

VERA で見えてきた銀河系ペルセウス座腕の構造と非円運動



坂井 伸行

〈総合研究大学院大学物理科学研究科天文科学専攻 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: nobuyuki.sakai@nao.ac.jp

本稿では、VERA で見えてきた銀河系ペルセウス座腕の系統的な非円運動について紹介します。非円運動の大きさは $\sim 20\text{--}30\text{ km s}^{-1}$ で、腕と腕の間の円盤領域で見られている円運動に対して、明らかなずれが見られています。この結果は、銀河系非軸対称重力ポテンシャルの寄与を直接見ていると考えられ、観測と理論との詳細比較を可能にする革新的な結果と言えます。今後VERAで銀河系円盤の位置天文がさらに進められ、40年以上仮説であり続けた密度波理論の直接検証も可能になってくるでしょう。これからはGAIAやJASMINEなど次世代の位置天文衛星が打ち上がり、銀河系位置天文はますます熱い科学テーマになってきます。VERAも銀河系円盤を見通せるという利点を活かし、特色ある科学的成果をこれからも提供していきます。

1. はじめに

「渦巻銀河の美しい写真を見たとき、ただ美しいで終わっては駄目で、天文学者はその先にある物理を理解しないとイケない。」筆者が天文学をスタートさせた学部生時代、当時の指導教官にいただいた言葉です。渦巻銀河や棒状銀河に見られる渦巻き腕／棒状構造は角運動量輸送（物質循環）の担い手と言う一面があり、円盤銀河の中で見られる華々しい星形成やバルジの成長などと密接に関連していると考えられます。さらに、渦巻銀河（や棒状銀河）は、近傍宇宙の銀河の中で大半を占めているという研究結果もあります¹⁾。つまり、渦巻銀河の構造や動力学を物理的に理解することは、その銀河自身の形成過程を理解するにとどまらず、宇宙の構造形成における重要な理解を与えることが期待されます。

本稿では、棒渦巻銀河と信じられ、かつ私たちが住んでいる天の川銀河について特に述べていきます。筆者らは現在、天の川銀河の正確な構造と

動力学を理解するために、VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry) プロジェクトを推進しています²⁾。数あるVERAプロジェクトの研究成果の中から特に今回は、筆者が現在強い興味をもっている、ペルセウス座腕の系統的な非円運動について紹介していきます。

1.1 天の川銀河（銀河系）

最も近い銀河である、私たち自身が住んでいる天の川銀河（銀河系）はどのような構造をしているのでしょうか？ Oort et al.³⁾ は中性水素ガス（HI, 21 cm輝線）を電波観測することで、われわれの銀河系にも渦巻き腕があることを明らかにしました。しかしこの研究では視線速度という一次元情報に頼っており、個々の天体までの距離測定に不定性が残っています。Spitzer赤外線衛星の観測結果に基づいて2本腕の棒渦巻銀河を主張する研究者や⁴⁾、特にペルセウス座腕（Perseus arm）と南十字-たて座腕（Crux-Scutum arm）は星でもガスでもトレースできると主張する研究者もいます⁵⁾。しかしながら依然として、私たち

が銀河系の中に住んでいるがゆえに、距離測定には不定性が残っているのが現状です。

私たちが住んでいる銀河系の正確な描像を得るためには、VERAプロジェクトがこれまで行ってきている位置天文（アストロメトリー）を、一声～20 kpc^{*1}と言われる銀河系円盤全体で行うことが求められます。

1.2 渦巻構造は準定常構造？ それとも非定常？

「綺麗なバラには棘がある」と言われますが、美しい渦巻構造にも「巻き込みの困難」という棘（問題）があることが知られています。「巻き込みの困難」とは、仮に渦巻き腕がその構成要因であるガスや星と一緒に銀河回転（差動回転）していると、数銀河回転（数億年）もしないうちにその構造が崩れてしまう問題を指します^{6), *2}。一方で多くの観測結果を見る限り、渦巻構造はあたかも準定常構造であるかのように安定に見えます。

その矛盾を解決するために提唱されたのが、「密度波理論」です⁷⁾。密度波理論では、渦巻き腕は恒星系円盤中に伝播する定在波とみなされ、渦巻パターンは円盤中を剛体回転します。これは、渦巻構造を宇宙年齢維持できるだけでなく、渦巻き腕付近で引き起こされるガスの圧縮・星形成の誘発という一連の物理現象を綺麗に説明できるので、多くの研究者に受け入れられてきました。

一方で近年コンピュータ技術の発達とともに、数値計算に基づく渦巻き腕の研究が盛んになってきました。時間発展を追える多くの数値計算の結果、外力（近傍銀河の潮汐力、棒状構造、etc.）なしで渦巻き腕を宇宙年齢維持するのは難しいという結果が出てきました⁸⁾。さらに特筆すべき結果は、渦巻き腕は生成と破壊を繰り返す非定常構造だと報告されたことです。Babaら⁹⁾では、星円盤

+ガス円盤+ダークマターハローポテンシャルを用い、N体数値計算が行われました。結果、星形成領域におけるガスの運動に関して、20 km s⁻¹を超えるような非円運動が報告されました。この結果は、近年われわれのVERAグループや米国のVLBAグループらが報告している、星形成領域の非円運動結果ともよく一致しています。

さて以上を踏まえると、密度波理論は正しくなくて、すでに「巻き込みの困難」は困難ではないという結論になるのでしょうか？ 仮に銀河系の非円運動がランダムで、大きさとしては20-30 km s⁻¹程度であるのならば、N体計算の結果ですべて説明できているのかもしれませんが、しかしながら2章で見ていきますが、VERAやVLBAグループらの最新の観測結果では、銀河系ペルセウス座腕で系統的な非円運動が見えてきています。興味深いことにこの系統的な非円運動は、非円運動の向きに関して、密度波理論の予測とよく一致していることもわかってきました。観測屋としては、よりよく観測を説明できる理論を見つけたいと思うのが、自然な流れではないでしょうか？

2. ペルセウス座腕の系統的な非円運動

さて2章では本稿のメインとなる、銀河系ペルセウス座腕の非円運動について紹介していきます。

2.1 内部固有運動+系統（銀河回転）固有運動 = 観測される固有運動

実際にVLBI観測をしたときに得られる主要な情報は、各メーザースポットの「絶対位置」と「フラックス密度」の情報です。同じメーザースポットの絶対位置の時間変化を追うことで、「年周視差」と「固有運動」の情報を引き出すことが可能になります。ここで気をつけることとして、

*1 距離の単位で「キロパーセク」と読む。1 kpcは約3,260光年。

*2 渦巻き腕が銀河回転（差動回転、 $d\Omega/dR \neq 0$ ）していると、腕の間隔（ ΔR ）と腕の巻き込み具合（ピッチアングル*i*）は時間（*t*）に反比例して減少していきます。 $\Delta R \approx 2\pi R \tan(i) = 2\pi/(t d\Omega/dR)$ 。

I05168+3634

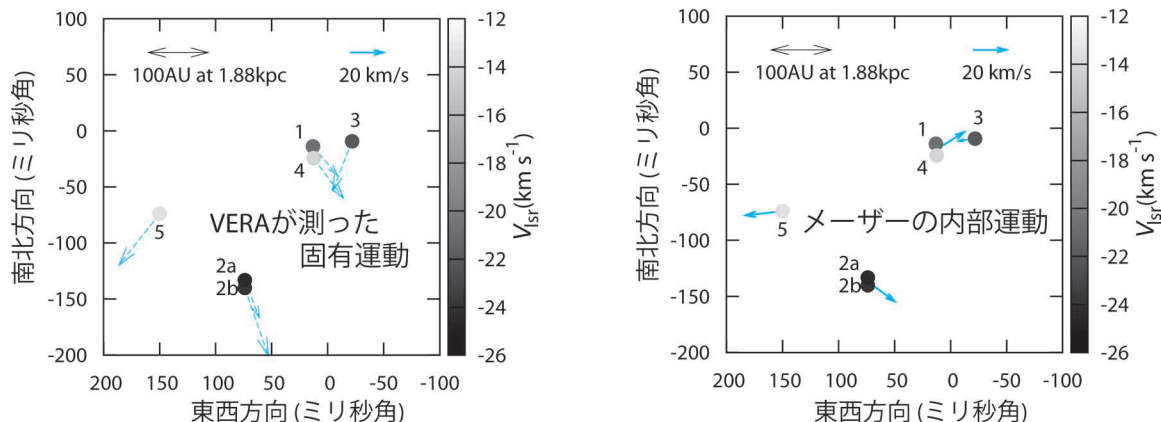


図1 VERAで観測された、IRAS 05168+3634の固有運動（左）と、メーザー自身の内部運動（右、ランダム運動を仮定）。Sakaiらのデータより作成¹⁰⁾。

固有運動を引き起こす要因は、銀河回転だけでなくメーザー自身の内部運動もあるということが挙げられます。例えば水メーザーのスペクトルピークを見たとき、その星形成領域全体の運動を反映していると考えられる、COやCS分子輝線などのスペクトルピークと異なるということはよく見られます*3。今回われわれが知りたい情報は星形成領域全体の運動なので、メーザー自身の内部運動は差し引く必要があります。

図1(左)は実際にVLBI観測で得られた固有運動です。CS ($J=2-1$) 観測¹¹⁾で得られた視線速度 $= -15.5 \text{ km s}^{-1}$ に対し、メーザーの視線速度は $v_{\text{H}_2\text{O}} = -12 \sim -23 \text{ km s}^{-1}$ となっています。図1(左)では、多くの大質量形成星形成領域の水メーザー観測で見られているような、双極アウトフローなどの兆候は見られていません。よって図1(左)では、単純に全体の固有運動の平均を取ること、系全体としての固有運動を見積もっています。図1(左)の各メーザースポットに対し、得ら

れた系全体の固有運動を引き算すると、メーザー自身の内部運動の様子も見ることができ（図1(右)）。結果としては、概ねランダムな内部運動が見られています。

2.2 最新のVLBI観測の結果

以上述べてきた「年周視差」・「(系統)固有運動」・「分子輝線の視線速度」の情報がそろえば、それぞれの天体の3次元位置と3次元運動が、観測量から直接明らかにされます。そこからさらに個々の天体の非円運動成分を知るには、銀河定数と太陽自身の非円運動、そして回転曲線の情報が必要になってきます*4。図2は、回転曲線を平坦 ($\Theta(R) = \Theta_0$) と仮定して得られた非円運動ベクトルです。ペルセウス座腕の天体に関しては、系統的に銀河中心方向 (U方向) と銀河回転から遅れる方向 ($-V$ 方向) に非円運動が卓越しています (図3も参照ください)。これは、渦巻腕内側で衝撃波面が発生し、そこで非円運動が引き起こされるという、密度波理論の予測と非円運動ベク

*3 例えば、 $r=1 \text{ pc}$, $M=10^4 M_{\text{sun}}$ の星形成領域のビリアル速度を見積もると、 $v_{\text{vir}} = \sqrt{GM/r} \sim 7 \text{ km s}^{-1}$ となります。実際の水メーザー観測でも、(天体に依存しますが)この程度のずれが見られています。

*4 銀河定数 (R_0 と Θ_0) と太陽の非円運動 (U_{\odot} , V_{\odot} , W_{\odot}) に関して本稿では、 $(R_0, \Theta_0) = (8.33 \text{ kpc}, 240 \text{ km s}^{-1})$ ^{13), 14)} と $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (11.1, 12.24, 7.25) \text{ km s}^{-1}$ ¹⁵⁾ をそれぞれ仮定しています。

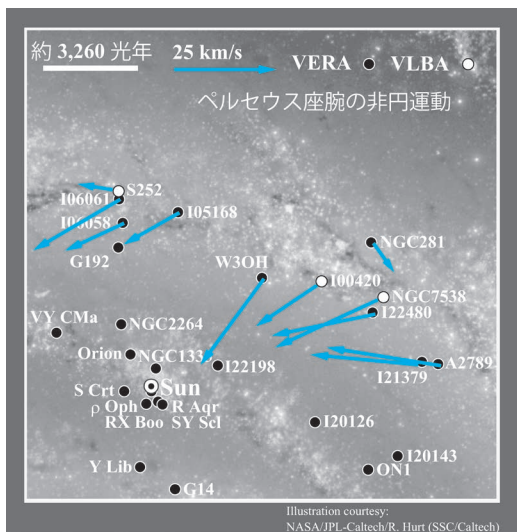


図2 VERA (●) や VLBA (○) で得られた、ペルセウス座腕に見られる系統的な非円運動 (矢印が非円運動ベクトル)。背景は、*Spitzer* 望遠鏡の観測結果などを基に描かれた、天の川銀河の想像図¹²⁾。

トルの向きに関して良い一致が見られています¹⁶⁾。一方で、星円盤+ダークマターハローポテンシャルを仮定した、 N 体数値計算による結果 (星の非円運動) ともよく一致しています⁸⁾。どちらの理論がより観測と合っているのかを切り分けるには、今後さらに、銀河系円盤の広範囲にわたる観測が必要になってきます。

2.3 得られた非円運動の妥当性・定量的評価

図3は、Sakai et al.¹⁰⁾ と図2のデータを基に作成した、非円運動平面 (U - V 平面) です。明らかに、インター腕 (腕と腕の間の領域, ●) は原点近くに集まっているのに対し、ペルセウス座腕・南十字-たて座腕の天体 (青●と□) に関しては、原点から離れた場所に集まっている様子が見て取れます。しかしながら、意気揚々と VERA で得られた非円運動の結果を各種の研究会で紹介するなか、以下の三つのコメントをいただきました。①「得られた非円運動は、銀河定数の違いにどの程度影響されますか？」②「その非円運動は、太陽自身の非円運動にどの程度影響されます

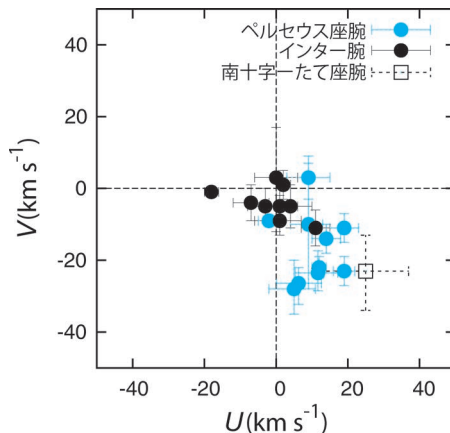


図3 ペルセウス座腕 (●), インター腕 (●), そして南十字-たて座腕 (□) における、非円運動成分の比較. $(U, V) = (0, 0) \text{ km s}^{-1}$ が円運動に相当。

表1 各誤差要因が図3の非円運動推定に与える影響

| | $U \text{ (km s}^{-1}\text{)}$ | $V \text{ (km s}^{-1}\text{)}$ |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 銀河定数誤差の影響 | ~16 | ~3 |
| 太陽非円運動誤差の影響 | ~5 | ~4 |
| 回転曲線誤差の影響 | — | 今後の観測で要確認 |

か？」③「あなたが示した非円運動は、仮定した回転曲線と実際の回転曲線とのずれとは解釈できませんか？」そこで自分自身ふと立ち止まり、結果の妥当性について考えてみることにしました。現在 VERA や VLBA で観測が行われた天体の大半は、太陽から 3 kpc 以内、銀河中心方位角 $-10^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$ に集中しています¹⁰⁾。天体間の銀河中心方位角 β が離れれば離れるほど、①銀河定数や②太陽非円運動の影響が顕著に表れます。そこでまず、①銀河定数の寄与について調べるために、銀河中心方位角が十分離れ、かつペルセウス座腕とインター腕に位置する異なる 2 天体を比較してみます。現実的な範囲で銀河定数を変化させたところ、銀河中心方位角 $\beta \sim 2^\circ$ (銀径 $l \sim 171^\circ$) の IRAS 05168 と銀河中心方位角 $\beta \sim 27^\circ$ (銀径 $l \sim 76^\circ$) の ON2N¹⁷⁾ について、2 天体間の非円運動のずれが U に関しては 16 km s^{-1} ほど、 V に関し

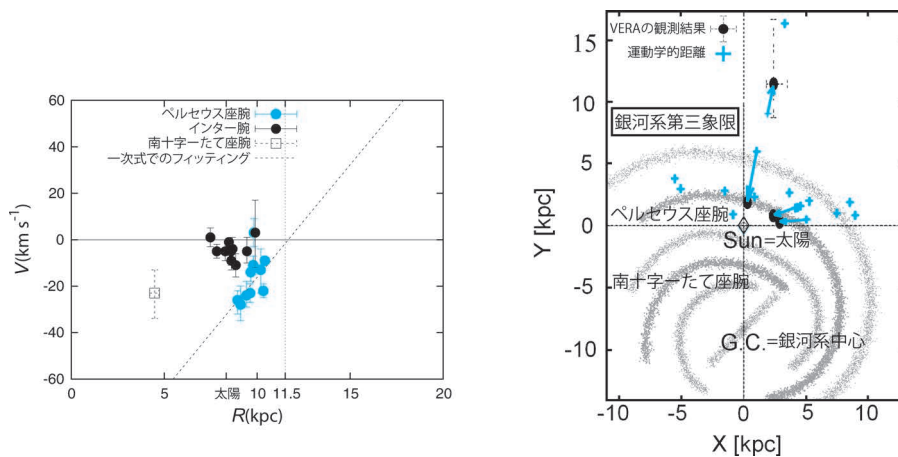


図4 (左) ペルセウス座腕(●), インター腕(●), そして南十字-たて座腕(□)における, 銀河回転に対する非円運動 (V) の比較. データは図3と同じであり, 横軸は銀河中心距離 R (kpc). (右) 銀河系の正面想像図上に¹⁸⁾, 銀河系外縁部回転曲線プロジェクト (VERAのサイエンスプロジェクトの一つ) で観測している天体の一部を, 運動学的距離 (+) と VLBI 観測の結果 (●) に基づいてそれぞれ表示しています

ては 3 km s^{-1} ほど最大で変化することがわかりました. つまり銀河定数誤差の影響は, U 成分に関して特に大きいことがわかります.

同じ天体ペアを使って, ②太陽非円運動の寄与についても同様に調べていきます. 現実的な範囲で太陽非円運動の値を変化させてみると, 銀河定数の誤差ほど影響は顕著に表れませんが, それでも U 成分に関しては 5 km s^{-1} ほど, V 成分に関しては 4 km s^{-1} ほど結果が変化することがわかりました.

それでは最後に, ③回転曲線モデルについて調べていきます. U 成分に関しては回転曲線の影響はないので, V 成分のみを今回は考えることになります. しかし, 実は同じ銀河中心距離 R に位置するペルセウス座腕とインター腕に関しても, 図3で見られたずれは綺麗に見られています (図4(左)参照). 同じ銀河中心距離 R での観測が行われていない領域は今後の観測で確認する必要がありますが, 図3で見られているずれを, 「(軸対称) 回転曲線モデル」の違いで説明することは難

しそうだと言えそうです.

これまでの議論を表1でまとめてみました. また, 筆者自身の図3の解釈を最後に述べていきます. 図3で U には多少不定性が残るものの, インター腕の天体はおおむね銀河回転に乗った円運動を示し, 星でもガスでもトレースされるペルセウス座腕では系統的な非円運動が見えていると言えます. 特に銀河回転方向の非円運動 V に関してははっきりとペルセウス座腕とインター腕でずれが見えていて, この系統的な差を種々の仮定 (銀河定数, 太陽非円運動, 回転曲線モデル) の違いで説明することは難しく, 理論との詳細比較をもって説明することが強く望まれます.

3. VERAで明らかにされる銀河系第三象限^{※5}のペルセウス座腕

「果たして密度波理論は正しいのか?」筆者の抱くシンプルな疑問を観測的に確認する面白い方法の一つ, 3章では紹介していきます. 図4(左)は銀河回転に対する非円運動 (V) を, 図3と同

^{※5} $180^\circ < \text{銀経} < 270^\circ$ の範囲が, 銀河系第三象限と定義されています (図4(右)も参照).

じ天体を用いて銀河中心距離 (R) に対して表示しています。密度波理論の予測では、共回転半径 (CR, 銀河回転と渦巻き腕のパターン速度が一致する共鳴位置) を境に非円運動の向きが変わると言われています¹⁶⁾。図4(左)のペルセウス座腕の天体に関しては、銀河中心距離 (R) に対して正の相関が見えていて (相関係数 $\rho \sim 0.7$)、仮に1次式でフィットすると、 $V=0 \text{ km s}^{-1}$ の位置が 11.5 kpc に現れます。実は視線速度を用い同様の研究が Russeil ら¹⁹⁾ で行われていて、彼らは $V=0 \text{ km s}^{-1}$ の場所 (CR) を 12.7 kpc と予測しています。われわれと彼らの違いはまず、距離測定の精度に関してわれわれに分があります。もう一つは、彼らはペルセウス座腕とアウター腕の天体を用いて CR を求めています。アウター腕に関しては3天体ほど VLBI 観測が既に行われていて (G75.30+1.32²⁰⁾, WB89-437²¹⁾, S269²²⁾), どの天体も $V \sim 0 \text{ km s}^{-1}$ が報告されているので、CR の決定に使ってよいのか疑問が残ります。以上を踏まえてわれわれの提案は、非円運動が顕著に見えているペルセウス座腕の VLBI 観測を銀河系第三象限に拡張することで、銀河系 CR 前後の運動を高精度で直接観測することです。この観測により、密度波理論の切り分けに関し、直接的な証拠を提示する事が可能になるだろうとわくわくしています。

図4(右)は、現在筆者が所属している銀河系外縁部回転曲線プロジェクト (VERA のサイエンスプロジェクトの一つ) で観測している天体の一部を、運動学的距離 (円運動を仮定して求めた距離) と VLBI 観測の結果に基づいてそれぞれ表しています。すでに銀河系第三象限ペルセウス座腕の天体 (候補) に対して VLBI 観測が継続中で、2013 年には観測結果・解析結果を報告できると期待しています。最後に一点伝えますと、図4(右)の $Y > 10 \text{ kpc}$ のところに1天体 (IRAS 05137+3919), 誤差が大きい ($\sim 31\%$) VLBI 観測の結果 (●) が見られます²³⁾。この天体は銀河中心距離

$R \sim 20 \text{ kpc}$ に位置するので、銀河系円盤の総質量を求めるうえで重要な天体として、現在精度の向上を目指して追加観測を行っているところです。この天体は本稿とは別の科学テーマになりますが、この天体の追観測結果についても2013年度中の公表を目指しています。

4. ま と め

最後に全体を俯瞰したうえでまとめたいと思います。本稿では VERA で得られた最新成果の一つとして、銀河系ペルセウス座腕で見られる系統的な非円運動について報告しました。これは銀河系動力学研究において、理論と観測との詳細比較を行うキックオフの意味をもちます。今後 VERA でさらに観測が進められることで、40年以上仮説であり続けた密度波理論について、ついに正誤の直接検証を行うことができるでしょう。

謝 辞

本稿の科学的な内容は、2012年に筆者らが発表した投稿論文¹⁰⁾に基づいています。詳しくはそれらをご覧ください。本間希樹氏、銀河系外縁部回転曲線プロジェクトのコアメンバー (中西裕之氏、松尾光洋氏、倉山智春氏) の各氏から原稿について有益なコメントを数多くいただきました。

参考文献

- 1) Loveday J., 1996, MNRAS 278, 1025
- 2) 川口則幸, 2013, 天文月報 106, 304
- 3) Oort J. H., Kerr F. J., Westerhout G., 1958, MNRAS 118, 379
- 4) Churchwell E., Babler B. L., Meade M. R., et al., 2009, PASP 121, 213
- 5) Benjamin R. A. 2008, ASP Conf. Ser. 387, Astronomical Society of the Pacific, pp. 375-380
- 6) 祖父江義明, 有本信雄, 家 正則 [編], 2007, シリーズ現代の天文学第5巻銀河II—銀河系 (日本評論社)
- 7) Lin C. C., Shu F. H. 1964, ApJ 140, 646
- 8) Baba J., Saitoh T. R., Wada K. 2012, ApJ, in press (arXiv: 1211.5401)

- 9) Baba J., Asaki Y., Makino J., Miyoshi M., Saitoh T. R., Wada K., 2009, ApJ 706, 471
- 10) Sakai N., Honma M., Nakanishi H., Sakanoue H., Kurayama T., Shibata K. M., Shizugami M., 2012, PASJ 64, 108
- 11) Bronfman L., Nyman L.-Å., May J., 1996, A&A 115, 81
- 12) *Spitzer* 衛星のHP: <http://www.spitzer.caltech.edu/news/277-ssc2008-10-Two-of-the-Milky-Way-s-Spiral-Arms-Go-Missing>
- 13) Gillessen S., Eisenhauer F., Trioee S., Alexander T., Genzel R., Martins F., Ott T. 2009, ApJ 692, 1075
- 14) Reid M. J., Menten K. M., Zheng X. W., Brunthaler A., Xu Y., 2009b, ApJ 705, 1548
- 15) Schonrich R., Binney J., Dehnen W., 2010, MNRAS, 403, 1829
- 16) Mel'nik A. M., Dambis A. K., Rastorguev A. S., 1999, AstL 25, 518
- 17) Ando K., Nagayama T., Omodaka T., et al., 2011, PASJ 63, 45
- 18) Georgelin Y. M., Georgelin Y. P., 1976, A&A 49, 57
- 19) Russeil D., Adami C., Georgelin Y. M., 2007, A&A 470, 161
- 20) Sanna A., Reid M. J., Dame T. H., et al., 2012, ApJ 745, 82
- 21) Hachisuka K., Brunthaler A., Menten K. M., Reid M. J., Hagiwara Y., Mochizuki N., 2009, ApJ 696, 1981
- 22) Honma M., Bushimata T., Choi Y. K., et al., 2007, PASJ 59, 889
- 23) Honma M., Hirota T., Kan-ya Y., et al., 2011, PASJ 63, 17

Systematic Noncircular Motion of the Perseus Spiral Arm Observed with VERA Nobuyuki SAKAI

The Graduate University for Advanced Studies (Sokendai), Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: We show one of VERA scientific results, systematic noncircular motion of the Perseus spiral arm. The noncircular motion, an order of $\sim 20\text{--}30\text{ km s}^{-1}$, is clearly different from circular motion at inter-arm region. The result allows us to compare it with theoretical results for an asymmetric potential of the Galaxy. Continuing VERA observations would reveal whether the density-wave theory which has been believed over 40 years is correct or not.