

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Міністерство освіти та науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Денищенко Софія Іванівна

УДК 524.6-327, 524.6-34

ДИСЕРТАЦІЯ

«СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ ГАЛАКТИКИ ЧУМАЦЬКИЙ ШЛЯХ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ КІНЕМАТИЧНОГО АНАЛІЗУ»

Спеціальність 104 – Фізика та астрономія

(Галузь знань 10 – Природничі науки)

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Софія ДЕНИЩЕНКО

Науковий керівник: Федоров Петро Миколайович, доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник.

Харків – 2023

АНОТАЦІЯ

Денищенко С.І. Структурні особливості галактики Чумацький Шлях за результатами кінематичного аналізу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія (Галузь знань 10 – Природничі науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти та науки України, Харків, 2023.

Дисертація присвячена визначенню параметрів спіральних рукавів Галактики, отриманих за допомогою кінематичних трасерів, що базуються на даних космічної місії GaiaDR3. Оскільки галактика Чумацький Шлях є нашою рідною галактикою, то положення та кінематику великої кількості об'єктів можна виміряти з високою точністю, що робить Чумацький Шлях єдиною спіральною галактикою, яку ми можемо детально дослідити. На базі цих знань формуються загальні уявлення про структуру, еволюцію та інші особливості спіральних галактик у всьому Всесвіті. Одним із структурних елементів Чумацького Шляху є спіральна структура, а її вивчення є важливим завданням в астрономії, яке і досі залишається актуальним.

Наразі з повною достовірністю не відомо про кількість, структуру та параметри спіральних рукавів у нашій Галактиці. Вибір трасерів та методів, які використовуються для вирішення цієї проблеми, може впливати на отримані числові оцінки параметрів спіральних рукавів Галактики та точність їх визначення. Високоточна астрометрія галактичних джерел поступово полегшує цю складну ситуацію, спричинену головним чином великою невизначеністю відстаней, оскільки зараз ми вже можемо отримати точні паралакси (кілька μas) та більш точні власні рухи зорь. Завдяки існуючим високоточним астрометричним та астрофізичним даним, що надає каталог *Gaia DR3*, з'явилася можливість детально аналізувати структурні особливості великої частини Галактики.

В роботі було запропоновано новий підхід до визначення трасерів спіральної структури, що базується на дослідженні кінематики зоряних полів, а також метод їх отримання. В якості трасерів, використовувались центроїди сферичних областей зорь радіусом 0.5 кпс, швидкості деформацій в яких, вздовж координатної осі R циліндричної галактоцентричної системи координат, є незначущими. Для дослідження кінематики в сферичних зоряних областях, в дисертаційній роботі було проведено в межах моделі Огороднікова-Мілна кінематичний аналіз 19 млн. зорь за даними *Gaia* DR3, абсолютна зоряна величина яких $M_G < 4$, що дозволяє використовувати їх на великих відстанях від Сонця. Ці трасери покривають галактичну площину в діапазонах галактоцентричних координат $140^\circ < \theta < 220^\circ$ і $4 \text{ кпк} < R < 14 \text{ кпк}$.

Для отримання параметрів спіралей галактики Чумацький Шлях, в роботі було застосовано метод, що ґрунтується на побудові діаграми «позиційний кут – логарифм відстані», і який зазвичай, використовується для визначення параметрів спіральної структури Галактики за даними різних трасерів.

В роботі було виконано порівняння числових значень отриманих кутів закручення спіралей та галактоцентричних відстаней до точки перетину спіралі з напрямом центр Галактики - Сонце, з відповідними параметрами, отриманими в різних сучасних дослідженнях за цією темою.

Також в роботі було виконано тестування працездатності та ефективності запропонованого методу, яке засвідчило надійність його роботи не тільки на спостережних даних *Gaia* DR3, але і на даних макетних зоряних каталогів із проекту *AURIGA*.

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^+_{II} , 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 О-М проведено кінематичний аналіз в кожній сферичній області та створено підвибірку центроїдів тих сферичних областей, у яких величина параметра M^+_{II} виявилася незначущою.

Представлено запропонований автором, оригінальний спосіб відбору кінематичних трасерів, що належать конкретним спіральним рукавам

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.

Головні наукові результати, що були отримані у роботі.

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 $\ln R = k\varphi + b$.

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 $\partial V_R / \partial R = M_{11}^+ \approx 0$.

Ключові слова: кінематика зірок, галактика, спіральні рукави галактики, фотометрія, Gaia.

ABSTRACT

Denyshchenko S.I. Structural features of the Milky Way galaxy based on the results of kinematic analysis. – Qualification scholarly paper: a manuscript.

Thesis submitted for obtaining the Doctor of Philosophy degree in Natural Sciences, Speciality 104 – Physics and Astronomy. – V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2023.

The dissertation is devoted to the determination of the parameters of the spiral arms of the Galaxy obtained using kinematic tracers based on the data of the *Gaia* DR3 space mission. Because the Milky Way is our home galaxy, the positions and kinematics of a large number of objects can be measured with high precision, making the Milky Way the only spiral galaxy we can study in detail. Based on this, general ideas about the structure, evolution and other features of spiral galaxies in the entire universe have been developed. One of the structural elements of the Milky Way is a spiral structure, and its study is an important task in astronomy, which is still relevant.

Currently, the amount of Galactic spiral arms, their structure and parameters are not known with complete certainty. The choice of tracers and methods used to solve this problem can affect the obtained numerical estimates of the parameters of the spiral arms of the Galaxy and the accuracy of their determination. High-precision astrometry of galactic sources gradually improves this difficult situation, caused mainly by large uncertainties in distances, since we can now already obtain accurate parallaxes (a few μas) and more accurate stellar proper motions. Thanks to the existing high-precision astrometric and astrophysical data provided by the *Gaia* DR3 catalog, it became possible to analyze in detail the structural features of a large part of the Galaxy.

This work proposes a new approach to the determination of tracers of the spiral structure, based on the study of the kinematics of stellar fields, as well as the method of obtaining them. As tracers, the centroids of spherical stellar regions with a radius of 0.5 kps have been used, where the deformation velocities along the

coordinate axis R of the cylindrical galactocentric coordinate system are insignificant. To study the kinematics in spherical stellar regions, a kinematic analysis of 19 million stars from the *Gaia* DR3 data, with an absolute magnitude of $M_g < 4$, which allows to use them at large heliocentric distances, has been made within the Ogorodnikov-Milne model. These tracers cover the galactic plane in the ranges of galactocentric coordinates $140^\circ < \theta < 220^\circ$ and $4 \text{ kpc} < R < 14 \text{ kpc}$.

To derive the parameters of the spirals of the Milky Way, the method based on the construction of the "positional angle - logarithm of the distance" diagram has been used. This method is commonly used based on the data of various tracers.

The work compares the numerical values of the spiral pitch angles and galactocentric distances to the point of intersection of the spiral with the direction of the Galactic center - the Sun, with the corresponding parameters obtained in various modern studies on this topic.

The work also tests the functionality and effectiveness of the proposed method, which proves the reliability of its applying not only to the *Gaia* DR3 observational data, but also to the data of mock stellar catalogs from the *AURIGA* project.

The progress of the dissertation work is covered in three sections.

The first chapter presents an overview of literature. The development of ideas about the structure and features of the Galaxy is described. The subsystems of the Galaxy and their relationship with the concept of "population" are described. Examples of works with the results of determining the parameters of the spiral structure and its schematic images using various tracers are given. An overview of the theories of the mechanism of the origin of the spiral structure of the Galaxy is briefly presented and the main problems of its study are described. A description of modern data on the spiral arms of the Milky Way galaxy is given.

In the second chapter of the dissertation, the mathematical methods used in the research are considered. The coordinate systems used in the work, as well as kinematic models, which are often used in kinematic studies of the Galaxy, are

considered. The method of determining the parameters of the spiral arms of the Galaxy using the "positional angle - logarithm of the distance" diagram is described.

In the third section, the results of the determination of kinematic parameters in previous works based on *Gaia* DR3 data and the rationale for using the kinematic method are given. It is shown that the positions of centroids with insignificant $M_{\pm 11}$ can be considered as kinematic tracers of spiral arms in the range of galactocentric cylindrical coordinates $140^\circ < \theta < 220^\circ$, $4 \text{ kpc} < R < 13$ with a distance from the Sun $R_0 = 8.15 \text{ kpc}$. Based on the need to have the most accurate astrometric parameters, a new selection of stars from the *Gaia* DR3 catalog was created, taking into account parallax corrections and corrections for the proper motions of bright stars.

Within the framework of the O-M model, a kinematic analysis has been performed in each spherical region and a subsample of the centroids of those spherical regions in which the value of the $M_{\pm 11}$ parameter turned out to be insignificant has been created.

The author's original method of selecting kinematic tracers belonging to specific spiral arms of the Galaxy, based on the analysis of radial velocities, is presented. A table of the obtained parameters of the spiral arms of the Galaxy is given, and the obtained results are compared with the results of other authors. The effectiveness of the proposed method of selecting kinematic tracers and obtaining the parameters of the spiral arms of the Galaxy was evaluated, both on model and observational data, and conclusions were drawn.

The main scientific results obtained in the work are as follows.

1. The use of the components of the deformation velocity tensor to study the spiral structure of the Galaxy is substantiated.
2. To solve the equations of the O-M model, the positions and velocities of stars with a full 5-parameter astrometric solution and radial velocity in the *Gaia* DR3 catalog have been calculated in the local galactic coordinate system.
3. Software for data processing, calculations and construction of galactic spiral arms has been created according to the method proposed in the work.
4. Within the galactocentric coordinates $4 \text{ kpc} < R < 14 \text{ kpc}$, $140^\circ < \theta < 220^\circ$, and $Z = 0 \text{ kpc}$, estimates of the kinematic parameters of the O-M model have been obtained using 19 million stars of the created sample.
5. For the first time, using a subsample of the centroids of those spherical regions in which the value of the kinematic parameter M_{+1} turned out to be insignificant, that is, the calculated value of the M_{+1} parameter did not exceed twice the error value of its determination, the distribution of such centroids in the Galactic plane has been constructed.
6. The author's proposed the method of selecting centroids that have $M_{+1} \approx 0$ and belong to a specific spiral arm was implemented for the first time. This removes the problem of the tracers belonging to the linear dependence $\ln R = k\varphi + b$, which always exists in classical methods when using the “positional angle — logarithm of the distance” diagram.
7. Estimates of the parameters of the spiral arms of the Galaxy using the proposed method have been obtained for the first time. The obtained parameter estimates are in good agreement with the results obtained by other authors. On their basis, by extrapolating beyond the available data, a four-armed spiral scheme has been built, on which segments of the galactic arms Scutum-Centaurus, Sagittarius-Carina, Perseus, Norma-Outer, as well as the local arm of Orion have been superimposed.

8. Testing of the proposed method has been performed by comparing the results with the results obtained by the dynamic method and by comparing the morphological features of the mock Galaxy with the coordinates of the centroids of its spherical regions for which the condition $\partial VR/\partial R = M_{\text{vir}} \approx 0$ is fulfilled.

Key words: kinematics of stars, galaxy, spiral arms of the galaxy, photometry, Gaia.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Публікації у закордонному періодичному науковому виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus

1. Fedorov P., Akhmetov, V., Velichko A., Dmytrenko, A., **Denyshchenko S.**, 2021. Kinematics of the Milky Way from the Gaia EDR3 red giants and subgiants. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 508, Iss. 2 P. 3055–3067 (Scopus, Q1).

DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stab2821>

(Особистий внесок здобувача: брала участь в постановці, обговоренні та розв'язання поставленої задачі, проводила аналіз даних Gaia EDR3, займалася побудовою та аналізом графіків, проводила відбір зір червоних гігантів із загальної вибірки.)

2. Fedorov P., Akhmetov, V., Velichko A., Dmytrenko, A., **Denyshchenko S.**, 2023. Mapping the kinematic parameters of the Galaxy from the Gaia EDR3 red giants and sub-giants. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 518, Issue 2, Pages 2761—2774 (Scopus, Q1).

DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stac3218>

(Особистий внесок здобувача: брала участь в постановці, обговоренні та розв'язання поставленої задачі, проводила розрахунок та аналіз кінематичних параметрів моделі Огороднікова-Мілна.)

3. **Denyshchenko S.**, Fedorov P., Akhmetov, V., Velichko A., Dmytrenko, A., 2023. Determining the parameters of the spiral arms of the Galaxy from kinematic tracers based on Gaia DR3 data. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, stad3350 (Scopus, Q1).

DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stad3350>

(Особистий внесок здобувача: поставила та розв'язала задачу. Використала рівняння тривимірної моделі Огороднікова–Мілна для оцінки кінематичних параметрів в площині Галактики в межах галактоцентричних координат 140°

$\langle \theta \rangle < 220^\circ$ и $4 \text{ кпк} < R < 14 \text{ кпк}$. Розробила та використала метод формування та відбору кінематичних трасерів. Отримала параметри п'яти сегментів спіральних рукавів та, провівши екстраполяцію за цими даними, отримала модель спіральної структури всієї Галактики. Автор брала участь в обговоренні, фізичній інтерпретації та обґрунтуванні отриманих результатів. Підготувала текст статті.)

4. Dmytrenko, A., Fedorov P., Akhmetov, V., Velichko A., **Denyshchenko S.**, 2023. The vertex coordinates of the Galaxy's stellar systems according to the Gaia DR3 catalogue. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 521, Issue 3, Pages 4247–4256 (Scopus, Q1).

DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stad823>

(Особистий внесок здобувача: брала участь в постановці, обговоренні та розв'язання поставленої задачі. Проводила аналіз кінематичних параметрів та тестувала перехід із прямокутної галактоцентричної системи координат до системи головних осей.)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. **Denyshchenko S.**, Akhmetov V., Fedorov P. / Kinematic Analysis of the Milky Way by Gaia EDR3 Data // International Conference “Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy” Devoted to 200th anniversary of Mykolaiv Astronomical Observatory MAO-200, September 27-30, 2021, Mykolaiv, Ukraine (Особистий внесок здобувача: аналіз та обробка даних, отримання кінематичних параметрів досліджуваної частини Галактики, інтерпретація отриманих результатів.)

6. Akhmetov V., Fedorov P., Velichko A., Dmytrenko A., **S.Denyshchenko** / Analysis of Modern Astrometric Catalogues in the Gaia Era // International Conference “Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy”

Devoted to 200th anniversary of Mykolaiv Astronomical Observatory MAO-200, September 27-30, 2021, Mykolaiv, Ukraine.

(Особистий внесок здобувача: аналіз та обробка даних, отримання кінематичних параметрів досліджуваної частини Галактики, інтерпретація отриманих результатів

7. **Denyshchenko S.I.**, Fedorov P.N., Akhmetov V.S., Velichko A.B. / Detection of spiral structures of the milky way galaxy using kinematic analysis // XXII Gamow International Astronomical Conference-School in Odessa: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, High Energy, Physics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology”, 22-26 August, 2022, Odesa, Ukraine.

(Особистий внесок здобувача: обчислення та аналіз кінематичних параметрів, розрахунок параметрів п'яти ділянок спіральних рукавів, графічне представлення результатів та інтерпретація отриманих результатів

8. Akhmetov V., Fedorov P., Velichko A., Dmytrenko A., **Denyshchenko S.**/ Mapping the kinematic parameters of the galaxy from the GAIA EDR3 data // XXII Gamow International Astronomical Conference-School in Odessa: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, High Energy, Physics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology”, 22-26 August, 2022, Odesa, Ukraine

(Особистий внесок здобувача: обчислення та аналіз кінематичних параметрів, графічне представлення результатів.)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	17
ВСТУП	18
Розділ 1. СПІРАЛЬНА СТРУКТУРА ГАЛАКТИКИ	25
1.1 Чумацький Шлях як галактика	25
1.1.1 Початок формування уявлень про Галактику	25
1.1.2 Населення та підсистеми Галактики	27
1.1.3 Спостереження спіральної структури	30
1.1.4 Карти спіральних рукавів та огляд трасерів	33
1.1.5 Проблематика вивчення спіральної структури	42
1.1.6 Огляд теорій утворення спіральної структури	45
1.2 Відомості про спіральні рукава Галактики	49
1.2.1 Загальна схема та галактичні квадранти	49
1.2.2 Рукав Norma-Outer	51
1.2.3 Рукав Scutum-Centaurus	51
1.2.4 Рукав Sagittarius-Carina	52
1.2.5 Рукав Perseus	53
1.2.6 Рукав Orion	54
Висновки до розділу	56
Розділ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ТА СПІРАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ	58
2.1 Системи координат, що використані в роботі	58
2.1.1 Дані Gaia та пов'язана з ними система відліку.	58
2.1.2 Галактична сферична система координат	61
2.1.3 Галактична прямокутна система координат	62
2.1.4 Галактоцентрична циліндрична система координат (R, θ, z)	63
2.2 Кінематичні моделі використані в роботі	64
2.2.1 Модель Огороднікова-Мілна	64
2.2.2 Модель Оорта-Лінблада	68
2.3 Метод “логарифм відстані-позиційний кут”	71
Висновки до розділу	74

ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ПАРАМЕТРІВ СПІРАЛЬНИХ РУКАВІВ ГАЛАКТИКИ	75
3.1 Визначення кінематичних параметрів за даними <i>Gaia</i> DR3	75
3.1.1 Визначення кінематичних параметрів в локальній системі координат	75
3.1.2 Аналіз кінематичних параметрів Галактики за даними <i>Gaia</i> DR3	79
3.2 Обґрунтування використання кінематичного методу	83
3.3 Кінематичні параметри у спеціальній вибірці зорь із каталогу <i>Gaia</i> DR3	84
3.4 Розподіл центроїдів вибраних зоряних систем	87
3.5 Визначення параметрів спіральних рукавів	92
3.6 Остаточні результати	102
3.7 Тестування кінематичного методу	107
Висновки до розділу	112
ВИСНОВКИ	113
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	115
ДОДАТОК А	124

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СК Система координат

ЕСК Друга екваторіальна система координат

ICRS Міжнародна небесна система координат

ГСК Галактична система координат

ПГСК Прямокутна галактична система координат

ЦГЦСК Циліндрична галактоцентрична система координат

О–Л Оорта–Ліндблада [модель]

О–М Огороднікова–Мілна [модель]

Г–Р Герцшпрунга–Рассела [діаграма]

МНК - Метод найменших квадратів

РС – Розсіяне скупчення

ВСТУП

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 [1]. 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° до 25° (детальніше у розділі 3). 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 НДІ астрономії Харківського національного університету 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 (здобувач – 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 (здобувач – виконавець).

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

Мета та завдання дослідження.

Метою дисертації є визначення параметрів спіральних рукавів Галактики з використанням кінематичних трасерів.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні ключові завдання:

- створити вибірку зірок з каталогу *Gaia* DR3, абсолютна зоряна величина яких $M_G < 4$;

- вирішити рівняння моделі O-M в локальній галактичній системі координат для кожної сферичної області, що сформована із створеної вибірки;
- створити підвибірку центроїдів тих сферичних областей, в яких величина кінематичного параметра M_{+i} є незначущою, тобто обчислене значення параметра M_{+i} не перевищує подвоєного значення похибки його визначення та побудувати розподіл таких центроїдів в Галактичній площині;
- створити програмне забезпечення для обробки даних, розрахунків кінематичних параметрів та побудови галактичних спіральних рукавів згідно із запропонованим методом;
- визначити та відібрати центроїди, що належать до конкретного спірального рукава;
- отримати оцінки параметрів спіральних рукавів Галактики з використанням запропонованого методу;
- шляхом екстраполяції за межі наявних даних, побудувати чотирьох-рукавну спіральну схему;
- провести порівняння отриманих результатів із результатами, що отримані динамічним методом та шляхом співставлення морфологічних особливостей макетної Галактики.

Об'єктом дослідження є спіральна структура галактики Чумацький Шлях.

Предметом дослідження є кінематичні параметри поля швидкостей в площині Галактики, параметри спіральних рукавів.

Методи дослідження.

Для знаходження параметрів спіральних рукавів в дисертаційній роботі було запропоновано оригінальний метод в якому, в якості кінематичних трасерів використовувались центроїди сферичних областей, для яких, величина кінематичного параметра M_{+n} була незначущою. Для визначення кінематичних параметрів використовувалась лінійна кінематична модель Огороднікова–Мілна (О-М). Фізичний зміст параметрів моделі О-М відповідає теоремі Гельмгольца для зоряних систем. Для вирішення системи рівнянь і отримання оцінок параметрів поля швидкостей зірок в Галактиці, застосовувався метод найменших квадратів. Використовуючи метод “позиційний кут - логарифм відстані” були визначені кути закручення та галактоцентричні відстані до точки перетину спіралей з напрямком центр Галактики — Сонце.

Наукова новизна одержаних результатів.

Під час виконання роботи отримані наступні наукові результати.

Вперше:

1. Запропоновано і обґрунтовано використання компонент тензора швидкості деформації для вивчення спіральної структури Галактики.
2. В галактичній площині в діапазоні галактоцентричних координат $140^\circ < \theta < 220^\circ$ і $4 \text{ кпк} < R < 14 \text{ кпк}$ побудовано карту розподілу центроїдів сферичних областей для яких кінематичні параметри M_{+n} є незначущими та які отримали назву “кінематичні трасери”.
3. На основі аналізу радіальних швидкостей центроїдів запропоновано та реалізовано спосіб відбору тих центроїдів, що належать конкретним спіральним рукавам.
4. Параметри п'яти спіральних рукавів нашої Галактики - Scutum-Centaurus arm, Sagittarius-Carina arm, Local arm, Perseus arm, Norma-Outer arm отримано за допомогою використання кінематичних трасерів, визначених запропонованим методом.

5. За визначеними в роботі параметрами, шляхом екстраполяції за межі наявних даних, схематично представлено спіральний візерунок нашої Галактики з нахилом великої осі бару приблизно 30° .

Практичне значення отриманих результатів.

Результати запропонованого кінематичного метода можуть бути використані для уточнення уявлень про будову та еволюцію Галактики.

Особистий внесок автора.

Особистий внесок автора є вагомим на всіх етапах і полягає в постановці задач, аналізі та систематизації наукових літературних даних за темою дисертації, у зборі та аналізі астрофізичних та астрометричних даних, які використовувались у цій роботі, аналізі та інтерпретації отриманих результатів, а також у підготовці публікацій за темою досліджень.

Апробація результатів дисертації.

Результати дисертаційної роботи були представлені у 3 доповідях на таких вітчизняних наукових конференціях:

- International Conference «Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy. MAO-200», Миколаїв (Україна), 27–30 вересня 2021 р.
- 22th International Gamow Conference – School: «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology», Одеса (Україна), 22–26 серпня 2022 р (на конференції було представлено дві доповіді).

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 4 наукових працях, всі у закордонному періодичному науковому виданні, що входить до міжнародної

наукометричної бази Scopus та у 4 тезах доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел і додатку А. Загальний обсяг роботи складає 125 сторінок з них текст основної частини становить 115 сторінок. Вона містить 37 рисунків та 4 таблиці. Список використаних джерел містить 87 найменувань.

Подяка

Авторка дисертаційної роботи дуже вдячна своєму вчителю, науковому керівнику д. ф.-м. н., с.н.с. проф. Федорову Петру Миколайовичу за отримання глибоких знань в області астрометрії, розуміння кінематичних процесів в Галактиці та, особливо, за допомогу у постановці та розв'язанні задач дисертаційної роботи. Також висловлюю велику подяку колективу НДІ астрономії та колегам кафедри астрономії і космічної інформатики Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна за підтримку та допомогу під час аналізу та обговорення результатів дисертації. Висловлюється також шана пам'яті і подяка першому науковому керівнику д. ф.-м. н., проф. Захожаю Володимирі Анатолійовичу.

Особлива подяка матері, Денищенко Наталлі Вікторівні, що завжди підтримувала мене в прагненні займатися астрономією, близьким родичам та друзям за терпіння і підтримку на всіх етапах навчання в аспірантурі й під час захисту дисертації, а також шкільним вчителям за отримані від них знання і знайомство з точними науками.

Окрема подяка висловлюється воїнам Збройних Сил України та Територіальної оборони Харківської області, які мужньо захистили місто Харків та боронять нашу країну від окупаційних військ РФ чим дають змогу й надалі займатися наукою.

РОЗДІЛ 1

СПРАЛЬНА СТРУКТУРА ГАЛАКТИКИ

1.1 Чумацький Шлях як галактика

1.1.1 Початок формування уявлень про Галактику

Що собою представляє та як виглядає Чумацький Шлях довгий час залишалося загадкою. Перший натяк на справжню природу Чумацького Шляху з'явився в 1610 році, коли італійський астроном і фізик Галілео Галілей досліджуючи його за допомогою свого телескопа прийшов до висновку, що Чумацький Шлях складається з незліченної кількості слабких окремих зірок.

У 1785 році англійський астроном німецького походження Вільям Гершель започаткував техніку підрахунку зірок, намагаючись визначити структуру Чумацького Шляху. Гершель припустив, що Чумацький Шлях має форму диска, але він помилково прийшов до висновку, що Сонячна система знаходиться в центрі цього диска [2]. На основі підрахунків Гершель побудував першу модель Галактики (рис.1.1), яка зараз має суто історичний інтерес.

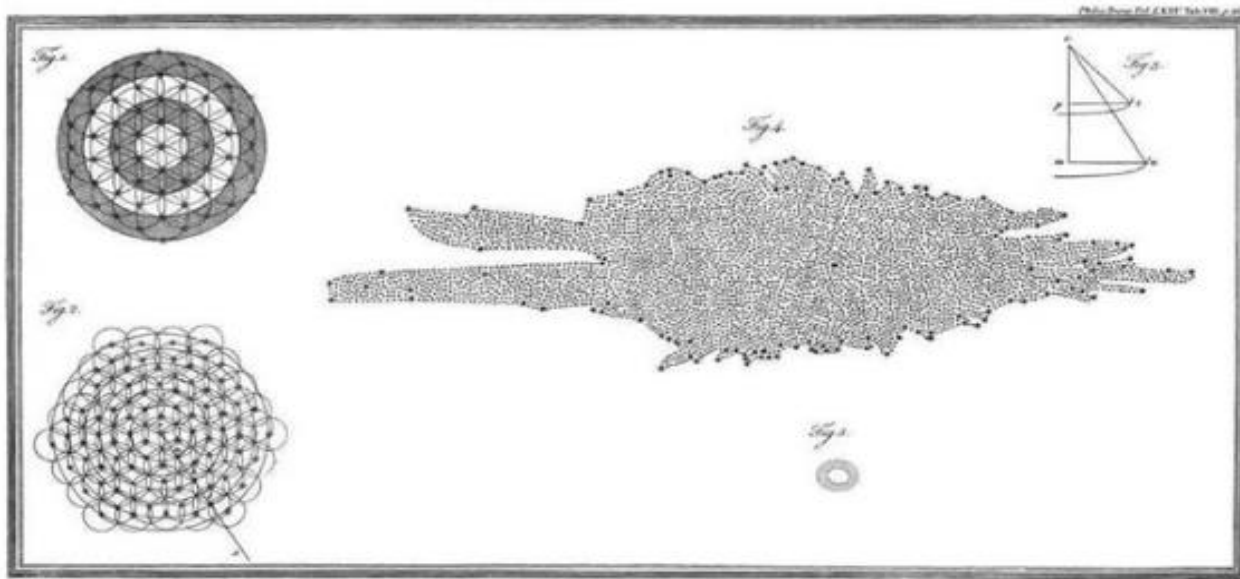


Рис. 1.1. Модель Галактики Вільяма та Кетрін Гершель (Гершель, 1785). Сонце знаходиться в центрі, а відстань до зірок визначається їх яскравістю.

Якобус Каптейн удосконалив карту Гершеля і оцінив розмір і форму Чумацького Шляху [3]. Однак ні Каптейн, ні Гершель не усвідомлювали важливості поглинання світла міжзоряним пилом, що призвело до помилкових оцінок розмірів і форми Галактики.

У 1917 році американський астроном Харлоу Шеплі склав карту протяжності галактики, підраховуючи кульові скупчення. 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. Це і нашттовхнуло вчених на думку, що Сонячна система також може знаходитись всередині такої системи. У 1924-1926 роках було відкрито обертання Галактики. До висновку про обертання дійшов Стремберг і паралельно з ним Оорт у 1927 році [4], внаслідок дослідження явища асиметрії зоряних рухів. В цей же час Ліндبلاد почав розробляти свою ідею про те, що Галактика складається з ряду підсистем, що обертаються навколо загальної осі з різною швидкістю [5,6,7].

Наступним важливим кроком стало відкриття Бааде у 1944 році двох типів зоряних населень [8], більш детально описане в наступному підрозділі. Воно стало основою, із якої виросла картина еволюції Галактики. У 1951 році Морган виявив, що розсіяні скупчення та молоді яскраві ОВ-зорі в межах 2 - 3 кпк від Сонця утворюють три вузькі смуги, які в подальшому почали розглядати як частини спіральних рукавів [9].

Майже у той час в 1958 році припущення про існування спіральної структури в Галактиці підтвердили Оорт та інші голландські астрономи. Вони вивчали дані про випромінювання водню на лінії $\lambda=21$ см. (детальніше описано у підрозділі 1.1.3), що допомогло встановити характер розподілу міжзоряного газу в Галактиці [10].

В подальшому, завдяки працям М, Шварцшильда, Оорта та інших астрономів була створена загальна картина будови Галактики. Вона

пояснювала встановлені на той час зв'язки між віком, просторовим розташуванням, хімічним складом, кінематикою та іншими характеристиками зоряного населення, завдяки яким стала вимальовуватись структура центральної частини Галактики, диск та інші компоненти системи.

1.1.2. Населення та підсистеми Галактики

В результаті описаних вище досліджень, з початку минулого століття, одним з найважливіших завдань в астрономії стало вивчення будови нашої Галактики. За приблизними оцінками Чумацький Шлях може містити понад ≈ 300 млрд зорь. Вік Галактики оцінюється близько 13 млрд років. Маса Галактики становить близько $M \sim 5,8 \times 10^{11} M_{\odot}$, а її радіус $R \sim 16$ кпк. За класифікацією Габбла Чумацький Шлях має тип SBbc.

В ході розвитку уявлень про загальну модель будови Галактики таке поняття, як “підсистема Галактики” стало тісно пов'язуватись з поняттям “населення”. Вивчаючи зорі різного типу туманності Андромеди в 1940-х роках Бааде помітив, що червоні гіганти концентруються ближче до ядра, а блакитні яскраві зорі переважно у спіральних рукавах. З цього почалося формування уявлення про населення галактик, детально описане в його праці 1944 року [10]. Об'єкти спіральних сегментів Бааде назвав населенням I, а зорі центральних областей - населенням II. При подальшому дослідженні зв'язку між положенням зорь у галактиці та їх фізичними властивостями було встановлено, що взагалі багато характеристик зорь, між якими немає прямої фізичної залежності (наприклад, вік, хімічний склад, кінематика, орбіти і т. п.), також пов'язані із положенням у галактиці і, відповідно, між собою.

В своїй оглядовій роботі В.А. Захожай наводить морфологічну характеристику Галактики, в якій описує сучасне бачення структури Галактики яка сформована, як багатокomпонентна система, що складається з чотирьох основних підсистем (рис. 1.2): пласкої, сферичної, проміжної та

галактик-супутників [11]. Підсистеми в Галактиці утворюють населення різного віку, що відрізняються одна від одної своєю геометрією, динамікою та іншими характеристиками.

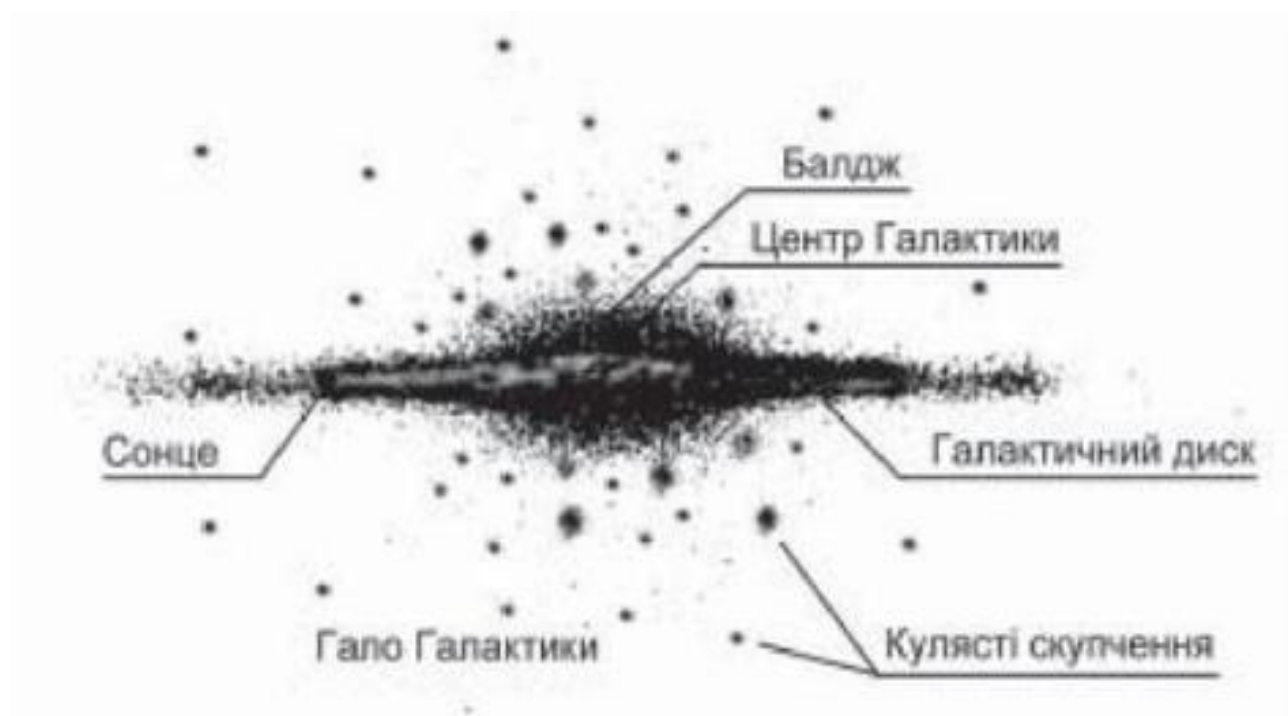


Рис. 1.2. Загальна модель будови Галактики; вид з ребра

Найбільш старі (вони становлять населення II) - це об'єкти, що одночасно бідні на важкі елементи та у яких, велика дисперсія швидкостей. Вони рухаються по сильно витягнутим орбітам. Типові, добре відомі представники населення II - це субкарлики, зорі типу RR Ліри, кульові скупчення. Ці об'єкти утворюють сферичну підсистему, для якої характерна сфероїдальна форма, сильна концентрація до центру Галактики та повільне обертання. Загалом сферична підсистема Галактики складається з корони, зовнішнього та внутрішнього гало.

Об'єкти меншого віку (населення I) - мають у десятки разів більший вміст металів, у них мала дисперсія швидкостей, вони зібрані в диску і рухаються майже круговими орбітами навколо центру Галактики, утворюючи

пласку підсистему до якої входить двокомпонентний диск. Найтонший компонент, який часто називають «тонким диском», включає пил і газ і наймолодші зірки, тоді як більш товстий компонент, «товстий диск», включає дещо старші зірки. До населення I відносяться зорі головної послідовності, надгіганти та більшість гігантів, міжзоряний газ та ряд інших об'єктів. Диск має спіральну структуру, що утворена спіральними рукавами - протяжними спіралеподібними формування із підвищеною концентрацією газу і пилу, а також центральну перемичкою, яка поєднує внутрішні частини спіральних рукавів (вважається, що вони вкручуються в місця поблизу крайніх двох частин перемички).

До проміжної підсистеми відносять балдж (потовщення діаметром близько 2 000 парсек) та область галактичного центра, що включає центральне скупчення зірок та чорну діру Стрілець A* [12], що вважається ядром Галактики. Ядро оточене щільними хмарами пилу і газу. На небесній сфері розташоване за напрямом на сузір'я Стрільця. Пил сильно поглинає випромінювання у видимій частині спектра, тому дослідження цієї області можливо проводити здебільшого у радіодіапазоні й інфрачервоних променях.

Терміни населення і підсистеми почали вживати один замість іншого. Говорячи про підсистему, мають на увазі сукупність будь-яких однакових об'єктів (наприклад, підсистема кульових скупчень), і навпаки, коли говорять про населення, мають на увазі структурну складову - диск, гало і т. п.

1.1.3 Спостереження спіральної структури

Вивчення властивостей диску Галактики та її спіральної структури виявилось дуже складною задачею, адже коли вивчають інші спіральні галактики, то зазвичай легко побачити, навіть на фотографіях, їх спіральний візерунок. Що ж стосується спіральних рукавів нашої Галактики, їх дослідження ускладнюються тим, що Сонце знаходиться поблизу середини галактичного диска і вид із Землі показує всі рукави вздовж майже однієї вузької смуги на небі. На північній частині небесної сфери ці смуги ототожнюють з трьома відрізками рукавів. Один із них — рукав Perseus, що проходить через сузір'я Персей, Візничий, Близнюки та Великий Пес. Другий рукав - Orion, або Local йде через сузір'я Оріон та Лебідь. І третій рукав – Sagittarius-Carina проходить через сузір'я Скорпіон, Стрілець та Орел. Його найзручніше спостерігати з Південної півкулі. Чумацький шлях на небі утворює майже повне коло. Рукава, що знаходяться між центром Галактики та Сонячною системою, як наприклад рукав у сузір'ї Стрільця, прийнято називати внутрішніми рукавами, а ті що знаходяться в протилежну від центра сторону, ближче до краю диска, як наприклад рукав в сузір'ї Персея, називають зовнішніми рукавами (не плутати з окремим рукавом Outer).

Для спостереження Чумацького Шляху в різних сегментах галактичних довгот проводять велику кількість локальних спостережень. Завдяки спостереженням отримують виміряні характеристики спіральних рукавів: довжини хвиль (λ) або спектральну частоту (f), довготу (l), широту (b), радіальну швидкість (V_R) тощо. Далі, використовуючи отримані дані для подальшого вивчення, зорі, частіше за все, відносять до фазових просторів.

Як вже було наведено раніше, дослідження структури диска почалося із вивчення властивостей газу в диску Галактики за допомогою радіоастрономічних методів. В галактиці Чумацький Шлях загалом міститься близько 5×10^9 М холодного газу, який майже весь рухається по кругових

орбітах, близьких до площини диска. Більшість цього газу ($\sim 80\%$) — це нейтральний атомарний водень (HI), який випромінює радіовипромінювання на довжині $\lambda=21$ см.

Відповідно до ефекту Доплера емісійна лінія нейтрального водню $\lambda=21$ см. розширюється через тепловий рух атомів водню газової хмари і рух окремих хмар, що перебувають на промені зору спостерігача [10]. Досліджуючи властивості газу в диску було помічено, що у більшості напрямків вздовж галактичного диску реєстрували не одну, а декілька окремих емісійних ліній. Цей ефект пояснювали таким чином: окремі хмари Гідрогену, перебуваючи на різних відстанях від центра Галактики, рухаються навколо нього з різними швидкостями. Якщо спостереження проводиться вздовж напрямку на центр Галактики ($l=0$), то променева швидкість хмар $V_r=0$ і відповідно, розширення лінії $\lambda=21$ см. буде зумовлене лише тепловими рухами атомів. Якщо ж спостерігати в інших напрямках, то проекції променевих швидкостей газових хмар, які перебувають на різних відстанях від центра вже не будуть нульовими. Тому для кожного значення довготи l у спектрі радіодіапазону променева швидкість V_r буде зафіксовано кількома емісійними компонентами, що зміщені одна відносно іншої згідно з ефектом Доплера [10].

Щоб отримати кінематичні відстані за припущенням, що водневі хмари обертаються навколо центру Галактики, Оорт в 1958 році склав карту (рис 1.3), що показала довгі дуги газу, які нагадували спіральні елементи на оптичних зображеннях зовнішніх галактик [13]. Так вперше стало очевидним існування спіральної структури нашої Галактики і дало поштовх до подальшого дослідження структури Галактики, використовуючи найрізноманітніші методи.

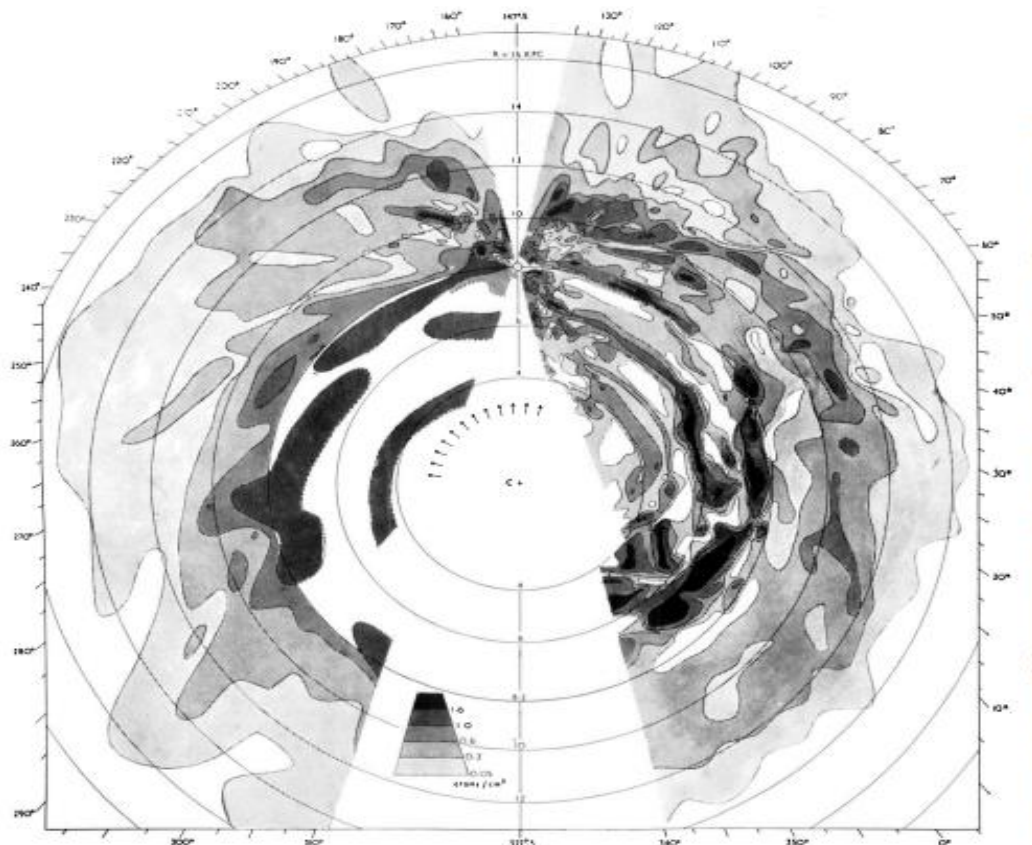


Рис 1.3. Розподіл нейтрального Водню в Галактиці [13].

Окрім нейтрального водню, в Галактиці міститься близько $\sim 20\%$ газу, що знаходиться в молекулярній формі, і його відстежують за допомогою лінії міліметрового випромінювання монооксиду вуглецю (CO). Молекулярний газ більш сконцентрований у центрі, ніж атомний газ, і в основному знаходиться на відстані $\sim 4,5$ кпк від центру [14].

Як виявилось згодом, в результаті спостереження радіовипромінювання, молекул CO на довжині хвилі 2,6 мм. дозволяють одержати характеристики міжзоряного газового середовища в диску Галактики навіть з більшою точністю, ніж спостереження радіовипромінювання нейтрального водню. Детальніше це явище було описано в роботі Дейма в 2011 році [14], результати представлені на рисунку 1.4.

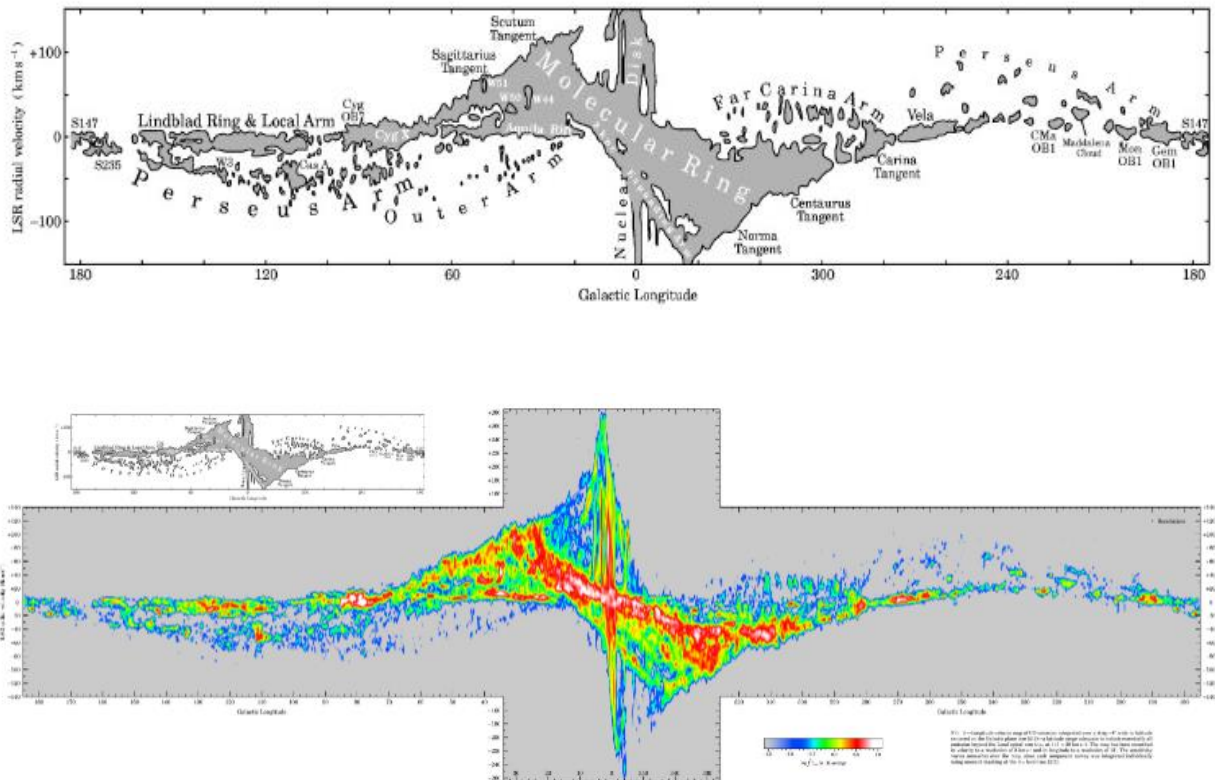


Рис. 1.4. Залежності променевої швидкості від галактичної довготи, що показана спектральними лініями випромінювання монооксиду вуглецю в молекулярних хмарах отримана із роботи [14]. Вертикальна структура в середині карти є центром Галактики.

1.1.5 Карті спіральних рукавів та огляд трасерів

З 1950-х років було прикладено багато зусиль, щоб зобразити спіральну структуру Чумацького Шляху (рис. 1.5). Тоді ж, вперше, були досліджені деякі характеристики відрізків спіральних рукавів. Було визначено, що рукав Perseus знаходиться на відстані близько 2 кпк від Сонця, в напрямку від центра Галактики, а рукав Sagatarius-Carina на відстані близько 1,5 кпк в напрямку на Галактичний центр. Також виявилось, що обидва рукави пересікають кругові орбіти зорь галактичного диска майже під однаковим кутом, який, за

визначенням різних авторів, становить від 10° до 20° . Його назвали «кутом нахилу» або «кутом закручення» спірального рукава [10].

Щоб окреслити точну спіральну структуру Галактики, необхідно мати велику кількість спіральних індикаторів (трасерів) із точними визначеннями відстаней. Існує значна різноманітність типів об'єктів які можуть трасувати спіральний візерунок Галактики.

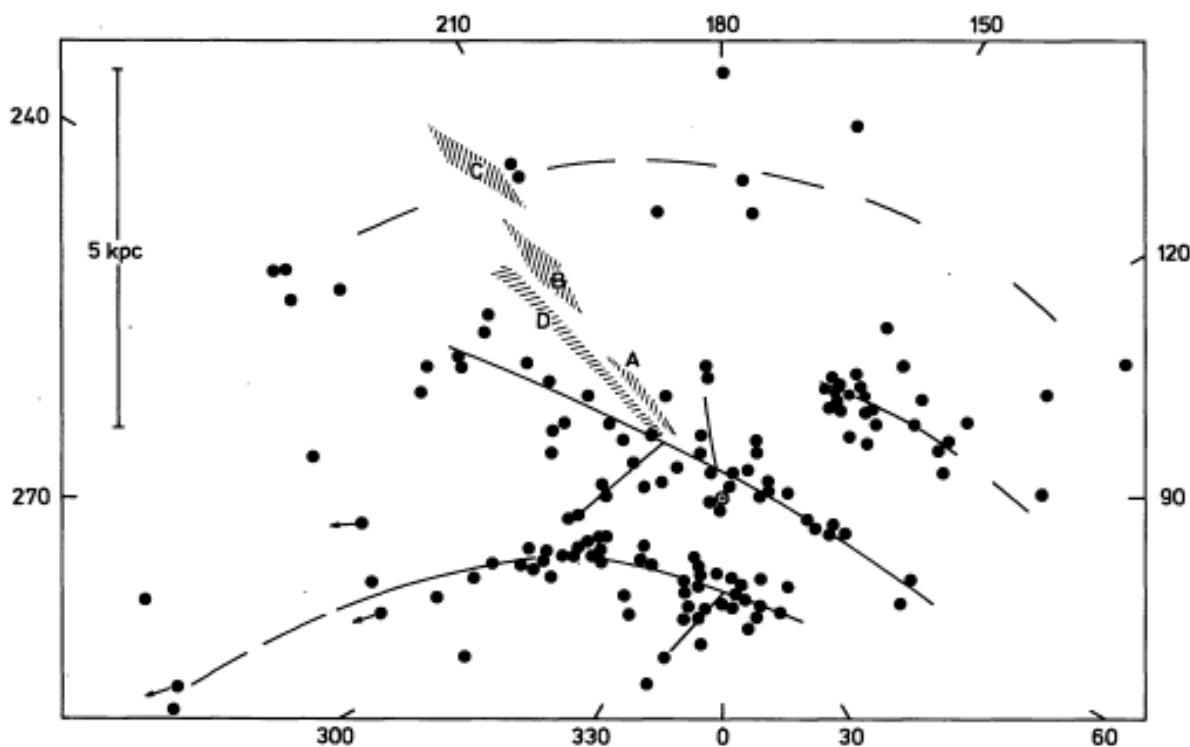


Рис. 1.5. Одні з перших отриманих можливих відрізків спіральних рукавів

Наприклад, в результаті спостережень було відкрито, що великі хмари частково іонізованого газу низької щільності (області НІІ) і метанолові мазери на частоті 6,7 ГГц розташовані в областях зореутворення тісно пов'язані з масивними молодими зорями. Гігантські молекулярні хмари (ГМХ) є місцем народження масивних зорь, і їх широко використовують для виявлення спіральних рукавів Галактики [15]. Вони є корисними для картографування спірального візерунка, оскільки дуже яскраві, можуть бути помітні у всій

галактичній площині [16, 17] та вважається, що майже не поглинаються міжзор'яним середовищем. Використовуючи кінематичні та спектروفотометричні методи для визначення відстаней до молодих зорь OB та гігантських областей НІІ, Джорджелін у 1976 році побудував зображення Чумацького Шляху з чотирма спіральними рукавами (рис. 1.6) [18].

Окрім цього, з початку досліджень спіральної структури, дуже зручними для досліджень були зорі спектрального класу від O до B2, окремо, у скупченнях або в асоціаціях. Фотометричні відстані до кластерів цих об'єктів займали важливе місце в усіх оптичних дослідженнях спіральної структури, а остання діаграма Беккера і Фенкарта [19] заснована виключно на цих об'єктах і областях НІІ. Визначення радіальної швидкості для молодих гарячих зірок в скупченнях і асоціаціях, в поєднанні з точними фотометричними відстанями, надали важливу базову інформацію щодо кінематики нашої Галактики, особливо кривої її обертання.

Зі швидким прогресом інфрачервоних методів виявлення та вимірювання більше уваги почали приділяти зорям червоним гігантам, як можливим спіральним індикаторам. У 1970 році в своїх роботах Хемфріс [20] і Лі [21] показали, що цілком можливо отримати точні визначення відстаней для цих зірок в інтервалі від 6 до 8 кілопарсек від Сонця. Концентрація червоних надгігантів у відомих спіральних структурах була показана на спіральній діаграмі Роберти Хамфріс (див. рис 1.7).

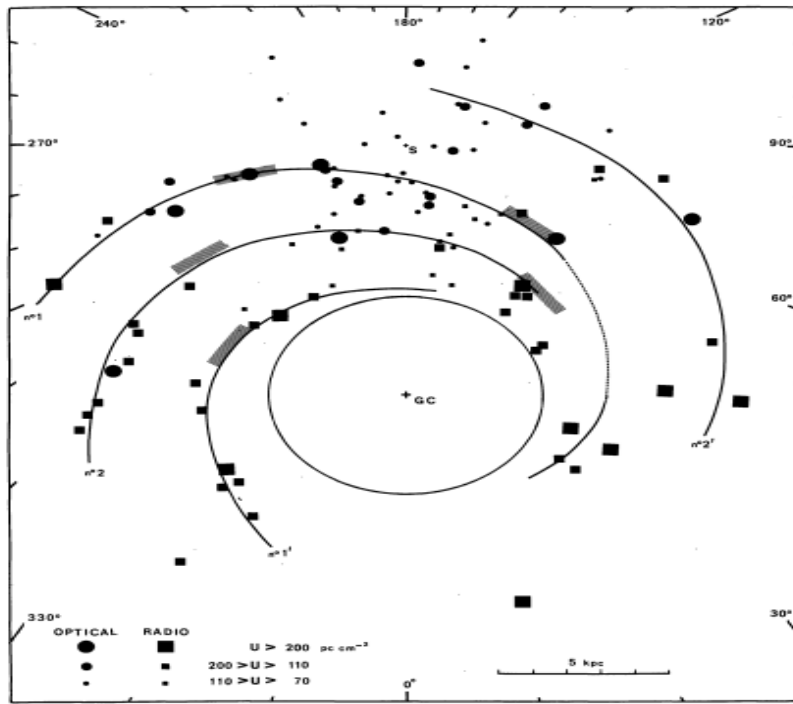


Рис. 1.6. Схематичний вигляд спіральних рукавів Чумацького Шляху (Georgelin & Georgelin 1976) [18].

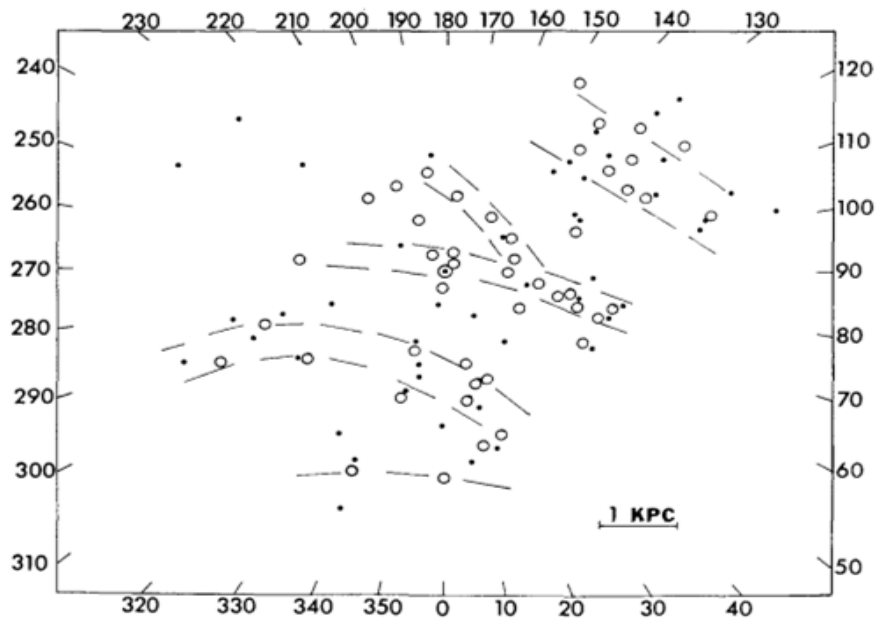


Рис 1.7. Надгіганти та спіральна структура. Розподіл зоряних асоціацій у просторі (незафарбовані кружечки) і розсіяні скупчення (крапки) (Humphreys 1970)[20].

Розсіяні скупчення (РС) також є одними із спіральних трасерів і мають певні переваги для розуміння властивостей спіральної структури Галактики. Їх вік охоплює широкий діапазон, від кількох мільйонів років до десятка мільярдів років. Це є дуже важливим для дослідження спіральної структури, окресленої від молодих до старих об'єктів, і, зокрема для розуміння еволюції спіральних рукавів. Спіральна структура Галактики була досліджена в багатьох дослідницьких роботах з використанням РС як індикаторів. Взаємозв'язок між розсіяними скупченнями і спіральними рукавами вперше у своїх роботах, в 1963 і 1964 роках, обговорив Беккер [22]. Діас і Лепін у 2005 році використали вибірку з 212 РС, щоб показати, що молоді РС (віком $< 1,2 \times 10^7$ років) все ще залишаються в трьох основних сегментах рукавів: Perseus, Local та Sagittarius-Carina [23]. Вони також оцінили швидкість обертання спірального візерунка Чумацького Шляху з використанням розсіяних скупчень, в якості трасерів, підтвердили, що домінуюча частка РС утворюється в спіральних рукавах. Ці результати Діаса нещодавно були оновлені у роботі 2019 року [24], який використав дані другого релізу Gaia (Gaia Collaboration 2018) [25]. Ще більш сучасні параметри спіральних рукавів також були отримані за допомогою молодих розсіяних скупчень та змінних зорь-цефеїд у роботі Поджіо 2021 року [26]. Також, у 2021 році були отримані параметри спіральної структури з використанням молодих розсіяних скупчень (< 20 млн років,) [27].

Далі в роботі наводяться деякі приклади складених схем спіральної структури Галактики за даними із різних робіт, що засновані на різних методах та типах об'єктів.

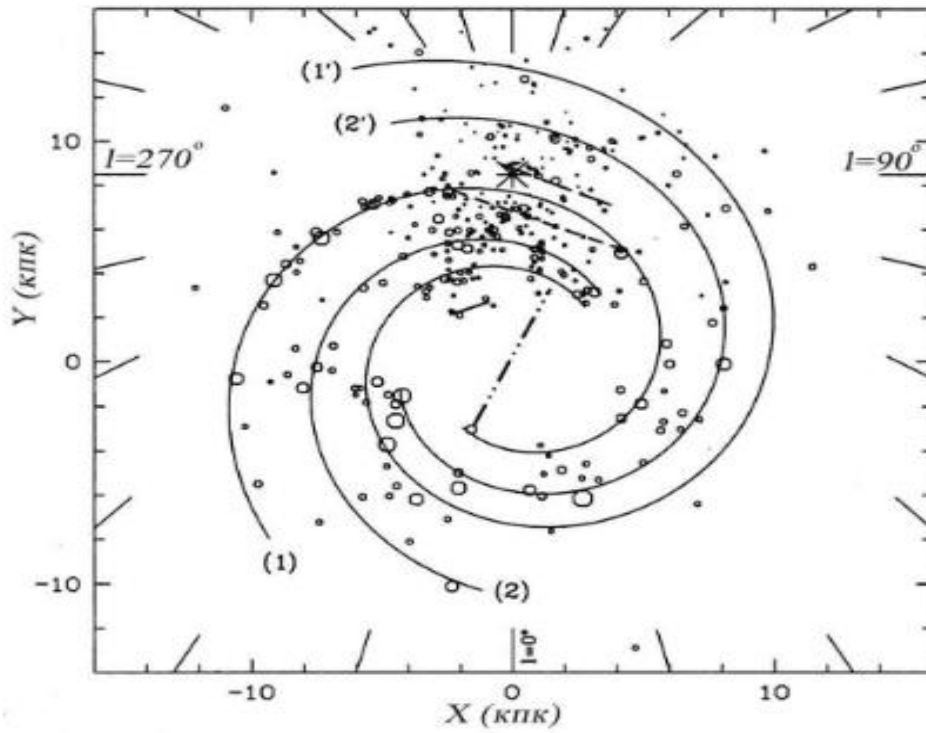
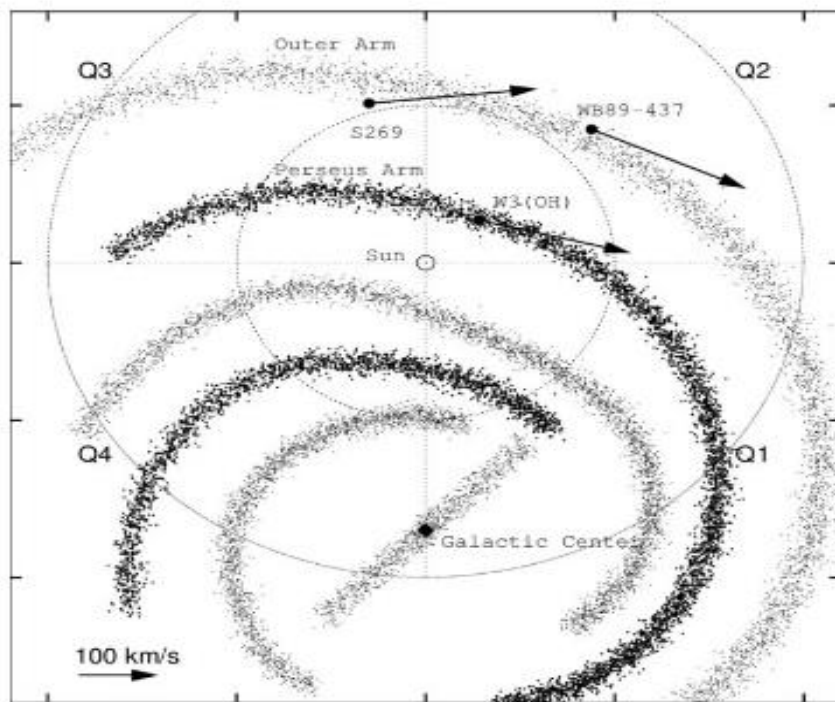


Рис.1.8. Карта розподілу областей НІІ у проекції на площину Галактики



1.9. Спиральні рукава в галактичній площині із роботи Рюсеіль (2003). [28]

В роботі Рейда 2019-го року [29] було зібрано та проаналізували близько 200 тригонометричних паралаксів та власних рухів молекулярних мазерів, пов'язаних із дуже молодими масивними зірками. Більшість вимірювань отримано з огляду *BeSSeL* з використанням *VLBA* та японського проекту *VERA*. Результати опубліковані в цій роботі свідчили про те, що Чумацький Шлях являє собою спіраль з чотирма спіральними рукавами, з деякими додатковими сегментами рукавів і шпорами. На рисунку 1.9 зображено вид Чумацького Шляху з північного полюса Галактики із цієї роботи, що показує розташування масивних областей зореутворення з виміряними тригонометричними паралаксами. Заштрихований еліпс є схематичним зображенням Галактичної перемички за даними із роботи [30]. Суцільні вигнуті лінії окреслюють центри рукавів, а пунктирні лінії - ширину рукавів. Параметри, що були отримані для відомих спіральних рукавів та сегментів рукавів наводяться у таблиці 1.1

Окрім цього в роботі Хоу 2021-го року [31], на основі найбільшого доступного на сьогодні набору даних, який складається з різних типів хороших спіральних трасувальників (GMC, мазери HMSFR, області HII, зірки O-типу та молоді OC) було зображено п'ять сегментів спіральних рукавів: Perseus, Local, Sagitarius-Carina, Scutum-Centaurus і Norma. Параметрів спіральних рукавів за результатами, отриманими в цій роботі, наведені у таблиці 1.2. За результатами цих досліджень було виявлено, що у спіральних рукавах і міжрукавних областях, розподіли спіральних трасерів представляє складні субструктури. Принаймні п'ять шпор або шпороподібних структур (пунктирні лінії на рис 1.12 були ідентифіковані в літературі, використовуючи переваги астрометричних даних мазерів HMSFR, але більше підструктур залишається відкритим за допомогою оновленого набору даних різних типів спіральних трасувальників.

Табл. 1.1

Характеристики спіральних рукавів [29].

Рука	N	l Тангічність	Діапазон β	$\beta_{\text{кінці}}$	$R_{\text{кінці}}$	$\psi_{\text{с}}$	$\psi_{\text{с}}$	Ширина
		(град.)	(град.)	(град.)	(КПК)	(град.)	(град.)	(КПК)
3 кпк(N)	3	337.0	15 – 18	15	$3,52 \pm 0,26$	$-4,2 \pm 3,8$	$-4,2 \pm 3,8$	$0,18 \pm 0,05$
Норма	11	327.5	5 – 54	18 ± 4	$4,46 \pm 0,19$	$-1,0 \pm 3,3$	$19,5 \pm 5,1$	$0,14 \pm 0,10$
Sct–Cep	36	306.1	0 – 104	23	$4,91 \pm 0,09$	$14,1 \pm 1,7$	$12,1 \pm 2,4$	$0,23 \pm 0,05$
Sgr– Автомобіль	35	285.6	2 – 97	24 ± 2	$6,04 \pm 0,09$	$17,1 \pm 1,6$	$1,0 \pm 2,1$	$0,27 \pm 0,04$
Місцевий	28	...	-8 – 34	9	$8,26 \pm 0,05$	$11,4 \pm 1,9$	$11,4 \pm 1,9$	$0,31 \pm 0,05$
Персей	41	...	-23 – 115	40	$8,87 \pm 0,13$	$10,3 \pm 1,4$	$8,7 \pm 2,7$	$0,35 \pm 0,06$
Зовнішній	11	...	-16 – 71	18	$12,24 \pm 0,36$	$3,0 \pm 4,4$	$9,4 \pm 4,0$	$0,65 \pm 0,16$

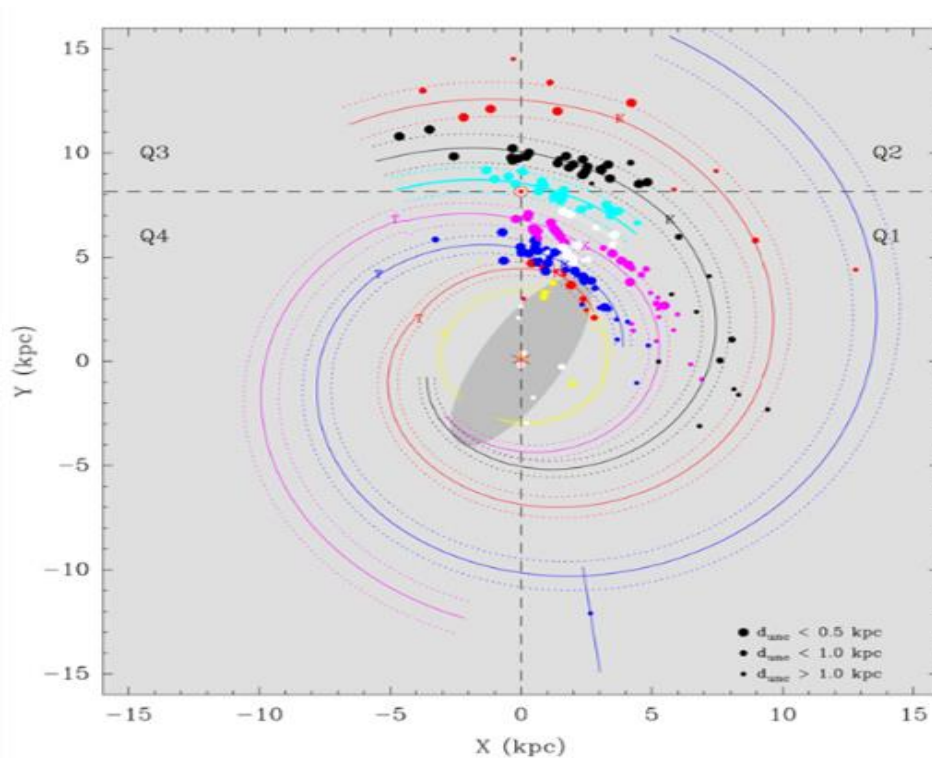
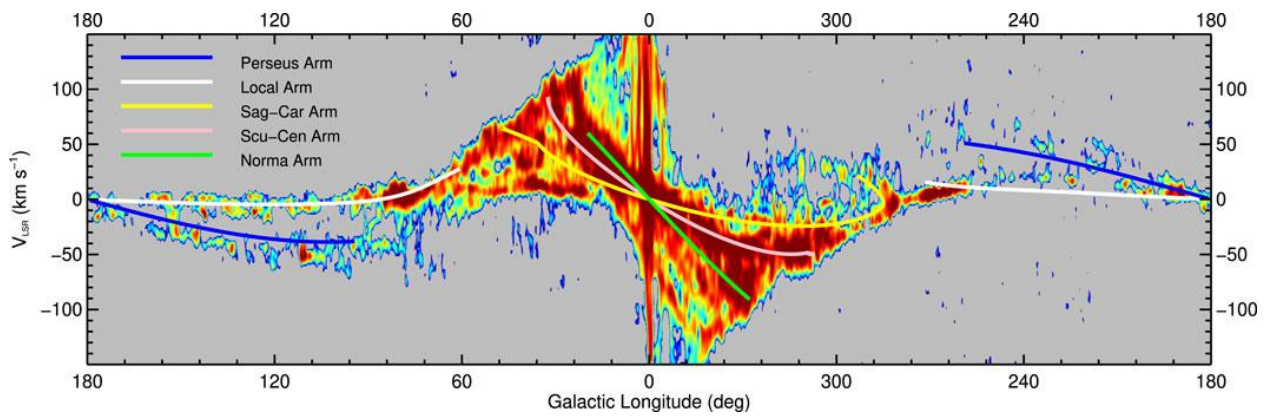


Рис. 1.10. Схема Галактики із роботи Рейда 2019 року. 3-кпк рукав - жовтого кольору; рукав Норма–Зовнішній - червоного; рукав Щита – Центавра – блакитний; рукав Кіля-Стрільця - фіолетовий; Місцевий рукав - блакитний; рукав Персея - чорний [29].



1.11. Підібрана модель спірального рукава, отримана в роботі [31] (накладена на діаграму $l - v$ 12CO (1–0)). Сегменти спіральних рукавів позначаються різними кольорами.

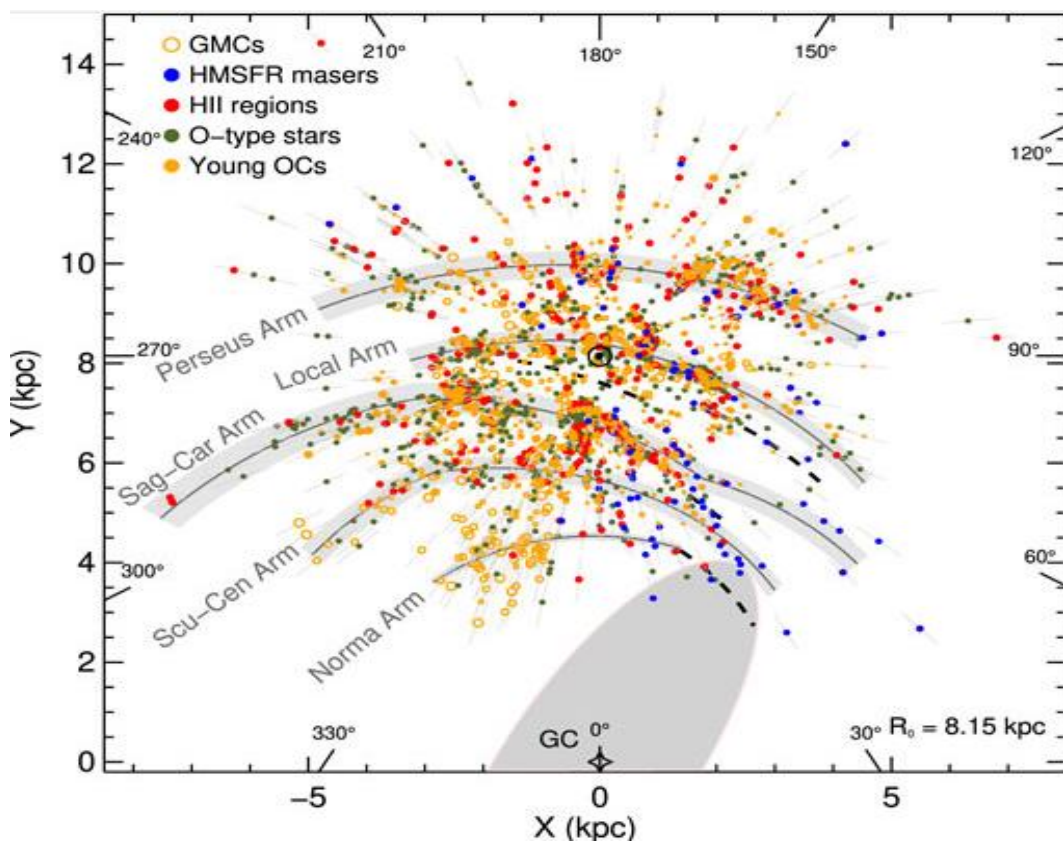


Рис. 1.12. Розподіл об'єднаного набору даних GMC, мазерів HMSFR, областей НІІ, зірок O-типу та молодих РС у галактичному диску. Заштриховані області навколо спіральних плечей позначають встановлену ширину плечей. Пунктирні лінії — це виявлені шпороподібні структури [31]

1.1.5 Проблематика вивчення спіральної структури

З моменту відкриття спіралей в нашій Галактиці і до сьогодні, головними завданнями теорії спіральної структури є пояснення наступних двох питань:

1. Чому деякі галактики мають чітко виражений спіральний візерунок, що тягнеться по всьому диску Галактики?
2. Чому цей візерунок існує протягом багатьох обертів Галактики, незважаючи на руйнівну дію диференційного обертання?

Цю проблему було сформульовано ще у 1972 році Оортом [32]. У своїй роботі він писав: "У системах з сильним диференційним обертанням, яке спостерігається у всіх спіральних галактиках без перемичок, спіральні риси цілком природні. Будь-яка структурна неоднорідність, ймовірно, закрутиться, утворюючи частину спіралі. Але не це явище ми повинні дослідити. Ми повинні пояснити спіральну структуру, що часто буває іррегулярною, і охоплює всю галактику від її ядра до самої зовнішньої частини, виходячи з двох діаметрально протилежних точок."

Очевидно, що якби спіральний візерунок існував протягом короткого інтервалу часу, ми не спостерігали б його у великій кількості дискових галактик. З іншого боку, диференційне обертання розтягує будь-яке утворення диску, змушуючи його зникнути за один - два оберти диска.

Окремі галактики показують правильну спіральну структуру, що складається зазвичай із двох спіральних рукавів, інші мають розкидані диском відрізки спіральних сегментів. Корменді та Норман у 1979 році спеціально досліджували питання: у яких випадках галактика має правильну, регулярну спіральну структуру [33]? Було досліджено, що у вибірці, яка складається із 54 спіральних галактик з правильною структурою, 25 галактик мають центральний бар, 21 галактика обертається майже тверdotільно), а 8 галактик мають близькі супутники.

Сучасні оцінки показують, що $\approx 10\%$ спіральних галактик мають упорядковану (англійською Grand Design) структуру - два яскраво виражені спіральні рукава, близько 60% галактик мають менш регулярну спіральну структуру, а 30% галактик, що залишилися, так звані флоккулентні, тобто не мають регулярної спіральної структури. В останніх можуть бути виділені лише окремі сегменти спіральних рукавів. В одній і тій же галактиці зазвичай співіснують елементи як упорядкованої, так і флоккулентної структури.

Важливим також є питання про напрямок закручування спіральних рукавів. Чи закручуються спіральні рукава у бік галактичного обертання чи у зворотний бік – розкручуються? Можливість відповісти на це питання ускладнена тим, що у галактик, видимих майже з ребра, в яких ми можемо досліджувати обертання, важко виділити спіральну структуру, у той час, як галактики, площини яких лежать перпендикулярно, неможливо вивчити обертання.

Аналіз невеликої кількості галактик зі зручним для спостереження проміжним нахилом показав, що у більшості випадків спіралі закручуються (відстаючі спіралі), у деяких випадках, як правило, у взаємодіючих галактиках, можливо зворотне (лідуючі спіралі). Воронцов-Вельяминов в своїй праці 1964-го року зазначив, що у деяких галактиках спостерігаються γ -форми - співіснування рукавів [34] протилежної закрутки, які, перетинаючись, утворюють структури, схожі на букву γ . Незважаючи на деякі сумніви, все ж таки зараз вважають, що спіралі закручуються. Цей висновок зроблено і для нашої Галактики.

Хоча спіральні рукава окреслюються в основному об'єктами молодого населення I, старі зорі диска – яскраві червоні гіганти та численні червоні карлики – також можуть трасувати спіралі, хоча контраст яскравості між рукавами та міжрукавним простором при цьому помітно нижчий. При цьому в ближньому ІЧ-діапазоні спіралі виглядають більш гладкими і безперервними, а фрагментарні рукави помітні слабші. На рис.1.13 показано зображення

галактики M51 у видимій області спектру та у ближній інфрачервоній області (смуга *J* інфрачервоного розширення системи *UBV* Джонсона та Моргана).

На рисунках 1.13 добре видно, що і в ІЧ-області спектра, де немає яскравих водневих ліній і випромінюють здебільшого червоні гіганти та слабкі червоні зорі головної послідовності, спіральні рукава видно добре. Понад те, зорі показують правильніші спіральні рукава, ніж області НІІ.

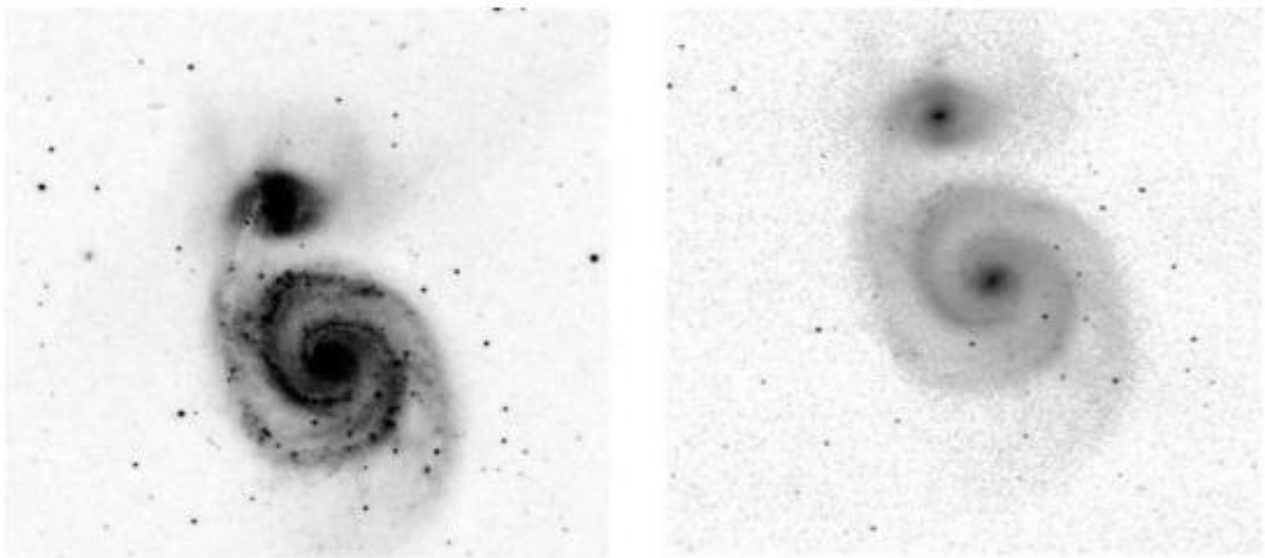


Рис 1.13. Порівняння двох зображення галактики M51 у видимій області спектру та у ближній інфрачервоній області

Крім вище зазначених невирішених питань існують значні розбіжності в отриманих в різних роботах значеннях параметрів спіральних рукавів. Чому відрізняються параметри можна пояснювати різними підходами, методами, точністю визначень відстаней до індикаторів та інших параметрів. Очевидно, що більш точне вимірювання відстані має вирішальне значення для розв'язання суперечок між різними групами.

Щодо вивчення нашої Галактики, то тут, окрім вище зазначених проблем, існує також багато суперечок й щодо кількості спіралей. Два дослідження ближнього інфрачервоного світла на яке не впливає поглинання пилу, виявили передбачуваний надлишок у рукаві Scutum-Crux приблизно на

30% більше зір червоних гігантів, ніж можна було б очікувати за відсутності спірального рукава [35,36]. Це спостереження свідчить про те, що Чумацький Шлях має лише два великі спіральні рукави: рукав Персея та Scutum-Crux. Решта рукавів містять надлишок газу, але не надлишок старих зорь [37]. У грудні 2013 року було виявлено, що розподіл молодих зорь і областей зореутворення відповідає чотирьох-рукавному спіральному опису Чумацького Шляху [38,39,40]. Таким чином, Чумацький Шлях, здається, має два спіральні рукави, промальовані старими зорями, і чотири спіральні рукави, промальовані газом і молодими зорями. Пояснення цієї очевидної невідповідності також наразі залишається невизначеним.

Ще в 1957 році Цвіккі зазначив, що об'єкти різного віку не однаково окреслюють спіральні рукава. Відповідно до сучасних всехвильових спостережень, дійсно, молоді об'єкти спіральної гілки розташовані на її передньому фронті, тоді як старіші виявляються помітно зміщеними [41].

1.1.6 Огляд теорій утворення спіральної структури

Існує багато теоретичних спроб пояснити походження рукавів і спіральних узорів у галактиках. У роботах Добса і Баба (2014) та Шелвуда і Мастерс (2022) [42,1] дуже детально наведено огляд розвитку уявлень про походження спіралей, описано сучасні теоретичні дослідження цієї проблеми та наведено короткий огляд даних спостережень.

Класичною, прийнято вважати теорію утворення спіральної структури Ліна та Шу 1964-го року [43]. Натхненні ідеєю хвиль кінематичної густини, запропонованою Ліндبلادом, Лінь і Шу запропонували самоузгоджену хвильову теорію густини. Але на відміну від підходу Ліндблода, вони розглядали галактичний диск як «континуум», що складається або з зірок, або з газу, і вивели дисперсійне співвідношення хвиль густини для обертового диска. Якісно вони припустили, що спіральні рукави не є матеріальними за

своєю природою, а складаються з областей більшої щільності, де зорі та газ рухаються через спіральні рукави. Різницю в динаміці часто порівнюють з автомобілями, що рухаються в заторі [42].

В описаній вище теорії, галактичний візерунок спірального рукава обертається, як тверде тіло з чітко визначеною кутовою швидкістю $\Omega(R)$. У цих моделях $\Omega(R)$ зазвичай розглядається як вільний параметр, який визначається із спостережень. Оскільки дисперсія швидкостей зорь у диску мала порівняно із швидкістю обертання диска, всі вони вважали за можливе скористатися рівняннями беззіштовхувальної зоряної гідродинаміки. Наклавши на осесиметричну поверхневу густину та гравітаційний потенціал диска малі гармонійні обурення, Лін та Шу вивели умову для області диска, в якій можуть існувати хвилі густини:

$$\Omega(R) - \frac{\kappa(R)}{m} < \Omega_p < \Omega(R) + \frac{\kappa(R)}{m}, \quad (1.1)$$

де $\Omega(R)$ є кутова швидкість обертання диска Галактики, а $K(R)$ – епіциклічна частота. В цій теорії спіральна хвиля щільності створює потенційну яму, з якою взаємодіє газ, що натікає на хвилю щільності. При протіканні через хвилю зоряної густини міжзоряний газ, що обертається разом із диском, прискорюється у її гравітаційному полі. При цьому виникає галактична ударна хвиля, геометрія фронту якої, є близькою до форми хвилі густини. Внаслідок значного стиснення газу в галактичній ударній хвилі, вона є важливим механізмом запуску процесу зореутворення. Саме цим пояснюється зосередження молодих та короткоживучих об'єктів у спіральних рукавах. Систематичні рухи, викликані у газі спіральним обуренням гравітаційного потенціалу, мають амплітуди близько 10 км/с. Оскільки частота обертання диску Галактики перевищує частоту обертання спірального візерунка, то спіральна хвиля, рухаючись у бік галактичного обертання, відстає від обертання диска. Зараз мало сумнівів у тому, що спіральні рукава

галактики - це хвилі густини, галактичного диска, що мають спіралеподібну форму фронту. Якщо навіть галактичний диск обертається диференційно, то спіральні хвилі густини можуть обертатися з постійною кутовою швидкістю, тому їх форма не повинна деформуватися внаслідок диференційного обертання диска.

Концепція хвиль густини виявилася надзвичайно плідною, оскільки дозволила пояснити з єдиної точки зору цілу низку явищ, що спостерігаються в нашій та інших спіральних галактиках. Сюди відносяться "галактографія" зореутворення, розташування зон іонізованого водню, пилу, можливість утворення багатофазної структури міжзоряного середовища і т. п. Водночас проблема спіральної структури поки що далека від остаточного вирішення. Неясні до кінця джерела енергії, що перманентно підтримують хвилі густини проти згасання, механізм порушення хвиль та інші проблеми. Квазістаціонарна хвильова теорія густини передбачає просторове зміщення різних компонентів плечей, наприклад, старих зірок, областей зореутворення, молекулярного газу та атомарного газу, через можливу затримку зореутворення внаслідок скупчення газу. Інші механізми не передбачають зсуву між зоряними спіральними рукавами та газоподібними рукавами.

Теорія утворення спіралей стохастичним явищем також є досить актуальною [1]. Вона стверджує, що якщо в якійсь частині зоряної системи, яка ще не має спіральних рукавів, починається зореутворення, воно безумовно будить поширюватися і на сусідні ділянки У зонах активного зореутворення масивні зорі можуть спалахувати як Наднові, внаслідок чого генеруються потужні ударні хвилі, які розповсюджуються у навколишньому міжзоряному середовищі та призводять до стискування сусідніх газопилових хмар, що, у свою чергу, ініціює утворення зір наступного покоління. Цей процес буде поступово поширюватися від центра Галактики і до її окраїн. За наявності диференційного обертання газу в диску (кутова швидкість зменшується з

віддаленням від центра) зони активного зореутворення, повинні згодом прийняти вигляд продовгуватих рукавів нечітко визначеної форми.

Очевидно, що для підтримання спіральної структури протягом тривалого проміжку часу потрібен зовнішній вплив. Вважається, що це може бути, наприклад, гравітаційне збурення диска, викликане наближенням інших галактик [44]. Таким чином, не виключено, що зовнішній вигляд галактики буде суттєво залежати від її оточення (компаньйонів, карликових галактик супутників тощо). Повне моделювання N тіл, що почалося з 1970-х років, дозволило змоделювати взаємодію між галактиками і продемонструвати, що походження спіральних рукавів дійсно можливе завдяки приливній взаємодії [45]. Наприклад моделювання, показало, що Чумацький Шлях міг отримати спіральну структуру в результаті неодноразових зіткнень з карликовою еліптичною галактикою Стрілець [46] .

1.2 Відомості про спіральні рукава Галактики

1.2.1 Загальна схема та галактичні квадранти

Загально прийнято зображувати Галактику та схему її спіральних рукавів в галактичній площині, використовуючи прямокутну геліоцентричну або галактоцентричну систему координат, при цьому дуже часто зображення поділяють на квадранти. Галактичний квадрант, або квадрант Чумацького Шляху, відноситься до одного з чотирьох кругових секторів у розділі Чумацького Шляху [47]. Існує два види розмежування галактичних квадрантів, які відповідно виконується згідно з обраною галактичною системою координат: перший ґрунтується на галактичній системі координат, в якій початок відліку знаходиться в Сонці, а в другому виді початок системи знаходиться в центрі Галактики.

В роботі Шена і Женга 2020-го року [48], було детально розглянуто поточне найкраще представлення структури та кінематики Галактики, а також - оновлену науково точну візуалізацію структури Чумацького Шляху. На рисунку (3.14) показана схема із їх роботи, на якій накладено обриси чотирьох спіральних рукавів на концептуальне зображення Чумацького Шляху. Для представлення структури Чумацького Шляху вони використали прямокутну галактоцентричну систему координат з чотирма квадрантами. Галактоцентричний азимут β , в їх роботі, визначається рівним нулю у напрямку на Сонце і збільшується за годинниковою стрілкою. Галактоцентрична система координат розділена жовтими пунктирними лініями на чотири квадранти. У чотирьох кутах вказано номери квадрантів. Центр Галактики (*червона зірочка*) знаходиться на (0, 0), а Сонце (*червоний символ Сонця*) знаходиться на (0, 8,15) кпк. Контури чотирьох рукавів: рукав Norma-Outer (*синій*); Рукав Scutum-Crux (*жовтий*); рукав Sagitarius-Carina (*зелений*); і рукав Perseus (*білий*). Пунктирні лінії позначають ширину чотирьох рукавів, яку було визначено в роботі Рейда 2019 року [29].

Схематичний еліпс в центрі Чумацького Шляху, представляє перемичку, що простягається від ближньої до Сонця частини в квадранті 2 і до квадранта 4. Використовуючи зоряні огляди червоного скупчення гігантів (RCG) в роботи [30] виявили, що перемичка має великі та малі пів-осі приблизно 5 та 1,5 кпк відповідно, і спрямована приблизно під кутом 30° до напрямку на Сонце (див. також [49,50]).

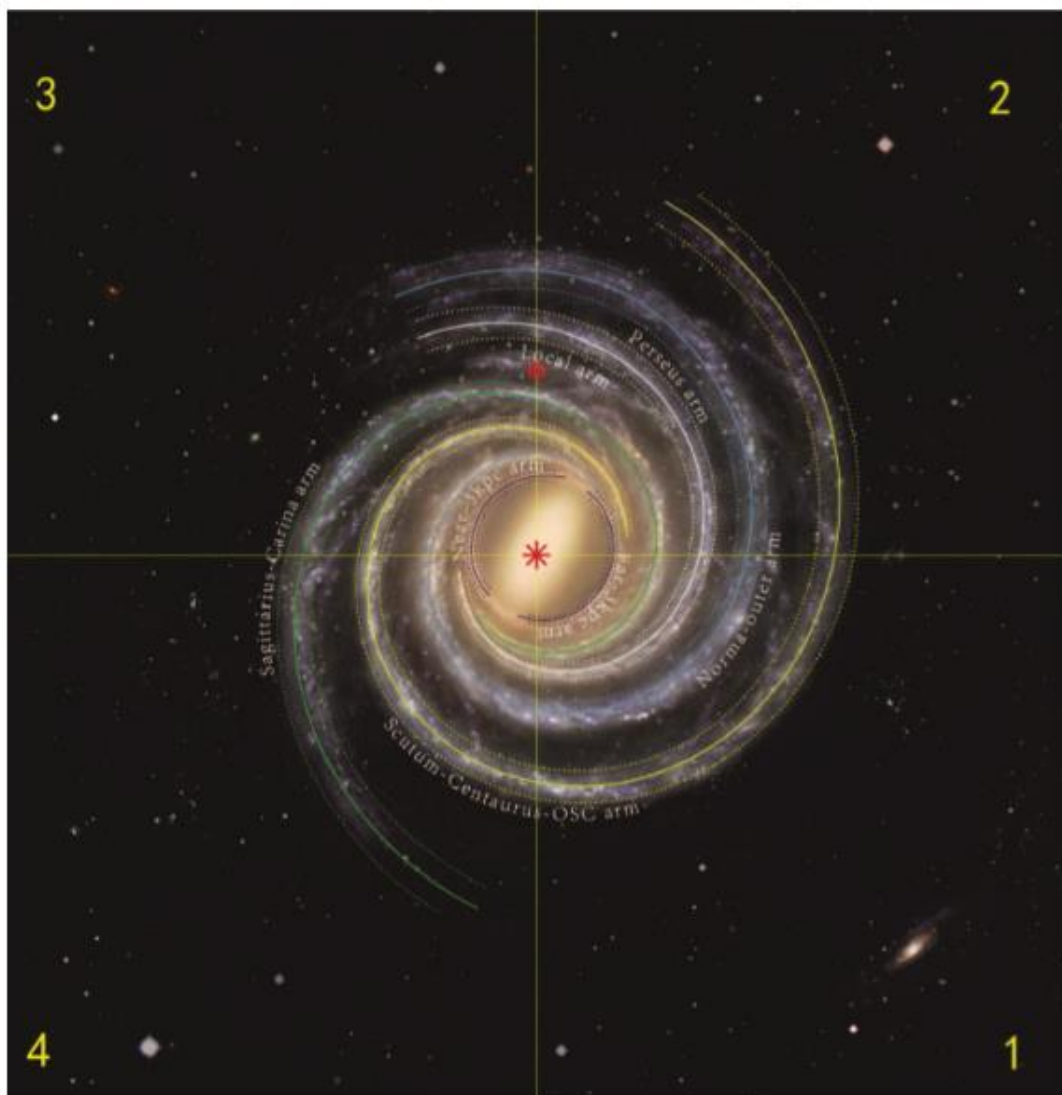


Рис 1.14. Схематичне зображення спіральних рукавів Чумацького Шляху

1.2.2 Рукав Norma-Outer

Рукав Norma - це спіральний рукав галактики Чумацький Шлях, що тягнеться від центральної області та навколо неї. Він названий на честь сузір'я Norma, через яке проходить на небесній сфері. Визначити його параметри вкрай важко, адже це один з найвіддаленіших рукавів від Сонця. Із результатів його досліджень, визначено, що він бере свій початок (вкручується) за галактичними координатами приблизно $(X, Y) = (3, 2)$ кпк біля кінця перемички, з ближньої до Сонця частини Галактики. За результатами роботи Рейда [29] рукав Norma (рис 1.14) в першому квадранті відображає квазілінійну, шпороподібну структуру. Параметри кута закручення для цього рукава із різних робіт (див. розділ 3) оцінюють приблизно від 6 до 14 градусів. Припускають, що швидше за все, рукав Norma обертається навколо зворотного боку галактичного центру і стає рукавом Outer, як показано на рис. 3.14, тому часто їх поєднують говорячи рукав Norma-Outer. Рукав Outer вперше безперервно було простежено в роботі [51] в другому та третьому квадрантах Галактики приблизно $(X, Y) \sim (-10, -10, 5)$. В більшості досліджень вважається що рукав Норма-Зовнішній, як і представлено на схемі, закінчується у третьому квадранті.

1.2.3 Рукав Scutum-Centaurus

Рукав Scutum-Centaurus також, як і рукав Norma-Outer, починається біля ближнього до нас кінця бара (перемички). Рукав Scutum-Centaurus було ідентифіковано за великою кількістю масивних областей зореутворення (МОЗ). 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.

В роботах [52,53] припускають, що він є одним із двох домінуючих (в дво-рукавній моделі) зоряних спіральних рукавів Чумацького Шляху. Зібрані масивні області зореутворення, області НІІ, зорі О-типу та молоді зоряні скупчення збагачують вибірку спіральних трасерів у цьому рукаві, особливо в четвертому квадранті Галактики. Як показано на рисунку ?, спіральні трасери в цьому рукаві, здається, розподілені більш рівномірно, ніж у рукаві Perseus, Local та рукаві Sagitarius-Carina. Простежений сегмент рукава починається біля $(X, Y) = (2, 5, 4)$ кпк і тягнеться до четвертого галактичного квадранта поблизу $(X, Y) = (-5, 4, 5)$ кпк, аж до ~ 8 кпк.

Кут закручення i для нього, за оцінками різними методами (див. Розділ 3), визначають в діапазоні від 8 до 18 градусів.

1.2.4 Рукав Sagitarius-Carina

Рукав Sagitarius-Carina отримав свою назву, як і інші спіральні рукава Галактики, завдяки сузір'ям через які він проходить на небесній сфері (див. Розділ 3). Рукав Sagitarius-Carina є одним із найвиразніших рукавів у нашій галактиці, оскільки містить багато регіонів НІІ і масивних областей зореутворення [28]. Проте, у 2008 році інфрачервоні спостереження за допомогою космічного телескопа Spitzer показали, що в рукаві Sagitarius-Carina 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.

Рукав Sagitarius-Carina є найближчим до Сонця рукавом у напрямку на галактичний центр (рис. 3.14), тому його властивості та параметри визначені, як правило, із найбільшою точністю. Розташований на відстані приблизно 1,8 кпк від Сонця. В галактичній площині за даними [29], він бере початок (вкручується) біля $(X, Y) = (4, 5, 4)$ кпк, поблизу віддаленого від Сонця

кінця бара (див рис ??). Простягається до четвертого квадранта поблизу $(X, Y) = (-7, 5)$ кпк, до ~ 19 кпк. Значення кута закручування для цього рукава коливаються від 9 до 14 градусів (див. Розд. 3).

Із результатів досліджень в роботі [31], припустили, що рукав Sagitarius-Carina складається з трьох сегментів, тому він був розділений на дві частини, а його параметри знаходили для кожного сегмента окремо.

1.2.5 Рукав Perseus

Рукав Perseus - теж один із найближчих до Сонця рукавів, в протилежному від галактичного центра напрямку. В деяких роботах вважається домінуючим разом із з рукавом Scutum-Centaurus [54]. На це вказує активність зореутворення великої маси (мазери HMSFR, області III, зорі O-типу, молоді ОС), молекулярний газ і газ HI [28,29].

Проте Рейд припустив, що рукав Perseus може не бути домінуючим, якщо виміряти активність зореутворення великої маси на більшій частині його довжини. Дослідження показали, що велика кількість масивних областей зореутворення цього рукава слабшає у другому галактичному квадранті і, можливо, повністю згасає в 3-му квадранті [29].

Крім того, рухаючись по спіралі всередину і через 1-й квадрант, спостерігається явне зменшення активного зореутворення [29], що простягається приблизно на 8 кпк уздовж рукава між довготами 90° і 50° . Для більш детального дослідження необхідно більше спіральних трасерів із точними відстанями, щоб надійно простежити цей рукав Perseus до віддалених регіонів Галактики. Кут закручення для цього рукава за різними оцінками сягає від 5 до 14 градусів.

1.2.6 Рукав Orion

Добре відомо, що наша Сонячна система знаходиться на відстані близько 8.15 кпк від центра Галактики між рукавами Perseus та Sagitarius-Carina і розташований у ще одній складовій частині спіральної структури Галактики - рукава Orion або рукава Local (Місцевий).

Щодо природи Місцевого рукава і досі ведуться дискусії. За одним із припущень він вважався «відгалуженням» рукава Sagitarius-Carina або вторинною спіраллю протягом тривалого часу [18, 28]. На користь цього припущення свідчили дані спостережень зон III та нейтрального водню, які не виявляють Місцевий рукав, але підтверджують існування рукавів Perseus та Sagitarius-Carina. Існування Місцевого рукава також ставить під сумнів механізм формування спіральної структури Галактики за теорією хвиль щільності [55], оскільки за наявності ще одного повноцінного рукава, важко пояснити надто вузький простір між ним та його ближніми рукавами Sagitarius-Carina та рукавом Perseus (менше 2 кпк).

Проте, за аналізом розподілу густини HMSFRs у ньому виявилось, що кількість цих спіральних трасерів порівнюється з кількістю в рукаві Sagitarius-Carina та рукаві Perseus [29]. Окрім цього, такі індикатори, як: гігантські молекулярні хмари (ГМХ), мазери (HMSFR), зорі O-типу та молоді розсіяні скупчення, що розташовані в цьому рукаві, представляють складні субструктури. Є деякі області, де щільність областей зореутворення та молодих зірок зростає. Один знаходиться поблизу $(X, Y) = (1,5, 7,7)$ кпк в першому галактичному квадранті, інший знаходиться поблизу $(X, Y) = (-2, 8,2)$ кпк в четвертому квадранті. Місцевий рукав, простежений мазерами HMSFR, тягнеться на > 6 кпк, що є більшим і помітнішим, ніж вважалося раніше. Отже, в деяких роботах пропонується, щоб це був домінуючий сегмент руки. Хоу (2021) [31] в своїй роботі зазначив, що Місцевий рукав може мати довжину ~ 9 кпк, починається поблизу $(X, Y) = (4.5, 6)$ кпк і простягається до третього і

навіть четвертого квадранту поблизу $(X, Y) = (-3, 8)$ кпк. За результатами досліджень Хоу, показано, що Місцевий рукав може поступово закручуватися всередину у четвертому галактичному квадранті, стаючи дуже близьким до рукава Кіля-Стрільця. Кут закручення для Місцевого рукава різними методами визначають приблизно від 8,5 до 13 градусів.

Висновки до розділу

Довгий час природа Чумацького Шляху залишалася для людства загадкою. Її дослідження стали однією з головних задач в астрономії. Виявилось, що наша Галактика має складну багатоконпоненту структуру. Однією із складових її підсистем є диск, який за всіма наявними на сьогоднішній день даними має спіральну структуру, механізм утворення якої все ще остаточно невідомий.

Важливість розуміння процесів, пов'язаних з появою та довготривалістю існування спіральної структури стимулює теоретичні дослідження. В останні роки ми значно просунулися в розумінні процесів, що відбуваються в зоряних системах. Виявилися можливості пояснення утворення та існування спіралей, що пов'язані з фізичними властивостями таких систем. Теоретичні дослідження фізичних властивостей зоряних систем дозволяють оптимістично дивитися на можливість пояснення феномену спіральності галактик в рамках відомих фізичних законів.

Досліджувати спіральну структуру вкрай важко, адже Сонячна система розташована майже в галактичній площині. Сильне поглинання світла перешкоджає визначенню структури диска на значних відстанях від Сонця. Протягом майже ста років історія побудови картини Чумацького Шляху була історією пошуку трасерів (індикаторів) спіральної структури та достовірних методів вимірювання відстаней до них.

Спіральні рукава Галактики в першому наближенні описують логарифмічною функцією, тобто такою для якої кут закручення є однаковим для всіх витків. В середньому для нашої Галактики кут закручення i прийнято вважати ~ 12 - 13 градусів. Визначенню параметрів спіральних рукавів присвячено велика кількість робіт, які засновані на різних динамічних та кінематичних методах. За останні кілька років було досягнуто значного прогресу в спостереженнях завдяки використанню спостережень *VLBI* в

радіодіапазоні та вимірювань астрометрії *Gaia* в оптичному діапазоні. І хоча наразі, досі залишається відкритим питання щодо кількості рукавів та їх точних характеристик, найбільш важливими можна вважати такі спіральні рукава як: Scutum-Centaurus, Sagittarius-Carina, Perseus, Norma-Outer, а також Місцевий рукав.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ТА СПІРАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

2.1 Системи координат, що використані в роботі

2.1.1 Дані Gaia та пов'язана з ними система відліку

Gaia Data Release 3 (*Gaia* DR3) було випущено 13 червня 2022 року [56]. Дані доступні в архіві *Gaia* (і в партнерських центрах обробки даних *Gaia*). Каталог *Gaia* DR3 базується на Early Data Release 3 [57] і поєднує ці вже опубліковані дані із численними новими даними, такими як протяжні об'єкти та кратні зірки. У табл. 2.1 наведено дані, що в подальшому використовувались в роботі (<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr3>).

Табл. 2.1.

Огляд *Gaia* Data Release 3 у цифрах

	# sources in Gaia DR3	# sources in Gaia DR2	# sources in Gaia DR1
Total number of sources	1,811,709,771	1,692,919,135	1,142,679,769
	Gaia Early Data Release 3		
Number of sources with full astrometry	1,467,744,818	1,331,909,727	2,057,050
Number of 5-parameter sources	585,416,709		
Number of 6-parameter sources	882,328,109		
Number of 2-parameter sources	343,964,953	361,009,408	1,140,622,719
Gaia-CRF sources	1,614,173	556,869	2191
Sources with mean G magnitude	1,806,254,432	1,692,919,135	1,142,679,769
Sources with mean G_{BP} -band photometry	1,542,033,472	1,381,964,755	-
Sources with mean G_{RP} -band photometry	1,554,997,939	1,383,551,713	-
	New in Gaia Data Release 3	Gaia DR2	Gaia DR1
Sources with radial velocities	33,812,183	7,224,631	-
Sources with mean G_{RVS} -band magnitudes	32,232,187	-	-
Sources with rotational velocities	3,524,677	-	-
Mean BP/RP spectra	219,197,643	-	-

Дані Gaia DR3 (як Gaia EDR3, так і повний Gaia DR3), були зібрані у період з 25 липня 2014 року (10:30 UTC) до 28 травня 2017 року (08:44 UTC). Система відліку, визначена за даними Gaia DR2, є реалізацією ICRS в оптичному діапазоні і має назву Gaia Celestial Reference Frame 2 (Gaia-CRF2) [58]. Вона заснована на 22-місячних спостереженнях космічним апаратом Gaia більш ніж півмільйона позагалактичних джерел. Gaia-CRF2 з'явилася у 2018 році й була представлена як «перша повноцінна оптична реалізація ICRS, побудована тільки на позагалактичних джерелах». Згодом з'явилась Gaia-CRF3 [59], що заснована на 34-місячних спостереженнях 1 614 173 позагалактичних джерел. У серпні 2021 року Міжнародний астрономічний союз ухвалив у Резолюції В3, XXXI Генеральної Асамблеї, що «з 1 січня 2022 року реалізація Міжнародної небесної системи відліку ICRS включатиме третю реалізацію Міжнародної небесної системи координат (ICRF3) для радіодіапазону та Gaia-CRF3 для оптичного діапазону». У той час, як положення зазвичай слабких квазарів становлять основну реалізацію Gaia-CRF3 на суб-мілісекундому рівні точності, положення та власні рухи 1 467 744 818 зірок у Gaia DR3 номінально знаходяться в одній і тій же системі координат і, таким чином, забезпечують вторинну реалізацію (аналог HCRF), яка покриває діапазон магнітуд G від 6 до 21 маг. з аналогічною точністю, яка погіршується із збільшенням часового інтервала від опорної епохи J2015.5. Початок координат цих систем розташований в барицентрі Сонячної системи, а осі спрямовані так само, як в екваторіальній системі координат FK5 в епоху J2000.

2.1.2 Галактична сферична система координат

Сферичну галактичну систему координат дуже часто використовують в кінематичних та динамічних дослідженнях. Основною площиною (ГСК) приймають площину галактичного диска. Положення цієї площини в системі Gaia-CRF3 визначається координатами одного з галактичних полюсів.

Консорціум Hipparcos (Перріман та ін., 1997а) [60] для епохи J2000.0 рекомендував наступні значення:

$$\alpha_{GC} = 266^\circ.40499, \quad \delta_{GC} = -28^\circ.93617, \quad (2.1)$$

$$\alpha_{GR} = 318^\circ.00439, \quad \delta_{GR} = +48^\circ.32964, \quad (2.2)$$

$$\alpha_{GP} = 192^\circ.85948, \quad \delta_{GP} = +27^\circ.12825, \quad (2.3)$$

а нуль-пункт відліку галактичних довгот було визначено як довготу висхідного вузла галактичної площини по відношенню до екватора ICRS J2000.0

$$l_G = 32,93192. \quad (2.4)$$

Перехід від Gaia-CRF3 до сферичної галактичної системи координат має вигляд:

$$\begin{pmatrix} \cos b \cos l \\ \cos b \sin l \\ \sin b \end{pmatrix} = A_G \begin{pmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix}, \quad (2.5)$$

де

$$A_G = \begin{pmatrix} \vec{l}_g \\ \vec{j}_g \\ \vec{k}_g \end{pmatrix} (\vec{i} \quad \vec{j} \quad \vec{k}). \quad (2.6)$$

Використовуючи наведені вище значення $\alpha_{GP} = 192^\circ, 85948, \delta_{GP} = +27^\circ, 12825, l_G = 32.93192$, матриця A_G буде мати наступний чисельний вигляд:

$$A_G = \begin{pmatrix} -0,054875560137 & -0,873437090253 & -0,483835015547 \\ 0,494109428013 & -0,444829629802 & 0,746982244500 \\ -0,867666148959 & -0,198076373706 & 0,455983776171 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Перехід від власних рухів зорь (μ_α, μ_δ) в системі Gaia CRF3 до власних рухів до власних рухів (μ_l, μ_b) в галактичній системі координат, виконується за формулами:

$$\mu_l \cos b = \mu_\alpha \cos \delta \cos \varphi + \mu_\delta \sin \varphi, \quad (2.8)$$

$$\mu_b = \mu_\alpha \cos \delta \sin \varphi + \mu_\delta \cos \varphi. \quad (2.9)$$

Паралактичний кут $0^\circ < \varphi < 360^\circ$, тобто кут між напрямком від світила на північний полюс Галактики та кругом схилення може бути визначений, наприклад з формул:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\cos \delta_{GP} \sin (\alpha - \alpha_{GP})}{\cos \delta \sin \delta_{GP} - \sin \delta \cos \delta_{GP} \cos (\alpha - \alpha_{GP})}, \quad (2.10)$$

$$\sin \varphi = \frac{\cos \delta_{GP} \sin (\alpha - \alpha_{GP})}{\cos b}. \quad (2.11)$$

2.1.2 Галактична прямокутна система координат.

Ця система координат задається правосторонньою трійкою взаємно-ортогональних одиничних векторів (i, j, k), спрямованих відповідно: від спостерігача у бік галактичного центру $l = 0^\circ, b = 0^\circ$, (GC) вісь x , у бік галактичного обертання $l=90^\circ, b=0^\circ$ (GR) вісь y і у бік північного полюса Галактики $b=90^\circ$, (GP) вісь z .

Очевидно, що компоненти радіус-вектора $\mathbf{r} = (x, y, z)$ зорі знаходяться за допомогою координат сферичної галактичної системи наступним чином:

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cos b \cos l \\ r \cos b \sin l \\ r \sin b \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

А компоненти вектора швидкості світила $V = (V_x; V_y; V_z)$ знаходяться за формулами:

$$\begin{aligned} V_x &= V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \\ V_y &= V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b, \\ V_z &= V_r \sin b + V_b \cos b, \end{aligned} \quad (2.13)$$

де:

$$V_l = k r \mu_l \cos b, V_b = k r \mu_b \quad (2.14)$$

Множник $k = 4,74$ необхідний для перетворення розмірності власних рухів зорь із мас рік⁻¹ в км с⁻¹ кпк⁻¹.

2.1.4 Галактоцентрична циліндрична система координат (R, θ, z)

Вісь z цієї системи спрямована у бік північного полюса Галактики з галактичного центру. Азімутальний кут θ відраховується від осі x проти годинникової стрілки навколо осі z , а R - галактоцентрична відстань зорі.

В галактоцентричній циліндричній системі координат координатами Сонця будуть: $R_{\odot} = R_0$, $\theta_{\odot} = 180^\circ$ та $z_{\odot} = 0$.

Зв'язок між координатами в галактичній прямокутній системі та циліндричній галактоцентричній системі встановлюється такими співвідношеннями:

$$R = \sqrt{(x - R_0)^2 + y^2}, \quad (2.15)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{y}{x}, z = z \quad (2.16)$$

В системах координат ICRS, ГСК, ПГСК, Сонце рухаються в просторі разом із ними. Проте, в дослідженнях іноді виникає необхідність циліндричну

галактоцентричну системи координат ввести таким чином, щоб вона рухалася у просторі зі швидкістю центра Галактики. Для того, щоб перерахувати компоненти швидкості довільної зірки з прямокутної галактичної системи координат в циліндричну галактичну систему координат, необхідно врахувати швидкість Сонця відносно Центра Галактики.

2.2 Кінематичні моделі використані в роботі

2.2.1 Модель Огороднікова-Мілна

Модель Огороднікова-Мілна є класичною кінематичною моделлю, що описує систематичне диференційне поле швидкостей зорь, спричинене галактичним обертанням і деформацією зоряної системи. Модель запропонував Огородніков (1932) [61], а потім відбулося її узагальнення до тривимірного випадку Мілном (1936) [62]. У моделі Огороднікова-Мілна вивчається поле швидкостей зорь, що заповнюють певну просторову область, яка розглядається як безперервне деформоване середовище. Введення поняття центроїду для кожної точки простору цього середовища надає можливість досліджувати рух зірок методами механіки суцільного середовища, незалежно від причин, що викликають цей рух [тарапов механіка сплош срб3].

Модель О-М є фізичною моделлю, оскільки вона отримана з розгляду конкретного фізичного процесу - галактичного обертання та деформації зоряної системи згідно з теоремою Гельмгольца.

З математичної точки зору рівняння різних моделей найбільш просто виглядають у декартовій системі координат x, y, z . У зоряній кінематиці часто використовується декартова галактична система координат. Її початок відліку встановлено в барицентрі Сонячної системи, вісь x спрямована на центр Галактики, вісь y – у напрямку обертання Галактики, а вісь z – перпендикулярно до площині Галактики (див. рис. 2.1).

Тривимірні кінематичні моделі найчастіше використовувались для отримання оцінок кінематичних параметрів навколосонячної області [64,65]. Проте, сучасні кінематичні дослідження, [66] показали, що оцінки кінематичних параметрів можна отримувати не лише для навколосонячного простору, а й для будь-якої частини площини Галактики, за умовою, що

кількість зорь у вибірці достатня для надійного вирішення систем рівнянь моделі Огороднікова-Мілна.

Аналіз поля швидкостей зорь виконується виходячи із загального виду розкладання безперервної вектор-функції $V(\mathbf{r})$ в околиці центроїду. Під центроїдом розуміється точка $\mathbf{r}_0(x_0, y_0, z_0)$, яка в даний момент збігається з тією точкою, що рухається із швидкістю, що дорівнює середній швидкості зорь, які містяться у вибраній області. У декартовій Галактичній системі координат x, y, z загальний вигляд розкладання поля швидкостей $V(\mathbf{r})$ в околиці центроїду має вигляд:

$$V(r) = V(r_0 + dr) = V(r_0) + \left(\frac{\partial V}{\partial x_k}\right)_0 dx_k + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x_k \partial x_m}\right)_0 dx_k dx_m + \dots,$$

$$(k, m = 1, 2, 3, \dots) \quad (2.16)$$

де значення похідних беруться у точці $\mathbf{r}_0(x_0, y_0, z_0)$. При аналізі швидкостей зірок обраної області, наприклад Сонячної околиці, ми обмежуємось малими першого порядку в цьому розкладанні і отримуємо компоненти v_i лінійного поля швидкостей V у точці, що знаходиться на геліоцентричній відстані $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + d\mathbf{r}$ від Сонця з наступного виразу:

$$v_i(r_0 + dr) = v_i(r_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} - \frac{\partial v_k}{\partial x_i}\right)_0 dx_k + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i}\right)_0 dx_k$$

$$= v_i(r_0) + \omega_{ik} dx_k + v_{ik} dx_k \quad (2.17)$$

Вирази компонентів антисиметричного та симетричного тензорів відповідно:

$$\omega_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} - \frac{\partial v_k}{\partial x_i}\right)_0 = -\omega_{ki} \quad (2.18)$$

$$v_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i}\right)_0 = v_{ki} \quad (2.19)$$

де, $i, k = 1, 2, 3$.

Вектор $V(\mathbf{r}_0)$ зазвичай інтерпретують як ефект руху Сонця відносно обраного центроїду зірок з компонентами U , V та W . Антисиметричний тензор ω_{ik} називають тензором локального обертання, оскільки він еквівалентний аксіальному вектору $\boldsymbol{\omega}$, матриця якого має вигляд:

$$M^- = \begin{pmatrix} M_{11}^- & M_{12}^- & M_{13}^- \\ M_{21}^- & M_{22}^- & M_{23}^- \\ M_{31}^- & M_{32}^- & M_{33}^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Цей тензор описує твердотільне обертання аналізованої зоряної системи навколо осі, що проходить через вибраний центроїд зірок з миттєвою кутовою швидкістю $\boldsymbol{\omega}$, а величини ω_1 , ω_2 , ω_3 є проєкціями вектора $\boldsymbol{\omega}$ на галактичні осі x , y , z .

Симетричний тензор другого рангу v_{ik} називають тензором швидкостей локальної деформації. Матриця цього тензора має вигляд:

$$M^+ = \begin{pmatrix} M_{11}^+ & M_{12}^+ & M_{13}^+ \\ M_{21}^+ & M_{22}^+ & M_{23}^+ \\ M_{31}^+ & M_{32}^+ & M_{33}^+ \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Він визначає швидкість деформаційного руху в зоряній системі. Діагональні компоненти симетричної матриці M_{11}^+ , M_{22}^+ та M_{33}^+ характеризують швидкості відносних розтягувань - стиснень зоряної системи вздовж осей x , y , z , а компоненти $M_{12}^+ = M_{21}^+$, $M_{23}^+ = M_{32}^+$, $M_{13}^+ = M_{31}^+$ — характеризують швидкості кутової деформації у площинах (x, y) , (y, z) та (x, z) відповідно. Під швидкістю кутової деформації розуміється зміна прямого кута в цих площинах внаслідок деформації. У зоряній динаміці компоненти саме

цього тензора співвідносять із силами, під впливом яких виникають деформації.

З урахуванням вищесказаного рівняння (2.17) можна записати і в такому вигляді:

$$v_i(r_0 + dr) = v_i(r_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} - \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right)_0 dx_k + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right)_0 dx_k = v_i(r_0) + M^- dx_k + M^+ dx_k \quad (2.22)$$

Елементи матриць M^- і M^+ є частковими похідними за координатами від проєкцій (v_1, v_2, v_3) вектора швидкості на осі прямокутних координат - їх називають кінематичними параметрами.

Щоб зв'язати компоненти швидкості $V(r)$ з власними рухами $\mu_l \cos b$ і μ_b за галактичною довготою та широтою відповідно і променевою швидкістю зорі V_r , ми проєктуємо вектор $V(r)$ на одиничні вектори e_l, e_b, e_r та вводимо множник $k = 4,74$ для перетворення розмірності власних рухів зірок мас/рік⁻¹ в км/с⁻¹ кпк⁻¹. Тоді умовні рівняння для власних рухів та променевих швидкостей у сферичній Галактичній системі координат виглядатимуть так:

$$k\mu_l \cos b = U/r \sin l - V/r \cos l - \omega_1 \sin b \cos l - \omega_2 \sin b \sin l + \omega_3 \cos b + M_{12}^+ \cos b \cos 2l - M_{13}^+ \sin b \sin l + M_{23}^+ \sin b \cos l - 0.5M_{11}^+ \cos b \sin 2l + 0.5M_{22}^+ \cos b \sin 2l \quad (2.23)$$

$$k\mu_b = U/r \cos l \sin b + V/r \sin l \sin b - W \odot / r \cos b + \omega_1 \sin l - \omega_2 \cos l - 0.5M_{12}^+ \sin 2b \sin 2l + M_{13}^+ \cos 2b \cos l + M_{23}^+ \cos 2b \sin l - 0.5M_{11}^+ \sin 2b \cos^2 l - 0.5M_{22}^+ \sin 2b \sin^2 l + 0.5M_{33}^+ \sin 2b, \quad (2.24)$$

$$V_r/r = -U/r \cos l \cos b - V/r \sin l \cos b - W/r \sin b + M_{13}^+ \sin 2b \cos l + M_{23}^+ \sin 2b \sin l + M_{12}^+ \cos^2 b \sin 2l + M_{11}^+ \cos^2 b \cos^2 l + M_{22}^+ \cos^2 b \sin^2 l + M_{33}^+ \sin^2 b \quad (2.25)$$

Ці формули визначають диференційне поле швидкостей зірок та містять 12 невідомих параметрів. У науковій літературі вони відомі як рівняння моделі Огороднікова-Мілна.

У разі відсутності променевих швидкостей, у двох рівняннях моделі О-М, що залишилися, є лінійна залежність між параметрами M_{11}^+ , M_{22}^+ та M_{33}^+ . Тому при аналізі лише власних рухів зірок зазвичай вводять заміни $M_{11}^* = (M_{11}^+ - M_{22}^+)$ та $M_{33}^* = (M_{33}^+ + M_{22}^+)$, а параметр M_{22}^+ опускають. Тоді в систему умовних рівнянь будуть входити одинадцять невідомих шуканих, які визначаються методом найменших квадратів.

2.2.2 Модель Оорта-Лінблада

Окремим випадком тривимірної моделі Огороднікова-Мілна є модель Оорта-Лінблада [67]. На початку минулого століття Оорт вивів формули, що дозволяють враховувати вплив обертання Галактики на власні рухи та променеві швидкості зірок. Він вважав, що всі зорі рухаються замкнутими круговими орбітами, паралельними галактичній площині, і ввів дві постійні A і B (постійні Оорта), для опису диференційного обертання Галактики. Різниця постійних $A - B = \omega$ дає кутову швидкість обертання Галактики на відстані Сонця. Якщо в моделі Огороднікова-Мілна вважати, що обертання зоряної системи відбувається строго в галактичній площині, тобто $\omega_3 = |\omega|$, а ω_1 і ω_2 дорівнюють нулю; вважати, що стиснення-розтягування вздовж осей відсутнє, тобто M_{11}^+ , M_{22}^+ , $M_{33}^+ = 0$, а деформацію вважати існуючою тільки в площині Галактики, то таку спрощену форму моделі Огороднікова-Мілна називають моделлю Оорта-Лінблада. У ній параметр M_{12}^+ дорівнює постійній Оорта A , а параметр $M_{21} = \omega_3$ дорівнює постійній Оорта B .

Вважаючи у вищенаведених рівняннях моделі О-М: $M_{21} = B$, $M_{12}^+ = A$,

$M^+_{11}, M^+_{22}, M^+_{33} = 0, \omega_1$ та $\omega_2 = 0$, отримуємо для компонентів власних рухів та променевої швидкості в декартовій Галактичній системі координат наступні вирази - формули моделі Оорта-Лінблада:

$$\begin{aligned} k\mu_l \cos b &= U/r \sin l - V/r \cos l + B \cos b + A \cos b \cos 2l, \\ k\mu_b &= U/r \cos l \sin b + V/r \sin l \sin b - W/r \cos b \\ &\quad - 0.5A \sin 2b \sin 2l, \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} V_r/r &= -U/r \cos l \cos b - V/r \sin l \cos b - W/r \sin b \\ &\quad + A \cos^2 b \sin 2l. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Формули, що містять постійні Оорта C і K вперше були введені Огородніковим при розгляді так званих «узагальнених формул Оорта» і мають вигляд

$$\begin{aligned} k\mu_l \cos b &= U/r \sin l - V/r \cos l + B \cos b + A \cos b \cos 2l \\ &\quad - C \cos b \sin 2l \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} k\mu_b &= U/r \cos l \sin b + V/r \sin l \sin b - W/r \cos b \\ &\quad - 0.5A \sin 2b \sin 2l - C \cos b \sin b \cos 2l - K \cos b \sin b \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} V_r/r &= -U/r \cos l \cos b - V/r \sin l \cos b - W/r \sin b \\ &\quad + A \cos^2 b \sin 2l \end{aligned} \quad (2.30)$$

де U, V, W - компоненти швидкості центроїду $A = M^+_{12}, B = M^+_{21}, C = 0.5 (M^+_{11} - M^+_{22})$ та $K = 0.5 (M^+_{11} + M^+_{22})$ - постійні Оорта. Але цей випадок вже не є моделлю Оорта-Лінблада, оскільки тут вже є стиснення-розтягнення вздовж осей.

З використанням даних першого релізу космічної місії Gaia, які були представлені у 2016 році, було опубліковано роботу [68], в якій було визначено значення всіх 4-х параметрів для Сонця, що становили:

$$\begin{aligned}
A_{\odot} &= 15,3 \pm 0,4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}, \\
B_{\odot} &= -11,9 \pm 0,4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}, \\
C_{\odot} &= -3,2 \pm 0,4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}, \\
K_{\odot} &= -3,3 \pm 0,6 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}.
\end{aligned}$$

Оскільки елементи тензорів обертання та деформації в локальній галактичній системі координат пов'язані з компонентами поля швидкостей V_R , V_{θ} і V_z галактоцентричної циліндричної системи (R, θ, z) , ми наводимо співвідношення, які встановлюють зв'язок між ними.

$$2M_{12}^{+} = \frac{\partial V_{\theta}}{\partial R} - \frac{V_{\theta}}{R_{\odot}} + \frac{1}{R_{\odot}} \frac{\partial V_R}{\partial \theta} \quad (2.31)$$

$$2M_{12}^{-} = \frac{\partial V_{\theta}}{\partial R} + \frac{V_{\theta}}{R_{\odot}} - \frac{1}{R_{\odot}} \frac{\partial V_{R_{\odot}}}{\partial \theta} \quad (2.32)$$

$$2M_{13}^{+} = -\frac{\partial V_R}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial R} \quad (2.33)$$

$$2M_{13}^{-} = -\frac{\partial V_R}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial R} \quad (2.34)$$

$$2M_{32}^{+} = -\frac{1}{R_{\odot}} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} - \frac{\partial V_{\theta}}{\partial z} \quad (2.35)$$

$$2M_{32}^{-} = -\frac{1}{R_{\odot}} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + \frac{\partial V_{\theta}}{\partial z} \quad (2.36)$$

$$M_{11}^{+} = \frac{\partial V_R}{\partial R} \quad (2.37)$$

$$M_{22}^{+} = \frac{V_R}{R_{\odot}} + \frac{1}{R} \frac{\partial V_{\theta}}{\partial \theta} \quad (2.38)$$

$$M_{33}^{+} = -\frac{\partial V_z}{\partial z} \quad (2.39)$$

2.3 Метод “логарифм відстані-позиційний кут”

Спіральні рукави галактик традиційно апроксимуються логарифмічними спіралями (наприклад, Russeil 2003 і посилання в ньому [30]). Положення зорі на логарифмічній спіралі можна описати наступним рівнянням:

$$R = a_0 \exp \{(\theta - \theta_0) \operatorname{tg} i\}, \quad (2.40)$$

де R – галактоцентрична відстань зорі, θ – позиційний кут зорі: $\tan \theta = y/(R_0 - x)$, де R_0 – галактоцентрична відстань Сонця, а x, y – геліоцентричні галактичні прямокутні координати зорі, причому вісь x спрямована від Сонця до центру Галактики, а напрям осі y збігається із напрямком обертання Галактики; θ_0 – деякий довільно обраний початковий кут, який ми вважаємо рівним нулю, $\theta_0 = 0$; $a_0 > 0$ — точка перетину осі X , що спрямована від центру Галактики і проходить через Сонце зі спіраллю, i — кут закручення спірального візерунка ($i < 0$ для спіралі, що закручується). При цьому логарифмічна спіраль має корисну властивість - кут закручення i при зміні позиційного кута не змінюється, так що він є характеристикою спіралі в цілому, а не окремих її відрізків.

Для отримання параметрів спіралей галактики Чумацький Шлях широко використовують метод вивчення спіральної структури Галактики за даними різних об'єктів [69,70], який ґрунтується на побудові діаграми «позиційний кут – логарифм відстані».

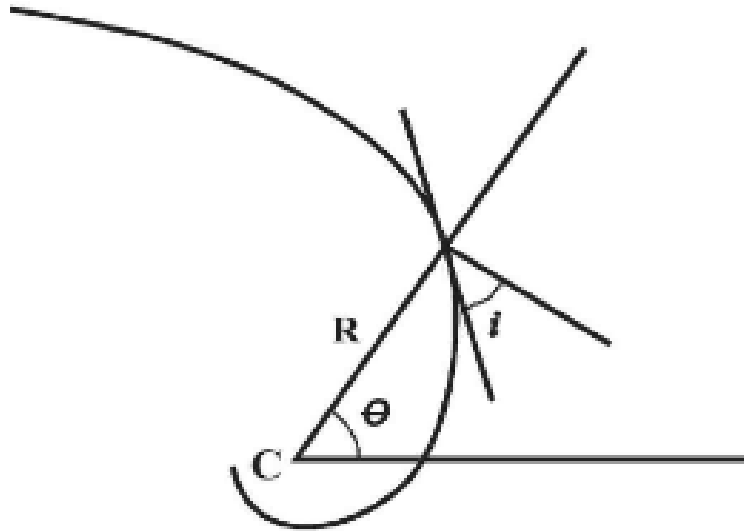


Рис. 2.1 Схематичне зображення логарифмічної спіралі.

Якщо вибрати позиційний кут θ_0 рівним нулю, то рівняння:

$$R = a_0 \exp \{(\theta - \theta_0) \operatorname{tg} i\}, \quad (2.41)$$

можна переписати у вигляді:

$$\ln(R/a_0) = \operatorname{tg} i \quad (2.42)$$

$$\text{або } \ln(R) = \operatorname{tg} i + \ln(a_0) = k\varphi + b \quad (2.43)$$

де $k = \operatorname{tg} i$, а $b = \ln(a_0)$. Як видно, це співвідношення є рівнянням прямої на площині «позиційний кут – логарифм відстані», звідки можна визначити кут закручення та відстань від центра до плеча спіралі. Перевага цього підходу полягає в тому, що оцінка кута закручення i , не залежить від числа спіральних плечей.

На рисунку 2.2 наведений приклад побудови діаграми залежності логарифма відстані від позиційного кута із роботи Бобилева 2014 року [71].

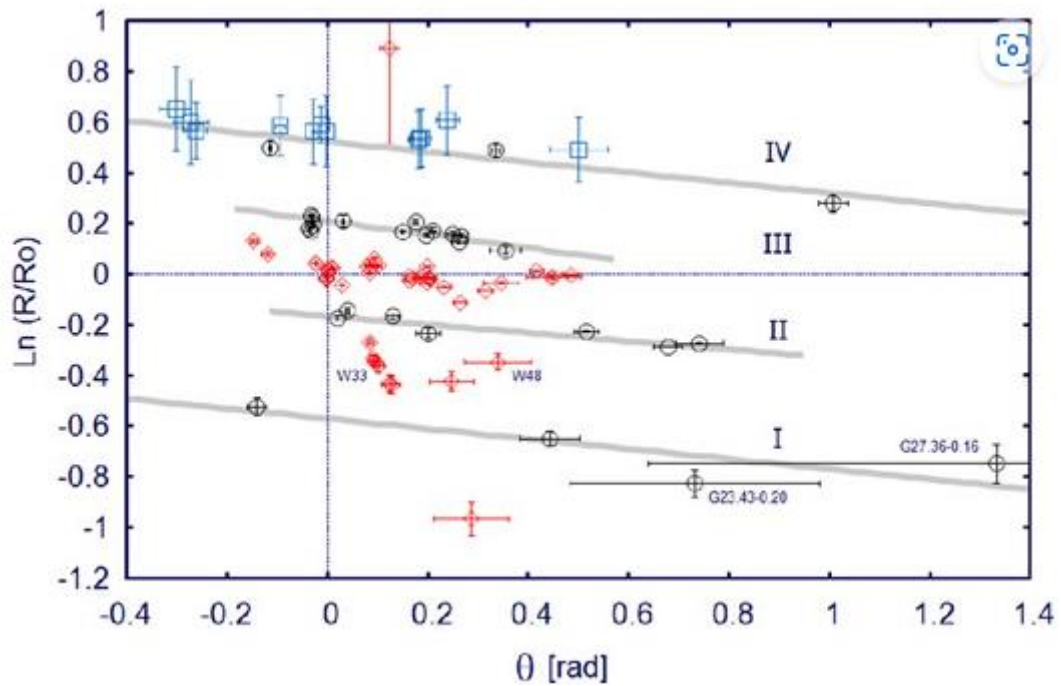


Рис. 2.2 Залежність логарифму відстані від позиційного кута. Місце розташування Сонця позначено пунктирною лінією, спіральні рукави позначені римськими цифрами (I–IV), мазери позначені кружечками, молоді відкриті зоряні скупчення у зовнішньому спіральному рукаві (IV) позначені сірими квадратами, мазери, які не використовувалися для визначення характеристик спіральних рукавів, позначені ромбами [71].

Висновки до розділу

Системи відліку та системи координат є основою для будь-яких астрономічних досліджень. Для кінематичних та динамічних досліджень Галактики найчастіше використовують такі галактичні системи координат, як: сферична, прямокутна, циліндрична.

Кінематичні дослідження Галактики є дуже важливими для розуміння її еволюційних та структурних особливостей, адже тісто пов'язані з динамічними процесами в галактичних підсистемах та між ними. Ще до недавнього часу, вони проводились виключно для областей, що зазвичай не перевищували відстані 1 кпк від Сонця. Космічна місія Gaia надала можливість реалізувати дослідження, які охоплюють значну частину Галактики з використанням кінематичних моделей. Зокрема, модель Огороднікова-Мілна, що є класичною кінематичною моделлю, описує систематичне диференціальне поле швидкостей зірок, спричинене галактичним обертанням і деформацією зоряної системи. Як виявилось нещодавно, оцінки кінематичних параметрів можливо отримувати не лише для навколосонячного простору, а й для будь-якої частини площини Галактики. Це може бути корисним в дослідження особливостей диску, зокрема, аналізу спіральної структури Галактики, адже модель Огороднікова-Мілна є фізичною моделлю, а її параметри тісно пов'язані з процесами, що відбуваються в тій області зірок, яка досліджується. Як вже було зазначено в розділі 1, спіральний візерунок Галактики можна описати, в першому наближенні, за допомогою логарифмічної спіралі, а метод за допомогою якого визначають її параметри базується на аналізі діаграми «позиційний кут – логарифм відстані».

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ПАРАМЕТРІВ СПРАЛЬНИХ РУКАВІВ ГАЛАКТИКИ

3.1 Визначення кінематичних параметрів за даними GaiaDR3

3.1.1 Визначення кінематичних параметрів в локальній системі координат

Для математичного запису основних кінематичних рівнянь різних моделей зазвичай використовується декартова система координат x, y, z . Положення системи збігається з барицентром Сонячної системи. Вісь x вказує на центр Галактики, вісь y збігається з напрямку обертання Галактики, а вісь z перпендикулярна галактичну площину і доповнює праву декартову систему координат. Дана система називається прямокутною галактичною системою координат.

У роботі [66,72] представлені кінематичні параметри моделі Огороднікова-Мілна для зоряних систем, що містяться у сферичних областях радіусом 1 кпс, а їх центроїди розташовані в галактичній площині, були визначені у локальних системах координат. Для математичного запису основних кінематичних рівнянь моделі Огороднікова-Мілна у локальній системі координат потрібно, щоб орієнтація локальної системи координат x', y', z' (тобто такої, що її початок розташовується в довільній точці галактичної площини), відповідала наступним умовам:

- вісь x' спрямована в центр Галактики;
- вісь y' – у напрямку обертання Галактики;
- вісь z' – перпендикулярно площині Галактики.

Ця вимога є обов'язковою, оскільки тільки в цьому випадку механічний зміст кінематичних параметрів моделі О-М залишається таким самим, як і у разі розташування початку відліку системи координат у Сонці.

Прямокутну галактичну систему координат можна ввести в будь-якій довільній точці Галактичної площини за умови, що для цієї точки та для зірок з її околиці відомі просторові координати та компоненти просторової швидкості. Перехід від декартової системи координат x, y, z з початком у барицентрі Сонячної системи до локальної декартової системи x', y', z' з початком у вибраній точці враховує, загалом, перенесення початку системи координат і поворот осей координат. Для орієнтації конкретної локальної системи координат із початком у довільній точці галактичної площини, використовується координати обраної точки x, y , відстань до центру Галактики R_0 , та кут $\varphi = 180 - \theta$, на який потрібно повернути вісь x системи, пов'язаної з Сонцем. Кут θ - це координата обраної точки в галактоцентричній циліндричній системі. При цьому початки відліків усіх локальних систем координат рухатимуться відносно центру Галактики, а величини U_x, U_y, U_z будуть компонентами просторової швидкості центроїду в декартовій галактоцентричній системі координат $x_{gal}, y_{gal}, z_{gal}$.

Тут доречно зауважити, що одиничні вектори локальної декартової системи координат фактично збігаються з ортами циліндричної системи координат, що починається в центрі Галактики, але одиничні вектори $\mathbf{i} = -\mathbf{e}_R$ і $\mathbf{j} = -\mathbf{e}_\theta$ протилежно орієнтовані ортам прямокутної системи.

Перехід від декартової системи координат з початком в Сонці до локальної декартової системи з початком в довільній точці відповідає переміщенню фіктивного спостерігача з барицентру Сонячної системи в точку, що задається координатами обраного початку відліку системи. Введення такої системи координат фактично позбавляє прямокутну галактичну систему привілейованого статусу і переводить її до ряду звичайних локальних систем.

Для визначення кінематичних параметрів у частині Галактичної площини, яка забезпечена шістьма астрометричними параметрами з *Gaia* EDR3 були насамперед сформовані сферичні області радіусом 1.0 кпс, центри яких розташовуються у вузлах прямокутної сітки, що збігається з галактичною

площиною. Збіг з галактичною площиною забезпечується шляхом завдання умови $z = 0$ для координат довільного вузла. Вузли розташовані один від одного вздовж координат x та y на відстані 100 пс. У кожен сферу, описану навколо заданого вузла, потрапляють зорі, які знаходяться на відстані від центру сфери, що не перевищує 1 кпс. Таким чином, вузли прямокутної сітки є центроїдами, швидкості яких дорівнюють середній швидкості зорь, що потрапили у сферу.

Потім, використовуючи рівняння моделі Огороднікова-Мілна, записані як у локальній прямокутній, так і в галактоцентричній циліндричній системах координат, було обчислено, методом найменших квадратів, компоненти швидкостей центроїдів (U_x, U_y, U_z) і (V_R, V_θ, V_z) , а також кінематичні параметри, тобто елементи матриць M і M^+ , які представляють собою часткові похідні проекцій вектора швидкості за координатами в декартовій та циліндричній системах координат.

Рівняння для визначення параметрів моделі Огородніков-Мілна, записані в локальній декартовій системі координат мають вигляд:

$$V_x = M_{11}^+ x' + M_{12}^+ y' - \omega_3 y' + M_{13}^+ z' + \omega_2 z' - U_x, \quad (3.1)$$

$$V_y = M_{12}^+ x' + \omega_3 x' + M_{22}^+ y' + M_{23}^+ z' - \omega_1 z' - U_y, \quad (3.2)$$

$$V_z = M_{13}^+ x' - \omega_2 x' + M_{23}^+ y' + \omega_1 y' + M_{33}^+ z' - U_z. \quad (3.3)$$

Очевидно, що ці кінематичні параметри є локальними, оскільки вони характеризують зоряну кінематику в межах малого об'єму, наприклад в межах сферичної області із заданим радіусом.

Зв'язок між кінематичними параметрами моделі Огороднікова-Мілна в локальній декартовій системі координат та частковими похідними компонентів швидкостей центроїдів в циліндричній галактоцентричній системі координат R, θ, z слідує з рівності матриць:

$$M = 0.5 \begin{pmatrix} 2M_{11}^+ & M_{12}^+ + M_{12}^- & M_{13}^+ + M_{13}^- \\ M_{21}^+ + M_{21}^- & 2M_{22}^+ & M_{23}^+ + M_{23}^- \\ M_{31}^+ + M_{31}^- & M_{32}^+ + M_{32}^- & 2M_{33}^+ \end{pmatrix} = \quad (3.4)$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{\partial V_R}{\partial R} & \frac{1}{R} \frac{\partial V_R}{\partial \theta} - \frac{V_\theta}{R} & \frac{\partial V_R}{\partial z} \\ \frac{\partial V_\theta}{\partial R} & \frac{1}{R} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_R}{R} & \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \\ \frac{\partial V_z}{\partial R} & \frac{1}{R} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} & \frac{\partial V_z}{\partial z} \end{pmatrix}$$

та встановлюється наступними формулами:

$$M_{11}^+ = \partial V_R / \partial R, \quad (3.5)$$

$$(\omega_3 + M_{12}^+) = \partial V_\theta / \partial R = -\partial V_{\text{rot}} / \partial R, \quad (3.6)$$

$$(\omega_2 - M_{13}^+) = \partial V_z / \partial R, \quad (3.7)$$

$$(\omega_3 - M_{12}^+) = V_\theta / R - 1/R \partial V_R / \partial \theta, \quad (3.8)$$

$$M_{22}^+ = V_R / R + 1/R \partial V_\theta / \partial \theta = V_R / R - 1/R \partial V_{\text{rot}} / \partial \theta, \quad (3.9)$$

$$(\omega_1 + M_{23}^+) = -1/R \partial V_z / \partial \theta, \quad (3.10)$$

$$(\omega_2 + M_{13}^+) = -\partial V_R / \partial z, \quad (3.11)$$

$$(\omega_1 - M_{23}^+) = \partial V_\theta / \partial z = -\partial V_{\text{rot}} / \partial z, \quad (3.12)$$

$$M_{33}^+ = \partial V_z / \partial z. \quad (3.13)$$

В результаті розв'язання рівнянь були отримані просторові швидкості U_x , U_y , U_z центроїдів відносно центру Галактики та 9 кінематичних параметрів, що характеризують кінематику зорь в кожній сферичній області. У цьому випадку механічний зміст кінематичних параметрів, отриманих у різних локальних системах координат x' , y' , z' , залишається незмінним. Діагональні компоненти симетричної матриці - M^+_{11} , M^+_{22} , M^+_{33} характеризують швидкості відносних розтягувань - стиснень в зоряній системі вздовж осей x' , y' , z' , компоненти $M^+_{12}=M^+_{21}$, $M^+_{23}=M^+_{32}$, $M^+_{13}=M^+_{31}$ — характеризують швидкості

кутової деформації в площинах (x', y') , (y', z') і (z', x') відповідно, а величини ω_1 , ω_2 , ω_3 - є проєкціями вектора миттєвої кутової швидкості ω зоряної області на осі локальної декартової системи.

Як було зазначено раніше, кінематичний аналіз, опублікований за результатами досліджень даної дисертаційної роботи [72], виходить за межі навколосонячного простору й можливий в будь-якій вибраній частині галактичної площини, навіть на відстанях до 10 кпк. Оцінка кінематичних параметрів в різних частинах Галактики дозволяє аналізувати характер змін кінематичних параметрів в залежності від галактоцентричних координат, а також вивчати локальні особливості поведінки поля швидкостей зірок.

Такий аналіз зоряної кінематики в кожній сфері дає можливість картування кінематичних параметрів в різних частинах Галактики та розуміння поведінки деяких глобальних кінематичних параметрів, тобто таких, які можна віднести до всієї Галактики.

3.1.2 Аналіз кінематичних параметрів M^+_{11} , M^+_{22} , M^+_{33} Галактики за даними *GaiaDR3*

На рисунках 3.1 – 3.3 нижче, наведено діагональні компоненти тензора швидкості деформації M^+_{11} , M^+_{22} , M^+_{33} в залежності від галактоцентричних координат X та Y у діапазоні кутів Θ від 210 до 150 градусів та відстаней R від 4 до 12 кпс, що були отримані в рамках дисертаційної роботи, а результати представлені в публікації [72].

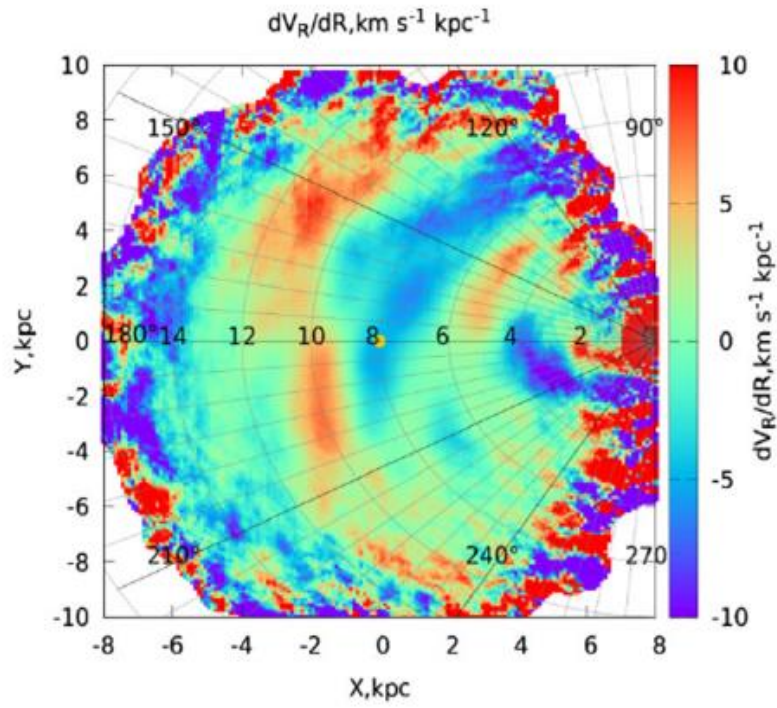


Рис. 3.1. Розподіл параметра M^+_{11} (моделі О-М) в галактичній площині.

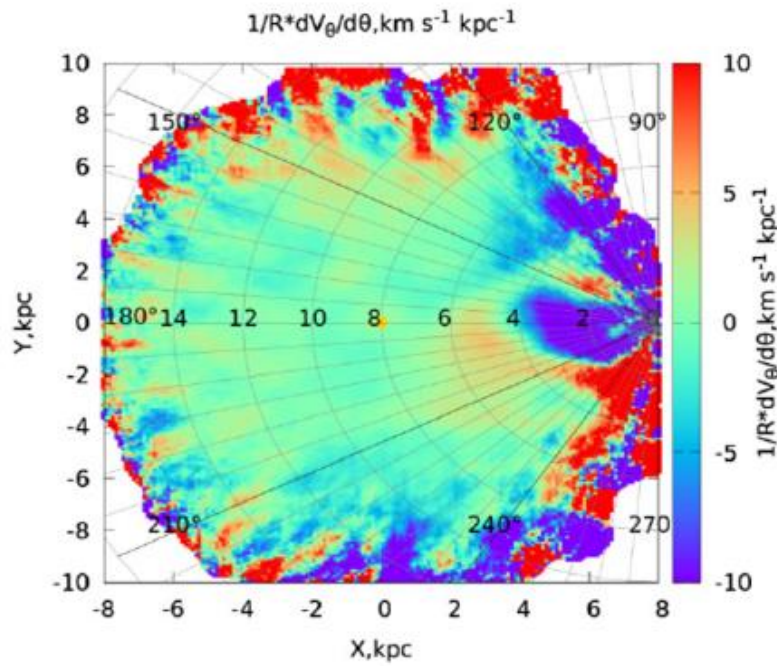


Рис. 3.2. Розподіл параметра M^+_{22} (моделі О-М) в галактичній площині.

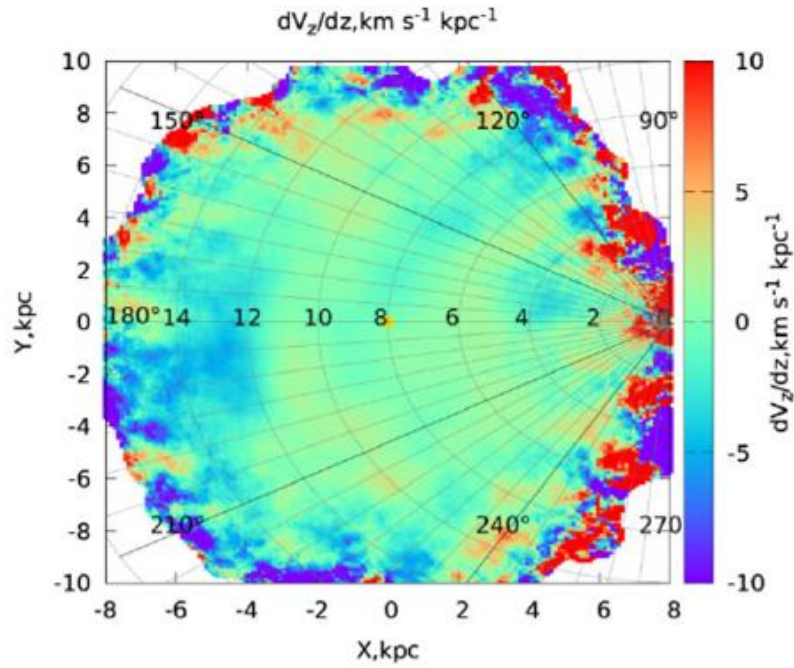


Рис. 3.3. Розподіл параметра M^+_{33} (моделі О-М) в галактичній площині.

Як видно з рисунку 3.2, в діапазоні кутів θ від 210 до 150 градусів і відстаней R від від 4 до 12 кпс величина зміни швидкості $dV_\theta/d\theta$ вздовж одиничного орта \mathbf{j}_θ (параметр M^+_{22}), що характеризує стиснення-розтягнення вздовж осі y локальної системи координат, дорівнює приблизно ± 2.5 км/скпс. В порівнянні з відомою середньою швидкістю V_θ (приблизно 240 км/с) це становить приблизно від 0.5 до 12 відсотків, залежно від R . У той же час, в тій же області Галактики параметр M^+_{11} , що характеризує стиснення-розтягнення вздовж осі x локальної системи (або вздовж одиничного орта \mathbf{i}) досягає значень приблизно ± 10 км/скпс усередині деяких кільцеподібних структур. Порівняно з радіальною швидкістю V_R (приблизно ± 10 км/скпс) її зміна $\partial V_R/\partial R = M^+_{11}$ становить майже 100% залежно від R . Також із рисунка 3.3 добре видно, що параметр $\partial V_z/\partial z$ майже у всій досліджуваній області Галактики практично дорівнює нулю. Тому слід визнати, що параметр $\partial V_R/\partial R = M^+_{11}$ (див. рис. 3.1) є визначальним у формуванні деформацій поля швидкостей. Цей висновок є дуже важливим і буде використовуватися в наступному підрозділі.

Як показав аналіз, проведений вище, в площині Галактики добре проглядаються деякі кільцеподібні структури (див. рис. 3.1). Також на рис. 3.1 добре видно, що поруч із цими кільцеподібними структурами в галактичній площині розташовані регіони, всередині яких градієнт $\partial V_R / \partial R = M^+_{11}$ близький до нуля.

Наприклад, така кільцеподібна структура, розташована на галактоцентричній відстані приблизно 13 кпс. Аналогічні структури, хоч і менш яскраво виражені, можна побачити на відстанях приблизно 9 кпс, 6 кпс та 4 кпс. Це означає, що швидкості деформаційного руху вздовж напрямку R всередині цих областей практично дорівнюють нулю, внаслідок чого не відбувається розширення або стиснення зоряних систем уздовж координати R .

В нашій спільній роботі [73] було показано, що у локальній системі координат компоненти тензорів швидкості деформації M^+_{13} та M^+_{23} для зоряних систем у всьому діапазоні змін галактоцентричних циліндричних координат R і θ близькі до нуля, що вказує на рух зірок, переважно в галактичній площині. Тому далі в дисертації тензор M^+ розглядається як плаский, тобто такий, що має лише чотири компоненти $M^+_{11}, M^+_{12}, M^+_{21}, M^+_{22}$, з яких лише три, є незалежними, тому що $M^+_{12} = M^+_{21}$. А у зв'язку з тим, що в порівнянні з відомою середньою швидкістю V_θ вплив компоненти M^+_{22} на деформацію поля зірок становить приблизно від 0.5 до 12 відсотків, залежно від R , ми нехтуємо цим впливом (тобто параметром M^+_{22}) на стійкість конфігурації зоряної структури.

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 $\partial V_R / \partial R = 0$.

3.2 Обґрунтування використання кінематичного методу

Як уже згадувалось в першому розділі, одним із основних завдань теорії спіральної структури, яка спирається на спостережні дані, є пояснення стійкості (стабільності) спіральних візерунків. Чому ці візерунки існують протягом багатьох обертів галактики, тоді як диференційне галактичне обертання прагне зруйнувати ці візерунки? Очевидно, що якби спіральний візерунок існував протягом короткого інтервалу часу, ми не спостерігали б його в більшості дискових галактик, оскільки диференційне обертання деформує будь-яку структуру в диску, змушуючи її руйнуватися протягом одного - двох обертів диска. Існують два варіанти пояснення: або спіралі безперервно зникають і відновлюються, або спіральний візерунок обертається тверdotільно.

В дисертаційній роботі не було мети відповісти на запитання, яка справжня причина стабільності рукавів, що спостерігаються. В роботі головним є питання, який кінематичний параметр можна пов'язати із стабільністю локальних зоряних систем, що містяться в сферичних областях заданого радіусу в епоху GAIA.

Одним з можливих пояснень стійкості спіральних візерунків є відсутність деформацій типу стиснення-розтягнення, що руйнують їх форму, в тих областях Галактики, де розташовані спіральні рукави. З кінематичної точки зору це означає, що в полі швидкостей зірок, що описуються моделлю Огороднікова-Мілна, діагональні компоненти тензора швидкості деформації, що характеризують деформації вздовж координатних осей, повинні бути близькими до нуля. 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. Зрозуміло, що в цих областях зоряні конфігурації будуть стійкими незалежно від того, внаслідок яких причин вони виникли і наскільки складні в них поля швидкостей.

Основна ідея запропонованого далі підходу полягає в наступному: Якщо спіральні рукави є стійкими структурами, то усередині них відповідальні за стиснення-розтягування кінематичні параметри M^+_{11} , M^+_{22} , M^+_{33} , отримані за моделлю O-M, мають бути близькими до нуля.

Саме тому в роботі вважається, що можемо розглядати положення центроїдів з незначущими M^+_{11} , як *кінематичні трасери* спіральних рукавів у діапазоні галактоцентричних циліндричних координат $140^\circ < \theta < 220^\circ$, $4 \text{ кпк} < R < 13 \text{ кпк}$.

3.3 Кінематичні параметри у спеціальній вибірці зорь із каталогу Gaia DR3

Вхідними даними для моделі Огороднікова-Мілна є положення та просторові швидкості зорь (власні рухи та променеві швидкості), а також відстані до них (паралакси).

Для формування кінематичних трасерів було створено спеціальну вибірку об'єктів із третього випуску даних Gaia - Gaia DR3, яка в подальшому і використовується для визначення кінематичних параметрів моделі Огороднікова-Мілна

Gaia DR3 надає оцінки 5 астрометричних параметрів (положення, власні рухи та паралакси) для 1,8 млрд зірок, а також фотометрію у смугах G, GRP та GBP. [(Riello et al. 2021 74)]. Серед них радіальні швидкості (шостий

астрометричний параметр) були виміряні для ~ 33 мільйонів об'єктів. Наявність 6 астрометричних параметрів дає можливість отримати повну інформацію про рух зірок у просторі. З цих 33 мільйонів об'єктів ми вибрали зорі високої світності з абсолютною зоряною величиною $M_G < 4$ як базову вибірку (див. рис. 3.4).

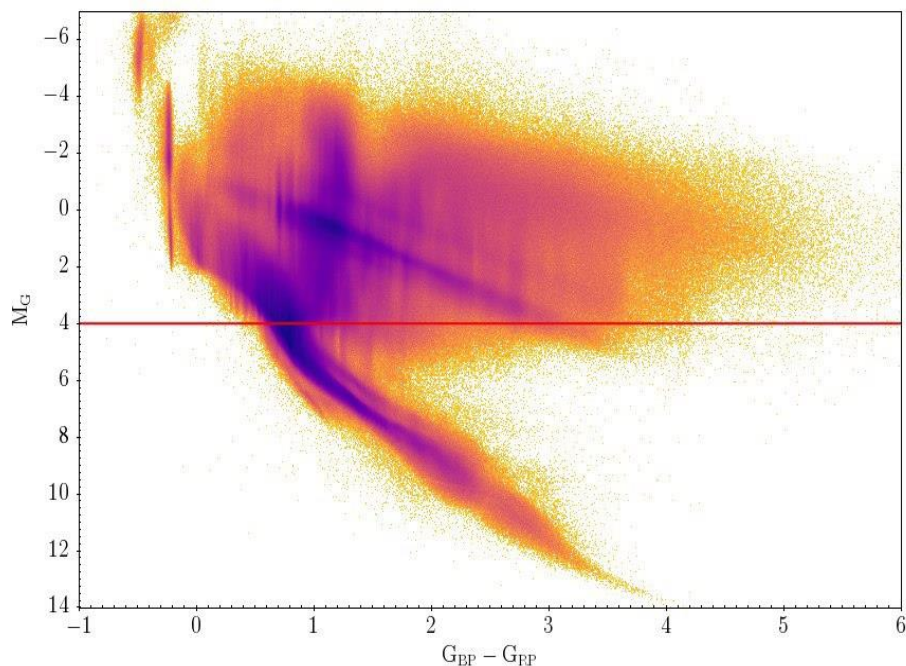


Рис. 3.4. Діаграма залежності показника кольору ($G_{BP} - G_{RP}$) від абсолютної зоряної величини M_G на основі даних *Gaia* DR3.

Для забезпечення найкращої якості астрометричних параметрів з цієї вибірки були виключені зорі, для яких виконуються такі умови:

$$\begin{cases} RUWE > 1.4, \\ \pi/\sigma_\pi < 5. \end{cases} \quad (3.14)$$

Показник RUWE (англ. Renormalised Unit Weight Error), що окремо наведений в каталозі *Gaia* DR3 для кожного джерела, буде близьким до 1, якщо модельне наближення профілю одиничної зорі добре відповідає її реальному профілю з астрометричних спостережень. Якщо значення буду надто перевищувати 1 ($> 1, 4$), то це буде вказувати на те, що джерело входить до

кратної системи зір, або існують інші чинники, що вносять велику похибку в астрометричне рішення.

Також, як відомо з [Lindegren et al. (2021) 75], паралакси GaiaDR3 систематично зміщені відносно очікуваного розподілу навколо нуля на кілька десятків мікросекунд дуги, ми здійснили їхнє коригування. Для виправлення паралаксів ми скористалися паралаксами bias Z5, що розраховані відповідно до таблиці 9, наведеній у роботі [Lindegren et al. (2021) 75]. Кількість об'єктів у вибірці через включення променевих швидкостей обмежена приблизно 17-ю зоряною величиною. Тому діапазон зоряних величин вибірки було розбито лише на дві частини. У діапазоні зоряних величин від 6 до 13 було застосовано зміщення нуль-пункту -30 мкс, а в діапазоні $m > 13$ використано величину -40 мкс. Оскільки у роботі [Lindegren et al. (2021) 75] на рис. 20 спостерігаються не регулярні стрибкоподібні зміни в діапазоні від 11.5 до 13 зоряної величини, було вирішено використовувати в цьому діапазоні середнє Z5, що приблизно дорівнює -30 мкс.

Крім того, було скориговано значення власних рухів зірок у діапазоні зоряних величин від 6 до 13. [Брандт, 2018; Ліндегрена та ін., 2018 76 77] показали, що у другому випуску даних GaiaDR2 система координат, що задається яскравими зорями, обертається відносно системи координат слабких зорь та квазарів зі швидкістю $\sim 0,15$ мсд/рік. У EDR3 це обертання було попередньо виключено (див. розділ 4.5 Ліндегрена та ін., 2021 75). Однак у роботі [A&A 649, A124 (2021) 91] було запропоновано додаткову корекцію, яку було використано у дисертаційному дослідженні для узгодження власних рухів зорь вибірки, які яскравіші, ніж $G = 13$, з Міжнародною системою небесних координат.

Після виконання всіх наведених вище критеріїв відбору, кількість об'єктів, що задовольняє їм і, які надалі були використані для кінематичного аналізу, склала близько 19,3 мільйонів.

3.4 Розподіл центроїдів вибраних зоряних систем

Для розв'язання системи рівнянь моделі Огороднікова-Мілна, отримана вибірка була поділена на зоряні системи, які представляли собою сферичні області радіусом $R_s = 0,5$ кпс. Центри цих сфер було встановлено у вузлах прямокутної сітки, заданої в галактичній площині. Вузли сітки відстояли один від одного вздовж координат x та y на відстані 100 пс. Область покриття Галактичної площини прямокутною сіткою вузлів (центроїдів) була обрана в межах $140^\circ < \theta < 220^\circ$, $1.5 \text{ кпк} < R < 13.5 \text{ кпк}$ галактоцентричних циліндричних координат з відстанню від Сонця $R_0 = 8.15$ кпс.

Розв'язання рівнянь моделі Огороднікова-Мілна, для 12 невідомих, були виконані методом найменших квадратів за астрометричними даними зірок, кількість яких у кожній сфері становила не менше 1000. Графіки залежностей M^+_{11} , M^+_{22} , M^+_{33} від координат X та Y у діапазоні кутів θ від 210 до 150 градусів та відстаней R від 4 до 12 кпс (див. рис. 3.5 – 3.7).

Поведінка кінематичних параметрів, представлених на рис. 3.5 – 3.7 дуже подібна до їх поведінки на рис. 3.1 – 3.3, хоча радіуси використаних сфер відрізняються в два рази, а вибірка зірок для яких $M_G < 4$ (див. рис. 3.4) включає як гіганти головної послідовності та і червоні гіганти. Тому всі міркування, що стосувалися кінематичних параметрів M^+_{11} , M^+_{22} , M^+_{33} , наведених у пункті 3.1, залишаються справедливими також і для вибірки із радіусом 0.5 кпс.

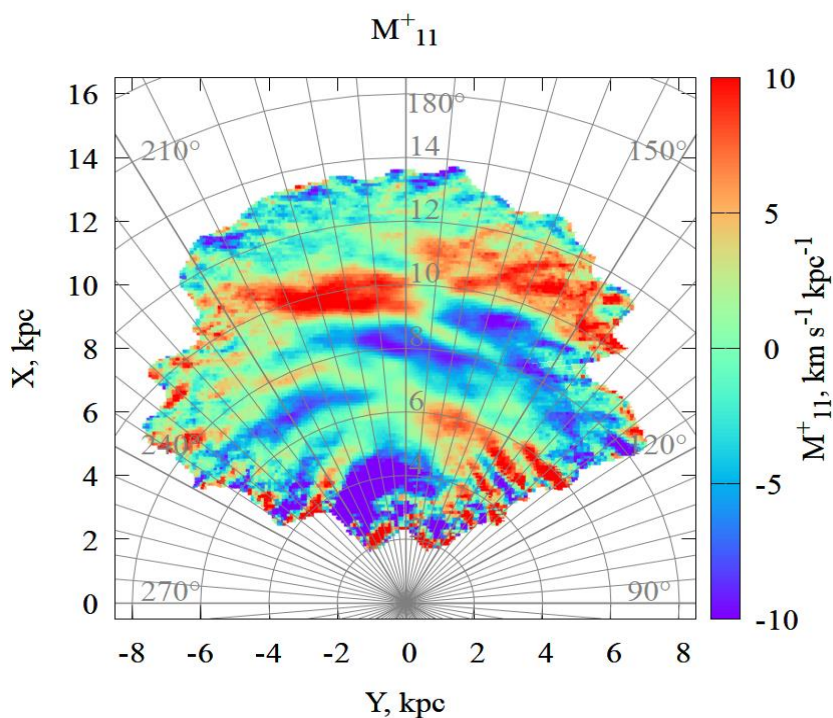


Рис. 3.5. Розподіл параметра M_{11}^+ (моделі О-М) в галактичній площині. Відстань до центра Галактика $R_0 = 8.15$ кпс.

Після обчислення кінематичних параметрів у кожній сфері, було створено підвибірку центроїдів тих сферичних областей, у яких величина параметра M_{11}^+ виявилася не значущою, тобто обчислене значення параметра M_{11}^+ не перевищувало подвоєного значення помилки визначення параметра. Як зазначалося вище, в дисертаційній роботі не розглядався вплив параметрів M_{22}^+ і M_{33}^+ на стійкість зоряних областей, 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.

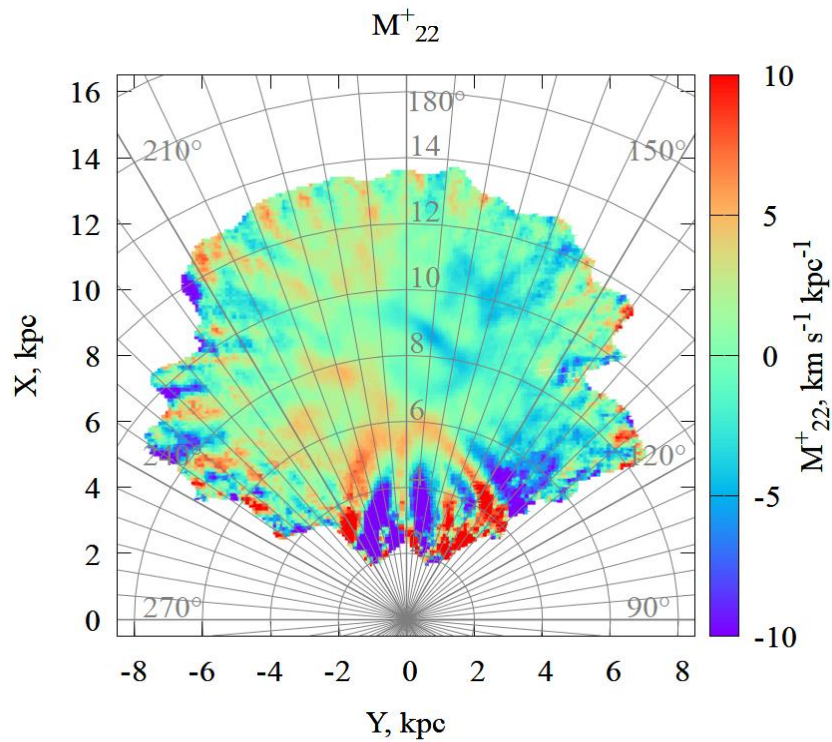


Рис. 3.6. Розподіл параметра M_{22}^+ (моделі О-М) в галактичній площині. Відстань до центра Галактика $R_0 = 8.15$ кпс.

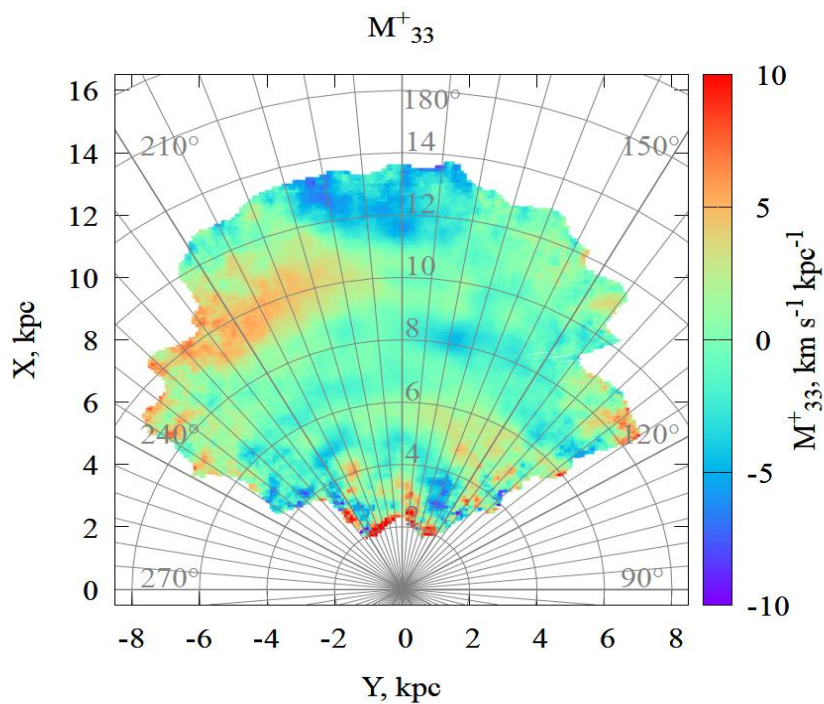


Рис. 3.7. Розподіл параметра M_{33}^+ (моделі О-М) в галактичній площині. Відстань до центра Галактика $R_0 = 8.15$ кпс.

Числове значення 0.5 кпс для радіусу сферичної області вибрано з емпіричних міркувань і є компромісом між забезпеченням надійності рішення метода найменших квадратів (достатньої кількості зірок у сфері) та впевненою фіксацією розташування обраних центроїдів у галактичній площині.

На рисунку 3.8 представлено розподіл положень центроїдів у галактичній площині XU , які сформовані із зірок, що містяться у сфері з радіусом $R_s = 0,5$ кпс і мають не значущі M^+_{11} .

Щоб зрозуміти, чи існують серед центроїдів на рис. 3.8 такі, що належать спіральним рукавам, ми наклали на рисунок 3.9 спіральні рукави з параметрами, отриманими в роботі Рейда 2019 року [29].

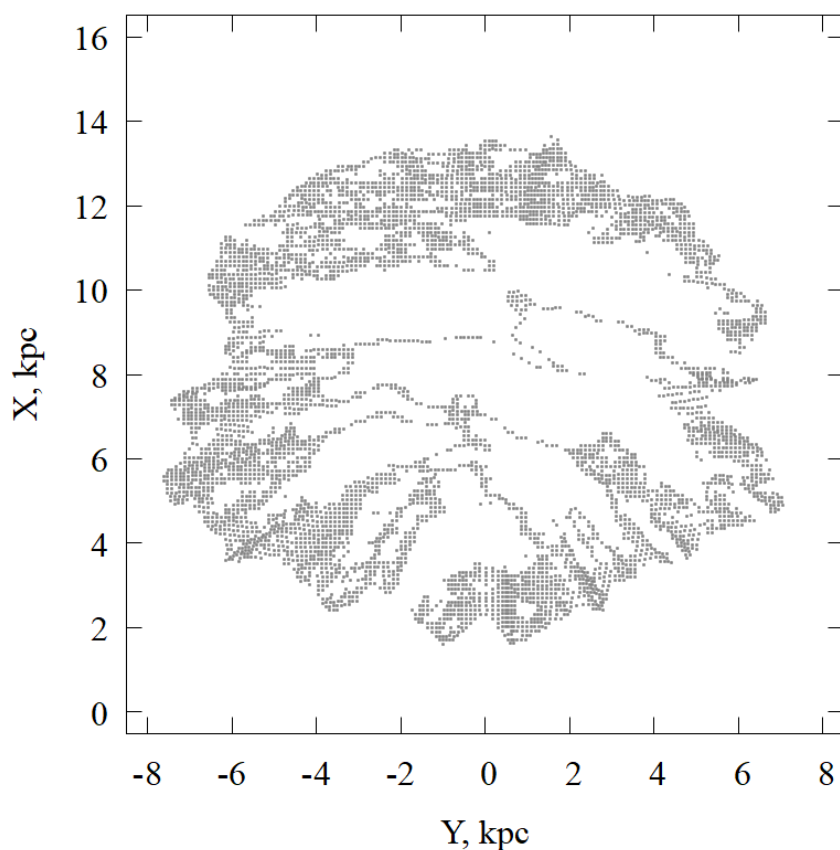


Рис. 3.8. Розподіл координат центроїдів у Галактичній площині XU , які утворюються із зірок, що містяться в сферах радіусом $R_s = 0,5$ кпк і мають незначущий параметр M^+_{11} .

Як видно із рис. 3.9 на окремих ділянках координатної площини розташування центроїдів добре узгоджуються з накладеними спіралями. У

зв'язку з цим, в дисертаційній роботі вважалось, що можна розглядати координати центрів сферичних областей, в яких M_{11}^+ є незначущими, як кінематичні трасери спіральних рукавів у діапазоні галактоцентричних циліндричних координат $140^\circ < \theta < 220^\circ$, $4 \text{ кпк} < R < 13 \text{ кпк}$.

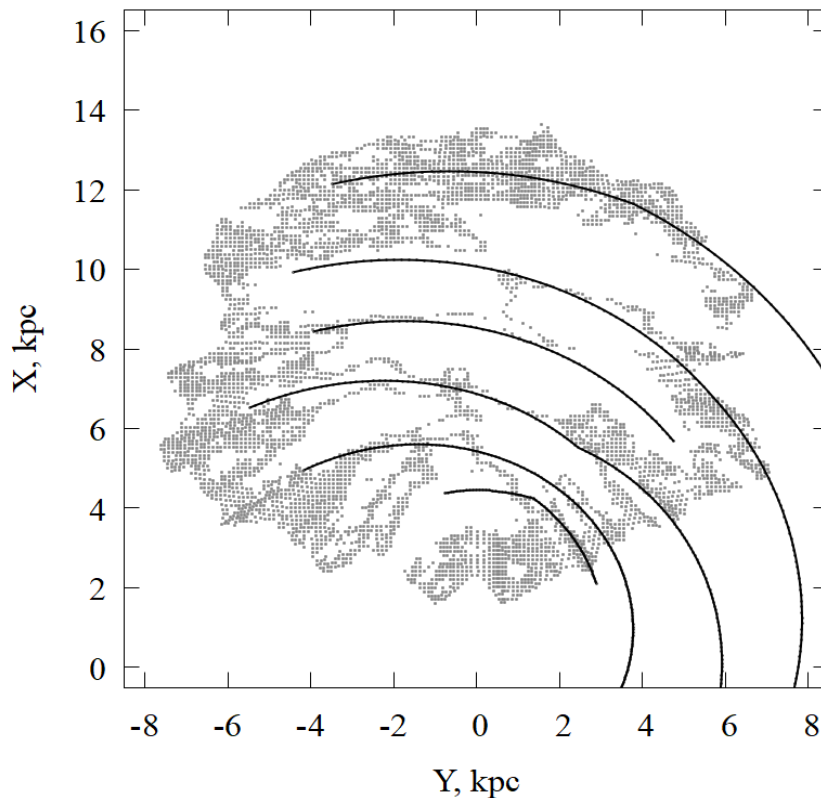


Рис. 3.9. Розподіл координат центрів у Галактичній площині XU , які утворюються із зірок, що містяться в сферах радіусом $R_s = 0,5 \text{ кпк}$ і мають незначущий параметр M_{11}^+ з накладеними спіралями, взятими з роботи Рейд та ін. (2019) [29].

Вибір цих діапазонів координат переважно обумовлений точністю використовуваних паралаксів і точністю отриманих кінематичних параметрів. Загальна кількість центрів із зазначеного діапазону становила 25 110. Саме ці центри використовувалися далі у роботі як кінематичні трасери спіральних рукавів.

3.5 Визначення параметрів спіральних рукавів

Для отримання параметрів спіралей галактики Чумацький Шлях було застосовувано метод, який широко використовується для вивчення спіральної структури Галактики за даними різних об'єктів [78,79,80] що був приведений у другому розділі. Метод ґрунтується на побудові діаграми «позиційний кут – логарифм відстані».

Розглядаючи центроїд як фіктивну зірку, що належить спіральному рукаву, рівняння, що визначає положення цієї фіктивної зорі на логарифмічній спіралі, можна записати так:

$$R = a_0 \exp((\varphi - \varphi_0) \operatorname{tg} i), \quad (3.15)$$

де R — галактоцентрична відстань центроїду, $a_0 = R(\varphi_0 = 0)$ — галактоцентрична відстань до точки перетину спіралі з напрямком центр Галактики - Сонце, φ — позиційний кут центроїду, який визначається з виразу

$$\operatorname{tg} \varphi = y/(R_0 - x), \quad (3.16)$$

де значення R_0 прийнято рівним 8,15 кпк, x, y - геліоцентричні галактичні прямокутні координати центроїду, причому вісь x спрямована від Сонця до центру Галактики, а напрям осі y збігається з напрямком обертання Галактики; φ_0 - деякий довільно обраний початковий кут, який, наприклад, приймають рівним середньому значенню всіх азимутів центроїдів, що належать рукаву. У цій роботі кут φ_0 прийнято рівним нулю. Кут закручення спірального рукава позначений як i ($i < 0$ для спіралі, що закручується). За даними вибірки, геліоцентрична відстань r до конкретного центроїду була отримана з коригованих паралаксів, як середнє значення відстаней до зірок, що містяться у сферичній області радіусом 0,5 кпс. Галактоцентрична відстань R до

конкретного центроїду та відповідний позиційний кут φ були розраховані за такими формулами:

$$R^2 = (R_0 - x)^2 + y^2, \quad (3.17)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = y/(R_0 - x), \quad (3.18)$$

де x, y - геліоцентричні галактичні прямокутні координати центроїду. Очевидно, що зв'язок між позиційним кутом і координатним кутом θ встановлюється наступним співвідношенням:

$$\varphi + \theta = 180^\circ. \quad (3.19)$$

Оскільки було вибрано, що $\varphi_0 = 0$, рівняння (3.15) можна переписати як:

$$\ln (R/a_0) = \operatorname{tg} i, \quad (3.20)$$

або у вигляді:

$$\ln (R) = \operatorname{tg} i + \ln (a_0), \quad (3.21)$$

яке в свою чергу можна переписати так:

$$\ln (R) = k\varphi + b, \quad (3.22)$$

де

$$k = \operatorname{tg} i, \text{ а } b = \ln (a_0). \quad (3.23)$$

Як видно, співвідношення (3.22) є рівнянням прямої на площині «позиційний кут – логарифм відстані». Рішення системи умовних рівнянь окремо для кожного спірального рукава методом найменших квадратів дає дві величини: k і b . Очевидно, що $i = \operatorname{arctg} k$, де i - кут закручення спіралі, а $a_0 = e^b$

i є галактоцентричною відстанню точки перетину спіралі з віссю X , яка спрямована від центру Галактики і проходить через Сонце.

Ключовим моментом у практичному використанні методу «позиційний кут – логарифм відстані» є знаходження координат тих трасерів, які належать конкретному спіральному рукаву. Очевидно, вибір таких центроїдів для побудови відрізків прямих ліній на площині «позиційний кут φ – логарифм відстані $\ln(R)$ » є досить суб'єктивною процедурою (див. рис 3.8). В більшості публікацій, що присвячені знаходженню координат трасерів, будь то цефеїди, чи OB зорі, чи інші молоді об'єкти, відбір координат трасерів є дуже суб'єктивним.

Об'єктивізацію процедури відбору точок (центроїдів), які використовуються в дисертації для побудови відрізків прямих ліній, було виконано за допомогою аналізу поведінки радіальних швидкостей центроїдів нашої вибірки в залежності від галактоцентричних координат R і θ .

Основна ідея, яка була використана в дисертації, полягала в тому очевидному факті, що центроїди, що належать конкретному рукаву, повинні розташовуватися на приблизно однаковій відстані від центру Галактики.

Наприклад, на рисунку (3.10), наведено залежність радіальної швидкості центроїдів від R при фіксованому значенні кута $\theta = 180^\circ$, які визначені шляхом розв'язання рівнянь моделі О-М. На рисунках (3.11 - 3.14) показані такі ж самі залежності, але побудовані при інших координатних кутах, відкладених симетрично відносно $\theta = 180^\circ$. Такі залежності радіальних швидкостей від R з кроком 1 градус по куту θ були побудовані для всієї досліджуваної в цій роботі частині Галактики. Червоним кольором на цих залежностях позначені центроїди, в яких виконується умова - параметр M^+_{11} є незначущим, тобто обчислене значення параметра M^+_{11} не перевищує подвоєного значення похибки його визначення. Як і очікувалося, червоні точки на рисунках 3.10-3.14 групуються у місцях локальних екстремумів, а також у тих місцях, де радіальна швидкість V_R практично є сталою. Також з рисунків добре видно,

що при зміні кута θ червоні точки зміщуються вздовж осі R в деякому інтервалі ΔR . При цьому виявилось, що середнє значення відстаней R_m з інтервалів ΔR корелює з відомими з літератури галактоцентричними відстанями a_0 до спіральних рукавів.

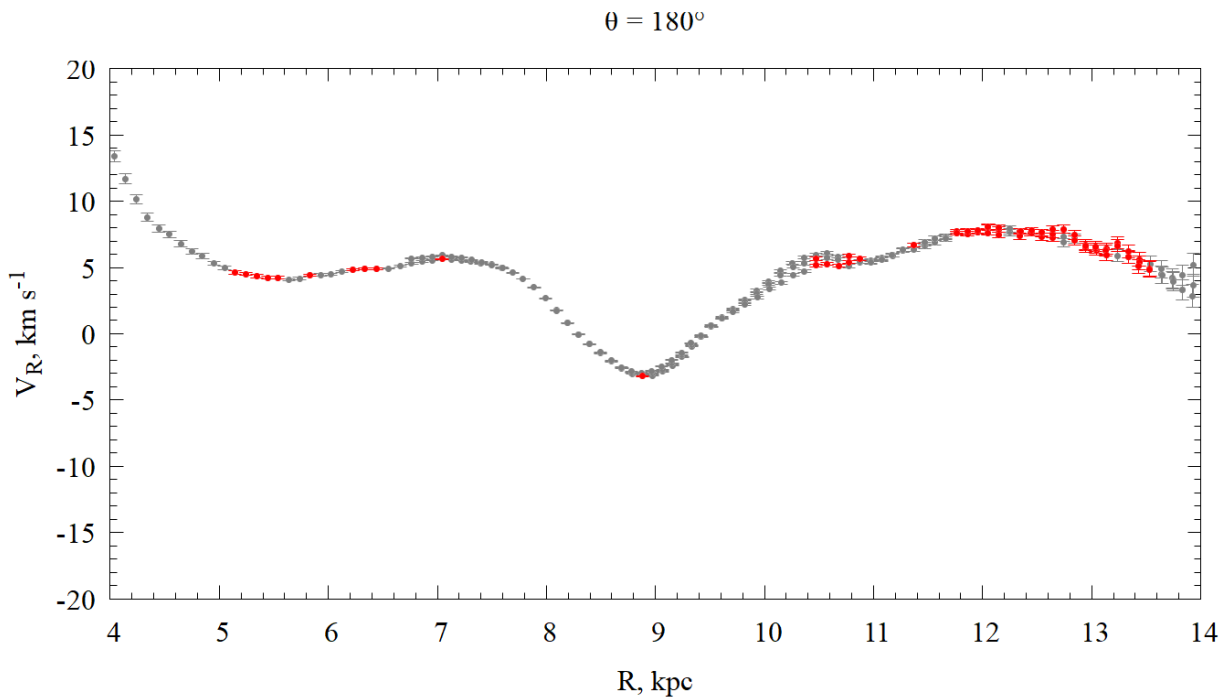


Рис. 3.10. Залежність радіальних швидкостей V_R центроїдів, як функція галактоцентричної відстані R при фіксованому куті $\theta = 180^\circ$. Червоним кольором показано центроїди, для яких виконується умова: параметр M_{11}^+ є незначущим.

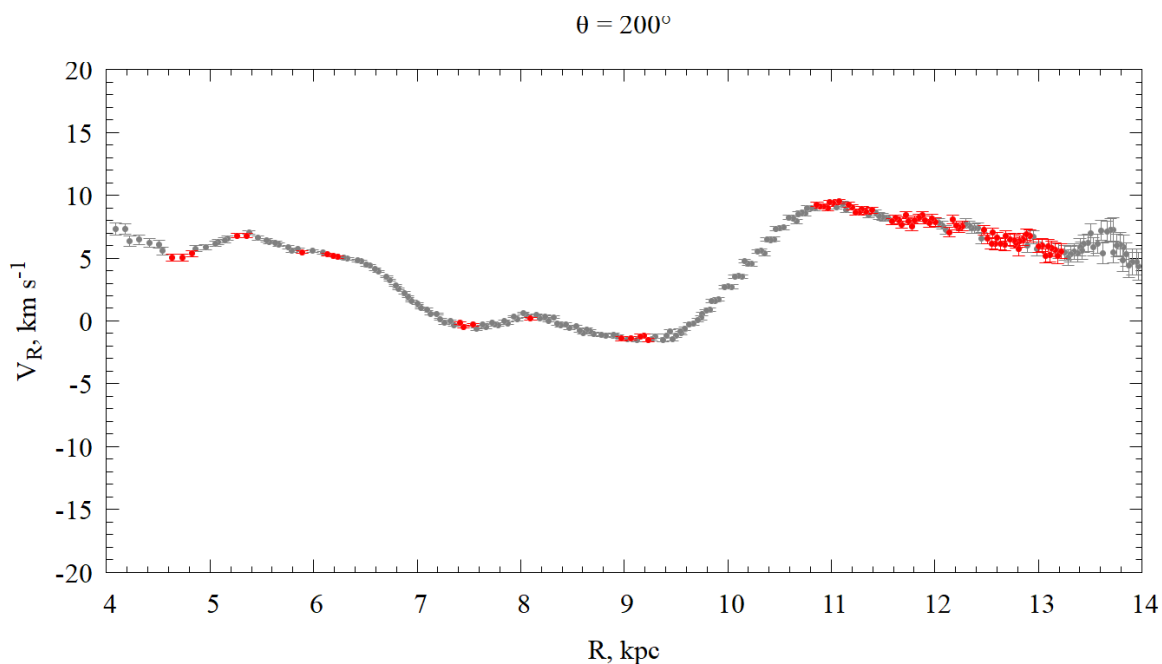


Рис. 3.11. Залежність радіальних швидкостей V_R центроїдів, як функція галактоцентричної відстані R при фіксованому куті $\theta = 200^\circ$. Червоним кольором показано центроїди, для яких виконується умова: параметр M^+_{II} є незначущим.

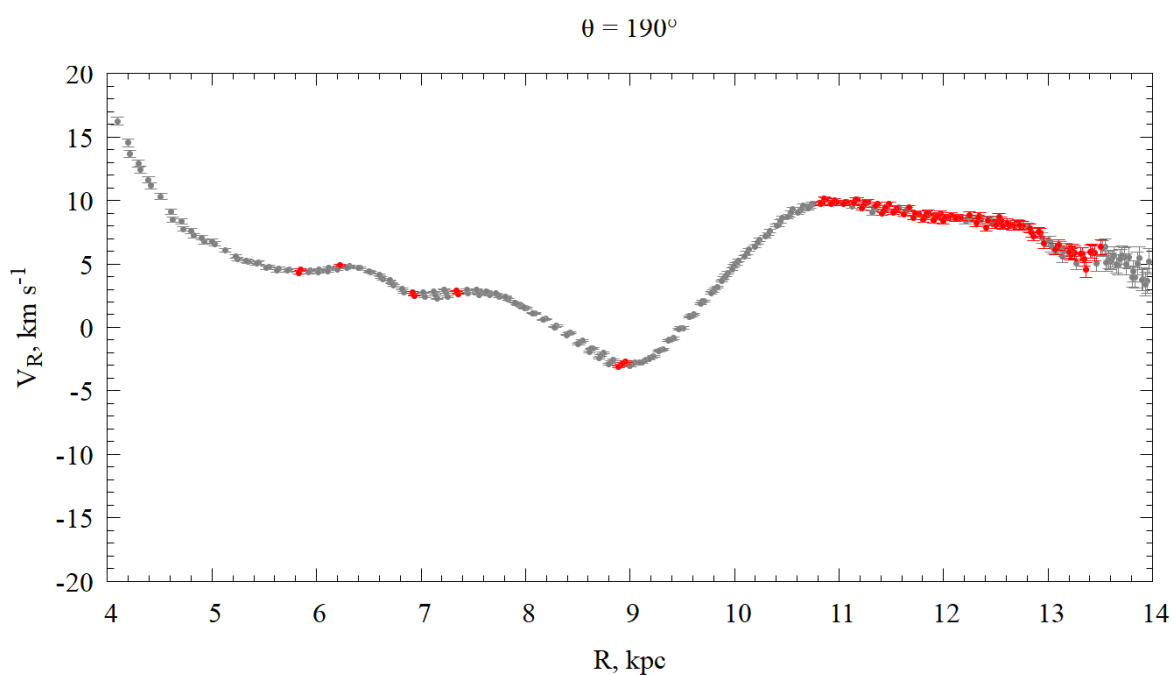


Рис. 3.12. Залежність радіальних швидкостей V_R центроїдів, як функція галактоцентричної відстані R при фіксованому куті $\theta = 190^\circ$. Червоним кольором показано центроїди, для яких виконується умова: параметр M^+_{II} є незначущим.

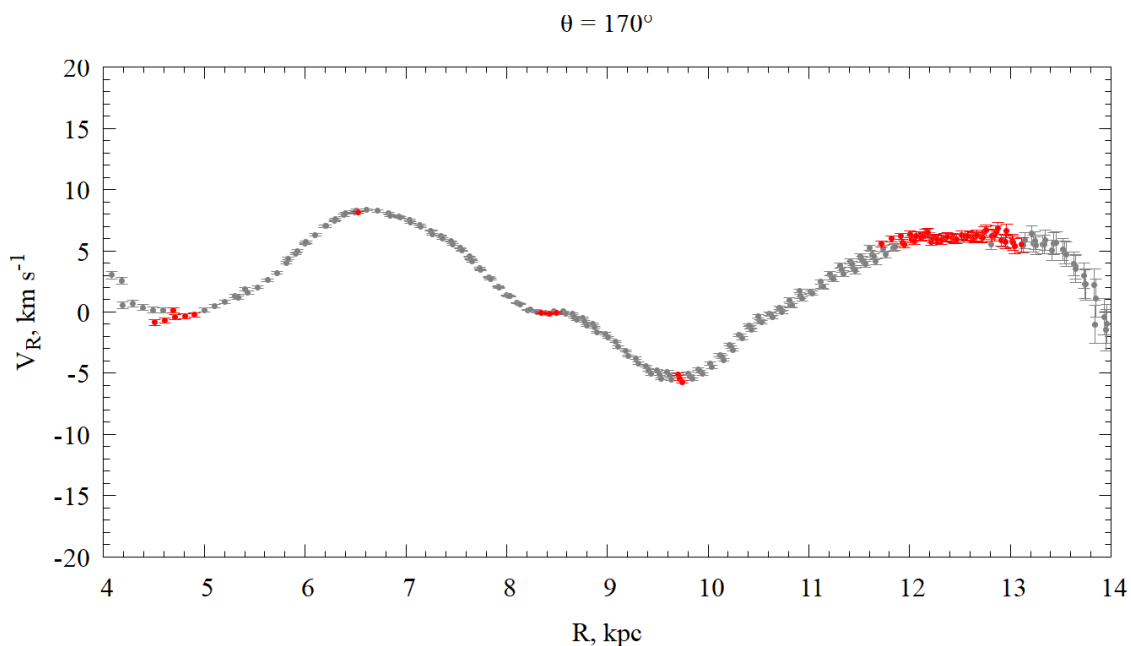


Рис. 3.13. Залежність радіальних швидкостей V_R центроїдів, як функція галактоцентричної відстані R при фіксованому куті $\theta = 170^\circ$. Червоним кольором показано центроїди, для яких виконується умова: параметр M^+_{II} є незначущим.

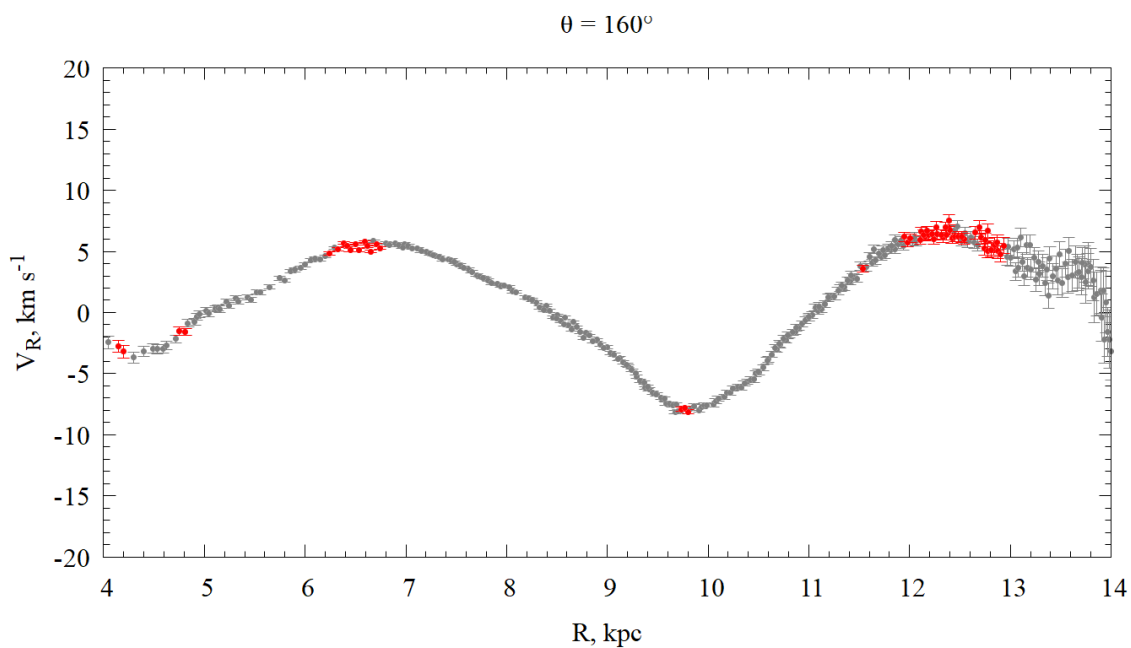


Рис. 3.14. Залежність радіальних швидкостей V_R центроїдів, як функція галактоцентричної відстані R при фіксованому куті $\theta = 160^\circ$. Червоним кольором показано центроїди, для яких виконується умова: параметр M^+_{II} є незначущим.

Вказані вище емпіричні факти дали можливість сформуванню послідовності дій для відбору центроїдів, які надалі використовувались для побудови лінійних залежностей $\ln(R) = k\varphi + b$.

Для формування первинного списку центроїдів, що належать до конкретного рукава, в роботі використовувались такі умови:

1. У сферичній ділянці радіусом 0.5 кпс параметр M_{11}^+ є не значущим.
2. За допомогою методу, описаного вище, в якості першого наближення a_0 використовувались знайдені середні значення галактоцентричних відстаней $R_m = 5.5, 6.8, 8.76, 10.4$ і 12.3 кпк, відповідно для рукавів Щита-Центавра, Стрільця-Кіля, локального рукава Оріона, Персея та рукава Норма-Зовнішній.
3. З аналізу різних робіт [81, 29, 83, 31, 27], у першому наближенні, кут закручення всіх спіральних рукавів i було прийнято рівним -13 градусів.
4. Для кожного спірального рукава значення R були розраховані за формулою:

$$R_i = a_0 \exp((\varphi - \varphi_c) \operatorname{tg} i), \quad (3.24)$$

з використанням наведених вище початкових значень a_0 , кута закручення i та позиційного кута φ_c центроїдів. Для конкретного спірального рукава відбирались центроїди лише тих сферичних областей, галактоцентрична відстань R_C до яких, задовільняє умові $|R_i - R_C| < 300$ пк, де R_i значення, отримане на попередньому кроці визначення R_i .

Далі наводиться баш-скрипт за допомогою якого було реалізовано описаний вище алгоритм:

```
#!/bin/bash

INPUTFILE=$1    #file with kinematics parameters
RESFILE=$2      #name of current spiral arm
Rmax=$3         #limit by geleodistance
Nmin=$4         #limit by count stars for centroid
rM11=$5        #limit by relation M11 to eM11
```

```

dth=$6          #limin by Theta galactocentric (deg)
i=$7           #twist of the spiral arms (deg)
R1=$8         #distance to spiral arms from GC on Sun line (kpc)
dR=$9         #width of the spiral arms (kpc)
sig=${10}     #value for sigma clipping
minTheta=${11} #min theta for model of the arm (rad)
maxTheta=${12} #max theta for model of the arm (rad)
dTheta=${13}  #step theta for model of the arm (rad)
#res_ind_R0.5_2order_gaiadr3_Mabs_4_R8.15.txt
#cut -f 4,5,6,7,37-38, 43/3
#R   Theta   X   Y   M11   eM11   Count
#16.482   172.600   -8.194  2.612 -19.066 30.322 389
#Example:
#./calc_arms_parameters res_ind_R0.5_2order_gaiadr3_Mabs_4_R8.15.txt Local 5 20000 2 30
-13 8.5 0.5 1.5 -1.5 1.5 0.1

cut -f 1-44 $INPUTFILE | awk '{if(FNR==1) print $0 }' > data.txt
cut -f 1-44 $INPUTFILE | awk '{if(FNR>1 && sqrt($37*$37/$38/$38)<'$Rm11' &&
($43>'$Nmin'*3)) && sqrt($6*$6+$7*$7)<'$Rmax' && $5>180-'$dth' && $5<180+'$dth'){print
$0} }' >> data.txt

#i   j     k     R     Theta X     Y     Z     Vr     Vth  Vx     Vy     Vz
     V     var_Vx var_Vy var_Vz var_V  Vx     eVx   Vy     eVy   Vz     eVz   w1
     ew1   w2     ew2   w3     ew3   M23   eM23  M13   eM13  M12   eM12  M11
     eM11  M22   eM22  M33   eM33  OM_count  OM_sig
#69   87     0     11.238 186.014   -3.024 -1.177 0.105  6.917 -223.099   -
30.230 221.093   3.452 225.907   30.154 20.915 14.897 18.501 7.929  0.138  -
223.822   0.135 -3.468 0.135  2.072  0.429 -4.781 0.469 -12.009   0.452 -2.2
58     0.429 -5.955 0.469 10.727 0.452 -0.516 0.696  3.946  0.581 -1.534 0.630 61237
     19.185

awk '{if(FNR==1) { printf("Theta\tlog(R)\t");print $0 } }' data.txt > data_$RESFILE.txt
awk '{th=(180-$5)*3.14159/180;arm_max=
=sin('$i'*3.14159/180.0)/cos('$i'*3.14159/180.0)*th+log('$R1'+'$dR');
arm_min=sin('$i'*3.14159/180.0)/cos('$i'*3.14159/180.0)*th+log('$R1'-'$dR');
if(log($4)>arm_min && log($4)<arm_max) {printf("%.6f\t%.6f\t",th,log($4)); print $0;} }'
data.txt >> data_$RESFILE.txt

wc -l data_$RESFILE.txt

awk '{if(FNR>1) printf("%.6f\t%.6f\n",$1,$2)}' data_$RESFILE.txt > temp.txt

```

```

#echo "sig=$sig"
./mnk_sigmaclipping temp.txt 2 $sig 3 > mnk_$RESFILE.txt
#rm temp.txt

logR=$(cut -f 1 mnk_$RESFILE.txt)
tani=$(cut -f 3 mnk_$RESFILE.txt)
sig_calc=$(cut -f 5 mnk_$RESFILE.txt)

echo "log(R)=$logR tani=$tani sig_calc=$sig_calc"

awk '{if(FNR==1) { printf("Theta\tlog(R)\t");print $0 }}' data.txt > used_data_$RESFILE.txt
awk '{th=(180-$5)*3.14159/180;fun_arm_max=
=$logR+'$tani'*th+'$sig'*'$sig_calc';fun_arm_min=$logR+'$tani'*th-'$sig'*'$sig_calc';
if(log($4)>fun_arm_min && log($4)<fun_arm_max) {printf("%.6f\t%.6f\t",th,log($4)); print
$0;}}' data.txt >> used_data_$RESFILE.txt

N=$(wc -l .txt)
echo "Used $N centroids"

#ln R0          e          tan(i)          e          sig
#2.164465    0.001492    -0.160971    0.006286    0.009262
Cat mnk_$RESFILE.txt | awk 'END
{ i=atan2($3,1.0)*180.0/3.14159;di=$4/(1+$3*$3)*180.0/3.14159;R=exp($1);dR=$2*exp($1);
print R"\t"dR"\t"i"\t"di;}' > parameters_$RESFILE.txt

echo "$RESFILE arm has parameters (R0,e_R0,i,e_i):"
cat parameters_$RESFILE.txt

cat mnk_$RESFILE.txt | awk 'END{ for (th='$minTheta'; th<='$maxTheta';
th+= '$dTheta'){ R=exp($1+$3*th);
x=R*sin(th);y=R*cos(th);
print th"\t"R"\t"x"\t"y; } }' > $RESFILE.txt

```

В подальшому, з метою визначення коефіцієнтів k та b були використані координати R_C і φ_0 центроїдів сферичних областей, що задовольняють перерахованим вище умовам для розв'язання рівнянь (3.22) методом

найменших квадратів з ітеративним виключенням центроїдів за критерієм: ухилення індивідуальної точки від рішення перевищує значення 2σ .

На рис. 3.15 наведено графіки для лінійних залежностей на площині “позиційний кут — логарифм відстані”, побудовані за отриманими даними R та φ відібраних центроїдів.

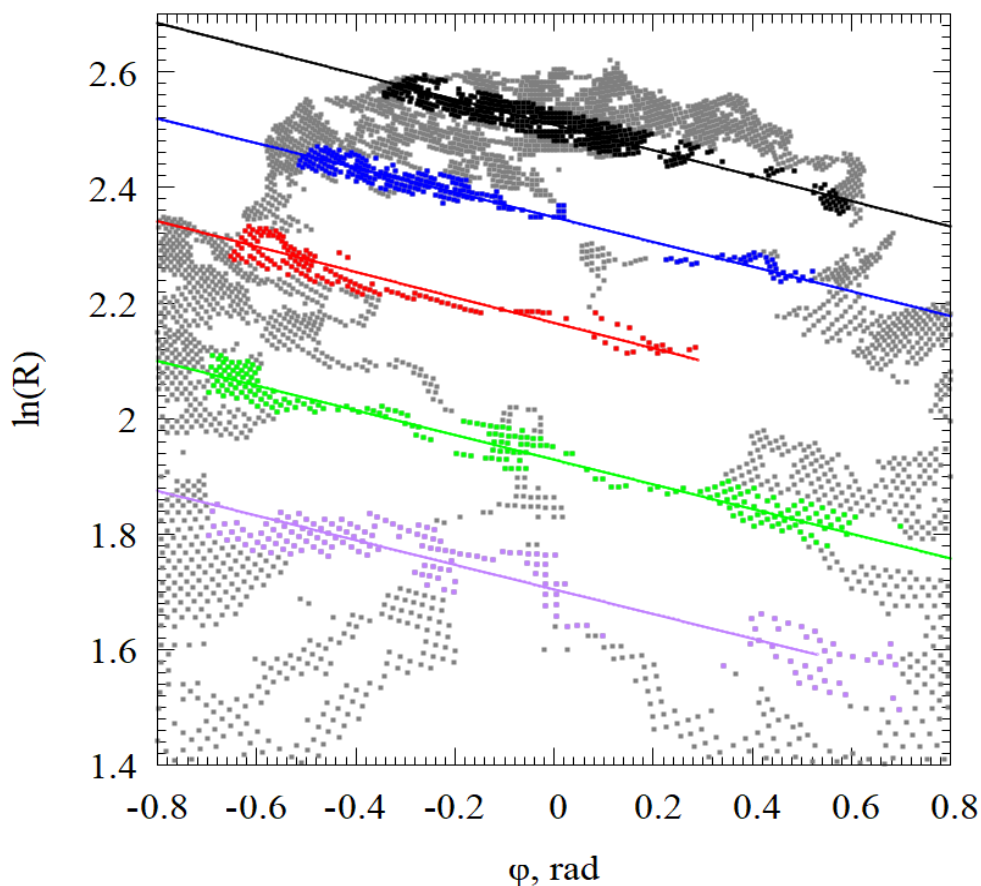


Рис. 3.15. Залежність $\ln(R)$ від позиційного кута φ .

Кольором, на рисунку (3.15) відзначені конкретні залежності відповідно до кожного рукава. Сині точки і лінії - рукав Perseus, зелені крапки та лінія – рукав Sagittarius-Carina, чорні крапки та лінія – рукав Norma-Outer, фіолетові крапки та лінія - рукав Scutum-Centaurus, червоні точки і лінія - рукава Local (Orion або Місцевий). Усі рисунки побудовані відповідно до наведеного вище алгоритму.

3.6 Остаточні результати

Використовуючи знайдені коефіцієнти k та b , остаточно було отримано параметри спіральних рукавів:

$$i = \arctg k, \quad (3.25)$$

$$a_0 = e^b, \quad (3.26)$$

а також їх невизначеності, що наведені в таблиці (3.1) та на рис. (3.15).

Табл. 3.1.

**Параметри спіральних рукавів, що були отримані в роботі.
I – рукав Scutum-Centaurus, II - рукав Sagittarius-Carina, III – рукав Perseus, IV - Norma-Outer, Local – Місцевий рукав (Оріона), N – число використаних центроїдів**

	I	II	Local	III	IV
i	-12.04 ± 0.34	-12.07 ± 0.17	-12.43 ± 0.32	-12.07 ± 0.18	-12.43 ± 0.18
a_0	5.493 ± 0.014	6.878 ± 0.010	8.719 ± 0.022	10.470 ± 0.012	12.289 ± 0.009
N	151	202	122	215	371

Як виявилось, виведені параметри спіральних рукавів, на рівні точності їх визначення, добре узгоджуються з параметрами, наведеними в інших дослідженнях, що використовують різні трасери та різні методи. В таблиці (3.2) наводяться параметри кута закручення i та галактоцентрична відстань до спіральних рукавів a_0 , за напрямком центр Галактики - Сонце, із таких робіт: (1) - Bobylev & Vajkova (2014)[71], (2) - Reid et al. (2019)[29], (3) - Veselova & Nikiforov (2020)[83], (4) - Hou (2021)[31], (5) - Xu et al.(2018)[79].

Табл. 3.2.

Параметри спіральних рукавів, що були отримані в інших роботах
 I – рукав Scutum-Centaurus, II - рукав Sagittarius-Carina, III – рукав Perseus, IV - Norma-Outer, Local – Місцевий рукав (Orion), N – число використаних центроїдів

	I	II	Local	III	IV	Ref
i	-11.2 ± 4.0	-9.3 ± 2.2	-10.2 ± 0.3	-14.8 ± 0.8	-11.5 ± 1.9	1
	-13.1 ± 2.0	-9.0 ± 1.9	-11.4 ± 1.9	-9.5 ± 2.0	-6.2 ± 4.2	2
	-11.7 ± 0.9	-13.1 ± 1.4	-9.9 ± 1.2	-6.2 ± 1.6	-5.2 ± 2.8	3
	-8	-13.8	-8.5	-11.9		4
	-18.7 ± 0.8	-13.5 ± 0.5	-11.5 ± 0.5	-9.0 ± 0.1		5
a_0	4.5 ± 0.2	6.8 ± 0.3	8.1 ± 0.3	9.9 ± 0.4	13.5 ± 0.5	1
	4.9 ± 0.1	6.0 ± 0.1	8.3 ± 0.1	8.9 ± 0.1	12.2 ± 0.4	2
	6.07 ± 0.04	6.78 ± 0.05	8.19 ± 0.05	9.74 ± 0.09	12.02 ± 0.17	3
	6.5	6.9	8.5	9.6		4
	5.9 ± 0.1	7.2 ± 0.1	8.3 ± 0.1	10.6 ± 0.1		5

Нижче наведено графіки логарифмічних спіралей, побудовані в галактичній площині за даними таблиці 3.1 Кольором (як і раніше) позначені конкретні залежності. Фіолетовий колір відповідає рукаву Scutum-Centaurus, зелений – Sagittarius-Carina, червоний – Local, синій – Perseus, рукав Norma-Outer – чорний. Усі рисунки побудовані відповідно до наведеного вище алгоритму.

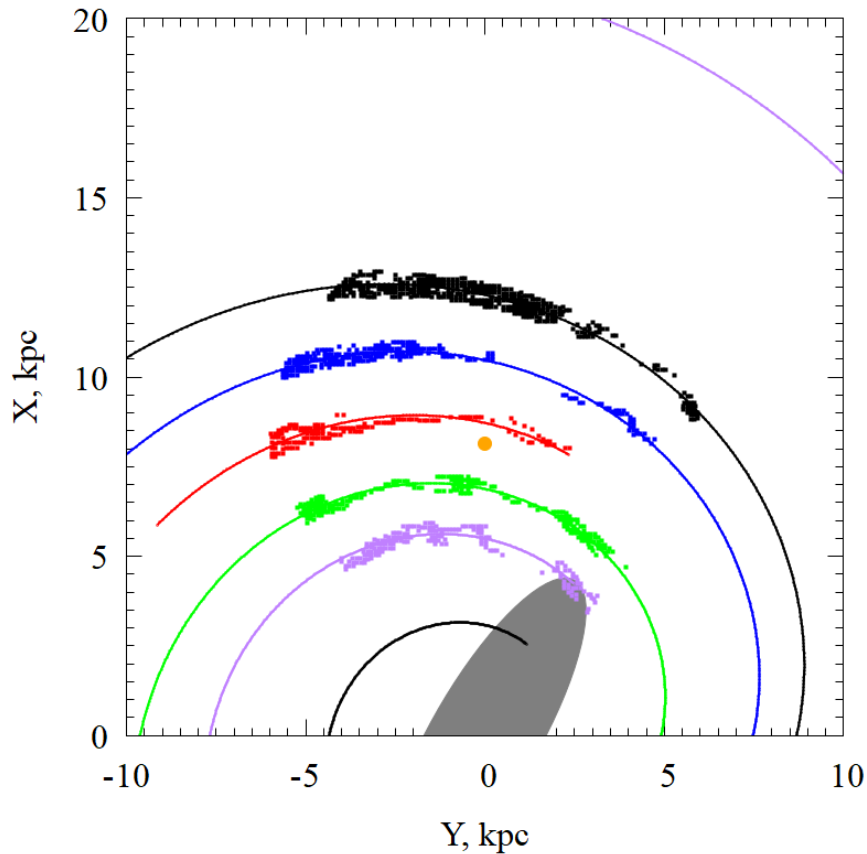


Рис. 3.16. Логарифмічні спіралі, побудовані в галактичній площині за даними таблиці 3.1

На рисунку (3.17) у прямокутній галактоцентричній системі координат зображено чотири основні спіральні рукави Чумацького Шляху. Вони побудовані за визначеними в роботі параметрами шляхом екстраполяції за межі наявних даних і схематично представляють спіральний візерунок нашої галактики. Також на рис. 3.17 за даними, отриманими у роботі [30] і де велика та мала осі бару були визначені як 5 і 1,5 кпк [84, 50] відповідно, а нахил великої осі бару до осі X координатної системи становить кут приблизно 30° , схематично у вигляді еліпса зображено бар.

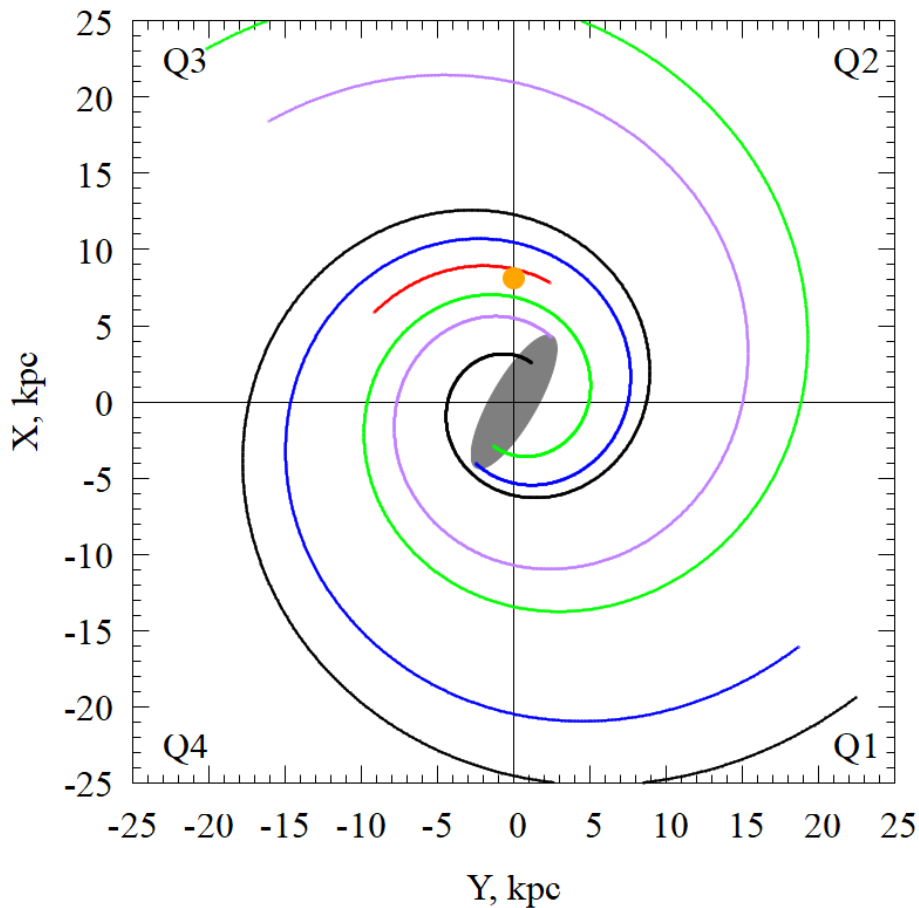


Рис. 3.17. Схематичне зображення спірального візерунка Чумацького Шляху в прямокутній галактоцентричній системі координат. Синя крива (–) відповідає рукаву Perseus, зелена крива (–) – рукаву Sagittarius-Carina, чорна крива (–) - Norma-Outer рукав, фіолетова крива (–) – рукав Scutum-Centaurus, червона крива (–) - Місцевий рукав. Жовта точка показує положення Сонця. Сірий еліпс показує відтворену галактичну смугу за даними Wegg et al. (2015) [30].

Слід зазначити, що на відміну від інших робіт, ми не використовували поняття “kink” («вигин») в спіральних рукавах, введене Рейдом у 2019 році [29], а вважали, що будь-який рукав може бути охарактеризований одним значенням кута закрутки. Також слід зазначити, що ми не мали можливості визначити ширину спіральних рукавів у цій роботі. Однак, якщо згадати, що використані трасери спіральних рукавів були максимально рознесені по галактоцентричній відстані на 600 пс, то її можна розглядати як нижню оцінку їхньої ширини.

Як можна побачити з представленого рисунка, спіральні рукави перетинаються з великою віссю бару в чотирьох точках. Точки перетину рукавів Norma-Outer та Scutum-Centaurus з великою віссю бару розташовані у другому галактоцентричному квадранті Q2 та мають приблизні координати $x_N = 2.5$, $y_N = 1.0$ кпс; $x_{Sc} = 4.0$, $y_{Sc} = 2.5$ кпс відповідно.

Рукав Norma-Outer починається у вказаній точці і продовжується в Q3 і Q4 квадранти, проходячи проти годинникової стрілки, в квадрант Q1. Рукав Scutum-Centaurus бере початок приблизно поблизу точки $x_{Sc} = 4.0$, $y_{Sc} = 2.5$ кпс в Q2 квадранті і закручується проти годинникової стрілки Q3 квадрант і потім простягається в Q1 квадрант.

Рукави Sagittarius-Carina і Perseus починаються поблизу далекого кінця бару і мають приблизні координати $x_S = -3.0$, $y_S = -1.5$ кпс; $x_P = -4.0$, $y_P = -2.5$ кпс відповідно. Рукав Sagittarius-Carina із квадранта Q4 проходить проти годинникової стрілки через квадранти Q1, Q2 та Q3. Рукав Perseus починається Q4, проходить через Q1, Q2, і Q3 розкручується далі проти годинникової стрілки.

Описана вище поведінка спіральних рукавів практично збігається з описами їхньої поведінки, наведеними у різних роботах, на які ми посилаємось.

3.7 Тестування кінематичного методу

У дисертаційній роботі запропоновано метод, що базується на кінематиці зоряних полів у сферичних областях Галактики розміром 0.5 кпс. На відміну від інших робіт, де використовуються тільки молоді об'єкти, в цих сферичних областях містяться зорі різного спектрального складу, а не тільки молоді об'єкти типу цефеїд, О-В зорь, мазерів, областей НІІ і тому подібних.

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. Тому виконане порівняння оцінок спіральних рукавів, з аналогічними оцінками з інших робіт, що отримані різними методами та з використанням різних трасерів і їх узгодження між собою, видається зовсім не випадковим.

Іншим аргументом на користь працездатності запропонованого методу можна вважати роботу Педро Полисио [85], де він дійшов висновку, що спіральні рукави характеризуються низькими значеннями радіальної дії J_R (карта J_R показує області з низькою радіальною дією в тих містах галактичної площини, що відповідають спіральним рукавам). Крім того, автор цієї статті надав зроблений ним рисунок, де показав, як узгоджуються його результати з аналогічними результатами, визначеними в інших роботах, включаючи роботу 2023-го року Денищенко [86].

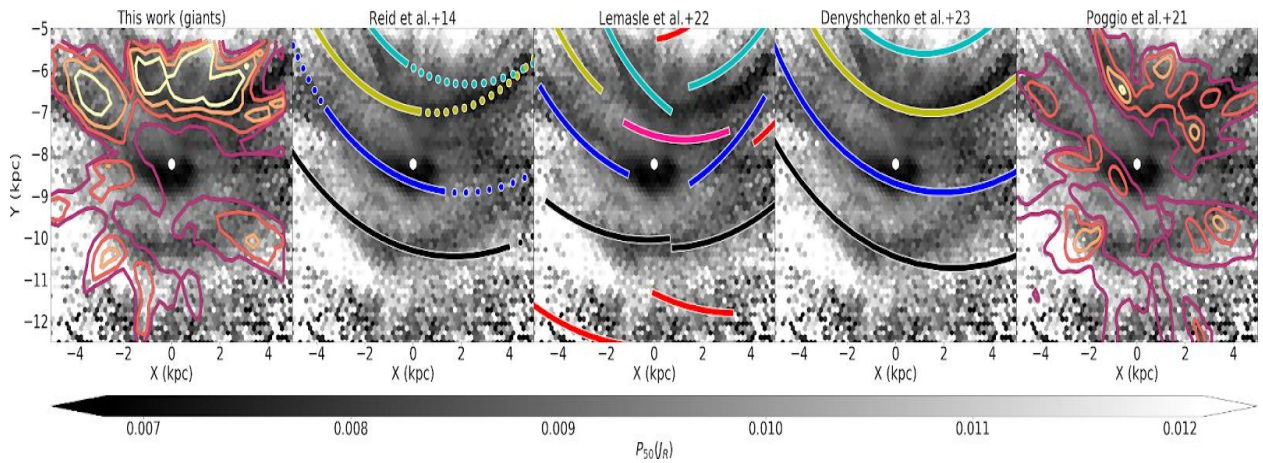


Рис. 3.18. Порівняння карт $P_{50}(J_R)$ зі спіральними рукавами із роботи [85]

Узгодженість результатів, отриманих незалежно традиційним (молоді об'єкти) динамічним (J_R) та кінематичним (M_{11}^+) методами свідчать про надійність запропонованого методу.

Ще один тест кінематичного методу було зроблено за допомогою модельних даних. Основне припущення, що центроїди сферичних регіонів, в яких $\partial V_R / \partial R = M_{11}^+ \approx 0$, можна використовувати як трасери спіральної структури, було перевірено на модельних даних каталога, представленого в роботі Grand та ін. в 2018 році [87].

Для цього з модельного каталогу Au 6, що доступний за посиланням (<https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/auriga/gaiamock.html>), та є близьким аналогом Чумацького Шляху за зоряною масою, швидкістю зореутворення, та морфологією, були відібрані зорі з індексом «true». Нахил великої осі бару до осі X координатної системи в макетному каталозі становить кут 30 градусів. Після проведеного відбору унікальних об'єктів залишилося 6 037 247 зорь. З них було відібрано 79 527 зорь, вік яких, менше 1 мільярда років.

Головна ідея тесту — це співставлення морфологічних особливостей макетної Галактики із координатами центроїдів її сферичних областей, для яких виконується умова $\partial V_R / \partial R = M_{11}^+ \approx 0$.

Перш за все було отримано зоряну поверхневу густину для створеної вибірки. Розподіл поверхневої густини відібраних молодих зірок з індексом «true» показано на рисунку (3.20). Як і очікувалось, на рис. (3.20) добре проглядається певна структура, що нагадує спіральний візерунок.

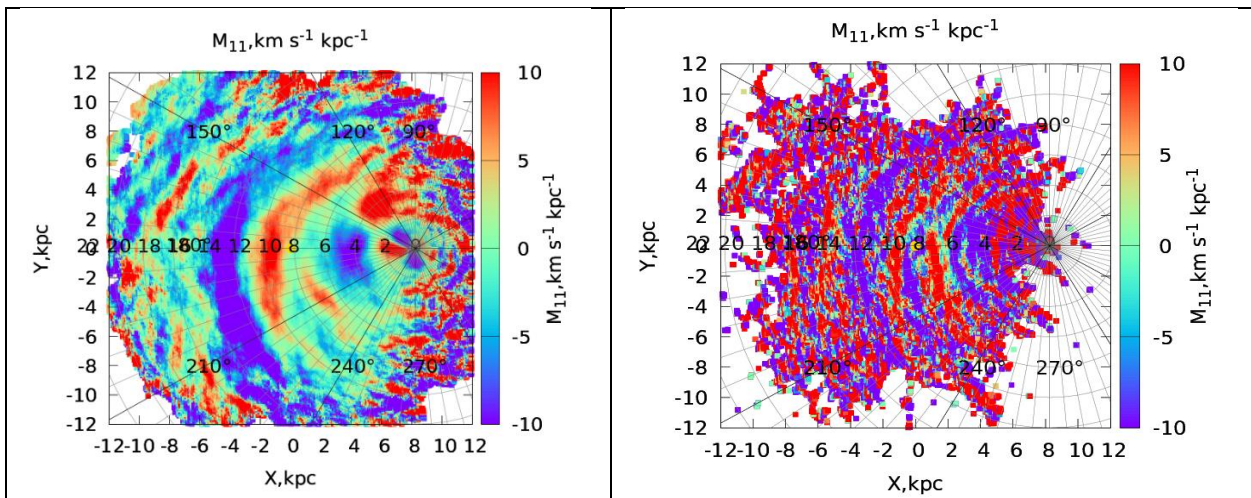


Рис. 3.19. Ліворуч - Розподіл параметра M_{11}^+ , що визначений у сфері радіусом 0,5 кпс для всіх 6 млн. об'єктів з індексом “true” (реально використовувалося 891 595 об'єктів з діапазонів $-15 \text{ кпс} < X < 15 \text{ кпс}$, $-15 \text{ кпс} < Y < 15 \text{ кпс}$ і $-0.5 \text{ кпс} < Z < 0.5 \text{ кпс}$). Праворуч - Розподіл параметра M_{11}^+ , що визначений у сфері радіусом 1,0 кпс (використовувалося 2208835 об'єктів з діапазонів $-15 \text{ кпс} < X < 15 \text{ кпс}$, $-15 \text{ кпс} < Y < 15 \text{ кпс}$ і $-1 \text{ кпс} < Z < 1 \text{ кпс}$)

На другому етапі було виконано кінематичний аналіз макетних зорь в сферичних областях з радіусом 0,5 кпк. На жаль, у випадку використання сферичних областей радіусом 0,5 кпк, кількість об'єктів, що потрапляє до сферичної області, у них виявилася недостатньою для достовірного визначення кінематичних параметрів моделі О-М. Тому радіус сфер було розширено до 1 кпк. Таким чином, фінально, були визначені параметри моделі Огороднікова-Мілна за всіма унікальними зорями з індексом “true”, що

містилися в сферичних областях радіусом 1 кпк. Використовуючи запропонований в дисертаційній роботі метод, було відібрано центроїди з незначущим параметром M_{11}^+ . Розподіл параметра M_{11}^+ , отриманий за цими даними, представлено на рисунку 3.19.

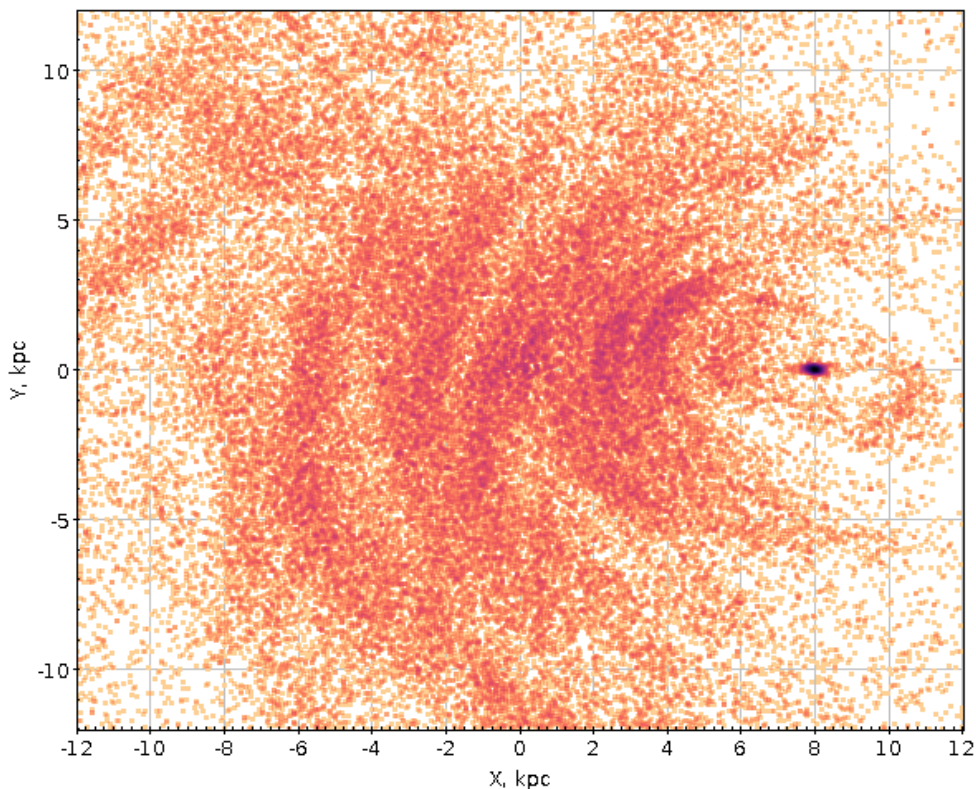


Рис. 3.20. Розподіл поверхневої густини для молодих зірок (вік $< 10^9$ років) з макетного каталогу з використанням тільки «true» даних - 79 527 об'єктів.

Після цього, на карту поверхневої густини зорь модельного каталога (див. рис. 3.20), були нанесені положення відібраних центроїдів з незначущим параметром M_{11}^+ , що визначений у сфері радіусом 0,5 кпс для всіх 6 млн. об'єктів з індексом “true” (див. рис. 3.21). З наведеного рисунка (3.21) добре видно, що існує певна кореляція між координатами центроїдів сферичних областей з незначущим параметром M_{11}^+ та областями підвищеної густини на великих галактоцентричних відстанях.

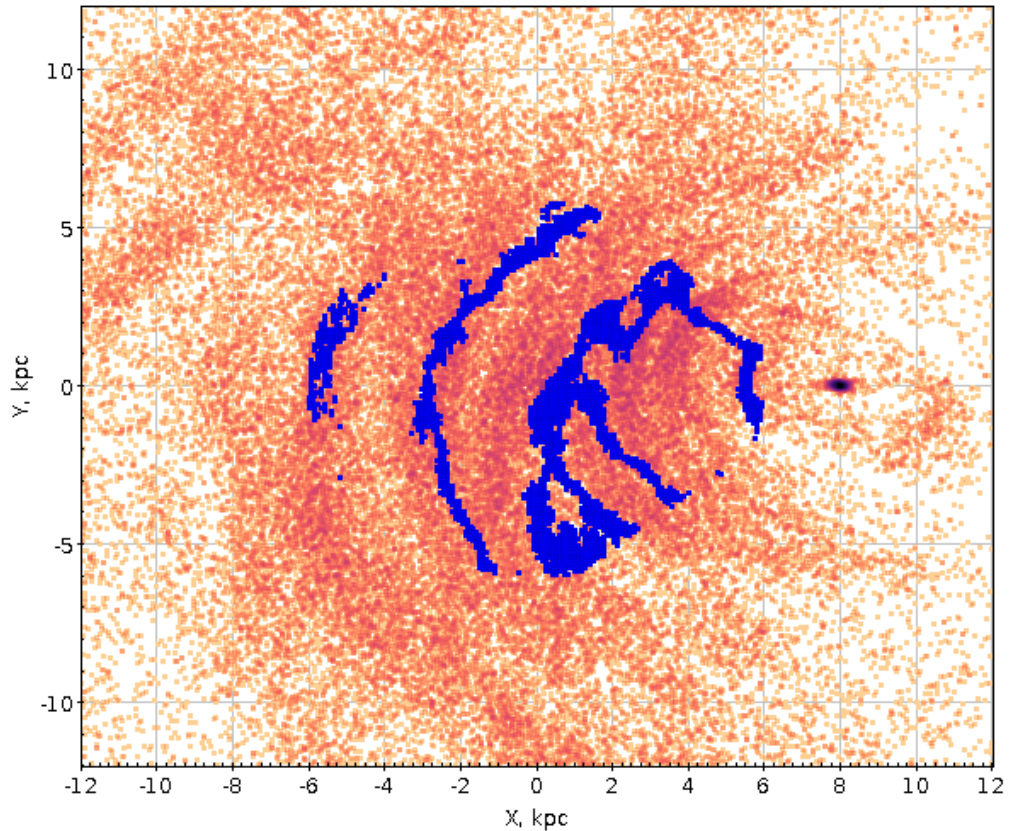


Рис. 3.21. Розподіл в галактичній площині зоряної поверхневої густини з нанесеними координатами центроїдів сферичних областей з незначущим параметром M_{11}^+

Хоча, використання великого радіуса сфери ($r = 1,0$ кпк) для аналізу швидкостей зірок не дозволяє розділити сусідні спіралі, розташовані ближче до центру Галактики, співпадіння координат віддалених спіралей макетної Галактики із координатами центроїдів тих сферичних областей, для яких виконується умова $\partial V_R / \partial R = M_{11}^+ \approx 0$, є очевидним.

Приведені тести переконливо демонструють, що центроїди сферичних областей з $\partial V_R / \partial R = M_{11}^+ \approx 0$ дійсно трасують спіральні рукави не тільки в спостережних даних (GaiaDR3), але і в системах, що моделюються (Auriga).

Висновки до розділу

Параметри спіральної структури, отримані в цій роботі, свідчать про їхню хорошу узгодженість з результатами, отриманими іншими авторами за різними показниками спіральної структури та різними підходами до їх вирішення. Непряме підтвердження наших результатів можна знайти в роботі Palicio et al. (2023) 96, де карта J_R показує області низької радіальної дії, що відповідають спіральним рукавам, про які йдеться в інших роботах. Використання в даній дисертації статистично незначущих кінематичних параметрів M_{11}^+ для вибору центроїдів, положення яких розглядаються як кінематичні трасери спіральних рукавів, виявилось досить надійним методом. Підкреслимо, що хоча кількість центроїдів, які використовуються для визначення параметрів спіралі, становить кілька сотень, кількість зірок у сферичних областях досягає сотень тисяч. Це дозволяє нам визначати кінематичні параметри, а також положення центроїдів з високою точністю, що позбавляє нас від довільності при виборі трасерів для фіксації конкретних рукавів спіралей. Запропонований підхід дозволив знайти стабільні структури в Галактиці, зокрема виявити спіральні рукави та визначити їх параметри.

Крім того, використаний метод дає можливість отримати інформацію не тільки про спіральні рукави, а й деяку додаткову інформація. Наприклад, рисунки (3.8) і (3.9) показують, що стійкі структури (M_{11}^+ - незначущий) існують не тільки у вигляді спіралей, але також у вигляді деяких утворень, що простягаються в просторі між ними. Інтерпретація цих фактів потребує подальшого ретельного вивчення, яке виходить за рамки цієї статті.

ВИСНОВКИ

Із аналізу проблематики досліджень спіральної структури можна зробити висновок - достовірне уявлення структури галактики Чумацький Шлях, головним чином, базується на відборі великої кількості трасерів (індикаторів) з надійно вимірними положеннями та відстанями до них.

В межах дисертаційної роботи, на основі даних *Gaia* DR3, було отримано ряд важливих результатів, для розуміння кінематичних особливостей структури нашої Галактики.

З використанням моделі Огороднікова-Мілна, було проведено просторовий кінематичний аналіз Галактики, який стосується частини галактичної площини в діапазонах галактоцентричних координат $140^\circ < \theta < 220^\circ$ і $4 \text{ кпк} < R < 14 \text{ кпк}$. Це стало можливим завдяки даним із каталога *Gaia* DR3, що надав повне 5-параметричне астрометричне рішення та радіальні швидкості для більш ніж 33 мільйонів об'єктів і, відповідно, створив умови для формування широкої вибірки зорь високої світності з абсолютною зоряною величиною $M_G < 4$ (~19.3 млн.), що дозволяє використовувати їх на великих відстанях від Сонця.

На базі знань, про зв'язок параметрів кінематичної моделі Огороднікова-Мілна з фізичними процесами в досліджуваних зоряних системах, в дисертаційній роботі було запропоновано новий тип трасерів спіральних рукавів - кінематичні трасери. Такі трасери представляють собою центроїди сферичних областей з радіусом 0.5 кпс, або в діапазоні від 0,5 до 1 кпк, кінематичні параметри M_{11}^+ яких, є незначущими, тобто не перевищує подвоєного значення похибки його визначення (близьким до нуля).

За результатами дисертаційної роботи вперше:

1. Обґрунтовано і запропоновано використання компонент тензора швидкості деформації для вивчення спіральної структури Галактики.
2. В галактичній площині в діапазоні галактоцентричних координат $140^\circ < \theta < 220^\circ$ і $4 \text{ кпк} < R < 14 \text{ кпк}$ побудовано карту розподілу центроїдів сферичних областей для яких кінематичні параметри M^+_{11} є незначущими та які отримали назву “кінематичні трасери”.
3. 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 $\ln R = k\varphi + b$.
4. Отримано оцінки параметрів спіральних рукавів Галактики з використанням запропонованого методу. Отримані оцінки параметрів показують добру узгодженість з результатами, отриманими іншими авторами. 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 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 $\partial V_R / \partial R = M^+_{11} \approx 0$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sellwood J. A., Masters K. L. Spirals in Galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2022. Vol. 60. P. 73-120.
2. Herschel W. On the construction of the heavens. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1785. Vol. 213. P. 213-266.
3. Kapteyn J. C. First Attempt at a Theory of the Arrangement and Motion of the Sidereal System. *The Astrophysical Journal*. 1922. Vol. 55, P. 302.
4. Oort J. H. Observational evidence confirming Linblad's hypothesis of a rotation of the galactic system. *Bulletin of the astronomical institutes of the Netherlands*. 1927. Vol. 3, P. 275.
5. Lindblad B. Cosmogonic consequences of a theory of the stellar system. *Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik*. 1926. Vol. 19A, P. 21.
6. Lindblad B. Star-streaming and the structure of the stellar system (Second paper). *Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik*. 1926. Vol. 19B, P. 7.
7. Lindblad B. Cosmogonic consequences of a theory of the stellar system. *Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik*. 1926. Vol. 19A, P. 35.
8. Osterbrock D. E. Walter Baade's Discovery of the Two Stellar Populations. *International Astronomical Union Symposium*. 1994. No 164. P. 21.
9. Morgan W. W., Sharpless S., Osterbrock, D. Some features of galactic structure in the neighborhood of the Sun. *Astronomical Journal*. 1952. Vol. 57, P. 3.
10. Андрієвський С. М., Кузьменков С. Г., Захожай В. А., Климишин І.А. Загальна астрономія: підручник. Харків, 2019. С. 524.
11. Захожай В. А. Физика звезд и межзвездной среды. Кинематика и физика небесных тел. 2005. Т. 21, № 6. С. 414.
12. Ciambur B. C., Graham A. W., Bland-Hawthorn J. Quantifying the (X/peanut)-shaped structure of the Milky Way – new constraints on the bar geometry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2017. Vol. 471, No 4. P. 3988.

13. Oort J. H., Kerr F. J., Westerhout G. The galactic system as a spiral nebula. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1958. Vol. 118, P. 379.
14. Dame T. M., Hartmann D., Thaddeus P. Longitude-velocity map of the Milky Way Galaxy. *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics*. 2001. Vol. 547.
15. Binney J., Tremaine S. Galactic Dynamics: Second Edition. *Princeton University Press*. 2008.
16. Dame, T. M., Thaddeus P. A Molecular Spiral Arm in the Far Outer Galaxy. *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics*. 2011. Vol. 734, L. 24.
17. Anderson L. D., Bania T. M., Balser D. S., Rood R. T. The Green Bank Telescope Galactic H II Region Discovery Survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2011. Vol. 194, P. 32.
18. Georgelin Y. M., Georgelin Y. P. The spiral structure of our Galaxy determined from H II regions. *Astronomy and Astrophysics*. 1976. Vol. 49, P. 57.
19. Becker W., Fenkart R. B. Galactic Clusters and H II Regions. *The Spiral Structure of our Galaxy*. 1970. Vol. 38, P. 205.
20. Humphreys R. M. The space distribution and kinematics of supergiants. *The Astrophysical Journal*. 1970. Vol. 75, P. 602.
21. Lee T. A. Photometry of high-luminosity M-type stars. *The Astrophysical Journal*, 1970. Vol. 162, P. 217.
22. Becker W., Fenkart R. B. The Spiral Structure of Our Galaxy, eds. W. Becker, & G. I. Kontopoulos, *The Spiral Structure of our Galaxy*. 1970. No 38. P. 205.
23. Dias W.S., Lepine J. R. D. Direct Determination of the Spiral Pattern Rotation Speed of the Galaxy. *The Astrophysical Journal*. 2005. Vol. 629, P. 825.
24. Dias W. S., Monteiro H., Lépine J. R. D., Barros D. A. The spiral pattern rotation speed of the Galaxy and the corotation radius with *Gaia* DR2.

- Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2019. Vol. 486, P. 5726.
25. Lindegren L., Hern´andez J., Bombrun A., Klioner S., Bastian U., Ramos-Lerate M., de Torres A., Steidelmüller H., Stephenson C., Hobbs D. Gaia Data Release 2 the astrometric solution. *Astronomy and Astrophysics*. 2018. Vol. 616, No 2.
 26. Poggio E., Drimme, R., Cantat-Gaudin T. Galactic spiral structure revealed by Gaia EDR3. *Astronomy and Astrophysics*. 2021. Vol. 651, No 104.
 27. Hao C. J., Xu Y., Hou L. G., Bian S. B., Li J. J., Wu Z. Y., He Z. H., Li Y. J., Liu D. J. Liu. Evolution of the local spiral structure of the Milky Way revealed by open clusters. *Astronomy and Astrophysics*. 2021. Vol. 652, No 102. P. 9.
 28. Russeil D. Star-forming complexes and the spiral structure of our Galaxy. *Astronomy and Astrophysics*. 2003. Vol. 397, P. 133.
 29. Reid M. J., Menten K. M., Brunthaler A., Zheng X. W., Dame T. M., Xu Y., Li J., Sakai N., Wu Y., Immer K.. Trigonometric Parallaxes of High-mass Star-forming Regions: Our View of the Milky Way. *The Astrophysical Journal*. 2019. Vol 885, No 2. P. 13.
 30. Wegg C., Gerhard O., Portail M. The spiral structure of the Milky Way. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2015. Vol. 450, P. 4050.
 31. Hou L. G. The Spiral Structure in the Solar Neighborhood. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2021. Vol. 8, P. 103.
 32. Oort J. H. On the problem of the origin of spiral structure. *Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft*. 1964. Vol. 32, P. 15
 33. Kormendy J., Norman C.A. Observational constraints on driving mechanisms for spiral density waves. *The Astrophysical Journal*. 1979. Vol. 233, P. 539.
 34. Воронцов-Вельямінов Б. А. Астрономія: підручник. Вид. Просвещение. 1964. С. 148.
 35. Lépine J. R. D. *The spiral structure of the Galaxy revealed by CS sources and*

- evidence for the 4:1 resonance. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2011. Vol. 414, No 2. P. 1607–1616.
36. McClure-Griffiths N. M., Dickey J. M., Gaensler B. M., Green A. J. A Distant Extended Spiral Arm in the Fourth Quadrant of the Milky Way. *The Astrophysical Journal*. 2004. Vol. 607, No 2. P. L127.
37. Dame T. M., Hartmann, D., Thaddeus P. The Milky Way in molecular clouds: A new complete CO survey. *The Astrophysical Journal*. 2001. Vol. 547, No 2. P. 792–813.
38. Benjamin R. A. First GLIMPSE results on the stellar structure of the Galaxy. *The Astrophysical Journal*. 2005. Vol. 630, No 2. P. L149-L152.
39. Urquhart J. S., C. Figura C., Moore T. J. T., Hoare M. G., Lumsden S. L., Mottram J. C., Thompson M. A., Oudmaijer R. D. Massive stars mark out Milky Way's 'missing' arms. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Vol. 437, No 2. P. 1791–1807.
40. Westerholm R. Milky Way Galaxy has four arms, reaffirming old data and contradicting recent research. *University Herald*. 2013.
41. Bobylev V. V. Estimation of the Parameters of the Spiral Pattern in the Galaxy Based on a Sample of Classical Cepheids. *Astronomy Letters*. 2022. Vol. 48, P. 126-137.
42. Dobbs C., Baba J. Dawes Review 4: Spiral Structures in Disc Galaxies. *Publications of the Astronomical Society of Australia*. 2014. Vol. 31, P. 40.
43. Lin C. C., Shu F. H. On the Spiral Structure of Disk Galaxies. *The Astrophysical Journal*. 1964. Vol. 140, P. 646.
44. Toomre A. Structure and Evolution of Normal Galaxies. *Cambridge University Press*. 1981. P. 111–136.
45. Hernquist L. An Analytical Model for Spherical Galaxies and Bulges. *The Astrophysical Journal*. 1990. Vol. 356, P. 359.
46. Antoja T., Helmi A., Romero-Gómez M., Katz D., Babusiaux C., Drimmel R., Evans D. W., Figueras F., Poggio E., Reylé C., Robin A. C., Seabroke G.,

- Soubiran C. A dynamically young and perturbed Milky Way disk. *Nature*. 2018. Vol. 561, P. 360-362.
47. Blaauw A., Gum C. S., Pawsey J. L., Westerhout G. The New I.A.U. System of Galactic Coordinates. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1960. Vol 121, No 2. P. 123–131.
48. Shen, J., Zheng, X. W. The bar and spiral arms in the Milky Way: structure and kinematics. *Astronomy and Astrophysics*. 2020. Vol. 20, P. 159.
49. Rattenbury N. J., Mao S., Sumi T., Smith M. C. Modelling the Galactic bar using OGLE-II red clump giant stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2007. Vol. 378, P. 1064.
50. Cao L., Mao S., Nataf D., Rattenbury N. J., Gould A. A new photometric model of the Galactic bar using red clump giants. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2013. Vol. 434, No 1. P. 595.
51. Uppal N., Ganes S., Schultheis M. The Outer spiral arm of the Milky Way using red clump stars. *Astronomy and Astrophysics*. 2023. **Vol.** 673, No 99. P. 10.
52. Drimmel R., Spergel D. N. Three Dimensional Structure of the Milky Way Disk. *The Astrophysical Journal*. 2001. Vol. 556, No 181.
53. Churchwell E. The Spitzer/GLIMPSE Surveys: A New View of the Milky Way. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2009. Vol. 121, No 877, P. 213.
54. Hou L. G., Han J. L., Shi W. B. The spiral structure of our Milky Way Galaxy. *Astronomy and Astrophysics*. 2009. Vol. 499, P. 473.
55. Shu F., Frank H. Six Decades of Spiral Density Wave Theory. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2016. Vol. 54, P. 667.
56. Klioner S. A., Lindegren L., Mignard F., Hern´andez J., Ramos-Lerate M., Bastian U., Biermann M., Bombrun A., de Torres A., Gerlach E. Gaia Early Data Release 3: The celestial reference frame (Gaia-CRF3). *Astronomy and Astrophysics*. 2022. Vol. 667, No. 148.

57. Klioner S. A., Lindegren L., Mignard F., Hern'andez J., Ramos-Lerate M., Bastian U., Biermann M., Bombrun A., de Torres A., Gerlach E. Gaia Early Data Release 3: The astrometric solution. *Astronomy and Astrophysics*. 2021. Vol. 649, No 2.
58. Mignard F., Klioner S. A., Lindegren L., Hern'andez J., Bastian U., Bombrun A., Hobbs D., Lammers U., Michalik D., RamosLerate M. Gaia Data Release 2. The celestial reference frame (Gaia-CRF2). *Astronomy and Astrophysics*. 2018. Vol. 616, No 14.
59. Mignard F., Klioner S. A., Lindegren L., Mignard F., Hern'andez J., Ramos-Lerate M., Bastian U., Biermann M., Bombrun A., A. de Torres. Gaia Early Data Release 3: The celestial reference frame (Gaia-CRF3). *Astronomy and Astrophysics*. 2022. Vol. 667, No 148.
60. Perryman M. A. C., Lindegren L., Kovalevsky J., Hoeg E., Bastian U., Bernacca P. L., Crézé M., Donati F., Grenon M., Grewing M. The HIPPARCOS Catalogue. *Astronomy and Astrophysics*. 1997. Vol. 323, P. L49.
61. К. Ф. Огородников. О динамике звездных движений в галактической системе на основе теории потоков. *Астрономический журнал*. 1932. Vol. 4. P. 180
62. E. A. Milne. Stellar Kinematics and the K-Effect. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1935. Vol. 95. P.560.
63. Тарапов И.Е. Механика сплошной среды. В трех частях. Часть 2. Общие законы кинематики и динамики. *Золотые страницы*. 2002. P.515
64. B. Du Mont. A Three-dimensional Analysis of the Kinematics of 512 FK4/FK4 Sup Stars. *Astronomy and Astrophysics*. 1977. Vol. 61. P.127
65. А.И. Яценко. Определение кинематических параметров Галактики по данным каталога ФОНАК. *Кинематика и физика небесных тел*. 2001. Vol.17. P. 166
66. P. N. Fedorov, V. S. Akhmetov, A. B. Velichko, A. M. Dmytrenko, S. I.

- Denyshchenko. Kinematics of the Milky Way from the Gaia EDR3 red giants and subgiants. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2021. Vol. 508. P. 3055
67. K. F. Ogorodniko. Dynamics of Stellar Systems. *Pergamon Press*. 1965. Vol. 359
68. Gaia Collaboration: A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H.J. de Bruijne, F. Mignard, R. Drimmel, C. Babusiaux, C. A. L. Bailer-Jones, U. Bastian, M. Biermann et al. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties. *Astronomy and Astrophysics*. 2016. Vol. 595, A2.
69. Xu Y., et al. On the nature of the Local spiral arm of the Milky Way. *The Astrophysical Journal*. 2013. Vol. 769. P.15.
70. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, 2016. Kinematic analysis of solar neighborhood stars based on RAVE4 data. *Astronomy Letters*, 42, 90
71. Bobylev V. V., Bajkova A. T. The Milky Way spiral structure parameters from data on masers and selected open clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2014. Vol. 437. P. 154.
72. P. N. Fedorov, V. S. Akhmetov, A. B. Velichko, A. M. Dmytrenko, S. I. Denyshchenko. Mapping the kinematic parameters of the Galaxy from the Gaia EDR3 red giants and sub-giants. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2021. Vol. 518. P. 2761
73. A. M. Dmytrenko, P. N. Fedorov, V. S. Akhmetov, A. B. Velichko and S. I. Denyshchenko. The vertex coordinates of the Galaxy's stellar systems according to the Gaia DR3 catalogue. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2023. Vol. 521. P. 424.
74. Riello M., et al. Gaia Early Data Release 3. *Astronomy and Astrophysics*. 2021. Vol. 649. A3.
75. L. Lindegren, U. Bastian, M. Biermann, A. Bombrun, A. de Torres, E. Gerlach, R. Geyer, J. Hern´andez, T. Hilger, D. Hobbs et al. Gaia 146 Early Data

- Release 3. Parallax bias versus magnitude, color, and position. *Astronomy and Astrophysics*. 2021. Vol. 649. A4
76. Brandt T. D. The Hipparcos–Gaia Catalog of Accelerations. *The Astrophysical Journal*. 2018. Vol. 239. P. 31.
- 77.L. Lindegren J. Hern´andez, A. Bombrun, S. Klioner, U. Bastian, M. Ramos-Lerate, A. de Torres, H. Steidelmüller, C. Stephenson, D. Hobbs et al. Gaia Data Release 2. The astrometric solution. *Astronomy and Astrophysics*. 2018. Vol. 616. A2.
- 78.Popova M. E., Loktin A. V. Kinematic parameters of the galactic spiral pattern from data on open star clusters and OB stars. *Astronomy Letters*. 2005. Vol. 31. P. 171.
- 79.Xu Y., et al. On the nature of the Local spiral arm of the Milky Way. *The Astrophysical Journal*. 2013. Vol. 769. P. 15.
- 80.Bobylev V. V., Bajkova A. T. The Milky Way spiral structure parameters from data on masers and selected open clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2014. Vol. 437. P. 154.
- 81.Dambis A. K., et al. Classical Cepheids and the spiral structure of the milky way. *Astronomy Letters*. 2015. Vol. 41. P. 489.
- 82.I. I. Nikiforov and A. V. Veselova. Numerical Study of Statistical Properties of the Galactic Center Distance Estimate from the Geometry of Spiral Arm Segments. *Astronomy Letters*. 2018. Vol. 44. P. 699
- 83.Veselova A. V., Nikiforov I. Segments of spiral arms of the Galaxy traced by classical Cepheids: effects of age heterogeneity. *Astronomy and Astrophysic*. 2020. Vol.20. P.209
- 84.Rattenbury N. J., Mao S., Sumi T., Smith M. C. Modelling the Galactic bar using OGLE-II red clump giant stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2007. Vol. 378. P.1064.
- 85.Palicio P. A., Recio-Blanco A., Poggio E., Antoja T., McMillan P. J., Spitoni E. Spiral-like features in the disc revealed by *Gaia* DR3 radial actions.

Astronomy and Astrophysics. 2023. Vol. 670. L7.

86. Denyshchenko S., Fedorov P., Akhmetov, V., Velichko A., Dmytrenko, A., Determining the parameters of the spiral arms of the Galaxy from kinematic tracers based on *Gaia* DR3 data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2023. Stad 3350.
87. Robert J. J. Grand, John Helly, Azadeh Fattahi, Marius Cautun, Shaun Cole, Andrew P. Cooper, Alis J. Deason, Carlos Frenk, Facundo A. Gómez, Jason A. S. Hunt, Federico Marinacci, Rüdiger Pakmor, Christine M. Simpson, Volker Springel, Dandan Xu. Aurigaia: mock *Gaia* DR2 stellar catalogues from the Auriga cosmological simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2018. Vol. 481. P. 1726–1743.

ДОДАТОК А

Список публікацій Денищенко Софії Іванівни

за темою дисертації

Публікації у закордонному періодичному науковому виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus

1. Fedorov P., Akhmetov, V., Velichko A., Dmytrenko, A., **Denyshchenko S.**, 2021. Kinematics of the Milky Way from the Gaia EDR3 red giants and subgiants. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 508, Iss. 2 P. 3055–3067 (Scopus, Q1).

DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stab2821>

2. Fedorov P., Akhmetov, V., Velichko A., Dmytrenko, A., **Denyshchenko S.**, 2023. Mapping the kinematic parameters of the Galaxy from the Gaia EDR3 red giants and sub-giants. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 518, Issue 2, Pages 2761—2774 (Scopus, Q1).

DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stac3218>

3. **Denyshchenko S.**, Fedorov P., Akhmetov, V., Velichko A., Dmytrenko, A., 2023. Determining the parameters of the spiral arms of the Galaxy from kinematic tracers based on *Gaia* DR3 data. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, stad3350 (Scopus, Q1).

DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stad3350>

4. Dmytrenko, A., Fedorov P., Akhmetov, V., Velichko A., **Denyshchenko S.**, 2023. The vertex coordinates of the Galaxy's stellar systems according to the Gaia DR3 catalogue. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 521, Issue 3, Pages 4247–4256 (Scopus, Q1).

DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stad823>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. **Denyshchenko S.**, Akhmetov V., Fedorov P. / Kinematic Analysis of the Milky Way by Gaia EDR3 Data // International Conference “Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy” Devoted to 200th anniversary of Mykolaiv Astronomical Observatory MAO-200, September 27-30, 2021, Mykolaiv, Ukraine
6. Akhmetov V., Fedorov P., Velichko A., Dmytrenko A., **S.Denyshchenko** / Analysis of Modern Astrometric Catalogues in the Gaia Era // International Conference “Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy” Devoted to 200th anniversary of Mykolaiv Astronomical Observatory MAO-200, September 27-30, 2021, Mykolaiv, Ukraine.
7. **Denyshchenko S.I.**, Fedorov P.N., Akhmetov V.S., Velichko A.B. / Detection of spiral structures of the milky way galaxy using kinematic analysis // XXII Gamow International Astronomical Conference-School in Odessa: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, High Energy, Physics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology”, 22-26 August, 2022, Odesa, Ukraine.
8. Akhmetov V., Fedorov P., Velichko A., Dmytrenko A., **Denyshchenko S.**/ Mapping the kinematic parameters of the galaxy from the GAIA EDR3 data // XXII Gamow International Astronomical Conference-School in Odessa: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, High Energy, Physics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology”, 22-26 August, 2022, Odesa, Ukraine

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 11:39:33 05.12.2023

Назва файлу з підписом: Denyshchenko.pdf
Розмір файлу з підписом: 3.1 МБ

Перевірені файли:
Назва файлу без підпису: Denyshchenko.pdf
Розмір файлу без підпису: 3.1 МБ

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

Підписувач: ДЕНИЩЕНКО СОФІЯ ІВАНІВНА

П.І.Б.: ДЕНИЩЕНКО СОФІЯ ІВАНІВНА

Країна: Україна

РНОКПП: 3528505260

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 11:39:29
05.12.2023

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000DB26350125249F04

Алгоритм підпису: ДСТУ-4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис PDF-файла (PAdES)

Формат підпису: З позначкою часу від ЕП (PAdES-B-T)

Сертифікат: Кваліфікований