

星の運動から探る 小マゼラン銀河の銀河相互作用

中 野 覚 矢

〈名古屋大学大学院理学研究科物理学専攻物理学領域 〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町〉
e-mail: nasatoya@a.phys.nagoya-u.ac.jp



位置天文衛星 Gaia によって得られた、小マゼラン銀河の内部の恒星の動きを紹介する。小マゼラン銀河は私たちから最も近い相互作用銀河であり、より重い大マゼラン銀河との近接相互作用によって大きく形が乱されている。ガスをトレースする若い大質量星と、星までの距離が分かる古典的セファイド変光星の小マゼラン銀河内部の運動から、銀河相互作用によって駆動された星のカオスな運動があらわになりつつある。

1. 最も近い銀河の1つ、小マゼラン銀河を探る

小マゼラン銀河^{*1}や大マゼラン銀河といえば、天の川銀河やアンドロメダ銀河に次いで有名な銀河であり、天文学に詳しくなくても名前だけは聞いたことがあるという方も少なくないだろう。実際、大小マゼラン銀河は高校の地学基礎の教科書に記載されており、SF作品などにもしばしば登場する^{*2}。では、なぜ大小マゼラン銀河はそれほどまでに有名なのだろうか。それは何より、私たちの住む天の川銀河のすぐ近くにある、極めて身近な銀河だからである。観測可能な宇宙には約2兆個以上もの銀河が存在するとされている中で、これらの銀河は私たちから最も近い部類に入り、南半球では肉眼で見える一般的な存在となっている。具体的には、小マゼラン銀河までの距離は約62 kpc（約20万光年）^[1]、大マゼラン銀河までの

距離は約50 kpc（約16万光年）であり^[2]、約770 kpc（約250万光年）に位置するアンドロメダ銀河の10倍以上近い。この桁違いの近さは天文学的な重要性にも直結し、系外銀河の中では最高精度の観測が可能である。大小マゼラン銀河では、銀河を星1つ1つに分解して観測可能なだけでなく、十分明るい星の動きまでも測定できるのである。

大小マゼラン銀河の天文学的な重要性として、それらが重力で互いに引かれあう相互作用銀河であることや、若く軽い銀河であることから初期の宇宙に存在した銀河と似た性質を持つことも挙げられる。例えば、天の川銀河は太陽の約1兆倍もの質量を持つ巨大な銀河である。天の川銀河のような現在の宇宙に存在する大質量の銀河は、より小さな銀河が衝突合体を繰り返しながら質量を獲得していく過程で形成されたと考えられている。過去の宇宙には、このような衝突や重力的な相互

^{*1} 小マゼラン「雲」とも呼ばれる。アンドロメダ星雲がアンドロメダ銀河と呼ばれて久しいように、筆者は「銀河」という天体の本質を表す名称を用いる方が語弊がないと考える。2024年には天文学辞典においても名称が「雲」から「銀河」へと改められている。

^{*2} かの有名な宇宙戦艦ヤマトは地球と大マゼラン銀河を往復する話であり、小マゼラン銀河と大マゼラン銀河は作中の敵に支配されているらしい。

作用の過程にある銀河が数多く存在しており、これらの銀河では相互作用によって爆発的な星の形成が誘発されている。大小マゼラン銀河は、私たちのすぐ隣にありながら、こうした過去の宇宙における銀河進化のメカニズムを解明する手がかりを与えてくれる、極めて重要な天体なのである。

特に、より軽い小マゼラン銀河では相互作用の影響が銀河の形態に強く表れており、ガスや固体微粒子（ダスト）などの星間物質の分布が乱されている。図1は小マゼラン銀河の星の分布と、星間物質の一種である電離水素の放射（ $H\alpha$ 放射）の分布を表す。また、図2は大小マゼラン銀河周辺の中性水素の放射の分布を表す。図1に見られるように、小マゼラン銀河の星間物質の分布は星の分布とは大きく異なっている。星間物質は逆V字（ Λ ）のような形態を示し、北から南西に向かって伸びる「バー構造」、および北から南東に向かって伸びる「ウイング構造」と呼ばれる構造によって特徴づけられる。南東には大マゼラン銀河が位置しており、ウイング構造は大小マゼラン

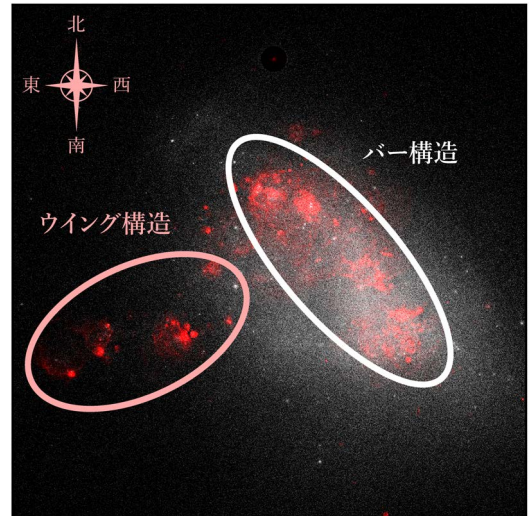


図1 小マゼラン銀河の星と星間物質の形態。図の上が北、右が西である。白い点1つ1つはGaiaで観測された小マゼラン銀河の星を表す。カラーで小マゼラン銀河の電離水素の放射（ $H\alpha$ 放射 [7]）が示されており、星間物質に特徴的な逆V字の形態を示す。楕円はバー構造とウイング構造を示す。

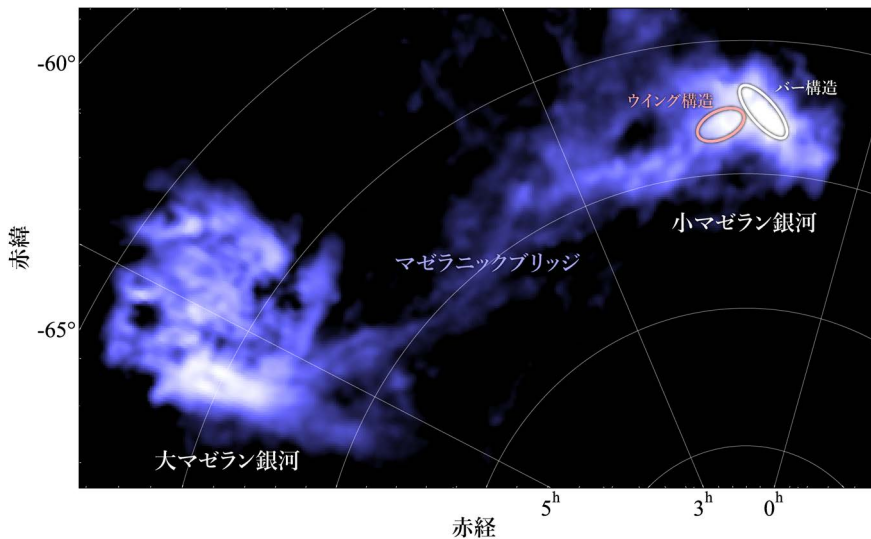


図2 大マゼラン銀河と小マゼラン銀河の周辺の中性水素（100–400 km s^{-1} 成分）の放射 [8]。小マゼラン銀河に示された楕円はバー構造とウイング構造を示す。2つの銀河はマゼラニックブリッジと呼ばれる中性水素の橋によって繋がっている。大マゼラン銀河の奥行き方向の速度（約260 km s^{-1} ）と小マゼラン銀河の奥行き方向の速度（約150 km s^{-1} ）に対応する速度をもつ中性水素からの放射のみを示している。

銀河を繋ぐガスと星の橋（マゼランックブリッジ：図2）に接続している。また、約数千万歳より若い星^{*3}も星間物質と同じく逆V字の分布を示すことが知られている。これは、若い星がその材料となる星間物質の中に依然として存在しているためであり、これらの若い星は約2億年前の大小マゼラン銀河の近接遭遇 [3] によって乱されたガスから誕生していると解釈される。さらに、小マゼラン銀河の特徴的な形態として、星の分布が奥行き方向に長く広がっていることも挙げられる。小マゼラン銀河の縦横幅は約5 kpc（約1万6000光年）であるが、奥行き方向の幅は約30 kpc（約10万光年）であり、実は小マゼラン銀河はソーセージのような細長い形状をしているのである [4-6]。この奥行き方向に伸びた形態も、銀河相互作用によって形成されたと考えられている。こうした小マゼラン銀河の複雑な形態や構造の起源を明らかにするには、銀河内の星やガスの運動、すなわち「運動学（kinematics）」を詳しく調べるのが欠かせない。

近年、欧州宇宙機関（ESA）の位置天文衛星 Gaia [9] の登場により、小マゼラン銀河に属する星の夜空の平面（天球面上）における動き（固有運動）がこれまでにない精度で測定できるようになった。図3は、天の川銀河を背景に宇宙を観測する Gaia のイメージ図である。Gaia は2013年12月に打ち上げられ、地球とともに太陽を公転しながら、2014年7月から2025年1月まで全天にわたる天体を継続的に観測した宇宙望遠鏡である。星の位置を長期間にわたって繰り返し観測することで、わずかな位置の変化から星の固有運動が得られる仕組みだ。さらに、2022年に公開された^{*4} Gaia の第3期データリリース [10] 以降では、小マゼラン銀河においても、十分に明るい星では天球面に直交する奥行き方向の速度（視線速度）も

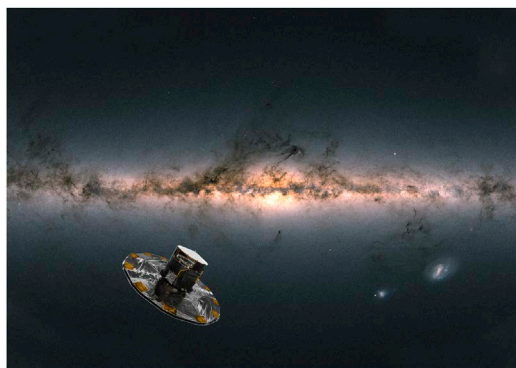


図3 宇宙を観測する位置天文衛星 Gaia のイメージ図。Gaia の写真と、Gaia によって観測された天の川銀河が合成されている。図の右下には Gaia によって観測された小マゼラン銀河（左側）と大マゼラン銀河（右側）も見られる。Credit: ESA/ATG medialab (spacecraft); ESA/Gaia/DPAC (Milky Way)。

得られるようになった。これにより、小マゼラン銀河における星の三次元運動の解析が現実のものとなっている。

とりわけ重要なのが、比較的若い星々の運動である。これらの星は形成から時間が経っておらず、母体となったガスとともに運動していると考えられるため、その固有運動からガスの天球面上の動きを間接的に推定できる。ガスの場合でも、輝線のドップラー効果を利用して視線速度の測定は可能である。しかし、ガスは点源である星のように位置を特定できる対象ではないため、時間をかけて追跡し固有運動を測定することは困難だ。したがって、若い星は、ガスの動きを代替的に捉えるトレーサーとして機能する点で有用である。さらに、前述のように、小マゼラン銀河のガスは相互作用によって乱されており、その影響が若い星の運動にも色濃く反映されていると考えられる。

このような背景を踏まえ、本稿では、小マゼラン銀河に存在する若い星のうち、大質量星と古典

^{*3} 太陽の年齢は46億歳であるため、数千万歳の星は太陽よりもはるかに若い。

^{*4} Gaia の観測データはネット上に公開されており (<https://gea.esac.esa.int/archive/>)、誰でも利用可能である。

的セファイド変光星（以下、古典的セファイド）という2種類の星種族に着目し、それぞれの三次元運動を解析した結果を紹介する。大質量星と古典的セファイドが示す特徴的な運動は、小マゼラン銀河がたどった相互作用や進化の歴史を読み解く上で、重要な手掛かりを与えてくれる。次節では、まずは大質量星の運動について詳しく見ていくことにしよう。

2. 小マゼラン銀河の大質量星の運動

2.1 大質量星の性質

大質量星は死に際に超新星爆発を起こす星であり、太陽の8倍以上の質量を持つ星として定義される。強い恒星風や超新星爆発によって周囲の星間空間に多大な影響を及ぼし、銀河進化の文脈でも大きな役割を果たす種族の星である。重い星ほど激しい核融合が起こっており、大質量星は小質量の星に比べて明るく、高い表面温度のために黒体放射で青く輝いて見える。そして、激しい核融合によって燃料となる水素は長くとも数千万年という短期間で使い果たされ、超新星爆発を起こす。つまり、現在観測される全ての大質量星は生まれてから数千万年以内の若い星であるといえる。

小マゼラン銀河の大質量星は、先行研究によって一覧表（カタログ）が作成されており、約5000個の大質量星が知られている [11]。しかし、そのカタログは異なる研究グループ・手法によって得られた大質量星サンプルの寄せ集めであり、統計的な解析には適さない。さらに、先行研究のカタログに掲載された大質量星の分布は、若い星が従うはずの逆V字型の形態（図1）を示さず、銀河全体に均一に広がっているため、多くの中質量星の混入が疑われる。そこで、まずはGaiaに

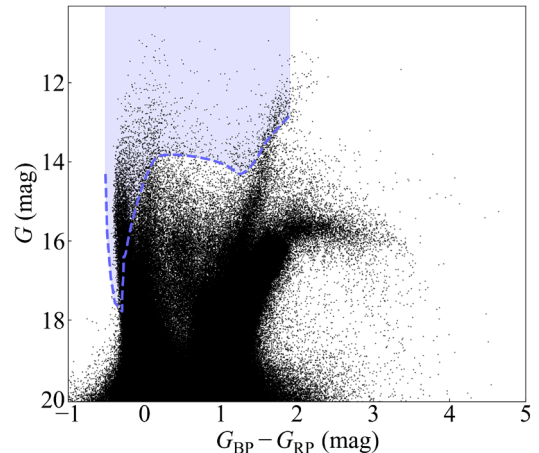


図4 Gaiaで観測された小マゼラン銀河の約200万個の星をプロットした色等級図。破線は色等級図上での大質量星とその他の星の境であり、主系列の一部（左側の $G=14-18$ 等級にわたる線）と太陽の8倍の質量を持つ星の進化の軌跡（ $G_{BP}-G_{RP}=0-2$ 等級にわたる曲線）を組み合わせで定義されている。破線より上の塗りつぶされた領域が理論的に大質量星がプロットされる領域である。

よる小マゼラン銀河全面の観測データを用いて、小マゼラン銀河の大質量星を均一な基準で網羅的に選定し、最新のカatalogを作成することしよう。

2.2 大質量星の選定

大質量星の選定のために、大質量星の「青く明るい」性質を利用する。Gaiaは3種類の広い波長帯で観測した星の明るさを提供しており、中心波長が約532 nmの G_{BP} 等級、約673 nmの G 等級、約797 nmの G_{RP} 等級のデータが利用可能である。2つの異なる波長で得られた等級の差から、星の色の情報が得られる。図4は、Gaiaで観測された小マゼラン銀河の約200万個^{*5}の星をプロットした色等級図であり、縦軸は星の明るさとして G 等

*5 年周視差 $\omega \leq 0.1$ masの制限によって、10 kpcより近くに位置する、天の川銀河に属する前景星を除いた数。なお、Gaiaの性能をもってしても ~ 10 kpcを超える遠方の星の年周視差は精度よく測定できないため、約62 kpcに位置する小マゼラン銀河の星の正確な距離を年周視差から求めることはできない。

級を、横軸は星の色として $G_{BP}-G_{RP}$ 等級を示す。色等級図において、明るい星ほど図の上側にプロットされる。また、図の左側にプロットされた星ほど青く、右側にプロットされた星ほど赤い。よって、基本的には図4の左上にプロットされている星のみを選択することで、青く明るい大質量星を取り出すことができる。

大質量星が色等級図上で占める領域を正確に決定するため、色等級図上で理論的に予想された星の進化の軌跡（PARSECモデル [12-18]）を用いる。星は中心部で水素の核融合を行う主系列星として進化を始め、その段階では色等級図上で主系列と呼ばれる1本の曲線上に分布する。やがて主系列星から赤色巨星に進化すると星は主系列から離れ、色等級図上においてより赤く、明るい領域（右上）に遷移する。このような星の進化に伴う色と明るさの変化はよく研究されており、色等級図上の進化の軌跡が星の質量に応じて計算されている。図4の破線は、主系列の一部と、8太陽質量の星の進化の軌跡を組み合わせで定義した大質量星の境界である。理論的には、8太陽質量を境に、より重い星は破線より上に、より軽い星は破線より下にプロットされる^{*6}。よって、図4の破線より上に位置し、塗りつぶされた領域にプロットされている7426個の星を大質量星として選択した。

図5は本研究で選択した大質量星の空間分布を、星間物質の3色合成図（赤：電離水素、緑：ダスト、青：中性水素）と比較したものである。大質量星は星間物質と同様に逆V字の形態（図1）を示し、若い星が従うべき性質に一致する。特に、赤で表されたH α 放射は、大質量星からの紫外線によって周囲の水素が電離されて生じる放射であり、若い大質量星の存在を直接的に示す。実際に、H α 放射と大質量星の分布はよく一致しており、選定の妥当性を裏付けている。

2.3 大質量星の固有運動

次に、選定した大質量星の小マゼラン銀河の内部における固有運動を見ていく。小マゼラン銀河そのものが天の川銀河に対して動いているため、星の固有運動から小マゼラン銀河の固有運動を差し引くことで、小マゼラン銀河内部における星の固有運動を求められる。ここでは、すべての星が62 kpcに位置すると仮定して固有運動を差し引く。図6に、小マゼラン銀河内部における大質量星の固有運動をベクトルで可視化した。得られた結果は先行研究で若い星の運動を解析した結果 [21-25] に概ね一致している。なお、多くの先行研究は小マゼラン銀河の一部分や、少数の星の解析に限られている。小マゼラン銀河全体の大質量星の分布、および固有運動を可視化したのは本研究が世界初である。

図6では固有運動の向きによってベクトルが着色されており、例として、画像上向きの運動は緑色、画像下向きの運動は赤紫色で示されている。ベクトルにはきれいなグラデーションが見られ、まるでカラフルな花火のように広がっていることが見て取れるだろう。このグラデーションは、大質量星が小マゼラン銀河から離れる方向に、放射状に運動する傾向があることを意味する。これらの銀河の外縁部に分布する星は200 km s⁻¹に近い速度で運動しており、中性水素ガスの回転（回転速度60 km s⁻¹ [26]）を仮定して計算した小マゼラン銀河の脱出速度85 km s⁻¹を上回っている。よって、これらの大質量星（および付随するはずのガス）は小マゼラン銀河に再び戻ることはなく、矮小銀河がガスを失い星形成を止める過程 [28] に対応する可能性がある。

また、図6の左側（東）に位置する大質量星は赤いベクトルで表され、多くが南東方向に運動している。特に、赤いベクトルは南東のウイング構

^{*6} 実際には、ダストによる赤化 [19] や、小マゼラン銀河内の星の距離の不定性などによって誤差が生じる。本稿の基となった学術論文 [20] ではこれらの影響を詳しく議論しており、大質量星の総数に大きな影響を与えるほどの誤差はない。

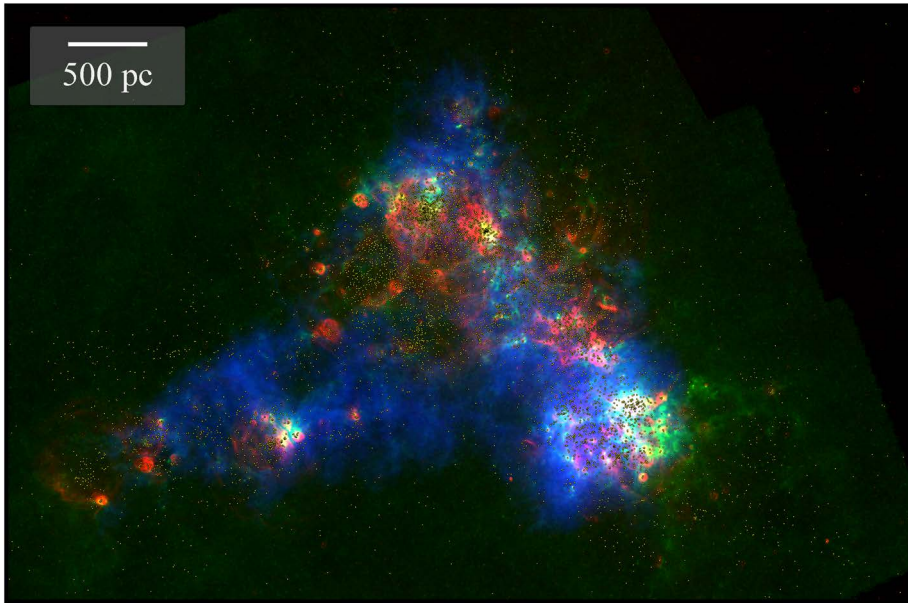


図5 小マゼラン銀河の大質量星の空間分布と、3種類の星間物質の空間分布の比較。大質量星は黄色い点で示されている。星間物質は3色合成図として示されており、電離水素（赤；図1と同じH α 放射 [7]）、ダスト（緑；Herschel宇宙望遠鏡による350 μm の画像 [27]）、中性水素（青；130–170 km s^{-1} 成分；ASKAP望遠鏡とParkes望遠鏡によるHI放射 [28]）を表す。中性水素の速度成分は小マゼラン銀河の視線速度（約150 km s^{-1} ）を中心としている。

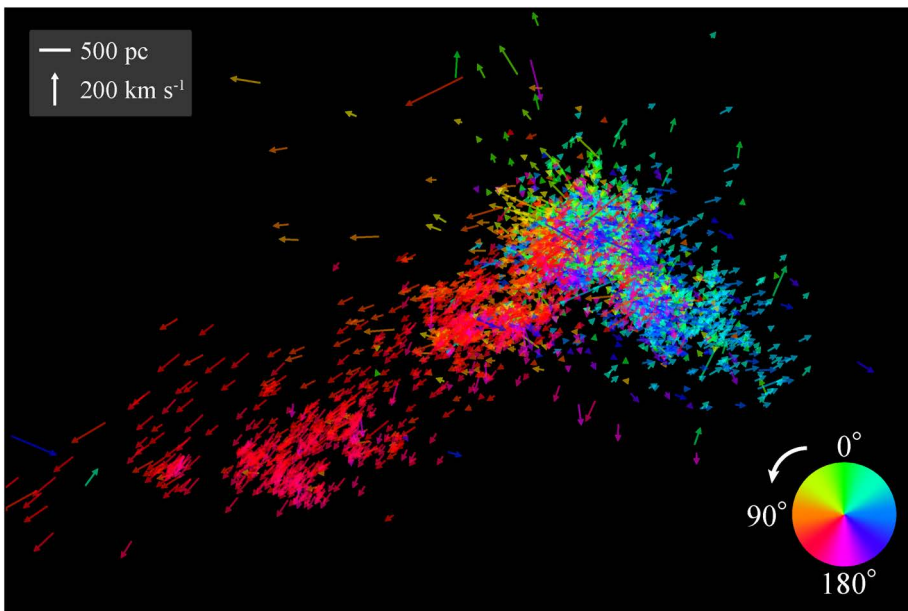


図6 小マゼラン銀河の大質量星の固有運動をベクトルで示した図。ベクトルは固有運動の向きによって色分けされている。図5に比べて広範囲を示しており、図の左下（南東）に位置するのはマゼラニックブリッジに分布する大質量星である。

造とマゼランブリッジに分布しており、南東方向に位置する大マゼラン銀河に向かう動きとして読み取れる。一方、図6の右側（西）に位置する大質量星は水色のベクトルで表され、多くが北西方向に運動している。この北西-南東方向に逆向きに運動している様子は、南東方向に位置する大マゼラン銀河からの潮汐力の影響と整合的である。潮汐力とは、銀河のような広がった天体に対して、近い部分ほど強く、遠い部分ほど弱く引く重力の差によって生じる力である。この力により、大マゼラン銀河に近く、相対的に強い重力を受けている星々は南東方向へと引き寄せられている。逆に、大マゼラン銀河から遠く、相対的に弱い重力を受けている星々は、小マゼラン銀河中心部よりも受ける引力が弱いため、取り残されて大マゼラン銀河とは逆向きに運動していると解釈できる。これはまさに、小マゼラン銀河が大マゼラン銀河によって引き裂かれていく過程が、個々の星の運動という形で可視化された例であり、銀河の破壊過程が鮮明に描き出されたのである。

2.4 大質量星の視線速度

続いて、固有運動と直交する奥行き方向の運動である、視線速度について見ていこう。図7は約500個の大質量星について、Gaiaによって測定された視線速度を示している。小マゼラン銀河自体の視線速度が約 150 km s^{-1} であるため、視線速度が 150 km s^{-1} より大きい星は相対的に私たちから遠ざかる方向に動いており、視線速度が 150 km s^{-1} より小さい星は相対的に私たちに近づく方向に動いている。図7より、南東に位置する大質量星ほど視線速度が大きく、より速く遠ざかっていると分かる。つまり、奥行き方向の運動を見た際にも、小マゼラン銀河の大質量星は北西-南東方向に逆向きに運動しており、大マゼラン銀河との相互作用を反映していると考えられる。

なお、大マゼラン銀河は、約62 kpcに位置する小マゼラン銀河より私たちに近く、約50 kpcに位置している。大マゼラン銀河に近い南東の星

ほど速く遠ざかることは、重力源の大マゼラン銀河からむしろ離れているように見えるため、一見すると奇妙である。しかしこれは、大マゼラン銀河の視線速度が約 260 km s^{-1} [29] と小マゼラン銀河より大きいことで説明できる。小マゼラン銀河の南東部に位置する星々は、大マゼラン銀河の重力に捉えられ、大マゼラン銀河の速度に近づいているのである。実際、マゼランブリッジの中性水素ガスは大マゼラン銀河に近づくほど視線速度が大きくなっているため [30]、ガスとともに動く大質量星の視線速度が南東に向かうほど大きいのは自然である。従って、北西-南東方向に逆向きの視線速度も、南東に位置する大マゼラン銀河の影響であるとして矛盾はない。

2.5 銀河回転の不在

さて、ここで、ガスの視線速度にも着目してみよう。図7の背景に示された色は、その位置に存在する中性水素ガスの平均的な視線速度を表している。ガスの視線速度は大質量星と同じく東西で逆向きの速度を示す。実は、このガスの視線速度の分布は、長らく小マゼラン銀河の銀河回転を意味すると考えられてきた [26, 32]。というのも、

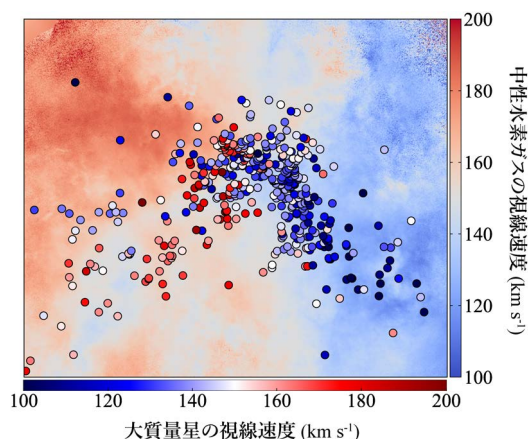


図7 小マゼラン銀河の大質量星の視線速度をカラーで示した図。大質量星は円で示されており、円の色は大質量星の視線速度を表す。背景は中性水素ガス [28] の速度場図であり、ガスの速度がカラーで示されている。

回転体を横から見ると、一方の側では私たちから遠ざかり、もう一方では近づくように見えるからだ。銀河は回転しているという前提に立てば、図7の大質量星や、その他の星種族 [33–35] でも報告されている逆向きの視線速度も、銀河の回転を表しているように見えるだろう。

しかし、図6に立ち返ると、大質量星の固有運動からは回転の兆候は見られない^{*7}。むしろ、大質量星の固有運動は回転ではなく北西-南東方向に互いに逆向きの運動を示しており、ガスの固有運動も若い大質量星と同様の動きをしていると考えられる。よって、図7の大質量星やガスに見られる逆向きの視線速度も、回転ではなく、大マゼラン銀河の潮汐力由来の逆方向の動きとして解釈するのが自然である。このように、視線速度だけでなく、Gaiaによる星の固有運動を加えた三次元運動を解析することで、銀河の運動学をより精密に捉えられるのである。

3. 小マゼラン銀河の古典的セファイドの運動

3.1 古典的セファイドの性質

さて、ここまで大質量星の運動について述べてきたが、大質量星の小マゼラン銀河内部の固有運動を求める際に、とある問題がある。それは大質量星までの距離が正確にわからないことだ。本来、Gaiaによって測定された星の天球面上の位置の変化から星の速度を求める際には、星までの距離の情報が必要である。例えば、天球面上で見かけ上、同じ長さだけ天体の位置が変化したように見えても、その天体までの距離が遠いほど速度は大きい^{*8}。とはいえ、星までの距離を正確に求

めることは困難であり、前節では大質量星までの距離を、一律に小マゼラン銀河までの距離62 kpcで代用して計算していた。しかし、前述の通り、小マゼラン銀河は奥行き方向に約30 kpcほど伸びた、ソーセージのような構造をしている。奥行き方向の30 kpcのどこに大質量星が分布しているかは自明ではなく、固有運動の向きや大きさには無視できない誤差が含まれている可能性がある。そこで登場するのが、星までの距離を正確に求められる古典的セファイドである。

古典的セファイドは誕生から数千万-数億年が経過した星種族であり、周期的に明るさを変化させる脈動変光星の一種として知られている。その特徴は、変光周期と絶対等級の間に周期-光度関係^{*9}と呼ばれる明確な関係が存在する点にある。変光周期の測定から絶対等級を求め、これを見かけの等級と比較することで、星までの距離を計算できるのである。この特性は、小マゼラン銀河が奥行き方向に約30 kpcも広がっていることを考えると極めて重要である。すなわち、すべての星を単一の距離にあると仮定することなく、銀河内の三次元的な空間構造を考慮した解析を可能にする。小マゼラン銀河の古典的セファイドは暗黒物質探査を目的に網羅的に観測され、詳細なカタログが提供されている [36, 37]。また、それらの距離を高精度に見積もる計算手法も確立されている [6, 38]。

3.2 古典的セファイドの三次元運動

図8は、個々の古典的セファイドまでの距離を用いて計算した、小マゼラン銀河内部における約4000個の古典的セファイドの固有運動をベクトルとして可視化したものである。図8より、大質量星と同様に、古典的セファイドの固有運動にも

^{*7} なお、回転している大マゼラン銀河で内部の星の固有運動を見ると、鮮明な時計回りの運動が見られる [31]。

^{*8} 電車から窓の外を眺めた際に、近くの建物が高速で動いて見えるのに対し、遠くの山がゆっくり動いて見えることと同じ。

^{*9} 古典的セファイドの周期-光度関係は、小マゼラン銀河の星々の観測からヘンリエッタ・スワン・リービットによって初めて確立された [39, 40]。エドウィン・ハッブルはこの関係を用いて、「アンドロメダ星雲」が天の川銀河の外にある天体、すなわち別の銀河であることを示し、宇宙に多数の「銀河」が存在することを明らかにしたのである [41]。

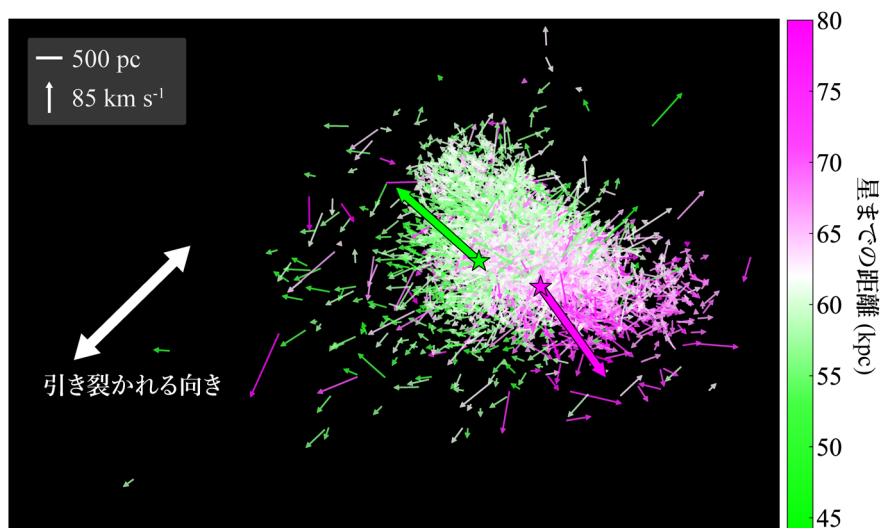


図8 小マゼラン銀河の古典的セファイドの固有運動をベクトルで示した図。ベクトルは古典的セファイドまでの距離によって色分けされている。凡例のベクトルの長さは小マゼラン銀河のおおよその脱出速度である 85 km s^{-1} に対応する。2つの星印は、それぞれ星までの距離が55 kpcより近い古典的セファイドの平均位置（左上の★）、星までの距離が70 kpcより遠い古典的セファイドの平均位置（右下の★）である。星印から伸びる太い矢印は、近い古典的セファイドと遠い古典的セファイドの平均的な運動方向を表す。

明確な銀河回転の兆候は見られない。また、図8の銀河外縁部に着目すると、北西および南東の領域に、銀河が引き裂かれる方向に沿って $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$ という大きな速度で運動する古典的セファイドが目立つ。この北西-南東方向の逆向きの運動は古典的セファイドの距離に依存せずに見られる。

次に、図9は約90個の古典的セファイドについて、Gaiaによって測定された視線速度を示している。この約90個は視線速度が測定可能な、特に明るく若い古典的セファイドであり、そのうちの36個は本研究で選定した大質量星と一致する。図9より、古典的セファイドの視線速度は大質量星と同じく北西-南東方向で逆向きの運動を示し、大マゼラン銀河の潮汐力による影響と整合的である。

つまり、小マゼラン銀河を引き裂く北西-南東方向の逆向きの運動、および銀河回転の不在という特徴は古典的セファイドにも共通して見られ、これらは大質量星の距離の不定性によって生じた

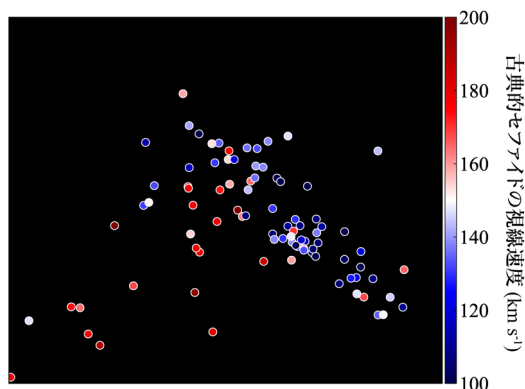


図9 小マゼラン銀河の古典的セファイドの視線速度をカラーで示した図。古典的セファイドは円で示されており、円の色は視線速度を表す。

見かけの運動ではないということだ。

さらに、図8より、古典的セファイドは、近いほど北東に、遠いほど南西に動いており、距離に応じて異なる固有運動の特徴を持つことが分かる。この距離に応じて見られる北東-南西方向の逆向きの運動は、大マゼラン銀河が位置する南東方向とは一致せず、銀河を引き裂く向きではない。

近い古典的セフィイドが北東に動くことに関しては既に先行研究で指摘されており、その原因は大マゼラン銀河の重力の影響であると議論されていた [25]。本研究では、新たに遠い星も南西に動いていることを示し、古典的セフィイドは距離に応じて互いに逆向きに運動していることを明らかにした。距離依存の北東-南西方向の運動は、大マゼラン銀河の潮汐力によって引き裂かれる方向とは異なる方向であり、大マゼラン銀河の潮汐力とは別の、謎のメカニズムが作用した結果である可能性を示唆している。例えば、小マゼラン銀河が私たちから見た奥行き方向、つまり天の川銀河と反対方向に伸びていることを踏まえると、この運動は天の川銀河の重力に起因するかもしれない。あるいは、さらに過去に起きていた大マゼラン銀河との近接遭遇の余波に起因するかもしれない。いずれにせよ、その起源は現状では不明であり、今後の数値シミュレーションによる検証が待たれる。

4. 新たなシミュレーションの重要性

もし小マゼラン銀河が回転していない場合、ケプラー回転を仮定して得られていた小マゼラン銀河の質量 [26, 32] が正しくないことになる。すると、その質量から計算された、小マゼラン銀河・大マゼラン銀河・天の川銀河の三体相互作用の軌道モデル (例えば [3]) も修正が必要かもしれない。

また、先ほどは詳述しなかったが、図7において、大質量星とガスの視線速度が完全には一致していない問題がある。特に銀河の北東では、ガスの視線速度は大きい、そこに分布する少数の星の視線速度は小さい。これは流体であるガスのみ働く作用が加わった結果であると考えられる。

このように、ガスと若い星の運動のずれや、小マゼラン銀河が距離に応じて逆向きに動くメカニズムは、銀河回転をしていない小マゼラン銀河のモデルに基づく新たなシミュレーションによって、今後明らかにされていくことが期待される。

本研究は、観測的研究によって理論的研究の方向性に新たな示唆を与えるものであり、まさに観測と理論の相互促進の一例であると言える。そして同時に、私たちのすぐ隣にある銀河ですら、その運動の全貌が未だ明らかではないという事実は、銀河動力学の理解に残された課題の大きさを改めて認識させるものである。

謝 辞

本稿は著者らによる学術論文 [20, 35] に基づいている。この場をお借りして、指導教員である立原研悟氏、そして共同研究者である玉城磨生氏に深く感謝申し上げる。本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2125 の財政支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] de Grijs, R., & Bono, G., 2015, AJ, 149, 179
- [2] de Grijs, R., et al., 2014, AJ, 147, 122
- [3] Diaz, J. D., & Bekki, K., 2012, ApJ, 750, 36
- [4] Scowcroft, V., et al., 2016, ApJ, 816, 49
- [5] Jacyszyn-Dobrzaniecka, A. M., et al., 2017, Acta Astron., 67, 1
- [6] Ripepi, V., et al., 2017, MNRAS, 472, 808
- [7] Smith, R. C., & MCELS Team, 1999, IAU Symposium, 190, 28
- [8] HI4PI Collaboration, et al., 2016, A&A, 594, A116
- [9] Gaia Collaboration, et al., 2016, A&A, 595, A1
- [10] Gaia Collaboration, et al., 2023, A&A, 674, A1
- [11] Bonanos, A. Z., et al., 2010, AJ, 140, 416
- [12] Bressan, A., et al., 2012, MNRAS, 427, 127
- [13] Chen, Y., et al., 2014, MNRAS, 444, 2525
- [14] Chen, Y., et al., 2015, MNRAS, 452, 1068
- [15] Tang, J., et al., 2014, MNRAS, 445, 4287
- [16] Marigo, P., et al., 2017, ApJ, 835, 77
- [17] Pastorelli, G., et al., 2019, MNRAS, 485, 5666
- [18] Pastorelli, G., et al., 2020, MNRAS, 498, 3283
- [19] <https://github.com/mfouesneau/dustapprox>
- [20] Nakano, S., et al., 2025, ApJS, 277, 62
- [21] Zivick, P., et al., 2018, ApJ, 864, 55
- [22] Oey, M. S., et al., 2018, ApJ, 867, L8
- [23] Murray, C. E., et al., 2019, ApJ, 887, 267
- [24] De Leo, M., et al., 2020, MNRAS, 495, 98
- [25] Niederhofer, F., et al., 2021, MNRAS, 502, 2859
- [26] Stanimirović, S., et al., 2004, ApJ, 604, 176
- [27] Meixner, M., et al., 2013, AJ, 146, 62
- [28] McClure-Griffiths, N. M., et al., 2018, Nat. Astron.,

2, 901

- [29] van der Marel, R. P., et al., 2002, *AJ*, 124, 2639
- [30] Brüns, C., et al., 2005, *A&A*, 432, 45
- [31] Gaia Collaboration, et al., 2021, *A&A*, 649, A7
- [32] Di Teodoro, E. M., et al., 2019, *MNRAS*, 483, 392
- [33] Evans, C. J., & Howarth, I. D., 2008, *MNRAS*, 386, 826
- [34] Dobbie, P. D., et al., 2014, *MNRAS*, 442, 1663
- [35] Nakano, S., & Tachihara, K., 2025, *ApJ*, 985, L5
- [36] Udalski, A., et al., 2015, *Acta Astron.*, 65, 1
- [37] Soszyński, I., et al., 2015, *Acta Astron.*, 65, 297
- [38] Ripepi, V., et al., 2016, *ApJS*, 224, 21
- [39] Leavitt, H. S., 1907, *Annals of Harvard College Observatory*, 60, 87
- [40] Leavitt, H. S., & Pickering, E. C., 1912, *Harvard College Observatory Circular*, 173, 1
- [41] Hubble, E. P., 1929, *ApJ*, 69, 103

Stellar Motions as Probes of Galactic Interactions in the Small Magellanic Cloud

Satoya NAKANO

Department of Physics, Graduate School of Science, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan

Abstract: I present the internal stellar motions of the Small Magellanic Cloud revealed by Gaia. The Small Magellanic Cloud is the nearest interacting galaxy to the Milky Way, and its structure has been significantly disturbed by close interactions with the more massive Large Magellanic Cloud. The internal motions, traced by young massive stars that follow the distribution of the interstellar medium and by classical Cepheids that provide accurate distance measurements, reveal complex and chaotic stellar dynamics driven by galactic interactions.