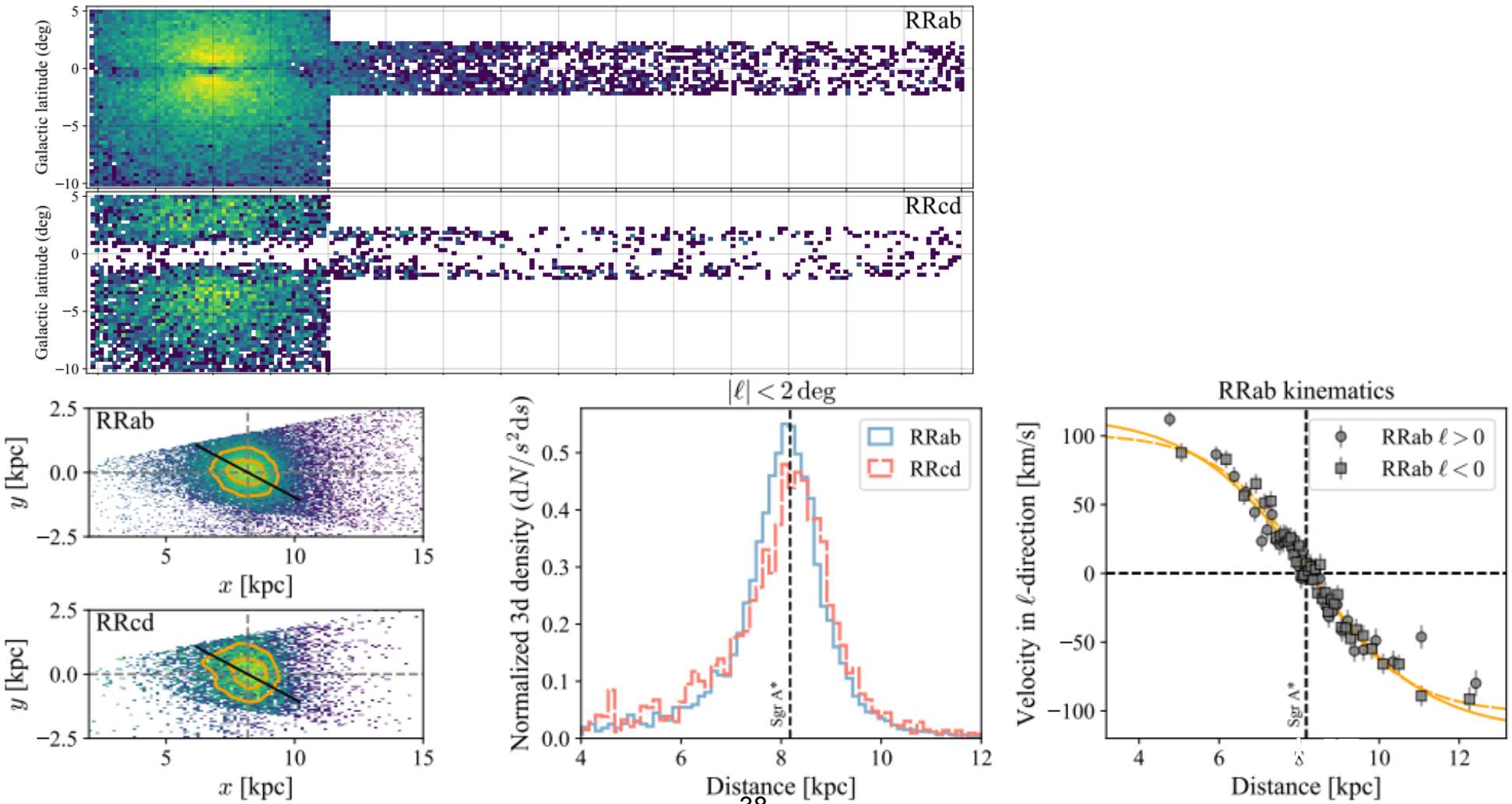
RR Lyrae Variables in the Galactic Bar/Bulge

Molnar et al. (2022), MNRAS, 509, 2566

~1.4M variables; (RRab~39,000, RRcd~8,00, Cep~1,400 etc.)

w/ kinematics (VIRAC proper motion)

rotation of RRL pops. w/ ~40 km/s/kpc



NSDs in external galaxies

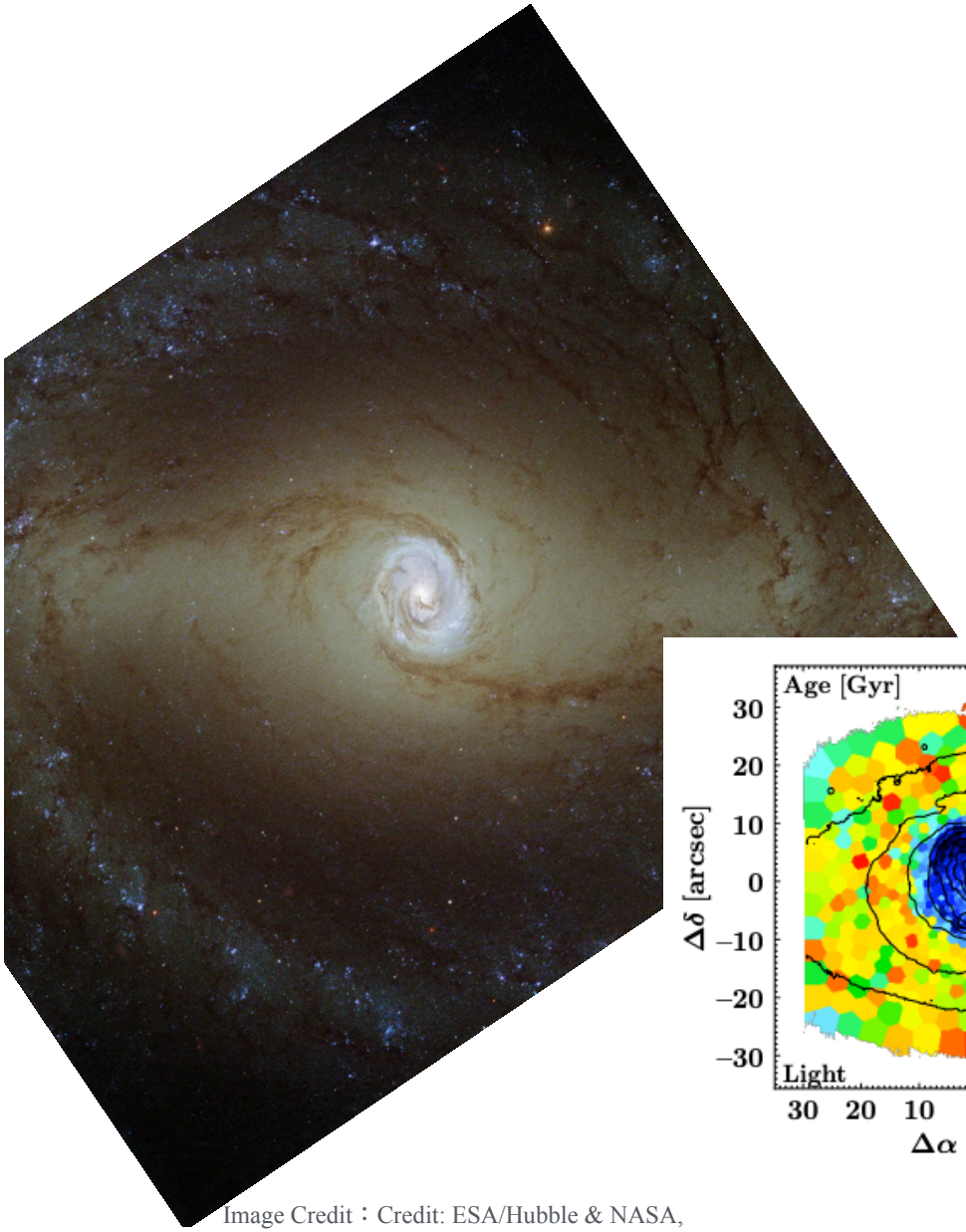


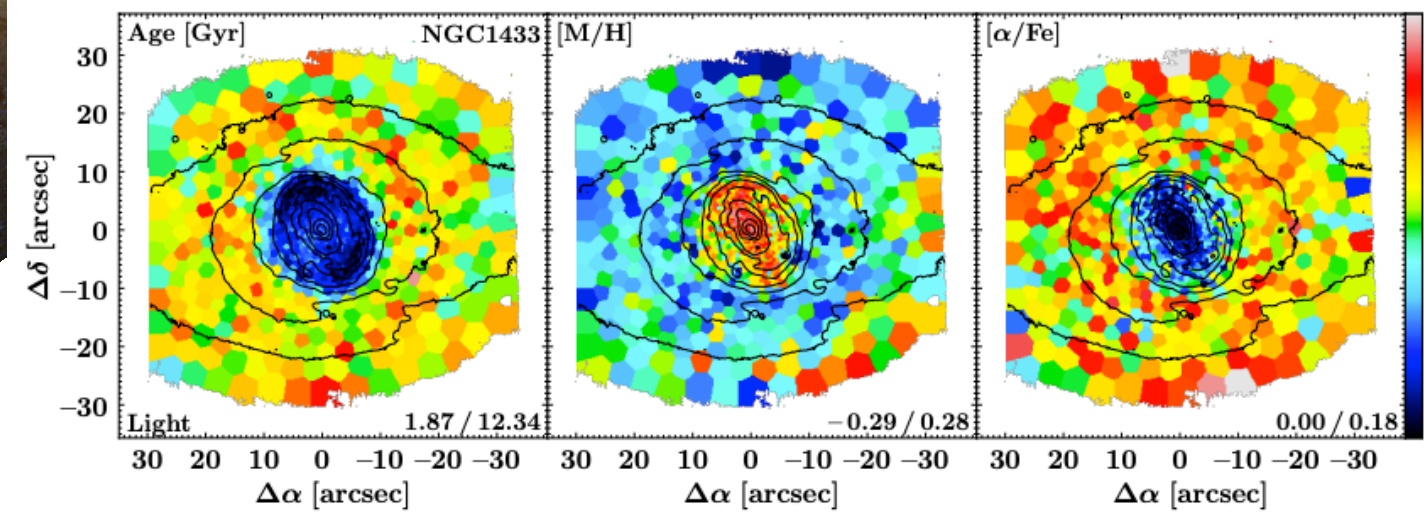
Image Credit：Credit: ESA/Hubble & NASA,
Acknowledgements: D. Calzetti (UMass) and the LEGUS Team

Time Inference with MUSE in Extragalactic Rings

Gadotti et al. (2019)

https://www.muse-timer.org/

younger, more metal-rich, lower velocity dispersions than the surrounding bar stars



Bittner et al. (2020); Gadotti et al. (2020)