

Голові разової  
спеціалізованої вченої ради  
Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна  
професору Василю ШЕВЧЕНКУ  
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

### **Відгук**

офіційного опонента, доцента кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидата фізико-математичних наук Решетника Володимира Миколайовича на дисертаційну роботу Денищенко Софії Іванівни «Структурні особливості галактики Чумацький Шлях за результатами кінематичного аналізу» подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Відомо, що галактика Чумацький Шлях є спіральною галактикою з перемичкою. Це встановлено з досліджень молекулярного газу, нейтрального газу, дослідження розподілу зірок тощо. Проте точна структура, кількість та положення спіральних рукавів все ще залишається до кінця не відомою.

Існує декілька основних причини, чому ця проблема так довго залишається невирішеною. Зокрема, перешкодою є те, що Сонце розташоване на краю галактичного диска поблизу площини Галактики, тому можна спостерігати лише суперпозицію різних структурних особливостей (наприклад, спіральних рукавів, шпор, відгалужень, галактичних смуг) уздовж променя зору. Також, через дуже велику густину та яскравість центральної частини Галактики, немає можливості досліджувати протилежну від Сонця ділянку Галактичного диска.

Більш того, рукава галактик зазвичай мають розгалуження, вони зливаються, скручуються та мають ступінь нерівномірності густини і лише в першому наближенні можуть бути описані логарифмічними спіралями. Досі не вирішеним є питання щодо того, чи є спіральний візерунок Галактики дво-рукавним або все ж таки чотирьох-рукавним.

Складність задачі полягає у відборі та визначенні розташування спіральних трасерів. Щоб окреслити точну структуру Галактики на диску необхідно виявити велику кількість спіральних індикаторів із добре визначеннями відстанями. Можливість детально дослідити та проаналізувати структурні особливості великої частини Галактики, надав третій реліз космічної місії Gaia, що містить високоточні власні рухи, паралакси, променеві швидкості та інші астрометричні та астрофізичні параметри для зорь різних типів. Вибірку із великою кількістю об'єктів можна використовувати не лише для аналізу структури Галактики за їхніми положеннями, а й провести кінематичний аналіз різних її областей і отримати додаткову інформацію про структурні особливості різних регіонів Галактики. Відповідно, задача вибору трасерів та методів визначення параметрів спіральних рукавів на основі даних Gaia DR3 є **актуальною** задачею сьогодення.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна та є складовою частиною наступних НДР:

– «Метод векторних сферичних функцій для дослідження кінематики Галактики на основі космічних та наземних даних», № державної реєстрації 0117U004968, 01.10.2017–30.09.2020 (здобувачка – виконавець).

– «Вирішення астрометричних, кінематичних та астрофізичних задач за даними сучасних каталогів із використанням штучних нейронних мереж», № державної реєстрації 0119U002537, 01.01.2019–31.12.2021 (здобувачка – виконавець).

– «Картування кінематичних параметрів Галактики за даними Gaia та інших сучасних каталогів», № державної реєстрації 0122U001479, 01.01.2022–31.12.2024 (здобувачка – виконавець).

**Загальна характеристика дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел і додатку. Загальний обсяг роботи складає 125 сторінок. Вона містить 37 рисунків та 4 таблиці. Список використаних джерел містить 87 найменувань. Хід дисертаційної роботи висвітлюється в трьох розділах.

У *першому розділі* представлено огляд літературних джерел. Описано розвиток уявлень про структуру та особливості Галактики. Розглянуті підсистеми Галактики та їх взаємозв'язок з поняттям «населення». Наводяться приклади робіт з результатами визначення параметрів спіральної структури та її схематичних зображень за допомогою різних трасерів. Представлено огляд можливих теорій виникнення спіральної структури Галактики та описано

головні проблеми її вивчення. Приведено опис сучасний даних про спіральні рукави галактики Чумацький Шлях.

У *другому розділі* дисертації розглядаються математичні методи, що були використані в рамках дослідження. Описані системи координат, що використовуються в роботі, а також кінематичні моделі, які часто застосовуються в кінематичних дослідженнях Галактики. Розглянуто метод визначення параметрів спіральних рукавів Галактики за допомогою діаграми “позиційний кут - логарифм відстані”.

У *третьому розділі* приведено результати визначення в попередніх роботах кінематичних параметрів за даними Gaia DR3 та приведено обґрунтування використання кінематичного методу. Показано, що положення центроїдів з незначущими  $M+11$ , можна розглядати як кінематичні трасери спіральних рукавів. Виходячи з необхідності мати максимально точні астрометричні параметри, створено нову вибірку зорь із каталогу Gaia DR3 з урахуванням поправок паралаксів та поправок до власних рухів яскравих зорь. В межах моделі Огороднікова-Мілна проведено кінематичний аналіз в кожній сферичній області та створено підвибірку центроїдів тих сферичних областей, у яких величина параметра  $M+11$  виявилася незначущою. Представлено запропонований автором, оригінальний спосіб відбору кінематичних трасерів, що належать конкретним спіральним рукавам. Проведено порівняння отриманих результатів з результатами інших авторів. Зроблена оцінку ефективності запропонованого методу кінематичних трасерів та отримання параметрів спіральних рукавів Галактики, як на модельних так і на спостережних даних та зроблено висновки.

У *Висновках* наведено основні результати роботи, які становлять новизну роботи. *Список використаних джерел* свідчить про проведення ретельного аналізу сучасних і класичних результатів наукових досліджень.

### **Найвагоміші наукові результати, представлені в дисертації:**

1. Обґрунтовано використання компонент тензора швидкості деформації для вивчення спіральної структури Галактики.
2. Для вирішення рівнянь моделі Огороднікова-Мілна були обчислені в локальній галактичній системі координат положення та швидкості зір з каталогу Gaia DR3.
3. Створено програмне забезпечення для обробки даних, розрахунків та побудови галактичних спіральних рукавів згідно із запропонованим у роботі методом.

4. У межах галактоцентричних координат  $4 \text{ кпк} < R < 14 \text{ кпк}$ ,  $140^\circ < \theta < 220^\circ$ , та  $Z = 0 \text{ кпк}$  отримано оцінки кінематичних параметрів моделі Огороднікова-Мілна з використанням 19 млн. зорь створеної вибірки.
5. Вперше, використовуючи підвибірку центроїдів тих сферичних областей, в яких величина кінематичного параметра  $M+11$  виявилася незначущою, було побудовано розподіл таких центроїдів в Галактичній площині.
6. Вперше реалізовано, запропонований автором спосіб відбору центроїдів сферичних областей, які мають  $M+11 \approx 0$  і належать до конкретного спірального рукава. Це знімає проблему приналежності трасерів до лінійної залежності в методах на основі діаграми “позиційний кут — логарифм відстані”.
7. Отримано оцінки параметрів спіральних рукавів Галактики з використанням запропонованого методу. Обраховані оцінки параметрів показують добру узгодженість з результатами, отриманими іншими авторами та значно більш високу точність їх визначення. На їх основі, шляхом екстраполяції за межі наявних даних, побудовано спіральну схему, на яку накладено сегменти галактичних рукавів Scutum-Centaurus, Sagittarius-Carina, Perseus, Norma-Outer, а також локального рукава Orion.
8. Виконано тестування запропонованого методу шляхом порівняння результатів із результатами, отриманими динамічним методом та шляхом співставлення морфологічних особливостей макетної Галактики.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендації, сформульованих у дисертації.** На основі тексту дисертації та змісту публікацій Денищенко С.І. можна стверджувати, що результати, представлені в дисертації, обґрунтовані, достовірні та відповідають меті і завданням дисертаційної роботи. Обґрунтованість і достовірність представлених результатів забезпечується:

- застосуванням надійно перевірених теоретичних моделей та статистичних методів до найновіших спостережних даних;
- систематичним порівнянням отриманих результатів з сучасними дослідженнями інших авторів;
- публікацією результатів дисертаційного дослідження в наукових виданнях найвищого рівня;
- апробацією отриманих результатів на міжнародних наукових конференціях.

**Апробація дисертації та публікації.** Результати роботи опубліковані в чотирьох статтях в журналі Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, апробовані на міжнародних наукових конференціях та не містять академічного плагіату.

**Оформлення дисертації.** Оформлення, зміст, структура дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

**Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.** Результати кінематичного аналізу, що одержані в даній роботі, запропонований оригінальний метод відбору трасерів, а також отримані параметри спіральних рукавів Галактики, можуть бути використані для уточнення уявлень про будову та еволюцію Галактики. Ця задача має фундаментальне значення для розуміння структури, кінематичних особливостей та інших характеристик нашої Галактики. Здобуті результати можуть стати важливою основою для майбутніх теорій динаміки Галактики, розподілу речовини в ній, походження її спіральної структури тощо.

**Оцінка змісту дисертації та її завершеності.** Дисертація Денищенко Софії Іванівни «Структурні особливості галактики Чумацький Шлях за результатами кінематичного аналізу» є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішений комплекс задач, пов'язаних з дослідженням кінематики зір в нашій Галактиці та її спіральної структури на основі статистичної обробки астрометричної інформації космічного телескопа Gaia.

Результати досліджень повністю висвітлені у наукових публікаціях, матеріалах конференцій та відображені у змісті дисертації.

#### **Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.**

Дисертацію написана науковою мовою, містить незначну кількість граматичних помилок і неточностей, на деякі з них варто вказати:

- В декількох місцях зустрічаються обдруківки та інколи недоречно використання знаків пунктуації.
- В тексті подекуди зустрічаються англійські одиниці вимірювання.
- На с.51 дається скорочення МОЗ, яке не входить в початковий список скорочень і надалі в тексті не використовується.
- На с. 52, 53 посилання на рисунки з невідомим номером.
- На с. 59, посилання не по загальному стандарту.
- На с. 84, посилання на джерела в розділі 3.3 мають інший формат.

При ознайомленні з роботою виникли деякі питання, наприклад:

- Не зовсім зрозуміло, чому при перетворенні формули 2.41 в 2.42 (с.72), пропала змінна позиційного кута  $\theta$ .
- На с.110 вказується, що "з рисунка 3.31 добре видно, що існує певна кореляція між координатами центроїдів сферичних областей з незначущим параметром  $M+11$  та областями підвищеної густини на великих галактоцентричних відстанях." Краще було би навести числові значення кореляції.

**Ці зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, не применшують її наукової і практичної цінності.**

**Загальні висновки.** За актуальністю і новизною отриманих результатів, їх рівнем, обсягом, достовірністю та обґрунтованістю, науковим і практичним значенням та їх оформленням, дисертаційна робота Денищенко Софії Іванівни «Структурні особливості галактики Чумацький Шлях за результатами кінематичного аналізу» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації». Вважаю, що Денищенко Софія Іванівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент,  
Кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри астрономії  
та фізики космоса  
фізичного факультету  
Київського національного  
університету імені Тараса Шевченка

Володимир РЕШЕТНИК

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ

створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 10:11:30 26.01.2024

Назва файлу з підписом: Denyschenko\_official\_review.docx.asice

Розмір файлу з підписом: 29.7 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Denyschenko\_official\_review.docx

Розмір файлу без підпису: 25.7 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: РЕШЕТНИК ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ

П.І.Б.: РЕШЕТНИК ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 2974221957

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 10:11:29 26.01.2024

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F0400000097E8420188A4C104

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)

Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2023.12.21 13:00

Голові разової  
спеціалізованої вченої ради  
Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна  
професору Василю ШЕВЧЕНКУ  
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

### Відгук

офіційного опонента, завідувачки відділу позагалактичної астрономії та астроінформатики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, доктора фізико-математичних наук, професора, член-кореспондента НАН України Вавилової Ірини Борисівни на дисертаційну роботу Денищенко Софії Іванівни «Структурні особливості галактики Чумацький Шлях за результатами кінематичного аналізу», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія»

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Деталізована спіральна структура нашої Галактики залишається невідомою внаслідок багатьох причин. Основними з них є а) наше місцеположення як спостерігача Всесвіту на краю галактичного диска поблизу площини Галактики, бі) потужна яскравість і щільність зір в балджі, центральній частині Галактики. Внаслідок першої з них ми можемо аналізувати лише суперпозицію різних структурних особливостей (спіральних рукавів і їхніх розгалужень, шпор, галактичних смуг) уздовж спостережуваної лінії зору, а внаслідок другої причини протилежна від Сонця ділянка галактичного диска залишається недоступною для дослідження. Спіральний візерунок Чумацького Шляху на високих галактичних широтах досить складний, із високим ступенем нерівномірності за щільністю областей скупчування зір. Це ускладнює впевнено вирішити скільки рукавів має Галактика (два або чотири), як і тільки в першому наближенні описати їх логарифмічними спіралями, де значення кута закручення спіралей коливаються від  $7^\circ$  до  $25^\circ$ . Тому кожне дослідження, яке проливає нове світло на вирішення цієї проблеми, є **значущим і актуальним**.

Іншим **актуальним** завданням у руслі астрометричних досліджень є необхідність відібрати та точно визначити розташування спіральних трасерів, як і виокремити надійні методи визначення параметрів спіральних рукавів.



Щоб окреслити структуру галактичного диску, необхідно виявити велику кількість індикаторів спіральних рукавів (яскравих зір, зоряних асоціацій, червоних надгігантів, розсіяних і кулястих зоряних скупчень, областей іонізованого водню, областей зореутворення, тощо) із найбільш точними визначеннями відстані до них. Таку можливість надали результати, отримані космічною обсерваторією GAIA, зокрема останній каталог GAIA DR3, який містить високоточні дані про власні рухи, паралакси, променеві швидкості та інші астрометричні та астрофізичні параметри зір різних спектральних типів. Окрім деталізації структури Галактики, статистично представницькі вибірки десятків мільйонів зір та аналіз поля їхніх швидкостей дозволяють отримати кінематичні параметри різних областей Галактики, – зокрема в дисертації це завдання вирішується в межах кінематичної моделі Огородникова-Мілна.

**Загальна характеристика дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел і додатку. Загальний обсяг роботи становить 125 сторінок. Вона містить 37 рисунків та 4 таблиці, список використаних джерел із 87 найменувань.

У *вступі* обґрунтовано вибір теми дослідження, мету та завдання; зазначено зв'язок з трьома науково-дослідними роботами Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, в яких Денищенко С.І. є виконавцем: «Метод векторних сферичних функцій для дослідження кінематики Галактики на основі космічних та наземних даних», «Вирішення астрометричних, кінематичних та астрофізичних задач за даними сучасних каталогів із використанням штучних нейронних мереж», «Картування кінематичних параметрів Галактики за даними Gaia та інших сучасних каталогів». Охарактеризовано предмет, об'єкт і методи дослідження та сформульовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Виокремлено особистий внесок Денищенко С.І. у чотирьох наукових статтях та подано перелік трьох конференцій, в яких здобувачка брала участь.

У *першому розділі* представлено огляд робіт за тематикою дисертаційного дослідження. Описано розвиток уявлень про структуру та особливості Галактики, взаємозв'язок підсистем з поняттям «зоряне населення». Подано приклади визначення параметрів спіральної структури за допомогою різних трасерів та огляд теорій механізму виникнення і підтримки спіральної структури, у т.ч. теорії хвиль густини; наводяться сучасні дані про спіральні рукави за дослідженнями розподілу зір в інфрачервоному діапазоні, молекулярного і нейтрального газу, в т.ч. радіоастрономічними методами. Зокрема приведено параметри спіральних рукавів із роботи Рейда та ін. (2019),

схематичне зображення розподілу різних трасерів за Хоу (2021), як і більш детально описані спіральні рукава Scutum-Centaurus, Sagittarius-Carina, Perseus, Norma-Outer та Місцевий рукав Orion.

У *другому розділі* розглядаються системи координат та математичні методи, що були використані в дослідженні. Розглядаються кінематичні моделі Огороднікова-Мілна та Оорта-Лінблада, метод визначення параметрів спіральних рукавів Галактики як логарифмічної спіралі за допомогою діаграми «позиційний кут – логарифм відстані».

У *третьому розділі* подано оригінальні результати, отримані Денищенко С.І. щодо визначення кінематичних параметрів Галактики за даними каталогу GAIA DR3 та обґрунтовано використання кінематичного методу. Показано, що положення центроїдів з незначущими елементами матриці  $M_{11}^+$  у моделі Огороднікова-Мілна можна розглядати як кінематичні трасери спіральних рукавів у діапазоні галактоцентричних циліндричних координат  $140^\circ < \theta < 220^\circ$ ,  $4 \text{ кпк} < R < 13$  з відстанню від Сонця  $R_0 = 8.15 \text{ кпк}$ . Автором дисертації створено нову вибірку зір із каталогу GAIA DR3 з урахуванням поправок паралаксів та поправок до власних рухів яскравих зір, що забезпечило максимальну точність астрометричних параметрів. В межах моделі Огороднікова-Мілна проведено кінематичний аналіз в кожній сферичній області. Сформовано умови виділення центроїдів, що належать до конкретного спірального рукава Галактики. З використанням цих умов створено підвибірку центроїдів тих сферичних областей, у яких величина параметра  $M_{11}^+$ , пов'язаного зі стабільністю локальних зоряних систем, що містяться в цих сферичних областях, виявилася незначущою (обчислене значення цього параметра не перевищує подвоєного значення помилки його визначення). Розподіл кінематичного параметру  $M_{11}^+$  у галактичній площині XY подано на рис. 3.15, а обґрунтування його застосування гарно проілюстровано на рис. 3.8, де розподіл координат центроїдів, які утворюються із зір, що містяться в сферах радіусом  $R_s = 0.5 \text{ кпк}$ , накладено на спіралі, взяті з роботи Рейда та ін. (2019).

Описано запропонований автором новий оригінальний спосіб відбору кінематичних трасерів, що належать кожному зі спіральних рукавів Галактики, заснований на аналізі поля радіальних швидкостей. Отримані параметри п'яти досліджених спіральних рукавів Галактики, подані в таблиці 3.1, порівнюються з результатами інших авторів (таблиця 3.2). Вивчено ефективність запропонованого методу кінематичних трасерів та отримання параметрів спіральних рукавів Галактики, як на модельних (макетних) AURIGA, так і на досліджуваних спостережних даних.

*Висновки* дисертаційної роботи узагальнено подають наукову новизну отриманих результатів. *Список використаних джерел* свідчить про проведення ретельного аналізу сучасних і класичних результатів досліджень за тематикою дисертації.

Серед **найвагоміших наукових результатів** Денищенко С.І., отриманих у дисертаційному дослідженні, слід відмітити такі:

1. Обґрунтовано використання компонент тензора швидкості деформації для вивчення спіральної структури Галактики. Отримано оцінки кінематичних параметрів моделі Огородникова-Мілна з використанням створеної вибірки 19 млн зір у межах галактоцентричних координат  $4 \text{ кпк} < R < 14 \text{ кпк}$ ,  $140^\circ < \theta < 220^\circ$ ,  $Z = 0 \text{ кпк}$ .

2. Вперше побудовано розподіл центроїдів в Галактичній площині тих сферичних областей, в яких величина кінематичного параметра  $M_{11}^+$  виявилася незначущою, з використанням нової підвибірки центроїдів.

3. Вперше реалізовано запропонований автором спосіб відбору центроїдів сферичних областей, які мають  $M_{11}^+ \approx 0$  і належать до кожного з п'яти спіральних рукавів Галактики. Це дозволяє уникнути проблеми приналежності трасерів до лінійної залежності  $\ln R = k\phi + b$ , яка притаманна класичним методів при використанні діаграми «позиційний кут – логарифм відстані».

4. Отримано оцінки параметрів спіральних рукавів Галактики з використанням запропонованого методу, які, добре узгоджуючись з результатами інших авторів, мають значно більш високу точність їх визначення. На їх основі, шляхом екстраполяції за межі наявних даних, побудовано спіральну схему, на яку накладено сегменти галактичних рукавів Scutum-Centaurus, Sagittarius-Carina, Perseus, Norma-Outer, Місцевого рукава Orion.

5. Виконано тестування запропонованого методу шляхом порівняння результатів із результатами, отриманими динамічним методом та шляхом співставлення морфологічних особливостей макетної Галактики із координатами центроїдів таких її сферичних областей, для яких виконується умова  $\partial VR / \partial R = M_{11}^+ \approx 0$ .

**Апробація дисертації та публікації.** Результати роботи опубліковані в чотирьох статтях в журналі Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (імпакт-фактор 4,8), у одній з яких Денищенко С.І. є першим автором. Результати апробовані на двох міжнародних наукових конференціях.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендації, сформульованих у дисертації.** Текст дисертації та зміст 4 наукових статей демонструє, що представлені результати обґрунтовані, достовірні та відповідають меті і завданням роботи. Обґрунтованість і достовірність наукових положень та висновків забезпечується а) застосуванням перевірених теоретичних моделей, зокрема кінематичної моделі Огородникова-Мілна, б) застосуванням статистичних методів при обробці спостережних даних і врахуванням похибок; в) узгодженістю отриманих результатів з сучасними дослідженнями інших авторів; г) публікаціями результатів у журналі *Mon. Not. R. Astron. Soc.* (квартиль Q1), який забезпечує фахове рецензування; д) апробацією отриманих результатів на наукових конференціях.

**Оформлення дисертації.** Оформлення, зміст, структура дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

**Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.** Результати кінематичного аналізу, що одержані в роботі Денищенко С.І., запропонований оригінальний метод відбору трасерів, а також отримані параметри п'яти спіральних рукавів Галактики мають високу значущість для уточнення уявлень про будову та еволюцію Галактики, кінематики і динаміки її підсистем, побудови кривої обертання та розподілу баріонної речовини в спіральних рукавах і міжзоряному середовищі, походження її спіральної структури. Виконані оцінки кінематики зір можуть бути однією з особливостей нашої Галактики при пошуках галактик-аналогів Чумацького Шляху. Матеріал, поданий у розділах 1 і 2, корисно включити в методичні розробки до лекційних курсів для бакалаврів, які навчаються за спеціальністю «Фізика та астрономія». У загальному контексті результати стануть у нагоді в астрономічних установах України і світу як у наукових дослідженнях, так і з метою популяризації науки.

**Оцінка змісту дисертації та її завершеності.** Дисертація Денищенко Софії Іванівни «Структурні особливості галактики Чумацький Шлях за результатами кінематичного аналізу» є завершеною науково-дослідною

роботою, в якій вирішений комплекс завдань щодо кінематики зір та спіральної структури Галактики з використанням астрометричних даних космічного телескопа GAIA.

Результати досліджень повністю висвітлені у наукових публікаціях, матеріалах конференцій та відображені у змісті дисертації.

### **Дискусійні положення і зауваження до змісту дисертації.**

1. Як зазначає автор, у дисертаційній роботі не розглядався вплив параметрів  $M_{22}^+$  і  $M_{33}^+$  на стійкість зоряних областей Галактики, а дослідження були зосереджені лише на встановленні зв'язку між параметром  $M_{11}^+$ , що характеризує стиснення-розтягнення поля швидкостей у сферичних областях та спіральними рукавами в площині XY. Чи вплине розгляд згаданих інших діагональних компонентів тензора швидкостей локальної деформації на отримані в дисертації результати, якщо розглядаються периферійні області Галактики (більше 12 кпк) або область балджу (до 4 кпк), як і в іншому діапазоні кутів (див. рис. 3.2 і 3.3 і обговорення на с. 79-83)? Чи для таких діапазонів треба шукати інший кінематичний трасер?

2. Яким чином отримані оцінки параметрів спіральних рукавів можуть бути використані для уточнення кривої обертання Галактики на відстанях 4-12 кпк, особливо на високих галактичних широтах, де спіральний візерунок залишається дискусійним?

3. Чи можна за отриманими параметрами поля швидкостей зоряних областей і центроїдів у досліджуваному діапазоні кінематичних параметрів виокремити вплив карликових галактик-супутників нашої Галактики або ознаки можливого злиття з Туманністю Андромеди?

4. У тексті дисертації присутня помилка при виділенні комою складового підрядного сполучника, яку опонент відмічав на перших сторінках (с. 27, «структури Галактики яка сформована, як...»), треба «структури Галактики, яка сформована як...»), а потім вже ні, бо вона виявилася систематичною; інші незначущі як «кпс» (с. 5 і далі, треба «кпк»), які не затруднюють читання тексту; зайві коми як «від Сонця, в напрямку від центра...» (с. 33); одиницю вимірювання «мас» (с. 62) краще писати англійською, або винести в перелік умовних позначень; писати українською «km/skpc» (зокрема с. 81); уніфікувати означення «зорі» чи «зірки», як і «зорь» чи «зір, зірок» у родовому;

5. Із тексту дисертації не зрозуміло, на якому етапі обчислення і обробки спостережних даних враховуються помилки астрометричних параметрів зір із каталогу GAIA DR3. Зокрема на с. 86 описується лише процедура як обійти

«проблему паралаксів» з їх систематичним зміщенням та корекції власних рухів.

Висловлені дискусійні положення більше стосуються врахування у подальших дослідженнях, а зауваження не впливають на загальну високу оцінку дисертаційної роботи.

**Загальні висновки.** За актуальністю і новизною отриманих результатів, рівнем їх публікації у високореєтинговому журналі, достовірністю та обґрунтованістю, науковим і практичним значенням, дисертаційна робота Денищенко Софії Іванівни «Структурні особливості галактики Чумацький Шлях за результатами кінематичного аналізу» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. No 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. No 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

Вважаю, що Денищенко Софія Іванівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент,  
доктор фізико-математичних наук,  
професор, член-кореспондент НАН України,  
завідувачка відділу позагалактичної  
астрономії та астроінформатики  
Головної астрономічної обсерваторії  
Національної академії наук України

Ірина ВАВИЛОВА

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ  
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 10:48:34 30.01.2024

Назва файлу з підписом: Відгук-Вавилова-дисер-Денищенко.pdf.asice  
Розмір файлу з підписом: 443.2 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Відгук-Вавилова-дисер-Денищенко.pdf  
Розмір файлу без підпису: 443.5 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ВАВИЛОВА ІРИНА БОРИСІВНА

П.І.Б.: ВАВИЛОВА ІРИНА БОРИСІВНА

Країна: Україна

РНОКПП: 2174017760

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 10:48:33  
30.01.2024

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000700643019AF1C104

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)

Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2023.12.21 13:00

Голові разової  
спеціалізованої вченої ради  
Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна  
професору Василю ШЕВЧЕНКУ  
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

## Рецензія

офіційного рецензента, професора кафедри астрономії та космічної інформатики фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, доктора фізико-математичних наук, Голубова Олексія Андрійовича на дисертаційну роботу Денищенко Софії Іванівни «Структурні особливості галактики Чумацький Шлях за результатами кінематичного аналізу» подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Відомо, що галактика Чумацький Шлях є спіральною галактикою з перемичкою. Це підтверджують багато досліджень зокрема: дослідження молекулярного газу, нейтрального газу, а також дослідження зірок в інфрачервоному діапазоні. Проте точна структура, кількість та положення спіральних рукавів все ще залишається до кінця не відомою.

Існує декілька основних причини, чому ця проблема так довго залишається невирішеною. Зокрема, перешкодою є те, що Сонце розташоване на краю галактичного диска поблизу площини Галактики, тому ми можемо бачити лише суперпозицію різних структурних особливостей (наприклад, спіральних рукавів, шпор, відгалужень і галактичних смуг) уздовж спостережуваної лінії видимості. Також, через дуже велику густину та яскравість центральної частини Галактики, ми не маємо можливості досліджувати протилежну від Сонця ділянку Галактичного диска.

Більш того, рукава галактик зазвичай мають розгалуження, вони зливаються, скручуються та мають ступінь нерівномірності густини і лише в першому наближенні можуть бути описані логарифмічними спіралями. Значення кута закручення спіралей, за різними оцінками, коливаються приблизно від  $7^\circ$  до  $25^\circ$ . Також, досі не вирішеним є питання щодо того, чи є



спіральний візерунок Галактики дво-рукавним або все ж таки чотирьох-рукавним.

Важкою задачею є необхідність відібрати та точно визначити розташування спіральних трасерів. Щоб окреслити точну структуру Галактики на диску необхідно виявити велику кількість спіральних індикаторів із найбільш точними визначеннями відстані. Можливість детально дослідити та проаналізувати структурні особливості великої частини Галактики, надав третій реліз космічної місії Gaia, що містить високоточні власні рухи, паралакси, променеві швидкості та інші астрометричні та астрофізичні параметри для зорь різних типів. Вибірку із великою кількістю об'єктів можна використовувати не лише для аналізу структури Галактики за їхніми положеннями, а й провести кінематичний аналіз різних її областей і отримати додаткову інформацію про структурні особливості різних регіонів Галактики. Відповідно, задача вибору трасерів та методів визначення параметрів спіральних рукавів на основі даних Gaia DR3 є **актуальною** задачею сьогодення.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна та є складовою частиною наступних НДР:

– «Метод векторних сферичних функцій для дослідження кінематики Галактики на основі космічних та наземних даних», № державної реєстрації 0117U004968, 01.10.2017–30.09.2020 (здобувачка – виконавець).

– «Вирішення астрометричних, кінематичних та астрофізичних задач за даними сучасних каталогів із використанням штучних нейронних мереж», № державної реєстрації 0119U002537, 01.01.2019–31.12.2021 (здобувачка – виконавець).

– «Картування кінематичних параметрів Галактики за даними Gaia та інших сучасних каталогів», № державної реєстрації 0122U001479, 01.01.2022–31.12.2024 (здобувачка – виконавець).

**Загальна характеристика дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел і додатку А. Загальний обсяг роботи складає 125 сторінок. Вона містить 37 рисунків та 4 таблиці. Список використаних джерел містить 87 найменувань. Хід дисертаційної роботи висвітлюється в трьох розділах.

У *першому розділі* представлено огляд літературних джерел. Описано розвиток уявлень про структуру та особливості Галактики. Описано підсистеми Галактики та їх взаємозв'язок з поняттям «населення». Наводяться

прикладі робіт з результатами визначення параметрів спіральної структури та її схематичних зображень за допомогою різних трасерів. Кратко представлено огляд теорій механізму виникнення спіральної структури Галактики та описано головні проблеми її вивчення. Приведено опис сучасних даних про спіральні рукави галактики Чумацький Шлях.

У другому розділі дисертації розглядаються математичні методи, що були використані в рамках дослідження. Розглядаються системи координат, що використовуються в роботі, а також кінематичні моделі, які часто застосовуються в кінематичних дослідженнях Галактики. Описується метод визначення параметрів спіральних рукавів Галактики за допомогою діаграми “позиційний кут - логарифм відстані”.

У третьому розділі приведено результати визначення в попередніх роботах кінематичних параметрів за даними Gaia DR3 та приведено обґрунтування використання кінематичного методу. Показано, що положення центроїдів з незначущими  $M+11$ , можна розглядати як кінематичні трасери спіральних рукавів у діапазоні галактоцентричних циліндричних координат  $140^\circ < \theta < 220^\circ$ ,  $4 \text{ кпк} < R < 13$  з відстанню від Сонця  $R_0 = 8.15 \text{ кпк}$ . Виходячи з необхідності мати максимально точні астрометричні параметри, створено нову вибірку зорь із каталогу Gaia DR3 з урахуванням поправок паралаксів та поправок до власних рухів яскравих зорь. В межах моделі O-M проведено кінематичний аналіз в кожній сферичній області та створено підвибірку центроїдів тих сферичних областей, у яких величина параметра  $M+11$  виявилася незначущою. Представлено запропонований автором, оригінальний спосіб відбору кінематичних трасерів, що належать конкретним спіральним рукавам 5 Галактики, на основі аналізу радіальних швидкостей. Приведена таблиця отриманих параметрів спіральних рукавів Галактики та проведено порівняння отриманих результатів з результатами інших авторів. Проведено оцінку ефективності запропонованого методу кінематичних трасерів та отримання параметрів спіральних рукавів Галактики, як на модельних так і на спостережних даних та зроблено висновки.

*Висновки* дисертаційної роботи підкреслюють наукову новизну проведених досліджень. *Список використаних джерел* свідчить про проведення ретельного аналізу сучасних і класичних результатів наукових досліджень.

### **Найвагоміші наукові результати, представлені в дисертації:**

1. Обґрунтовано використання компонент тензора швидкості деформації для вивчення спіральної структури Галактики.
2. Для вирішення рівнянь моделі O-M положення та швидкості зірок, що мають повне 5-параметричне астрометричне рішення та радіальна

швидкість в каталозі Gaia DR3, були обчислені в локальній галактичній системі координат.

3. Створено програмне забезпечення для обробки даних, розрахунків та побудови галактичних спіральних рукавів згідно із запропонованим у роботі методом.
4. У межах галактоцентричних координат  $4 \text{ кпк} < R < 14 \text{ кпк}$ ,  $140^\circ < \theta < 220^\circ$ , та  $Z = 0 \text{ кпк}$  отримано оцінки кінематичних параметрів моделі O-M з використанням 19 млн. зорь створеної вибірки.
5. Вперше, використовуючи підвибірку центроїдів тих сферичних областей, в яких величина кінематичного параметра  $M+11$  виявилася незначущою, тобто обчислене значення параметра  $M+11$  не перевищувало подвоєного значення похибки його визначення, було побудовано розподіл таких центроїдів в Галактичній площині.
6. Вперше реалізовано, запропонований автором спосіб відбору центроїдів сферичних областей, які мають  $M+11 \approx 0$  і належать до конкретного спірального рукава. Це знімає, завжди існуючу у класичних методах при використанні діаграми “позиційний кут — логарифм відстані”, проблему приналежності трасерів до лінійної залежності  $\ln R = k\phi + b$ .
7. Отримано оцінки параметрів спіральних рукавів Галактики з використанням запропонованого методу. Отримані оцінки параметрів показують добру узгодженість з результатами, отриманими іншими авторами та значно більш високу точність їх визначення. На їх основі, шляхом екстраполяції за межі наявних даних, побудовано спіральну схему, на яку накладено сегменти галактичних рукавів Scutum-Centaurus, Sagittarius-Carina, Perseus, Norma-Outer, а також локального рукава Orion.
8. Виконано тестування запропонованого методу шляхом порівняння результатів із результатами, отриманими динамічним методом та шляхом співставлення морфологічних особливостей макетної Галактики із координатами центроїдів таких її сферичних областей, для яких виконується умова  $\partial V R / \partial R = M+11 \approx 0$

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** На основі тексту дисертації та змісту публікацій Денищенко С.І. можна стверджувати, що результати, представлені в дисертації, обґрунтовані, достовірні та відповідають меті і завданням дисертаційної роботи. Обґрунтованість і достовірність представлених результатів забезпечується:

- застосуванням надійно перевірених теоретичних моделей та статистичних методів до найновіших спостережних даних;
- систематичним порівнянням отриманих результатів з сучасними

дослідженнями інших авторів;

- публікацією результатів дисертаційного дослідження в наукових виданнях найвищого рівня;
- достатньою апробацією отриманих результатів на наукових конференціях.

**Апробація дисертації та публікації.** Результати роботи опубліковані в чотирьох статтях в журналі *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, – одному з найпрестижніших в світі астрономічних журналів з імпакт-фактором 4,8. В одній з цих статей здобувач є першим автором. Також результати апробовані на наукових конференціях конференціях, в тому числі – на Гамівській конференції, одній з найпрестижніших українських конференцій в галузі астрономії.

**Оформлення дисертації.** Оформлення, зміст, структура дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

**Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.** Результати кінематичного аналізу, що одержані в даній роботі, запропонований оригінальний метод відбору трасерів, а також отримані параметри спіральних рукавів Галактики, можуть бути використані для уточнення уявлень про будову та еволюцію Галактики. Ця задача має фундаментальне значення для розуміння структури, кінематичних особливостей та інших характеристик нашої Галактики. Здобуті результати можуть стати важливим будівельним блоком для майбутніх теорій динаміки Галактики, розподілу речовини в ній, походження її спіральної структури і т.д.

**Оцінка змісту дисертації та її завершеності.** Дисертація Денищенко Софії Іванівни «Структурні особливості галактики Чумацький Шлях за результатами кінематичного аналізу» є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішений комплекс задач, пов'язаних з дослідженням кінематики зір в нашій Галактиці та її спіральної структури на основі статистичної обробки астрометричної інформації космічного телескопа Gaia. Результати досліджень повністю висвітлені у наукових публікаціях, матеріалах конференцій та відображені у змісті дисертації.

## Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.

1. На с. 47 два речення (від слів «Квазістаціонарна хвильова» до слів «газоподібними рукавами») є неякісним перекладом двох перших речень з другого абзацу вступу статті L. G. Hou & J. L. Han “Offset between stellar spiral arms and gas arms of the Milky Way” (2015, MNRAS, 454, p. 626) без посилання на першоджерело.
2. На с. 48 стверджується: «Очевидно, що для підтримання спіральної структури протягом тривалого проміжку часу потрібен зовнішній вплив». На мою думку, це твердження зовсім не є очевидним. Більш того, воно протирічить спостережним даним (більшість спіральних галактик не мають великих супутників). Також воно протирічить викладеним в попередніх абзацах теоріям утворення спіральної структури завдяки внутрішнім процесам.
3. У рівнянні (1.1) не пояснений зміст символів  $\Omega_p$  і  $m$ , а епіциклічна частота позначена одночасно двома різними символами  $K$  і  $k$ . У рівняннях (3.20) і (3.21) загублено множник  $\varphi$ .
4. У підписі до Рис. 1.1 астрономка Кароліна Гершель помилково названа ім'ям Кетрін. В описі Рис. 3.18 не пояснені кольори й позначення, не визначено  $P_{50}$ , не пояснений зміст радіальної дії.
5. Для вказаних на с. 27 значень маси й радіуса Галактики  $5,8 \times 10^{11} M_{\odot}$  і 16 кпк бажано надати посилання на джерело, бо на такій високій точності між джерелами існують помітні розбіжності.
6. Незрозумілим залишилось значення слова «вкручуватися» на с. 29, «квазілінійний» на с. 51, фрази «активність зореутворення великої маси» на с. 53. Фраза «скупчення нових зірок» на с. 51, ймовірно, має позначати скупчення новоутворених зір, натомість як термін «нова зоря» традиційно має інше значення. На с. 52 і 53 замість номерів рисунків стоять знаки питання. Не пояснене скорочення «HMSFR». На с. 53 фраза «велика кількість ... слабшає», ймовірно, має позначати «кількість ... зменшується». На с. 45 «хвильова теорія густини», ймовірно, має позначати теорію хвиль густини. На с. 62 англійське скорочення mas від слова milliarcsecond транслітероване українською як «мас», що зовсім не є стандартним українським позначенням. На с. 112 дисертація помилково названа статтею.
7. Для назв спіральних рукавів поперемінно вживаються українські й англійські назви, на с. 45 – навіть в межах одного речення. Я б радив систематично дотримуватись одного набору термінів і віддав би перевагу українським варіантам.
8. В дисертації паралельно вживаються терміни «зірка» й «зоря»,

натомість як саме варіант «зоря» є найбільш загальноприйнятим в астрономічному контексті. (Див., наприклад, «Астрономічний енциклопедичний словник» або «Енциклопедію сучасної України».) Паралельно з правильною словоформою «зір» систематично вживається помилковий варіант «зорь». Замість рекомендованого «Астрономічним енциклопедичним словником» і більшістю україномовних підручників терміну «кулясті скупчення» використовується термін «кульові скупчення». На с. 46 збурення названі «обуреннями». Кілька разів спіральні рукави помилково названі «плечами» і один раз (на с. 54) - «рукою». Вперемішку використовуються терміни «хвилі густини» і «хвилі щільності» (перший варіант є точнішим).

Ці зауваження не впливають на якість результатів дисертаційної роботи і обґрунтованість наведених здобувачем висновків.

**Загальні висновки.** За актуальністю і новизною отриманих результатів, їх рівнем, обсягом, достовірністю та обґрунтованістю, науковим і практичним значенням та їх оформленням, дисертаційна робота Денищенко Софії Іванівни «Структурні особливості галактики Чумацький Шлях за результатами кінематичного аналізу» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації». Вважаю, що Денищенко Софія Іванівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Офіційний рецензент,  
доктор фізико-математичних наук,  
професор кафедри астрономії  
та космічної інформатики  
фізичного факультету  
Харківського національного  
Університету імені В.Н. Каразіна

Олексій ГОЛУБОВ

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ  
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 05:27:35 27.01.2024

Назва файлу з підписом: Відгук\_Голубов.pdf.asice  
Розмір файлу з підписом: 167.3 КБ

Перевірені файли:  
Назва файлу без підпису: Відгук\_Голубов.pdf  
Розмір файлу без підпису: 176.0 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ГОЛУБОВ ОЛЕКСІЙ АНДРІЙОВИЧ  
П.І.Б.: ГОЛУБОВ ОЛЕКСІЙ АНДРІЙОВИЧ  
Країна: Україна  
РНОКПП: 3120308319  
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА  
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 06:27:26  
27.01.2024  
Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"  
Серійний номер: 5E984D526F82F38F0400000095E63C01604EB204  
Алгоритм підпису: ДСТУ 4145  
Тип підпису: Удосконалений  
Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)  
Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)  
Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2023.12.21 13:00

Голові разової  
спеціалізованої вченої ради  
Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна  
професору Василю ШЕВЧЕНКУ  
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

## Рецензія

офіційного рецензента, доцента кафедри астрономії та космічної інформатики фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, кандидата фізико-математичних наук, Слюсарєва Івана Григоровича на дисертаційну роботу Денищенко Софії Іванівни «Структурні особливості галактики Чумацький Шлях за результатами кінематичного аналізу» подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Відомо, що галактика Чумацький Шлях є спіральною галактикою з перемичкою. Це підтверджують багато досліджень зокрема: дослідження розподілу та руху молекулярного і нейтрального газу, дослідження зір та комплексів зореутворення в інфрачервоному діапазоні, розподіл розсіяних зоряних скупчень. Проте деталі та точні значення параметрів спіральної структури, кількість (дві спіралі чи чотири) та ширина спіральних рукавів все ще залишаються у більшій чи меншій мірі дискусійними.

Існує декілька основних причини, чому ця проблема так довго залишається невирішеною. Зокрема, перешкодою є те, що Сонце розташоване на краю галактичного диска поблизу площини Галактики, тому ми можемо бачити лише суперпозицію різних структурних особливостей уздовж променю зору. Також, через дуже велику густину та яскравість центральної частини Галактики, ми не маємо можливості досліджувати протилежну від центра Галактики ділянку диска.

Більш того, рукава галактик зазвичай мають розгалуження, вони зливаються, скручуються та мають ступінь нерівномірності густини і лише в першому наближенні можуть бути описані логарифмічними спіралями. Значення кута закручення спіралей, за різними оцінками, коливаються приблизно від  $7^\circ$  до  $25^\circ$  в залежності від типу галактики.



Важливою задачею є необхідність відібрати та точно визначити розташування об'єктів, що маркують положення спіральних рукавів – так званих трасерів. Щоб окреслити точну структуру Галактики необхідно виявити велику кількість спіральних трасерів із найбільш точними вимірними швидкостями та відстанями. Можливість детально дослідити та проаналізувати структурні особливості великої частини Галактики, надав третій реліз космічної місії Gaia, що містить високоточні власні рухи, паралакси, променеві швидкості та інші астрометричні та астрофізичні параметри для зір різних типів. Вибірку із великою кількістю об'єктів можна використовувати не лише для аналізу структури Галактики за їхніми положеннями, а й провести кінематичний аналіз різних її областей і отримати додаткову інформацію про структурні особливості різних регіонів Галактики. Відповідно, задача вибору трасерів та методів визначення параметрів спіральних рукавів на основі даних Gaia DR3 є **актуальною** задачею досліджень у галузі галактичної астрономії.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна та є складовою частиною наступних НДР:

– «Метод векторних сферичних функцій для дослідження кінематики Галактики на основі космічних та наземних даних», № державної реєстрації 0117U004968, 01.10.2017–30.09.2020 (здобувачка – виконавець).

– «Вирішення астрометричних, кінематичних та астрофізичних задач за даними сучасних каталогів із використанням штучних нейронних мереж», № державної реєстрації 0119U002537, 01.01.2019–31.12.2021 (здобувачка – виконавець).

– «Картування кінематичних параметрів Галактики за даними Gaia та інших сучасних каталогів», № державної реєстрації 0122U001479, 01.01.2022–31.12.2024 (здобувачка – виконавець).

**Загальна характеристика дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел і додатку А. Загальний обсяг роботи складає 125 сторінок. Вона містить 37 рисунків та 4 таблиці. Список використаних джерел містить 87 найменувань. Хід дисертаційної роботи висвітлюється в трьох розділах.

У *першому розділі* представлено огляд літературних джерел. Описано розвиток уявлень про структуру та особливості Галактики. Описано підсистеми Галактики та їх взаємозв'язок з поняттям «населення». Наводяться приклади робіт з результатами визначення параметрів спіральної структури та

її схематичних зображень за допомогою різних трасерів. Кратко представлено огляд теорій механізму виникнення спіральної структури Галактики та описано головні проблеми її вивчення. Приведено опис сучасних даних про спіральні рукави галактики Чумацький Шлях.

У *другому розділі* дисертації розглядаються математичні методи, що були використані в рамках дослідження. Розглядаються системи координат, що використовуються в роботі, а також кінематичні моделі, які часто застосовуються в кінематичних дослідженнях Галактики. Описується метод визначення параметрів спіральних рукавів Галактики за допомогою діаграми “позиційний кут - логарифм відстані”.

У *третьому розділі* приведено результати визначення в попередніх роботах кінематичних параметрів за даними Gaia DR3 та приведено обґрунтування використання кінематичного методу. Показано, що положення центроїдів з незначущими  $M+ 11$ , можна розглядати як кінематичні трасери спіральних рукавів у діапазоні галактоцентричних циліндричних координат  $140^\circ < \theta < 220^\circ$ ,  $4 \text{ кпк} < R < 13$  з відстанню від Сонця  $R_0 = 8.15 \text{ кпк}$ . Виходячи з необхідності мати максимально точні астрометричні параметри, створено нову вибірку зорь із каталогу Gaia DR3 з урахуванням поправок паралаксів та поправок до власних рухів яскравих зорь. В межах моделі O-M проведено кінематичний аналіз в кожній сферичній області та створено підвибірку центроїдів тих сферичних областей, у яких величина параметра  $M+ 11$  виявилася незначущою. Представлено запропонований автором, оригінальний спосіб відбору кінематичних трасерів, що належать конкретним спіральним рукавам 5 Галактики, на основі аналізу радіальних швидкостей. Приведена таблиця отриманих параметрів спіральних рукавів Галактики та проведено порівняння отриманих результатів з результатами інших авторів. Проведено оцінку ефективності запропонованого методу кінематичних трасерів та отримання параметрів спіральних рукавів Галактики, як на модельних так і на спостережних даних та зроблено висновки.

*Висновки* дисертаційної роботи підкреслюють наукову новизну проведених досліджень. *Список використаних джерел* свідчить про проведення ретельного аналізу сучасних і класичних результатів наукових досліджень.

### **Найвагоміші наукові результати, представлені в дисертації:**

1. Обґрунтовано використання компонент тензора швидкості деформації для вивчення спіральної структури Галактики.
2. Для вирішення рівнянь моделі O-M положення та швидкості зірок, що мають повне 5-параметричне астрометричне рішення та радіальна

швидкість в каталозі Gaia DR3, були обчислені в локальній галактичній системі координат.

3. Створено програмне забезпечення для обробки даних, розрахунків та побудови галактичних спіральних рукавів згідно із запропонованим у роботі методом.
4. У межах галактоцентричних координат  $4 \text{ кпк} < R < 14 \text{ кпк}$ ,  $140^\circ < \theta < 220^\circ$ , та  $Z = 0 \text{ кпк}$  отримано оцінки кінематичних параметрів моделі O-M з використанням 19 млн. зорь створеної вибірки.
5. Вперше, використовуючи підвибірку центроїдів тих сферичних областей, в яких величина кінематичного параметра  $M+11$  виявилася незначущою, тобто обчислене значення параметра  $M+11$  не перевищувало подвоєного значення похибки його визначення, було побудовано розподіл таких центроїдів в Галактичній площині.
6. Вперше реалізовано, запропонований автором спосіб відбору центроїдів сферичних областей, які мають  $M+11 \approx 0$  і належать до конкретного спірального рукава. Це знімає, завжди існуючу у класичних методах при використанні діаграми “позиційний кут — логарифм відстані”, проблему приналежності трасерів до лінійної залежності  $\ln R = k\phi + b$ .
7. Отримано оцінки параметрів спіральних рукавів Галактики з використанням запропонованого методу. Отримані оцінки параметрів показують добру узгодженість з результатами, отриманими іншими авторами та значно більш високу точність їх визначення. На їх основі, шляхом екстраполяції за межі наявних даних, побудовано спіральну схему, на яку накладено сегменти галактичних рукавів Scutum-Centaurus, Sagittarius-Carina, Perseus, Norma-Outer, а також локального рукава Orion.
8. Виконано тестування запропонованого методу шляхом порівняння результатів із результатами, отриманими динамічним методом та шляхом співставлення морфологічних особливостей макетної Галактики із координатами центроїдів таких її сферичних областей, для яких виконується умова  $\partial VR / \partial R = M+11 \approx 0$

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** На основі тексту дисертації та змісту публікацій Денищенко С.І. можна стверджувати, що результати, представлені в дисертації, обґрунтовані, достовірні та відповідають меті і завданням дисертаційної роботи. Обґрунтованість і достовірність представлених результатів забезпечується:

- застосуванням надійно перевірених теоретичних моделей та статистичних методів до найновіших спостережних даних;
- систематичним порівнянням отриманих результатів з сучасними дослідженнями інших авторів;
- публікацією результатів дисертаційного дослідження в наукових виданнях найвищого рівня;
- достатньою апробацією отриманих результатів на наукових конференціях.

**Апробація дисертації та публікації.** Результати роботи опубліковані в чотирьох статтях в журналі *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, – одному з найпрестижніших в світі астрономічних журналів з імпакт-фактором 4,8. В одній з цих статей здобувач є першим автором. Також результати апробовані на наукових конференціях конференціях, в тому числі – на Гамівській конференції, одній з найпрестижніших українських конференцій в галузі астрономії.

**Оформлення дисертації.** Оформлення, зміст, структура дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

**Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.** Результати кінематичного аналізу, що одержані в даній роботі, запропонований оригінальний метод відбору трасерів, а також отримані параметри спіральних рукавів Галактики, можуть бути використані для уточнення уявлень про будову та еволюцію Галактики. Ця задача має фундаментальне значення для розуміння структури, кінематичних особливостей та інших характеристик нашої Галактики. Здобуті результати можуть стати важливим будівельним блоком для майбутніх теорій динаміки Галактики, розподілу речовини в ній, походження її спіральної структури і т.д.

**Оцінка змісту дисертації та її завершеності.** Дисертація Денищенко Софії Іванівни «Структурні особливості галактики Чумацький Шлях за результатами кінематичного аналізу» є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішений комплекс задач, пов'язаних з дослідженням кінематики зір в нашій Галактиці та її спіральної структури на основі статистичної обробки астрометричної інформації космічного телескопа Gaia.

Результати досліджень повністю висвітлені у наукових публікаціях, матеріалах конференцій та відображені у змісті дисертації.

### **Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.**

1. На стор. 26: «Проте відкриття галактик, як фізичних об'єкта відбулося лише у 20-х роках минулого століття, коли у 1924 році Хаббл виявив найближчі спіральні туманності, які виявились гігантськими зоряними системами.» Хаббл не виявляв найближчі спіральні туманності, він виявив цефеїди у М 31 та за залежністю «період - світність» встановив відстань до туманності.
2. Таблиця 1.1 Sgr-Автомобіль, Тангічність
3. На сторінці 45 назва розділу 1.1.6 «Огляд теорій утворення спіральної структури» - хоча тут мається на увазі не утворення як процес – а опис природи спіральної структури. Процес генерації спірального візерунку ще біль дискусійний.
4. На сторінці 51: «У 2006 році регіоні знаходження рукава Scutum-Centaurus було виявлено велике скупчення нових зірок, що містить 14 надгігантів, а у 2007 році було відкрито скупчення з приблизно 50 000 новоутворених зірок.» Звісно тут мова про молоді зорі, і використовувати епітет «нові» недоречно, адже за ним закріплений зовсім інший зміст.
5. На сторінці 52: «Проте, у 2008 році інфрачервоні спостереження за допомогою космічного телескопа Spitzer показали, що в рукаві SagittariusCarina відносно мало молодих зірок, на відміну від рукава Scutum-Centaurus і рукава Perseus . Це може свідчити про те, що цей рукав є другорядним, разом із рукавом Norma-Outer. Ці два рукава здебільшого являють собою концентрації газу і новоутворених зірок.» Зміст двох речень мітить явне протиріччя.
6. На сторінці 53: двічі зустрічається термін «активність зореутворення великої маси» - що мається на увазі не можна зрозуміти.
7. На сторінці 54: «Отже, в деяких роботах пропонується, щоб це був домінуючий сегмент руки.» Звісно тут мав бути «рукав» а не «рука».
8. На сторінці 56 у висновках до розділу 1 «Спіральні рукава Галактики в першому наближенні описують логарифмічною функцією...». Логарифмічною спіраллю, адже логарифмічна функція може бути різного вигляду.
9. Пропуски номерів рисунків на сторінці 51 та на невірно оформлене посилання на сторінці 64.

10. На сторінці 95: «центроїди, що належать конкретному рукаву, повинні розташовуватися на приблизно однаковій відстані від центру Галактики.» Не зрозуміло, мається на увазі – усі центроїди даного рукава, чи лише центроїди рукава із фіксованою галактоцентричною довготою. Адже хоча кут закрутки спіралей і невеликий, все ж він не нульовий і тому при переміщенні на  $2^\circ$  кпк вздовж рукава радіус-вектори центроїдів зростуть в 1.5 рази.
11. На сторінці 109 у підписі до Рис. 3.19 переплутані підписи лівого і правого рисунку.
12. До незначних зауважень, що відносяться до всього тексту, можна віднести вживання «зірок» та «зорей», одночасне використання як транслітерованих назв рукавів, так і латиномовних, подання прізвищ науковців як із ініціалами так і без.

До більш принципових зауважень, що виникають при читанні тексту дисертації можна віднести формулювання ряду близьких за змістом тверджень:

На сторінках 82-83: «Оскільки деформаційна швидкість вздовж напрямку  $R$  дорівнює  $\partial V_R / \partial R$  є виключно наслідком здатності зіркової області деформуватися, то у випадку, коли її значення в середньому дуже близько до нуля, деформації структур, що спостерігаються в цих областях, повинні бути відсутніми, і як наслідок, їх форма не повинна змінюватися з часом. Властивість незмінності форми структур, що містять об'єкти з кінематичним параметром  $\partial V_R / \partial R = 0$ , дозволяє припускати наявність зв'язку між стійкістю спірального візерунка в нашій галактиці і параметром  $\partial V_R / \partial R = 0$ .»

На сторінці 84: «З фізичної точки зору відсутність змін швидкості вздовж координатних осей, свідчить про відсутність деформацій (стиснень розтягнень) у цих напрямках, а отже і силових впливів, які призводять до змін конфігурації зірок у сферичних областях. Цей фізичний факт є підставою для того, щоб пов'язати кінематичний параметр, відповідальний за стиснення-розтягнення із стійкістю локальних зоряних систем, що спостерігаються в епоху GAIA і містяться у виділених областях.»

«Якщо спіральні рукави є стійкими структурами, то усередині них відповідальні за стиснення-розтягування кінематичні параметри  $M_{+11}$ ,

$M_{+22}$ ,  $M_{+33}$ , отримані за моделлю О-М, мають бути близькими до нуля.»

На сторінці 107: «Основна ідея запропонованого в дисертації методу полягає в тому, що спіральні рукави будуть стійкими структурами, якщо усередині них виконується умова - параметр моделі Огороднікова-Мілна  $M_{+11}^+ = \partial V_R / \partial R$  близький до нуля.

На сторінці 112: «Запропонований підхід дозволив знайти стабільні структури в Галактиці, зокрема виявити спіральні рукави та визначити їх параметри... стійкі структури ( $M_{11} + -$  незначущий) існують не тільки у вигляді спіралей, але також у вигляді деяких утворень, що простягаються в просторі між ними.»

В усіх цих твердженнях мова йде про прямий зв'язок між малістю значення параметра  $M_{+11}^+ = \partial V_R / \partial R$  та стійкістю спіральною структури. При чому в різних місцях твердження коливається за змістом від можливості існування такого зв'язку (на 82-83 сторінках) до чіткої заяви – спіральні рукави стабільні, якщо  $M_{+11}^+$  має приблизно нульове значення. Окрім того, що особливо у останньому випадку має бути наведено доказ заявленого твердження, або ж посилання на роботи де такий строгий зв'язок доведено, і чого, відповідно не має. Такий розкид у силі формулювань – від гіпотези, до суворого твердження, та їх вигляд як узагальнень, що не супроводжуються доказами, сильно заплутує читача. Крім того слід зазначити, що принциповим тут є те, що  $M_{+11}^+$  відноситься до кінематичного опису руху суцільного середовища, а отже не передбачає ніякого прямого зв'язку із стаціонарністю/стабільністю/стійкістю. Для пошуків зв'язку із силами (які відповідають за стабільність чи стійкість) потрібно аналізувати не кінематичні рівняння руху середовища, що є наслідком теореми Гельмгольца, а рівняння типу Нав'є-Стокса або Больцмана. По-друге, незрозуміло чи вважає автор дисертації, що спіралі це саме матеріальні утворення, чи вважає їх результатом взаємодії газової складової Галактики із хвилюю густини (а отже і гравітаційного потенціалу) у зоряному диску, що спричиняє сплеск темпу зореутворення. Адже у першому випадку постановка питання про стабільність такої структури цілком зрозуміла, а от у випадку хвиль густини – зв'язок із стабільністю хвиль і нульовим значенням  $M_{+11}^+$  стає значно більш проблематичним. Адже тоді потрібен аналіз стабільності хвильової структури із якого виводилося б твердження  $M_{+11}^+ = 0$ . Цих зауважень не було б, якщо автор залишився б у полі гіпотез про зв'язок  $M_{+11}^+$  і спіральним рукавом і не робив би таких далеких і широкозмістовних узагальнень, що не підкріплені доказами. Ще одне питання виникає при

розгляді Рис.3.9 на сторінці 91, або ж 3.15 на сторінці 101 та Рис. 3.21 на сторінці 111. Для аналізу властивостей рукавів було використано приблизно 1000 центроїдів із  $M_{11}^+ = 0$ , тоді як на зазначених рисунках таких центроїдів у разі більше. Якщо гіпотеза вірна про зв'язок таких центроїдів із спіралями, то який фізичний зміст у тих центроїдах, що мають значення близькі до нуля, але до спіралей не віднесені?

**Загальні висновки.** За актуальністю і новизною отриманих результатів, їх рівнем, обсягом, достовірністю та обґрунтованістю, науковим і практичним значенням та їх оформленням, дисертаційна робота Денищенко Софії Іванівни «Структурні особливості галактики Чумацький Шлях за результатами кінематичного аналізу» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації». Вважаю, що Денищенко Софія Іванівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Офіційний рецензент,  
Кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри астрономії  
та космічної інформатики  
фізичного факультету  
Харківського національного  
Університету імені В.Н. Каразіна

Іван СЛЮСАРЕВ



Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ  
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 23:48:58 31.01.2024

Назва файлу з підписом: Денищенко\_Рецензія\_Слюсарев\_.pdf.asice  
Розмір файлу з підписом: 319.8 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Денищенко\_Рецензія\_Слюсарев\_.pdf  
Розмір файлу без підпису: 331.8 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: СЛЮСАРЕВ ІВАН ГРИГОРОВИЧ

П.І.Б.: СЛЮСАРЕВ ІВАН ГРИГОРОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 3199806486

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 23:48:54  
31.01.2024

Сертифікат виданий: АЦСК АТ КБ «ПРИВАТБАНК»

Серійний номер: 248197DDFAB977E504000000A46D13019D314E04

Тип носія особистого ключа: ЗНКІ криптомодуль ІІТ Гряда-301

Серійний номер носія особистого ключа: 020

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Кваліфікований

Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)

Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAdES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2023.12.21 13:00