

氏 名 坂井 伸行

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1656 号

学位授与の日付 平成26年3月20日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Spiral Structure and Non-Circular Motions of the Milky Way
Galaxy Revealed by VLBI Astrometry

論文審査委員 主 査 准教授 久野 成夫
教 授 川口 則幸
准教授 伊王野 大介
准教授 小林 尚人 東京大学
教 授 千葉 柁司 東北大学

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

本博士論文の目的は、VERA による VLBI 位置天文観測により、円盤銀河の理論(仮説)である密度波理論を、観測から直接検証する事である。これまでの研究では、主に視線速度と言う一次元情報がベースになっており、観測と理論との直接比較が非常に困難であった。我々は、VLBI 位置天文観測から、3次元位置と3次元運動を測定する事で、上記の直接比較を行う事に成功した。

本博士論文は、ペルセウス座腕に関連した、3天体の VLBI 位置天文観測の結果に基づいている。個々の観測結果に基づいた議論を紹介すると共に、これまでの VLBI 位置天文観測の結果も組み合わせ、密度波理論に立脚したガス円盤の解析解との比較を行っている。

1 天体目は星形成領域 IRAS 05168+3634 (銀径 $l = 170.7^\circ$, 銀緯 $b = -0.3^\circ$, 視線速度 $V_{lsr} = -15.5$ km/s)で、位置天文観測の結果が 2 章にまとめられている (Sakai et al. 2012)。この天体は銀径が 180 度に近く、視線速度が 0 km/s に縮退する領域に付随している事から、特に運動学的距離の精度が悪い事が知られていた。実際我々の観測により、従来使われてきた運動学的距離 6 kpc (Molinari et al. 1996)が、 $1.88 (+0.21/-0.17)$ kpc に改訂された。距離が 3 倍以上小さくなった事により、この天体が銀河系アウター腕ではなく、ペルセウス座腕に付随する事が明らかになった。更にこの天体は、銀河系円盤において、15 km/s 程度の非円運動 (e.g., VLBI 観測で得られた 3 次元運動から、仮定した銀河回転成分を差し引いた残差に相当)を有している事も明らかになった。非円運動の向きは、銀河回転から遅れ、かつ銀河中心方向に向かっていて、この結果は、ペルセウス座腕における過去の VLBI 観測の結果と良く一致する。この様な系統的な非円運動は、密度波理論を基に導かれた、銀河衝撃波 (e.g., Fujimoto 1968; Robert 1969)の描像とよく一致する。

2 天体目は星形成領域 IRAS 00259+5625 ($l = 119.8^\circ$, $b = -6.0^\circ$, $V_{lsr} = -38.3$ km/s)で、特に絶対固有運動の測定結果が 3 章にまとめられている (Sakai et al. 2014a)。この天体は光度変動が激しく、距離測定に関しては期待した精度が得られなかった (e.g., $2.4 (+1.0/-0.6)$ kpc)。一方、銀河面に対して鉛直方向の固有運動測定には成功した (e.g., $\mu_b = -2.62 \pm 0.65$ mas/yr)。仮に、我々の距離測定の結果を用い、得られた固有運動を絶対速度に焼き直すと、銀河面鉛直方向に対して、 -18 km/s 程度の顕著な非円運動が得られる (e.g., ガスの典型的なランダム運動 ~ 7 km/s よりも有意に大きい)。更にこの天体は、中性水素 (HI) 21cm 輝線観測で過去に見つかっていた、NGC 281 スーパーバブルと言う円弧状の構造に付随している。我々の観測結果は、スーパーバブルを構成するガスが何らかの原因 (e.g., 連鎖的超新星爆発)で銀河系円盤から巻き上げられ、その後ハローと相互作用しながら膨張していくシナリオを示唆する結果となった。この天体を銀河面に投影すると、ペルセウス座腕の位置に対応し、渦状腕付近では腕に関する系統的な非円運動だけでなく、スーパーバブル膨張運動と言った、局所的な非円運動も発生する事が明らかになった。

3 天体目は星形成領域 IRAS 07427-2400 ($l = 240.3^\circ$, $b = 0.1^\circ$, $V_{lsr} = 68.0$

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

km/s)で、位置天文観測の結果と共に、博士論文全体の議論が 4 章にまとめられている (Sakai et al. 2014b in preparation)。この天体は我々の距離測定の結果から、銀河系第三象限のペルセウス座腕に位置している事が明らかになった(e.g., 距離は、 $5.18+0.77/-0.59$ kpc)。過去、ペルセウス座腕の VLBI 観測は、銀径の範囲が 43—189 度までに限られており (e.g., Sakai et al. 2012; Zhang et al. 2013)、我々の観測によって、銀径の範囲を 240 度まで拡張する事に成功した。

その結果、我々は単一のピッチアングル (i : 腕の巻き込みの強さの指標)で、銀径 94—240 度のペルセウス座腕は説明できるのにも関わらず($i = 17.7 \pm 1.8^\circ$)、銀径を 43—240 度までに拡張すると、ピッチアングルが大きく変わることを見出した($i = 11.5 \pm 1.3^\circ$)。その原因としては、系外銀河の観測で見られる渦状腕の分岐やスパークなどが考えられるが、今後、更に観測天体数を増やして検証する事が必要である。

最後に 4 章の議論の拡張として、2 章で紹介した渦状腕に付随する系統的な非円運動を、Pinol-Ferrer et al. (2012, 2014)の、ガス円盤の解析解を使って検証する。このモデルは、運動方程式の線形解析解を与えるもので(Binney & Tremaine 2008 の p. 189 を参照)、周転円近似 (Lindblad 1927)、剛体回転する非軸対称ポテンシャル(e.g., Lindblad 1958)、更にはガス円盤の運動を記述する減衰項 (Wada 1994)が組み込まれている。我々是对数形状の渦巻きポテンシャルを導入し、観測で得られた非円運動を説明するためのモデルパラメータを、reduced chi-square の値を最小化するようにして求めた。

その結果、我々は非円運動がモデルを使って説明できるだけでなく、渦巻きポテンシャルの手前に、ガス密度が高い場所が見出された。その場所は、ペルセウス座腕の VLBI 観測の結果とよく一致した。更に、得られた渦巻きポテンシャルの回転角速度($\Omega_p = 17.0 \pm 0.5$ km/s/kpc)と、渦巻き腕の本数($m = 4$ 本)を用い、Inner Lindblad Resonance (ILR)の位置を、 $R = 9.1+0.3/-0.2$ kpc と導く事に成功した。これは、太陽近傍の星の運動から、 $ILR = 8.2 +0.3/-0.4$ kpc と求めた、Quillen et al. (2005)と似た様な傾向を示している。強調すべき点として、数キロパーセックにおける 3次元運動の情報から力学共鳴の導出に成功したのは、我々が世界で初めてである。

5 章は本博士論文のまとめである。我々は VLBI 位置天文観測の結果に基づき (計 14 天体)、銀径 43—240 度におけるペルセウス座腕の広域構造(e.g., ピッチアングル)、及び付随する非円運動を、世界最高精度で明らかにした。位置天文観測の結果を用い、密度波理論を直接検証する事にも成功した。今後の観測戦略としては、(i) $43^\circ < \text{銀径} < 95^\circ$ の観測からペルセウス座腕の形状関数を改良する事と、(ii) $190^\circ < \text{銀径} < 240^\circ$ の観測から、共回転共鳴(CR)の位置とパターン速度を高精度で決定する事が重要となってくる。

これからの銀河系位置天文研究は、次世代の位置天文衛星 GAIA が中心の一角をにない、我々が観測してきたガス円盤の情報に、星円盤の情報を加える事が可能になる。その際、星円盤でもガス円盤同様に系統的な非円運動が見られるか、更には星とガスの分布に系統的なオフセットがあるか否かを検証すれば、密度波理論以外の力学モデルの検証が、将来的に可能となってくる。今後得られる大量の観測データに対し、観測との直接比較から、銀河系の力学や進化を最も正しく記述できるモデルを選択する事が、これからの課題となってくる。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本論文は、VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry) を用いてVLBI (Very Long Baseline Interferometry) アストロメトリーによるH₂Oレーザーの年周視差と固有運動の精密な測定を行い、銀河系のペルセウス渦状腕の3次元構造と運動を明らかにし、さらに銀河系の渦状構造形成メカニズムを解明するために、密度波理論に基づくモデルとVLBIアストロメトリーによるこれまでの観測結果の比較を行った研究である。

第1章では、イントロダクションとして銀河系の構造と運動について、おもにこれまでの観測から知られていることがまとめられている。また、VLBIアストロメトリーの原理、達成される精度、VERA計画についてまとめられている。最後に、VLBIアストロメトリーを用いて、ペルセウス渦状腕の構造と運動を調べることによって、銀河系の渦状構造の形成メカニズムについての知見を得るといふ本研究の目的が述べられている。

第2章では、ペルセウス渦状腕にあるIRAS05168+3634の観測結果がまとめられている。出願者は、VERAを用いて測定した年周視差から距離を求め、それが $1.88^{+0.11}_{-0.11}$ kpcと、これまでの測定結果 (6 kpc) よりもはるかに小さく、その結果、この天体がこれまで考えられていたようにアウター渦状腕に存在するのではなく、ペルセウス渦状腕に存在することを明らかにした。また、この天体を含めたペルセウス渦状腕に存在する7天体が、銀河回転と逆方向かつ銀河中心方向の特異運動をしていることを明らかにした。この結果は、ペルセウス渦状腕上の天体の系統的な特異運動を初めて示した重要な結果であり、Sakai et al. (2012)として日本天文学会欧文研究報告 (PASJ) に出版されている。

第3章では、NGC281スーパーバブルと呼ばれる水素原子ガスのループ構造に付随したIRAS00259+5625の固有運動の測定結果をまとめている。VERAによる固有運動の測定結果から、この天体が銀河面に垂直方向に、速度 $17.9 \pm 12.2 \text{ km s}^{-1}$ で運動していることを明らかにした。この結果は、Sakai et al. (2014a)として、PASJに受理されている。

第4章では、大質量星形成領域にあるIRAS07427-2400の観測結果と、ペルセウス渦状腕以外の渦状腕のデータも含めて、密度波理論に基づく渦状構造モデルとの比較を行っている。出願者は、VERAによる観測で、IRAS07427-2400の距離が $5.18^{+0.77}_{-0.77}$ kpcであり、ペルセウス渦状腕上に存在することを明らかにした。ペルセウス渦状腕の銀経が 189° を超える部分にある天体の距離をVLBIアストロメトリーで決定したのは、これが初めてであり、ペルセウス渦状腕の構造を知るために非常に重要な成果である。出願者は、この天体を含めることで、ペルセウス渦状腕のピッチ角を、銀経 l が $94.60^\circ \leq l \leq 240.32^\circ$ の範囲でフィッティングした場合は $11.5^\circ \pm 1.3^\circ$ 、 $43.17^\circ \leq l \leq 240.32^\circ$ の範囲でフィッティングした場合は $17.7^\circ \pm 1.8^\circ$ であり、途中で枝分かかれやスパー構造を持つ可能性があることを示した。出願者はさらに、観測された特異運動を密度波理論にもとづく解析的モデルと比較することで、渦状ポテンシャルの位置やパターン速度の導出を試みている。その結果、最も確からしいモデルでは、(i)4本腕、(ii)パターン速度が $17.0 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ 、(iii)渦状腕のピッチ角が 11.5° 、であることなどが示された。現状では、観測点数が十分ではないこともあり、まだ不定性が大きいですが、銀河系の渦状構造を明らかにする新しい試みとして、高く評価される。

(Separate Form 3)

第5章では、全体のまとめとともに、今後に残された課題や将来の構想が述べられている。

このように、本研究は、VLBI アストロメトリーを用いて、銀河系のペルセウス渦状腕の3次元構造を明らかにし、さらに銀河系の渦状構造の形成メカニズム解明に独自の手法で取り組んだものであり、その成果は高く評価される。出願者が観測、解析、議論にいたるまで主体的に研究を進めたことも確認された。また、本論文の主要な部分は査読付き学術雑誌に2編出版済みであることも含め、審査委員会は全会一致で本論文が博士論文として優れたものであることを認め、合格であると判断する。