

高精度位置天文観測時代の棒状構造・渦状腕研究

朝野哲郎¹・馬場淳一²

〈¹ 東京大学理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈² 鹿児島大学大学院理工学研究科附属天の川銀河研究センター 〒890-8580 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-24〉

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: ¹ t.asano@astron.s.u-tokyo.ac.jp, ² babajn2000@gmail.com

われわれ人類の住む銀河である「天の川銀河」は宇宙に遍く存在する「棒渦巻銀河」の一種である。しかし、この事実が確立するまでには、系外銀河よりも時間がかかった。これは、天の川銀河は他の系外銀河では到達不可能な高い分解能で詳細に調べることが可能である一方で、われわれがその内部に位置し、天の川銀河の全体像を見渡すことが簡単ではないためである。しかし、2014年に科学運用を開始した位置天文観測衛星「Gaia」(ガイア)の革新的な位置天文観測データにより、天の川銀河の恒星系成分の理解が飛躍的に進展しつつある。本稿では、筆者らのGaiaデータと大規模数値シミュレーションデータを用いた研究に基づき、天の川銀河の基幹構造である渦状腕や棒状構造に関する理解の到達点と今後の課題点を整理し、赤外線位置天文観測衛星計画「JASMINE」への期待を述べる。

1. はじめに

三角測量の原理に基づいて天体までの距離測定を行う観測的天文学は「位置天文学」と呼ばれ、その歴史は紀元前約150年にまで遡ることができる。1989年には、大気ゆらぎの影響を避けるために世界初の位置天文観測衛星「ヒッパルコス」が打ち上げられ、1/1000秒角精度で約10万個の星の位置天文観測に成功し、多くの知見をもたらした [1]。しかし、測定された星は太陽系近傍の約100 pc程度のものであり、銀河系中心までの距離の約8 kpcに比べて1%程度の非常に狭い領域のものであった。2014年にはヒッパルコス衛星の後継機である位置天文観測衛星「Gaia」 [2] が科学運用を開始し、約1/100ミリ秒角精度 (= 1/10万秒角精度) で約10億個の星の正確な位置天文観測を達成している。2022年6月に第3期

データが公開され、最終カタログは2020年代後半に公開が予定されている。

特に、2018年4月に公開された第2期データ (Gaia DR2) のインパクトは大きく、太陽近傍の大量の星の詳細な位置天文観測に加え、数千kpcスケールにわたり銀河円盤の鉛直方向の星の運動が測定され、大局スケールの非円運動速度構造や銀河面震動 [3-5] が発見されるに至った。これにより、本稿の主題でもある天の川銀河の渦状腕構造や棒状構造の研究も大きく進展しつつある。

天の川銀河に渦状腕構造の存在が指摘されたのは、1950年代初頭である [6]。その後も多くの研究により、太陽近傍の数kpc以内には「いて-りゅうこつ腕」と「ペルセウス腕」と呼ばれる主要な腕構造が存在し、これら2つの主要な腕の間に「局所腕」(または「オリオン腕」と呼ばれる小さな腕が存在することが、HII領域やOB型星、

星形成領域などの観測から示唆されてきた [7, 8]. 近年では, HIやCO輝線の運動学的距離マップ [9] (中西裕之氏の2021年2月号記事も参照) や電波VLBI位置天文観測による大質量星形成領域(メーザー天体) [10, 11] といった若い天体でトレースした天の川銀河広域の渦状腕構造が明らかになってきた(図1(a)). ここ数年は, Gaiaデータの活躍により星成分の観測が進み, ペルセウス腕周辺の非円運動速度場 [12], 局所腕の星密度マップ [13] の研究も進みつつある.

一方で, 棒状構造(バー)の存在への明確な示唆が得られたのは, 渦状腕構造の発見よりも半世紀ほど後の1990年頃である. 1970年代から銀河系中心方向広域の赤外線観測が進展し, 銀河系バルジは銀経方向に非対称であることが指摘された [14, 15]. この非対称性は銀河系中心の棒状構造が存在し, 太陽系はその長軸方向から数10度程度傾いた方向に位置しているためと考えられた(図1). 現在では, Gaiaの位置天文観測と地上望遠鏡による測光・分光サーベイをもとにして棒状構造領域の星の距離を推定し, 棒状構造の空間分布 [16] や非円運動速度場 [17] も得られており, 天の川銀河の棒状構造の存在が確立されたと言える. また, Gaiaデータによる棒状構造のパターン速度(Ω_b)*¹の推定 [18, 19] も進んできた. 次の大きな課題は, 天の川銀河の棒状構造の形成時期(年齢)の推定であろう.

このような天の川銀河研究の進展の背景には, Gaiaの革新的データの公開に加え, 数値シミュレーションの発展も大きな役割を果たしてきた. 例えば, 天の川銀河の数値シミュレーションとメーザー天体のVLBI測量との比較による渦状腕構造の研究 [20] などが挙げられる. 近年では,

ガスを無視したモデルであるが, ダークマターもN体で扱ったディスク+バルジ+ハローの自己無撞着な10億粒子規模の世界最高レベルの大規模N体シミュレーション [21] にも成功し, Gaiaデータとの比較において重要な役割を果たしてきた [18, 22]. ガスを考慮した数値シミュレーションでは星の年齢の情報も含まれるため, 観測される星の種族を限定した比較が可能であり, 現在計画が進行中である赤外線位置天文観測衛星「JASMINE」計画のサイエンスケース考案においても重要な役割を果たしてきた [23, 24]. このように, 近年の位置天文観測データに基づく科学的成果の創出において, 天の川銀河の数値シミュレーションは必要不可欠な役割を担ってきた.

本稿では, Gaiaデータと数値シミュレーションを用いた筆者らの研究をもとに, 天の川銀河の渦状腕や棒状構造に関する最新の知見を紹介する. なお, ハロー部に関しては本号の服部公平氏の記事を参照してほしい.

2. 渦状腕構造

重力ポテンシャルを担う恒星系としての渦状腕の起源の理論モデルとして, 1960年代より回転運動の振る舞いと寿命の観点から大きく2つの仮説が提唱されている [27]. 一つが渦状腕は数銀河回転周期(≥ 1 Gyr)にわたり剛体回転的に伝播する波動現象とする「準定常密度波モデル」(以降, 密度波モデル) [28] である. もう一つは渦状腕は差動回転に伴い巻き込まれながら銀河回転周期程度(100 Myr程度)で増幅・合体・分裂を繰り返す非定常構造とする「動的渦状腕モデル」 [29] である. しかしながら, 観測的検証は十分に行われていなかった.

*¹ パターン速度とは, 棒状構造(や渦状腕構造)の回転角速度である. 通常, 単位としてkm/s/kpcを用いる. 距離を表す単位としてkmとkpcが入っており, 物理学徒には気持ち悪い単位であろう. これは, 天文学では速度を通常のkm/s単位で表すのに対して, 距離をkmではなくkpc単位をつかっていることに起因する. このようにkmとkpcを残した(やや気持ち悪い)単位で角速度を表現することで, 距離をkpcからkmに変換することなく, 角速度から速度km/sを関連付けやすくできるのである.

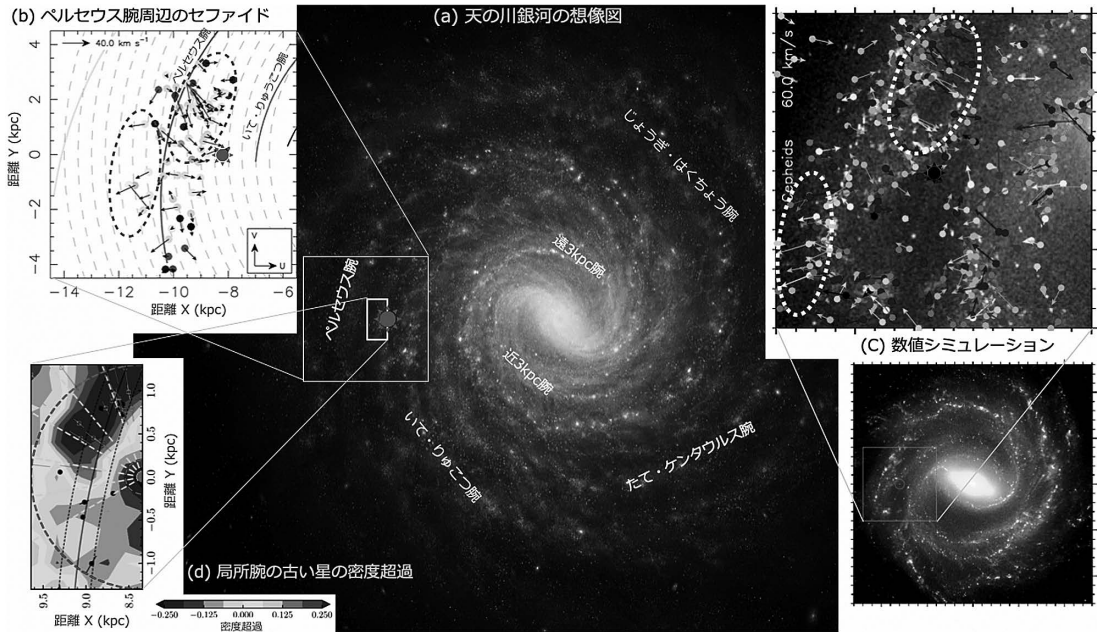


図1. (a) 最新の星形成領域の位置天文観測結果 [10] と筆者らの数値シミュレーション [25] を参考にした天の川銀河の想像図 (制作者: 岩下慎吾. Credit: NAOJ, Baba et al.) (b) ペルセウス腕周辺のセフィイドの特異運動の観測 ([12] より再編集). 破線の楕円で囲った領域で顕著にペルセウス腕から発散する特異運動を示す. (c) 数値シミュレーションの中で減衰状態にある動的渦状腕周辺での、年齢が100 Myr より若い星の特異速度分布の予測 [12]. セフィイドの観測と類似した特異速度分布が再現されている. (d) 局所腕における古い星の密度超過 ([26] より再編集)

筆者らは天の川銀河の渦状腕の動学的振る舞いを明らかにすべく、2016年9月に公開された Gaia 初期データ (Gaia DR1) と Tycho-2 カタログに基づく固有運動データ (Tycho-Gaia Astrometric Solution; TGAS) と視線速度の文献データを利用して「ペルセウス腕」周辺に分布する77個のセフィイドの特異速度 (銀河回転からずれた非円運動速度) を調べた. その結果、ペルセウス腕に対して発散していくような特異速度分布が得られた (図1(b)). このように渦状腕に対して発散していくような特異速度分布は、減衰期にある動的渦状腕モデルで自然に説明することができる (図1(c)).

ペルセウス腕周辺での発散するようなセフィイドの特異速度分布は、ガスの視線速度場 [30] や Gaia DR3 の赤色巨星の速度場でも得られている

[17]. また、Gaia の赤色巨星の密度超過マップに基づくと、ペルセウス腕はメーザー天体から決めたものよりも大きなピッチ角である可能性も指摘されている [31]. さらに興味深いことに、最近、中性水素原子ガスの銀経-視線速度図 ($l-v$ 図) 構造に基づきペルセウス腕は存在しない可能性も指摘されている [32]. ペルセウス腕は破壊過程にあるだけではなく、そもそも存在しないのかもしれない.

主要な腕構造であるペルセウス腕の他に、太陽系に最も近い「局所腕」に関する研究も進展した. 局所腕は一般に比較的弱く、「いてりゅうこつ腕」から枝分かれした小枝のような構造である「スパー (spur)」に相当するものであると考えられてきた. しかし、近年の星形成領域の VLBI 観測により、全長5 kpcにまで及ぶ主要な腕の可能

性が指摘されるようになった [33]. 筆者らは Gaia DR2 データを用いて、星形成領域から示唆される局所腕に、古い星（年齢 1 Gyr 程度）からなる密度超過が付随する可能性を指摘した [13] (図 1(d)). さらに、今回の Gaia データの解析で明らかになった局所腕の恒星密度超過と VLBI 観測で得られた星形成領域の空間分布を比較し、両者の間に大きな空間的オフセットがあることが示唆された. このようなオフセットは密度波モデルの予測 [34] に矛盾しない. しかし、局所腕の大きなピッチ角は、成長段階にある動的渦状腕の振る舞い [29] の可能性もある.

3. 銀河系円盤広域の非円運動速度構造

筆者らは 2018 年 4 月に Gaia DR 2 が公開された当日、星の回転速度を銀河系中心からの距離ごとにみるという単純解析により、波のような速度構造（右下がりの複数の筋模様）を新しく発見した [3] (図 2(a)). これは銀河円盤の速度構造に kpc スケールの非円運動が存在することを意味しており、棒状構造などによる影響であると考えられて

いる（後述）. さらに、銀河円盤に鉛直方向の速度にも大きな振動のような構造も発見された. これは銀河円盤が大きく震動していることを意味し（銀河円盤の震動なので、「銀震」と呼ばれる）、その起源として、いて座矮小銀河からの潮汐力が有力視されている [4]. 銀河系円盤は面内方向にも鉛直方向にも大きく揺れているのである.

このような銀河スケールの速度場の歪みに加え、太陽近傍の星の速度構造にもこれまでよりも詳細な構造が多数発見されてきた. 図 2(b) は、Gaia DR3 [35] のデータをもとに作成した太陽から 200 pc 以内の星の速度空間分布である. この図から、星が密に分布した複数の領域が確認できる [36]. これらは、「運動集団 (moving group)」や「速度空間サブ構造」「ストリーム」と呼ばれている. ヒッパルコス衛星で調べられたものに「ヒヤデス・ストリーム」「プレアデス・ストリーム」「シリウス・ストリーム」や「ヘラクレス・ストリーム」があり、Gaia によって新たに「かみのけ座運動集団」や「ホーン運動集団」「ハット運動集団」なども発見された. 特に興味深いこ

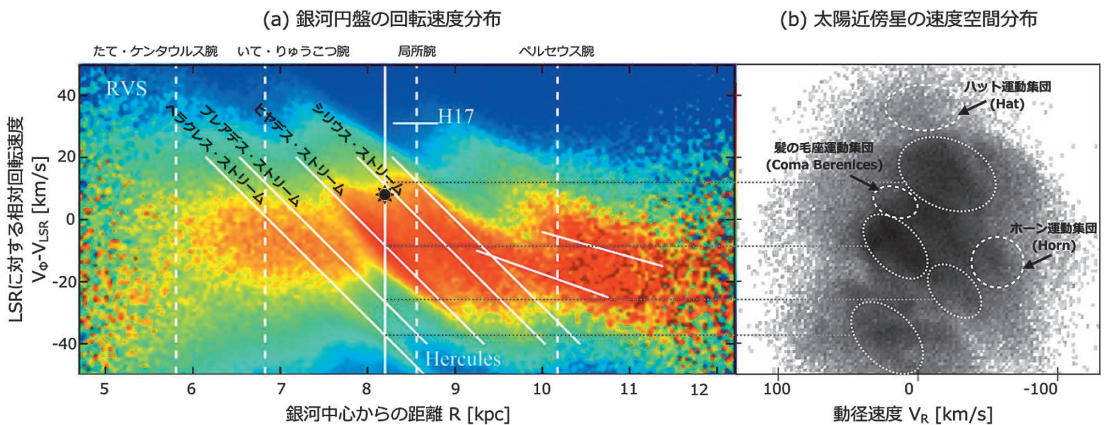


図 2. (左) 筆者らによる Gaia DR2 を用いた銀河円盤の回転速度の動径分布 ([3] より改編). 銀経 0 度から 180 度を結ぶ直線方向にある銀河円盤の星の回転速度 V_ϕ を銀河中心からの距離 R の関数としてプロットしてある. 色の濃さは星の数を示している. 右下がりの実線は、筆者らが同定したコヒーレントな構造を示す. (右) Gaia DR3 に基づく太陽近傍星の速度空間分布. V_R と V_ϕ は、それぞれ銀河中心を原点とする円筒座標系での動径方向の速度と方位角方向の速度. 点線で示されているのは、以前から知られている主要な運動集団であり、左図のストリーム構造と対応づいている. また、破線で示されているのは新たに見つかった運動集団（ハット運動集団、髪の毛座運動集団、ホーン運動集団）である.

とに、ヒッパルコス衛星の観測では一つの運動集団と思われていたヘラクレス・ストリームは、複数本に分かれていることもわかってきた。

ここでの大きな発見は、これらの太陽近傍の運動集団が銀河スケールにわたりコヒーレントにつながっていることである (図2(a)). つまり、太陽近傍の運動集団は局所的な起源ではなく、銀河動力学構造と密接に関連した構造であることが観測的に明確になったのである. 特に、ヘラクレス・ストリームはヒッパルコス衛星による発見当初から、棒状構造による軌道共鳴^{*2} (特に外部リンドブラッド共鳴) に関連した運動集団であると考えられており [37], その起源には諸説^{*3} があるが、いずれにせよ天の川銀河の非軸対称構造と密接に関連した非円運動速度構造であることは明確である.

以下では、N体シミュレーションを用いて速度空間サブ構造と棒状構造の共鳴の関係を調べた筆者らの研究 [18, 22] を紹介する.

3.1 速度空間サブ構造と棒状構造による軌道共鳴

今回用いたN体モデル [21] は、円盤、バルジ、ダークマター (DM) ハローの3要素から構成されている. 3要素すべてについて1粒子あたりの質量は約170太陽質量であり、合計粒子数は51億体である. シミュレーションには、GPU並列のツリー法コードである Bonsai [44] を用いた. 時刻 $t=0$ に軸対称な初期条件から始めて $t=10$ Gyr まで計算されている. 図3に、 $t=10$ Gyr における銀河円盤を正面 (face on) と横 (edge on) から見た様子を示している. 銀河中心部には棒状構造を確認することができる. 回転曲線やバルジ

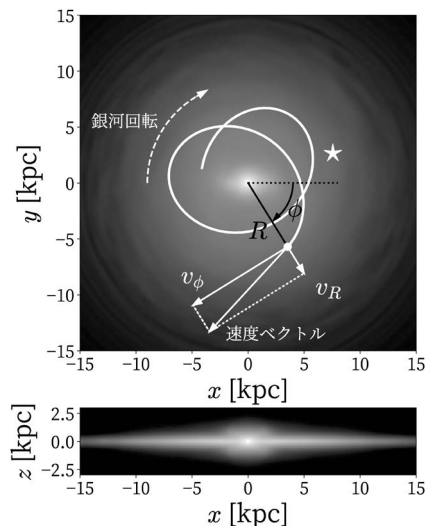


図3. Face-on (上段) と edge-on (下段) で見たN体モデルの銀河円盤. 上段のパネルにおける白色の実線は、粒子軌道の一例. 粒子の位置は、銀河中心を原点とする円筒座標系 (R, ϕ) で表現する. $\phi=0$ は棒状構造の長軸の方向と一致するようにとる. 速度ベクトルも円筒座標系の動径成分 v_R と方位角成分 v_ϕ に分解して表現する.

領域の視線速度分散など円盤・バルジの基本的な力学構造は近年のMWの観測と整合的である.

シミュレーションデータ解析として、はじめに、銀河中心からの距離 R と棒状構造の長軸に対する角度 ϕ を変えながら、銀河円盤の様々な場所で図2と同様の速度空間分布を作成した. 観測とN体モデルの速度空間分布を目視で比較したところ、図5のように $R=8$ kpc, $\phi=-20^\circ$ でヘラクレスストリームのような構造を有する速度空間分布を発見した. 他にも、図2(b) 中のハットやホーンに類似したサブ構造も確認できる. $R=8$ kpc,

^{*2} 銀河系のなかを周回運動する星が棒状構造と周期的に会合することにより棒状構造からの重力を同じように受けて、軌道が大きく変化する (または、特定の軌道状態に捕捉される) 現象を示す. 例えば、ブランコを星、そしてそれに乗って足で漕いでいる人を棒状構造と考えると、ブランコの動きに合わせて足を漕ぐ方が大きく揺れるというのと同じ現象である.

^{*3} ページ数の都合上、詳細は割愛するが、高次のバー共鳴 [38, 39], 渦状腕の共鳴 [40], 棒状構造と渦状腕の複合的な摂動 [41, 42] でもヘラクレス・ストリームやその他のサブ構造を説明することができる. さらに、棒状構造の回転が減速する効果を考慮することで、 v_R について非対称なヘラクレス・ストリームの構造を説明するモデルも提唱されている [43].

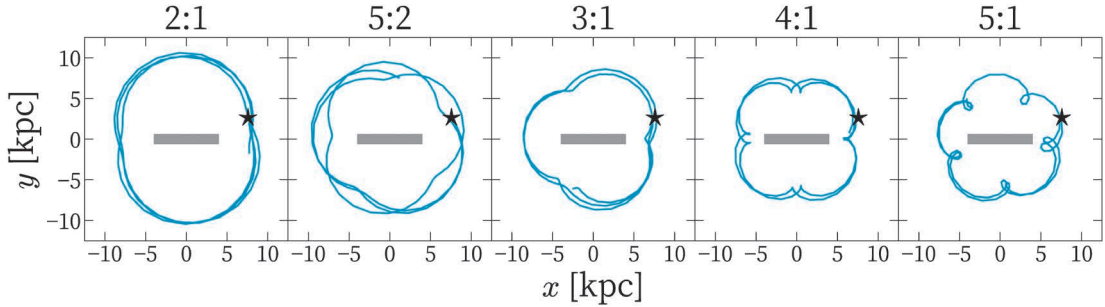


図4. 棒状構造の共鳴に束縛された軌道の一例. 2:1, 5:2, 3:1, 4:1, 5:1共鳴に束縛された軌道を棒状構造とともに回転する座標系で表示している. 灰色の長方形は棒状構造の長軸の方向を示している. 星印は「太陽」の位置.

$\phi = -20^\circ$ をN体モデルにおける「太陽」の位置として定義する.

次に, 軌道解析のために, 「太陽近傍」の粒子の位置を600 Myrにわたって追跡した. 軌道のフーリエ解析などによって, 各粒子に対して動径方向の振動数 Ω_R と方位角方向の振動数 Ω_ϕ を求めた.

$$m(\Omega_\phi - \Omega_b) + l\Omega_R = 0 \quad (m, l \text{は整数}) \quad (1)$$

を満たすような軌道を棒状構造の $m:l$ 共鳴と呼ぶ(ここで Ω_b はバーのパターン速度を表す). 振動数比 $(\Omega_\phi - \Omega_b)/\Omega_R$ が $-l/m$ から ± 0.01 の範囲にあるものを $m:l$ 共鳴に束縛されている軌道として選択した. 図4に, 2:1, 5:2, 3:1, 4:1, 5:1共鳴に束縛された軌道の一例を示す. $m:l$ 共鳴は, 棒状構造とともに回転する座標系で銀河中心周りを一周する間に動径方向に m/l 回振動するような軌道である.

速度空間分布(図5)に共鳴軌道の位置を重ねてプロットしたものが図6である. それぞれの共鳴に束縛された粒子たちの分布がサブ構造と対応していることがわかる. 2:1, 5:2, 3:1共鳴は, それぞれハット, シリウスストリーム, ホーンに相当するサブ構造を形作っている. ヘラクレスストリームは, 4:1と5:1の2つの共鳴から構成されている. ヘラクレスストリームを複数の共鳴の重ね合わせで説明するこのモデルは, ヘラクレスストリームが内部構造を持つというGaiaによる

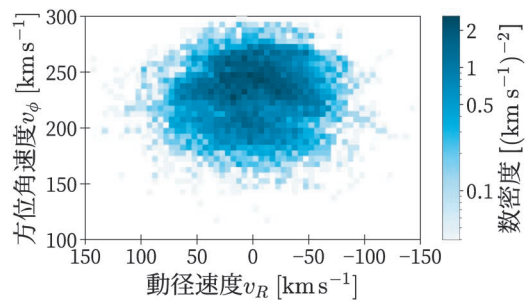


図5. N体モデルにおける「太陽近傍」での速度空間分布.

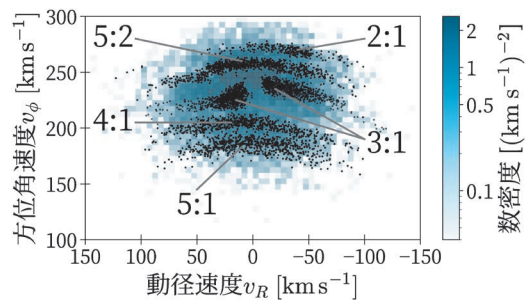


図6. 速度空間サブ構造と棒状構造の共鳴の関係.

発見とも整合的である.

このようなサブ構造とバーの共鳴の対応関係が成り立つために必要なバーのパターン速度は, $40\text{--}45 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ である. このパターン速度に対して, バーの主要な共鳴である共回転共鳴(Corotation Resonance; CR)と外部リンドブラッド共鳴(Outer Lindblad Resonance; OLR)^{*4}の共鳴半径はそれぞれ, $R_{\text{CR}} \sim 5.3\text{--}6 \text{ kpc}$, $R_{\text{OLR}} \sim$

9-10 kpcに位置する。われわれの太陽系は、これらの共鳴半径の間に位置することになる。

3.2 速度空間分布の時間変動

ここまで、一つの時刻のスナップショットを詳細に解析し、棒状構造の共鳴と速度空間サブ構造の関係を調べた。ここでは、速度空間分布の時間的な変動に着目し、棒状構造の共鳴とサブ構造の対応関係が普遍的なものであるのか議論してみたい。モデルと観測の速度空間分布の類似度を定量的に評価するために、確率分布間の乖離度を測る指標である Kullback-Leibler divergence (KLD) を導入する。はじめに、図2の v_R-v_ϕ 速度空間を格子状に K 個に分割する。太陽から 200 pc 以内の星について、 i 番目の速度空間領域に含まれる星の数を n_i 、星の総数を $N = \sum_{i=1}^K n_i$ として、ある星が領域 i に属する確率を $p_i = n_i/N$ で定義する。N 体モデルでも、時刻 t と位置 (R, ϕ) を動かしながら、同様にして確率分布 q を求める。確率分布 p と q の間の KLD は、

$$\text{KLD} = \sum_{i=1}^K p_i \log \frac{p_i}{q_i} \quad (2)$$

と書ける。KLD は、(1) 常に非負値をとり、(2) p と q が同じ分布の場合のみゼロとなる、という性質を満たすことから、確率分布間の「距離」のようなものとして理解される。つまり、モデルの速度空間分布 q が実際の太陽近傍の速度空間分布 p をよく再現するほど、KLD の値は小さくなる。

図7は、 $(R, \phi) = (7, -25^\circ), (8, -25^\circ), (9, -25^\circ)$ での KLD の時間変化を示している。図8の棒状構造のパターン速度・強度^{*5}の時間変化と見比べると、KLD が棒状構造の進化と対応していることがわかる。 $t \sim 3$ Gyr で KLD が急激に

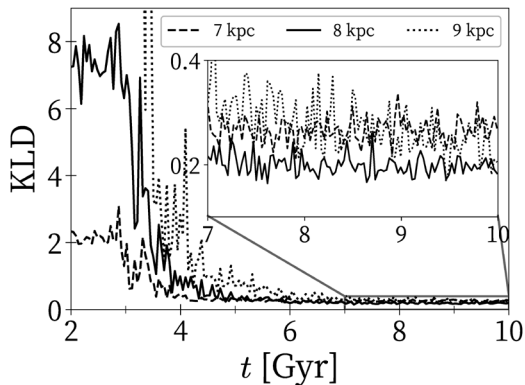


図7. $R=7$ (破線), 8 (実線), 9 (点線) kpc での KLD の時間変化。棒状構造に対する角度は、3つの半径全てで $\phi = -25^\circ$ に固定している。

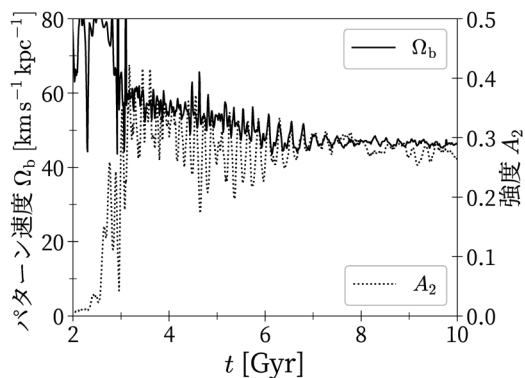


図8. 棒状構造のパターン速度 (実線) と強度 (点線) の時間変化。

減少し始めるが、この時刻はN体モデルでの棒状構造形成の時期に対応する。棒状構造の減速が起きている $t \sim 3$ Gyr から ~ 7 Gyr までは、KLD は振動を伴いつつ低下している。 $t \sim 7$ Gyr 以降、KLD の値は比較的安定していて、特に $R=8$ kpc で小さな値を示している。ただし、この期間も KLD の振動は続いていて、N 体モデルの $R=8$ kpc では、太陽近傍の速度空間分布に似たものが見つかりやすい傾向にあるが、常に類似度が高

*4 共回転共鳴は $l=0$ ($\Omega_\phi = \Omega_b$) 共鳴、外部リンドブラッド共鳴は $2:1$ 共鳴と同一のものである。

*5 棒状構造のパターン強度とパターン速度は、面密度分布のフーリエ級数展開から定義する。半径ごとに規格化した銀河円盤の面密度 $\Sigma(R, \phi)/\Sigma_0(R)$ を $\Sigma(R, \phi)/\Sigma_0(R) = \sum_{m=0}^{\infty} A_m(R) \exp\{im[\phi - \phi_m(R)]\}$ のように展開する。 $1 < R < 2$ kpc での $m=2$ のモード振幅 A_2 を棒状構造の強度、位相角 ϕ_2 の単位時間あたりの変化量をパターン速度として定義する。

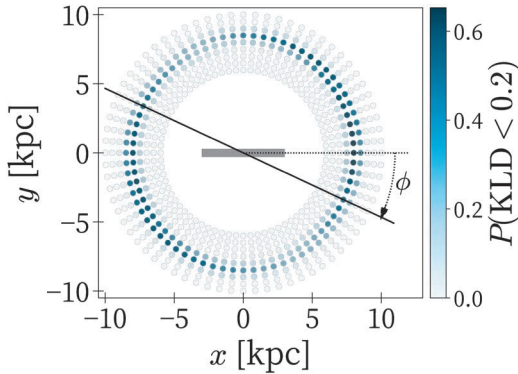


図9. N体モデルでの小さなKLDを持つ(太陽系近傍の速度空間分布に類似した)速度空間分布の出現確率. 丸印はKLDを測定した地点を示している. 色はKLD<0.2の速度空間分布の出現確率を表す. 灰色の長方形は棒状構造の位置を表す. 棒状構造の長軸と一致するように方位角の原点を取る ([22]より再編集).

いわけではないことを示している.

N体モデル内のどの場所で、KLDが小さい(太陽近傍の星の速度空間分布に類似した)速度空間分布が見つかりやすいかを調べるため、 $t=7$ Gyr以降、N体モデル内の様々な場所で速度空間分布のKLDを測定した. 図9の丸印はKLDを測定した地点を表している、色はKLD<0.2の速度空間分布の出現確率(頻度) $P(KLD<0.2)$ を示している. 閾値として選んだ0.2という値については、目視で類似度を判定した図5の速度空間分布のKLDが0.2であることに由来する. 高い $P(KLD<0.2)$ を示す地点が、 $R\sim 8$ kpcに集中していることがわかる. また、 $P(KLD<0.2)$ は R だけでなく ϕ にも強く依存している. 図10上段のヒストグラムは、KLD<0.2の速度空間分布が検出された回数 $N(KLD<0.2)$ を、棒状構造に対する角度 ϕ の関数として表している. R ごとにピークの位置が異なっていて、太陽と銀河中心の間の距離に相当する $R=8.2$ kpcでは、KLDの小さな速度空間分布が最も頻繁に発見されるのは $\phi\sim -30^\circ$ であった. これは、観測的に推定されている棒状構造に対する太陽の相対位置 [45]

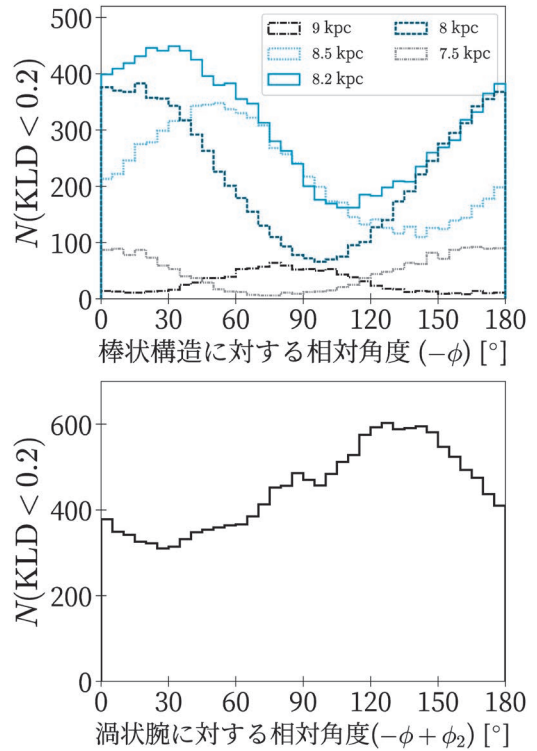


図10. KLD<0.2の速度空間分布の出現回数 $N(KLD<0.2)$ の角度依存性. (上) $N(KLD<0.2)$ を棒状構造の長軸に対する相対角度の関数として表している. 線種は、銀河中心からの距離($R=7.5, 8, 8.2, 8.5, 9$ kpc)の違いを表している. (下) $N(KLD<0.2)$ を渦状腕に対する相対角度の関数として表している. 渦状腕の位置は面密度の $m=2$ のモードの位相角 $\phi_2(R)$ で定義する. ここでは角度依存性のみに着目するため $R=8$ kpcと 8.5 kpcのヒストグラムを足し合わせて表示している.

と一致する. KLDの (R, ϕ) 依存性は、速度空間分布が少なからず棒状構造の共鳴の影響を受けていることを示唆している. 共鳴に束縛された星たちも銀河円盤内にランダムに分布しているわけではなく、軌道種族ごとに固有の (R, ϕ) 依存性を持つ [46]. これが速度空間構造とKLDにも反映されていると考えられる. また、前節と同じようにして軌道解析を行ったところ、特に小さなKLDを示す速度空間分布については、目視でもヘラクレスストリームのような構造が見られると

もに、図6と同じ棒状構造の共鳴とサブ構造の対応関係が見られた [22].

図10下段は、 $KLD < 0.2$ の速度空間分布の検出回数を渦状腕に対する相対角度の関数として示している。渦状腕の位置を面密度の $m=2$ のモードの位相角で定義している。腕 (0° と 180°) から離れた場所で、KLDの小さな速度空間分布の出現頻度が高いことがわかる。このことは、太陽系がMWの主要な腕から離れた場所に位置していることと整合的である。渦状腕近傍では、その摂動によって棒状構造の影響が相対的に弱められていると推測される。図7で見られるKLDの振動も渦状腕に起因するものだと考えられる。改めて

強調しておくが、このような非定常的な状況でも、棒状構造は円盤星の運動に強い影響を与えていて、ヘラクレスストリームに代表される速度空間サブ構造は、棒状構造の共鳴によって合理的に説明される。

4. 棒状構造の形成進化

ここまで述べてきたように、近年の大規模分光測光サーベイとGaiaの革新的高精度データにより、天の川銀河の棒状構造の「現在の」動力学的性質が明らかになってきた [18, 19, 47, 48]. しかしながら、棒状構造がいつ形成され、どのように進化してきたのかの理解ははまだほとんど進んで

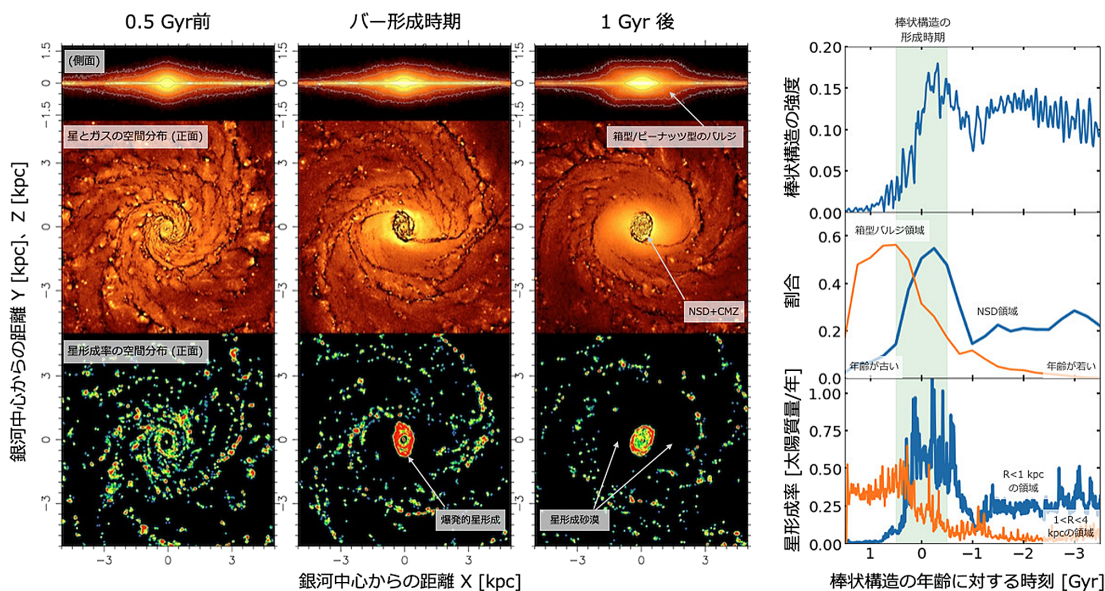


図 11. アテルイ II を用いてシミュレーションした天の川銀河の棒状構造の形成進化の様子 [23, 24]. (左) 上段が銀河面を真横から見た星の分布、中段が銀河を正面から見た星の分布とガスの分布 (黒). 下段が銀河を正面から見たときの星形成の活発さを表したもので、色の濃い部分 (カラー版では赤い部分) ほど星形成が活発なことを示す。左から棒状構造形成の5億年前、棒状構造形成期 (0年)、10億年後の様子をそれぞれ示した。棒状構造が形成され始めると、中心核バルジ部分 (中心の1 kpc程度の領域) にガスが集まり、星形成が活発になる。一方、棒状構造 (中心から1-3 kpc程度の間) のガスは徐々になくなり、10億年後では棒状構造でほとんど星が作られていない (星形成砂漠) ことがわかる。また、棒状構造を真横から見ると (上段)、次第に箱型またはピーナッツ形状になっていくこともわかる。(右) 上から、棒状構造の強度の時間変化、中心核ディスク/箱型バルジ領域に含まれる星の年齢の頻度分布、銀河中心からの距離 $R < 1$ kpc と $1 < R < 3$ kpc の星形成率の時間変化、時間は棒状構造の形成時期に相対的な値としてあり、値が大きいほど過去を意味する。中心核バルジでは棒状構造の形成時期より若い星が多く、銀河面から離れた棒状構造の領域 (箱型バルジ領域) では逆に古い星が多いと期待される。

いない。これは棒状構造は銀河円盤から生じる動力学構造であるため、棒状構造を構成する星の年齢が単純には棒状構造形成の時期には一致しないことに起因する。

棒状構造形成は銀河円盤の自発的不安定性などにより生じ、銀河円盤全体を大きく歪ませる激しく「突発的」な動力学現象である [49]。そのため、棒状構造形成期には銀河内の星・ガスの運動は大きくかき乱される。例えば、もし棒状構造が太陽系よりも後に形成されれば、太陽系は棒状構造形成期に大きく軌道移動して、現在の位置まで到達する可能性も考えられる。また、棒状構造形成により星間ガスは角運動量を失いバルジ領域に一気に流れ込み、バルジ領域で爆発的星形成を誘発することで、「中心核ディスク (Nuclear Stellar Disk; NSD)」と呼ばれる新たな力学構造ができあがる [23]。この進化シナリオに基づく、中心核ディスク星の星形成史・化学進化史には「棒状構造形成の情報」が刻まれることが期待される。

図 11 は、筆者らによる天の川銀河の N 体/SPH シミュレーションの結果である*⁶。棒状構造が計算開始から 1 Gyr 後くらいから形成され始め、約 1.5 Gyr にはほぼ完成している (中段)。この棒状構造の形成開始と同時に、中心の 1 kpc 以内程度の領域に大量のガスが流入し爆発的星形成を引き起こし (下段)、新たに中心核ディスク (NSD) が形成されることがわかるであろう (中段)。実際に天の川銀河の中心 200 pc 程度以内に NSD が観測されている [50]。一方で、棒状構造となった領域では星間ガスが枯渇するため、星形成活動は急激に低下することになる [24]。

このように棒状構造の形成により、天の川銀河内での星形成活動が領域によって異なるという「星形成活動の分画化現象」が引き起こされる可能性がある [24]。棒状構造形成時に爆発的に星が生まれる領域と星形成活動が不活発な領域がで

きることで、構造内の異なる領域で全く異なる星の年齢構成を示すことが期待されるのである (図 11 右側)。このような年齢分布の違いを観測的に明らかにすることで、天の川銀河の棒状構造がいつ形成されたのかを推定できるであろう。

5. 今 後

本稿では、筆者らの研究を中心に、Gaia データおよび数値シミュレーションに基づく天の川銀河の棒状構造と渦状腕構造の研究を紹介してきた。最後に現在の到達点と今後の課題を述べておきたい。

棒状構造に関しては、3.1 節で紹介したように Gaia により現在のパターン速度の推定 [18, 19] が進んだが、棒状構造の形成時期や減速史はまだまだ不明である。筆者らが棒状構造形成時期の指標として予測する、箱型バルジと中心核ディスク領域の星の年齢分布の違いを観測的に得るためには、地球から観測した星がどの距離にあり、どのような運動をしているのかを知ることが不可欠である [23]。外側の箱型バルジ領域は Gaia によりある程度観測することが可能であるが [51]、中心核ディスクの領域は星間物質によって可視光線が強く吸収されるので、Gaia の可視光帯観測では星の運動を測定できない。そのため、中心核ディスク星の位置天文観測には、赤外線位置天文観測衛星「JASMINE」が重要となる。特にミラ型変光星を観測することで、その周期-年齢関係から星の年齢も推定することができると期待される [52]。

2 章で述べたように、渦状腕モデルとしては大きく 2 つある。古典的な密度波モデルでは渦状腕は剛体回転的であるため、パターン速度が一意に決まる一方で、動的渦状腕モデルでは渦状腕は銀河差動回転により巻き込まれるので、パターン速度は銀河中心からの距離にほぼ反比例するような分布を示すと期待される。そのため、渦状腕のパ

*⁶ 国立天文台 4D2U により可視化された棒状構造形成の動画「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」: <https://www.youtube.com/watch?v=Shucn3Hllow>

ターン速度の半径依存性を観測的に制限することが理論モデルの検証につながる [27]. 近年では散開星団の Gaia データに基づき星団の誕生位置を算出することで過去の渦状腕の位置を推定し、現在の位置との比較からパターン速度を推定する研究が行われており、銀河外縁部の渦状腕ほど遅く回転している可能性も報告されている [53]. この観測結果を信じると、動的渦状腕が支持されることになる. 一方で、同様に星団の誕生位置の解析からパターン速度を推定し、剛体回転的で長寿命な密度波であるとする主張もあり [54, 55], 議論は収束していない. 議論の収束を得られない要因は、そもそも未だに渦状腕の正確な本数や位置が不定であることであろう [11, 31, 56, 57]. 天の川銀河の渦状腕の観測的な理解が十分に進展していないのは、Gaia は星間減光が強い銀河面内の星を十分に精度よく位置天文観測ができないためである. 星成分としての渦状腕構造の理解のためには、Gaia のように全天の赤外線位置天文観測が必要であり、Gaia の後継機として検討されている赤外線位置天文観測衛星「GaiaNIR」計画に期待したい.

謝 辞

本稿で紹介した筆者らの研究は、主に河田大介氏、藤井通子氏らとの共同研究に基づいています. また、筆者（馬場）の数値シミュレーションはすべて N 体/SPH シミュレーションコード ASURA（開発者神戸大学・斎藤貴之氏）を用いて、国立天文台天文シミュレーションプロジェクト CfCA の共同利用計算機アテルイ-II で実行して得たものです. この場を借りて感謝いたします. なお、本研究は主に科研費（18K03711, 21K03633, 22H01259）と学振（22J11943）の支援を受けて行われたものです. 最後に、この原稿を作成するにあたってお世話になった、天文月報編集委員の川中宣太氏に感謝いたします.

参考文献

- [1] Perryman, M., 2012, *Astronomical Applications of Astrometry* (Cambridge University Press, Cambridge)
- [2] Gaia Collaboration, et al., 2016, *A&A*, 595, A1
- [3] Kawata, D., et al., 2018, *MNRAS*, 479, L108
- [4] Antoja, T., et al., 2018, *Nature*, 561, 360
- [5] Ramos, P., et al., 2018, *A&A*, 619, A72
- [6] Morgan, W. W., et al., 1952, *AJ*, 57, 3
- [7] van de Hulst, H. C., et al., 1954, *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 12, 117
- [8] Geogelin, Y. M., & Geogelin, Y. P., 1976, *A&A*, 49, 57
- [9] Nakanishi, H., & Sofue, Y., 2016, *PASJ*, 68, 5
- [10] Reid, M. J., et al., 2019, *ApJ*, 885, 131
- [11] Shen, J., & Zheng, X.-W., 2020, *Res. Astron. Astrophys.*, 20, 159
- [12] Baba, J., et al., 2018, *ApJ*, 853, L23
- [13] Miyachi, Y., et al., 2019, *ApJ*, 882, 48
- [14] Blitz, L., & Spergel, D. N., 1991, *ApJ*, 379, 631
- [15] Nakada, Y., et al., 1991, *Nature*, 353, 140
- [16] Anders, F., et al., 2019, *A&A*, 628, A94
- [17] Gaia Collaboration, et al., 2022a, *arXiv e-prints*, arXiv:2206.06207
- [18] Asano, T., et al., 2020, *MNRAS*, 499, 2416
- [19] Kawata, D., et al., 2021, *MNRAS*, 508, 728
- [20] Baba, J., et al., 2009, *ApJ*, 706, 471
- [21] Fujii, M. S., et al., 2019, *MNRAS*, 482, 1983
- [22] Asano, T., et al., 2022, *MNRAS*, 514, 460
- [23] Baba, J., & Kawata, D., 2020, *MNRAS*, 492, 4500
- [24] Baba, J., et al., 2022, *MNRAS*, 513, 2850
- [25] Baba, J., et al., 2017, *MNRAS*, 464, 246
- [26] Minniti, J. H., et al., 2021, *A&A*, 654, A138
- [27] Dobbs, C., & Baba, J., 2014, *PASA*, 31, e035
- [28] Lin, C. C., & Shu, F. H., 1964, *ApJ*, 140, 646
- [29] Baba, J., et al., 2013, *ApJ*, 763, 46
- [30] Tchernyshyov, K., et al., 2018, *AJ*, 156, 248
- [31] Poggio, E., et al., 2021, *A&A*, 651, A104
- [32] Peek, J. E. G., et al., 2022, *ApJ*, 925, 201
- [33] Xu, Y., et al., 2016, *Sci. Adv.*, 2, e1600878
- [34] Baba, J., et al., 2015, *PASJ*, 67, L4
- [35] Gaia Collaboration, et al., 2022b, *arXiv e-prints*, arXiv:2208.00211
- [36] Gaia Collaboration, et al., 2018, *A&A*, 616, A11
- [37] Dehnen, W., 2000, *AJ*, 119, 800
- [38] Monari, G., et al., 2019, *A&A*, 626, A41
- [39] Hunt, J. A. S., & Bovy, J., 2018, *MNRAS*, 477, 3945
- [40] Khoperskov, S., & Gerhard, O., 2022, *A&A*, 663, A38
- [41] Hunt, J. A. S., et al., 2018, *MNRAS*, 481, 3794
- [42] Hattori, K., et al., 2019, *MNRAS*, 484, 4540
- [43] Chiba, R., et al., 2021, *MNRAS*, 500, 4710
- [44] Bédorf, J., et al., 2012, *J. Comput. Phys.*, 231, 2825
- [45] Bland-Hawthorn, J., & Gerhard, O., 2016, *ARA&A*,

54, 529

- [46] Ceverino, D., & Klypin, A., 2007, MNRAS, 379, 1155
- [47] Sanders, J. L., et al., 2019, MNRAS, 488, 4552
- [48] Bovy, J., et al., 2019, MNRAS, 490, 4740
- [49] Sellwood, J. A., 2014, Rev. Mod. Phys., 86, 1
- [50] Launhardt, R., et al., 2002, A&A, 384, 112
- [51] Grady, J., et al., 2020, MNRAS, 492, 3128
- [52] Sanders, J. L., et al., 2022, MNRAS, 517, 257
- [53] Castro-Ginard, A., et al., 2021, A&A, 652, A162
- [54] Dias, W. S., et al., 2019, MNRAS, 486, 5726
- [55] Hao, C. J., et al., 2021, A&A, 652, A102
- [56] Rezaei Kh., S., et al., 2018, A&A, 618, A168
- [57] Lemasle, B., et al., 2022, A&A, 668, A40

Dynamics of Galactic Bar and Spiral Arms in the Era of Gaia and JASMINE

Tetsuro ASANO¹ and Junichi BABA²

¹ *Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

² *Amanogawa Galaxy Astronomy Research Center, 1-21-24 Korimoto, Kagoshima, Kagoshima 890-8580, Japan*

² *National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: The galaxy in which humanity resides, the “Milky Way galaxy,” is a specific type of barred spiral galaxy that is prevalent throughout the universe. However, it took longer for this fact to be established than it did for extra-galaxies. This is mainly due to the fact that while the Milky Way galaxy can be studied in great detail with a resolution unattainable in other extra-galaxies, it is challenging for us, being situated within it, to survey the entire image of the Milky Way. Nevertheless, thanks to the groundbreaking astrometric data of “Gaia”, the understanding of the stellar components of the Milky Way galaxy is progressing rapidly. In this review, we will summarize, based on research utilizing Gaia data and large-scale numerical simulations, the current understanding of the spiral arm and bar in the Milky Way galaxy, and the future challenges, and express our expectations for the infrared astrometric observation satellite plan “JASMINE.”