

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Величко Ганна Борисівна

УДК 524.6-327, 524.6-34

ДИСЕРТАЦІЯ

«КІНЕМАТИКА ЗІРОК В МЕЖАХ КІЛОПАРСЕКУ ВІД СОНЦЯ ЗА ДАНИМИ НАЗЕМНИХ ТА КОСМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ»

Спеціальність 104 – Фізика та астрономія
(Галузь знань 10 – Природничі науки)

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

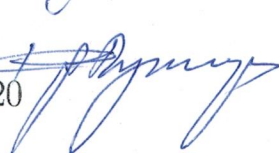
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 Г. Б. Величко

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

*Усі примірники дисертації ідентичні за змістом.
Голова спеціалізованої
вченої ради ДФ 64.051.007*

Харків – 2020



*Дмитро
Вулішко*

АНОТАЦІЯ

Величко Г. Б. Кінематика зірок в межах кілопарсеку від Сонця за даними наземних та космічних спостережень. – 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 і науки України, Харків, 2020.

Кінематичні дослідження зірок сонячної околиці почалися 250 років тому. З того часу кількість і якість астрометричних даних багаторазово зросла, було розроблено ряд методів дослідження кінематики зірок, виділені структурні складові Галактики і особливості їх руху. Однак дотепер існують не достатньо досліджені проблеми, пов'язані з точністю визначення таких параметрів як галактоцентрична відстань Сонця, швидкість руху локального стандарту спокою (ЛСС), швидкість обертання зірок різних підсистем сонячної околиці навколо центра Галактики V_{rot} , форма кривої обертання Галактики, та інші. Точність визначення всіх цих параметрів впливає на розуміння структури та еволюції Галактики, побудову її динамічної моделі.

Сучасні астрометричні каталоги, що містять дані для сотень мільйонів зірок, дають можливість детально вивчати кінематику зірок як в сонячній околиці, так і за її межами. Зазвичай кінематичні дослідження зірок полягають в отриманні оцінок кінематичних параметрів тієї або іншої фізичної моделі, наприклад, Оорта–Ліндблада або Огороднікова–Мілна (О–М). Але численні дослідження показують, що ці моделі не є повними, тобто не враховують всі систематичні компоненти реального поля швидкостей зірок. Цю проблему вдалося вирішити шляхом застосування методу розкладання поля швидкостей зірок за векторними сферичними функціями (ВСФ), який дає можливість детектувати всі систематичні складові, які присутні в русі зірок. Однак і цей метод є неефективним, коли необхідно досліджувати кінематику зірок, що займають не всю небесну сферу, а деяку область на ній. Така необхідність виникає, наприклад, при

дослідженні ефектів, які мають протилежну спрямованість в північній і південній галактичних півсферах. Для дослідження кінематики зірок в окремій зоні використовується метод зонних ВСФ (ЗВСФ).

Основною проблемою методів ВСФ і ЗВСФ є те, що, на відміну від параметрів фізичної моделі, фізичний зміст коефіцієнтів розкладання є наперед невідомим, тобто ці методи дають можливість отримати тільки формальну математичну модель. Фізичний зміст деяких коефіцієнтів розкладання за ВСФ і ЗВСФ вдалося визначити шляхом зіставлення з параметрами моделі О–М, тоді як природа інших коефіцієнтів залишається неясною. Тому одним із важливих завдань є визначення фізичного сенсу значущих позамодельних коефіцієнтів. У ряді досліджень було показано, що в полі швидкостей зірок, крім модельних параметрів, присутні позамодельні коефіцієнти t_{211} і s_{310} . Різні автори пов'язують ці коефіцієнти з наявністю вертикального градієнта швидкості обертання зірок навколо центра Галактики. Одним із завдань цієї роботи є перевірка цього припущення.

Добре відомо, що Галактика складається з ряду підсистем, що розрізняються віком, геометрією, кінематикою, вмістом важких елементів, оскільки вони формувалися на різних етапах еволюції Галактики. У сонячній околиці виділяють щонайменше три підструктури, які мають симетрію відносно основної площини Галактики: тонкий і товстий диски, а також гало. Крім того, деякі дослідники вважають, що існуює ще надтонкий диск і вторинна підсистема товстого диска. Зі збільшенням відстані від площини Галактики $|z|$ частка зірок тонкого диска (молода підсистема) зменшується, а частка зірок товстого диска (стара підсистема), навпаки, зростає. В результаті поступово збільшується середній вік зірок. Через те, що швидкість обігу зірок навколо центра Галактики залежить від їх віку, виникає вертикальний градієнт $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$, який є негативним в північній галактичній півсфері і позитивним в південній півсфері. Величина цього градієнта була отримана в ряді робіт з використанням даних з різних каталогів, і її модуль варіюється в діапазоні $20\text{--}50 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. Тому ще одним завданням роботи є отримання значення $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ за даними сучасних каталогів, а також

пояснення і систематизація цього розкиду значень.

Незважаючи на те, що сучасні каталоги мають хорошу внутрішню точність визначення астрометричних параметрів зірок, вони можуть мати різні систематичні похибки. Внаслідок розбіжності між системами власних рухів різних каталогів виникають систематичні розходження значень кінематичних параметрів, отриманих за цими даними. Оскільки неможливо дізнатися, система якого каталогу є «правильною», виникає розкид значень деяких кінематичних параметрів, який перевищує іноді внутрішню точність даних кожного з каталогів. Отримання кінематичних параметрів за власними рухами зірок з різних каталогів дає можливість оцінити величину систематичних розбіжностей систем цих каталогів.

Крім власних рухів зірок для дослідження кінематики використовуються також променеві швидкості. Так в каталозі *Gaia* DR2 містяться променеві швидкості близько 7.2 мільйонів зірок. Ці дані дають повну інформацію про рух зірок у просторі. При цьому важливою умовою є узгодженість систем власних рухів і променевих швидкостей, яка може не виконуватися через те, що принцип визначення перших є геометричним (за зміною напрямків на зірки), а останніх – астрофізичним (за зсувом ліній поглинання в спектрах зірок). Отримання кінематичних параметрів окремо за власними рухами і просторовими швидкостями дає можливість з'ясувати, чи є системи власних рухів і променевих швидкостей сумісними відносно отриманих результатів.

*Ця дисертація присвячена дослідженню кінематики зірок сонячної околиці (з геліоцентричними відстанями $r < 1.2$ кпк) за даними каталогів *Gaia* DR1 TGAS, UCAC5, HSOY, PMA, *Gaia* DR2 з використанням моделі О–М, а також методів розкладання поля швидкостей зірок за ВСФ і ЗВСФ. Окремо розглядаються кілька підсистем зірок: 1) зірки змішаного спектрального складу, які є спільними в каталогах TGAS, UCAC5, HSOY і PMA; 2) молоді червоні гіганти (ЧГ) вторинного згущення, які є спільними в каталогах *Gaia* DR2 RV (підмножина зірок, для яких визначені променеві швидкості) і PMA; 3) зірки головної послідовності (ГП), які є спільними в каталогах *Gaia* DR2 і PMA.*

Для використання моделі О–М, методів ВСФ і ЗВСФ автором дисертації

було створено програмне забезпечення з використанням мови програмування C і утиліт командного рядка ОС Linux. Значення параметрів обчислюються за допомогою лінійного методу найменших квадратів. Для створення рівномірного розподілу об'єктів на сфері використовується бібліотека Healpix. Крім того, автором дисертації було отримано зв'язок між параметрами моделі О–М і коефіцієнтами розкладання за ЗВСФ для зон $0^\circ \leq b \leq 90^\circ$ (північна галактична півсфера) і $-90^\circ \leq b < 0^\circ$ (південна галактична півсфера) як для коефіцієнтів t, s , які відповідають тангенціальній складовій швидкостей зірок (власні рухи), так і для коефіцієнтів v , які відповідають радіальній компоненті (променеві швидкості).

У дисертації наведено оригінальні результати аналізу кінематичних параметрів моделі О–М і позамодельних коефіцієнтів, отриманих за даними зазначених вище каталогів, як для всієї небесної сфери, так і окремо для північної та південної галактичних півсфер. Кінематичні параметри досліджуються як в залежності від геліоцентричної відстані, так і від показника кольору $(J - K_S)_0$.

Аналіз кінематичних параметрів зірок в залежності від геліоцентричної відстані r показав, що кінематика близьких і далеких зірок різниться. Поле швидкостей близьких зірок досить збурене, тобто містить багато гармонік, частина з яких має відповідні аналоги в моделі О–М, а частина таких аналогів не має, тобто є позамодельними. При цьому вони визначаються з великими випадковими похибками. По мірі збільшення відстані r кінематика стає більш схожою на Оортівську.

При дослідженні кінематики зірок ГП, які знаходяться в сонячній околиці розміром $r \leq 1$ кпк, в залежності від показника кольору було показано, що кінематика зірок раннього і пізнього спектральних класів розрізняється. Всі кінематичні параметри мають тренди в діапазоні $0.0^m \leq (J - K_S)_0 < 0.4^m$, тоді як поза цим діапазоном їх значення досягають плато і далі практично не змінюються. Пекулярна поведінка молодих зірок може бути обумовлена тим, що їх поле швидкостей ще продовжує бути збуреним. Деякі з цих зірок можуть належати таким структурам як, наприклад, пояс Гулда.

Головні результати, що були отримані у роботі, є наступними.

1. Вперше отримані значення кінематичних параметрів моделі О–М за власними рухами і просторовими швидкостями (власні рухи плюс променеві швидкості) *Gaia* DR2 для вибірки молодих ЧГ. Аналіз показав, що системи власних рухів і променевих швидкостей близьких зірок *Gaia* DR2 ($r < 0.5$ кпк) не сумісні щодо отриманих результатів. Цьому факту може бути, щонайменше два пояснення: або у вимірах *Gaia* є внутрішні систематичні похибки, характерні для близьких зірок, або поле швидкостей близьких зірок спотворено впливом реальних факторів, наприклад, спотвореннями в поясі Гулда. При виключенні з вибірки зірок з відстанями $r < 0.5$ кпк результати стають узгодженими.
2. Вперше для зірок ГП отримана залежність від показника кольору кінематичних параметрів моделі О–М і коефіцієнтів розкладання за ВСФ та ЗВСФ, а також вертикального градієнта, що виведений за власними рухами зірок *Gaia* DR2 і РМА. При аналізі поля швидкостей окремо в північній і південній галактичних півсферах була безпосередньо обчислена величина вертикального градієнта $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$. За власними рухами зірок *Gaia* DR2 і РМА було виявлено, що зірки ранніх спектральних класів, $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.2^{\text{m}}$ мають нульовий вертикальний градієнт. Потім він досягає значення $\simeq 20 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ при $0.3^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.4^{\text{m}}$ і далі знаходиться приблизно на цьому ж рівні.
3. Аналіз кінематики зірок за даними різних каталогів виявив розкид значень деяких кінематичних параметрів, який досягає $\pm 4 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. В результаті, при обчисленні глобальних параметрів Галактики, наприклад, швидкості обертання зірок V_{rot} навколо її центра, розкид значень становить $\pm 20 \text{ км с}^{-1}$. В основному цей розкид обумовлений різницею між системами власних рухів зірок каталогів *Gaia* і РМА. З іншого боку, ряд параметрів не має систематичних розходжень.
4. Показано, що вертикальний градієнт має додатковий вплив на компоненту швидкості Сонця $Y_{\odot}$. Таким чином, наприклад, при $|\partial V_{\text{rot}}/\partial z| = 22 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ добавка до $Y_{\odot}$ становить $\simeq 4.2 \text{ км с}^{-1}$. Тому

можна зробити висновок, що значення $Y_{\odot}$, які були отримані за власними рухами зірок *Gaia* DR2 і PMA, є комбінацією двох ефектів: асиметричного дрейфу (тобто кореляції між віком зірок ГП і швидкістю обертання навколо центра Галактики) зірок, які знаходяться безпосередньо в площині Галактики, і вертикального градієнта швидкості обертання зірок навколо центра Галактики (через те, що середній вік зірок збільшується з відстанню від площини Галактики).

5. За допомогою моделювання поля швидкостей зірок в галактоцентричній системі координат показано, що при аналізі по всій сфері позамоделльні коефіцієнти t_{211} і s_{310} виникають спільно, коли присутній вертикальний градієнт швидкості обертання зірок навколо центра Галактики $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$, який має протилежну спрямованість в північній і південній галактичних півсферах. Однак коефіцієнт s_{310} може відрізнитися від нуля і за відсутності вертикального градієнта, тобто може бути декілька причин виникнення s_{310} .
6. Виявлено відмінність кінематики близьких ($r < 0.4$ кпк) і далеких ($r > 0.4$ кпк) зірок, зірок ранніх $((J - K_S)_0 < 0.4^{\text{m}})$ і пізніх $((J - K_S)_0 > 0.4^{\text{m}})$ спектральних класів.

В цілому, отримані результати узгоджуються з сучасними уявленнями про структуру Галактики і кінематику її підсистем. Незважаючи на те, що внутрішня точність визначення астрометричних і фотометричних даних в сучасних каталогах висока, систематичні відмінності між їх системами власних рухів призводять до суттєвого розкиду значень деяких кінематичних параметрів і глобальних параметрів Галактики на відстані Сонця. Тому через неможливість вирішити, система якого каталогу є «правильною», на даний момент неможливо об'єктивно поліпшити точність визначення цих параметрів. Проте, завдяки великій кількості даних для зірок, розподілених по всій небесній сфері, стало можливим застосовувати сучасні методи для вивчення кінематики і виявляти закономірності в русі зірок, що належать різним підсистемам Галактики, в залежності від геліоцентричної відстані, показника кольору, віку, та ін. Отримані результати можуть бути використані

для уточнення динамічної моделі Галактики.

Ключові слова: кінематика зірок, околиця Сонця, власні рухи зірок, променеві швидкості зірок, зірки головної послідовності, червоні гіганти, зірки змішаного спектрального складу.

ABSTRACT

Velichko A. B. Kinematics of stars within a kiloparsec from the Sun using ground- and space-based observations. – 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, 2020.

Kinematic investigations of stars located within the solar neighbourhood started 250 years ago. Since then, quantity and quality of astrometric data have increased significantly, a number of methods for kinematic analysis has been developed, structural components of the Galaxy and their motion features have been discovered. However, there are still some problems with the accuracy of determining parameters such as the galactocentric distance of the Sun, the speed of the local standard of rest, the rotational velocity of stars, belonging to subsystems in the solar environment, around the Galaxy’s center V_{rot} , shape of the rotational curve of the Galaxy, and some others. Accuracy of determination of all these parameters affect the understanding of the structure and evolution of the Galaxy, the construction of its dynamic model.

Modern large astrometric catalogs, containing data for hundreds of millions stars, make it possible to study in detail the kinematics of stars both in the solar neighborhood and beyond. Usually, kinematic studies of stars are needed to obtain estimates of the kinematic parameters of a physical model, such as the Oort–Lindblad or Ogorodnikov–Milne ones. But numerous studies show that these models are not complete, i.e. they do not take into account all the systematic components which are present in the real stellar velocity field. This problem was solved by applying the method of decomposition of the stellar velocity field onto vector spherical harmonics (VSH), which allows to detect all the systematic components that are present in the stellar motions. However, this method is also ineffective when it is necessary to study the kinematics of stars, which do not occupy the entire celestial sphere, but some area on it. The need arises, for example, when effects that have opposite directions in the northern and southern

galactic hemispheres are analyzed. To study the kinematics of stars located in a certain zone the method of zonal VSH (ZVSH) is used.

The main problem of the VSH and ZVSH methods is that, in contrast to the parameters of the physical model, the physical content of the decomposition coefficients is unknown in advance, i.e. these methods allow to obtain only a formal mathematical model. The physical meaning of some VSH and ZVSH decomposition coefficients has been determined by comparison with the O–M model parameters, while the nature of the other coefficients remains unclear. Therefore, one of the important tasks is to determine the physical meaning of significant beyond-the-model coefficients. A number of studies have shown that in the stellar velocity field, in addition to the model parameters, there are beyond-the-model coefficients t_{211} and s_{310} . Various authors have associated these coefficients to the presence of a vertical gradient of the rotational velocity of stars around the Galactic center. One of the tasks of this work is to test this assumption.

It is well known that the Galaxy consists of a number of subsystems that differ in age, geometry, kinematics, content of heavy elements, because they were formed at different stages of the evolution of the Galaxy. In the solar neighborhood, there are at least three substructures that have symmetry relative to the main plane of the Galaxy: thin and thick disks, and halo. In addition, some authors believe that there is also an ultra-thin disk and a secondary subsystem of the thick disk. As the distance from the Galactic midplane $|z|$ increases, the fraction of the thin disk stars (young subsystem) decreases, while the fraction of the thick disk stars (old subsystem), on the contrary, increases. As a result, the average age of the stars gradually increases. Because rotational velocities of stars around the Galactic center depend on their age, the vertical gradient $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ arises, which is negative in the northern galactic hemisphere and positive in the southern hemisphere. The value of this gradient has been obtained in a number of works using data from different catalogues, and its modulus varies in the range of $20\text{--}50 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$. Therefore, another task of the work performed is to obtain the value $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ according to modern catalogues, as well as to explain and systemize the resulting scatter of values.

Although modern catalogues have good internal accuracy of the stellar astrometric parameters, they may have various systematic errors. Due to differences between the systems of proper motions of different catalogues, there are systematic differences between values of kinematic parameters obtained from these data. Since it is impossible to find out which catalogues system is «correct», a scatter of values of some kinematic parameters, exceeding the internal accuracy of these catalogue. Obtaining kinematic parameters from stellar proper motions of different catalogues allows to estimate the level of the systematic differences between their systems.

In addition to the stellar proper motions, radial velocities are also used for kinematic analysis. So, the *Gaia* DR2 catalogue contains radial velocities for about 7.2 million stars. These data provide complete information on the motion of stars in space. An important condition is the consistency between systems of proper motions and radial velocities, which may not be fulfilled due to the fact that the principle of determining the former is geometric (by changing directions to stars), and the latter – astrophysical (by shifting absorption lines in stellar spectra). Obtaining kinematic parameters separately from their proper motions and spatial velocities makes it possible to find out whether the systems of proper motions and radial velocities are in agreement.

This thesis is dedicated to the kinematic analysis of stars located within the solar neighborhood (with heliocentric distances $r < 1.2 \text{ kpc}$) using data from catalogues *Gaia* DR1 TGAS, UCAC5, HSOY, PMA, *Gaia* DR2 and applying the O–M model as well as methods of the stellar velocity field decomposition onto VSH and ZVSH. Several subsystems of stars are considered separately: 1) stars of mixed spectral composition, which are common in the TGAS, UCAC5, HSOY and PMA catalogues; 2) young red giants of secondary clump, which are common in the *Gaia* DR2 RV (a subset of stars for which radial velocities are determined) and PMA catalogues 3) main sequence stars that are common in the *Gaia* DR2 and PMA catalogs.

To apply the O–M model, as well as VSH and ZVSH methods, the author of the thesis has made software using the programming language *C* and OS Linux command line utilities. Values of the kinematic parameters and decomposition

coefficients have been calculated using the linear least squares method. The Healpix library has been used to create a uniform distribution of objects through the sphere. In addition, the author of the thesis obtained a relationship between the O–M model parameters and the decomposition coefficients onto ZVSH for the zones $0^\circ \leq b \leq 90^\circ$ (northern galactic hemisphere) and $-90^\circ \leq b < 0^\circ$ (southern galactic hemisphere) both for the coefficients t, s , which correspond to the tangential component of the velocities of stars (proper motions), and for the coefficients v , which correspond to the radial component (radial velocities) .

The thesis presents novel results of analysing the O–M model kinematic parameters and the beyond-the-model coefficients derived from data of the above mentioned catalogues, both for the whole celestial sphere and separately in the northern and southern galactic hemispheres. Kinematic parameters have been investigated both depending on the heliocentric distance and the color index $(J - K_S)_0$.

Analysis of the kinematic parameters of stars depending on their heliocentric distances r has shown that the kinematics of near and far stars is different. The velocity field of nearby stars is quite perturbed, i.e. it contains many harmonics, some of which have corresponding analogues in the O–M model, and some do not have such analogues, i.e. they are beyond-the-model. In this case, they are determined with large random errors. As the distance r increases, the kinematics becomes similar to the Oort one.

Kinematic study of MS stars, located within the solar vicinity with $r \leq 1$ kpc, depending on color index has shown that the kinematics of early and late spectral type stars is different. All kinematic parameters have trends in the range $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.4^{\text{m}}$, while outside this range their values reach the plateau and then remain virtually constant. The peculiar behavior of young stars may be due to the fact that their velocity field is still perturbed. Some of these stars may belong to structures such as the Gould belt.

The main results obtained in the work are as follows.

1. For the first time, for the sample of young RG the values of the O–M model kinematic parameters were derived from the *Gaia* DR2 proper motions

and spatial velocities (proper motions plus radial velocities). The analysis has shown that the systems of the *Gaia* DR2 proper motions and radial velocities of nearby stars ($r < 0.5 \text{ kpc}$) are not consistent. There can be at least two explanations for this fact: either there are internal systematic errors inherent in nearby stars from *Gaia* measurements, or the velocity field of nearby stars is distorted by real factors, for instance, by movements within the Gould belt. When the stars with distances $r < 0.5 \text{ kpc}$, are excluded from the sample the results become consistent.

2. For the first time, for MS stars the dependence on color index of the O–M model kinematic parameters, VSH and ZVSH decomposition coefficients, as well as the vertical gradient derived from the *Gaia* DR2 and PMA stellar proper motions was traced. When analyzing the velocity field separately in the northern and southern galactic hemispheres, the values of the vertical gradient $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ was directly calculated. According to the proper motions of the stars *Gaia* DR2, and PMA, it was found that stars of early spectral types, $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.2^{\text{m}}$, have a zero vertical gradient. It then reaches $\simeq 20 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ at $0.3^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.4^{\text{m}}$ and remains at about the same level.
3. Kinematic analysis of stars according from data of various catalogues revealed a scatter of values of some kinematic parameters, that reach $\pm 4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$. As a result, when calculating the global parameters of the Galaxy, for example, the rotational velocity of the stars V_{rot} around the Galactic center, the scatter is up to $\pm 20 \text{ km s}^{-1}$. This variation is mainly due to the difference between systems of the *Gaia* and PMA proper motions. On the other hand, a number of parameters do not have systematic differences.

In general, the results are consistent with modern view on the structure of the Galaxy and kinematic properties of its subsystems. Despite the fact that the internal accuracy of determining astrometric and photometric data in modern catalogues is good, systematic differences between their systems of proper motions result in a significant variance in the values of some kinematic parameters and global parameters of the Galaxy at the Solar distance. Therefore, due to the

impossibility to decide which catalogue's system is «correct», at the moment it is impossible to objectively improve the accuracy of determining these parameters. However, due to the large amount of data for stars distributed throughout the celestial sphere, it became possible to apply modern methods to study their kinematics and identify patterns in the motion of stars belonging to different subsystems of the Galaxy, depending on heliocentric distance, color, age, etc. The results derived can be used to refine the dynamic model of the Galaxy.

Key words: stellar kinematics, solar neighborhood, stellar proper motions, stellar radial velocities, main sequence stars, red giants, stars of mixed spectral composition.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Публікація у науковому фаховому виданні України

1. **Velichko A. B.**, Fedorov P. N. Kinematics of the Milky Way from velocities of young red clump giants using the PMA and Gaia DR2 data // Odessa Astron. Publ. 2018. Vol. 31. P. 123–127.

DOI: <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2018.31.144742>

(Особистий внесок здобувача: самостійно поставила задачу, з використанням власного програмного забезпечення виконала розрахунки кінематичних параметрів моделі О–М для молодих гігантів червоного згущення за власними рухами зірок Gaia DR2 і PMA, а також за променевими швидкостями Gaia DR2. Автор брала участь в обговоренні отриманих результатів, їх фізичній інтерпретації, підготувала текст статті.)

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

2. Akhmetov V. S., Fedorov P. N., **Velichko A. B.**, Shulga V. M. The PMA Catalogue: 420 million positions and absolute proper motions // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2017. Vol. 469, Iss. 1. P. 763–773. (Scopus).

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85036516892&origin=resultslist>

(Особистий внесок здобувача: приймала участь в постановці, обговоренні та вирішенні поставленої задачі, проводила дослідження рівняння блиску в каталозі PMA, створила програмне забезпечення для візуалізації отриманих результатів.)

3. Fedorov P. N., Akhmetov V. S., **Velichko A. B.** Testing stellar proper motions of TGAS stars using data from the HSOY, UCAC5 and PMA catalogues // Mon.

Not. R. Astron. Soc. 2018. Vol. 476, Iss. 2. P. 2743–2750. (Scopus).

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85048532582&origin=resultslist>

(Особистий внесок здобувача: приймала участь в обробці даних за допомогою власного програмного забезпечення, порівнянні систем власних рухів каталогів TGAS, HSOY, UCAC5 і PMA, приймала участь в обговоренні результатів, їх фізичній інтерпретації та приймала участь в написанні тексту статті.)

4. **Velichko A. B.**, Fedorov P. N., Akhmetov V. S. Kinematics of main sequence stars from the Gaia DR2 and PMA proper motions // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2020. Vol. 494, Iss. 1. P. 1430–1447. (Scopus).

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85085394243&origin=resultslist>

(Особистий внесок здобувача: поставила задачу, створила програмне забезпечення для застосування метода ЗВСФ, та з використанням нього за власними рухами зірок Gaia DR2 і PMA виконала розрахунки кінематичних параметрів моделі О–М і коефіцієнтів розкладання за ВСФ і ЗВСФ для зірок головної послідовності; виконала моделювання поля швидкостей зірок з використанням власного програмного забезпечення. Автор брала участь в обговоренні результатів, їх фізичній інтерпретації, підготувала текст статті.)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Akhmetov V. S., Fedorov P. N., **Velichko A. B.** The PMA catalogue. astrometric and multiband photometric data for more than 400 millions objects // KOLOS 2016 : International meeting on variable stars research, December 1–3 2016. : abstr. Stakčín, Slovakia, 2016. P. 1.

(Особистий внесок здобувача: дослідження рівняння блиску в каталогах PMA і UCAC5.)

6. **Velichko A.B.**, Akhmetov V. S., Fedorov P. N. Kinematics of our Galaxy from the PMA and TGAS catalogues // Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology, cosmomicrophysics, astroparticle physics, radioastronomy and astrobiology : 17th Gamow Conference-school, August 12–20 2017. : abstr. Odesa, 2017. P. 23.

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, отримання та аналіз кінематичних параметрів).
7. **Velichko A. B.**, Akhmetov V. S., Fedorov P. N. Kinematics of our Galaxy from the PMA and TGAS catalogues // Astrometry and Astrophysics in the Gaia sky : International Astronomical Union Symposium 330, April 24–28 2017. : abstr. Nice, France, 2017. P. 39.

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, отримання та аналіз кінематичних параметрів.)
8. Akhmetov V. S., Fedorov P. N., **Velichko A. B.** The PMA catalogue as a realization of the extragalactic reference system in optical and near infrared wavelengths // Astrometry and Astrophysics in the Gaia sky : International Astronomical Union Symposium 330, April 24–28 2017. : abstr. Nice, France, 2017. P. 1. *(Особистий внесок здобувача: візуалізація результатів.)*
9. **Velichko A. B.**, Akhmetov V. S., Fedorov P. N. Kinematics of our Galaxy from the PMA and TGAS catalogues // Астрономія та фізика космосу в Київському університеті : міжнародна конференція, 23–26 травня 2017 р. : Київ, 2017. С. 86.

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, отримання та аналіз кінематичних параметрів.)
10. **Velichko A. B.** Kinematics of our Galaxy from stellar proper motions of modern catalogues // KOLOS 2017 : International meeting on variable stars research, November 30–December 2 2017. : abstr. Stakčín, Slovakia, 2017. P. 21.

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, отримання та аналіз кінематичних параметрів.)

11. **Velichko A. B.**, Akhmetov V. S., Fedorov P. N. Kinematics of our Galaxy from the PMA and TGAS catalogues // Astrometry and Astrophysics in the Gaia sky : Proceedings of the International Astronomical Union Symposium 330, April 24–28 2017, Nice, France, 2018. P. 100–103. (Scopus).
URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85044975115&origin=resultslist>
(Особистий внесок здобувача: створила програмне забезпечення для застосування методу розкладання поля швидкостей зірок за ВСФ, що дозволило отримати кінематичні параметри за власними рухами зірок з каталогів PMA і TGAS. Автор брала участь в обговоренні результатів, їх фізичній інтерпретації та підготувала основну частину тексту статті.)
- 11a. Akhmetov V. S., Fedorov P. N., **Velichko A. B.**. The PMA Catalogue as a realization of the extragalactic reference system in optical and near infrared wavelengths // Astrometry and Astrophysics in the Gaia sky : Proceedings of the International Astronomical Union Symposium 330, April 24–28 2017, Nice, France, 2018. P. 81–82. (Scopus).
URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85044990810&origin=resultslist>
(Особистий внесок здобувача: приймала участь в постановці, обговоренні та вирішенні поставленої задачі, створила програмне забезпечення для візуалізації отриманих результатів.)
12. **Величко Г. Б.** Кінематика нашої Галактики за даними сучасних каталогів // XIII Барабашовські обласні наукові читання з астрономії учнів та студентів : конференція 14 квітня 2018 р. : тези доп. Харків, 2018. С. 4.
(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, отримання та аналіз кінематичних параметрів.)
13. **Velichko A. B.**, Fedorov P. N. Kinematics of the Milky Way from velocities of young red clump giants using the PMA and Gaia DR2 data // Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology, cosmomicrophysics, astroparticle physics, radioastronomy and astrobiology : 18th Odessa international astronomical Gamow

Conference–school, August 12–18 2018. : abstr. Odesa, 2018. P. 25.

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, відбір молодих ЧГ, отримання та аналіз кінематичних параметрів.)

14. **Velichko A. B.**, Fedorov P. N. 3D kinematics of the Galactic thin disc stars from the Gaia DR2 and PMA data // XXXth General Assembly of the International Astronomical Union : International conference, August 20–31 2018. : abstr. Vienna, Austria, 2018.

URL: <https://astronomy2018.univie.ac.at/posterabstracts/all-posterabstracts-sorted>

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, відбір зірок тонкого диску Галактики, отримання та аналіз кінематичних параметрів.)

15. **Velichko A. B.**, Fedorov P. N. Kinematics of main sequence stars from the Gaia DR2 and PMA proper motions // New Trends in Astrophysics, Cosmology and Radioastronomy after Gamow : 6th Gamow International Conference in Odessa : Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Radioastronomy and Astrobiology : 19th Gamow Summer School, August 11–18 2019. : abstr. Odesa, 2019. P. 23.

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, відбір зірок ГП, отримання та аналіз кінематичних параметрів, моделювання поля швидкостей зірок.)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	22
ВСТУП	23
РОЗДІЛ 1. РОЗВИТОК КІНЕМАТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЛАКТИКИ	31
1.1 Астрометричні параметри	31
1.1.1 Положення та власні рухи зірок	31
1.1.2 Паралакси зірок	36
1.1.3 Геліоцентричні відстані до зірок	37
1.1.4 Променеві швидкості зірок	38
1.2 Зміна уявлень про кінематику зірок	40
1.2.1 Рух Сонця	40
1.2.2 Обертання галактики Чумацький Шлях	45
1.3 Галактичні константи	49
1.3.1 Локальний стандарт спокою	49
1.3.2 Галактоцентрична відстань Сонця	51
1.4 Структура Галактики	52
Висновки до розділу 1	55
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ЗІРОК.	57
2.1 Системи координат	57
2.1.1 Екваторіальна система координат	57
2.1.2 Галактична система координат	57
2.1.3 Перехід від екваторіальної в галактичну систему координат	58
2.1.4 Галактоцентрична циліндрична система координат	59
2.2 Кінематичні моделі	60
2.2.1 Модель Ковальського – Ері	60
2.2.2 Модель Огороднікова-Мілна	61
2.2.3 Векторні сферичні функції	65
2.2.4 Зонні векторні сферичні функції	67
2.3 Моделювання поля швидкостей зірок	69
Висновки до розділу 2	71

РОЗДІЛ 3. КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ	73
3.1 Астрометричні каталоги, що використовуються при кінематичних дослідженнях	75
3.1.1 Gaia	76
3.1.2 PMA	77
3.1.3 HSOY	78
3.1.4 UCAC5	79
3.1.5 Систематичні відмінності між даними каталогів	79
3.1.6 Проблема визначення геліоцентричних відстаней	81
3.1.7 Карти поглинання	85
3.2 Кінематика зірок змішаного спектрального складу	89
3.2.1 Аналіз кінематичних параметрів	89
3.2.2 Висновки до підрозділу 3.2	93
3.3 Кінематика молодих червоних гігантів згущення	96
3.3.1 Відбір червоних гігантів вторинного згущення	96
3.3.2 Аналіз кінематичних параметрів	99
3.3.3 Висновки до підрозділу 3.3	103
3.4 Кінематика зірок головної послідовності	104
3.4.1 Відбір зірок ГП	104
3.4.2 Рух Сонця	107
3.4.3 Кінематика на всій сфері	109
3.4.4 Кінематика в південній і північній галактичних півсферах . .	117
3.4.5 Про походження позамодельних коефіцієнтів t_{211} , s_{310} і прискорення сонячного руху	126
3.4.6 Моделювання поля швидкостей зірок	128
3.4.7 Висновки до підрозділу 3.4	134
Висновки до розділу 3	137
ВИСНОВКИ	139
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	142
ДОДАТОК А	160

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВСФ	Векторні сферичні функції
ЗВСФ	Зонні векторні сферичні функції
ЧГ	Червоні гіганти
Модель О–М	Модель Огороднікова–Мілна
ІЧ	Інфрачервоний
ГП	Головна послідовність
Г–Р	Герцшпрунга–Рассела [діаграма]
ЛСС	Локальний стандарт спокою
ГСК	Галактична система координат
ЕСК	Екваторіальна система координат
МНК	Метод найменших квадратів
ГА	Генеральна Асамблея
МАС	Міжнародний Астрономічний Союз
ICRS	International Celestial Reference System
HCRF	Hipparcos Celestial Reference Frame

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Добре відомо, що Галактика Чумацький Шлях має складну структуру. Вона складається з кількох підсистем, що вкладені одна в іншу і знаходяться в динамічній рівновазі. Зірки, що належать підсистемам тонкого, товстого дисків, гало, балджу, мають різні кінематичні, геометричні особливості, розрізняються вмістом металів і α -елементів. Деякі автори виділяють також і молодий тонкий (надтонкий) диск, а також товстий диск, який є бідний металами. Безпосередньо в сонячній околиці (ця область не має чіткого визначення, а її межі варіюються в залежності від завдання, яке вирішується; в межах дисертації під сонячною околицею розуміється область з геліоцентричними відстанями $r < 1.2$ кпк) в основному присутні зірки тонкого і товстого дисків. Частина молодих зірок може належати місцевим пекулярним структурам, таким як пояс Гулда, що мають збурене поле швидкостей зірок, а їх кінематика відхиляється від середньостатистичної. Виділення підсистем і дослідження їх кінематики є дуже важливим і **актуальним** завданням сучасної зоряної астрономії, оскільки дає можливість краще зрозуміти, як рухаються зірки в просторі, а також забезпечує обмеження для побудови динамічної моделі Галактики.

Якість кінематичного аналізу залежить від багатьох параметрів, серед яких можна виділити якість і кількість астрометричних та фотометричних даних, наявність систематичних похибок у власних рухах і променевих швидкостях зірок, повнота вибірки, якість відбору зірок, що належать конкретній підсистемі, яка, в свою чергу, визначається якістю урахування міжзоряного поглинання і почервоніння.

До 2016 року уявлення про кінематику Галактики базувалися на результатах, отриманих за власними рухами зірок з таких каталогів, як HIPPARCOS, Tycho-2, UCAC4, XPM, 2MASS. При цьому основним джерелом паралаксів зірок був каталог HIPPARCOS, що містить всього ~118000 найближчих зірок із середньою відстанню менше ніж 250 пк, серед яких найбільш достовірні значення ($\zeta\varpi/\varpi < 0.2$) мають лише 50000 зірок.

Ситуація значно покращилася з виходом двох релізів космічної місії *Gaia*. В рамках першого релізу *Gaia* DR1 були отримані 5 астрометричних параметрів (положення, власні рухи і паралакси) для більш ніж 2 мільйонів зірок (каталог TGAS), тоді як у другому релізі *Gaia* DR2 кількість таких зірок збільшилася до 1.3 мільярда. При цьому *Gaia* DR2 має беспрецедентну випадкову точність своїх астрометричних параметрів, приблизно на три порядки вищу, ніж в проекті HIPPARCOS. Додатково для ~7 мільйонів зірок були визначені ще і променеві швидкості. Поліпшити точність і збільшити обсяг даних планується в подальших релізах *Gaia* EDR3 і *Gaia* DR3 і фінальному релізі *Gaia* DR4.

Крім того, на базі *Gaia* DR1 були створені масові каталоги власних рухів зірок: PMA (у комбінації з 2MASS, більше 420 мільйонів зірок), UCAC5 (у комбінації з UCAC4, більше 107 мільйонів зірок), HSOY (з комбінації з RPMXL, близько 583 мільйонів зірок). Серед них виділяється каталог PMA, який представляє систему власних рухів, незалежну від HCRF/ICRF, тоді як системи каталогів UCAC5 і HSOY відповідають системі TGAS (*Gaia* DR1).

Таким чином, на даний час існує значна кількість високоточних даних, що щільно покривають всю небесну сферу і заповнюють великий об'єм простору. Наявність високоточних паралаксів великої кількості зірок, з яких обчислюються їх геліоцентричні відстані, та фотометрії в різних смугах дає можливість розділяти зірки на підсистеми, що необхідно для виявлення закономірностей руху цих підсистем. Завдяки наявності великої кількості власних рухів відкриваються нові можливості в дослідженні кінематики зірок, які полягають в тому що стає можливим більш детально вивчати поле швидкостей зірок не тільки по всій небесній сфері, а й в окремих зонах, застосовуючи нові методи, такі як розкладання поля швидкостей зірок за системами векторних сферичних функцій (ВСФ) та зонних ВСФ (ЗВСФ). Ці методи дають можливість отримати повну формальну модель поля швидкостей зірок, виділяючи всі статистично значущі систематичні компоненти. Фізичний сенс отриманих компонент зазвичай з'ясовується шляхом порівняння коефіцієнтів розкладання з параметрами вже існуючих фізичних моделей. Важливими задачами є знаходження фізичного сенсу

або причин виникнення коефіцієнтів розкладання, які не мають аналогів в фізичних моделях та побудова повної кінематичної моделі. Наявні променеві швидкості зірок, рівномірно розподілених по небесній сфері, разом з власними рухами дають можливість обчислити просторові швидкості цих зірок і отримати кінематичні параметри в рамках тривимірних моделей. Оскільки ніколи неможливо з упевненістю сказати, чи присутні систематичні похибки в системі власних рухів того чи іншого каталогу, важливо проводити кінематичний аналіз за різними даними (наприклад PMA і *Gaia* DR2), тим самим отримуючи діапазон оцінки значень кінематичних параметрів.

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:

– «Дослідження кінематики Галактики на основі даних каталогу XPM2», № державної реєстрації 0116U000830, 01.01.2016–31.12.2018 (здобувач – виконавець).

– «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).

Мета та завдання дослідження. Метою дисертації є вивчення кінематики різних підсистем зірок, що знаходяться в сонячній околиці, з використанням найточніших сучасних астрометричних та фотометричних даних. Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні ключові завдання:

- розробка програмного забезпечення для обчислення кінематичних параметрів Галактики з використанням кінематичних моделей і методу розкладання поля швидкостей зірок за системами векторних сферичних функцій, зонних векторних сферичних функцій, для чого були використані мови програмування C, Python та утіліти командного рядка

ОС Linux;

- відбір достовірних астрометричних та фотометричних даних, точність визначення яких не гірше заданої, з каталогів *Gaia* DR1, *Gaia* DR2, UCAC5, HSOY і PMA;
- відбір зірок, що належать тій чи іншій досліджуваній підсистемі, з використанням діаграми Г – Р;
- отримання кінематичних параметрів а також коефіцієнтів розкладання за ВСФ та ЗВСФ як для окремої зоряної підсистеми, так і Галактики в цілому;
- моделювання поля швидкостей зірок для перевірки і встановлення зв'язку тих чи інших коефіцієнтів розкладання з фізичними процесами, які присутні в Галактиці;
- аналіз отриманих даних в контексті загальноприйнятої моделі Галактики.

Об'єктом дослідження є зірки, що знаходяться в сонячній околиці, Галактика Чумацький Шлях.

Предметом дослідження є поле швидкостей зірок, кінематика зірок сонячної околиці, кінематичні параметри Галактики на відстані Сонця.

Методи дослідження. Для кінематичного аналізу зірок сонячної околиці були використані високоточні астрометричні і фотометричні дані з сучасних масових каталогів TGAS (*Gaia* DR1), *Gaia* DR2, PMA, 2MASS. Застосовувались методи, засновані на використанні кінематичних моделей, а також методи розкладання поля швидкостей зірок за векторними сферичними функціями (ВСФ) – для зірок, що покривають всю небесну сферу, і за зонними ВСФ (ЗВСФ) – для аналізу кінематики зірок, що покривають частину небесної сфери (деяку зону). Для вирішення сукупності рівнянь і отримання значень кінематичних параметрів застосовувався метод найменших квадратів (МНК). Крім того, для виявлення причин виникнення позамоделних коефіцієнтів було застосовано моделювання поля швидкостей зірок.

Наукова новизна одержаних результатів. У процесі кінематичних досліджень отримано такі нові результати.

Вперше:

1. За даними каталогів *Gaia* DR2 і PMA, кількість зірок в яких забезпечує репрезентативність зоряної вибірки до значних геліоцентричних відстаней (1 кпк і більше), отримано кінематичні параметри і позамоделльні коефіцієнти розкладання за ВСФ та ЗВСФ. Виконано порівняння результатів, які були отримані за даними цих двох каталогів.
2. Для зірок ГП за даними каталогів *Gaia* DR2 і PMA отримано залежність кінематичних параметрів моделі О–М і позамоделльних коефіцієнтів розкладання за ВСФ та ЗВСФ, а також вертикального градієнта $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ від показника кольору, а значить і від віку зірок.
3. Надійно і коректно визначено $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ за зірками з відстанями до 1 кпк прямим методом (окремо в північній і південній півсферах).
4. Виконано моделювання поля швидкостей зірок в галактоцентричній системі координат, яке містить вертикальний градієнт швидкості обертання зірок навколо центра Галактики $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$, та його порівняння з результатами, які були отримані за реальними даними *Gaia* DR2.
5. Порівняння результатів, отриманих за змодельованими і реальними *Gaia* DR2 даними, показало, що існує додаткова причина виникнення позамоделльної гармоніки S_{310} в полі швидкостей зірок, окрім наявності вертикального градієнта $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$.
6. Виявлено суперечність власних рухів і променевих швидкостей зірок *Gaia* DR2 для близьких молодих ЧГ згущення.

Дістало подальший розвиток:

7. Оцінка реальної точності визначення деяких локальних кінематичних параметрів і глобальних параметрів Галактики на відстані Сонця, яка погіршується через систематичні відмінності систем власних рухів зірок різних каталогів (TGAS, UCAC5, HSOY, PMA).

8. Кінематичний аналіз різних вибірок зірок окремо в південній і північній галактичних півсферах, який є значно ефективнішим та більш інформативним, ніж аналіз по всій небесній сфері.

9. Застосування методів розкладання поля швидкостей зірок за ВСФ і ЗВСФ.

10. Вплив вертикального градієнта $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ на значення компоненти швидкості Сонця $Y_{\odot}$, який можна розділити на два ефекти: асиметричний дрейф зірок, що знаходяться безпосередньо в площині Галактики (тобто кореляція між віком зірок ГП і швидкістю їх обертання навколо центра Галактики) і вертикальний градієнт швидкості обертання Галактики (через те, що середній вік зірок збільшується з відстанню від площини Галактики).

Практичне значення отриманих результатів.

Результати кінематичного аналізу, що одержані в даній роботі, можуть бути використані для уточнення кінематичної і динамічної моделей Галактики.

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

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи були представлені у 10 доповідях на таких вітчизняних та міжнародних наукових конференціях:

- International meeting on variable stars research «Kolos 2016», Стакчин, Словачія, 1–3 грудня 2016 р.
- International Astronomical Union Symposium 330 «Astrometry and Astrophysics in the Gaia sky», was a tribute to François Mignard, expert in astrometry and reference frames, and chair of the Gaia Data Processing and Analysis Consortium since its formation and until the end of 2012, Ніцца,

Франція, 24–28 квітня 2017 р.

- Annual International Conference «Astronomy and Space Physics», Київ, Україна, 23–26 травня 2017 р.
- 17th International Gamow Conference – School: «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology» devoted to: the 110th anniversary of the corresponding member of Ukrainian Academy of Science professor V. Tsesevich; the 100th anniversary of the cosmological constant in Einstein equations, Одеса (Україна), 13 – 19 серпня 2017 р.
- International meeting on variable stars research «Kolos 2017», Стакчин, Словачія, 30 листопада–2 грудня 2017 р.
- XIII Барабашовські обласні наукові читання з астрономії учнів та студентів, Харків, Україна, 14 квітня 2018 р.
- 18th International Gamow Conference-School: «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology», Одеса, Україна, 12–18 серпня 2018 р.
- XXXth General Assembly of the International Astronomical Union, Відень, Австрія, 20–31 серпня 2018 р.
- 6th Gamow International Conference in Odessa: «New Trends in Astrophysics, Cosmology and Radioastronomy after Gamow» and 19th Gamow Summer School: «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology» devoted to 115th anniversary of George (Georgij) Gamow, Одеса, Україна, 11–18 серпня 2019 р.

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 16 наукових працях, серед яких 1 стаття у науковому фаховому виданні України, 3 статті у зарубіжному періодичному науковому виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, 12 праць, які засвідчують апробацію матеріалів

дисертації: 2 статті за матеріалами конференції були включені до наукометричної бази даних Scopus; 10 тез доповідей наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатку. Загальний об'єм роботи складає 164 сторінки (6.8 авторських аркушів), з них текст основної частини становить 120 сторінок (5.0 авторських аркушів). Вона містить 39 рисунків, 12 таблиць. Список використаних джерел містить 182 найменування.

Автор вдячна науковому керівнику д. ф.-м. н., с.н.с. Федорову П. М. за допомогу у постановці задач та обговоренні отриманих результатів, колективу НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за допомогу при обговоренні результатів дисертації, чоловікові Величко Сергію Федоровичу за терпіння та підтримку на всіх етапах навчання та захисту дисертації, доньці Соні за те, що є джерелом натхнення.

РОЗДІЛ 1

РОЗВИТОК КІНЕМАТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЛАКТИКИ

Розуміння походження та еволюції галактик – одна з головних цілей сучасної астрономії. Одним із способів вирішення цієї проблеми є кінематичне дослідження просторових швидкостей зірок нашої Галактики. Кінематика – розділ зоряної астрономії, що вивчає закономірності руху об'єктів в Галактиці різними методами. Основним матеріалом для вивчення кінематики Галактики є астрометричні параметри: положення, власні рухи, променеві швидкості, паралакси. Крім того, додаткову інформацію про приналежність зірок до тієї чи іншої підсистеми можна отримати, маючи, наприклад, зоряні величини в декількох фотометричних смугах і вміст деяких хімічних елементів. Якість кінематичних досліджень визначається, головним чином, якістю спостережних даних, яка останнім часом значно поліпшилась.

1.1 Астрометричні параметри

1.1.1 Положення та власні рухи зірок

До початку XVIII століття астрономи вважали, що зірки є нерухомими об'єктами. У 1717 році вийшла стаття англійського астронома Едмунда Галлея [1], в якій автор заявив про зміщення на небесній сфері положень Сіріуса, Арктура і Альдебарана більш ніж на пів градуса за час, що минув з моменту спостереження цих зірок давньогрецькими астрономами Тімохарісом, Гіпархом та Клавдієм Птолемеєм. Згідно з сучасними оцінками власних рухів цих зірок, за 1800 років їх положення повинні були зміститися приблизно на $40'$, $68'$ та $6'$, відповідно. Висновки Галлея про зміщення положень Сіріуса і Арктура виявилися вірними. Помилкове визначення величини зміщення Альдебарана досі залишається загадкою. Проте, вихід статті Галлея вважається моментом виявлення власних рухів зірок. Згодом точність визначення положень зірок поступово поліпшувалася за рахунок розвитку інструментів і методів спостережень.

Регулярні спостереження і каталогізація положень зірок проводилися з початку XIX століття в таких обсерваторіях, як Грінвічська, Паризька, Пулковська, Кенінсбергська, Військово-морська США та інші, що призвело до створення поколінь фундаментальних каталогів зірок. Перший фундаментальний каталог був створений Бесселем на основі спостережень Баддлєя протягом 1750–1765 років і опублікований в 1818 році [2]. Він містить положення більше ніж 3000 зірок, для багатьох з яких були отримані також власні рухи. Для приведення положень зірок на одну епоху (1755 рік) Бессель винайшов нові методи редукції, за допомогою яких враховувалися ефекти аберації і нутації, а також інструментальні похибки [3, 4]. Ньюком, що дав початок «американській» серії фундаментальних каталогів, назвав Бесселя засновником німецької школи астрометрії. Ньюком, використовуючи методи Бесселя, в 1898 році опублікував каталог 1297 зірок [5]. Американська серія каталогів увінчалася створенням Генерального каталогу Боса (General catalogue), який містить 33342 зірок на епоху 1950.0 [6] та каталогу 5268 стандартних зірок Морган на епоху 1950.0 [7].

Німецька серія фундаментальних каталогів відома під аббревіатурою «FK» (Fundamental Katalog). Останнім загальноприйнятим фундаментальним наземним каталогом став FK5 [8], що містить всього 1535 зірок. Він відтворював систему відліку FK5, яка визначалася динамічно, оскільки була прив'язана до екліптичної та земної екваторіальної системи координат. Ця первинна система потім розширювалася в область слабких зірок і відповідно відтворювалася великим числом зірок (наприклад, каталог PRM, що містить 370 тисяч зірок, [9]). Основними осями, які задають систему відліку, були напрямок осі обертання Землі і напрямок на точку весняного рівнодення, яка знаходиться в точці перетину площини екліптики і земного екватора.

Положення зірок в цій системі відліку задавалися двома координатами: прямим схиленням α , початком відліку якого є точка весняного рівнодення, і схиленням δ , що веде відлік від екваторіальної площини. Система відліку, що задається таким чином, не є нерухомою, а обертається внаслідок місячно–сонячної і планетної прецесії, нутації. Щоб перейти до системи, що не

обертається, необхідно «заморозити» цю обертальну систему шляхом фіксації її екватора і точки весняного рівнодення в конкретний момент часу, так звану стандартну епоху. Ця процедура виконує перерахунок координат зірок, що змінюються внаслідок прецесії, нутації, зоряної аберації і паралакса, а отже вимагає використання моделей цих астрономічних сталих. Для приведення положень зірок на задану епоху необхідно знати ще й їхні власні рухи. Метою будь-якого фундаментального каталогу є відтворення інерціальної системи координат настільки точно, наскільки це можливо. При цьому стала місячно–сонячної прецесії p є ключовим параметром, і точність реалізації системи відліку сильно залежить від точності визначення p .

В середині ХХ століття стало ясно, що наземні астрометричні спостереження в оптичному діапазоні досягли своєї межі точності – 0.2 секунд дуги (сд) [10]. Два головні чинники перешкоджали подальшому поліпшенню точності: розмиття атмосферою Землі зображень зірок і деформація телескопів силою тяжіння. Ситуацію поліпшив новий метод, розроблений Матвеєнко [11], – радіоінтерферометрія з наддовгими базами (РНДБ), який надал можливість досягти точності визначення положень квазарів і інших позагалактичних джерел (наприклад, АЯГ) 1–0.5 мілісекунд дуги (мсд). Завдяки спостереженням квазарів – далеких позагалактичних джерел, стало можливо більш просто і точно реалізувати інерціальну систему відліку. Вона має дві основні переваги: 1) квазари практично не мають власних рухів, тобто їх взаємні положення практично незмінні; 2) нова система відліку не залежить від прецесійно–нутаційного руху Землі.

У 1997 році за рішенням Генеральної Асамблеї Міжнародного астрономічного союзу (ГА МАС) була прийнята, а з 1 січня 1998 року введена в якості стандарту Міжнародна небесна система відліку ICRS (International Celestial Reference System), що змінила концепцію системи відліку FK5. Початок її відліку збігається з барицентром Сонячної системи. Перша її реалізація була побудована за допомогою 295 позагалактичних радіоджерел, рівномірно розподілених по всій небесній сфері і які мали точність положень близько 10 мсд. Значного поліпшення точності спостережень в оптичному діапазоні довжин хвиль вдалося досягти за рахунок розміщення телескопів

поза атмосферою Землі.

Перший астрометричний космічний телескоп був запущений в серпні 1989 року в рамках місії HIPPARCOS. За 37 місяців роботи він провів мільйони вимірювань положень зірок. В результаті в 1998 році вийшов каталог, що містить положення 118218 зірок, виміряних з точністю близько 1 мсд [12, 13], а також власні рухи і паралакси зірок. Крім того, на основі цих спостережень були створені більш великі за кількістю зірок, але менш точні каталоги Tycho-1 і Tycho-2, які містять 1 і 2.5 мільйони об'єктів, відповідно. Деякі середні характеристики каталогів HIPPARCOS і Tycho-2 наведені в табл. 1.1. Таким чином, першою оптичною реалізацією системи ICRS став каталог HIPPARCOS. Ця реалізація отримала назву HCRF (Hipparcos Celestial Reference Frame).

Крім оцінки якості астрометричних параметрів у випадковому відношенні, дуже важливим фактором для їх використання в кінематичних дослідженнях є відсутність систематичних обертань системи координат, що задається каталогом, по відношенню до ICRS. За оцінками авторів каталогу HIPPARCOS його система узгоджена з системою ICRF з точністю ± 0.6 мсд і не обертається відносно ICRF в межах ± 0.25 мсд p^{-1} .

Наступним кроком в космічних астрометричних спостереженнях став запуск 19 грудня 2013 року телескопа в рамках космічної місії *Gaia*. Метою цього проекту є побудова дуже точної тривимірної карти просторового розподілу і руху ~ 1 мільярда зірок, що знаходяться не тільки в нашій Галактиці, а й за її межами. В рамках першого релізу *Gaia* DR1, що вийшов 14 вересня 2014 року, сформованого з спостережень на протязі 14 місяців, було опубліковано два набори даних:

1) Каталог TGAS (Tycho–Gaia Astrometric Solution), отриманий в рамках основного рішення для об'єктів, які є спільними з об'єктами HIPPARCOS і Tycho-2. Він містить положення, власні рухи і паралакси 2057050 зірок. Середня точність визначення астрометричних параметрів TGAS порівнянна з точністю, досягнутою в HIPPARCOS.

2) Вторинний набір даних *Gaia* DR1 (виключаючи зірки TGAS) містить лише положення 1140622719 зірок.

25 квітня 2018 року на основі 22 місячних спостережень був опублікований другий реліз *Gaia* DR2, набагато об'ємніший за перший. Загальна кількість об'єктів становить 1692919135, серед них 1331909727 зірок мають положення, власні рухи і паралакси, а 7224631 ще і променеві швидкості. Крім того, для частини зірок наведені такі астрофізичні параметри, як ефективна температура, радіус, світимість. Точність параметрів у порівнянні з *Gaia* DR1 зросла на порядок. Згідно з [14], опорний фрейм *Gaia*-CRF2 в області слабких зоряних величин ($G \sim 19^m$) узгоджується з ICRF з точністю краще ніж 0.02 мсд на епоху J2015.5 і не обертається відносно ICRF з точністю 0.02 мсдр^{-1} . У яскравій частині ($G < 12^m$) узгодження *Gaia*-CRF2 з ICRF краще 0.3 мсд, а відносне обертання може становити 0.15 мсдр^{-1} . *Gaia*-CRF2 узгоджена з прототипом нової реалізації в радіодіапазоні – ICRF3, і повинна в оптичному діапазоні до моменту виходу фінального релізу *Gaia* замінити систему HCRF.

До кінця роботи місії *Gaia* заплановано випустити ще третій реліз, що складається з двох частин: *Gaia* EDR3 (Early DR3) і DR3, а також фінальний реліз *Gaia* DR4, в якому прогнозована точність визначення астрометричних параметрів буде на мікросекундному рівні.

Таблиця 1.1

Порівняльні характеристики каталогів, отримані при космічних спостереженнях HIPPARCOS і Gaia

Каталог	HIPPARCOS	Tycho-2	TGAS	<i>Gaia</i> DR1	<i>Gaia</i> DR2*
Середня епоха	1991.25	2000.0	2015.0	2015.0	2015.5
Період спостережень, міс	37	37	14	14	22
Кількість зірок	118218	2539913	2057050	1140622719	1331909727
Максимальна зор. велич., m	12.4	12.5	21	12.4	21
Повнота, m	7.3 – 9	11.0	11.0	не визначена	12–17
Середня точність:					
положень, мсд	<1	10–100	0.3	≈ 10	0.02–2
власних рухів, мсдр^{-1}	<1	≈ 2.5	1		0.07–3
паралаксів, мсд	≈ 1		0.3		0.02–2
фотометрії, m	≈ 0.002	0.013–0.10	0.001–0.03	0.001–0.03	0.002–0.2
Узгодження з ICRS, мсд	0.6	0.6	0.1		0.3
Відхилення власних рухів від інерціальних, мсдр^{-1}	0.25	0.25	0.03		0.15

* - тільки зірки, для яких визначені 5 астрометричних параметрів

Крім каталогу *Gaia*, існує ще кілька сучасних масових каталогів, що містять власні рухи: PMA ([15], більше 420 мільйонів зірок), UCAC5 ([16],

більше 107 мільйонів зірок), HSOY ([17], 583 мільйонів зірок).

1.1.2 Паралакси зірок

Перший тригонометричний паралакс (зміщення зірки на небі через рух спостерігача разом із Землею навколо Сонця) був визначений для Веги (α Ліри) Василем Яковлевичем Струве в 1837 році [18] на основі спостережень, що почалися в 1824 році в Дерптській обсерваторії. Він отримав значення $0''.125$, тоді як сучасне значення становить 130.23 ± 0.36 мсд. Незабаром після цього, в 1838 році, Фрідріх Бессель [19] визначив паралакс зірки 61 Лебедя: $0''.3136 \pm 0''.0202$ (сучасне значення 286.1457 ± 0.0590 мсд), а потім Томас Хендерсон в 1839 році виміряв паралакс найближчої до Землі зірки α Центавра: $1''.16 \pm 0''.11$ (зараз 754.81 ± 4.11 мсд). Струве і Бесселю вдалося отримати близькі до реальних значення паралаксів завдяки використанню високоточного мікрометра, створеного Йозефом Фраунгофером.

Завдяки встановленню в обсерваторіях Європи і Америки оптики, сконструйованої Фраунгофером, а також використанню фотопластинок, поступово кількість вимірюваних паралаксів зростала. У 1900 році Каптейн склав компіляційний каталог паралаксів 58 зірок [20], як за кінематичними спостереженнями на обсерваторії Геттінген (Німеччина), так і за спостереженнями, виконаними на інших обсерваторіях: на мисі Доброї Надії (Cape of Good Hope, Південна Африка [21]), в Єльському університеті (США), в Лейпцигу (Німеччина) та в інших. До 1910 року були виміряні паралакси 365 зірок [22].

У той же час Франк Шлезінгер в 1903 році почав програму визначення паралаксів зірок на Йоркській обсерваторії. В результаті в 1924 році був опублікований Генеральний каталог паралаксів близько 2000 зірок [23]. Потім вийшли доповнені версії цього каталогу в 1935 і 1952 (з доповненням в 1963) роках. Четверта версія Генерального каталогу була створена в 1995 році ван Альтеної ([24], <https://cdsarc.unistra.fr/viz-bin/cat/I/238A>) та, в порівнянні з попередньою версією 1963 року, тобто за 32 роки, було додано всього лише 1722 об'єктів. У каталозі представлені паралакси 8112 зірок

із середньою точністю визначення $0''.004$. При цьому кількість зірок з надійно визначеним паралаксом (наприклад, з відносною похибкою 10 %) становила всього ~ 2000 . Точність спостережень з поверхні Землі не давала можливості отримувати високоточні паралакси і значно нарощувати їх кількість. Крім того, спостереження на різних інструментах приводили до виникнення систематичних помилок визначення. Звичайно, тригонометричні паралакси були тоді не єдиним способом оцінки відстаней до зірок (існують ще спектроскопічні, фотометричні, динамічні і статистичні паралакси), проте геометричні виміри паралакса є вільними від впливу будь-яких фізичних припущень, а всі інші методи повинні бути відкалібровані за тригонометричними паралаксами.

Кардинально ситуація змінилася з виходом в 1997 році каталогу HIPPARCOS, одержаного з космічних спостережень, а потім каталогів в рамках місії *Gaia* (див. Розділ 1.1.1).

1.1.3 Геліоцентричні відстані до зірок

Починаючи з роботи Стремберга 1927 року [25], багато авторів відзначають, що через присутність помилок визначення паралаксів ϖ обчислення відстаней до зірок через співвідношення $1/\varpi$ є некоректним і призводить до систематичної похибки, особливо коли відносна похибка $\varsigma_{\varpi}/\varpi > 0.2$ [26]. Якщо припустити, що паралакс виміряно з похибкою $\varpi \pm \varsigma_{\varpi}$, то за визначенням Гауссового розподілу, з ймовірністю 95.4 % значення паралакса знаходиться або в інтервалі $1/r = [\varpi - 2\varsigma_{\varpi}, \varpi]$, або в інтервалі $1/r = [\varpi, \varpi + 2\varsigma_{\varpi}]$. При трансформації ϖ в $r = 1/\varpi$ ці інтервали перетворюються в такий спосіб: $r = [1/\varpi, 1/(\varpi - 2\varsigma_{\varpi})]$ і $r = [1/(\varpi + 2\varsigma_{\varpi}), 1/\varpi]$. Таким чином видно, що ці інтервали однакові для $1/r$ і неоднакові для r . Наприклад, при $\varpi = 1$ мсд і $\varsigma_{\varpi} = 0.3$ мсд (тобто відносна похибка $\varsigma_{\varpi}/\varpi = 0.3$), інтервали такі: $r = [1, 2.5]$ і $r = [0.62, 1]$ (в кпк). Досить часто при обчисленні відстаней використовується байєсівський підхід. Та і в цьому випадку правильність визначення відстаней не гарантована, оскільки необхідно

обирати апріорні припущення, що є нетривіальним завданням. Відстані за допомогою байєсівського підходу з різними апріорними припущеннями були обчислені для всіх зірок каталогу TGAS ([27], https://www2.mpia-hd.mpg.de/homes/calj/tgas/_distances/main.html), для 7.2 мільйонів зірок з *Gaia* DR2 з променевими швидкостями ([28], [29], <https://zenodo.org/record/1268353/#.Xsy0sjozZPY>), для всіх об'єктів *Gaia* DR2 ([30], <http://gaia.ari.uni-heidelberg.de/tap.html>, https://www2.mpia-hd.mpg.de/~calj/gdr2/_distances/main.html). Отримані результати не завжди узгоджуються між собою.

1.1.4 Променеві швидкості зірок

Променева швидкість – складова просторової швидкості зірки вздовж променю зору. Променева швидкість є астрометричним параметром, проте підхід до її визначення має фізичну основу: її визначають по зсуву ліній в спектрах зірок щодо їх справжніх положень, який виникає через ефект Доплера. Вперше зміщення спектральних ліній в спектрах зірок вдалося виміряти Герману Карлу Фогелю і Юліусу Шейнеру завдяки створенню ними вдосконаленого спектрографа з використанням фотопластинок. Протягом 1888–1892 років вони систематично фотографували спектри зірок, в результаті чого, вперше визначили променеві швидкості зірок, і в 1895 році опублікували каталог променевих швидкостей 52 зірок [4].

На ГА МАС, що проходила в Брюсселі в 1919 році, було прийнято рішення про об'єднання зусиль і кооперацію обсерваторій усього світу для визначення і створення загального каталогу променевих швидкостей. До 1920 року були виміряні променеві швидкості понад 2000 зірок на 15 обсерваторіях. Цей список поповнювався зі швидкістю 250 нових зірок на рік ([31], сторінка 107). Однак не існувало схеми приведення спостережень до однієї системи. Багато хто розумів, що при комбінуванні результатів спостережень на різних обсерваторіях необхідно вводити поправки і ваги. Питання про калібрування даних було вперше підняте Кемпбеллом в 1925 році на ГА МАС, що проходила в Англії. На ГА МАС 1928 року в Лейдені

комітет під керівництвом Фроста Мура і Спенсера Джонса розробив схему призначення корекцій і ваг променевих швидкостей стандартних зірок.

У 1932 році Джозефом Муром був опублікований Генеральний каталог променевих швидкостей зірок, туманностей і скупчень [32], який містить дані 6739 зірок, серед яких променеві швидкості наведені для 6354 об'єктів. Променеві швидкості були отримані в 19 обсерваторіях і приведені за допомогою систематичних корекцій, що залежать від спектрального класу, в Лікську систему відліку.

У 1930–1950-х роках найбільш активна робота по визначенню променевих швидкостей зірок велася на обсерваторіях Маунт Вільсон, Мак-Доналд, Лікській, Йеркській (США), Доміньон (Канада), Пулковській, Сімеїзській (СРСР). В рамках ГА МАС 1948 р. в Цюріху було прийнято рішення створити нову версію Генерального каталогу Мура. В результаті в 1953 р. Ральфом Вільсоном був створений Генеральний каталог променевих швидкостей зірок [33], а його система відліку була прийнята за стандарт. Точність променевих швидкостей оцінювалася на рівні менше ніж 2 км с^{-1} . У 1957 році МАС затвердив список 60 зірок–стандартів для калібрування променевих швидкостей [34], в 1973 році до цього списку була додана 21 слабка зірка [35]. З цього списку пізніше було виключено 9 змінних зірок [36].

Для коректного кінематичного аналізу необхідні дані, вільні від систематичних помилок. Для вирішення цієї проблеми Гончаровим [37] в 2006 р. був створений компіляційний каталог PCRV (Pulkovo Compilation of Radial Velocities) променевих швидкостей для 35495 зірок HIPPARCOS, що рівномірно покривають небесну сферу та мають геліоцентричні відстані до 500 пк. Для його створення було використано 203 каталоги променевих швидкостей. Середня похибка визначення променевих швидкостей PCRV оцінюється в 0.7 км с^{-1} .

За допомогою спектрометра на космічному телескопі Gaia до кінця місії планується виміряти променеві швидкості 150 мільйонів зірок до 17 зоряної величини [38]. В каталозі *Gaia* DR2 представлені променеві швидкості 7.2 мільйонів зірок спектральних класів FGK. Систематичні похибки варіюються від 0.1 км с^{-1} при $G_{\text{RVS}} < 9^{\text{m}}$ до 0.5 км с^{-1} при

$$G_{\text{RVS}} = 11^{\text{m}}.75.$$

Кінематичний аналіз окремо за власними рухам і променевими швидкостями є корисним інструментом для виявлення систематичних відмінностей цих даних.

1.2 Зміна уявлень про кінематику зірок

Уявлення про кінематику зірок змінювалися поступово, у міру накопичення і поліпшення точності астрометричних даних: власних рухів, паралаксів, а пізніше і променевих швидкостей.

1.2.1 Рух Сонця

Вивчення руху Сонця в просторі було історично першим завданням зоряної кінематики. У 1748 році Джеймс Брадлей вперше припустив [39], що власні рухи зірок можуть бути викликані різними причинами, в тому числі і рухом Сонця в просторі. У 1783 році Вільям Гершель, аналізуючи власні рухи 13 яскравих зірок, виявив, що Сонце разом із сонячною системою рухається в напрямку точки, яка знаходиться поблизу зірки λ Геркулеса ($A_{\odot} = 263^{\circ}$, $D_{\odot} = +26^{\circ}$, [40]). При цьому він зазначає, що, можливо, ця точка вибрана не найкращим чином, а в своєму листі Олександру Вільсону ([41], стор. 87) Гершель повідомляє, що апекс Сонця знаходиться між зірками λ і ρ Геркулеса (тобто в діапазоні екваторіальних координат $A_{\odot} = 260^{\circ} - 263^{\circ}$, $D_{\odot} = +26^{\circ} - +37^{\circ}$). Метод Гершеля полягав в нанесенні на небесну сферу великих кіл, які визначаються напрямком власних рухів кожної зірки, і знаходженні точки перетину кожної пари цих кіл. Припускаючи, що рух зірки, який спостерігається, обумовлений виключно рухом Сонця, всі кола повинні перетинатися в одній точці, яка називається апексом. Однак насправді координати точок перетину різних пар великих кіл відрізняються (тому що кожна зірка має в своєму русі пекулярну складову), причому неможливо однозначно обчислити найбільш ймовірну точку.

Пізніше Фрідріх Вільгельм Бессель в 1818 році оголосив, що немає ніяких доказів того факту, що Сонце рухається в напрямку сузір'я Геркулеса.

Джон Гершель також спростував результати свого батька Уильяма [42], [43]. І тільки в 1837 році Фрідріх Аргеландер [44], використовуючи власні рухи 390 зірок, підтвердив, що Сонце рухається відносно них в напрямку $A_{\odot} = 260^{\circ} 50' \pm 3^{\circ} 28'$, $D_{\odot} = +31^{\circ} 7' \pm 2^{\circ} 20'$. З цього моменту реальність руху Сонця більше не піддавалася сумніву. Координати апекса визначалися багато разів, проте різні автори отримували різні значення координат апекса ([42], рисунок на стор. 206).

Більш зручний і точний метод визначення не тільки напрямку, а й швидкості руху Сонця відносно зірок був запропонований англійським астрономом Джорджем Ері [45], [46] і російським астрономом Маріаном Альбертовичем Ковальським ([47], ця робота була опублікована французькою мовою, а перекладена на російську мову Д. Я. Мартиновим [48]). Обидва автори незалежно один від одного вивели систему рівнянь для власних рухів зірок, за допомогою якої можна визначити швидкість руху Сонця $X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}$ щодо центроїда зірок і координати апекса.

Ці рівняння називаються рівняннями Ковальського – Ері (або Ері – Ковальського в зарубіжній науковій літературі). Ковальський, використовуючи власні рухи 3136 зірок з каталогу Бадделя, визначив «найбільш надійні при нинішньому стані наших знань законів зірок» значення координат апекса Сонця, а також його швидкості руху (в кутових секундах за рік):

$$A_{\odot} = 262^{\circ} 1', D_{\odot} = +38^{\circ} 48',$$

$$X_{\odot} = -4''.530, Y_{\odot} = -0''.635, Z_{\odot} = +3''.679, \mu = 5''.87.$$

При цьому він зазначив, що значення $A_{\odot}, D_{\odot}$ залежать від набору зірок, який використовувався.

Ері використав власні рухи 113 зірок і отримав:

$$A_{\odot} = 261^{\circ} 29', D_{\odot} = +24^{\circ} 44',$$

$$X_{\odot} = +0''.257, Y_{\odot} = +1''.717, Z_{\odot} = -0''.800, \mu = 1''.91.$$

Першим, хто визначив компоненти руху Сонця і координати його апекса

за променевими швидкостями, був Вільям Кемпбелл [49]. Він вивів рівняння та, використовуючи променеві швидкості 280 зірок, отримав:

$$A_{\odot} = 277^{\circ} 30' \pm 4^{\circ} 8', D_{\odot} = +19^{\circ} 58' \pm 5^{\circ} 9', V_{\odot} = -19.89 \pm 1.52 \text{ км с}^{-1}$$

При порівнянні з результатами, отриманими за власними рухам зірок іншими авторами, Кемпбелл відзначає, що рух Сонячної системи в просторі – величина відносна. Результати, отримані для різних груп зірок, можуть помітно відрізнятися (див., наприклад, [42], [50]), що відображає відмінності в їх кінематичних властивостях. У зв'язку з цим, Еддінгтон писав в 1938 році [51]: «Здається астрономічним законом той факт, що ніхто не отримує таке ж значення апекса Сонця, як будь-хто інший ... навіть зараз невизначеність становить близько 5° .

У спробах знайти закономірність, Льюїс Бос [52] і Бенджамін Бос [53, 54] досліджували рух Сонця відносно зірок різного спектрального класу від B до M . Вони помітили, що рух Сонця щодо зірок ранніх і пізніх спектральних класів розрізняється як за напрямком, так і по модулю швидкості. Так, наприклад, в роботі [53] було знайдено, що відносно зірок спектральних класів $K - M$ Сонце рухається зі швидкістю 21.9 км с^{-1} в напрямку $A = 274^{\circ}.5, D = 39^{\circ}.5$, тоді як відносно зірок $A - F$ швидкість Сонця складає 16.3 км с^{-1} а напрямок $A = 267^{\circ}.9, D = 28^{\circ}.5$. Ці результати були отримані з використанням положень і власних рухів 6188 зірок до 7.0 зоряної величини з каталогу Preliminary General Catalogue, складеного Льюїсом Босом і опублікованого в 1910 році [55]. В роботі [56] була отримана залежність швидкості руху Сонця відносно зірок різних спектральних класів за променевими швидкостями 1274 зірок з каталогу променевих швидкостей Кемпбелла [57, 58, 59]. В результаті був підтверджений факт збільшення модуля швидкості Сонця відносно вибірок зірок при переході від ранніх до пізніх спектральних класів. Так по $K - M$ зіркам $V_{\odot} = 21.9 \text{ км с}^{-1}$, тоді як по $A - F$ зірках $V_{\odot} = 16.3 \text{ км с}^{-1}$, що в точності відповідає результатам, отриманим за власними рухами.

Пізніше в ряді робіт було відзначено, що зірки, які мають великі

просторові швидкості (більше $65\text{--}80 \text{ км с}^{-1}$), показують асиметрію своїх рухів. Так, з аналізу рухів зірок з використанням променевих швидкостей Адамсом і Кухельшуттером було показано [60], що серед високошвидкісних зірок переважають такі, які мають негативні значення променевих швидкостей, тоді як зірок з великими за значенням позитивними променевими швидкостями менше 25 %. Променева швидкість вважається позитивною, якщо зірка віддаляється від спостерігача і негативною, якщо наближається.

З аналізу як променевих швидкостей, так і власних рухів зірок декількома авторами було показано, що в проекції на галактичну площину зірки з великими по модулю швидкостями не зустрічаються в діапазоні довгот l від 40° до 140° (центр цієї «області уникнення» знаходиться поблизу $l \sim 90^\circ$) і рухаються в середньому в напрямку $l \approx 270^\circ$ (наприклад, [61, 62, 63]). Аналогічний висновок був зроблений Босом, Реймондом і Вільсоном з використанням просторових швидкостей зірок [64].

Густав Стремберг в 1924 році, використовуючи власні рухи близько 2100 зірок з відомими паралаксами, розділив їх на 12 груп і вперше наніс на малюнок проекцію еліпсоїдів швидкостей цих груп на галактичну площину [65]. В результаті він побачив, що чим більше швидкість центроїда вибірки зірок відносно Сонця, тим більше дисперсія швидкостей зірок, що входять в цю вибірку. Провівши пряму лінію через усі отримані центроїди, Стремберг зазначив, що вектор зміщення швидкостей центроїдів має найбільшу проекцію на галактичну вісь y , тоді як його проекції на осі x, z значно менші. Ця пряма отримала назву «вісь асиметрії Стремберг». У 1925 році Стремберг виконав цю ж процедуру, використовуючи променеві швидкості зірок [66].

Сам ефект систематичного зсуву швидкостей центроїдів щодо напрямку руху Сонця отримав назву асиметричного дрейфу. Це поняття, ймовірно, було введено Ліндبلادом [67]. Відзначимо, що поняття «дрейф» спочатку використовував Каптейн, коли розвивав свою теорію двох зоряних потоків, а Еддінгтон, розробляючи в 1906 р. [68] математичний апарат для перевірки теорії Каптейна, визначив поняття «дрейф зірок» як «систему зірок,

швидкості яких щодо деякої системи відліку розподілені досить випадковим чином. Швидкість дрейфу – швидкість вищевказаної системи відліку». Зараз під поняттям «асиметричний дрейф» мають на увазі різницю між швидкістю обертання навколо центра Галактики центроїда вибірки зірок і локального стандарту спокою.

Вирішуючи диференціальні рівняння Джинса [69] для опису дисперсії швидкостей зоряної системи, що знаходиться в динамічній рівновазі, Ліндبلاد [70] в 1925 році отримав теоретичний квадратичний зв'язок між дисперсією швидкостей і середньою швидкістю обертання навколо центра Галактики, яку можна було порівняти зі спостереженнями Стремберга. Згідно з припущенням Ліндблада, нульова дисперсія швидкостей повинна відповідати максимальній швидкості обертання по круговій орбіті навколо центра Галактики.

В 1950 році Паренаго [71] досліджуючи кінематичні характеристики зірок головної послідовності (ГП), такі як швидкість руху Сонця $V_{\odot}$, координати апекса Сонця $L_{\odot}, B_{\odot}$, дисперсії залишкових швидкостей $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ (в проекції на осі x, y, z , відповідно), в залежності від спектрального класу в діапазоні від $B0$ до $M9$, виявив певну закономірність, причому ця закономірність не носить безперервний характер, а показує розрив безперервності. Паренаго виявив, що зірки ГП за своїми властивостями поділяються на дві групи: $O-F$ і $G-M$. Усередині кожної групи кінематичні властивості залишаються без істотних змін, а в діапазоні $F-G$ відбувається перехід від першої групи до другої. Точка, де ця залежність виходить на плато, отримала назву точки розриву Паренаго. Вона знаходиться на $B-V \simeq 0.61^m$ [72], що відповідає $J-K_S \simeq 0.35^m$ (таблиця Е. Мамаджека http://www.pas.rochester.edu/~emamajek/EEM_dwarf_UBVIJHK_colors_Teff.txt).

У 1982 році Делае [73] у своїй лекції астрономічному співтовариству в Страсбурзі вперше звернув увагу на вік зірок як один з параметрів, що впливають на їх кінематичні властивості, щонайменше в сонячній околиці.

З появою високоточних даних, отриманих за допомогою космічного телескопа HIPPARCOS (головним чином, власних рухів і паралаксів), Денен і

Бінней [72] детальніше досліджували кінематичні характеристики зірок ГП в залежності від показника кольору $B - V$. За вибіркою близько 12000 зірок ГП з найбільш точними паралаксами ($\sigma_{\varpi}/\varpi < 0.1$) автори підтвердили наявність точки розриву Паренаго, перевизначили значення ключових кінематичних параметрів, дисперсію швидкостей зірок в залежності від показника кольору, а значить і від їх віку.

Таким чином, на даний момент прийнято наступну модель, яка пояснює спостережні факти. Зірки, народжуючись в диску Галактики, на початку життя мають максимальні значення компоненти швидкості $V_{\text{rot}} = -V_{\Theta}$ (тобто в напрямку обертання Галактики). З часом, зі збільшенням кількості оборотів по орбіті, дисперсія швидкостей зірок збільшується за рахунок багаторазових збурень гравітаційним потенціалом Галактики, а компонента вектора швидкості, що співпадає з напрямом обертання навколо центра Галактики, зменшується. Виділивши зірки ГП і обчислюючи їх кінематичні параметри в залежності від показника кольору, ми отримуємо залежність від віку зірок: чим більш червоні зірки, тим вони в середньому старіші. Цей ефект пояснюється тим, що час життя і час знаходження на ГП більш блакитних і масивних зірок менше, ніж більш червоних і менш масивних. Наприклад, зірка з масою $2M_{\odot}$ (спектральний клас $F6$, $(J - K_S)_0 = 0.26^{\text{m}}$) знаходиться на стадії ГП ~ 1.25 мільярда років, а зірка з масою $1 M_{\odot}$ ($G2$, $(J - K_S)_0 = 0.37^{\text{m}}$) – ~ 10 мільярдів років. Зірки, що знаходяться правіше точки розриву Паренаго на діаграмі показник кольору – абсолютна зоряна величина, мають приблизно постійний середній вік, тому всі кінематичні параметри в цьому діапазоні знаходяться на плато.

1.2.2 Обертання галактики Чумацький Шлях

Ідея про те, що галактика Чумацький Шлях обертається, була висловлена ще У. Гершелем. Для перевірки цієї гіпотези в 1883 р. Ф. Ранкеном [74] і Ф. Болтом [75] були зроблені спроби визначити величину кутової швидкості обертання Галактики $d\omega$ на відстані Сонця. Додавши в рівняння,

які описують рух Сонця, компоненти

$$\frac{\cos P \cos \sigma d\omega}{\varpi} - \text{за прямим сходженням, } \frac{\sin P \cos \sigma d\omega}{\varpi} - \text{за схиленням, (1.1)}$$

Ранкен за власними рухами 250 зірок з каталогу Аргеландера «Боннський огляд» і 80 зірок з дисертаційної роботи Л. де Болла визначив $d\omega = +5.645 \pm 1.288 \text{ мсдр}^{-1}$ (по компоненті власного руху уздовж прямого сходження) і $+2.385 \pm 1.464 \text{ мсдр}^{-1}$ (уздовж схилення). Ф. Болт в своїй дисертації [75] за власними рухами зірок з каталогів Лаланде [76] і Шіллеруп [77] отримав три узгоджених між собою значення кутової швидкості обертання Галактики: $d\omega = -3.55, -4.77, -4.96 \text{ мсдр}^{-1}$, але вони не узгоджуються з результатом, отриманим Ранкеном. У 1887 році Л. Струве за даними пулковського каталогу отримав значення $d\omega = -4.13 \pm 4.24 \text{ мсдр}^{-1}$ [78]. Незважаючи на те, що ці значення узгоджуються з отриманими Болтом, Струве прийшов до висновку, що внаслідок точності висхідних даних, яка існувала на той момент, говорити з упевненістю про існування обертання Галактики не можна.

З часом точність спостережень росла (див, наприклад, [79]), і в першій половині XX століття вже були накопичені відомості про систематичні рухи різних груп зірок. Каптейн відкрив зоряні потоки, та як не парадоксально, це призвело до деякого застою в розвитку теорії обертання Галактики, оскільки він, маючи видатний авторитет, був противником цієї теорії. Тільки в 1922 році Каптейн спробував узгодити свої результати, які стосуються зоряних потоків, з теорією обертання, припустивши, що в галактичній системі є дві групи зірок, які обертаються в двох взаємно протилежних напрямках. Шварцшильд виявив еліпсоїдальний розподіл швидкостей зірок, що знаходяться в сонячній околиці.

Крім того, були відомі й інші закономірності в рухах зірок. Наприклад, астрономи знали, що змінні зірки типу RR Ліри, а також кульові скупчення мають систематичний рух близько $200\text{--}300 \text{ км с}^{-1}$ відносно яскравих зірок. Пекулярні швидкості перших складають близько 80 км с^{-1} , що в кілька разів більше пекулярних швидкостей яскравих зірок. Б. Ліндبلاد в 1926 році сприяв розвитку теорії обертання Галактики, запропонувавши гіпотезу,

яка пояснює сукупність цих фактів [80]. Він припустив, що Галактика складається з підсистем, кожна з яких є симетричною відносно спільної осі симетрії, при цьому кожна підсистема перебуває в своїй динамічній рівновазі. Всі підсистеми, кожна зі своєю швидкістю, обертаються навколо їх спільної осі.

Опираючись на гіпотезу Ліндблада і адаптуючи формули для гравітаційного потенціалу, Я. Оорт в 1927 році вивів формули для отримання швидкості обертання групи зірок, що знаходяться в сонячній околиці, навколо центра Галактики [81]. Ці рівняння називаються моделлю Оорта – Ліндблада. Нехай R і r – відстані від центра Галактики і від Сонця до зірки. Припустимо також, що величина r/R мала, щоб компонентами другого порядку і вище можна було знехтувати. Тоді швидкість зірок, викликана обертанням Галактики, дорівнює

$$\begin{aligned} rA \sin 2(l - l_0) & \text{ уздовж променя зору,} \\ rA \cos 2(l - l_0) + rB & \text{ в тангенціальній площині,} \end{aligned}$$

де l_0 – довгота центра Галактики, яка в сучасній галактичній системі координат дорівнює нулю. Параметри A і B , приведені нижче, отримали назву постійних Оорта.

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{\text{rot}}}{R_{\odot}} - \frac{dV_{\text{rot}}}{dr} \Big|_{R_{\odot}} \right); \quad B = -\frac{1}{2} \left(\frac{V_{\text{rot}}}{R_{\odot}} + \frac{dV_{\text{rot}}}{dr} \Big|_{R_{\odot}} \right), \quad (1.2)$$

де $R_{\odot}$ – відстань від центра Галактики до Сонця, V_{rot} – швидкість обертання центроїда зірок навколо центра Галактики. Таким чином, маючи власні рухи і променеві швидкості зірок, за допомогою формул 1.2 можна оцінити кутову швидкість обертання системи зірок навколо центра Галактики $d\omega = A - B$, а якщо відома відстань до центра Галактики, то можна оцінити лінійну швидкість $V_{\text{rot}} = R_{\odot} \eta (A - B)$, де $\eta = 4.74$, коефіцієнт переходу від мсдр⁻¹ до кмс⁻¹ кпк⁻¹. Використовуючи променеві швидкості з різних джерел, Оорт зробив висновок про те, що різні групи зірок рухаються навколо віддаленого центра Галактики в одному і тому ж напрямку. Величина швидкості систематично змінюється від блакитних до червоних зірок ГП.

Виходячи з цього, було прийнято, що просторова швидкість кожної зірки, що входить в деяку групу, складається з декількох компонент [82]:

- 1) руху Сонця з протилежним знаком,
- 2) диференціального обертання Галактики і
- 3) пекулярної швидкості зірки відносно центроїда даної групи.

Під центроїдом групи зірок розуміють точку, що співпадає з геометричним центром цієї групи з використанням припущення про еквівалентність мас об'єктів, які входять до неї. При цьому сума пекулярних швидкостей всіх об'єктів відносно їх центроїда дорівнює нулю.

Модель Оорта – Ліндблада була узагальнена К. Ф. Огородніковим [83] і Е. Мілном [84] на неосесиметричний випадок і отримала назву лінійної моделі О – М. Для цього був застосований метод, розроблений Стоксом в 1845 році [85] для опису руху рідини. Едмондсон поширив модель О – М на складові другого порядку [86]. Існує окремий випадок моделі другого порядку – узагальнені рівняння Оорта [87], в яких враховані зміни кутової швидкості обертання зоряної системи тільки в напрямку на центр Галактики.

Метод вивчення поля швидкостей зірок, який зводиться до отримання МНК оцінок параметрів фізичної моделі, методично хороший за умови повноти цієї моделі. Насправді, заздалегідь невідомо, чи є фізична модель повною, тобто включає всі систематичні складові, присутні в полі швидкостей зірок, яке спостерігається. Для вирішення цієї проблеми став використовуватися інший підхід до побудови моделей, який базується на розкладанні поля швидкостей зірок за ортогональними системами функцій, зокрема – за системою векторних сферичних функцій (ВСФ). Такі моделі формально є повними, тобто містять всі систематичні компоненти, які присутні у власних рухах і/або променевих швидкостях зірок.

Апарат ВСФ [88] для аналізу векторних полів, заданих на сфері, впливає з класичного розкладання скалярних полів за базисом скалярних сферичних функцій. Останнє широко застосовується в багатьох областях науки, в тому числі і в астрономії – наприклад, при аналізі гравітаційного потенціалу небесних тіл. Першим, хто запропонував використовувати скалярні сферичні функції для характеристики помилок астрометричних

каталогів, був Броше [89], [90]. Але при цьому аналіз був виконаний окремо для компонент $\Delta \alpha \cos \delta$ і $\Delta \delta$ шляхом розкладання двох скалярних функцій. Вперше для вирішення астрометричних завдань апарат двовимірних векторних сферичних функцій (визначених у тангенціальній площині) був застосований в роботі [91] для аналізу різниць положень і власних рухів зірок каталогів FK5 і HIPPARCOS. В роботі [92] більш розгорнуто описані технічні деталі застосування цього методу для аналізу астрометричних каталогів. Вперше до проблем зоряної кінематики апарат двовимірних ВСФ був застосований в роботах Вітязева і Шуксто [93, 94]. Аналізуючи власні рухи зірок з каталогу HIPPARCOS, автори знайшли відповідності між параметрами моделі О–М і деякими гармоніками розкладання. Крім того, були виявлені позамоделльні значущі гармоніки T_{211} і S_{310} . Їх наявність було також підтверджено в ряді інших робіт, наприклад: [95], [96], [97]. Ці гармоніки були виявлені і за даними інших каталогів, наприклад, в полі швидкостей зірок каталогу UCAC4 [98]. В роботі [96] метод ВСФ був поширений на випадок тривимірного поля швидкостей зірок (власні рухи та променеві швидкості) .

1.3 Галактичні константи

Для побудови динамічних моделей Галактики, встановлення кількості і розподілу темної речовини (мабуть, найважливіша проблема динаміки Галактики), надзвичайно важливо знати такі фундаментальні кінематичні параметри як галактоцентрична відстань Сонця $R_{\odot}$, швидкість руху локального стандарту спокою (ЛСС) відносно Сонця $V_{\odot, \text{ЛСС}}$ та навколо центра галактики $V_{\text{rot}, \text{ЛСС}}$. Незважаючи на зусилля, що вживаються протягом останніх десятиліть, локальна швидкість обертання Галактики і галактоцентрична відстань Сонця залишаються величинами, виміряними з точністю не краще 20 % [99].

1.3.1 Локальний стандарт спокою

Локальний стандарт спокою (ЛСС) – гіпотетична точка, положення якої в даний момент збігається з положенням Сонця, і яка рухається по ідеальній

круговій орбіті навколо центра Галактики на галактоцентричній відстані $R_{\odot}$. ЛСС забезпечує фундаментальну систему відліку при кінематичних і динамічних дослідженнях Галактики, оскільки всі вимірювання виконуються відносно Сонця.

Швидкість Сонця відносно середньої швидкості зірок сонячної околиці призвела до виникнення концепції «локального руху Сонця». Виділяють стандартний, основний і пекулярний рух Сонця. Згідно з [82], стандартний рух Сонця визначається як швидкість Сонця «відносно центроїда зірок 5–6^m змішаного спектрального складу, серед яких чимало далеких гігантів і надгігантів». У книзі Міхаласа і Бінні [100] стандартний рух – це «рух Сонця відносно зірок, зазвичай представлених в каталогах променевих швидкостей і власних рухів». Це, як правило, зірки спектральних класів $A - G$, включаючи зірки ГП, гіганти і надгіганти. У довіднику К. У. Аллена [101] наводяться наступні компоненти швидкості стандартного руху Сонця: $X_{\odot} = +10.2 \text{ км с}^{-1}$, $Y_{\odot} = +15.1 \text{ км с}^{-1}$, $Z_{\odot} = +7.4 \text{ км с}^{-1}$.

Основний рух Сонця відносять до центроїду «близьких» зірок [82], [100]. Згідно з довідником Аллена [101], компоненти основного руху Сонця дорівнюють $X_{\odot} = +9 \text{ км с}^{-1}$, $Y_{\odot} = +12 \text{ км с}^{-1}$, $Z_{\odot} = +7 \text{ км с}^{-1}$ а в книзі Куликівського [82] вони складають $X_{\odot} = +10 \text{ км с}^{-1}$, $Y_{\odot} = +10 \text{ км с}^{-1}$, $Z_{\odot} = +6 \text{ км с}^{-1}$.

За методикою визначення виділяють два види ЛСС: динамічний і кінематичний [102, 103]. Динамічний ЛСС обчислюють з використанням різних динамічних моделей, а швидкість Сонця відносно динамічного ЛСС називають пекулярною швидкістю Сонця.

Для обчислення кінематичного ЛСС існує два способи. Один з них базується на використанні співвідношення Стремберга. Метод полягає в знаходженні таких значень $(X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot})_{\text{ЛСС}}$, які відповідають нульовій дисперсії залишкових швидкостей. Він був використаний, наприклад, в роботах [72, 104, 105, 106]. В роботі Шенріха та ін. [107] значення $(X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot})_{\text{ЛСС}}$ були отримані з урахуванням градієнта металічності. Найбільш сучасне визначення отримано в роботі [108] за даними *Gaia* DR2.

Другий спосіб – використання наймолодших об’єктів, таких як мазери,

Значення компонент руху Сонця щодо ЛСС, що отримані в спеціалізованій літературі

Посилання	Дані, що використовуються	$X_{\odot}$, км с ⁻¹	$Y_{\odot}$, км с ⁻¹	$Z_{\odot}$, км с ⁻¹
Денен & Бинней (1998)[72]	HIPPARCOS, зірки ГП	10.00 ± 0.36	5.25 ± 0.62	7.17 ± 0.38
Бобилев & Байкова (2007)[104]	Обзор [111], F-, G-карлики	8.7 ± 0.5	6.2 ± 2.26	7.2 ± 0.8
Аумер & Бинней (2009)[112]	HIPPARCOS, зірки ГП	9.96 ± 0.33	5.25 ± 0.54	7.07 ± 0.34
Рейд и ін. (2009)[113]	мазери VLBI	9	20	10
Шенрих та ін. (2010)[107]	HIPPARCOS, зірки ГП	$11.1^{+0.69}_{-0.75}$	$12.24^{+0.47}_{-0.476}$	$7.25^{+0.37}_{-0.36}$
Бобылев & Байкова (2010)[109]	HIPPARCOS, O-B2.5, мазери VLBI, цефеїди	6.0 ± 0.5	10.6 ± 0.8	6.5 ± 0.3
Коскуноглу та ін. (2011)[105]	RAVE, F, G, K зірки	8.39 ± 0.41	13.42 ± 0.49	6.60 ± 0.30
Голубов та ін. (2013)[106]	RAVE, карлики	8.74 ± 0.13	3.06 ± 0.68	7.57 ± 0.07
Бобылев & Байкова (2017)[110]	<i>Gaia</i> DR1, OB зірки	8.19 ± 0.74	9.28 ± 0.92	8.79 ± 0.74
Динг та ін. (2019)[108]	<i>Gaia</i> DR2, зірки ГП	8.63 ± 0.64	4.76 ± 0.49	7.26 ± 0.36

O – B зірки, розсіяні скупчення, середня швидкість обертання яких навколо центра Галактики теоретично повинна співпадати зі швидкістю ЛСС, а впливом асиметричного дрейфу можна знехтувати. Цей метод використовувався, наприклад в [109, 110].

Деякі значення з наукової літератури приведені в табл. 1.2. Крім того, огляди значень $(X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot})_{\text{ЛСС}}$ наведені, наприклад, в [114, 108].

Виявляється, що компоненти швидкості Сонця відносно ЛСС, отримані різними авторами, мають значний розкид. Значення компоненти $X_{\odot, \text{ЛСС}}$ за різними визначеннями варіюються в діапазоні ~ 6 – ~ 12 км с⁻¹, $Z_{\odot, \text{ЛСС}}$ – в діапазоні ~ 5 – ~ 9 км с⁻¹. Визначення компоненти $Y_{\odot, \text{ЛСС}}$ – набагато більш дискусійне питання, за різними даними значення варіюються від ~ 3 км с⁻¹ [106] до ~ 26 км с⁻¹ [115]. Знаходження $(X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot})_{\text{ЛСС}}$ є однією з основних задач сучасної астрономії.

1.3.2 Галактоцентрична відстань Сонця

Відстань від центра Галактики до Сонця $R_{\odot}$ є одним з ключових параметрів. У кінематиці цей параметр важливий, наприклад, для визначення швидкості обертання сонячної околиці навколо галактичного центра.

Першим відстань $R_{\odot}$ оцінив Харлоу Шеплі [116] в 1918 році. Він прийняв правильне припущення, що шарові скупчення концентруються до центра Галактики, визначив

координати центра поблизу $\alpha = 17^h 30^m, \delta = -30^\circ$ (сучасні значення: $\alpha = 17^h 45^m 40^s .04, \delta = -29^\circ 00' 28'' .1; l = 359^\circ .94425, b = -00^\circ .04616$), а також відстань $R_\odot = 13$ кпк, що в два рази більше сучасних оцінок.

Згідно з [117, 118], використовують три типи методів визначення $R_\odot$.

1) Прямі (первинні) методи, які не базуються на додаткових калібруваннях, використовують мінімальні модельні припущення. Приклади прямих методів: вимірювання паралаксів або променевих швидкостей об'єктів, що знаходяться безпосередньо в центрі Галактики; визначення розмірів орбіт зірок навколо центральної чорної діри.

2) Непрямі (вторинні) методи, базуються на співвідношеннях, які повинні бути попередньо відкалібровані. Зазвичай це співвідношення між світимістю і будь-яким іншим добре вимірюваним параметром об'єкта. Наприклад, зірки типу RR Ліри або цефеїди мають співвідношення період–світимість; гіганти червоного згущення на діаграмі Герцшпрунга–Расела (Г–Р) мають визначену абсолютну зоряну величину.

3) Методи, що базуються на моделях, які націлені на створення моделі Галактики, а $R_\odot$ – один з вхідних параметрів цієї моделі. Наприклад, кінематичні моделі, для яких використовуються VLBI спостереження областей формування зірок, що містять мазери. Другий приклад – вивчення просторового розподілу об'єктів інших типів, які знаходяться в рукавах Чумацького Шляху.

Огляди найбільш сучасних значень можна знайти в роботах [119], [117], [118], [120], [121]. Остання компіляція приведена в роботі [122], згідно з якою сучасні значення $R_\odot$ варіюються в діапазоні 6.9–8.9 кпк, а середнє значення становить 8.0 ± 0.2 кпк.

1.4 Структура Галактики

Існування протяжного та майже сферичного гало і концентрованого в площині диска в нашій Галактиці було вперше відзначено Яном Оортом [123]. Він відмітив, що зірки з малими просторовими швидкостями ($< 62 \text{ км с}^{-1}$) мають тенденцію концентруватися до площини Галактики. З іншого боку, чим

далі зірка знаходиться від площини Галактики, тим більше спостерігається відсоток високошвидкісних зірок. Гілмор і Рейд [124] були першими, хто виявив, що диск Чумацького шляху складається з двох підсистем з різними шкалами висот (напівтовщинами) h_z : 300 і 1350 пк. (передбачається, що щільність зірок має експоненціальний розподіл $n(z) \propto \exp(-|z|/h_z)$). Першу підсистему автори назвали «старим диском», а другу – «товстим диском». Зараз ці підсистеми називаються товстим диском і тонким диском, відповідно.

Згідно з сучасними уявленнями, диск Галактики можна поділити щонайменше на чотири структурних елементи (див. рис. 1.1), які розрізняються геометричними розмірами, кінематикою, віком, вмістом металів $[\text{Fe}/\text{H}]$, вмістом α -елементів $[\alpha/\text{Fe}]$ ([125], стор. 46; [126], стор. 47, [127]). α -елементи – це такі хімічні елементи, головні ізотопи яких складаються з цілого числа ядер ^4He (C, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca і Ti) і утворюються в результаті дії α -процесів. Квадратні дужки позначають те, що значення нормоване на сонячне. Наприклад,

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \lg \left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_* - \lg \left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\odot}, \quad (1.3)$$

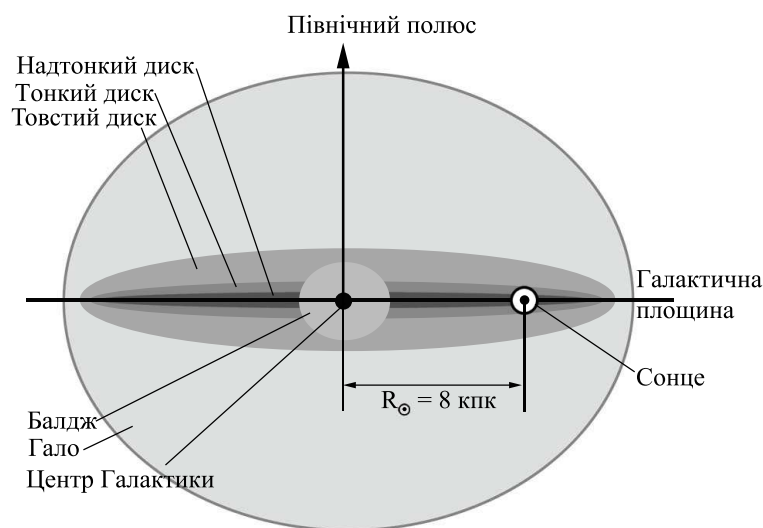
де N_{Fe} і N_{H} – число атомів заліза і водню в одиниці об'єму, відповідно.

Структурними елементами диска Галактики є наступні:

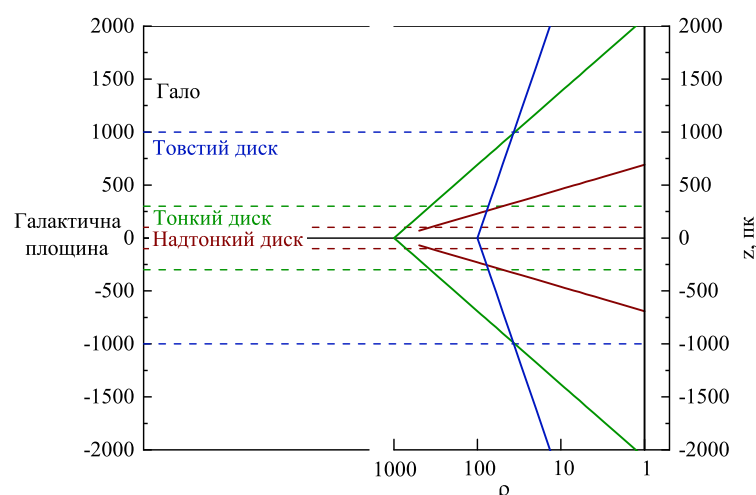
1) Молодий тонкий (надтонкий) диск, до складу якого входять наймолодші зірки, хмари атомарного HI і молекулярного газу, області HII , протозірки, зірки OB , цефеїди I типу. Півтовщина молодого тонкого диска становить $h_z \sim 50\text{--}100$ пк. Швидкість обертання молодого тонкого диска оцінюється в діапазоні $220\text{--}260 \text{ км с}^{-1}$.

2) Тонкий диск містить більш старі зірки віком не більше 8 мільярдів років, з металічністю $-0.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.5$, вмістом α -елементів близько 0.2 dex (dex – це безрозмірна величина, що дорівнює порядку величини; різниця x dex відповідає зміні величини за коефіцієнтом 10^x), і має напівтовщину $h_z \sim 300\text{--}400$ пк. Швидкість обертання становить близько $\sim 220 \text{ км с}^{-1}$.

3) Товстий диск (канонічний) складається з відносно старих зірок



а)



б)

Рис. 1.1 а): схематичне зображення галактики Чумацький Шлях, вид збоку. б): великомасштабний вид диска і гало Галактики в сонячній околиці. Горизонтальними штриховими лініями показані межі кожної з компонент диска: надтонкого диска (червоний колір, $z = \pm 100$ пк), тонкого диска (зелений колір, $z = \pm 300$ пк), товстого диска (синій колір, $z = \pm 1000$ пк). Суцільними лініями показано розподіл відносної щільності зірок в залежності від z , який має експоненціальний закон $n(z) \propto \exp(-|z|/h_z)$. В сонячній околиці на 1000 зірок тонкого диску припадає 20 зірок товстого диску та 1 зірка гало. Дані, які наведені на цьому рисунку, взяті з роботи Бузера [128]. Згідно з приватним повідомленням Бузера, напівтовщина надтонкого диска була отримана не локально, а в середньому по всьому радіусу від центра до краю Галактики. Локальна щільність зірок надтонкого диска досить невизначена, тому розподіл щільності від z показано схематично, а червоні лінії не з'єднано при $z = 0$ пк

невеликої металічності, $-1.0 \text{ dex} < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.4 \text{ dex}$, віком 8–12 мільярдів

років. Напівтовщина канонічного товстого диска h_z становить 1–1.5 кпк. Швидкість його обертання становить $\sim 180 \text{ км с}^{-1}$. Вміст α -елементів систематично більше, ніж у зірок тонкого диска на 0.2–0.4 dex.

4) Згідно з дослідженням Каролла та ін. 2019 року [127], можна виділити товстий диск, бідний металами (ТДБМ), який містить в два рази менше важких елементів ніж канонічний товстий диск, а також має швидкість обертання на $\sim 30 \text{ км с}^{-1}$ менше швидкості обертання канонічного товстого диска, тобто $\sim 150 \text{ км с}^{-1}$.

Крім зірок диска, в сонячній околиці також присутні зірки гало, які є найстарішими (віком ~ 13 мільярдів років) об'єктами Галактики з найнижчим вмістом металів $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0 \text{ dex}$. Саме гало як ціле практично не має систематичного обертання навколо центра Галактики, оскільки зірки, що належать цій підсистемі, рухаються хаотично.

З зазначених п'яти підсистем в сонячній околиці основними вважаються тонкий диск, товстий диск і гало (див., наприклад, [129]).

Висновки до розділу 1

Кінематику зірок сонячної околиці, а також питання побудови і кінематики Галактики в цілому почали вивчати кілька сотень років тому. З того часу, завдяки поліпшенню точності астрометричних спостережень, збільшенню кількості спостережного матеріалу, розробці нових методик кінематичного аналізу, побудові кінематичних і динамічних моделей, було виявлено безліч деталей і закономірностей в русі зірок і їх розподілі в просторі. Однак дотепер залишаються невирішеними багато проблем, такі як визначення ЛСС, тобто нуль-пункту швидкостей зірок; галактоцентричної відстані Сонця; геліоцентричних відстаней зірок; урахування поглинання і почервоніння, які особливо важливі при дослідженні зірок галактичного диска. Всі ці параметри на даний час відомі з великою невизначеністю, що впливає на значення кінематичних параметрів, а також визначення глобальних параметрів Галактики, таких як швидкість обертання Галактики на відстані Сонця, крива обертання Галактики. Зонні систематичні похибки

паралаксів можуть призводити до виникнення помилкових компонент поля швидкостей зірок. Крім того, відмінності систем власних рухів і/або променевих швидкостей зірок з різних астрометричних каталогів призводить до систематичних відмінностей значень кінематичних параметрів і глобальних параметрів Галактики.

Оскільки кінематика зірок різних груп розрізняється, для більш детального її вивчення необхідно, використовуючи різні астрофізичні критерії, сортувати зірки за віковими групами, за вмістом металів, або відбирати зірки, що належать до різних складових Галактики: тонкого, товстого дисків і гало. Для цього використовуються, наприклад, показники кольору і абсолютні зоряні величини, точність яких визначається точністю фотометрії, а також точністю карт або моделей поглинання/почервоніння.

Ще однією з важливих проблем зоряної кінематики є знаходження всіх значущих складових локального поля швидкостей зірок, які відсутні у відомих фізичних моделях, та визначення їх фізичного сенсу, або їхнього зв'язку з тими чи іншими фізичними процесами, що присутні в Галактиці.

Поява більш точних і обширних астрометричних, фотометричних, спектральних даних і використання сучасних методів обробки дає можливість детальніше дослідити поле швидкостей зірок, уточнювати значення кінематичних параметрів локального поля швидкостей зірок і глобальних параметрів Галактики. Крім того, ці дані дають можливість отримати більш точні уявлення про розподіл речовини в просторі і побудувати більш точні карти поглинання/почервоніння.

Тому, метою цієї дисертації є детальне дослідження кінематики різних груп зірок, відібраних за допомогою діаграми $\Gamma - P$, з використанням найбільш точних сучасних астрометричних та фотометричних даних з каталогів UCAC5, HSOY, TGAS (*Gaia* DR1), *Gaia* DR2, PMA, 2MASS. Обчислення кінематичних параметрів моделі $O - M$, а також позамоделних коефіцієнтів розкладання поля швидкостей зірок, за сучасними даними надасть можливість точніше оцінити глобальні параметри Галактики на відстані Сонця, уточнити сучасні уявлення про кінематику зірок в навколосонячному просторі.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ЗІРОК

2.1 Системи координат

2.1.1 Екваторіальна система координат

Положення об'єктів у всіх сучасних астрометричних каталогах наводяться в екваторіальній системі координат (ЕСК). Основною площиною в ЕСК є площина небесного екватора.

ЕСК задається трійкою одиничних векторів $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ таким чином, що вектор $\mathbf{i}$ спрямований на точку весняного рівнодення Υ ($\alpha = 0^\circ, \delta = 0^\circ$, вісь x), яка, згідно з резолюцією ГА МАС 1997 року, зафіксована відносно положень позагалактичних джерел і збігається з координатами Υ в системі каталогу FK5 на епоху J2000.0. Вектор $\mathbf{k}$ спрямований на північний полюс світу ($\delta = 90^\circ$, вісь z), а вектор $\mathbf{j}$ заданий таким чином, що $\mathbf{j} = \mathbf{k} \times \mathbf{i}$ і задає вісь y , яка спрямована в точку з координатами ($\alpha = 90^\circ, \delta = 0^\circ$). Таким чином, набір $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ становить праву трійку векторів.

2.1.2 Галактична система координат

При кінематичних дослідженнях зручно працювати в галактичній системі координат (ГСК).

Сучасне визначення ГСК є наступним. Площина диска Галактики прийнята за основну площину ГСК. Її положення в екваторіальній системі координат задається координатами одного з галактичних полюсів. Початок відліку співпадає з барицентром Сонячної системи, яка вважається розташованою в площині Галактики. Одиничний вектор $\mathbf{i}_G$ спрямований на Галактичний центр GC ($l = 0^\circ, b = 0^\circ$, вісь x (x_1)), який збігається з положенням джерела Стрілець A*. Вектор $\mathbf{k}_G$ є паралельним напрямку із центра Галактики на північний полюс ($b = 90^\circ$) і задає вісь z (x_3). Вісь y (x_2) визначається напрямом $\mathbf{j}_G = \mathbf{k}_G \times \mathbf{i}_G$ і збігається з напрямком обертання Галактики ($l = 90^\circ, b = 0^\circ$).

2.1.3 Перехід від екваторіальної в галактичну систему координат

Зв'язок між ЕСК і ГСК здійснюється за допомогою матриці поворотів A_G :

$$A_G = \begin{pmatrix} -0.0548755601367195 & -0.8734370902532698 & -0.4838350155472244 \\ +0.4941094280132430 & -0.4448296298016944 & +0.7469822445004389 \\ -0.8676661489582886 & -0.1980763737056720 & +0.4559837761713720 \end{pmatrix}$$

Для отримання координат l, b із координат α, δ скористаємося наступним перетворенням

$$\begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos b \cos l \\ \cos b \sin l \\ \sin b \end{pmatrix} = A_G \begin{pmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix}$$

Тоді

$$\operatorname{tg} l = \frac{g_2}{g_1}; \quad \operatorname{tg} b = \frac{g_3}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}}$$

Власні рухи $\mu_\alpha \cos \delta$, μ_δ трансформуються в $\mu_l \cos b$, μ_b за допомогою наступного перетворення [130]:

$$\begin{pmatrix} \mu_l^* \\ \mu_b \end{pmatrix} = \frac{1}{\cos b} \begin{pmatrix} C_1 & C_2 \\ -C_2 & C_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu_\alpha^* \\ \mu_\delta \end{pmatrix},$$

де $\mu_l^* = \mu_l \cos b$ і $\mu_\alpha^* = \mu_\alpha \cos \delta$; коефіцієнти C_1, C_2 задаються рівняннями

$$C_1 = \sin \delta_{GP} \cos \delta - \cos \delta_G \sin \delta \cos (\alpha - \alpha_{GP}) \quad (2.1)$$

$$C_2 = \cos \delta_{GP} \sin (\alpha - \alpha_{GP}), \quad (2.2)$$

де α_{GP} , δ_{GP} – екваторіальні координати північного галактичного полюсу (див. співвідношення 2.3).

Значення екваторіальних координат галактичного центра, північного полюсу і напрямку обертання Галактики, відповідно до рекомендацій

консорціуму HIPPARCOS [12], складають:

$$\begin{aligned}\alpha_{GC} &= 266^{\circ}.40499, & \delta_{GC} &= -28^{\circ}.93617; \\ \alpha_{GR} &= 318^{\circ}.00439, & \delta_{GR} &= +48^{\circ}.32964; \\ \alpha_{GP} &= 192^{\circ}.85948, & \delta_{GP} &= +27^{\circ}.12825;\end{aligned}\tag{2.3}$$

Величина $\cos b$ може бути обчислена таким чином: $\cos b = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$.

2.1.4 Галактоцентрична циліндрична система координат

Початок відліку системи координат R, Θ, Z знаходиться в центрі Галактики, вісь Z задається напрямком на північний полюс, азимутальний кут Θ відраховується від осі x геліоцентричної галактичної системи координат в напрямку, який є протилежним ходу годинникової стрілки, тобто у зворотний бік відносно до обертання Галактики, R – відстань від центра Галактики до проекції об'єкта на галактичну площину. На рис. 2.1 показано зв'язок між галактоцентричною і галактичною системами координат.



Рис. 2.1 Галактична прямокутна і галактоцентрична циліндрична системи координат

Обчислення компонент швидкостей зірок в ГСК

Компоненти швидкості зірки V_x, V_y, V_z , тобто проекції на галактичні осі x, y, z обчислюються з власних рухів за допомогою рівнянь:

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos l \cos b & -\sin l \cos b & -\cos l \sin b \\ \sin l \cos b & \cos l \cos b & -\sin l \sin b \\ \sin b & \cos b & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_r \\ \eta r \mu_l^* \\ \eta r \mu_b \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

де V_r – променева швидкість зірки; μ_l^*, μ_b – компоненти її власного руху; $\eta = 4.74$ – коефіцієнт переведення одиниці виміру власних рухів мсдр⁻¹ в кмс⁻¹ кпк⁻¹; r – геліоцентрична відстань до зірки в кпс.

2.2 Кінематичні моделі

Кінематичні моделі використовуються для дослідження поля швидкостей зірок в околиці Сонця.

2.2.1 Модель Ковальського – Ері

Суть моделі полягає в тому, що спостережувані швидкості зірок є чисто паралактичними, тобто в полі швидкостей зірок присутній тільки рух Сонця.

За власними рухами зірок μ_l^*, μ_b , або їх променевими швидкостями V_r , або просторовим швидкостям $V_s = V_r + \eta r \sqrt{\mu_l^2 + \mu_b^2}$ шляхом вирішення за допомогою МНК рівнянь моделі Ковальського – Ері

$$\begin{aligned} \eta r \mu_l \cos b &= X_{\odot} \sin l - Y_{\odot} \cos l \\ \eta r \mu_b &= X_{\odot} \cos l \sin b + Y_{\odot} \sin l \sin b - Z_{\odot} \cos b \\ V_r &= -X_{\odot} \cos l \cos b - Y_{\odot} \sin l \cos b - Z_{\odot} \sin b \end{aligned} \quad (2.5)$$

обчислюються компоненти швидкості Сонця $X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}$ відносно центроїда зірок. Модуль швидкості Сонця дорівнює:

$$V_{\odot} = \sqrt{X_{\odot}^2 + Y_{\odot}^2 + Z_{\odot}^2} \quad (2.6)$$

Координати апексу $L_{\odot}, B_{\odot}$, тобто точки, в напрямку якої рухається Сонце, обчислюються з виразів:

$$\operatorname{tg} L_{\odot} = \frac{Y_{\odot}}{X_{\odot}}, \quad \operatorname{tg} B_{\odot} = \frac{Z_{\odot}}{\sqrt{X_{\odot}^2 + Y_{\odot}^2}} \quad (2.7)$$

Для обчислення похибок визначення величин $V_{\odot}, L_{\odot}, B_{\odot}$ [131] використовуються формули:

$$\varepsilon(V_{\odot}) = \sqrt{\frac{x^2 \varepsilon_x^2 + y^2 \varepsilon_y^2 + z^2 \varepsilon_z^2}{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (2.8)$$

$$\varepsilon(L_{\odot}) = \sin L_{\odot} \cos L_{\odot} \sqrt{\frac{\varepsilon_x^2}{x^2} + \frac{\varepsilon_y^2}{y^2}} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon(B_{\odot}) = \sin B_{\odot} \cos B_{\odot} \sqrt{\frac{x \varepsilon_x}{x^2 + y^2}^2 + \frac{y \varepsilon_y}{x^2 + y^2}^2 + \frac{\varepsilon_z^2}{z^2}}, \quad (2.10)$$

де $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – похибки визначення компонент швидкостей Сонця $x = X_{\odot}$, $y = Y_{\odot}$, $z = Z_{\odot}$, відповідно.

Коли відомі значення $X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}$, поправки за рух Сонця до власних рухів і променевих швидкостей зірок обчислюються за такими формулами:

$$\delta \mu_l^* = (X_{\odot} \sin l - Y_{\odot} \cos l) / (\eta r) \quad (2.11)$$

$$\delta \mu_b = (X_{\odot} \cos l \sin b + Y_{\odot} \sin l \sin b - Z_{\odot} \cos b) / (\eta r) \quad (2.12)$$

$$\delta V_r = -X_{\odot} \cos l \cos b - Y_{\odot} \sin l \cos b - Z_{\odot} \sin b \quad (2.13)$$

2.2.2 Модель Огороднікова-Мілна

Модель О–М надає можливість досліджувати поле швидкостей в зоряній системі, яка деформується та рухається разом з Сонцем навколо центра Галактики. Використовуючи ГСК, яка описана в розділі 2.1.2 і обмежуючись малими першого порядку в розкладанні поля швидкостей $\mathbf{V}(r)$, лінійне поле швидкостей в точці, що знаходиться на геліоцентричній відстані $\mathbf{r}$ від Сонця, може бути записано як [87]:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_{\odot} + M^+ \mathbf{r} + M^- \mathbf{r}, \quad (2.14)$$

де $\mathbf{V}_{\odot} = (X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot})$, поступальна швидкість центроїда розглянутих зірок, яка дорівнює пекулярній швидкості Сонця відносно цього центроїда з протилежним знаком, а $M^+ \mathbf{r}$ і $M^- \mathbf{r}$ – складові деформаційного і обертального руху розглянутої зоряної системи, відповідно.

Елементи матриць M^+ і M^- являють собою часткові похідні від проєкцій (V_x, V_y, V_z) вектора швидкості $\mathbf{V}$ на осі прямокутної системи

координат (x_1, x_2, x_3) . Ці часткові похідні прийнято називати кінематичними параметрами.

$$M_{pq}^+ = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_p}{\partial x_q} + \frac{\partial V_q}{\partial x_p} \right); \quad M_{pq}^- = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_p}{\partial x_q} - \frac{\partial V_q}{\partial x_p} \right) \quad p, q = 1, 2, 3 \quad (2.15)$$

Елементи матриці M_{pq}^+ складають симетричний тензор, який визначає швидкість деформаційного руху в даній зоряній системі:

$$M^+ = \begin{bmatrix} M_{11}^+ & M_{12}^+ & M_{13}^+ \\ M_{21}^+ & M_{22}^+ & M_{23}^+ \\ M_{31}^+ & M_{32}^+ & M_{33}^+ \end{bmatrix}$$

Параметри $M_{12}^+ = M_{21}^+, M_{23}^+ = M_{32}^+, M_{13}^+ = M_{31}^+$ характеризують швидкості деформації в площинах (x_1, x_2) , (x_2, x_3) і (x_3, x_1) , відповідно, тоді як M_{11}^+, M_{22}^+ і M_{33}^+ характеризують швидкості відносних розтягнень – стиснень зоряної системи уздовж осей x_1, x_2, x_3 , відповідно.

Компоненти антисиметричного тензора M_{pq}^- описують локальне твердотільне обертання зоряної системи навколо центроїда розглянутих зірок з миттєвою кутовою швидкістю Ω .

$$M^- = \begin{bmatrix} M_{11}^- & M_{12}^- & M_{13}^- \\ M_{21}^- & M_{22}^- & M_{23}^- \\ M_{31}^- & M_{32}^- & M_{33}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix},$$

де $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – проєкції вектора швидкості твердотільного обертання на осі x_1, x_2, x_3 , відповідно.

Спроектуювавши рівняння 2.14 на осі Галактичної системи координат, ми отримуємо таку систему рівнянь, яка вирішується за допомогою МНК:

$$\begin{aligned} \eta \mu_l \cos b &= X_\odot / r \sin l - Y_\odot / r \cos l - \omega_1 \sin b \cos l - \omega_2 \sin b \sin l + \\ &+ \omega_3 \cos b + M_{12}^+ \cos b \cos 2l - M_{13}^+ \sin b \sin l + M_{23}^+ \sin b \cos l - \\ &- 0.5 M_{11}^+ \cos b \sin 2l + 0.5 M_{22}^+ \cos b \sin 2l \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned}
\eta \mu_b = & X_{\odot}/r \cos l \sin b + Y_{\odot}/r \sin l \sin b - Z_{\odot}/r \cos b + \omega_1 \sin l - \\
& - \omega_2 \cos l - 0.5 M_{12}^+ \sin 2b \sin 2l - M_{13}^+ \cos 2b \cos l + \\
& + M_{23}^+ \cos 2b \sin l - 0.5 M_{11}^+ \sin 2b \cos^2 l - \\
& - 0.5 M_{22}^+ \sin 2b \sin^2 l + 0.5 M_{33}^+ \sin 2b
\end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\begin{aligned}
V_r/r = & -X_{\odot}/r \cos l \cos b - Y_{\odot}/r \sin l \cos b - Z_{\odot}/r \sin b + \\
& + M_{13}^+ \sin 2b \cos l + M_{23}^+ \sin 2b \sin l + M_{12}^+ \cos^2 b \sin 2l + \\
& + M_{11}^+ \cos^2 b \cos^2 l + M_{22}^+ \cos^2 b \sin^2 l + M_{33}^+ \sin^2 b
\end{aligned} \tag{2.18}$$

При відсутності променевих швидкостей неможливо отримати окремо параметри M_{11}^+, M_{22}^+ і M_{33}^+ , тому отримують тільки їх комбінації у вигляді $M_{11}^* = M_{11}^+ - M_{22}^+$ і $M_{33}^* = M_{33}^+ - M_{22}^+$. В цьому випадку система рівнянь виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned}
\eta \mu_l \cos b = & X_{\odot}/r \sin l - Y_{\odot}/r \cos l - \omega_1 \sin b \cos l - \omega_2 \sin b \sin l + \\
& + \omega_3 \cos b + M_{12}^+ \cos b \cos 2l - M_{13}^+ \sin b \sin l \\
& + M_{23}^+ \sin b \cos l - 0.5 (M_{11}^+ - M_{22}^+) \cos b \sin 2l
\end{aligned} \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned}
\eta \mu_b = & X_{\odot}/r \cos l \sin b + Y_{\odot}/r \sin l \sin b - Z_{\odot}/r \cos b + \omega_1 \sin l - \\
& - \omega_2 \cos l - 0.5 M_{12}^+ \sin 2b \sin 2l + M_{13}^+ \cos 2b \cos l + \\
& + M_{23}^+ \cos 2b \sin l + 0.5 (M_{33}^+ - M_{22}^+) \sin 2b - \\
& - 0.5 (M_{11}^+ - M_{22}^+) \sin 2b \cos^2 l
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Оскільки елементи тензорів обертання і деформації в локальній галактичній системі пов'язані з компонентами поля швидкостей V_R , V_{θ} і V_Z в галактоцентричній циліндричній системі (R, θ, Z) ,

$$\begin{aligned}
2M_{12}^+ &= \frac{\partial V_{\theta}}{\partial R} - \frac{V_{\theta}}{R_{\odot}} + \frac{1}{R_{\odot}} \frac{\partial V_R}{\partial \theta} & 2M_{12}^- &= \frac{\partial V_{\theta}}{\partial R} + \frac{V_{\theta}}{R_{\odot}} - \frac{1}{R_{\odot}} \frac{\partial V_R}{\partial \theta} \\
2M_{13}^+ &= -\frac{\partial V_R}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial R} & 2M_{13}^- &= -\frac{\partial V_R}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial R}
\end{aligned}$$

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

$$M_{11}^+ = \frac{\partial V_z}{\partial R} \quad M_{22}^+ = \frac{V_R}{R_\odot} + \frac{1}{R} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \quad M_{33}^+ = -\frac{\partial V_z}{\partial z},$$

то використовуючи комбінації параметрів моделі О–М можна визначити деякі глобальні кінематичні характеристики Галактики, дійсні в сонячній околиці [132] – [133], [94].

1) Лінійну кругову швидкість руху центроїда зірок, розташованого в центрі Сонця, навколо центра Галактики V_{rot} обчислюють за формулою

$$V_{\text{rot}} = -V_\theta = -R_\odot (M_{12}^- - M_{12}^+) = -R_\odot (B - A) \quad (2.21)$$

У цій роботі використовується значення $R_\odot = 8.0 \pm 0.2$ кпк. [122]

2) Радіальний градієнт швидкості обертання Галактики, або нахил кривої обертання Галактики, визначається виразом:

$$\frac{\partial V_{\text{rot}}}{\partial R} = -\frac{\partial V_\theta}{\partial R} = -(M_{12}^- + M_{12}^+) \quad (2.22)$$

3) Вертикальний градієнт швидкості обертання Галактики визначається наступним чином:

$$\frac{\partial V_{\text{rot}}}{\partial z} = -\frac{\partial V_\theta}{\partial z} = -(M_{32}^- - M_{32}^+) \quad (2.23)$$

4) Величина, яку в роботі [133] пов'язують з кінематичним проявом локального вигину площини Галактики. За аналогією з роботою [134], позначимо Σ :

$$\Sigma = -\frac{1}{R_\odot} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} = M_{32}^+ + M_{32}^- \quad (2.24)$$

5) Вертикальний градієнт швидкості розширення системи:

$$\frac{\partial V_R}{\partial z} = -(M_{13}^- + M_{13}^+) \quad (2.25)$$

6) Радіальний градієнт вертикальної компоненти поля швидкостей зірок:

$$\frac{\partial V_z}{\partial R} = M_{13}^- - M_{13}^+ \quad (2.26)$$

2.2.3 Векторні сферичні функції

Коректне використання методу розкладання поля швидкостей за ВСФ вимагає рівномірного розподілу об'єктів на сфері. В іншому випадку, нерівномірність може привести до порушення ортогональності ВСФ [96]. Щоб уникнути цього, в роботі застосовується схема пікселізації HEALPix (The Hierarchical Equal Area iso-Latitude Pixelization) [135], яка дозволяє розділити всю сферу на рівні майданчики (пікселі). Центри цих пікселів розташовані на колах постійної широти і на кожному колі рівновіддалені по довготі. Ключовим параметром, який необхідно задати при використанні бібліотеки HEALPix, є N_{side} , пов'язаний з кількістю пікселів, на яку розділяється небесна сфера, наступним чином: $N_{\text{pix}} = 12 N_{\text{side}}^2$. Таким чином, задаючи $N_{\text{side}} = 10$, сфера розділяється на 1200 пікселів. Поділ небесної сфери на пікселі дозволяє сформувати вибірку фіктивних зірок (число яких дорівнює числу пікселів) з положеннями, що задаються центрами пікселів, та власними рухами, які дорівнюють середнім значенням власних рухів зірок, що належать конкретному пікселю. Таким чином, всі зірки з даної вибірки замінюються N_{pix} незваженими фіктивними зірками, рівномірно розподіленими на небесній сфері.

ВСФ мають три компоненти: радіальну $\mathbf{V}_{\text{нкп}}$, тороїдальну $\mathbf{T}_{\text{нкп}}$ та сфероїдальну $\mathbf{S}_{\text{нкп}}$, що задаються за допомогою наступних співвідношень [96]:

$$\mathbf{V}_{\text{нкп}}(l, b) = K_{\text{нкп}}(l, b) \mathbf{e}_r, \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{\text{нкп}}(l, b) &= T_{\text{нкп}}^l(l, b) \mathbf{e}_l + T_{\text{нкп}}^b(l, b) \mathbf{e}_b = \\ &= \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} \left(\frac{\partial K_{\text{нкп}}(l, b)}{\partial b} \mathbf{e}_l - \frac{1}{\cos b} \frac{\partial K_{\text{нкп}}(l, b)}{\partial l} \mathbf{e}_b \right) \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{\text{нкп}}(l, b) &= S_{\text{нкп}}^l(l, b) \mathbf{e}_l + S_{\text{нкп}}^b(l, b) \mathbf{e}_b = \\ &= \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} \left(\frac{1}{\cos b} \frac{\partial K_{\text{нкп}}(l, b)}{\partial l} \mathbf{e}_l + \frac{\partial K_{\text{нкп}}(l, b)}{\partial b} \mathbf{e}_b \right), \end{aligned} \quad (2.29)$$

де

$$K_{\text{нкп}}(l, b) = R_{\text{нк}} \begin{cases} P_{\text{n},0}(b), & k = 0, p = 1; \\ P_{\text{нк}}(b) \sin kl, & k \neq 0, p = 0, \\ P_{\text{нк}}(b) \cos kl, & k \neq 0, p = 1, \end{cases}$$

$$R_{\text{нк}} = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi}} \begin{cases} \sqrt{\frac{2(n-k)!}{(n+k)!}}, & k > 0; \\ 1, & k = 0 \end{cases}$$

Тут $P_{\text{нк}}$ – поліноми Лежандра при $k = 0$ або приєднані функції Лежандра при $k > 0$. Таким чином задані функції $\mathbf{V}_{\text{нкп}}$, $\mathbf{T}_{\text{нкп}}$ і $\mathbf{S}_{\text{нкп}}$ являють собою ортонормовану систему функцій на сфері.

За допомогою ВСФ тривимірне поле швидкостей зірок можна представити в наступному вигляді:

$$\mathbf{U}(l, b) = \sum_{\text{нкп}} t_{\text{нкп}} \mathbf{T}_{\text{нкп}}(l, b) + \sum_{\text{нкп}} s_{\text{нкп}} \mathbf{S}_{\text{нкп}}(l, b) + \sum_{\text{нкп}} v_{\text{нкп}} \mathbf{V}_{\text{нкп}}(l, b), \quad (2.30)$$

де $t_{\text{нкп}}$, $s_{\text{нкп}}$, $v_{\text{нкп}}$ – коефіцієнти при тороїдальних, сфероїдальних і радіальних гармоніках.

Проектуючи це рівняння на осі галактичної системи координат, отримуємо наступну систему, що складається з трьох рівнянь, які вирішуються за допомогою МНК:

$$\mu_l \cos b = \sum_{\text{нкп}} t_{\text{нкп}} \mathbf{T}_{\text{нкп}}^l(l, b) + \sum_{\text{нкп}} s_{\text{нкп}} \mathbf{S}_{\text{нкп}}^l(l, b) \quad (2.31)$$

$$\mu_b = \sum_{\text{нкп}} t_{\text{нкп}} \mathbf{T}_{\text{нкп}}^b(l, b) + \sum_{\text{нкп}} s_{\text{нкп}} \mathbf{S}_{\text{нкп}}^b(l, b) \quad (2.32)$$

$$V_r/r = \sum_{\text{нкп}} v_{\text{нкп}} \mathbf{V}_{\text{нкп}}(l, b) \quad (2.33)$$

Цей метод дозволяє виявити всі статистично значущі складові, присутні в реальному полі швидкостей зірок. В результаті отримується повна, з математичної точки зору, модель. Фізичний сенс деяких параметрів цієї моделі був вперше встановлений в роботі Вітязева і Цветкова [96] за допомогою співвідношень між коефіцієнтами розкладання за ВСФ і параметрами моделі О – М. Ці співвідношення були отримані також і автором дисертації. Вони наведені в табл. 2.1.

Співвідношення між параметрами моделі О – М і коефіцієнтами розкладання за ВСФ t, s, v , що взяті з роботи [96]

Параметр	Зв'язок з коеф. t, s	Зв'язок з коеф. v
ω_1	$0.346 t_{111}$	–
ω_2	$0.346 t_{110}$	–
ω_3	$0.346 t_{101}$	–
$X_{\odot}/ r $	$-0.346 s_{111}$	$-0.488 v_{111}$
$Y_{\odot}/ r $	$-0.346 s_{110}$	$-0.488 v_{110}$
$Z_{\odot}/ r $	$-0.346 s_{101}$	$-0.488 v_{101}$
M_{23}^+	$0.446 s_{210}$	$0.546 v_{210}$
M_{13}^+	$0.446 s_{211}$	$0.546 v_{211}$
M_{12}^+	$0.446 s_{220}$	$0.546 v_{220}$
M_{11}^*	$0.893 s_{221}$	–
M_{33}^*	$0.769 s_{201} + 0.446 s_{221}$	–
M_{11}^+	–	$0.282 v_{001} - 0.314 v_{201} + 0.543 v_{221}$
M_{22}^+	–	$0.282 v_{001} - 0.314 v_{201} - 0.543 v_{221}$
M_{33}^+	–	$0.282 v_{001} + 0.629 v_{201}$

Використовуючи ці табличні співвідношення, можна обчислити параметри моделі О – М з коефіцієнтів розкладання t, s, v .

2.2.4 Зонні векторні сферичні функції

Нехай зірки з розглянутої підвибірки займають на небесній сфері область В, яка визначається наступним чином: $0 \leq l \leq 2\pi$, $-b_z \leq b \leq b_z$. Позначимо $b_{\min} = -b_z$, $b_{\max} = b_z$. Слідуючи роботі [136], введемо перетворення для координати b :

$$\hat{b} = \arcsin(P \sin b + Q)$$

де

$$P = \frac{2}{s_2 - s_1}, \quad Q = \frac{s_2 + s_1}{s_2 - s_1}, \quad s_1 = \sin b_{\min}, \quad s_2 = \sin b_{\max}$$

Це перетворення переводить всю сферу на дану область В.

В цьому випадку ВСФ визначаються за допомогою формул:

$$\mathbf{V}_{\text{нкп}}(l, \hat{b}) = K_{\text{нкп}}(l, \hat{b}) \mathbf{e}_r, \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{\text{нкп}}(l, \hat{b}) &= T_{\text{нкп}}^l(l, \hat{b}) \mathbf{e}_l + T_{\text{нкп}}^b(l, \hat{b}) \mathbf{e}_b = \\ &= \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} \left(\frac{\partial K_{\text{нкп}}(l, \hat{b})}{\partial \hat{b}} \mathbf{e}_l - \frac{1}{\cos \hat{b}} \frac{\partial K_{\text{нкп}}(l, \hat{b})}{\partial l} \mathbf{e}_b \right) \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{\text{нкп}}(l, \hat{b}) &= S_{\text{нкп}}^l(l, \hat{b}) \mathbf{e}_l + S_{\text{нкп}}^b(l, \hat{b}) \mathbf{e}_b = \\ &= \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} \left(\frac{1}{\cos \hat{b}} \frac{\partial K_{\text{нкп}}(l, \hat{b})}{\partial l} \mathbf{e}_l + \frac{\partial K_{\text{нкп}}(l, \hat{b})}{\partial \hat{b}} \mathbf{e}_b \right), \end{aligned} \quad (2.36)$$

де

$$K_{\text{нкп}}(l, \hat{b}) = R_{\text{нк}} \begin{cases} P_{n,0}(\hat{b}), & k = 0, p = 1; \\ P_{\text{нк}}(\hat{b}) \sin kl, & k \neq 0, p = 0, \\ P_{\text{нк}}(\hat{b}) \cos kl, & k \neq 0, p = 1, \end{cases}$$

$$R_{\text{нк}} = \sqrt{P \frac{2n+1}{4\pi}} \begin{cases} \sqrt{\frac{2(n-k)!}{(n+k)!}}, & k > 0; \\ 1, & k = 0 \end{cases}$$

При використанні ЗВСФ зв'язок між параметрами моделі О–М і коефіцієнтами розкладання є більш складний, ніж у випадку звичайних ВСФ, тому що кожен параметр породжує серію коефіцієнтів, які зменшуються [137]. У цьому випадку необхідно використовувати матриці зв'язку між параметрами моделі О–М і коефіцієнтами розкладання виду 2.37.

Наприклад, в даній роботі використовується розділення сфери на північну ($0^\circ \leq b < 90^\circ$) та південну ($-90^\circ < b \leq 0^\circ$) галактичні півсфери. Для цих зон співвідношення між параметрами моделі О–М і коефіцієнтами розкладання за ЗВСФ t, s були вперше отримані Вітязовим і Цветковим [137]. Автором дисертації були отримані співвідношення як для коефіцієнтів t, s , так і для коефіцієнтів v .

Зв'язок між параметрами моделі О–М і коефіцієнтами розкладання представлений в табл. 2.2.

$$\begin{bmatrix} \omega_3 \\ \omega_2 \\ \omega_1 \\ X_{\odot}/|r| \\ Y_{\odot}/|r| \\ Z_{\odot}/|r| \\ M_{23}^+ \\ M_{13}^+ \\ M_{12}^+ \\ M_{11}^* \\ M_{33}^* \end{bmatrix} = A_{ts} \begin{bmatrix} t_{101} \\ t_{110} \\ t_{111} \\ s_{101} \\ s_{110} \\ s_{111} \\ s_{201} \\ s_{210} \\ s_{211} \\ s_{220} \\ s_{221} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\odot}/|r| \\ Y_{\odot}/|r| \\ Z_{\odot}/|r| \\ M_{23}^+ \\ M_{13}^+ \\ M_{12}^+ \\ M_{11}^+ \\ M_{22}^+ \\ M_{33}^+ \end{bmatrix} = A_v \begin{bmatrix} v_{001} \\ v_{101} \\ v_{110} \\ v_{111} \\ v_{201} \\ v_{210} \\ v_{211} \\ v_{220} \\ v_{221} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

2.3 Моделювання поля швидкостей зірок

Створення штучного поля швидкостей зірок із заданими характеристиками дозволяє перевірити, як ті чи інші ефекти впливають на значення кінематичних параметрів. Зокрема, в даній роботі моделюється поле швидкостей в галактоцентричній системі координат і перевіряється його вплив на власні рухи зірок в локальній ГСК.

Для того щоб змоделювати поле швидкостей зірок, необхідно виконати кілька кроків. За основу беруться реальні координати зірок l, b, r підвибірки, що досліджується. Вони трансформуються в прямокутну ГСК x, y, z з використанням співвідношень

$$x = r \cos b \cos l$$

$$y = r \cos b \sin l$$

$$z = r \sin b$$

Для трансформації їх в галактоцентричну прямокутну систему координат (див. Рис. 2.1) використовуються такі співвідношення:

$$X = x - R_{\odot}, \quad Y = y, \quad Z = z$$

Галактоцентричні координати обчислюються як:

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad \text{tg } \Theta = \frac{Y}{X}, \quad Z = z$$

Таблиця 2.2

Співвідношення між параметрами моделі О – М і коефіцієнтами розкладання за ЗВСФ t, s, v . Верхні знаки відповідають північній півсфері, а нижні знаки – південній півсфері

Параметр	Співвідношення з коефіцієнтами ВСФ
ω_1	$0.77 t_{111} \mp 0.21 s_{110} + 0.64 s_{210}$
ω_2	$0.77 t_{110} \pm 0.21 s_{111} - 0.64 s_{211}$
ω_3 (B)	$0.51 t_{101}$
$X_{\odot}/ r $	$\pm 0.44 t_{110} - 0.54 s_{111} \pm 1.11 s_{211}$
$Y_{\odot}/ r $	$\mp 0.44 t_{111} - 0.54 s_{110} \pm 1.11 s_{210}$
$Z_{\odot}/ r $	$-0.29 s_{101} \pm 0.94 s_{201}$
M_{23}^+	$-0.15 t_{111} \pm 0.15 s_{110} + 1.17 s_{210}$
M_{13}^+	$0.15 t_{110} \pm 0.15 s_{111} + 1.17 s_{211}$
M_{12}^+ (A)	$0.75 s_{220}$
M_{11}^*	$1.50 s_{221}$
M_{33}^*	$\pm 0.50 s_{101} + 2.09 s_{201} + 0.75 s_{221}$
$X_{\odot}/ r $	$-0.42 v_{111} \pm 1.33 v_{211}$
$Y_{\odot}/ r $	$-0.42 v_{110} \pm 1.32 v_{210}$
$Z_{\odot}/ r $	$\mp 0.86 v_{001} - 0.79 v_{101} \pm 4.60 v_{201}$
M_{23}^+	$\pm 0.35 v_{110} + 1.48 v_{210}$
M_{13}^+	$\pm 0.35 v_{111} + 1.48 v_{211}$
M_{12}^+ (A)	$0.89 v_{220}$
M_{11}^+	$0.86 v_{001} \mp 0.59 v_{001} + 0.77 v_{201} + 0.88 v_{221}$
M_{22}^+	$0.86 v_{001} \mp 0.59 v_{001} + 0.77 v_{201} - 0.88 v_{221}$
M_{33}^+	$5.36 v_{201}$

Далі задається потрібне поле швидкостей зірок так, як його видно з центра Галактики. В результаті для кожної зірки отримуємо компоненти швидкості V_R, V_{Θ}, V_Z в галактоцентричній циліндричній системі координат. Для трансформації цих швидкостей в координати V_X, V_Y, V_Z необхідно знати матрицю направляючих косинусів G_1 між циліндричною та прямокутною системами координат. Вона виглядає наступним чином:

$$\begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix} = G_1 \begin{pmatrix} R \\ \Theta \\ R \end{pmatrix}, \text{ где } G_1 = \begin{pmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta & 0 \\ \sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Вважаючи, що зірки рухаються по своїх орбітах тільки в площині Галактики, радіальна і вертикальна компоненти руху зірок покладаються рівними нулю: $V_R = 0$ та $V_Z = 0$. Тому отримуємо:

$$\begin{aligned} V_X &= -\sin \Theta V_\Theta \\ V_Y &= \cos \Theta V_\Theta \\ V_Z &= 0 \end{aligned} \tag{2.38}$$

Вважаючи, що спостерігач рухається навколо центра Галактики зі швидкістю центроїда зірок V_c , маємо:

$$V_x = V_X, \quad V_y = V_Y - V_c, \quad V_z = V_Z$$

Для аналізу отриманого локального поля швидкостей зірок необхідно трансформувати V_x , V_y і V_z в V_r , $\mu_l \cos b$, μ_b , використовуючи матрицю направляючих косинусів G_2

$$\begin{pmatrix} V_r \\ \mu_l \cos b \\ \mu_b \end{pmatrix} = G_2 \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix},$$

де

$$G_2 = \begin{pmatrix} \cos b \cos l & -\sin l & -\sin b \cos l \\ \cos b \sin l & \cos l & 0 \\ \sin l & -\sin b \sin l & \cos b \end{pmatrix}$$

Враховуючи, що $V_z = 0$, трансформація виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned} V_r &= -V_x \sin l + V_y \cos l \\ \mu_l \cos b &= (-V_x \cos l \sin b - V_y \sin l \sin b)/(\eta r) \\ \mu_b &= (V_x \cos l \cos b + V_y \sin l \cos b)/(\eta r) \end{aligned} \tag{2.39}$$

Висновки до розділу 2

У цьому розділі описані методи, які використовуються для дослідження кінематики зірок. Зазвичай вони засновані на аналізі власних рухів і

променевих швидкостей зірок з метою отримання значень кінематичних параметрів в рамках будь-якої кінематичної моделі за допомогою МНК. Недолік цього підходу полягає в тому, що модель може бути неповною, тобто містити не всі систематичні компоненти, які присутні в реальному полі швидкостей зірок. Для вирішення цієї проблеми використовується інший підхід до побудови кінематичних моделей, заснований на розкладанні поля швидкостей зірок за системою ВСФ. Такі моделі є повними з математичної точки зору, однак фізичний зміст коефіцієнтів розкладання невідомий. Частина коефіцієнтів розкладання мають аналоги в моделі О–М, але виявляється, що поле швидкостей зірок зазвичай містить ще й позамоделльні коефіцієнти, фізичний сенс яких необхідно знайти.

Модель О–М і метод ВСФ дають можливість досліджувати кінематику зірок, розташованих рівномірно по всій сфері. Однак в полі швидкостей зірок присутні ефекти, які, наприклад, мають протилежну спрямованість в різних галактичних півсферах, а при аналізі по всій сфері вони компенсують один одного. Тому більш доцільно досліджувати кінематику зірок, які займають певну зону на небесній сфері. Для цього використовується метод ЗВСФ. Для з'ясування причин виникнення деяких позамоделльних коефіцієнтів в цій роботі було змодельовано штучне поле швидкостей зірок.

Отже, використання сучасних методів дослідження поля швидкостей зірок дозволить досягти головної мети дисертації – отримати детальне уявлення про кінематику зірок, що знаходяться в навіколосонячному просторі.

Для роботи з моделлю О–М, методами ВСФ і ЗВСФ, а також моделювання поля швидкостей зірок автором дисертації було створене програмне забезпечення за допомогою мов програмування С і Python, а також утиліт командного рядка ОС Linux. Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [138, 139, 140].

РОЗДІЛ 3

КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ

Вихід у світ перших двох релізів місії *Gaia* зробив доступними нові дані для дослідження кінематики зірок не тільки в сонячній околиці, а і за її межами. Наявність паралаксів і високоточних власних рухів зірок в *Gaia* DR2 дає можливість сподіватися на уточнення, а можливо і отримання нової інформації щодо кінематики зірок в нашій Галактиці. Ефективність аналізу поля швидкостей суттєво залежить від якості і кількості спостережного матеріалу. Очевидно, що *Gaia* DR2 має безпрецедентну випадкову точність своїх астрометричних параметрів, приблизно на три порядки вищу, ніж в проекті HIPPARCOS. У кількісному відношенні ці проекти просто не можна порівнювати.

Оскільки власні рухи зірок все ще є наймасовішим матеріалом для виведення кінематичних параметрів, принципово важливим є відсутність в них систематичних похибок, що призводять до фіктивного обертання системи відліку, що задається положеннями і власними рухами зірок, і отже до спотворень значень кінематичних параметрів. Причинами таких систематичних похибок можуть бути, наприклад, неточність прив'язки нуль-пункту системи власних рухів до позагалактичних об'єктів або систематична похибка типу рівняння блиску. Навіть в каталозі *Gaia* DR2, як зазначено в [141], зоряний опорний фрейм, що задається положеннями і власними рухами порівняно яскравих зірок має значний спін ($\sim 0.15 \text{ мсдр}^{-1}$) відносно слабших квазарів. Очевидно, що фіктивне обертання буде спотворювати поле швидкостей досліджуваних зірок, а в кінцевому підсумку, спотворить отримані результати. Не існує навіть теоретичної можливості виявити таке фіктивне обертання, оскільки не існує ідеальної нерухомої системи координат. Однак можна виконати порівняння кінематичних параметрів, що виведені за двома незалежними системами власних рухів.

З цією метою необхідно використовувати системи абсолютних власних рухів зірок. Іншими словами, нуль-пункти систем власних рухів зірок повинні бути встановлені за допомогою положень нерухомих позагалактичних

джерел – галактик та/або квазарів. Цей підхід був вперше строго реалізований при створенні каталогу абсолютних власних рухів приблизно 300 мільйонів зірок ХРМ, що покривають все небо, а потім був застосований при створенні сучасного каталогу абсолютних власних рухів – РМА [15]. Хоча цей каталог був створений як з використанням високоточних положень позагалактичних джерел з каталогу *Gaia* DR1 [142, 143], так і положень 2MASS, його система власних рухів, внаслідок процедури «абсолютного калібрування», є незалежною від даних *Gaia* DR1, а також від HCRF [144]. У даній роботі для визначення кінематичних параметрів поряд з даними каталогу *Gaia* DR2 використовується каталог РМА, система власних рухів зірок якого є незалежною від *Gaia*-CRF2 [145]. З іншого боку, кількість і якість астрометричних параметрів, представлених в *Gaia* DR2 і РМА дають можливість застосувати для кінематичного аналізу не тільки традиційні моделі (модель Оорта – Ліндблада, модель О – М), але і порівняно недавно розроблений метод розкладання поля швидкостей зірок за системою ВСФ.

Крім того, в *Gaia* DR2 окремим списком наводяться ~7.2 мільйонів зірок з виміряними променевими швидкостями. Таким чином, відомі їхні просторові швидкості $V = \sqrt{\eta r(\mu_l^2 + \mu_b^2) + V_r^2}$.

Зазвичай дослідження кінематики Галактики зводиться до отримання кінематичних параметрів в рамках будь-якої фізичної моделі. Найчастіше такою моделлю є лінійна модель О – М [87]. На жаль, при використанні цієї моделі заздалегідь невідомо, чи відповідає вона реальному полю швидкостей зірок. У загальному випадку лінійна модель О – М дає можливість знайти тільки 12 невідомих, хоча в полі швидкостей можуть бути присутні й інші систематичні компоненти, які не входять в модель. Ця проблема природно розв’язується при застосуванні методу розкладання поля швидкостей зірок за системою ВСФ [88]. Метод дає можливість виявити всі систематичні складові, які присутні в спостережуваному полі швидкостей зірок, і таким чином, скласти повну з математичної точки зору кінематичну модель. Для встановлення фізичного сенсу коефіцієнтів розкладання такої формальної кінематичної моделі знаходять взаємозв’язки між ними і параметрами фізичної моделі.

Для коректної інтерпретації результатів, отриманих в рамках будь-якої фізичної моделі необхідно мати більш-менш рівномірний розподілу об'єктів відносно головної площини (в даній роботі це галактична площина). В іншому випадку, між параметрами, отриманими за допомогою МНК, можуть виникати значні кореляції, а значення самих параметрів при цьому можуть бути сильно спотворені. З іншого боку, в Галактиці можуть існувати процеси, які мають протилежну спрямованість в північній і південній галактичних півсферах, наприклад, градієнт швидкості обертання Галактики при віддаленні від її основної площини $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$. Такі процеси принципово неможливо виявити за допомогою моделі О–М, оскільки вони, при аналізі поля швидкостей всієї небесної сфери, компенсують один одного.

При використанні звичайних ВСФ також необхідною умовою є рівномірність покриття зірками всієї небесної сфери, тоді як метод ЗВСФ, розроблений [136], дає можливість отримати кінематичні параметри за власними рухами і променевими швидкостями зірок, що містяться лише в окремій зоні небесної сфери. Особливий інтерес представляє вивчення кінематики зірок окремо в північній і південній галактичних півсферах. Вперше це було зроблено в роботі [137] за власними рухами зірок з каталогів HIPPARCOS, Tycho-2 і UCAC3. Автори виявили, що параметри моделі О–М M_{32}^+ і ω_1 є значущими, а їх значення мають різні знаки в різних галактичних півсферах.

Як відзначено в розділі 1, кінематика зірок залежить, головним чином, від їх віку. У даній роботі, використовуючи астрофізичні критерії, такі як спектральний клас і клас світимості, що характеризують їх положення на діаграмі Г–Р, формуються вибірки зірок, що відрізняються середнім віком, і досліджуються їх кінематичні характеристики.

3.1 Астрометричні каталоги, що використовуються при кінематичних дослідженнях

В даний час існує значна кількість високоточних оглядів неба, що містять всі або частину таких параметрів як положення зірок, їх власні рухи, променеві швидкості, паралакси і зоряні величини в різних діапазонах

довжин хвиль: *Gaia* DR1, TGAS, *Gaia* DR2, PMA, UCAC5, HSOY, LAMOST, SDSS, AllWISE, 2MASS. З цього переліку в даній роботі використовуються дані каталогів TGAS (*Gaia* DR1), *Gaia* DR2, PMA, UCAC5, HSOY а також фотометричні дані з каталогу 2MASS.

3.1.1 *Gaia*

За час роботи над даною дисертацією вийшло два релізи космічної місії *Gaia*: DR1 і DR2, дані яких і були використані для кінематичних досліджень.

Перший реліз *Gaia* DR1 [143], заснований на 14-місячних спостереженнях, вийшов 14 вересня 2016 року. Каталог складається з двох частин:

1) Основний набір (каталог TGAS, Tycho-Gaia Astrometric Solution, [146]) містить положення, власні рухи, паралакси, фотометрію в смузі G для 2057050 зірок, спільних з об'єктами з каталогів HIPPARCOS і Tycho-2. Типова похибка визначення положень становить ± 0.3 мсд, а власних рухів – ± 1 мсд р^{-1} . Власні рухи і паралакси 93635 зірок підмножини HIPPARCOS набагато точніші – на рівні ± 0.06 мсд р^{-1} і ± 0.3 мсд, відповідно. При цьому наголошується [143], що до значень паралаксів необхідно додати систематичну компоненту ~ 0.3 мсд.

2) Вторинний набір даних містить положення і фотометрію в смузі G для 1140622719 зірок. Типова похибка положень цих зірок становить $\sim \pm 10$ мсд.

Система положень і власних рухів наведені в опорному фреймі, який узгоджений з ICRF з точністю краще 0.1 мсд на епоху J2015.0 і не має обертання на рівні 0.03 мсд р^{-1} .

25 квітня 2018 року вийшов другий реліз космічної місії *Gaia* (*Gaia* DR2) на основі 22 місячних спостережень. В каталозі містяться положення, власні рухи і паралакси для більш ніж 1.3 мільярди об'єктів, рівномірно розподілених по всій небесній сфері. Положення і паралакси цих джерел були визначені з випадковою похибкою від ± 0.02 – 0.04 мсд ($G < 15^{\text{m}}$) до ± 2 мсд ($G = 21^{\text{m}}$), а власні рухи мають випадкову точність ± 0.07 мсд р^{-1} при $G < 15$, яка погіршується до ± 3 мсд р^{-1} при $G = 21^{\text{m}}$. Автори роботи [141], використовуючи дані *Gaia* DR2 для 556869 квазарів, знайшли, що

паралакси джерел в каталозі *Gaia* DR2 мають систематичний зсув, що залежить від їх положення на небесній сфері, зоряної величини, показника кольору і в середньому дорівнює -0.029 мсд. Згідно з [14], опорний фрейм *Gaia*-CRF2 в області слабких зоряних величин ($G \sim 19^m$) узгоджений з ICRF з точністю краще ніж ± 0.02 мсд на епоху J2015.5 і не обертається відносно ICRF з точністю ± 0.02 мсд p^{-1} . У яскравій частині ($G < 12^m$) узгодження *Gaia*-CRF2 з ICRF краще ніж 0.3 мсд, а відносне обертання може становити 0.15 мсд p^{-1} .

Окремо опублікований каталог ~ 7.2 мільйонів об'єктів, для яких були виміряні також і променеві швидкості. Це зірки спектральних класів *FGK* з ефективними температурами T_{eff} в діапазоні $3550\text{--}6900$ K і зоряними величинами $G_{\text{RVS}}^{\text{ext}} < 12^m$ [147], [148]. Положення і паралакси цих зірок були визначені з похибкою $\pm 0.02\text{--}0.04$ мсд, а власні рухи отримані з точністю краще ніж ± 0.07 мсд p^{-1} . Точність променевих швидкостей варіюється від ± 0.3 км с^{-1} при $G_{\text{RVS}} < 8^m$ до ± 1.8 км с^{-1} при $G_{\text{RVS}} = 11.75^m$. Систематичні похибки променевих швидкостей, що були отримані при порівнянні з п'ятьма наземними каталогами: CU6GB, SIM, RAVE, APOGEE і *Gaia*-ESO, також залежать від зоряної величини. Вони змінюються від 0.1 км с^{-1} при $G_{\text{RVS}} < 8^m$ до 0.5 км с^{-1} при $G_{\text{RVS}} = 11.75^m$ (див. [14], табл. 3, а також [148]).

3.1.2 РМА

Каталог абсолютних власних рухів РМА (Proper Motions Absolute, [15]) був створений в Інституті астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (Україна), з комбінації положень зірок каталогу 2MASS, отриманих з наземних спостережень, і положень зірок каталогу *Gaia* DR1, отриманих з космічних спостережень. Різниця епох між положеннями зірок в цих каталогах становить 15 років. Каталог РМА містить більше 420 мільйонів зірок (~ 38 % всіх об'єктів *Gaia*). Нуль-пункт системи власних рухів зірок був встановлений з використанням положень ~ 1.6 мільйонів позагалактичних джерел з каталогу *Gaia* DR1. Також в каталозі наводяться положення, запозичені з каталогу *Gaia* DR1, і зоряні величини J, H, K і G , запозичені з каталогів 2MASS і *Gaia* DR1 відповідно.

Каталог РМА охоплює всю небесну сферу, включаючи площину Галактики. Власні рухи зірок отримані з випадковою похибкою $\sim 2\text{--}5$ мсдр $^{-1}$ при $10^m < G < 17^m$. У роботі [15] було показано, що система координат, яка реалізована положеннями і власними рухами зірок РМА на рівні невизначеності 0.35 мсдр $^{-1}$ не має обертання відносно фрейма, зафіксованого положеннями 1.6 мільйонів галактик і квазарів з Gaia DR1, що містяться в каталозі РМА. У цьому сенсі ця система координат є незалежною кінематичною реалізацією ICRS в оптичному та ближньому інфрачервоному (ІЧ) діапазонах.

На рис. 3.1 показані нормовані на одиницю профілі фотометричних фільтрів $G, G_{BP}, G_{RP}, J, H, K_S$. Крім того, в табл. 3.1 наведені їх середні довжини хвиль і ширини FWHM.

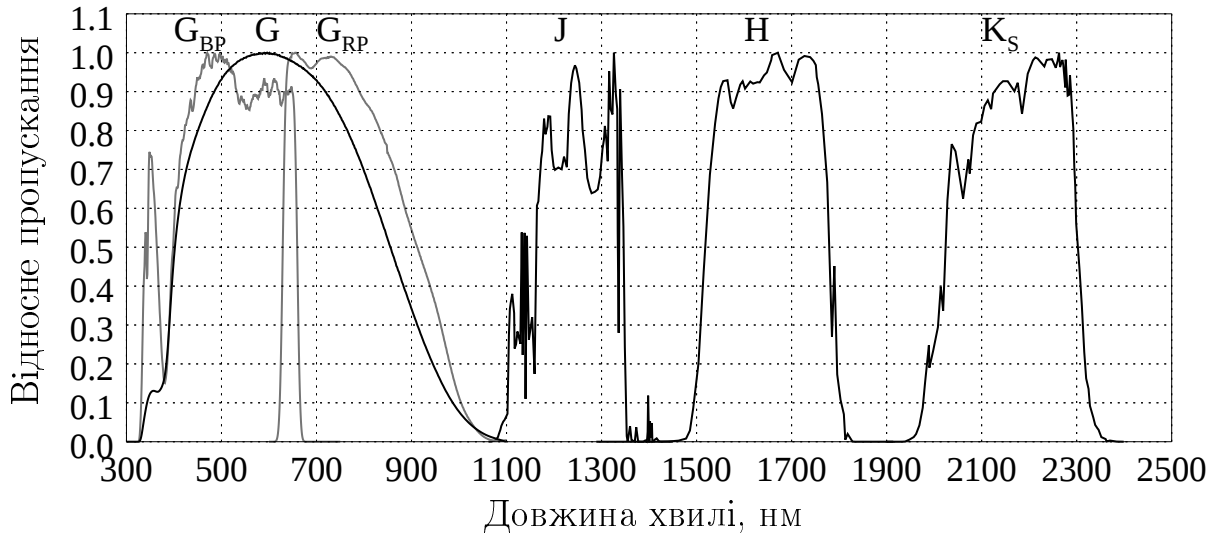


Рис. 3.1 Профілі фотометричних фільтрів G, G_{BP}, G_{RP} (Gaia DR2) і J, H, K_S (2MASS)

3.1.3 HSOY

Каталог HSOY (Hot Stuff for One Year, [17]) був отриманий з комбінації положень каталогів Gaia DR1 і PPMXL. Він містить 583 мільйони зірок, для кожної з яких наводяться положення і власні рухи. Точність цих положень знаходиться на рівні Gaia DR1, а випадкова похибка власних рухів становить $\pm 1\text{--}5$ мсдр $^{-1}$. Система положень і власних рухів наведена

в опорному фреймі TGAS.

Таблиця 3.1

Характеристики фотометричних смуг

Фільтр	λ , нм	Ширина, нм
G	673	440
G_{BP}	532	253
G_{RP}	797	296
J	1235	162
H	1662	251
K_S	2159	262

3.1.4 UCAC5

Каталог UCAC5 (USNO CCD Astrograph Catalog–5, [16]), був отриманий шляхом приведення даних каталогу UCAC4 в систему *Gaia* DR1. Він містить положення і власні рухи 107 мільйонів зірок з типовою точністю власних рухів $\pm 1\text{--}2 \text{ мсдр}^{-1}$ в діапазоні зоряних величин $R = 11 - 15^{\text{m}}$ і близько $\pm 5 \text{ мсдр}^{-1}$ при $R = 16^{\text{m}}$. В якості опорного каталогу використовувався каталог TGAS.

Варто зазначити, що для створення каталогів HSOY і UCAC5 використовувався класичний метод розповсюдження опорної системи від яскравої частини діапазону зоряних величин до слабкої. Тому їх системи власних рухів повинні відтворювати систему *Gaia* DR1, тоді як в каталозі РМА містяться абсолютні власні рухи, нуль-пункт яких був встановлений за допомогою 1.6 мільйонів позагалактичних джерел, тобто вони наведені у позагалактичній системі координат і є незалежними від системи *Gaia* DR1.

3.1.5 Систематичні відмінності між даними каталогів

В роботі [149], за участю автора дисертації, було проведено зіставлення систем власних рухів HSOY, UCAC5, РМА і TGAS в діапазоні їх спільних зоряних величин G . В результаті виявлено, що компоненти ω_x і ω_z

вектора обертання систем відліку каталогів HSOY, UCAC5 і PMA відносно системи TGAS не перевищують 0.5 мсдр^{-1} (див. рис. 3.2 – 3.4). В той же час, компонента ω_y показує практично ідентичну поведінку у всіх трьох випадках, змінюючись від $+0.5 \text{ мсдр}^{-1}$ до -1 мсдр^{-1} в діапазоні $8^{\text{m}} < G < 13^{\text{m}}$ (від 0 мсдр^{-1} до -1 мсдр^{-1} в разі каталогу HSOY). Внаслідок цього було зроблено висновок, що виявлене обертання спричинено присутністю систематичних похибок у власних рухах зірок TGAS. Крім того, було зазначено, що такі систематичні відмінності між системами власних рухів різних каталогів неминуче приведуть до систематичних розбіжностей кінематичних параметрів, отриманих за цими даними.

Зауважимо, що крім взаємного обертання між системами координат, що задаються каталогами, може існувати і зміщення їх початків координат один відносно іншого, так званий глайд, який не був розглянутий в [149]. Наявність глайда, а також інших деформаційних і обертальних складових, може привести до додаткових систематичних відмінностей між значеннями кінематичних параметрів.

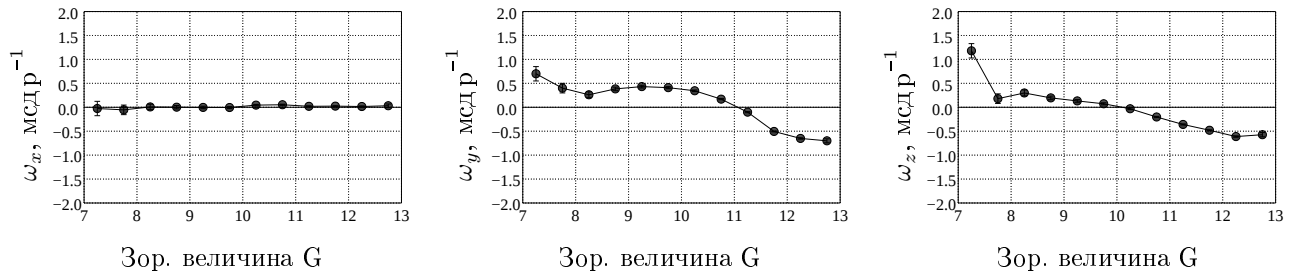


Рис. 3.2 Компоненти вектора взаємного обертання двох опорних систем каталогів PMA і TGAS виду PMA – TGAS

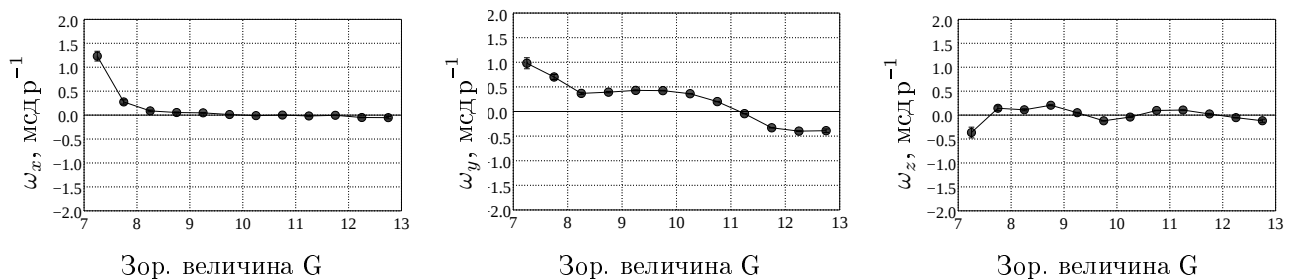


Рис. 3.3 Компоненти вектора взаємного обертання двох опорних систем каталогів UCAC5 і TGAS виду UCAC5 – TGAS

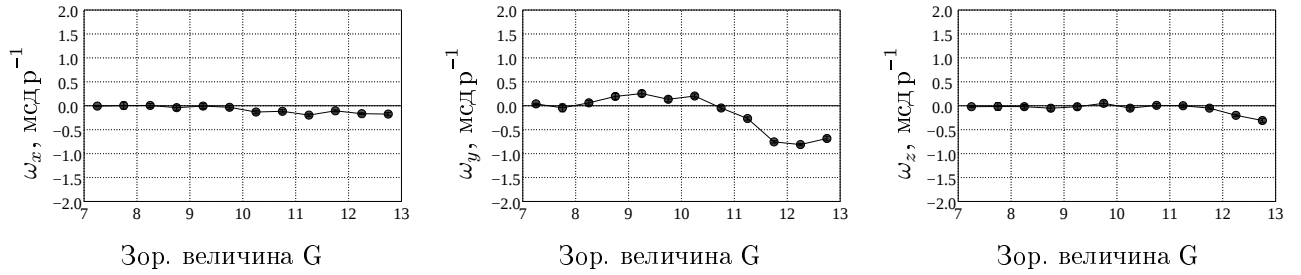


Рис. 3.4 Компоненти вектора взаємного обертання двох опорних систем каталогів HSOY і TGAS виду HSOY – TGAS

3.1.6 Проблема визначення геліоцентричних відстаней

На даний момент наймасовішим джерелом оцінки відстаней до зірок є тригонометричні паралакси. До того ж, це єдиний прямий метод оцінки відстаней, тоді як всі інші методи використовують різні астрофізичні припущення і є набагато більш трудомісткими.

Як зазначено в підрозділі 1.1.3, отримання відстаней з тригонометричних паралаксів за формулою

$$r = \frac{1}{\varpi} \quad (\text{в кпк}) \quad (3.40)$$

призводить до систематичних похибок, які зростають зі збільшенням ζ_{ϖ}/ϖ , і особливо позначаються вже при $\zeta_{\varpi}/\varpi > 0.2$, що обмежує область вивчення простору значенням $r < 1$ кпк. На додаток до цього, самі паралакси, крім випадкових похибок визначення, можуть мати також систематичні похибки.

Так, Ліндегрен та ін. [150] порівнюючи паралакси 86928 зірок TGAS і HIPPARCOS знайшли медіанну різницю нуль–пунктів паралаксів $\Delta\varpi(\text{TGAS-HIPPARCOS}) = -0.089 \pm 0.006$ масд, при цьому це значення різниться в різних екліптичних півсферах: в північній півсфері воно дорівнює -0.130 ± 0.006 масд, а в південній -0.053 ± 0.006 масд; $\Delta\varpi$ збільшується зі збільшенням показника кольору $(V - I)$ в північній півсфері і зменшується в південній. При аналізі паралаксів 135000 квазарів автори знайшли що їх значення відрізняються від нуля і дорівнюють -0.073 ± 0.002 масд і $+0.074 \pm 0.005$ масд в північній і південній екліптичних півсферах відповідно. Крім того, при порівнянні паралаксів 141 цефеїди TGAS з паралаксами, отриманими за співвідношенням період–світимість, була знайдена різниця

$$\Delta\varpi = -0.016 \pm 0.023 \text{ мсд.}$$

В роботі Джао та ін. [151] автори порівняли паралакси TGAS з тригонометричними паралаксами 612 зірок, які знаходяться в області 25 пк від Сонця, отриманих з HIPPARCOS і наземних спостережень. Автори знайшли $\Delta\varpi = -0.24 \pm 0.02$ мсд, обумовлену в основному даними HIPPARCOS. У той же час Джао та ін. не знайшли залежності $\Delta\varpi$ від зоряної величини, показника кольору і власних рухів, однак виявили різницю значень $\Delta\varpi$ в північній і південній екліптичних півсферах: -0.17 ± 0.03 і -0.32 ± 0.04 мсд, відповідно.

Стассун і Торрес [152] порівняли паралакси 111 затменно-змінних подвійних зірок TGAS зі значеннями, отриманими із їх фізичних характеристик. Точність отриманих значень в середньому становить ± 0.19 мсд. Автори виявили різницю $\Delta\varpi = -0.25 \pm 0.05$ мсд. Також автори виявили залежність $\Delta\varpi$ від температури зірок, зоряної величини V , а також сильну кореляцію значень паралаксів із зоряною величиною V . У північній і південній екліптичних півсферах $\Delta\varpi$ становить -0.38 ± 0.06 і -0.05 ± 0.09 мсд, відповідно. Також автори знайшли залежність $\Delta\varpi$ від екліптичної довготи: $\Delta\varpi = -0.22 - 0.003\beta$ мсд.

Де Ріддер та ін. [153] порівняли паралакси TGAS з астеросейсмічними значеннями, отриманими за різними спостереженнями телескопа Kepler. Автори виявили добре узгодження між даними TGAS і астеросейсмічними значеннями паралаксів для 22 карликів і субгігантів, що знаходяться поблизу Сонця. Однак в разі 938 гігантів, які перебувають на геліоцентричних відстанях від 0.5 до 5 кпк, виявилися суттєві відмінності в значеннях паралаксів. На думку авторів, астеросейсмічні паралакси є на порядок більш точними, ніж тригонометричні паралакси TGAS. Тому вони вирішили, що знайдені відмінності (значення яких не наведено в статті [153]) спричинені похибками в каталозі TGAS.

Ліндегрєн та ін. [141], досліджуючи паралакси в каталозі *Gaia* DR2, виявили що вони мають глобальний систематичний зсув в середньому $\Delta\varpi = -0.029$ мсд. Автори відзначають, що величина цієї систематичної похибки може варіюватися в межах десятків мікросекунд в залежності

від таких характеристик зірок як зоряна величина, показник кольору, положення на небесній сфері. На рис. 3.5 штриховою кривою показані різниці відстаней $1/\varpi - 1/\varpi_c$, де $\varpi_c = \varpi + 0.029$ мсд (тобто з урахуванням поправки, знайденої Ліндегреном та ін.). Різниця в порівнянні з відстанями $1/\varpi$ становить 50 пк на відстані 1 кпк, а на відстані 2 кпк досягає величини 200 пк.

Для обчислення «правильних» відстаней застосовують баєсівський підхід з різними реальними апріорними припущеннями. Наприклад, Астрадамдья і Байлер-Джонс ([27], <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=J/ApJ/833/119&-to=3>) отримали баєсівські відстані для зірок TGAS, використовуючи різні апріорні припущення: експоненціальний розподіл щільності зірок з параметром «довжина шкали» $L = 0.11$ кпк (rMoExp1) і 1.35 кпк (rMoExp2), а також більш складний тривимірний розподіл щільності зірок «Чумацький Шлях» (rMoMW), де враховуються ефекти селекції через обмеження огляду *Gaia* по зоряній величині. Порівняння відстаней, отриманих в цих трьох випадках, з відстанями $1/\varpi$ показано на лівій панелі рис. 3.5.

Як видно з рисунка, відстані, які отримані при різних припущеннях, не узгоджуються. Однак автори [27] прийшли до висновку, що всі вони є реалістичними за умови, що в разі експоненціального розподілу зірок необхідно більш ретельно підбирати параметр L , а також враховувати фотометричні властивості каталогу.

Щенріх та ін. ([29], <https://zenodo.org/record/2557803>), використовуючи метод з роботи [154], отримали баєсівські відстані для вибірки ~ 7.2 мільйонів зірок *Gaia* DR2 RV (тобто для тих зірок з каталогу *Gaia* DR2, для яких виміряні променеві швидкості). В якості апріорного знання автори використовували функцію селекції по зоряній величині, а також трикомпонентний розподіл зірок в просторі, який включає тонкий, товстий диски, і гало. Відмінності відстаней $r_{\text{Щен}}$, отриманих в роботі [29], від відстаней r_{ϖ} , отриманих з паралаксів за формулою $1/\varpi$, виду $r_{\varpi} - r_{\text{Щен}}$, показані на правій панелі рис. 3.5 суцільною кривою. На відстані 1 кпк різниця становить 40 пк, а на відстані 2 кпк ця різниця збільшується

до 110 пк. Таким чином, відстані, отримані безпосередньо з паралаксів, переоцінені.

Для цієї ж вибірки зірок Макміллан [28] застосував в якості апріорного знання розподіл абсолютних зоряних величин M_{Grvs} , що очікується для зірок в діапазоні $3550 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 6900 \text{ K}$. Автор припустив, що популяція зірок *Gaia* DR2 RV має таку ж НФМ і розподіл по віку, як і в апріорному припущенні «Age» з роботи [155]; розподіл металічності $[M/H]$ є гауссовим із середнім -0.1 і дисперсією 0.3 . Отримані оцінки відстаней наведені за посиланням <https://doi.org/10.5281/zenodo.1268353>, а їх порівняння з відстанями $1/\varpi$ показано на правій панелі рис. 3.5 штрихпунктирною кривою. З рисунка можна бачити, що отримані відстані мало відрізняються від відстаней $1/\varpi$. Різниця не перевищує 20 пк на відстані 1.2 кпк, потім зменшується до нуля.

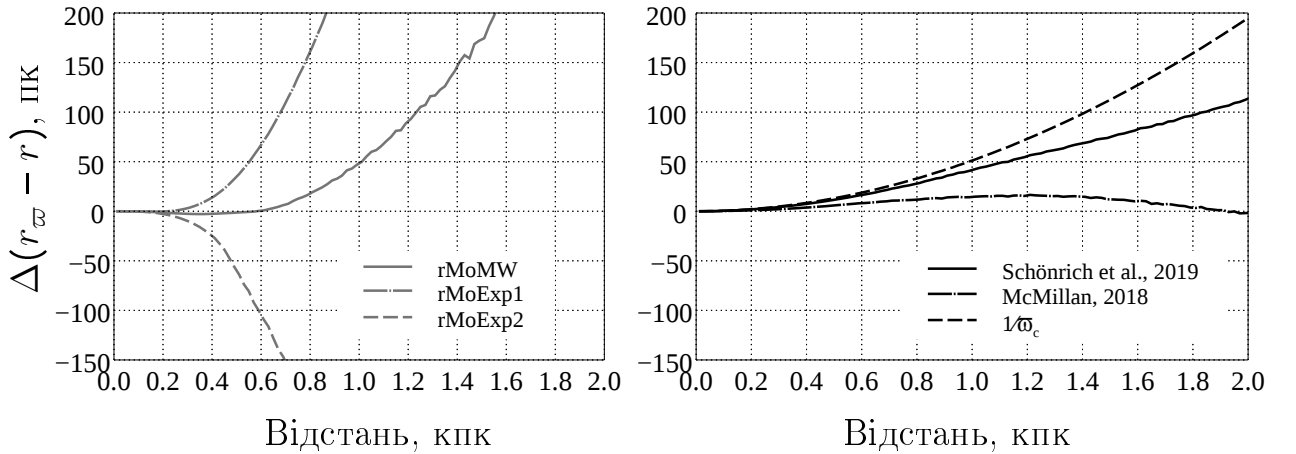


Рис. 3.5 Ліва панель: різниця відстаней, отриманих з паралаксів *Gaia* DR1 TGAS за формулою $1/\varpi$, і баєсівських відстаней з роботи Астрадамдья і Байлер-Джонса [27] для трьох різних апріорних припущень (див. опис в тексті): rMoMW (сіра суцільна крива), rMoExp1 (сіра штрих-пунктирна крива), rMoExp2 (сіра штрихова крива). Права панель: різниця відстаней, отриманих з паралаксів *Gaia* DR2 RV за формулою $1/\varpi$, і відстаней з роботи Щенріх та ін. [29] (чорна суцільна крива), роботи Макміллана [28] (чорна штрих-пунктирна крива), отриманих за формулою $1/\varpi_c$ з використанням виправлених за систематичну похибку паралаксів (чорна штрихова крива). Тут $\varpi_c = \varpi + 0.029 \text{ мсд}$

Вибір апріорних припущень є непростим завданням. Вони повинні включати в себе властивості зоряного огляду і всі особливості розподілу

зірок в просторі, що очікуються для конкретної зоряної вибірки. Необхідною вимогою є позитивні значення відстаней.

Порівняння баєсівських відстаней, отриманих в різних роботах, вказує на те, що використання різноманітних апріорних припущень призводить до суперечливих результатів. Тестові розрахунки в рамках цієї дисертації показали, що при дослідженні кінематики зірок, що знаходяться в межах геліоцентричних відстаней $r < 1.2$ кпк, відмінності між відстанями, які показані на правій панелі рис. 3.5, практично не впливають на значення кінематичних параметрів.

У даній роботі для кінематичного аналізу використовуються зірки сонячної околиці з геліоцентричними відстанями $r < 1.2$ кпк, астрометричні параметри яких визначені з високою точністю. Крім того, завжди відбираються зірки за критерієм $\varsigma_{\varpi}/\varpi < 0.2$, для яких відмінності між баєсівськими відстанями і відстанями $1/\varpi$ повинні бути мінімальні. Тому для оцінки відстаней хорошим наближенням є $1/\varpi$.

3.1.7 Карти поглинання

Для відбору зірок різних спектральних класів, наприклад, ГП або ЧГ, необхідно з хорошою точністю визначати показник кольору (наприклад, $(J - K_S)_0$ і абсолютну зоряну величину M_{K_S}, M_G , де J і K_S – зоряні величини з каталогу 2MASS [156], G – зоряна величина з каталогів місії *Gaia*. Використання саме ГЧ фотометрії обумовлено тим, що в цьому діапазоні довжин хвиль поглинання на порядок менше, ніж у видимому діапазоні. Так, наприклад, згідно з [157] коефіцієнти поглинання $A_J = 0.282 A_V$, $A_H = 0.190 A_V$, $A_K = 0.114 A_V$.

Для врахування почервоніння і поглинання в цій роботі була використана тривимірна карта міжзоряного поглинання з роботи Гончарова [158], яка розрахована для близькосонячної області з $r < 1.2$ кпк і $|z| < 600$ пк і має роздільність 20 пк. На цій карті для сітки з галактичними координатами x, y, z (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-3?-source=J/PAZh/43/521/xyzej>) або l, b (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-3?-source=J/PAZh/43/521/rlbejk>) наводяться

значення E_{J-K_S} , E_{B-V} , A_V і R_V , де E_{J-K_S} , E_{B-V} – надлишки кольорів, A_V – коефіцієнт поглинання в смузі V , $R_V = A_V/E_{B-V}$ – коефіцієнт відношення повного поглинання до селективного.

Згідно з особистим повідомленням Гончарова, насправді область застосування цієї карти значно більша зазначених меж, оскільки при $|z| = 600$ пк і $|b| > 20^\circ$ джерела опиняються за межами галактичного шару пилу, а значить почервоніння/поглинання не буде наростати уздовж відповідних променів зору. Тому значення $E(J - K_S)$, A_V , що відповідають $|z| = 600$ пк і $|b| > 20^\circ$, можна використовувати для оцінки почервоніння/поглинання при $|z| > 600$ пк. Таким чином, ця карта поглинання може бути використана всередині всієї області з $r < 1.2$ кпк.

Значення коефіцієнта поглинання були обчислені за формулою $A_{K_S} = 0.114A_V$ [157]. Для обчислення значень в будь-якій заданій точці простору була використана трилінійна інтерполяція.

Для порівняння, а також розширення області, що досліджується, була використана також карта розподілу пилу в близькосонячному просторі розміром $6 \times 6 \times 0.8$ кпк³ з роботи Лалlement та ін. [159]. У Страсбурзькій базі даних ця карта представлена у вигляді розподілу диференціальної непрозорості міжзоряного пилу dA_0/dr (розмірність зоряна величина на пк), де A_0 – екстинкція на довжині хвилі $\lambda 5500\text{\AA}$ (<http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/625/A135>).

Крім того, автори [159] розробили програмне забезпечення (представлено на сайті https://astro.acri-st.fr/gaia_dev/#extinction) для отримання інтегрального значення $A_0(r)$ уздовж заданого напрямку l, b з кроком по відстані 5 пк. Для ілюстрації на рис. 3.6 наведена залежність $A_0(r)$ уздовж кількох напрямків, що розрізняються по галактичній широті b . З малюнка добре видно, що найбільш сильне поглинання відчувають зірки, які знаходяться безпосередньо в площині Галактики, особливо в напрямку на її центр ($l = 0^\circ, b = 0^\circ$). Зі збільшенням (або зменшенням) галактичної широти b , вплив поглинання зменшується, і стає мінімальним в напрямках на північний ($b = 90^\circ$) та південний ($b = -90^\circ$) полюси Галактики. Довжина кожної кривої на малюнку обмежена областю розповсюдження карти.

Цей рисунок наочно демонструє немонотонне наростання поглинання уздовж променя зору, а також варіації поглинання уздовж різних напрямків, що вказує на необхідність використання карт поглинання при використанні фотометричних даних зірок.

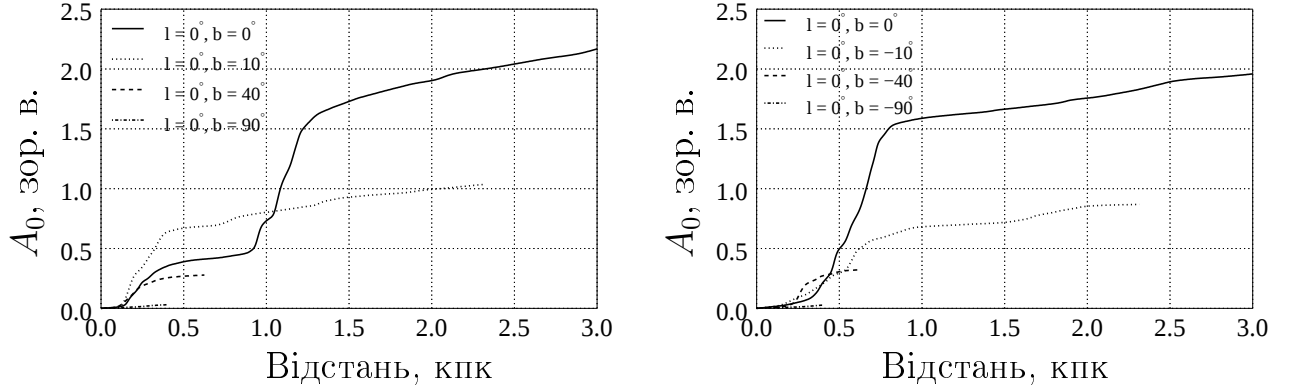


Рис. 3.6 Поглинання A_0 в залежності від геліоцентричній відстані, отримане за даними Лаллемент та ін. [159]. Ліва панель: уздовж напрямків $l = 0^\circ, b = 0^\circ$ (напрямок на центр Галактики, суцільна лінія), $l = 0^\circ, b = 10^\circ$ (пунктирна лінія), $l = 0^\circ, b = 40^\circ$ (штрихова лінія), $b = 90^\circ$ (напрямок на північний полюс, штрих-пунктирна лінія). Права панель: уздовж напрямків $l = 90^\circ, b = 0^\circ$ (напрямок обертання зірок навколо центра Галактики, суцільна лінія), $l = 90^\circ, b = -10^\circ$ (пунктирна лінія), $l = 90^\circ, b = -40^\circ$ (штрихова лінія), $b = -90^\circ$ (напрямок на південний полюс, штрих-пунктирна лінія)

Використовуючи сітку координат, що співпадають з центрами пікселів HEALPix (наприклад, з параметром $N_{\text{side}} = 20$, тобто $N_{\text{pix}} = 4800$), ми отримуємо карту розподілу A_0 уздовж 4800 напрямків, рівномірно розподілених по всьому небу. Потім, застосовуючи ряд перетворень, рекомендованих Лаллемент в особистому повідомленні: $A_V = 0.95 A_0$; $A_{K_S} = 0.114 A_V$; $E_{B-V} = A_V / R_V$; $E_{J-K_S} = 0.6 E_{B-V}$, отримуємо для кожної зірки величини A_{K_S} і E_{J-K_S} . Значення коефіцієнта R_V бралось або з роботи Гончарова [158], якщо зірка знаходилась в області застосування його карти, або використовувалось стандартне значення $R_V = 3.1$ [160].

На рис. 3.7 показана різниця надлишків кольорів ΔE_{J-K_S} (Гончаров–Лаллемент) в залежності від відстані уздовж 240 напрямків на галактичних широтах $b = 0^\circ, 11^\circ.5, 23^\circ.6, 41^\circ.8, -23^\circ.6, -41^\circ.8$ (по 40 напрямків на кожній широті). З рисунка видно, що найбільші відмінності

E_{J-K_S} , до 0.25^m , спостерігаються в найбільш щільних областях поблизу галактичної площини. Крім того, спостерігається систематична відмінність на рівні 0.05^m .

В наступних підрозділах розглядається кінематика зірок різних підсистем нашої Галактики з врахуванням вказаних вище обмежень і поправок.

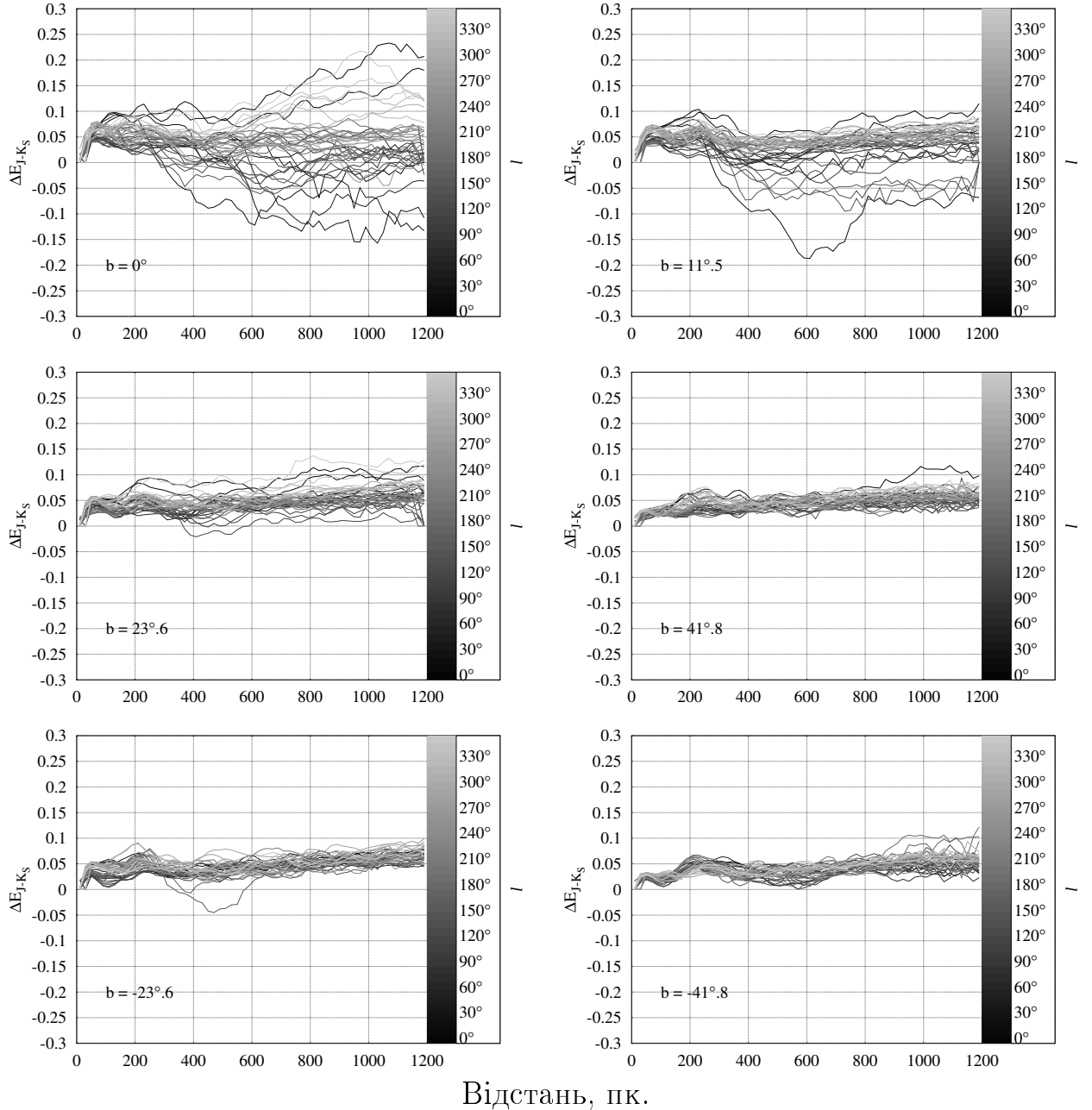


Рис. 3.7 Різниця E_{J-K_S} (Гончаров – Лалlement) на шести різних галактичних широтах: $b = 0^\circ, 11^\circ.5, 23^\circ.6, 41^\circ.8, -23^\circ.6, -41^\circ.8$. Відтінками сірого позначені галактичні довготи, які рівномірно розташовані уздовж кожної широти

3.2 Кінематика зірок змішаного спектрального складу

У цьому підрозділі аналізується кінематика зірок змішаного спектрального складу, визначена за власними рухами ~ 1.9 мільйонів спільних зірок з каталогів HSOY, UCAC5, PMA і TGAS, описаних в підрозділі 3.1, з метою вивчення впливу систематичних відмінностей між системами власних рухів, зазначених в підрозділі 3.1.5, на значення кінематичних параметрів.

Зірки були розділені на підвибірки за геліоцентричними відстанями в діапазоні $0.1 < r < 1.2$ кпк з кроком 0.1 кпк. Для кожної підвибірки зірок були отримані коефіцієнти розкладання $t_{\text{нкр}}, s_{\text{нкр}}$ за допомогою методу ВСФ, описаного в підрозділі 2.2.3. Кінематичні параметри моделі О–М, наведені на рис. 3.8, 3.9, були обчислені з коефіцієнтів розкладання за допомогою співвідношень з табл. 2.1.

Результати цього дослідження представлені в роботі [138].

3.2.1 Аналіз кінематичних параметрів

Параметри ω_z і M_{12}^+

Залежність параметрів ω_z і M_{12}^+ від геліоцентричної відстані показана на верхній панелі рис. 3.8. З рисунка видно, що значення параметра ω_z , що характеризує локальне обертання підвбірок зірок навколо осі z , визначені за даними каталогів HSOY, UCAC5, PMA і TGAS, збігаються між собою в межах 3σ . Навпаки, значення параметра M_{12}^+ , визначені за власними рухами зірок PMA, систематично менше значень, отриманих за даними інших каталогів. Різниця становить в середньому $1.5 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$.

Як наслідок, значення швидкості обертання підвбірок зірок навколо центра Галактики V_{rot} , визначені за даними PMA, також повинні систематично відрізнятися від тих, які визначені за даними HSOY, UCAC5 і TGAS (див. формулу 2.21). З лівої панелі рис. 3.10 видно, що $V_{\text{rot}}(\text{PMA})$ систематично менше значень, отриманих за даними інших каталогів в середньому на 14.5 км с^{-1} .

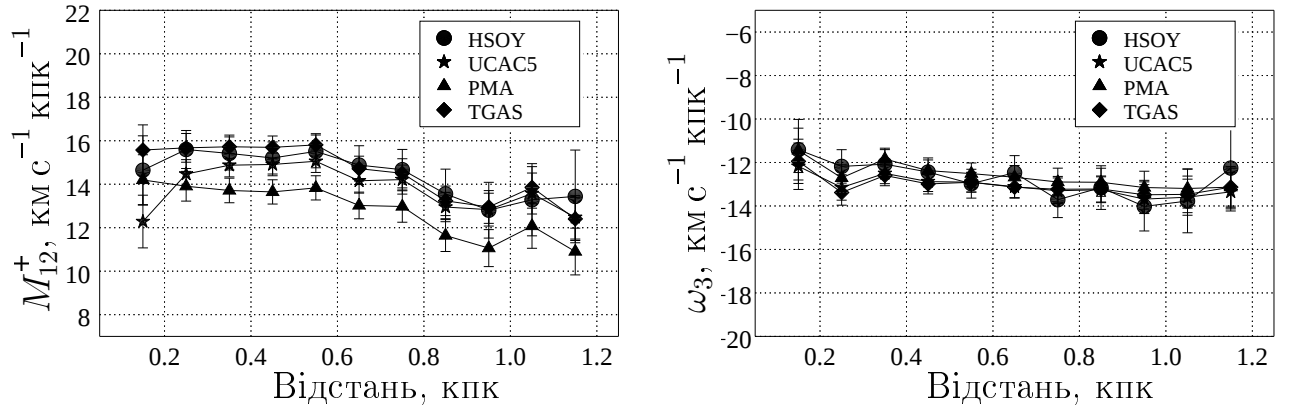


Рис. 3.8 Кінематичні параметри M_{12}^+ і ω_3 моделі О – М, отримані за власними рухами зірок з каталогів HSOY (кружки), UCAC5 (зірки), PMA (трикутники) і TGAS (ромби), в залежності від геліоцентричної відстані

З іншого боку, значення нахилу кривої обертання, який також обчислюється з комбінації параметрів ω_3 і M_{12}^+ (формула 2.22), збігаються в межах 3σ у всьому діапазоні відстаней (права панель рис. 3.10).

Параметри ω_2 , ω_1 , M_{13}^+ , M_{23}^+ , M_{11}^* і M_{33}^*

Серед значень параметрів ω_2 , ω_1 , M_{13}^+ , M_{23}^+ , M_{11}^* і M_{33}^* (рис. 3.9), отриманих за власними рухами HSOY, UCAC5, PMA і TGAS, практично немає систематичних відмінностей в межах похибок визначення. Можна виділити натяк на систематичну відмінність значень ω_1 , визначених за даними HSOY, від значень, визначених за даними PMA, UCAC5 і TGAS.

Крім того, простежується така тенденція, що значення параметрів ω_2 , ω_1 , M_{13}^+ , M_{23}^+ , M_{33}^* для найближчих зірок, при $r < 0.4$ кпк, в середньому трохи відрізняються від нуля, тоді як для зірок з $r \geq 0.4$ кпк ці параметри стають майже нульовими. Таким чином, можна зробити висновок, що кінематика близьких і далеких зірок розрізняється. Значення параметра $M_{11}^* = M_{11}^+ - M_{22}^+$, що характеризує розширення зоряної підвибірки, відмінні від нуля у всьому діапазоні відстаней, і знаходиться в межах $-7 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1} < M_{11}^* < -4.2 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$.

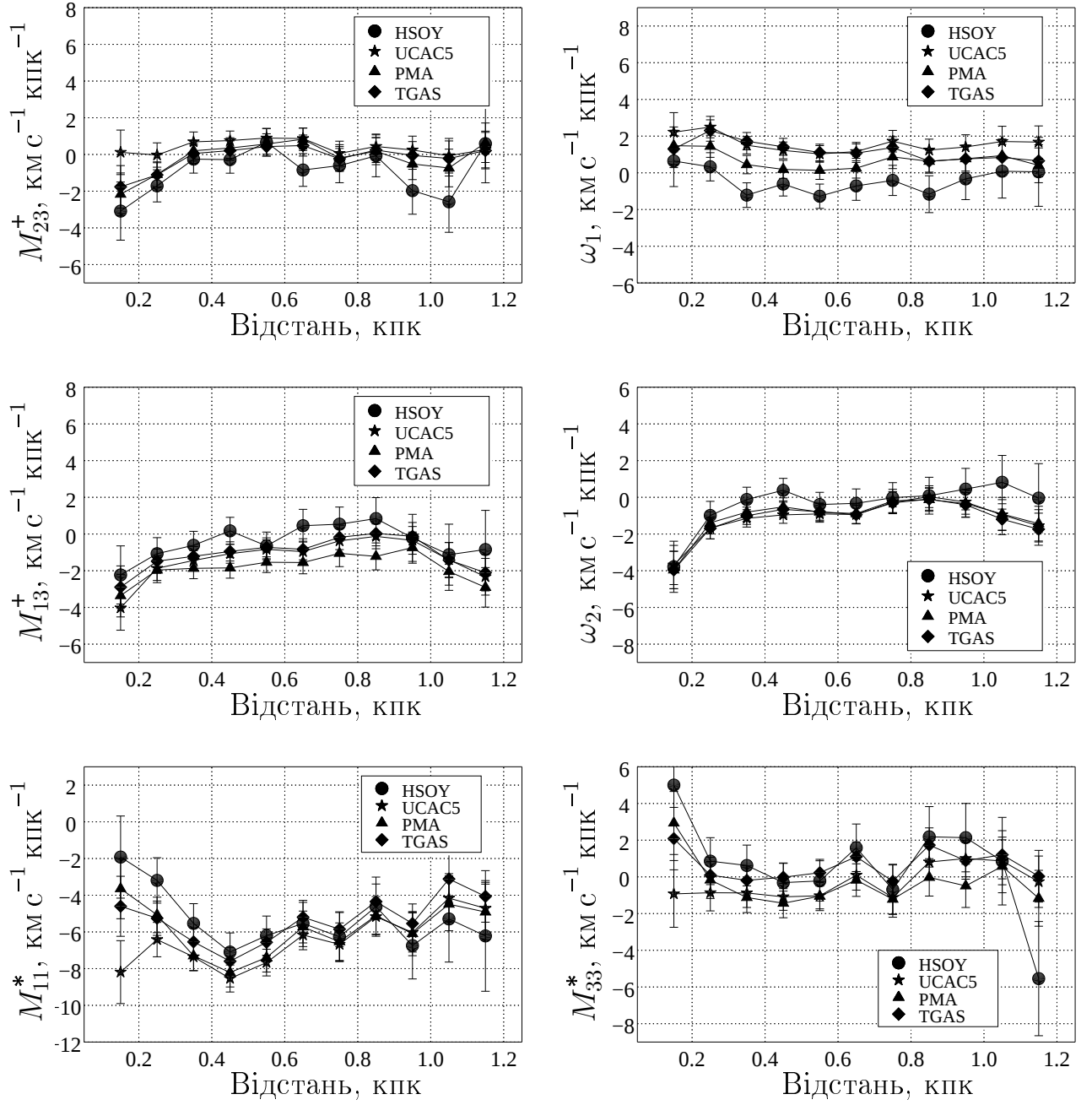


Рис. 3.9 Кінематичні параметри M_{23}^+ , M_{13}^+ , ω_1 , ω_2 , M_{11}^* , M_{33}^* , отримані за власними рухами зірок з каталогів HSOY (кружки), UCAC5 (зірки), PMA (трикутники) і TGAS (ромби), в залежності від геліоцентричної відстані

Як буде показано в підрозділі 3.3, де в розрахунках використовуються також і променеві швидкості, значення M_{11}^* в основному визначається компонентою M_{11}^+ , тоді як M_{22}^+ має мале по модулю або практично нульове значення.

Позамодельні коефіцієнти

На рис. 3.12 показані кінематичні спектри (тобто набір значень всіх коефіцієнтів розкладання t, s) до $n = 3, k = 3, p = 1$, визначені за власними рухами зірок каталогу TGAS, що знаходяться в сферичних шарах $0.1 \text{ кпк} < r < 0.2 \text{ кпк}$ і $0.9 \text{ кпк} < r < 1 \text{ кпк}$. Добре видно, що поле швидкостей близьких зірок (тобто в шарі $0.1\text{--}0.2 \text{ кпк}$) більш збурене, ніж поле швидкостей далеких зірок.

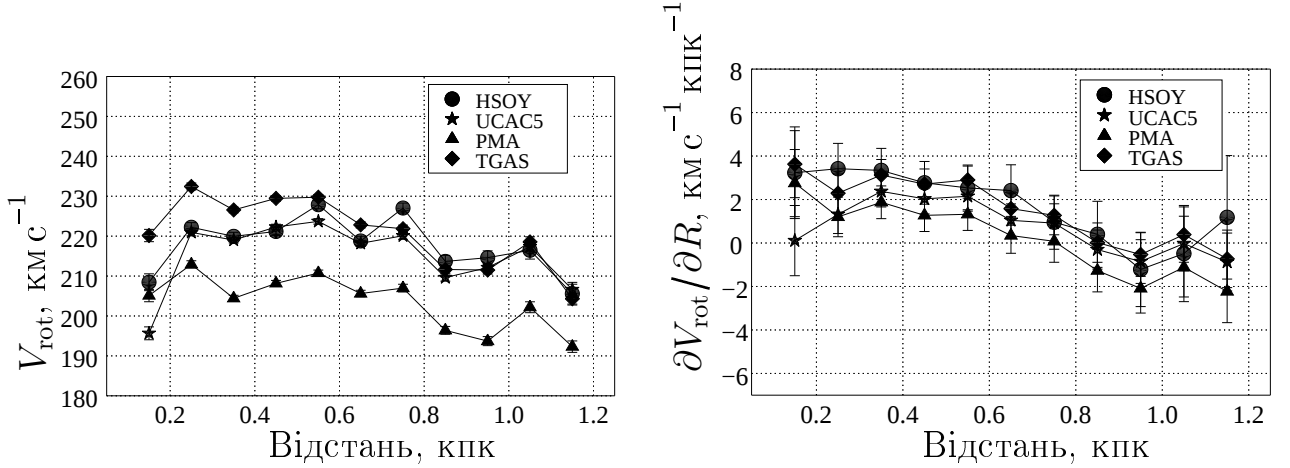


Рис. 3.10 Швидкість обертання зірок навколо центра Галактики (ліва панель) і нахил кривої обертання (права панель), визначені за власними рухами зірок з каталогів HSOY (кружки), UCAC5 (зірки), PMA (трикутники) і TGAS (ромби) в залежності від геліоцентричної відстані

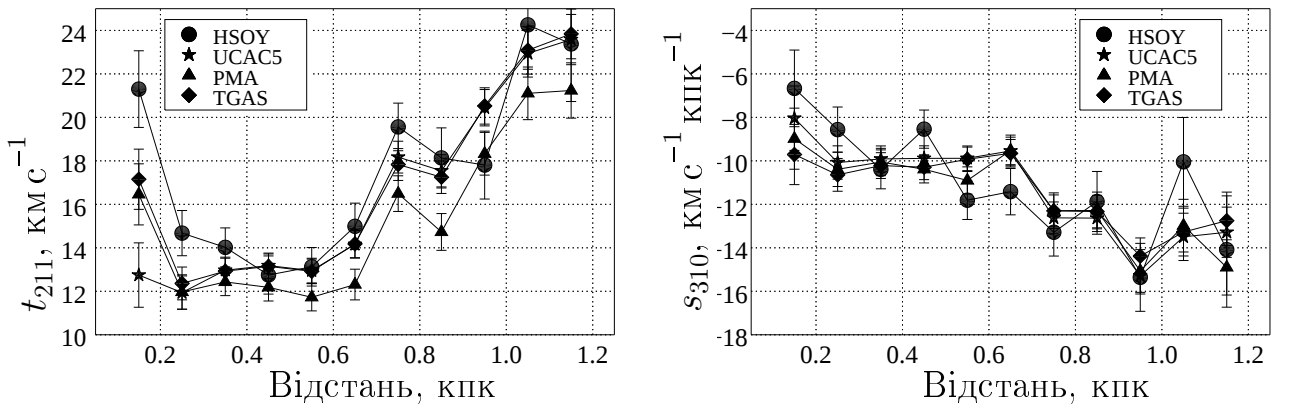


Рис. 3.11 Позамодельні коефіцієнти t_{211} (ліва панель) і s_{310} (права панель), визначені за власними рухами зірок з каталогів HSOY (кружки), UCAC5 (зірки), PMA (трикутники) і TGAS (ромби) в залежності від геліоцентричної відстані

Із збільшенням геліоцентричної відстані кінематика зірок стає більш

схожою на Оортівську, тобто ту, яка відповідає моделі Оорта–Ліндблада. Ця модель включає в себе, крім компонент швидкості Сонця $X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}$, тільки компоненти обертання ω_z і деформації M_{12}^+ в площині Галактики, які називаються постійними Оорта B і A , відповідно. Як видно з правої панелі рис. 3.12, насправді найбільшу амплітуду мають параметри $X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}, \omega_z$ і M_{12}^+ .

Проте крім коефіцієнтів, що відповідають параметрам моделі О–М (позначені темно-сірим кольором, див. табл. 2.1), в полі швидкостей зірок виявляються також позамоделні коефіцієнти, серед яких найбільшу амплітуду мають коефіцієнти t_{211} і s_{310} . Їх поведінку в залежності від відстані показано на рис. 3.11. Як видно з рисунка, значення цих коефіцієнтів, визначених за власними рухами зірок з каталогів HSOY, UCAC5, PMA, TGAS, практично не мають систематичних відмінностей. Розкид значень становить від $0.5 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ (s_{310} , $0.3 \text{ кпк} \leq r < 0.4 \text{ кпк}$) до $8.5 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ (t_{211} , $0.1 \text{ кпк} \leq r < 0.2 \text{ кпк}$). Також можна бачити, що є тенденція збільшення їх модулів при збільшенні відстані до зоряного шару. Так, при усередненні за даними всіх каталогів, значення t_{211} змінюються від 12.7 до 23.0 $\text{км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, а s_{310} від -8.34 до $-13.8 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$.

Як буде показано в підрозділі 3.4.5, коефіцієнти t_{211} і s_{310} пов'язані з наявністю в полі швидкостей зірок вертикального градієнта швидкості обертання зірок навколо центра Галактики $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$. Цей ефект полягає в тому, що чим далі від площини Галактики знаходяться зірки, тим повільніше вони обертаються навколо її центра.

3.2.2 Висновки до підрозділу 3.2

Аналіз кінематики зірок за даними різних каталогів дає можливість виявити, яким чином систематичні відмінності між системами власних рухів каталогів впливають на значення кінематичних параметрів. Так як на даний момент неможливо визначити, система якого каталогу відповідає дійсності і не має систематичного зсуву щодо «ідеальної» системи, то різниці значень кінематичних параметрів, можуть характеризувати реальну точність їх визначення. В окремих випадках різниці значень можуть досягати

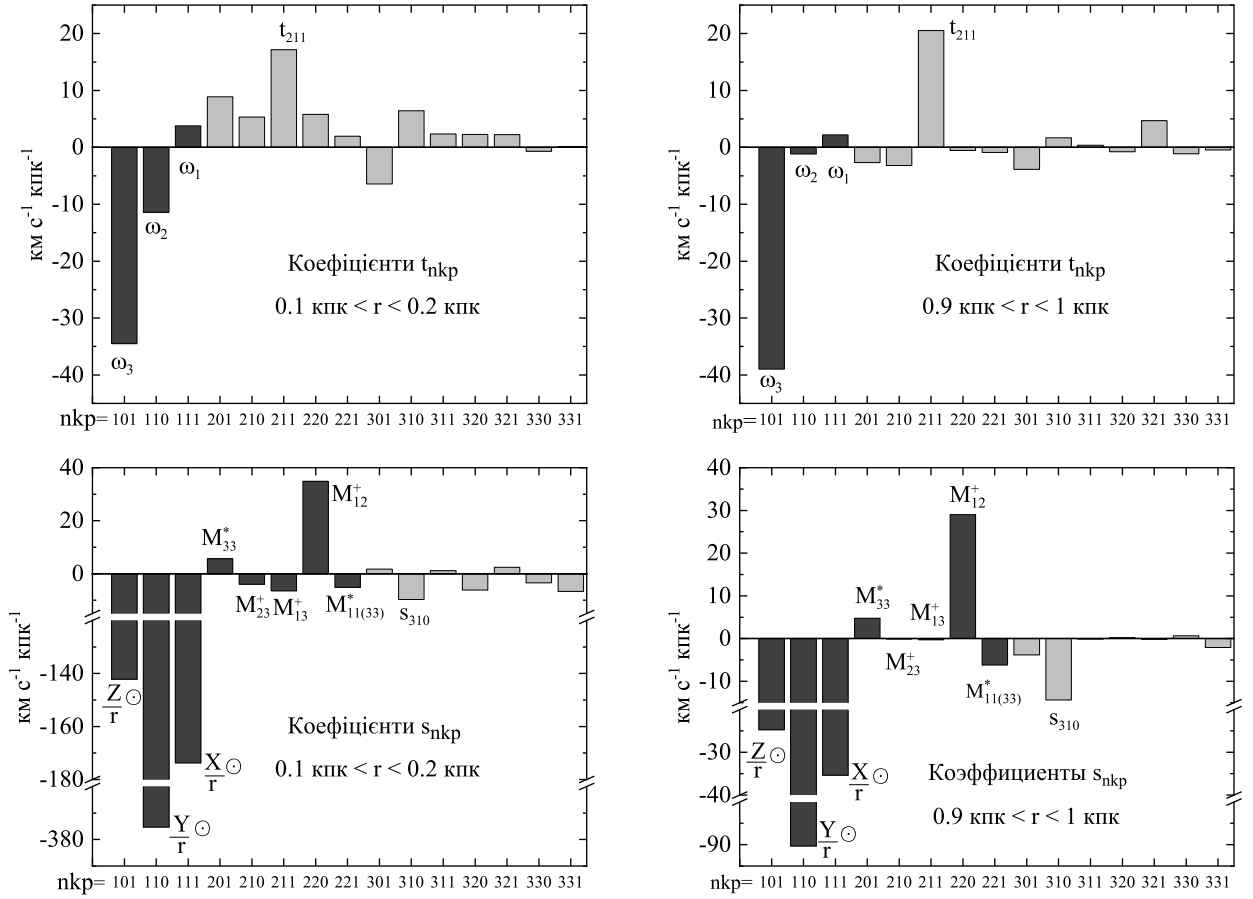


Рис. 3.12 Кінематичні спектри до $n = 3, k = 3, p = 1$, отримані за власними рухами зірок каталогу TGAS, що знаходяться в діапазоні геліоцентричних відстаней $0.1 \text{ кпк} < r < 0.2 \text{ кпк}$ і $0.9 \text{ кпк} < r < 1.0 \text{ кпк}$. На верхній панелі представлені коефіцієнти розкладання за ВСФ t_{nkr} , на нижній панелі – коефіцієнти s_{nkr} . Темно-сірим кольором показані коефіцієнти, які відповідають параметрам моделі О–М, світло-сірим кольором показані позамоделльні коефіцієнти

$\pm 4 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, тоді як внутрішня похибка визначення за даними кожного з каталогів становить $\pm 1\text{--}2 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. В результаті, при обчисленні глобальних параметрів Галактики, наприклад, швидкості обертання зірок навколо її центра V_{rot} (з комбінації параметрів ω_3 і M_{12}^+ , формула 2.21), різниці значень досягають 25 км с^{-1} . Оскільки положення і власні рухи зірок каталогів TGAS, UCAC5 і HSOY наведені в одному і тому ж опорному фреймі HCRF/ICRF, то отримані розбіжності в кінематичних параметрах, в основному обумовлені відмінністю систем цих трьох каталогів від системи RMA.

З іншого боку, приведені вище міркування стосовно параметра ω_1 не

спрацьовують, тому що значення цього кінематичного параметра, отримані за даними HSOY, відрізняються від значень, отриманих за даними TGAS, UCAC5 і PMA. Таким чином можна зробити висновок, що навіть у разі приведення систем двох каталогів до одного і того ж опорного фрейма можуть виникати систематичні відмінності між деякими кінематичними параметрами.

Аналіз кінематичних параметрів зірок в залежності від геліоцентричної відстані r показав, що кінематика близьких і далеких зірок різниться. Поле швидкостей близьких зірок більш збурене, тобто містить множину гармонік, частина з яких відповідає моделі О–М, а частина є позамоделними. При цьому, вони визначаються з великими випадковими похибками. Із збільшенням відстані r кінематика зірок стає більш схожою на Оортівську, тобто, окрім компонент руху Сонця $X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}$, найбільш значними за амплітудою стають параметри ω_3, M_{12}^+ , тоді як значення параметрів $\omega_2, \omega_1, M_{13}^+, M_{23}^+$ зменшуються майже до нуля. Також в полі швидкостей далеких зірок залишається компонента, що характеризує радіальну деформацію M_{11}^* , а компонента M_{33}^* становиться практично нульовою. Розрахунки з залученням променевих швидкостей показують (див. табл. 3.2), що, як правило, найбільш значним по амплітуді серед параметрів $M_{11}^+, M_{22}^+, M_{33}^+$ є параметр M_{11}^+ , який за знаком завжди негативний. Це означає, що розглянута система зірок стискається вздовж осі x галактичної системи координат. В той же час значення параметрів M_{22}^+, M_{33}^+ в основному або малі, або нульові.

Крім модельних параметрів, у всіх кінематичних спектрах особливо виділяються коефіцієнти розкладання за ВСФ t_{211} і s_{310} . Вони виникають спільно (деталі наведені у розділі 3.4.5) внаслідок присутності в полі швидкостей вертикального градієнта швидкості обертання зірок навколо центра Галактики $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$. Модулі значень цих коефіцієнтів мають тенденцію збільшуватися із збільшенням r , що пов'язано із зростанням у досліджуваних вибірці частки зірок все більш далеких від площини Галактики, середній вік яких більше ніж у близьких.

3.3 Кінематика молодих червоних гігантів згущення

Червоне згущення – це компактна область на діаграмі $\Gamma - R$, яку займають зірки, що знаходяться на стадії горіння гелію в ядрі. Згідно з дослідженням Жіларді та ін. [161] і Жіларді [162], окрім основного, існує також і вторинне згущення ЧГ, розташоване на діаграмі $\Gamma - R$ з лівого (більш синього) краю горизонтальної гілки ЧГ і яке має трохи меншу світимість, ніж гіганти основної гілки. Метою цього дослідження є: 1) перевірка сумісності власних рухів і променевих швидкостей зірок щодо моделі $O - M$; 2) перевірка факту малого віку зірок, що входять у вторинне згущення ЧГ.

Для дослідження кінематики молодих гігантів червоного згущення використана підмножина 7.2 мільйонів зірок, для яких в каталозі *Gaia* DR2 представлені не тільки власні рухи, а і їх променеві швидкості (назвемо цей набір *Gaia* DR2 RV, описаний в частині 3.1.1). Щоб залучити до аналізу також і інші дані, було зроблено координатний перетин зірок РМА з зірками *Gaia* DR2 RV. Для відбору зірок, найбільш якісних з точки зору точності їх астрометричних параметрів, до отриманого перетину застосовані астрометричні критерії Ліндегрена: $\varsigma_{\varpi}/\varpi < 0.2$ і $(\mu_{l*}/\varsigma_{\mu_{l*}})^2 + (\mu_b/\varsigma_{\mu_b})^2 > 25$, в результаті чого, знайдено 6.9 мільйонів спільних об'єктів.

Результати даного дослідження також представлені в роботі [139].

3.3.1 Відбір червоних гігантів вторинного згущення

Зірки вторинного згущення добре виділяються на діаграмі $M_{K_S}, G - K_S$ і знаходяться всередині еліпса з центром $M_{K_S}, G - K_S \simeq (-1.30, 1.95)$ (https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20171020).

На лівій панелі рис. 3.13 показана діаграма абсолютна зоряна величина M_{K_S} – показник кольору $G - K_S$ для зірок з $E(J - K_S) < 0.04^m$ (тобто тих зірок, які вважаються непочервонівшими) для області гігантів горизонтальної гілки. На цій діаграмі виділяється згущення зірок, окреслене еліпсом. На правій панелі рис. 3.13 показано розподіл в залежності від показника кольору $G - K_S$ для зірок, що знаходяться в діапазоні $-1.5^m < M_{K_S} < -1.0^m$. Видно, що розподіл має два піки, показаних за

допомогою кривих Гаусса. Лівий пік відповідає зіркам вторинного згущення, тоді як правий – субгігантам.

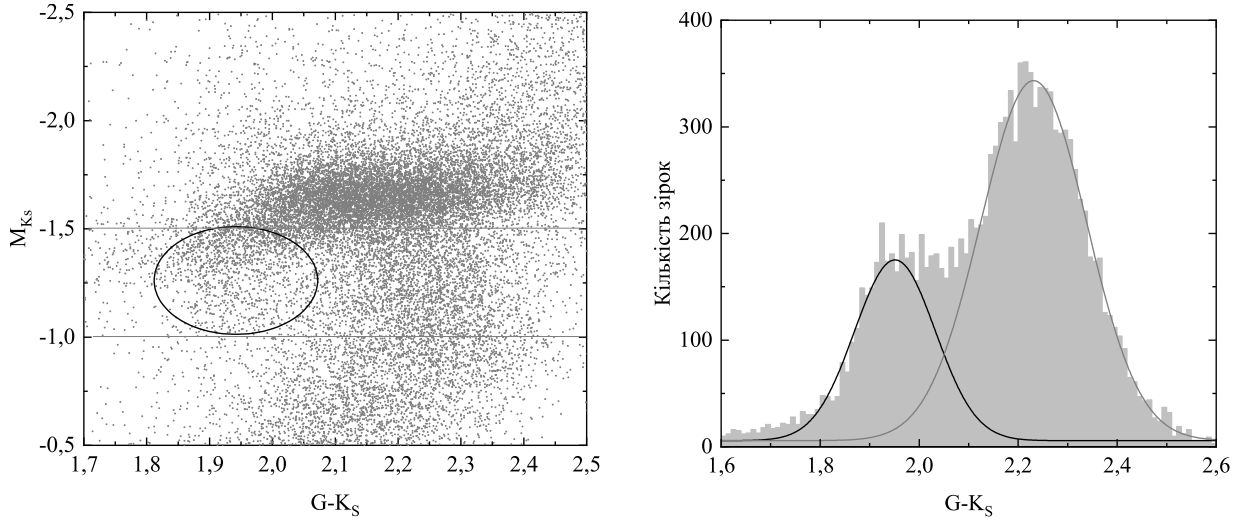


Рис. 3.13 Ліва панель: діаграма абсолютна зоряна величина M_{K_S} – показник кольору $G - K_S$ для зірок з $E(J - K_S) < 0.04$ в області гігантів горизонтальної гілки. Еліпсом показано вторинне згущення. Права панель: розподіл зірок в залежності від показника кольору $G - K_S$ для зірок, що знаходяться в діапазоні $-1.5^m < M_{K_S} < -1^m$ (тобто між двома прямими лініями, показаними на лівій панелі). Дві криві Гаусса показують положення двох піків розподілу. Чорна крива з центром $G - K_S = 1.95$ відповідає вторинному згущенню зірок

Як основне, так і вторинне згущення складаються з гігантів, які перебувають на стадії горіння гелію в ядрі. Вторинне згущення відрізняється від основного тим, що воно складається з відносно молодих зірок з початковими масами $\approx 2 - 2.5 M_{\odot}$ [162], які пропускають стадію виродження електронного газу після вичерпання водню в ядрі. В результаті такі зірки концентруються окремо від основного згущення ЧГ і є відносно молодими, оскільки час життя зірок з масою більше $2 M_{\odot}$ не перевищує 2 мільярди років (див. рис. 3.14). Тому в роботі Гончарова [163] вони називаються молодими гігантами червоного згущення.

Всі молоді гіганти червоного згущення знаходяться поблизу площини Галактики, тому при їх відборі особливо важливо враховувати міжзоряне поглинання. Оскільки карта поглинання Гончарова, яка описується в розділі 3.1.7, надає значення коефіцієнтів почервоніння $E(J - K_S)$ і

$E(B - V)$, а ЧГ вторинного згущення краще відокремлюються за показником кольору $G - K_S$, автором дисертації знайдено зв'язок між $E(G - K_S)$ і $E(J - K_S)$ за зміщенням максимуму розподілу зірок червоного згущення $G - K_S$ в залежності від $E(J - K_S)$ (див. рис. 3.14). Точки були апроксимовані за допомогою полінома третього ступеня: $E(G - K_S) = -0.138 \pm 0.233E(J - K_S) + 21.273 \pm 2.912E(J - K_S)^2 - 35.411 \pm 9.805E(J - K_S)^3$. Для виправлення абсолютної зоряної величини M_G за поглинання використано співвідношення $A_G = 0.4A_V$. Таким чином, маючи виправлені за поглинання і почервоніння $M_{G,0}$ і $(G - K_S)_0$, були відібрані молоді ЧГ, що належать вторинному згущенню, за допомогою обмеження еліпсом з центром в точці $(M_{G,0}, (G - K_S)_0) = (0.6, 1.9)$ і півосями $(\delta M_{G,0}, \delta (G - K_S)_0) = (0.5, 0.1)$ (див. рис. 3.13). Результуюча вибірка містить 19600 ЧГ.

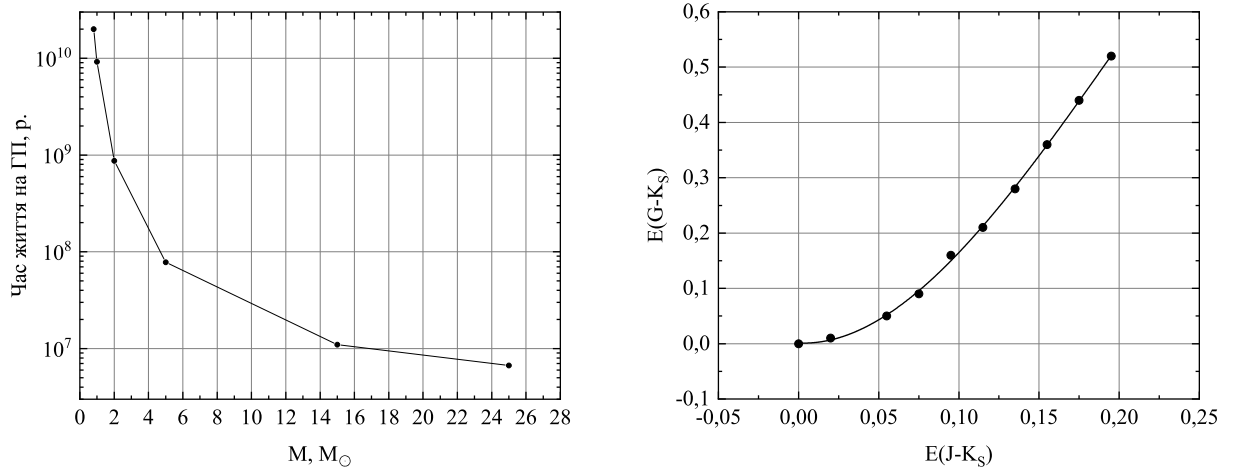


Рис. 3.14 Ліва панель: залежність часу життя зірки на ГП від початкової маси зірки. Значення для 15 і 25 $M_\odot$ взяті з [164], для менших мас – з [165]. Права панель: зв'язок почервоніння $E(G - K_S)$ і $E(J - K_S)$. $E(G - K_S) = -0.138 \pm 0.233E(J - K_S) + 21.273 \pm 2.912E(J - K_S)^2 - 35.411 \pm 9.805E(J - K_S)^3$

Для аналізу поля швидкостей цих зірок була використана модель О–М, описана в розділі 2.2.2. Кінематичні параметри були обчислені для трьох випадків: 1) за просторовими швидкостями зірок з каталогу *Gaia* DR2 RV (власні рухи плюс променеві швидкості); 2) тільки за власними рухами зірок з каталогу *Gaia* DR2 RV; 3) за власними рухами зірок з каталогу РМА, що

є спільними з *Gaia* DR2 RV.

Крім того, розглядаються дві підвибірки з характерними геліоцентричними відстанями: в діапазонах 0–1.2 кпк і 0.5–1.2 кпк. Останній випадок розглядається для виключення впливу зірок, що належать поясу Гулда і можуть спотворювати досліджуване поле швидкостей.

3.3.2 Аналіз кінематичних параметрів

Рівняння моделі О–М 2.16, 2.17, 2.18 були вирішені спільно за допомогою МНК з використанням власних рухів і променевих швидкостей зірок з *Gaia* DR2 RV. Отримані параметри позначені далі в тексті як «*Gaia*, 3D», оскільки вони були визначені за тривимірними швидкостями. Для обчислення кінематичних параметрів за власними рухами спільних зірок *Gaia* DR2 RV і РМА, були вирішені рівняння 2.19, 2.20. Ці параметри позначені далі як «*Gaia*, 2D» і «РМА, 2D», відповідно.

Отримані результати представлено в табл. 3.2 і на рис. 3.15, 3.16. Крім того, обчислення були виконані для двох підвбірок зірок з геліоцентричними відстанями $0 \text{ кпк} < r < 1.2 \text{ кпк}$ і $0.5 \text{ кпк} < r < 1.2 \text{ кпк}$. Вважається, що в другому випадку велика частина зірок, що належать поясу Гулда, виключена із зоряної вибірки.

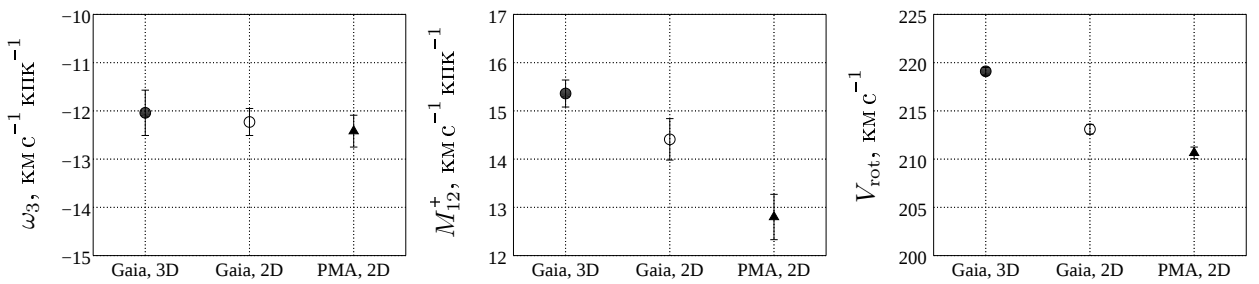


Рис. 3.15 Параметри моделі О–М ω_3 , M_{12}^+ і швидкість обертання вибірки зірок навколо центра Галактики V_{rot} , визначені за тривимірними швидкостями (заповнені кружки), за власними рухами (відкриті кружки) *Gaia* DR2 RV, а також за власними рухами РМА (трикутники). Результати отримано для гігантів вторинного червоного згущення в діапазоні геліоцентричних відстаней $0 \text{ кпк} < r < 1.2 \text{ кпк}$

Параметри моделі O – M, отримані за даними *Gaia* DR2 і PMA

Кінем. параметр	Одиниці виміру	0-1.2 кпк		0.5-1.2 кпк	
		Gaia, 3D	Gaia, 2D	Gaia, 3D	PMA, 2D
$X_{\odot}$	км с ⁻¹	9.83 ± 0.13	9.32 ± 0.17	10.89 ± 0.15	11.62 ± 0.26
$Y_{\odot}$	км с ⁻¹	11.64 ± 0.13	11.71 ± 0.18	12.63 ± 0.15	11.59 ± 0.30
$Z_{\odot}$	км с ⁻¹	7.80 ± 0.13	7.72 ± 0.15	7.29 ± 0.15	7.46 ± 0.21
ω_1	км с ⁻¹ кпк ⁻¹	1.75 ± 0.47	2.08 ± 0.52	0.43 ± 0.38	0.57 ± 0.57
ω_2	км с ⁻¹ кпк ⁻¹	-3.46 ± 0.47	-3.41 ± 0.52	-2.66 ± 0.38	-3.22 ± 0.57
ω_3 (B)	км с ⁻¹ кпк ⁻¹	-12.04 ± 0.47	-12.23 ± 0.28	-12.09 ± 0.19	-12.28 ± 0.28
M_{23}^+	км с ⁻¹ кпк ⁻¹	-1.23 ± 0.47	-1.66 ± 0.62	0.14 ± 0.38	-0.09 ± 0.66
M_{13}^+	км с ⁻¹ кпк ⁻¹	-2.61 ± 0.47	-2.61 ± 0.62	-1.94 ± 0.38	-3.17 ± 0.62
M_{12}^+ (A)	км с ⁻¹ кпк ⁻¹	15.36 ± 0.28	14.41 ± 0.43	15.26 ± 0.19	13.41 ± 0.38
$M_{11}^+(M_{11}^*)$	км с ⁻¹ кпк ⁻¹	-8.82 ± 0.43	-10.38 ± 1.14	-8.34 ± 0.28	-10.0 ± 0.76
M_{22}^+	км с ⁻¹ кпк ⁻¹	0.90 ± 0.38	–	0.76 ± 0.76	–
$M_{33}^+(M_{33}^*)$	км с ⁻¹ кпк ⁻¹	-0.28 ± 0.38	-2.98 ± 1.09	-1.09 ± 0.66	-4.31 ± 1.09
V_{rot}	км с ⁻¹	219.1 ± 0.4	213.1 ± 0.5	218.6 ± 0.3	205.2 ± 0.5
$L_{\odot}$	°	49.8 ± 3.8	51.5 ± 0.1	49.3 ± 4.6	44.9 ± 0.3
$B_{\odot}$	°	27.1 ± 1.6	27.3 ± 0.1	23.6 ± 1.8	24.5 ± 0.1

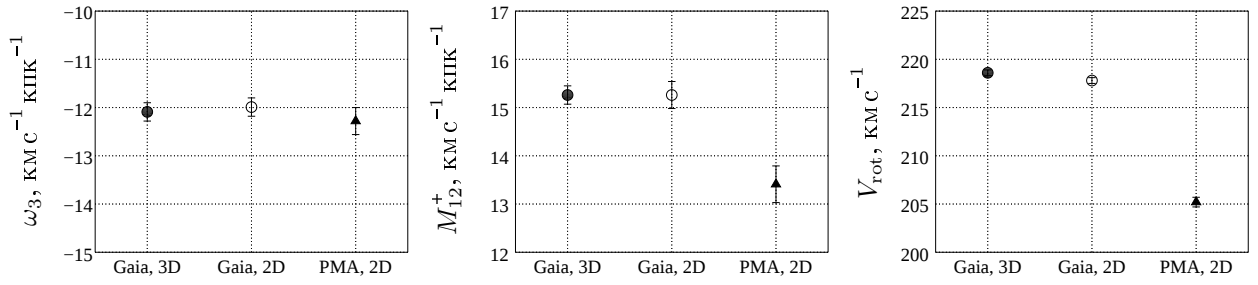


Рис. 3.16 Параметри моделі О – М ω_3 , M_{12}^+ і швидкість обертання вибірки зірок навколо центра Галактики V_{rot} , визначені за тривимірними швидкостями (заповнені кружки), за власними рухами (відкриті кружки) *Gaia* DR2 RV, а також за власними рухами РМА (трикутники). Результати визначені для гігантів вторинного червоного згущення в діапазоні геліоцентричних відстаней $0.5 \text{ кпк} < r < 1.2 \text{ кпк}$

Це є цілком виправданим кроком, бо добре відомо, що пояс Гулда – молода місцева структура, що оточує сонячну околицю і нахилена до площини Галактики під кутом $\sim 20^\circ$. Різні дослідження показали, що кінематика зірок пояса Гулда визначається не тільки галактичним обертанням, але і його власним обертанням і деформацією. Тому, наявність у вибірці зірок, що належать поясу Гулда, може призводити до спотворення кінематичних параметрів.

Компоненти руху Сонця $X_\odot, Y_\odot, Z_\odot$

Значення компоненти швидкості Сонця $Y_\odot$ є непрямою ознакою середнього віку зірок, що складають вибірку. Так, наприклад, залежність компоненти $Y_\odot$ від віку була отримана в роботі Гончарова [166] за власними рухами з каталогу HIPPARCOS і променевими швидкостями з Пулковського каталогу променевих швидкостей PCRV для 15402 зірок спектральних класів О – F, що знаходяться в сонячній околиці і належать тонкому диску Галактики.

За даними *Gaia*, 3D, 2D і РМА, 2D для зірок вторинного згущення ЧГ значення $Y_\odot$ в середньому становить 11.32 км с^{-1} для вибірки 0–1.2 кпк і 12.54 км с^{-1} для вибірки 0.5–1.2 кпк, що відповідає середньому віку ~ 2 млрд років (згідно з рис. 7 з роботи [166]) для зірок, що складають вибірку. Таким

чином можна зробити висновок, що відібрані ЧГ дійсно є відносно молодими.

Значення компонент руху Сонця $X_{\odot}, Z_{\odot}$ в середньому не залежать від віку зірок, хоча мають варіації в діапазоні $\pm 2.5 \text{ км с}^{-1}$ відносно середніх значень $\sim 10 \text{ км с}^{-1}$ і $\sim 7 \text{ км с}^{-1}$. За даними *Gaia*, 3D, 2D і PMA, 2D в середньому $X_{\odot} = 9.68 \text{ км с}^{-1}$, $Z_{\odot} = 7.73 \text{ км с}^{-1}$ для вибірки 0–1.2 кпк і $X_{\odot} = 11.11 \text{ км с}^{-1}$, $Z_{\odot} = 7.34 \text{ км с}^{-1}$ для вибірки 0.5–1.2 кпк.

В цілому, за всіма даними значення компонент руху Сонця узгоджені між собою і не суперечать результатам, що отримані іншими авторами за різними даними.

Параметри ω_3 і M_{12}^+

Значення параметра моделі О–М ω_3 , отримані як за даними *Gaia*, 3D, 2D так і PMA, 2D, узгоджуються в межах 3σ для обох вибірок 0–1.2 кпк і 0.5–1.2 кпк (ліві панелі рис. 3.15 і 3.16). Значення параметра M_{12}^+ , отримані за просторовими швидкостями і власними рухами зірок *Gaia* DR2 для вибірки 0–1.2 кпк, різняться: $\Delta M_{12}^+(3D-2D) = 0.95 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, тоді як для вибірки 0.5–1.2 кпк значення збігаються (середні панелі рис. 3.15 і 3.16). Крім того, як і в разі зірок змішаного спектрального складу (розділ 3.2), значення параметра M_{12}^+ , отримані за даними PMA, значно відрізняються від значень за даними *Gaia*. Так, для вибірки 0.5–1.2 кпк $\Delta M_{12}^+(Gaia-PMA) = 1.85 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. Як наслідок, різняться значення швидкості обертання зірок навколо центра Галактики V_{rot} (праві панелі рис. 3.15 і 3.16). Для вибірки 0.5–1.2 кпк отримуємо: $\Delta V_{\text{rot}}(Gaia-PMA) = 13.0 \text{ км с}^{-1}$.

Параметри $\omega_1, \omega_2, M_{23}^+$ і M_{13}^+

За всіма використаними даними значення параметрів моделі О–М $\omega_1, \omega_2, M_{23}^+$ і M_{13}^+ по модулю більше для вибірки 0–1.2 кпк, ніж для вибірки 0.5–1.2 кпк. Це означає, що вибірка зірок 0–1.2 кпк має компоненти вектора обертання навколо осей галактичної системи координат x і y , а також деформації в площинах (y, z) і (x, z) . У разі вибірки 0.5–1.2 кпк компоненти вектора обертання навколо осей x, y стають нульовими з точністю до похибки визначення, а компоненти деформації M_{23}^+ і M_{13}^+ стають менше по модулю в

порівнянні з випадком 0–1.2 кпк.

Таким чином можна зробити висновок, що поле швидкостей зірок вибірки 0–1.2 кпк спотворено додатковими компонентами обертань і деформацій, які відрізняються від основного обертання ω_1 і ω_2 і деформації M_{12}^+ в площині Галактики і які можуть бути пов’язані в тому числі з рухом в поясі Гулда.

Параметри M_{11}^+ , M_{22}^+ , M_{33}^+ , M_{11}^* і M_{33}^*

Ці параметри характеризують радіальні деформації даної вибірки зірок. Негативні значення свідчать про те, що вибірка зірок стискається, а позитивні – про її розширення. Нагадаємо, що при спільному використанні власних рухів і променевих швидкостей зірок компоненти M_{11}^+ , M_{22}^+ , M_{33}^+ визначаються окремо, тоді як за власними рухам обчислити можливо тільки їх лінійні комбінації виду $M_{11}^* = M_{11}^+ - M_{22}^+$ і $M_{33}^* = M_{33}^+ - M_{22}^+$.

З табл. 3.2 видно, що за даними *Gaia*, 3D компонента M_{11}^+ має максимальні за модулем значення, тоді як M_{22}^+ і M_{33}^+ малі або нульові в межах 3σ . Тобто, розглянуті вибірки зірок стискаються головним чином уздовж осі x . Для порівняння з результатами, отриманими за власними рухами *Gaia* DR2 і PMA, обчислимо різниці $M_{11}^+ - M_{22}^+$ і $M_{33}^+ - M_{22}^+$ за даними *Gaia*, 3D. Вони дорівнюють відповідно -9.72 ± 0.57 км с⁻¹ кпк⁻¹, -1.18 ± 0.57 км с⁻¹ кпк⁻¹ для вибірки 0–1.2 кпк і -9.10 ± 0.81 км с⁻¹ кпк⁻¹, -1.85 ± 1.01 км с⁻¹ кпк⁻¹ для вибірки 0.5–1.2 кпк.

В результаті бачимо, що значення M_{11}^* узгоджуються в межах похибок визначення для всіх даних що використовуються, і практично не розрізняються для вибірок 0–1.2 кпк і 0.5–1.2 кпк. Значення M_{33}^* в кілька разів менше за модулем значень M_{11}^* . У разі вибірки 0–1.2 кпк вони не є значущими в межах 3σ .

3.3.3 Висновки до підрозділу 3.3

У цьому підрозділі проаналізовано кінематику ЧГ вторинного згущення за даними з каталогів *Gaia* DR2 і PMA. Ці зірки є порівняно молодими об’єктами, вік яких не перевищує 2 мільярдів років. Непрямою ознакою

молодості зірок, що входять до вибірки, є значення компоненти руху Сонця $Y_{\odot}$ відносно цієї вибірки. Зіставляючи результати, отримані для вибірки ЧГ вторинного згущення за даними *Gaia* DR2 і РМА, з залежністю $Y_{\odot}$ від віку зірок, що отримана Гончаровим у ([166], Рис. 7), можна зробити висновок, що середній вік зірок даної вибірки дійсно становить не більше 2 мільярдів років.

Порівняння значень кінематичних параметрів, отриманих за власними рухами і просторовими швидкостями *Gaia* DR2, показало, що системи власних рухів і променевих швидкостей близьких зірок *Gaia* DR2 ($r < 0.5$ кпк) є несумісними відносно результатів. Цьому факту може бути, принаймні два пояснення: або у вимірах *Gaia* для близьких зірок є внутрішні систематичні похибки, або поле швидкостей близьких зірок спотворено впливом реальних факторів, таких як пояс Гулда. При виключенні з вибірки зірок з відстанями $r < 0.5$ кпк результати стають узгодженими.

Очікуваним результатом є відмінності між значеннями деяких параметрів, отриманих за даними *Gaia* DR2 і РМА. Найбільшу різницю має параметр M_{12}^+ , в результаті чого виникає різниця між значеннями швидкості обертання вибірки зірок навколо центра Галактики V_{rot} .

3.4 Кінематика зірок головної послідовності

Зірки ГП мають таку властивість, що залежність кінематичних параметрів від показника кольору побічно є залежністю від віку зірок, щонайменше в діапазоні $(J - K_S) \leq 0.35^{\text{m}}$ ($B - V \leq 0.61^{\text{m}}$). Тому, обчислюючи кінематичні параметри зірок ГП для різних підвибірок за показником кольору, можна простежити залежність цих параметрів від віку зірок. Результати цього дослідження представлені в роботі [140].

3.4.1 Відбір зірок ГП

Для відбору зірок, що належать ГП, була використана діаграма $M_{K_S,0} - (J - K_S)_0$ (див. рис. 3.17), де J і K_S – зоряні величини з каталогу

2MASS. Абсолютна зоряна величина $M_{K_S,0}$ була обчислена за формулою

$$M_{K_S,0} = K_S + 5 + 5 \lg \varpi - A_{K_S}, \quad (3.41)$$

а показник кольору був виправлений за почервоніння $(J - K_S)_0 = (J - K_S) - E(J - K_S)$, взяте з карти поглинання Гончарова ([158], див. розділ 3.1.7).

Значення коефіцієнта поглинання обчислюється за формулою $A_{K_S} = 0.114A_V$ ([157]). Для обчислення значень в будь-якій заданій точці простору була використана трилінійна інтерполяція. На рис. 3.17 для порівняння показані діаграми $M_{K_S} - (J - K_S)$ (до корекції за почервоніння і поглинання) і $M_{K_S,0} - (J - K_S)_0$ (після корекції) для зірок, які займають випадковим чином обрану область 560 квадратних градусів поблизу площини Галактики з центром в напрямку $l = 207^\circ$, $b = 0^\circ$.

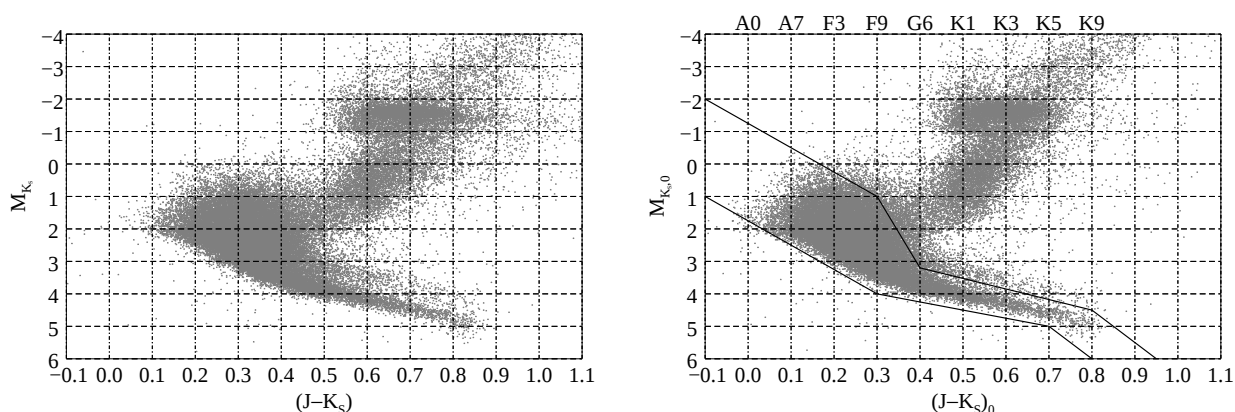


Рис. 3.17 Діаграма Г–Р для зірок, що знаходяться в області площею 560 кв. градусів з центром $l = 207^\circ$, $b = 0^\circ$. На лівому рисунку показані значення до корекції даних за поглинання і почервоніння. На правому рисунку – після корекції. Лініями показані обмеження, що застосовуються для відбору зірок ГП. Спектральні класи були визначені за допомогою таблиці Е. Мамаджека (http://www.pas.rochester.edu/~emamajek/EEM_dwarf_UBVIJHK_colors_Teff.txt)

За аналогією з загальноприйнятою методикою (наприклад, [72], [167], [134]), зірки ГП були відібрані за допомогою обмеження їх на діаграмі Г–Р лінійними функціями виду $M_{K_S} = a(J - K_S) + b$. Значення коефіцієнтів a і b в залежності від $(J - K_S)_0$ наведені в табл. 3.3. Геліоцентричні відстані r (в кпк) були отримані з використанням паралаксів *Gaia* DR2 за

співвідношенням 3.40.

Таблиця 3.3

Значення коефіцієнтів a і b для відбору зірок ГП

Діапазон $(J - K_S)_0$	a	b
Нижній край		
-0.10 – 0.30	7.50	1.75
0.30 – 0.70	2.50	3.25
0.70 – 0.90	10.00	-2.00
Верхній край		
-0.10 – 0.30	7.50	-1.25
0.30 – 0.40	22.00	-5.60
0.40 – 0.80	3.25	1.90
0.80 – 0.90	14.60	-7.14

Для кінематичного аналізу відбирались зірки ГП за наступними додатковими критеріями: геліоцентричні відстані знаходяться в діапазоні 0.1–1 кпк, відносна похибка паралакса $\varsigma_{\varpi}/\varpi < 0.2$, відносна похибка власних рухів $(\mu_{\alpha^*}/\varsigma_{\alpha^*})^2 + (\mu_{\delta}/\varsigma_{\delta})^2 > 25$.

Також з вибірки були вилучені зірки, просторова швидкість яких більше швидкості втечі, яка становить, згідно з [168], 521 км с^{-1} . Тангенціальна частина V_t просторової швидкості V_s була оцінена за теоремою Клейбера, у відповідності з якої $\bar{V}_t = \frac{\pi}{4} \bar{V}_s$ в середньому (див., наприклад, [169], стор. 75–77), в результаті чого $\bar{V}_t = 409 \text{ км с}^{-1}$. Таким чином, використовуючи співвідношення $V_t < 409 \text{ км с}^{-1}$, зірки що втікають були виключені з розгляду. Зірки з відстанями 0–100 пк не розглядаються тому, що кінематичні параметри, знайдені за їх власними рухами, визначаються з великими похибками (див., наприклад, [138]).

В даному дослідженні аналізуються зірки, які знаходяться в сонячній околиці, де паралакси визначені з високою точністю. Тестові розрахунки показали, що використання відстаней, отриманих байєсовським методом ([30]) або виправлених за систематичні похибки ($\varpi_c = \varpi + 0.029 \text{ мсд}$, [141]), в нашому випадку практично не впливає на значення кінематичних параметрів, що отримуються.

Результуюча вибірка, з урахуванням всіх перерахованих вище критеріїв

і обмежень, містить ~ 24.1 мільйонів зірок.

3.4.2 Рух Сонця

Через те, що компоненти швидкості Сонця $X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}$ входять в формули (2.16, 2.17) з множником $1/|r|$, рішення цих рівнянь буде коректним тільки в разі, коли всі зірки вибірки знаходяться приблизно на одній відстані від Сонця. В цьому випадку кінематичні параметри будуть визначені незалежно один від одного, оскільки кореляційна матриця МНК буде діагональною. У нашому дослідженні таку умову забезпечити неможливо через те, що при формуванні підвбірок за показником кольору в кожному з них будуть потрапляти зірки з довільними відстанями з діапазону 0.1–1 кпк. З цієї причини доцільно визначити і виключити рух Сонця з власних рухів зірок до визначення значень інших параметрів моделі О – М, а також позамодельних коефіцієнтів.

З причин, які описані в підрозділі 3.4.6, для обчислення значень компонент швидкості Сонця були відібрані тільки ті зірки, які знаходяться в тонкому галактичному шарі $-25 \text{ пк} < z < 25 \text{ пк}$, швидкості яких практично не спотворені вертикальним градієнтом.

Компоненти швидкості Сонця $X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}$ були визначені для кожної кольорової підвбірки шляхом вирішення рівнянь 2.16, 2.17 методом МНК, як за власними рухами *Gaia* DR2, так і РМА. Залежності отриманих компонент швидкості від показника кольору наведені на рис. 3.18.

Поправки для корекції власних рухів зірок *Gaia* DR2 і РМА за поступальну швидкість Сонця були обчислені за формулами 2.11, 2.12. Для кожного кольорового піддіапазону поправки, обчислені за даними *Gaia* DR2 і РМА, були відняті з власних рухів *Gaia* DR2 і РМА, відповідно.

Як видно з рис. 3.18, компоненти швидкості Сонця $X_{\odot}$ і $Z_{\odot}$ практично не залежать від показника кольору, і в середньому дорівнюють відповідно $10.36 \pm 0.08 \text{ км с}^{-1}$ та $7.44 \pm 0.05 \text{ км с}^{-1}$ за даними *Gaia* DR2, тоді як за даними РМА: $9.46 \pm 0.08 \text{ км с}^{-1}$ і $7.51 \pm 0.06 \text{ км с}^{-1}$. Для компоненти $X_{\odot}$ є невеликі систематичні відмінності $\Delta X_{\odot}(\text{РМА} - \text{Gaia DR2}) \simeq -0.9 \text{ км с}^{-1}$. Навпаки, значення $Y_{\odot}$, як і очікувалося, показують сильну залежність

від показника кольору в діапазоні $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.4^{\text{m}}$, а в діапазоні $0.4^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.8^{\text{m}}$ залишаються приблизно постійними на рівні в середньому $\approx 21.3 \text{ км с}^{-1}$. Бари похибок на рисунку не видно тому що, значення похибок малі і знаходяться в діапазоні $0.04\text{--}0.07 \text{ км с}^{-1}$.

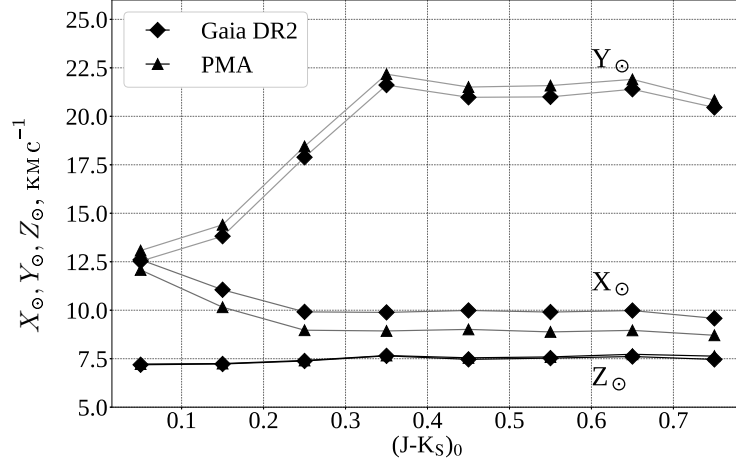


Рис. 3.18 Компоненти швидкості Сонця $X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}$, обчисленні за власними рухами зірок *Gaia* DR2 (ромби) і PMA (трикутники), які належать тонкому галактичному шару $-25 \text{ пк} < z < 25 \text{ пк}$

Майже аналогічну поведінку компонент $X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}$ в залежності від показника кольору $B - V$ було отримано також у роботі [72] за власними рухами зірок ГП з каталогу HIPPARCOS. Автори відзначають відсутність змін в залежності від показника кольору $B - V$ для компонент $X_{\odot}$ і $Z_{\odot}$, рівних в середньому $10.00 \pm 0.36 \text{ км с}^{-1}$ і $7.17 \pm 0.38 \text{ км с}^{-1}$, відповідно. З іншого боку, автори вказують на зростання значень компоненти $Y_{\odot}$ аж до точки Паренаго, яка знаходиться в області $B - V \approx 0.61^{\text{m}}$ (що дорівнює $(J - K_S)_0 \approx 0.35^{\text{m}}$), і зазначають, що зростання цієї компоненти обумовлено асиметричним дрейфом зірок: чим старше зірки, тим вони повільніше обертаються навколо центра Галактики, і отже, тим швидше рухається Сонце відносно цих зірок в напрямку осі y ГСК. Слід відзначити, що в роботі [72] значення $Y_{\odot}$ правіше точки Паренаго знаходяться на рівні $\approx 25 \text{ км с}^{-1}$. В той же час, на рис. 3.18 добре видно, що це значення, обчислене за зірками із тонкого галактичного шару $-25 \text{ пк} < z < 25 \text{ пк}$, становить $\approx 21.3 \text{ км с}^{-1}$.

На рис. 3.19 показані значення координат апексу руху Сонця $L_{\odot}, B_{\odot}$. Так

як вони обчислюються з $X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}$, очікуваною є залежність значень $L_{\odot}, B_{\odot}$ від показника кольору: вони мають тренди в діапазоні $0.0 \leq (J - K_S)_0 < 0.4$ а далі виходять на плато. Так, в середньому за даними *Gaia* DR2 і PMA значення $L_{\odot}$ змінюються в діапазоні $46^{\circ} - 67^{\circ}$, а значення $B_{\odot}$ – в діапазоні $22^{\circ} - 18^{\circ}$. Значення $L_{\odot}$, отримані за даними *Gaia* DR2 і PMA, мають систематичні відмінності $2 - 3^{\circ}$, тоді як значення $B_{\odot}$ добре узгоджуються між собою у всьому діапазоні показників кольору.

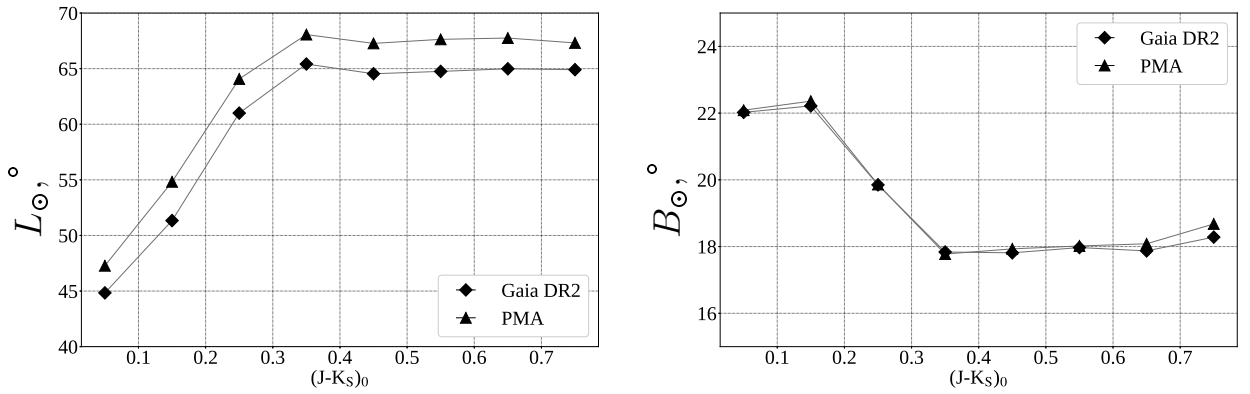


Рис. 3.19 Координати апексу руху Сонця в ГСК $L_{\odot}, B_{\odot}$, обчисленні за власними рухами зірок *Gaia* DR2 (ромби) і PMA (трикутники), які належать тонкому галактичному шару $-25 \text{ пк} < z < 25 \text{ пк}$

3.4.3 Кінематика на всій сфері

Перш за все були визначені кінематичні параметри для всієї небесної сфери. Для цього за виправленими за рух Сонця власними рухами зірок ГП з *Gaia* DR2 і PMA були обчислені значення коефіцієнтів розкладання за ВСФ. Як приклад, в табл. 3.4 наведені чисельні значення коефіцієнтів $t_{\text{нкp}}$ і $s_{\text{нкp}}$ до $n = 3$, $k = 3$, отримані за даними *Gaia* DR2 для різних показників кольору в діапазоні $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.8^{\text{m}}$. Значення параметрів моделі О–М були обчислені з коефіцієнтів розкладання за допомогою співвідношень з табл. 2.1. Підкреслимо, що з коефіцієнтів $t_{\text{нкp}}$ отримуються параметри $\omega_1, \omega_2, \omega_3$, а з коефіцієнтів $s_{\text{нкp}} - M_{23}^+, M_{13}^+, M_{12}^+, M_{11}^*, M_{33}^*, X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}$. Оскільки систематична складова руху Сонця була виключена з поля швидкостей зірок, залишкові значення коефіцієнтів s_{101}, s_{111} , що відповідають компонентам $X_{\odot}, Z_{\odot}$ руху Сонця, стали малими або практично нульовими.

Коефіцієнти розкладання за ВСФ до $n = 3$ за даними *Gaia* DR2 для підвибірок зірок ГП
 $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 \leq 0.8^{\text{m}}$, в км с^{-1} кпк

$(J - K_S)_0$	0.0–0.1	0.1–0.2	0.2–0.3	0.3–0.4	0.4–0.5	0.5–0.6	0.6–0.7	0.7–0.8
t_{101}	-41.30 ± 1.78	-37.34 ± 0.58	-39.62 ± 0.20	-39.26 ± 0.17	-39.12 ± 0.19	-39.15 ± 0.20	-38.94 ± 0.20	-38.13 ± 0.17
t_{110}	-9.74 ± 1.78	-5.38 ± 0.58	-2.58 ± 0.20	-1.29 ± 0.17	-2.02 ± 0.19	-1.75 ± 0.20	-1.81 ± 0.20	-3.46 ± 0.17
t_{111}	4.41 ± 1.78	0.64 ± 0.58	0.93 ± 0.20	2.33 ± 0.17	2.31 ± 0.19	2.20 ± 0.20	2.22 ± 0.20	2.07 ± 0.17
t_{201}	0.09 ± 1.78	0.43 ± 0.58	-1.95 ± 0.20	-0.87 ± 0.17	-0.69 ± 0.19	-1.16 ± 0.20	-0.85 ± 0.20	-0.01 ± 0.17
t_{210}	0.95 ± 1.78	0.57 ± 0.58	-1.82 ± 0.20	-2.77 ± 0.17	-3.39 ± 0.19	-3.16 ± 0.20	-3.10 ± 0.20	-3.36 ± 0.17
t_{211}	0.32 ± 1.78	-0.22 ± 0.58	3.47 ± 0.20	13.16 ± 0.17	14.30 ± 0.19	13.47 ± 0.20	13.41 ± 0.20	14.24 ± 0.17
t_{220}	-0.63 ± 1.78	0.63 ± 0.58	0.27 ± 0.20	-0.35 ± 0.17	-0.42 ± 0.19	-0.46 ± 0.20	-0.67 ± 0.20	-0.56 ± 0.17
t_{221}	-0.29 ± 1.78	0.61 ± 0.58	1.08 ± 0.20	0.30 ± 0.17	0.58 ± 0.19	0.11 ± 0.20	0.47 ± 0.20	0.35 ± 0.17
t_{301}	-6.08 ± 1.78	-2.28 ± 0.58	-1.52 ± 0.20	-1.27 ± 0.17	-0.98 ± 0.19	-1.32 ± 0.20	-1.27 ± 0.20	-0.96 ± 0.17
t_{310}	0.51 ± 1.78	0.83 ± 0.58	1.25 ± 0.20	1.00 ± 0.17	1.12 ± 0.19	1.04 ± 0.20	1.29 ± 0.20	0.81 ± 0.17
t_{311}	0.15 ± 1.78	-2.20 ± 0.58	-1.18 ± 0.20	-0.43 ± 0.17	-0.42 ± 0.19	-0.44 ± 0.20	-0.21 ± 0.20	-0.46 ± 0.17
t_{320}	0.41 ± 1.78	-0.07 ± 0.58	0.32 ± 0.20	0.51 ± 0.17	0.49 ± 0.19	0.10 ± 0.20	0.33 ± 0.20	0.03 ± 0.17
t_{321}	-1.93 ± 1.78	0.31 ± 0.58	0.87 ± 0.20	1.41 ± 0.17	0.91 ± 0.19	1.00 ± 0.20	1.20 ± 0.20	0.88 ± 0.17
t_{330}	-0.31 ± 1.78	-0.30 ± 0.58	-0.37 ± 0.20	-0.19 ± 0.17	-0.39 ± 0.19	-0.09 ± 0.20	-0.31 ± 0.20	-0.16 ± 0.17
t_{331}	0.04 ± 1.78	-0.24 ± 0.58	-0.06 ± 0.20	0.07 ± 0.17	0.14 ± 0.19	0.06 ± 0.20	0.27 ± 0.20	0.18 ± 0.17
s_{101}	-2.29 ± 1.78	-1.09 ± 0.58	-2.34 ± 0.20	-1.58 ± 0.17	-2.32 ± 0.19	-1.61 ± 0.20	-1.45 ± 0.20	-2.39 ± 0.17
s_{110}	-2.20 ± 1.78	-2.39 ± 0.58	-16.09 ± 0.20	-35.90 ± 0.17	-37.11 ± 0.19	-36.80 ± 0.20	-36.00 ± 0.20	-40.09 ± 0.17
s_{111}	11.12 ± 1.78	5.43 ± 0.58	-2.11 ± 0.20	-4.97 ± 0.17	-5.26 ± 0.19	-4.97 ± 0.20	-4.89 ± 0.20	-6.78 ± 0.17
s_{201}	2.10 ± 1.78	3.72 ± 0.58	2.80 ± 0.20	2.54 ± 0.17	2.10 ± 0.19	2.20 ± 0.20	2.55 ± 0.20	2.01 ± 0.17
s_{210}	-2.51 ± 1.78	1.03 ± 0.58	1.18 ± 0.20	-0.09 ± 0.17	-0.07 ± 0.19	0.08 ± 0.20	0.12 ± 0.20	-0.27 ± 0.17
s_{211}	-3.61 ± 1.78	-2.91 ± 0.58	-2.34 ± 0.20	-1.32 ± 0.17	-1.88 ± 0.19	-1.56 ± 0.20	-1.67 ± 0.20	-1.90 ± 0.17
s_{220}	34.93 ± 1.78	34.79 ± 0.58	32.72 ± 0.20	31.74 ± 0.17	32.10 ± 0.19	32.04 ± 0.20	32.09 ± 0.20	32.91 ± 0.17
s_{221}	-10.64 ± 1.78	-8.44 ± 0.58	-5.80 ± 0.20	-6.12 ± 0.17	-5.67 ± 0.19	-5.81 ± 0.20	-5.77 ± 0.20	-5.63 ± 0.17
s_{301}	-1.54 ± 1.78	-0.51 ± 0.58	-1.57 ± 0.20	-0.88 ± 0.17	-1.37 ± 0.19	-1.52 ± 0.20	-1.54 ± 0.20	-1.75 ± 0.17
s_{310}	-5.87 ± 1.78	-1.71 ± 0.58	-3.19 ± 0.20	-8.99 ± 0.17	-9.85 ± 0.19	-9.47 ± 0.20	-9.01 ± 0.20	-9.68 ± 0.17
s_{311}	1.27 ± 1.78	0.77 ± 0.58	-0.02 ± 0.20	-1.15 ± 0.17	-1.75 ± 0.19	-1.14 ± 0.20	-1.25 ± 0.20	-1.73 ± 0.17
s_{320}	-1.27 ± 1.78	-1.61 ± 0.58	-1.76 ± 0.20	-0.43 ± 0.17	-0.94 ± 0.19	-0.44 ± 0.20	-0.87 ± 0.20	-0.72 ± 0.17
s_{321}	-2.80 ± 1.78	0.13 ± 0.58	0.16 ± 0.20	-0.10 ± 0.17	0.08 ± 0.19	0.09 ± 0.20	-0.14 ± 0.20	0.02 ± 0.17
s_{330}	-0.22 ± 1.78	1.28 ± 0.58	1.19 ± 0.20	2.02 ± 0.17	1.87 ± 0.19	1.69 ± 0.20	1.91 ± 0.20	1.95 ± 0.17
s_{331}	-1.74 ± 1.78	-1.73 ± 0.58	-1.48 ± 0.20	-0.68 ± 0.17	-0.61 ± 0.19	-0.75 ± 0.20	-0.83 ± 0.20	-0.64 ± 0.17

Значення коефіцієнта s_{110} , що відповідає компоненті $Y_{\odot}$, малі для зірок із піддіапазону $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.2^{\text{m}}$, потім збільшуються до значення $\approx 33 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ і залишаються на цьому рівні в діапазоні $0.3^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.8^{\text{m}}$. Така поведінка буде пояснена в підрозділі 3.4.6. Залежності компонент швидкості обертання $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ і швидкості деформації $M_{23}^+, M_{13}^+, M_{12}^+, M_{11}^*$ і M_{33}^* від показника кольору $(J - K_S)_0$ приведено на рисунках 3.22 і 3.25.

Параметри M_{12}^+ і ω_3

Розглянемо параметри M_{12}^+ і ω_3 , представлені на рис. 3.20. З комбінації цих параметрів (формули (2.21) і (2.22)), було обчислено лінійну швидкість обертання центроїда зірок навколо центра Галактики V_{rot} , а також радіальний градієнт $\partial V_{\text{rot}} / \partial R$ всередині області, яку займає дана вибірка зірок (рис. 3.21).

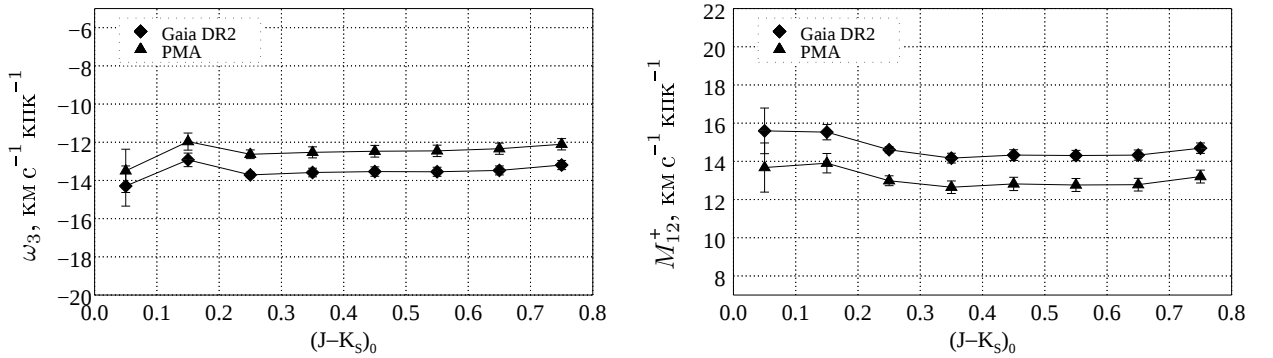


Рис. 3.20 Параметри моделі О – М ω_3 (стала Оорта В), ω_2, ω_1 (ліва панель) і M_{12}^+ (стала Оорта А), M_{13}^+, M_{23}^+ (права панель), отримані для всієї сфери за даними *Gaia* DR2 (ромби) і PMA (трикутники)

Як видно з рис. 3.20, значення обох параметрів, отриманих за власними рухами зірок *Gaia* DR2, по модулю систематично більше, ніж за власними рухами PMA у всьому діапазоні $(J - K_S)_0$. Різниця $\Delta M_{12}^+ (Gaia \text{ DR2} - \text{PMA})$ в середньому дорівнює $1.59 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, а $\Delta \omega_3 (Gaia \text{ DR2} - \text{PMA}) = -1.10 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, що призводить до систематичної різниці $\Delta V_{\text{rot}} (Gaia \text{ DR2} - \text{PMA}) \approx 21 \text{ км с}^{-1}$ (рис. 3.21). З рис. 3.21 також можна бачити наявність тренда V_{rot} в діапазоні $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 \leq 0.3^{\text{m}}$. Це свідчить про те, що зірки ранніх спектральних класів обертаються навколо центра Галактики з більшою швидкістю, ніж зірки пізніх спектральних

класів.

На правій панелі рис. 3.21 можна бачити, що градієнт $\partial V_{\text{rot}}/\partial R$ практично дорівнює нулю і лише в піддіапазонах $0.1^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 \leq 0.2^{\text{m}}$ і $0.7^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 \leq 0.8^{\text{m}}$ має статистично значущу величину на рівні 3σ . Це свідчить про те, що крива обертання Галактики в розглянутій околиці Сонця є практично плоскою.

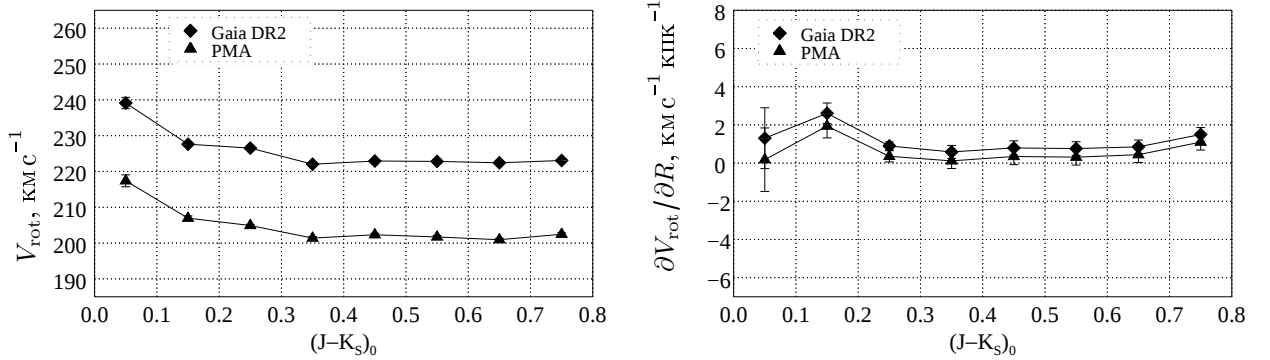


Рис. 3.21 Лінійна швидкість обертання центроїдів зірок навколо центра Галактики V_{rot} (ліва панель) і нахил кривої обертання $\partial V_{\text{rot}}/\partial R$ (права панель), отримані за власними рухами *Gaia* DR2 (ромби) і PMA (трикутники)

При усередненні результатів за всіма показниками кольору отримуємо: за даними *Gaia* DR2 $A = 14.69 \pm 0.39 \text{ км с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$, $B = -13.53 \pm 0.34 \text{ км с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$, за даними PMA $A = 13.10 \pm 0.47 \text{ км с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$, $B = -12.50 \pm 0.41 \text{ км с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$. Ці значення не зважені, і вони збігаються зі зваженими в межах $0.10\text{--}0.15 \text{ км с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$.

Цікаво порівняти ці результати з результатами, що отримані іншими авторами за зірками ГП. В роботі [134] за власними рухами зірок з каталогу TGAS (*Gaia* DR1) були отримані кінематичні параметри моделі O–M за вибіркою зірок ГП в діапазоні відстаней 0–1.6 кпк. Згідно з їхніми даними, параметр $A = M_{12}^+ = 16.29 \pm 0.06 \text{ км с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$, а $B = \omega_3 = -11.90 \pm 0.05 \text{ км с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$. В роботі [167] за власними рухами зірок ГП з типовою геліоцентричною відстанню 230 пк з каталогу TGAS були отримані наступні значення: $A = 15.3 \pm 0.4 \text{ км с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$, $B = -11.9 \pm 0.4 \text{ км с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$.

Очевидно, що розбіжність результатів обумовлена різними вибірками

зірок та даними, що використовуються.

Параметри (ω_1 , M_{23}^+) і (ω_2 , M_{13}^+)

Поведінку параметрів (ω_1 , M_{23}^+) і (ω_2 , M_{13}^+) в залежності від показника кольору представлено на рис. 3.22 (верхня і нижня панелі, відповідно). Підкреслимо, що поведінка всіх параметрів, отриманих за даними *Gaia* DR2 і PMA, практично ідентична у всьому діапазоні показника кольору.

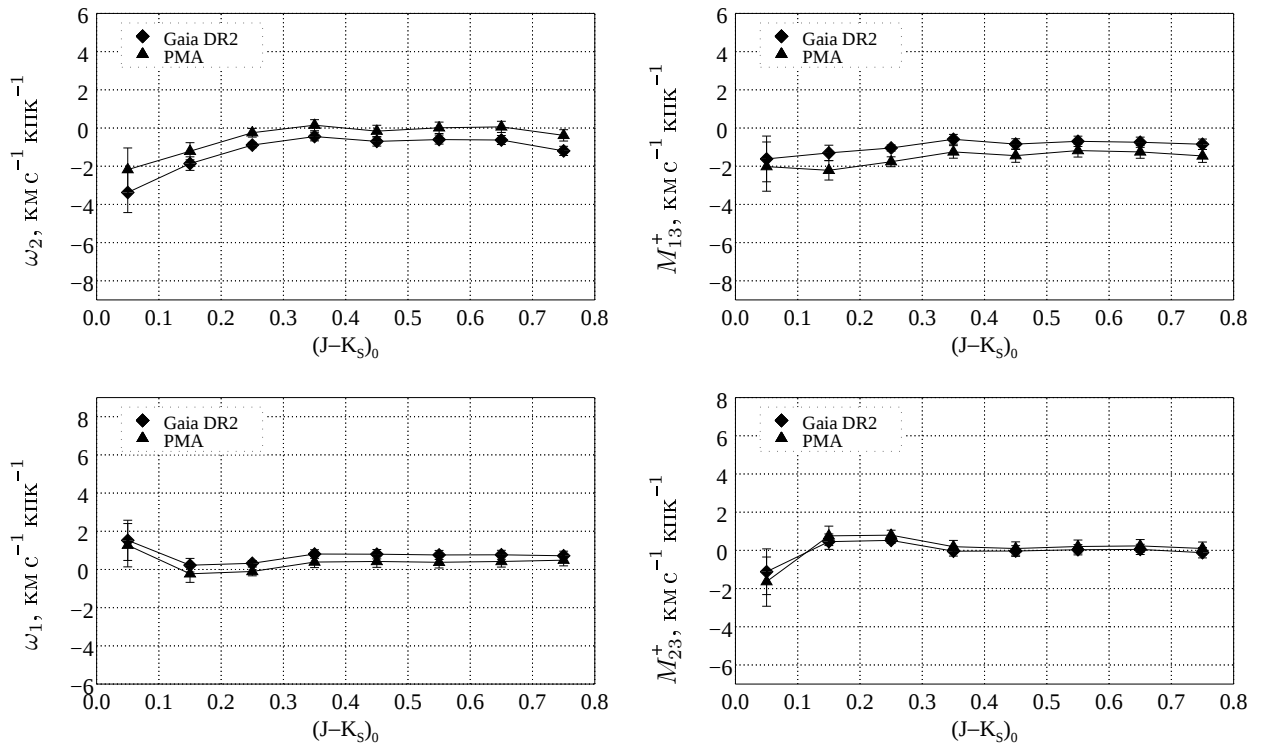


Рис. 3.22 Параметри моделі О–М ω_2, ω_1 (ліва панель) і M_{13}^+, M_{23}^+ (права панель), отримані для всієї сфери за даними *Gaia* DR2 (ромби) і PMA (трикутники)

У той же час спостерігаються невеликі систематичні зсуви між значеннями параметрів, отриманих за даними *Gaia* DR2 і PMA, в діапазоні $0.2\text{--}2.0 \text{ km s}^{-1} \text{kpc}^{-1}$. Також на рис. 3.22 чітко видно, що кінематика зірок ранніх спектральних класів (піддіапазон $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_s)_0 < 0.3^{\text{m}}$) дещо відрізняється від кінематики зірок пізніх спектральних класів ($0.3^{\text{m}} \leq (J - K_s)_0 < 0.8^{\text{m}}$). Так, наприклад, в піддіапазоні $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_s)_0 < 0.3^{\text{m}}$ містяться порівняно великі за модулем значення параметрів ω_1 , ω_2 , M_{23}^+ і M_{13}^+ ($1.5\text{--}3 \text{ km s}^{-1} \text{kpc}^{-1}$), тоді як у разі

зірок пізніх спектральних класів значення цих параметрів по модулю помітно зменшуються або стають нульовими.

Ненульові значення параметрів ω_1 і ω_2 вказують на те, що вектор твердотілого обертання вибірки зірок, крім проекції на вісь z , має також, хоч і невеликі, але статистично значимі складові по осях x і y , відповідно, тобто він не є перпендикуляром до площини Галактики. Ненульові значення параметрів M_{23}^+ і M_{13}^+ свідчать про наявність деформаційних швидкостей в площинах (y, z) і (x, z) , відповідно.

Тепер розглянемо величини, які обчислюються з комбінації параметрів (ω_1, M_{23}^+) і (ω_2, M_{13}^+) : вертикальний градієнт швидкості обертання зірок навколо центра Галактики $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ (формула 2.23, ліва панель рис. 3.23), параметр Σ (формула 2.24, права панель рис. 3.23), вертикальний градієнт швидкості розширення зіркової системи $\partial V_R/\partial z$ (формула 2.25, рис. 3.24). Як можна бачити з рис. 3.23 і 3.24, поведінка і значення параметрів $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ і $\partial V_R/\partial z$ в піддіапазоні $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.3^{\text{m}}$ помітно відрізняються від таких в інших піддіапазонах. Значення $\partial V_R/\partial z$, що отримані за даними обох каталогів, узгоджуються між собою. Вони ненульові та змінюються в діапазоні від $\sim 4.5 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ до $\sim 1 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ в залежності від показника кольору. Значення $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ близькі до нуля, але за даними *Gaia* DR2 і PMA мають систематичні розходження близько $0.8 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$.

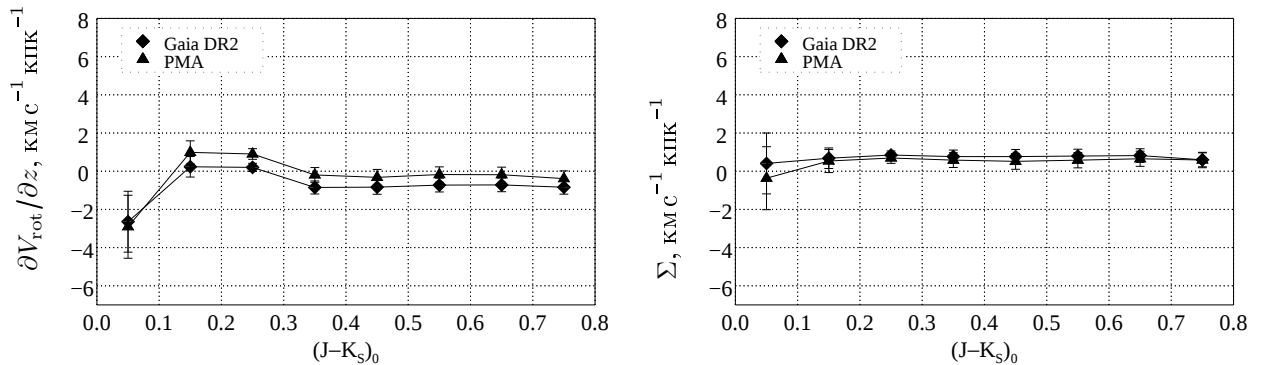


Рис. 3.23 Вертикальний градієнт $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ (формула 2.23) і Σ (формула 2.24), що отримані для всієї сфери за власними рухами *Gaia* DR2 (ромби) і PMA (трикутники)

Що стосується величини Σ , що характеризує наявність локального вигину диска Галактики, то цей параметр в усьому діапазоні використаних

показників кольору дуже близький до нуля. Цьому факту може бути, принаймні, два пояснення: або кінематика близьких зірок (до 1 кпк) не є чутливою до викривлення диска Галактики, або, як припустили Вітязов і Цветков [137], параметр Σ взагалі не пов'язаний з ефектом викривлення диска Галактики. Підкреслимо, що викривлення диска Галактики недавно було детектовано за даними *Gaia* DR2 з використанням зірок ГП, розташованих лівіше точки повороту, гігантів [170], зірок ОБ [171] та класичних цефеїд [172].

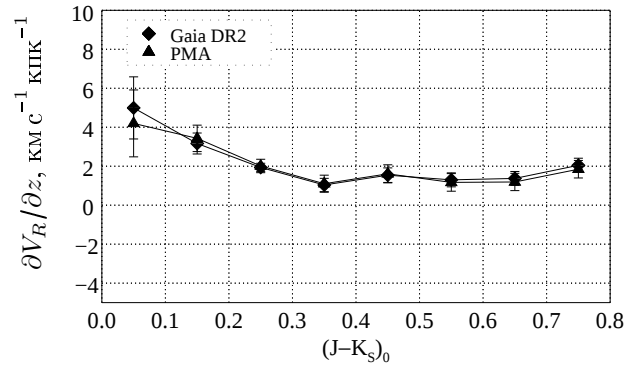


Рис. 3.24 Вертикальний градієнт розширення зоряної системи (формула 2.25), отриманий для всієї сфери за власними рухами *Gaia* DR2 (ромби) і PMA (трикутники)

Параметри M_{11}^* , M_{33}^*

Як вже зазначалося вище, параметри M_{11}^+ , M_{22}^+ і M_{33}^+ характеризують швидкості відносних розтягнень–стиснень зоряної системи уздовж осей x_1, x_2, x_3 , відповідно. Однак використання тільки власних рухів не дає можливості визначити поведінку зоряної системи уздовж кожної з її осей окремо.

З наведених на рис. 3.25 лінійних комбінацій $M_{11}^* = M_{11}^+ - M_{22}^+$ і $M_{33}^* = M_{33}^+ - M_{22}^+$ видно, що значення параметрів M_{11}^* і M_{33}^* , які отримані за даними *Gaia* DR2 і PMA, практично збігаються у всьому діапазоні показників кольору. Також видно, що в діапазоні $0.0^m \leq (J - K_S)_0 < 0.3^m$ присутня лінійна залежність, а поза цим діапазоном значення параметрів залишаються майже незмінними. На жаль, ці факти не дають можливості отримати будь-яких висновків відносно параметрів M_{11}^+ , M_{22}^+ , M_{33}^+ .

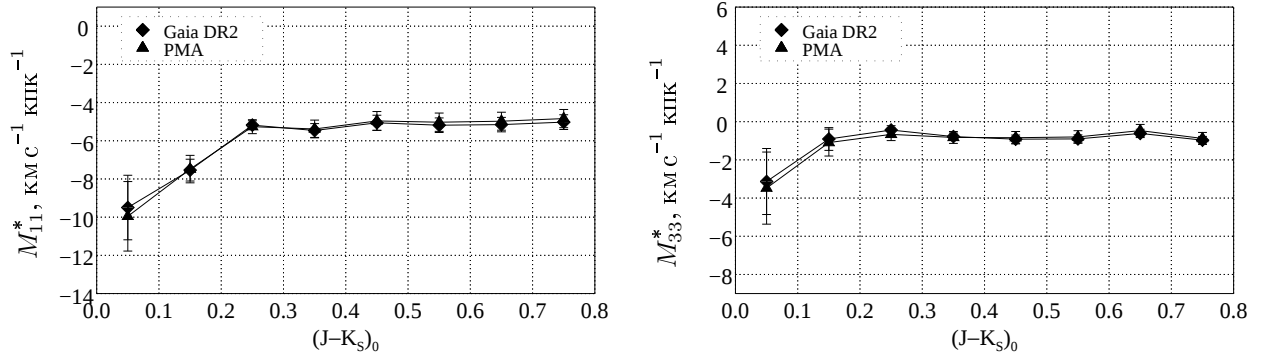


Рис. 3.25 Параметри моделі О–М M_{11}^* (ліва панель), M_{33}^* (права панель), отримані для всієї сфери за даними *Gaia* DR2 (ромби) і PMA (трикутники)

Щоб прояснити ситуацію хоча б на якісному рівні, ми виконали тестові розрахунки для зірок ГП *Gaia* DR2 з підключенням променевих швидкостей, тобто зробили розкладання реального просторового поля швидкостей за ВСФ. З'ясувалось, що в цьому випадку параметр M_{11}^+ має значуще негативне значення, тобто зоряна система, що аналізується, стискається вздовж осі x . При цьому швидкість стиснення M_{11}^+ підвибірки більш молодих зірок більше, ніж підвибірки більш старих зірок. Параметр M_{22}^+ виявився позитивним, а M_{33}^+ практично нульовим або позитивним, але по модулю його значення менше значень M_{22}^+ .

Позамодельні коефіцієнти t_{211} , s_{310}

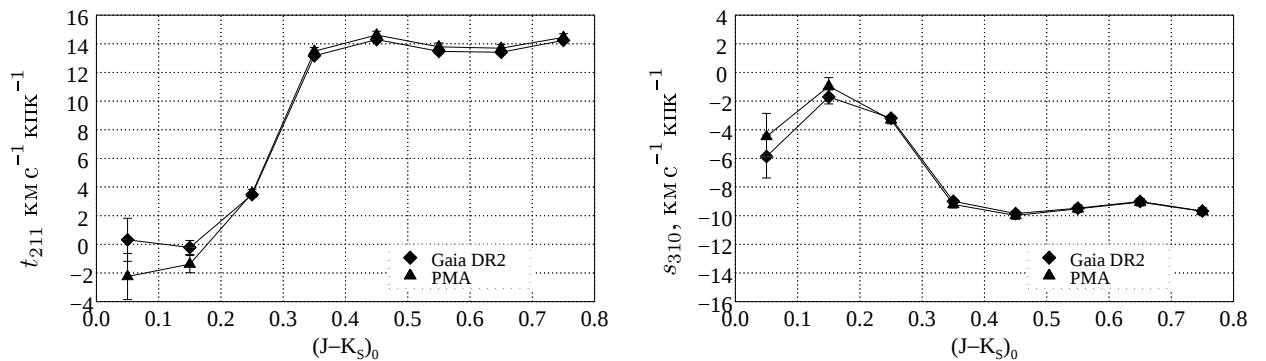


Рис. 3.26 Позамодельні коефіцієнти t_{211} (ліва панель) і s_{310} (права панель), отримані для всієї сфери за власними рухами *Gaia* DR2 (ромби) і PMA (трикутники)

Як можна бачити з табл. 3.4, реальне поле швидкостей зірок

Gaia DR2, крім коефіцієнтів, що відповідають параметрам моделі О–М, містить позамоделльні коефіцієнти. Існування статистично значущих членів розкладання, що не мають аналогів в моделі О–М, свідчить про наявність в полі швидкостей зірок відповідних позамоделльних гармонік. Найбільшими значущими позамоделльними коефіцієнтами є коефіцієнти t_{211} і s_{310} . Їх значення в залежності від показника кольору наведені на рис. 3.36. Вони змінюються в діапазоні $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.4^{\text{m}}$, потім знаходяться на постійному рівні.

Вид гармонік T_{211} і S_{310} наведено в табл. 3.5. Походження позамоделльних гармонік розглядається в підрозділі 3.4.5

Таблиця 3.5

Вид гармонік T_{211} , S_{310}

гармоніка	норм. множник	l	b
T_{211}	$\sqrt{\frac{5}{8\pi}}$	$-\cos 2b \cos l$	$-\sin b \sin l$
S_{310}	$\sqrt{\frac{7}{128\pi}}$	$-\cos l (5 \sin^2 b - 1)$	$\sin b \sin l (15 \sin^2 b - 11)$

3.4.4 Кінематика в південній і північній галактичних півсферах

У цьому підрозділі розглядаються кінематичні параметри, які були визначені за даними *Gaia* DR2 і РМА окремо для північної та південної галактичних півсфер з використанням методу ЗВСФ. Параметри моделі О–М були обчислені з використанням формул зв'язку з табл. 2.2. На рис. 3.27–3.30 представлені компоненти вектора твердотільного обертання (зліва) і швидкості деформацій у відповідних площинах (праворуч) в залежності від показника кольору для даних *Gaia* DR2 і РМА.

Параметри (M_{12}^+ , ω_3)

З рис. 3.27 і 3.28 добре видно, що значення параметрів ω_3 і M_{12}^+ , які отримані для всієї сфери, а також для північної і південної півсфер, добре узгоджуються між собою в усьому діапазоні показників кольору як для даних *Gaia* DR2, так і для даних РМА. Максимальна різниця

значень параметрів в півсферах становить $\sim 2.4 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ (параметр M_{12}^+ , підвбірка $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 \leq 0.1^{\text{m}}$, за даними RMA).

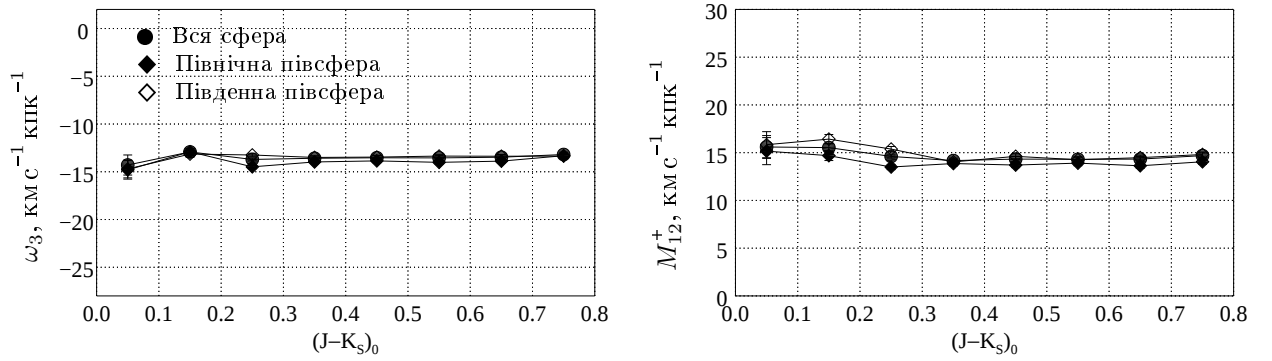


Рис. 3.27 Параметри моделі О–М ω_3 (стала Оорта В), і M_{12}^+ (стала Оорта А), M_{13}^+ , M_{23}^+ , що отримані за власними рухами *Gaia* DR2 для всієї сфери (заповнені кружки, ●), північної (заповнені ромби, ◆) і південної (пусті ромби, ◇) галактичних півсфер

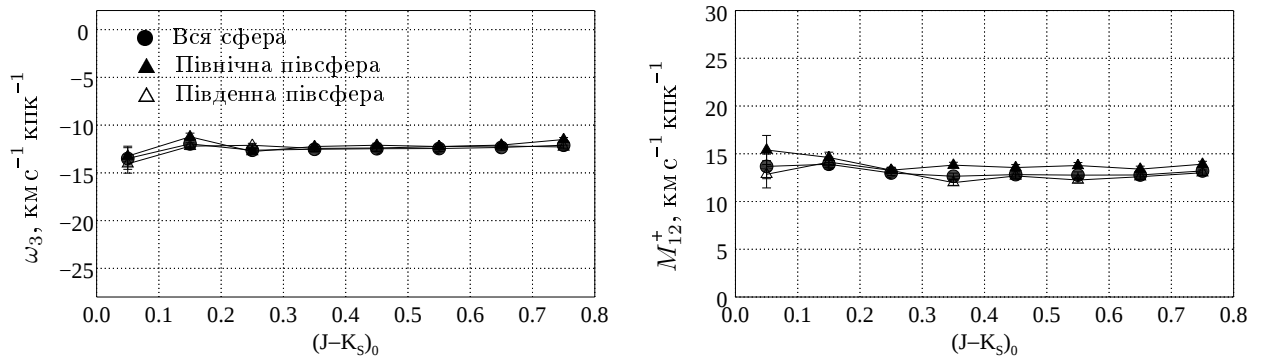


Рис. 3.28 Параметри моделі О–М ω_3 (стала Оорта В) і M_{12}^+ (стала Оорта А), що отримані за власними рухами RMA для всієї сфери (заповнені кружки, ●), північної (заповнені трикутники, ▲) і південної (пусті трикутники, △) галактичних півсфер

Параметри (ω_1, M_{23}^+) і (ω_2, M_{13}^+) та їх комбінації

З верхніх панелей рис. 3.29, 3.30 видно, що значення параметрів ω_2 і M_{13}^+ , отримані в півсферах, помітно відрізняються від таких, що отримані на всій сфері, причому в діапазоні $0.2^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 \leq 0.8^{\text{m}}$ значення цих параметрів позитивні в південній півсфері і негативні в північній.

На нижніх панелях рис. 3.29, 3.30 можна бачити, що модулі параметрів ω_1 і M_{23}^+ в діапазоні $0.1^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 \leq 0.4^{\text{m}}$ зростають від $0 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ до $\sim 10 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, а далі залишаються постійними, причому ω_1 має негативні

значення в південній півсфері і позитивні в північній, тоді як значення M_{23}^+ , навпаки, позитивні в південній півсфері і негативні в північній. Вперше на ці факти було звернено увагу в роботі [137] при аналізі власних рухів зірок каталогів HIPPARCOS, Tycho-2 і UCAC3.

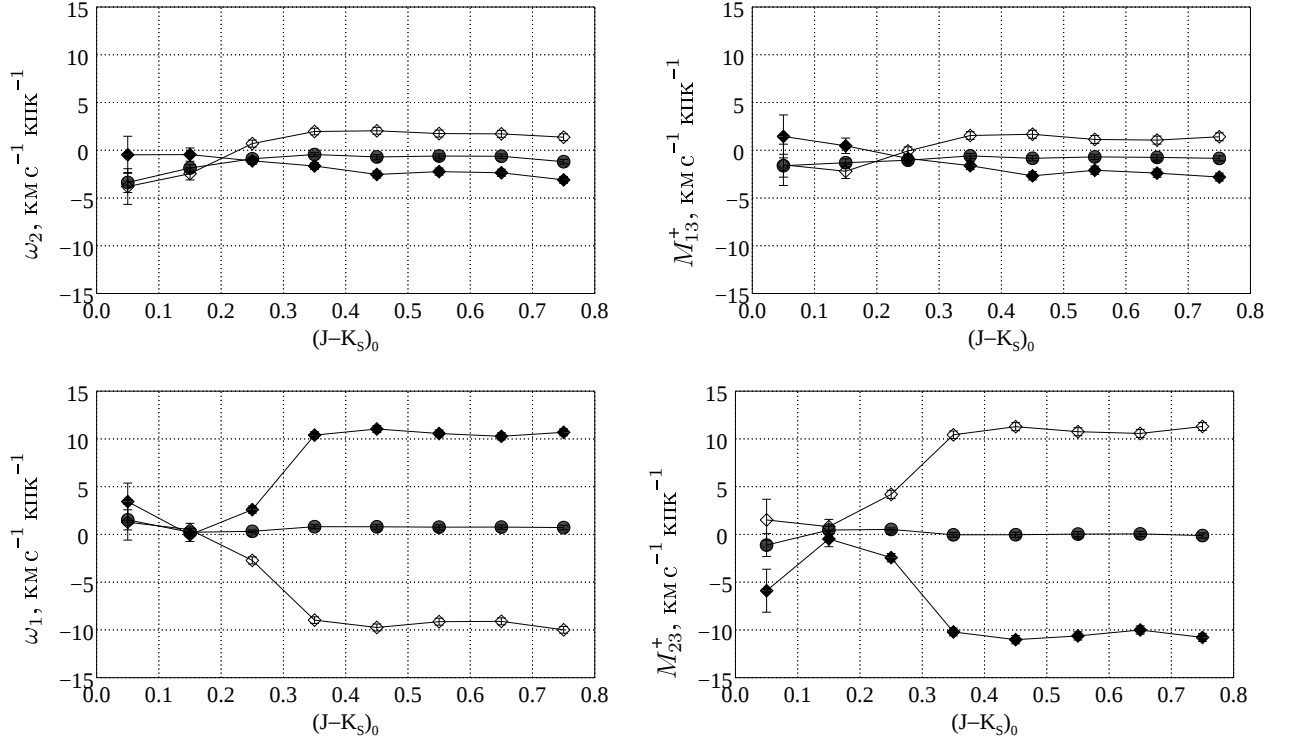


Рис. 3.29 Параметри моделі О–М ω_3 (стала Оорта В), ω_2, ω_1 (ліва панель), і M_{12}^+ (стала Оорта А), M_{13}^+, M_{23}^+ (права панель), отримані за власними рухами *Gaia* DR2 для всієї сфери (заповнені кружки, ●), північної (заповнені ромби, ◆) і південної (пусті ромби, ◇) галактичних півсфер

Через те, що поведінка цих параметрів в півсферах симетрична, при вирішенні рівнянь для всієї сфери їх значення виявляються практично нульовими. На рисунках також добре видно, що достовірність поведінки параметрів помітно знижується в діапазоні $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.1^{\text{m}}$ через збільшення похибок їх визначення.

Згідно з формулою (2.23), параметри M_{23}^+ і ω_1 дають можливість оцінити величину вертикального градієнта швидкості обертання Галактики $\partial V_{\text{rot}} / \partial z$ окремо в північній і південній півсферах.

Поведінку градієнтів $\partial V_{\text{rot}} / \partial z$, обчислених в північній і південній півсферах в залежності від показника кольору представлено на рис. 3.31. На

цьому рисунку для зручності порівняння градієнтів, що відповідають різним півсферам, значення $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ в північній півсфері були помножені на -1 . З огляду на це зауваження, з рис. 3.31 видно, що поведінка вертикального градієнта майже симетрична відносно вісі $(J - K_S)$, тобто градієнти мають протилежні знаки в північній і південній півсферах, а їх модулі практично однакові за даними каталогу *Gaia* DR2 і дещо відрізняються за даними каталогу РМА. Той факт, що величина $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ негативна в північній півсфері і позитивна в південній, означає зменшення швидкості обертання зірок навколо центра Галактики по мірі віддалення від галактичної площини на північ і на південь.

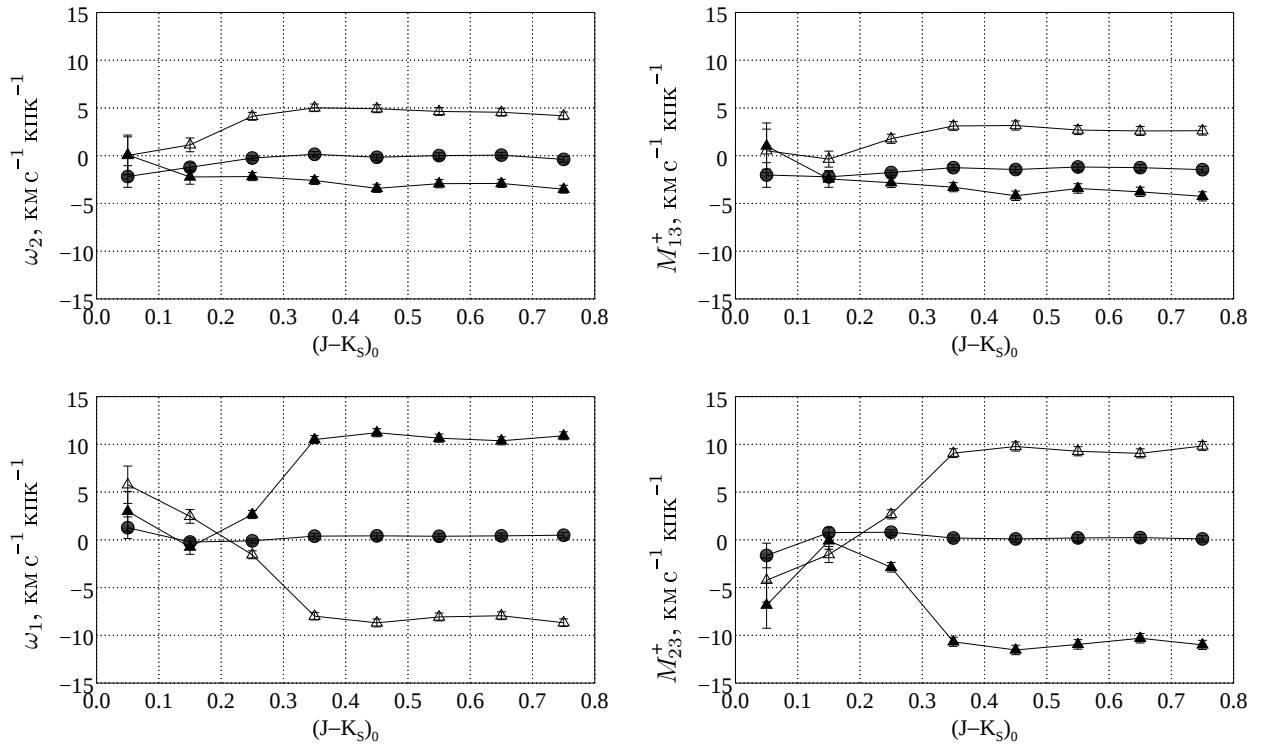


Рис. 3.30 Параметри моделі О – М ω_3 (стала Оорта В), ω_2, ω_1 (ліва панель), і M_{12}^+ (стала Оорта А), M_{13}^+, M_{23}^+ (права панель), що отримані за власними рухами РМА для всієї сфери (заповнені кружки, $\bullet$), північної (заповнені трикутники, $\blacktriangle$) і південної (пусті трикутники, $\triangle$) галактичних півсфер

За даними *Gaia* DR2 (рис. 3.31, ліва панель) максимальна розбіжність між значеннями $|\partial V_{\text{rot}}/\partial z|$ в північній і південній півсферах в діапазоні $0.1^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.8^{\text{m}}$ становить $2 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. Цікаво відзначити, що величина $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ для молодих зірок помітно менше, ніж для зірок старіших. Так значення $\partial V_{\text{rot}}/\partial z \simeq 0 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ в піддіапазоні

$0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.2^{\text{m}}$, далі в піддіапазоні $0.2^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.4^{\text{m}}$ збільшуються до $\approx 20 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, після чого залишаються практично постійними.

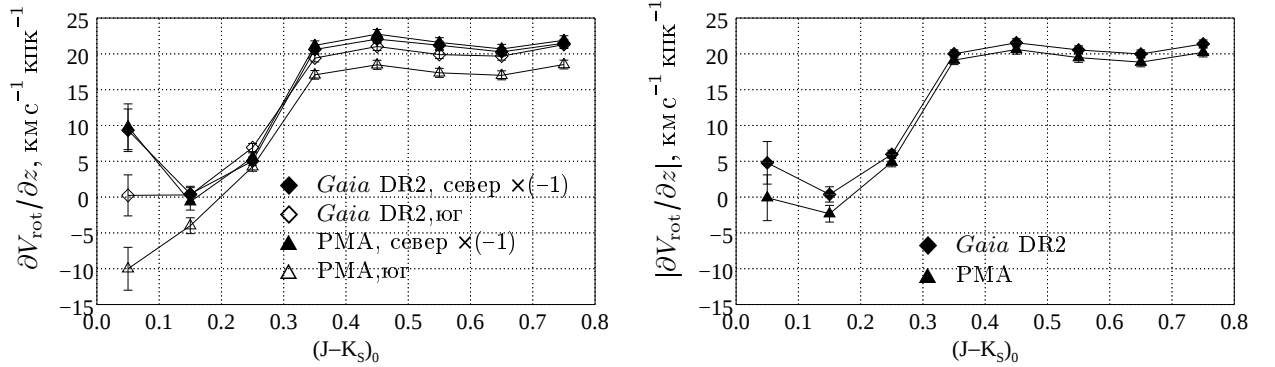


Рис. 3.31 Ліва панель: вертикальний градієнт $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$, отриманий за власними рухами *Gaia* DR2 (ромби) і РМА (трикутники) в північній (значення помножені на -1 , заповнені символи) і південній (відкриті символи) півсферах. Права панель: $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$, усереднений за двома півсферами за власними рухами *Gaia* DR2 (ромби) і РМА (трикутники)

У піддіапазоні $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.1^{\text{m}}$ спостерігається максимальна розбіжність між величинами $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$: в південній півсфері градієнт дорівнює $\approx 1.06 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, тоді як в північній він дорівнює $\approx -10.38 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, при цьому похибки визначення цих величин найбільші.

За даними РМА (рис. 3.31, ліва панель) систематичні відмінності значень $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ в північній і південній півсферах приблизно в 2 рази більші, ніж за даними *Gaia* DR2. При цьому поведінка $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ в залежності від показника кольору в цілому повторює поведінку, отриману за даними *Gaia* DR2. Найбільша відмінність градієнтів, як і у випадку *Gaia* DR2, присутня в піддіапазоні $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.1^{\text{m}}$. Однак дивно те, що при усередненні значень $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$, виведених за даними каталогів *Gaia* DR2 і РМА для кожної з півсфер (рис. 3.31, права панель), було отримано відмінну згоду між середніми значеннями модуля градієнта.

Тому питання про те, чи спричинені систематичні відмінності градієнтів, отриманих за даними РМА і *Gaia* DR2, реальними рухами зірок, чи вони є наслідком відмінностей систематик, властивих каталогам РМА і *Gaia* DR2, залишається відкритим.

Таким чином, можна зробити висновок, що вертикальний градієнт $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ (див. рівняння 2.23) це ефект, який має протилежну спрямованість в північній і південній галактичних півсферах. Тому при обчисленні по всій сфері були отримані значення $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ близькі до нуля. В іншому випадку, можна вважати, що цей ефект не скомпенсований в двох півсферах. Підтвердження цьому можна бачити на рис. 3.32, де значення $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$, визначені по всій сфері, близькі до нуля для всіх підвбірок, крім випадку $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.1^{\text{m}}$. У той же час, величина вертикального градієнта, визначеного в півсферах, сильно змінюється в піддіапазоні $0.2^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.3^{\text{m}}$ приблизно від нуля до $\sim 20 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. Це означає, що при переході від ранніх спектральних класів до пізніх, вертикальний градієнт зростає до $\sim 20 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, а потім, починаючи з $(J - K_S)_0 \approx 0.3^{\text{m}}$ залишається практично незмінним.

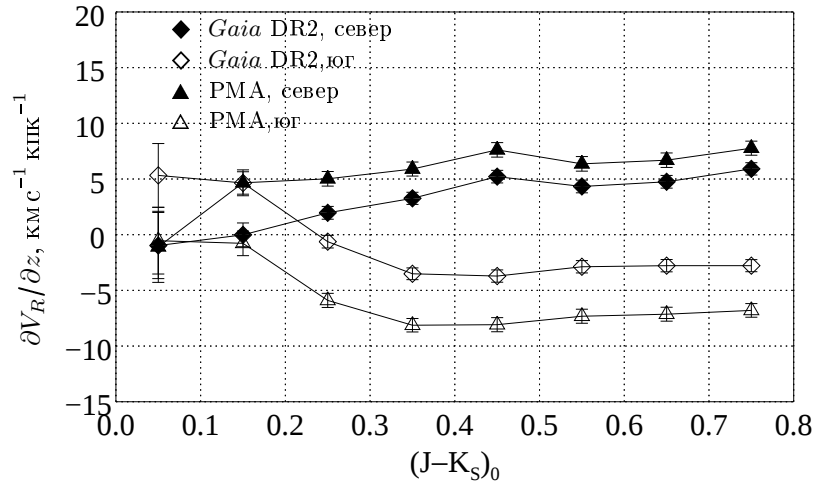


Рис. 3.32 Вертикальний градієнт швидкості розширення системи $\partial V_R/\partial z$, отриманий за власними рухам *Gaia* DR2 (ромби) і РМА (трикутники) в північній (заповнені символи) і південній (відкриті символи) півсферах

Тепер розглянемо параметри ω_2 і M_{13}^+ (середня панель рис. 3.29 і 3.30). Як за даними *Gaia* DR2, так і за даними РМА, значення цих параметрів для північної і південної півсфер у всьому діапазоні показників кольору, що використовується, відрізняються від значень, отриманих для всієї сфери. Оцінку величини вертикального градієнта радіальної швидкості розширення зоряної системи $\partial V_R/\partial z$ було отримано за формулою 2.25.

Поведінку градієнта $\partial V_R/\partial z$ представлено на рис. 3.32, де він має позитивні значення в північній півсфері і негативні в південній. Це означає, що при віддаленні від площини Галактики радіальна швидкість розширення зоряної системи збільшується.

Порівнюючи результати, отримані для всієї сфери з результатами, отриманими для півсфер, стає зрозумілим, що малі значення $\partial V_R/\partial z$ на рис. 3.24 обумовлені різними знаками градієнтів в півсферах (рис. 3.32).

В середньому за даними *Gaia* DR2 в діапазоні $0.3^m \leq (J - K_S)_0 < 0.8^m$ $\partial V_R/\partial z$ дорівнює $5.28 \pm 0.57 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ в північній півсфері і $-2.87 \pm 0.56 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ в південній, а за даними PMA відповідно $7.15 \pm 0.64 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ і $-7.05 \pm 0.64 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$.

Для порівняння отриманих результатів, приведемо результати, представлені в роботі [137], де автори досліджували кінематику тільки червоних зірок за їх власними рухами з каталогів HIPPARCOS, Tycho-2 і UCAC3 в залежності від зоряної величини окремо в північній і південній галактичній півсферах. Ними були отримані наступні оцінки:

$$20.1 \pm 2.9 < \left| \frac{\partial V_{\text{rot}}}{\partial z} \right| < 49.2 \pm 0.8 \text{ kms}^{-1} \text{кпс}^{-1}, \quad (3.42)$$

причому нижня межа була отримана за червоними гігантами з каталогу HIPPARCOS з відстаннями 250–500 пк. Відзначимо, що це значення близьке до значення, яке було отримано в цій дисертації за власними рухами червоних зірок ГП (рис. 3.31). Також слід мати на увазі, що при використанні даних Tycho-2 і UCAC3 у авторів не було інформації про відстані до об'єктів. Досить ймовірно, що в зоряні вибірки, які використовували автори, входила значна кількість гігантів з великими відстанями ($> 1 \text{ кпк}$), що могло привести до більших значень $|\partial V_{\text{rot}}/\partial z|$.

У цій же роботі [137] також була отримана оцінка $\partial V_R/\partial z$. За власними рухами червоних зірок HIPPARCOS автори знайшли, що $\partial V_R/\partial z = 12.4 \pm 4.2 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ і $-2.7 \pm 4.1 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ в північній і південній півсферах, відповідно. Хоча ці значення були отримані зі значною похибкою, вони не суперечать (принаймні за знаком) тим, які були отримані в цій дисертації.

В роботі Субіран [173] було показано, що вертикальний градієнт $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$, виміряний за власними рухами зірок, що знаходяться в полі розміром 7° на відстані 10° від північного галактичного полюса, з геліоцентричною відстанню $z \leq 900$ кпк, дорівнює $-20 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, і обумовлений, головним чином, сумішшю тонкого і товстого дисків. Відомо, що тонкий диск складається з молодих зірок і зірок середнього віку, тоді як товстий диск – стара підсистема (див. наприклад, [174]). Крім того, тонкий і товстий диски мають різні шкали висот h_z , наприклад, за даними [175] ці значення складають відповідно 300 кпк і 900 кпк (див. підрозділ 1.4). Як наслідок, при віддаленні від площини Галактики, в зоряній суміші зменшується частка зірок тонкого диска і збільшується частка зірок товстого диска (див. рис. 3.33), що призводить до збільшення середнього віку зірок вибірки і зменшення швидкості обертання навколо центра Галактики. В роботі [173] цей ефект називається «вертикальним градієнтом асиметричного дрейфу».

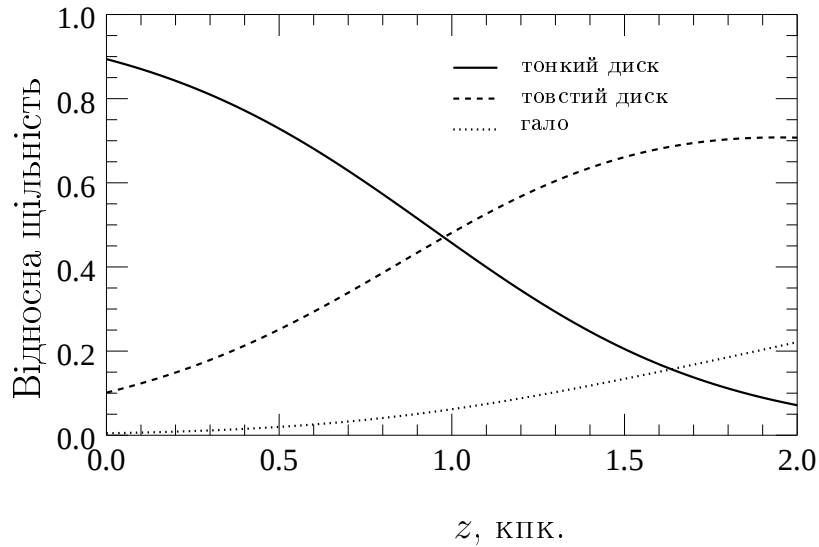


Рис. 3.33 Залежність відносної щільності зірок тонкого диска (суцільна крива), товстого диска (штрихова крива) і гало (пунктирна крива) від відстані від площини Галактики z

З рис. 3.33 видно, що безпосередньо поблизу Сонця зірки тонкого диска за кількістю домінують. При збільшенні відстані від площини Галактики z відносна щільність зірок тонкого диска зменшується, тоді як зірок товстого диска і гало, навпаки, зростає. На відстані $z \approx 1$ кпк відносна кількість

зірок тонкого і товстого дисків стає однаковою, а зірки гало за кількістю становлять 5 %.

Рисунок 3.33 був отриманий автором дисертації з використанням наступних припущень [176]:

1) експоненціальний закон розподілу зірок тонкого і товстого дисків як функції відстані від площини Галактики z і галактоцентричної відстані R (т. зв. подвійний експоненціальний диск):

$$\rho_{D_i}(R, Z) = \rho_{D_i}(R_\odot, Z_\odot) \exp \left[-\frac{(R - R_\odot)}{H_{r,i}} - \frac{(|Z| - |Z_\odot|)}{H_{z,i}} \right], \quad (3.43)$$

де $i = 1, 2$; $H_{z,i}, H_{r,i}$ – шкала висот і шкала довжин тонкого ($i = 1$) або товстого ($i = 2$) диска; $\rho_{D_i}(R_\odot, z_\odot)$ – щільність зірок в точці, де знаходиться Сонце (тобто при $R = R_\odot, z = z_\odot$);

2) закон розподілу зірок гало має наступний вигляд залежно від R, z :

$$\rho_H(R, z) = \rho_H(R_\odot, z_\odot) \left(\frac{R^2 + (z/k)^2}{R_\odot^2 + (z_\odot/k)^2} \right)^{-p/2}, \quad (3.44)$$

де $\rho_H(R_\odot, Z_\odot)$ – щільність зірок гало в точці, де знаходиться Сонце, k – параметр сплюснення, а p – індекс степеневого розподілу, значення яких були визначені в роботі [177]: $(k, p) = (0.45 \pm 0.04, 2.4 \pm 0.07)$. z – відстань зірки від площини Галактики; R – галактоцентрична відстань до зірки, що обчислюється за формулою

$$R^2 = R_\odot^2 + r^2 \cos^2 b - 2 R_\odot r \cos l \cos b \quad (3.45)$$

Значення $\rho_{D_1}(R_\odot, z_\odot) = 0.889$, $\rho_{D_2}(R_\odot, z_\odot) = 0.12$, $\rho_H(R_\odot, z_\odot) = 0.005$ були взяті з роботи [175].

Товщина дисків залежить від дисперсії швидкостей зірок ([178], стор. 25). Простежується така залежність, що чим старше зірки, які складають вибірку, тим більше дисперсія їх пекулярних швидкостей. При цьому максимальне значення дисперсії спостерігається у зірок гало. В табл. 3.6 наведені характеристики цих підсистем з роботи [179], де $\varsigma_x, \varsigma_y, \varsigma_z$ – дисперсії компонент швидкостей по відповідних осях ГСК, а $V_{\text{асим}}$ – величина асиметричного дрейфу, яка характерна для кожної популяції зірок. З таблиці видно, що одночасно зі збільшенням дисперсії швидкостей також збільшується і

Характеристики зірок тонкого, товстого дисків і гало

Параметр, км с ⁻¹	ς_x	ς_y	ς_z	$V_{\text{асим}}$
Тонкий диск	35	20	16	-15
Товстий диск	67	38	35	-46
Гало	160	90	90	-220

величина асиметричного дрейфу $V_{\text{асим}}$ (тобто різниця між швидкостями обертання навколо центра Галактики ЛСС і центроїда вибірки зірок, що аналізується). За рахунок цього ефекту швидкість Сонця $X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}$ має різні значення відносно центроїдів різних вибірок зірок.

Наочно відмінність кінематичних характеристик показана на діаграмі Тумре (рис. 3.34). $X_{\text{ЛСС}}, Y_{\text{ЛСС}}, Z_{\text{ЛСС}}$ є компоненти пекулярних швидкостей зірок, які приведені до ЛСС. З рисунка видно, що зірки тонкого диска мають найменшу дисперсію швидкостей, і практично всі знаходяться всередині кола радіусом $\approx 70 \text{ км с}^{-1}$, більшість зірок товстого диска потрапили між радіусами 70 і 200 км с^{-1} , тоді як зірки гало мають швидкості більше 200 км с^{-1} . При цьому видно, що кордони між підсистемами не є чіткими.

3.4.5 Про походження позамоделних коефіцієнтів t_{211}, s_{310} і прискорення сонячного руху

Питання про походження позамоделних гармонік при розкладанні поля швидкостей зірок за векторними сферичними функціями, а також про встановлення їх фізичного сенсу розглядалось неодноразово в ряді робіт. Так, наприклад, в роботі [96] в рамках узагальненої моделі Оорта другого порядку ([87, 104]) бул встановлений зв'язок між коефіцієнтами t_{211}, s_{310} і параметрами Оорта другого порядку F і G . Автори зробили висновок про те, що коефіцієнти t_{211}, s_{310} можна отримати за допомогою лінійної комбінації параметрів $F = 0.5R_{\odot}\omega_{\odot}''$ і $G = A/R_{\odot}$. При цьому, згідно з їх розрахунками, коефіцієнт s_{310} повинен бути негативним і протилежним за знаком коефіцієнту t_{211} . Модуль t_{211} повинен перевищувати модуль s_{310} в 5.8 раз. Відповідно до нашого аналізу (рис. 3.36), t_{211} перевищує по модулю s_{310} тільки в діапазоні $0.3^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.8^{\text{m}}$, де $|t_{211}/s_{310}|$ в середньому ≈ 1.5 .

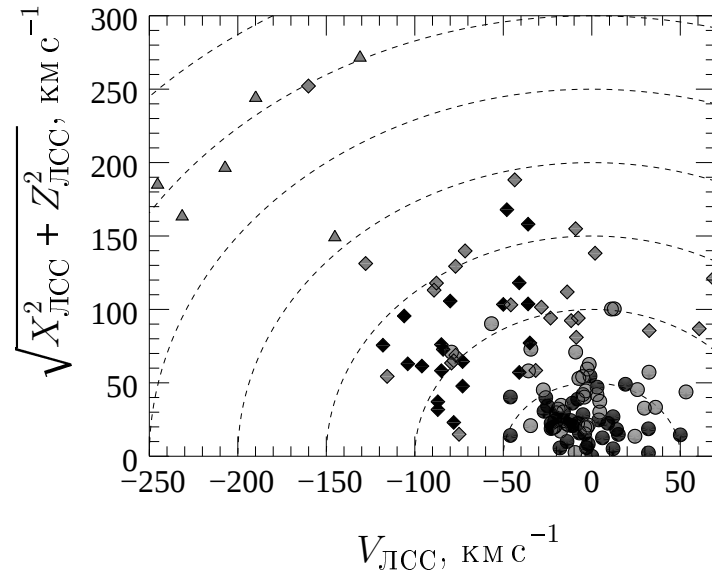


Рис. 3.34 Діаграма Тумре для зірок сонячної околиці з $r < 0.2$ кпк, яка побудована за даними з робіт [179] і [180]. Належність тієї чи іншої підсистеми визначена в роботі [179] за кінематичним критерієм, а в роботі [180] – за вмістом α -елементів, або кінематичним критерієм. ● – зірки тонкого диска з роботи [179]; ● – зірки тонкого диска з роботи [180]; ◆ – зірки товстого диска з роботи [179]; ◆ – зірки товстого диска з роботи [180]; ▲ – зірки гало з роботи [180]

В роботі [181] передбачалося, що зміна компоненти швидкості Сонця $Y_{\odot}$ відносно зірок відбувається таким чином, що значення $Y_{\odot}$ збільшуються при збільшенні зоряних відстаней від площини Галактики. Використовуючи це припущення, автор визначив значення $|\partial V_{\text{rot}} / \partial z| \approx 30 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ за власними рухами слабких зірок з каталогу NPM. В роботі [95] було зроблено припущення, що однією з причин появи позамоделних гармонік T_{211} і S_{310} може бути вертикальний градієнт швидкості обертання.

Вітязов і Цветков [137] змодельовали таку ситуацію, коли параметри M_{+23} і ω_1 мали протилежні знаки в північній і південній півсферах: $\omega_1 = \pm 25 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, $M_{23}^{\pm} = \mp 25 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, де верхній і нижній знаки відповідають північній і південній галактичним півсферам, відповідно. Таким чином, відповідно з формулою 2.23 автори створили поле швидкостей зірок з $\partial V_{\text{rot}} / \partial z = \mp 50 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. Розкладаючи це поле швидкостей за системою ВСФ, визначених на всій сфері, автори отримали $t_{211} = 35.0 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, $s_{310} = -29.7 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. Цей факт свідчить про те, що вертикальний

градієнт спричинив виникнення гармонік T_{211} і S_{310} . Однак автори не робили ніяких порівнянь із значеннями, отриманими з реальних даних.

3.4.6 Моделювання поля швидкостей зірок

В межах цієї дисертації пропонується дещо інший підхід, який дає можливість на основі моделювання поля швидкостей зірок, що містить вертикальний градієнт, отримати більше інформації як про модельні, так і позамоделльні кінематичні параметри. З цією метою в галактоцентричній системі координат було змодельовано поле швидкостей зірок за методикою, яка описана в підрозділі 2.3, для всіх кольорових підвбірок з використанням числових значень параметрів $V_{\text{rot},0}$ і $|\partial V_{\text{rot}}/\partial z|$, що приблизно відповідають реальним даним, отриманим із даних *Gaia* DR2 (див рис. 3.21 і 3.32).

Розглянемо процес моделювання на прикладі кольорової підвбірки $0.4^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.5^{\text{m}}$. Вхідні параметри мають такі зачення: $V_{\text{rot},0} = 230 \text{ км с}^{-1}$ та $|\partial V_{\text{rot}}/\partial z| = 22 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, де $V_{\text{rot},0}$ – швидкість обертання навколо центра Галактики, задана в площині Галактики при $z = 0$. Вертикальний градієнт був введений в поле швидкостей зірок за допомогою функції

$$V_{\text{rot}}(z) = V_{\text{rot},0} - |\partial V_{\text{rot}}/\partial z| |z| \quad (3.46)$$

Таким чином було реалізовано уповільнення швидкості обертання Галактики, яке дорівнює $22 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. При цьому вважалось, що Сонце разом із спостерігачем рухається навколо центра Галактики зі швидкістю 230 км с^{-1} .

При розкладанні цього поля швидкостей за ВСФ, визначеного на всій сфері, було отримано 5 значущих гармонік. Відповідні цим гармонікам коефіцієнти розкладання відображені в табл. 3.8. Також в цій таблиці для порівняння наводяться значення коефіцієнтів розкладання, які були отримані при використанні реального поля швидкостей зірок *Gaia* DR2 із піддіапазону $0.4^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.5^{\text{m}}$. Модельна швидкість $V_{\text{rot},0}$ була підібрана таким чином, щоб центроїд зірок мав швидкість V_{rot} , яка приблизно відповідає реальному значенню, отриманому за власними рухами зірок з *Gaia* DR2 (див.

підрозділ 3.4.3 і рис. 3.21).

Таким же чином був змодельований вертикальний градієнт і для інших колірних підвибірок зірок, але з різними значеннями $|\partial V_{\text{rot}}/\partial z|$ (див. табл. 3.7).

Таблиця 3.7

Вхідні параметри моделі $|\partial V_{\text{rot}}/\partial z|$, в одиницях $\text{км с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$

$(J - K_S)_0$	0.0–0.1	0.1–0.2	0.2–0.3	0.3–0.4	0.4–0.5	0.5–0.6	0.6–0.7	0.7–0.8
$ \partial V_{\text{rot}}/\partial z $	0	0	6	20	22	21	21	22

Далі докладно розглянемо коефіцієнти розкладання з табл. 3.8, що були отримані за модельним полем швидкостей.

Таблиця 3.8

Коефіцієнти, отримані за модельним і реальним (*Gaia* DR2) полями швидкостей зірок для підвибірки $0.4^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.5^{\text{m}}$

Коеф.	<i>Gaia</i> DR2	Модель
t_{101}	–39.11	–40.34
t_{211}	14.29	14.29
s_{110}	–37.11	–37.03
s_{220}	32.10	30.92
s_{310}	–9.85	–8.79

Коефіцієнти t_{101} і s_{220}

Нагадаємо, що коефіцієнт t_{101} відповідає параметру ω_3 моделі О–М, а також постійній Оорта B з моделі Оорта–Лінблада, а коефіцієнт s_{220} відповідає параметру M_{12}^+ моделі О–М, а також постійній Оорта A . Як і очікувалося, через включення в модельне поле швидкостей зірок, що мають обертання навколо центра Галактики, коефіцієнти t_{101} і s_{220} виявилися значущими.

З табл. 3.8 видно, що модельні і реальні значення цих коефіцієнтів дуже близькі, що призводить до близьких значень V_{rot} . Так, для модельного поля швидкостей зірок $V_{\text{rot}}(\text{Модель}) = 222.0 \text{ км с}^{-1}$, а для реального *Gaia* DR2 $V_{\text{rot}}(\text{Gaia}) = 222.9 \text{ км с}^{-1}$.

Коефіцієнт s_{110}

Фізичний сенс коефіцієнта розкладання s_{110} згідно з табл. 2.1 в моделі О–М є не що інше, як компонента $Y_{\odot}$ швидкості руху Сонця відносно центроїда зірок. Хоча рух Сонця не було включено в модельне поле швидкостей зірок, тобто $X_{\odot} = Y_{\odot} = Z_{\odot} = 0.0 \text{ км с}^{-1}$, проте, після розкладання модельного поля швидкостей за ВСФ, коефіцієнт s_{110} в піддіапазоні кольору $0.4^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.5^{\text{m}}$, виявився відмінним від нуля. Це означає, що наявність в полі швидкостей вертикального уповільнення обертання Галактики $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ призводить до виникнення ненульової компоненти швидкості Сонця $Y_{\odot}/|r| = -0.346 s_{110} = -12.8 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$.

Далі за модельними власними рухами індивідуальних зірок за допомогою моделі О–М були отримані кінематичні параметри, в тому числі і компонента руху Сонця $Y_{\odot}$. Використання індивідуальних зірок з їх індивідуальними відстанями дає можливість обчислити компоненти руху Сонця в км с^{-1} . Отримані значення $Y_{\odot}$ в залежності від показника кольору показані на правій панелі рис. 3.35 кружками.

На лівій панелі цього ж рисунка нижньою кривою показані значення $Y_{\odot}$, які були отримані за індивідуальними власними рухами зірок *Gaia* DR2, що знаходяться в тонкому галактичному шарі $-25 \text{ пк} \leq z \leq 25 \text{ пк}$ і $0.1 \text{ кпк} \leq r \leq 1 \text{ кпк}$. Вважається, що компонента швидкості Сонця $Y_{\odot}$ відносно зірок шару практично не спотворена впливом вертикального градієнта (не більше 0.5 км с^{-1}).

Крім того, ромбами (верхня крива на лівій панелі рис. 3.35) показані значення $Y_{\odot}$, що обчислені за індивідуальними власними рухами зірок *Gaia* DR2 в діапазоні відстаней $0.1 \text{ кпк} \leq r \leq 1 \text{ кпк}$, тобто по всім зіркам, які входять в кожну підвибірку.

Оскільки значення, які отримані за власними рухами зірок, що знаходяться в шарі $-25 \text{ пк} \leq z \leq 25 \text{ пк}$, не спотворені впливом вертикального градієнта, поведінку $Y_{\odot}$ обумовлено тільки асиметричним дрейфом, який є різницею між швидкостями обертання навколо центра Галактики ЛСС і центроїда кожної підвибірки зірок. З лівої панелі рис. 3.35 можна бачити, що значення $Y_{\odot}$, отримані за власними рухами всіх зірок *Gaia* DR2,

що знаходяться в діапазоні геліоцентричних відстаней $0.1 \text{ кпк} \leq r \leq 1 \text{ кпк}$, відрізняються від значень, що з'єднані нижньою кривою, на величину $\Delta Y_{\odot}$, яка практично збігається з $Y_{\odot}$, отриманим за модельними даними. Для зручності значення $\Delta Y_{\odot}$ в порівнянні з модельними даними показані на правій панелі рис. 3.35.

Тепер очевидно, що поведінка компоненти $Y_{\odot}$, яка виведена за власними рухами реальних зірок з *Gaia* DR2 (верхня крива на правій панелі рис. 3.35) обумовлена сумарним впливом двох факторів. Перший фактор – асиметричний дрейф, а другий – зменшення швидкості обертання Галактики $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$. Таким чином можна стверджувати, що причиною виникнення в розкладанні модельного поля швидкостей коефіцієнта s_{110} є вертикальний градієнт $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$. Підтвердженням цього висновку є майже повний збіг значень коефіцієнта s_{110} для реального і модельного полів швидкостей, наведених в табл. 3.8, а також збіг значень $Y_{\odot}$, показаних на правій панелі рис. 3.35.

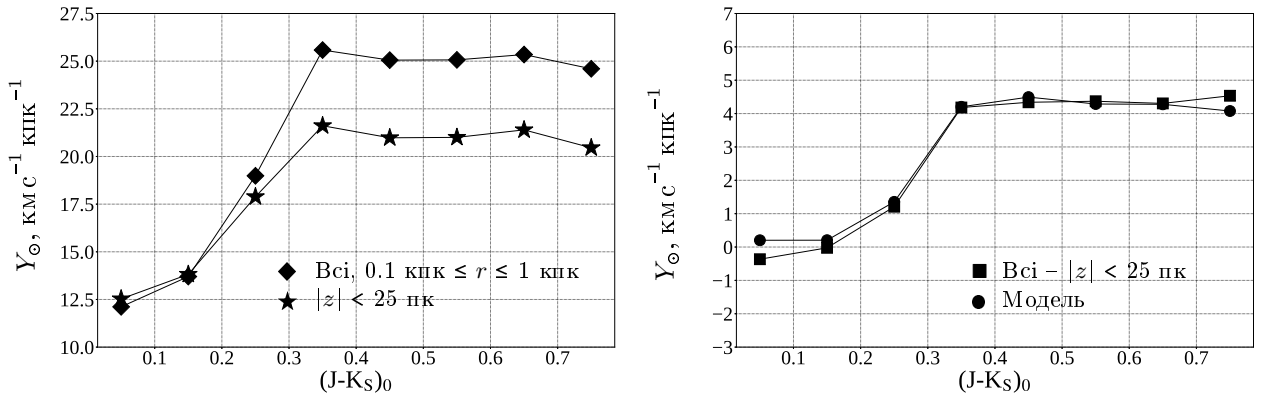


Рис. 3.35 Ліва панель: компонента руху Сонця $Y_{\odot}$, отримана за власними рухами зірок *Gaia* DR2, розташованих в діапазоні геліоцентричних відстаней $0.1 \text{ кпк} \leq r \leq 1 \text{ кпк}$ (ромби, верхня крива) і всередині галактичного шару $-25 \text{ пк} \leq z \leq 25 \text{ пк}$, $0.1 \text{ кпк} \leq r \leq 1 \text{ кпк}$ (зірки, нижня крива). Права панель: значення $Y_{\odot}$, отримані з модельних даних (заповнені кружки) в порівнянні з різницею значень між верхньою і нижньою кривими з лівої панелі (заповнені квадрати)

Тут слід зауважити, що виявлені факти впливають на значення поправок для корекції власних рухів зірок за формулами 2.11, 2.12. Очевидно, що для коректного виключення сонячного руху необхідно використовувати

компоненти, вільні від впливу вертикального градієнта. Тому всі розрахунки і графіки, представлені в розділах 3.4.3, 3.4.4, виконані з урахуванням цього зауваження, тобто в формулах 2.11, 2.12 використовувалися компоненти $X_{\odot}$, $Y_{\odot}$, $Z_{\odot}$, визначені за зірками *Gaia* DR2 і PMA з тонкого шару $-25 \text{ кпк} \leq z \leq 25 \text{ кпк}$ з відстанями $0.1 \text{ кпк} \leq r \leq 1 \text{ кпк}$.

Коефіцієнти t_{211} і s_{310}

Коефіцієнти t_{211} , s_{310} є позамоделними. Очевидно, що вони виникають спільно внаслідок включення вертикального градієнта в поле швидкостей зірок. Підтвердженням цьому є наведені в табл. 3.8, а також на рис. 3.36 значення цих коефіцієнтів, що отримані по модельному і реальному полях швидкостей зірок. З табл. 3.8 видно, що значення коефіцієнтів t_{211} практично збігаються, а між значеннями коефіцієнтів s_{310} є лише невелика відмінність: $s_{310}(\text{Модель} - \textit{Gaia} \text{ DR2}) = 0.79 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ в середньому в діапазоні $0.1 \leq (J - K_S)_0 < 0.8$. Таким чином, можна зробити висновок, що коефіцієнт t_{211} повністю пояснюється наявністю вертикального градієнта, тоді як причина виникнення коефіцієнта s_{310} може бути не одна. Більш того, коефіцієнт s_{310} може виникати окремо від t_{211} , що видно з рис. 3.36 в діапазоні $0.0 \leq (J - K_S)_0 < 0.2$. При відсутності вертикального градієнта і нульових значеннях t_{211} , отриманих за даними *Gaia* DR2, значення s_{310} дорівнюють -6.43 ± 1.50 і $-1.69 \pm 0.49 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ в діапазонах $0.0^{\text{м}} \leq (J - K_S)_0 < 0.1^{\text{м}}$ і $0.1^{\text{м}} \leq (J - K_S)_0 < 0.2^{\text{м}}$, відповідно.

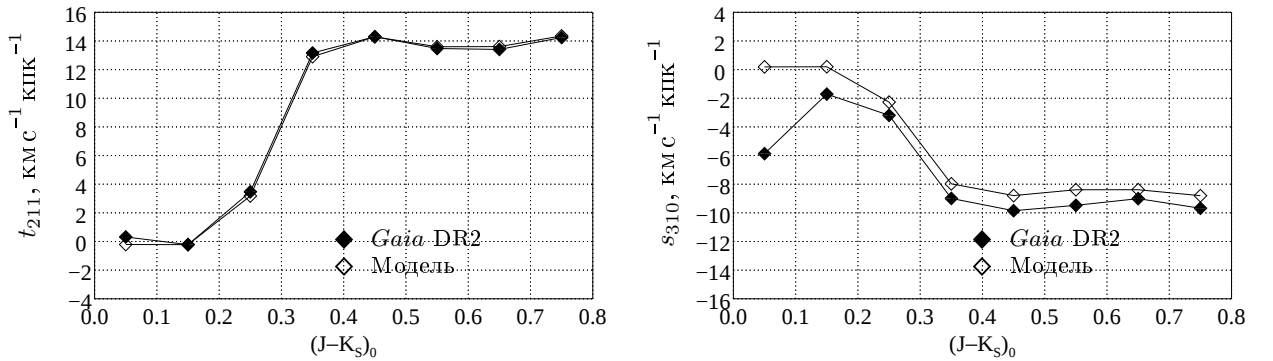


Рис. 3.36 Коефіцієнти розкладання за ВСФ t_{211} і s_{310} , які були отримані за власними рухами зірок *Gaia* DR2 (заповнені ромби) і за модельними даними (пусті ромби)

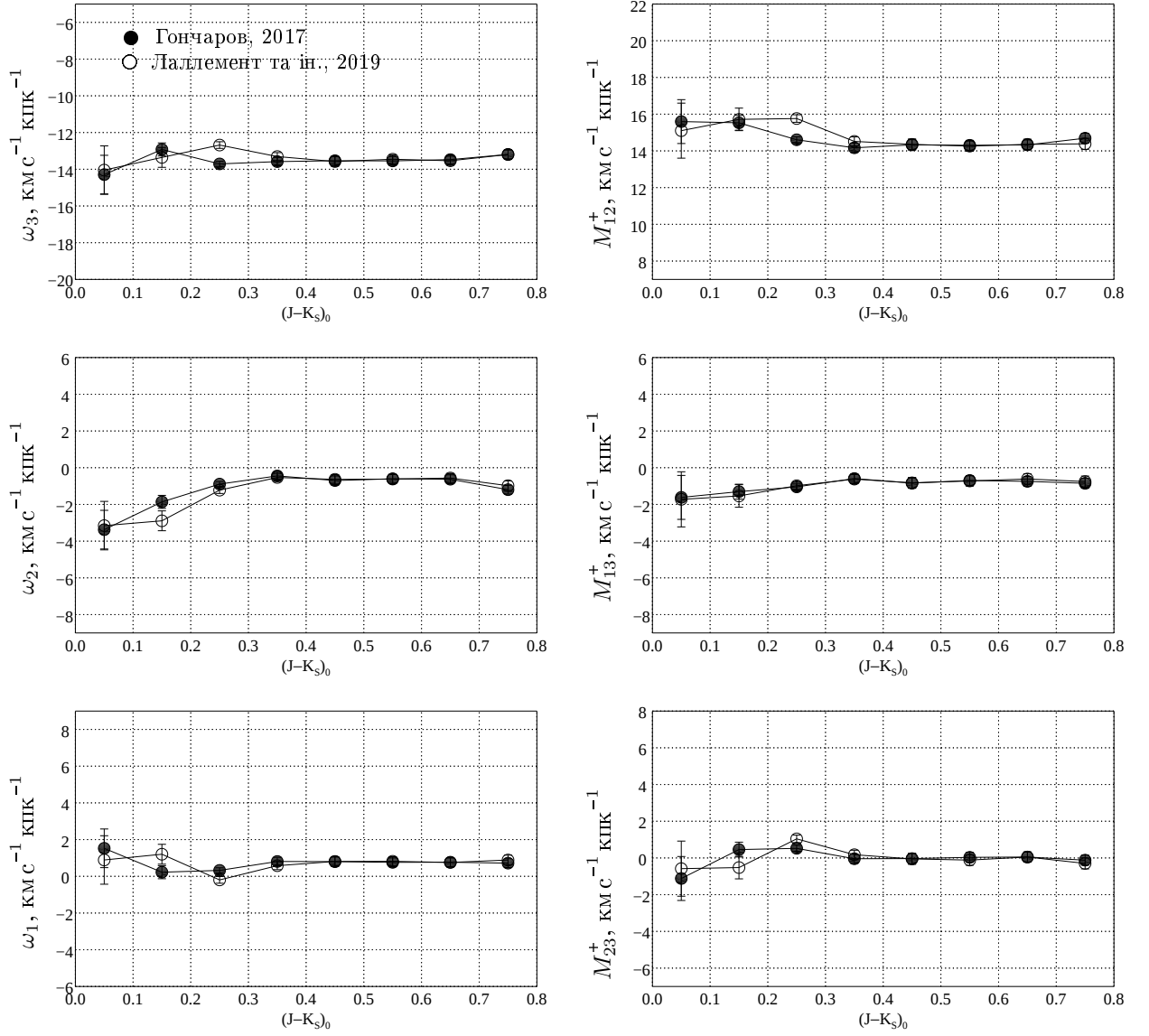


Рис. 3.37 Параметри моделі О–М ω_3 (стала Оорта В), ω_2, ω_1 (ліва панель), і M_{12}^+ (стала Оорта А), M_{13}^+, M_{23}^+ (права панель), що отримані за власними рухами *Gaia* DR2 з використанням карти поглинання Гончарова [158] (заповнені кружки, ●) і карти поглинання Лаллемент та ін. [159] (пусті кружки, ○)

З іншого боку, тестові визначення компоненти $Y_\odot$ всередині кольорових підвибірок *Gaia* DR2 в кожному з шарів Галактики $0 \leq |z| < 100$, $100 \leq |z| < 200$, ... $900 \leq |z| < 1000$ з наступним їх виключенням з власних рухів зірок в цих шарах, призводять до зникнення позамоделних коефіцієнтів t_{211} , s_{310} , що також підтверджує їх виникнення внаслідок існування $\partial V_{\text{rot}} / \partial z$. На жаль, фізичний зміст цих коефіцієнтів при такому моделюванні встановити неможливо, але принаймі зрозуміло, внаслідок чого

ВОНИ ВИНИКАЮТЬ.

Вплив карт поглинання на результати

З метою перевірки, як впливає застосування різних карт поглинання на кінематичні параметри, було виконано тестові обчислення з використанням карти Лаллемент та ін. [159], описаної в розділі 3.1.7. Абсолютні зоряні величини M_{K_S} і показники кольору $(J - K_S)$ були виправлені за поглинання і почервоніння з урахуванням співвідношень, наведених в підрозділі 3.1.7.

Потім були виділені зірки ГП способом, описаним в розділі 3.4.1, і отримані кінематичні параметри в залежності від показника кольору. В результаті були виявлені невеликі відмінності між значеннями деяких параметрів в діапазоні $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.4^{\text{m}}$, що не перевищують $1.5 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, в порівнянні з основним випадком використання карти поглинання Гончарова [158] (див. рис. 3.37). Як правило, ці відмінності можна порівняти з похибками визначення параметрів. Якісно картина не змінилася.

3.4.7 Висновки до підрозділу 3.4

У підрозділі 3.4.3 була використана підмножина ~ 24.1 мільйонів зірок ГП з геліоцентричними відстанями $0.1 \text{ кпк} \leq r \leq 1 \text{ кпк}$, які є спільними в каталогах *Gaia* DR2 і РМА. Ця вибірка зірок була розділена за показником кольору $(J - K_S)_0$, який виправлено за почервоніння, на вісім підвбірок в діапазоні $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.8^{\text{m}}$ з розміром кожного піддіапазону 0.1^{m}

Кінематичні параметри моделі О–М були отримані для кожної підвбірки з використанням власних рухів зірок з каталогів *Gaia* DR2 і РМА. Кінематичні рівняння були розв’язані як для всієї небесної сфери, так і окремо для північної і південної галактичних півсфер. Кінематичний аналіз в півсферах дозволив детектувати більше ефектів в полі швидкостей зірок, ніж при аналізі по всій сфері. Для цього використовувалися методи розкладання поля швидкостей зірок за ВСФ і ЗВСФ. Були отримані наступні результати:

1) Показано, що кінематика зірок раннього і пізнього класів розрізняється. Всі кінематичні параметри мають тренди в діапазоні $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.4^{\text{m}}$, тоді як поза цим діапазоном їх значення досягають

плато і практично не змінюються. Пекулярна поведінка молодих зірок може бути обумовлена тим, що їх поле швидкостей ще є збуреним. Деякі з цих зірок можуть належати таким структурам як, наприклад, пояс Гулда.

2) При аналізі поля швидкостей окремо в північній і південній галактичних півсферах можна безпосередньо обчислити величину вертикального градієнта $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$. За власними рухами зірок *Gaia* DR2 і РМА було виявлено, що зірки ранніх спектральних класів, $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.2^{\text{m}}$ мають нульовий вертикальний градієнт. Потім він зростає з ростом $(J - K_S)_0$ і досягає значення $\approx 20 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ при $0.3^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.4^{\text{m}}$ і далі знаходиться приблизно на цьому рівні.

Підтверджено факт, вперше відзначений Вітязовим і Цветковим [137], що при наявності вертикального градієнта параметри моделі О–М ω_1 і M_{23}^+ мають протилежні знаки в різних галактичних півсферах. Показано, що параметр ω_1 є позитивним в північній півсфері і негативним в південній, тоді як M_{23}^+ , навпаки, негативний в північній півсфері і позитивний в південній. Це означає, що вертикальний градієнт, будучи лінійною комбінацією цих двох параметрів, негативний в північній півсфері і позитивний в південній. Ця поведінка є наслідком зменшення швидкості обертання зірок навколо центра Галактики при віддаленні від її площини.

3) Показано, що вертикальний градієнт має додатковий вплив на компоненту швидкості Сонця $Y_{\odot}$. Таким чином, наприклад, при $|\partial V_{\text{rot}}/\partial z| = 22 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ добавка до $Y_{\odot}$ становить $\approx 4.2 \text{ км с}^{-1}$. Тому можна зробити висновок, що значення $Y_{\odot}$, що отримані за власними рухами зірок *Gaia* DR2 і РМА, є комбінацією двох ефектів: асиметричного дрейфу зірок (тобто кореляцією між віком зірок ГП і швидкістю обертання навколо центра Галактики), що знаходяться безпосередньо в площині Галактики, і вертикального градієнта швидкості обертання Галактики (через те, що середній вік зірок збільшується з відстанню від площини Галактики).

4) Показано, що позамоделні гармоніки T_{211} , S_{310} виникають одночасно через наявність $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$. Уповільнення швидкості обертання зірок навколо центра Галактики при збільшенні z викликано збільшенням середнього віку зірок, обумовленого збільшенням частки зірок товстого диска (старі

зірки) і зменшенням частки зірок тонкого диска (молоді зірки). За аналогією зі «звичайним» асиметричним дрейфом в науковій літературі вертикальний градієнт називається вертикальним асиметричним дрейфом [182] або вертикальним градієнтом асиметричного дрейфу [173]. Останнє визначення, мабуть, є більш точним.

Існування коефіцієнтів t_{211} повністю пояснюються вертикальним градієнтом, тоді як значення s_{310} , крім вертикального градієнта, можуть містити внесок ще якогось ефекту. Моделювання показало, що одночасна присутність в полі швидкостей зірок гармонік T_{211} і S_{310} є індикатором присутності вертикального градієнта $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$.

5) Виявлено систематичні відмінності між значеннями деяких кінематичних параметрів, отриманих за даними *Gaia* DR2 і РМА, обумовлені, ймовірно, відмінностями між їх системами власних рухів. Ці відмінності впливають на значення глобальних параметрів Галактики. Наприклад, через систематику $\Delta\omega_1(\text{Gaia-PMA})$ і $\Delta M_{12}^+(\text{Gaia-PMA})$, значення швидкості обертання зірок навколо центра Галактики V_{rot} за даними РМА систематично менше, ніж за даними *Gaia* DR2: $\Delta V_{\text{rot}}(\text{Gaia-PMA})$ в середньому $\simeq 21 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$.

З іншого боку, ряд параметрів практично не мають систематичних відмінностей. Наприклад, значення позамоделних коефіцієнтів t_{211} і s_{310} , що отримані за даними *Gaia* DR2 і РМА, узгоджуються між собою протягом усього діапазона показників кольору.

Відзначимо також ситуацію, при якій значення $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$, які були отримані за власними рухами РМА в північній і південній півсферах, систематично розрізняються на величину $\simeq 5 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ в діапазоні $0.3^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.8^{\text{m}}$. У той же час, вони відрізняються і від значень, отриманих за даними *Gaia* DR2. Однак, при усередненні по півсфері, значення $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$, що отримані за даними *Gaia* DR2 і РМА, знаходяться в згоді у всьому діапазоні показників кольору.

Висновки до розділу 3

Сучасні високоточні астрометричні і фотометричні дані для сотень мільйонів зірок, що покривають всю небесну сферу, дають можливість детально дослідити кінематику різних підсистем Галактики. У розділі 3 досліджується кінематика зірок змішаного спектрального складу в залежності від геліоцентричної відстані до зірок за даними каталогів TGAS, PMA, UCAC5 і HSOY, кінематика молодих ЧГ згущення за даними *Gaia* DR2 і PMA, кінематика зірок ГП в залежності від показника кольору, а значить і від віку зірок, за даними *Gaia* DR2 і PMA. Крім того, аналіз кінематичних параметрів за даними різних каталогів є тестом якості цих даних.

При використанні власних рухів зірок з різних каталогів виявляється, що значення деяких кінематичних параметрів мають значний розкид, що перевищує внутрішні випадкові похибки визначення. Наприклад, значна різниця виникає між значеннями параметра M_{12}^+ , що призводить до невизначеності значення швидкості обертання зірок навколо центра Галактики аж до $\Delta V_{\text{rot}} \approx 21 \text{ км с}^{-1}$. Фактично, це значення є реальною похибкою визначення параметра, так як неможливо з'ясувати, система якого каталогу є більш «правильною». З іншого боку, значення ряду кінематичних параметрів, які були отримані за даними різних каталогів, добре узгоджуються між собою.

Дослідження кінематичних параметрів зірок змішаного спектрального класу в залежності від геліоцентричних відстаней показало, що кінематика близьких ($r < 0.4$ кпк) і далеких ($r > 0.4$ кпк) зірок різна. Кінематичний спектр найближчих зірок з відстанями $r < 0.1$ кпк дуже схожий на білий шум, тоді як зі збільшенням відстані він поступово стає майже Оортівським. Наприклад, для шару $0.8 \text{ кпк} < r < 0.9 \text{ кпк}$ поле швидкостей зірок містить компоненти руху Сонця $X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}$, $M_{12}^+(A), \omega_3(B)$, M_{11}^+ , а також позамоделльні коефіцієнти t_{211} і s_{310} . Всі інші параметри моделі О – М і позамоделльні коефіцієнти малі або нульові.

Дослідження кінематичних параметрів молодих ЧГ показало наступне. По-перше, відповідно до значень параметра $Y_{\odot}$, середній вік цих зірок не

перевищує 2 мільярди років. По-друге, в разі включення до вибірки зірок з відстанями $r < 0.5$ кпк було виявлено протиріччя між значеннями параметра M_{12}^+ , отриманими за власними рухами і просторовими швидкостями з каталогу *Gaia* DR2. Це протиріччя може бути обумовлено або внутрішніми систематичними похибками визначення променевих швидкостей/власних рухів зірок, або наявністю збурень в полі швидкостей близьких зірок, викликаних структурами, подібними до поясу Гулда. Для зірок в діапазоні відстаней $0.5 \text{ кпк} < r < 1.2 \text{ кпк}$, тобто за межами характерного радіуса пояса Гулда, результати стають узгодженими.

При дослідженні кінематичних параметрів зірок ГП в залежності від показника кольору було показано, що кінематика молодих і старих зірок різна. Це відбивається на значеннях всіх параметрів моделі O–M: вони мають тренди в діапазоні $0.0^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.4^{\text{m}}$, потім виходять на плато і залишаються приблизно на одному рівні. За допомогою моделювання поля швидкостей зірок було показано, що позамоделльні коефіцієнти t_{211} і s_{310} виникають одночасно, коли присутній вертикальний градієнт швидкості обертання зірок навколо центра Галактики, а їх значення залежать від величини цього градієнта.

Таким чином, дані різних каталогів показують, що кінематика зірок залежить як від геліоцентричної відстані до зірок, так і від їх віку. Якісно спостережні дані підтверджують існуючу модель структури і еволюції Галактики (див. підрозділи 1.2.1 і 1.4), щонайменше в межах сонячної околиці в діапазоні $r < 1.2$ кпк. Однак відмінності між системами власних рухів/променевих швидкостей каталогів призводять до великих невизначеностей значень деяких локальних кінематичних параметрів, а також глобальних параметрів Галактики.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [138], [139], [140].

ВИСНОВКИ

В результаті проведеної роботи була одержана низка нових результатів з вивчення кінематика різних підсистем зірок, які знаходяться в сонячній околиці, з використанням даних сучасних астрометричних каталогів TGAS (*Gaia* DR1), *Gaia* DR2, UCAC5, HSOY і PMA. Показано, як кінематичні параметри залежать від геліоцентричної відстані до зірок, їх спектрального класу, віку, а також даних, що використовуються.

Виявлено, що систематичні відмінності між системами власних рухів зірок різних каталогів не дозволяють поліпшити точність визначення деяких кінематичних параметрів, а також глобальних параметрів Галактики на відстані Сонця. Головним чином, це стосується параметрів моделі O–M M_{12}^+ і ω_3 та швидкості обертання зірок навколо центру Галактики V_{rot} . Невизначеність останньої становить $\approx 20 \text{ км с}^{-1}$ за рахунок систематики, яка присутня між каталогами *Gaia* DR2 і PMA.

З аналізу кінематичних параметрів зірок змішаного спектрального складу в залежності від геліоцентричної відстані був зроблений висновок, що кінематика близьких ($r \leq 0.4$ кпк) і далеких ($r > 0.4$ кпк) зірок різна. Поле швидкостей близьких зірок містить багато статистично значимих компонент, тоді як кінематика далеких зірок стає більше схожою на оортовську.

З аналізу кінематики зірок ГП в залежності від показника кольору, тобто і від віку, було показано, що кінематика зірок з $(J - K_S)_0 \leq 0.4^{\text{m}}$ (молодих) і $(J - K_S)_0 > 0.4^{\text{m}}$ (старих) розрізняється. Поле швидкостей молодих зірок сбурене з різних причин, наприклад за рахунок гравітаційного впливу рукавів Галактики або пояса Гулда – локальної структури в сонячній околиці.

В цілому, отримані результати узгоджуються з загальноприйнятою моделлю Галактики. Серед іншого, було отримано ряд оригінальних результатів, які полягають в наступному.

Вперше:

1. За даними каталогів *Gaia* DR2 і PMA, кількість яких забезпечує репрезентативність вибірки зірок до значних геліоцентричних відстаней (1 кпк і більше), отримано кінематичні параметри і позамоделльні коефіцієнти

розкладання за ВСФ та ЗВСФ. Виконано порівняння результатів, які були отримані за даними цих двох каталогів.

2. Для зірок ГП за даними каталогів *Gaia* DR2 і РМА отримано залежність кінематичних параметрів моделі О–М і позамодельних коефіцієнтів розкладання за ВСФ та ЗВСФ, а також вертикального градієнта $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ від показника кольору, а значить і від віку зірок.

3. Надійно і коректно визначено $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ за зірками з відстанями до 1 кпк прямим методом (тобто окремо в північній і південній півсферах).

4. Виконано моделювання поля швидкостей зірок в галактоцентричній системі координат, яке містить вертикальний градієнт швидкості обертання зірок навколо центру Галактики $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$, та його порівняння з результатами, які були отримані за реальними даними *Gaia* DR2.

5. Порівняння результатів, отриманих за змодельованими і реальними *Gaia* DR2 даними, показало, що існує додаткова причина виникнення позамодельної гармоніки S_{310} в полі швидкостей зірок, окрім наявності вертикального градієнта $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$.

6. Виявлено суперечність власних рухів і променевих швидкостей зірок *Gaia* DR2 для близьких молодих ЧГ згущення.

Дістало подальший розвиток:

7. оцінка реальної точності визначення деяких локальних кінематичних параметрів і глобальних параметрів Галактики на відстані Сонця, яка погіршується через систематичні відмінності систем власних рухів зірок різних каталогів (TGAS, UCAC5, HSOY, РМА);

8. кінематичний аналіз різних вибірок зірок окремо в південній і північній галактичних півсферах, який є значно ефективнішим та більш інформативним, ніж аналіз по всій небесній сфері;

9. застосування методів розкладання поля швидкостей зірок за ВСФ і ЗВСФ;

10. вплив вертикального градієнта $\partial V_{\text{rot}}/\partial z$ на значення компоненти швидкості Сонця $Y_{\odot}$, який можна розділити на два ефекта: асиметричний дрейф зірок, що знаходяться безпосередньо в площині Галактики (тобто кореляція між віком зірок ГП і швидкістю їх обертання навколо центру Галактики) і вертикальний градієнт швидкості обертання Галактики (через те, що середній вік зірок збільшується з відстанню від площині Галактики).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Halley E. Considerations on the change of the latitudes of some of the principal fixt stars // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1717. Vol. 30. P. 736–738
2. Bessel F. W., Bradley J. *Fundamenta astronomiae pro anno MDCCLY: deducta ex observationibus per annos 1750–1762 institutis viri incomparabilis James Bradley in specula astronomica Grenovicensi*. Regiomonti, 1818. 341 p.
3. Fricke W. Fundamental catalogues: past, present and future // *Celestial mechanics*. 1985. Vol. 36, No. 3. P. 207–239
4. Smith E. Star catalogues // *Publications of the astronomical society of the pacific*. 1904. Vol. 15, No. 98. P. 193–201
5. Newcomb S. *Catalogue of fundamental stars for the epochs 1875 and 1900 reduced to an absolute system*. Michigan : 1898. 340 p.
6. Boss B. *General catalogue of 33342 stars for the epoch 1950*. Washington : 1937. Vol. 1–5.
7. Morgan H. R. *Catalog of 5268 standard stars, 1950.0 based on the normal system N30* // *Astronomical papers prepared for use of the American ephemeris and nautical almanac*. 1952. Vol. 13. P. 109–231
8. Fricke W., Schwan H., Lederle T., Bastian U., Bien R., Burkhardt G., Du Mont B., Hering R., Jährling R., Jahreiß H., Röser S., Schwerdtfeger H. - M., Walter H. G. *Fifth fundamental catalogue (FK5). Part 1. The basic fundamental stars*. Heidelberg : Veröff. Astron. Rechen-Inst., 1988. Vol. 32. 106 p.
9. Röser S., *The final PPM star catalogue for both hemispheres* // *Bulletin d'information du Centre de Données stellaries*. 1992. Vol. 42. P. 11–16.
10. Витязев В. В. *Анализ астрометрических каталогов с помощью сферических функций*. Санкт-Петербург, 2017. 224 с.

11. Матвеев Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б. О радиоинтерферометре с большой базой // Известия вузов. Радиофизика. 1965. Т. 8, № 4. С. 651–654.
12. Perryman M. A. C., Lindegren L., Kovalevsky J., Høg E., Bastian U., Bernacca P. L., Creze M., Donati F., Grenon M., Grewing M., van Leeuwen F., van der Marel H., Mignard F., Murray C. A., Le Poole R. S., Schrijver H., Turon C., Arenou F., Froeschle M., Petersen C. S. The Hipparcos catalogue // Astronomy and Astrophysics. 1997. Vol. 323. P. L49–L52.
13. ESA. The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission. Netherlands : Noordwijk, 1997. Vol. 1200. 542 p.
14. Gaia collaboration. Gaia data release 2. Summary of the contents and survey properties // Astron. Astrophys. 2018. Vol. 616. Art. A1.
15. Akhmetov V. S., Fedorov P. N., Velichko A. B., Shulga V. M. The PMA Catalogue: 420 million positions and absolute proper motions // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2017. Vol. 469, No. 1. P. 763–773.
16. Zacharias N., Finch C., Frouard J. UCAC5: New Proper Motions Using Gaia DR1 // Astronomical Journal. 2017. Vol. 153, No. 4. P. 1–9.
17. Altmann M., Roeser S., Demleithner M., Bastian U., Schilbach E. Hot Stuff for One Year (HSOY). A 583 million star proper motion catalogue derived from Gaia DR1 and PPMXL. // Astronomy and Astrophysics. 2017. Vol. 600. Art. L4.
18. Struve F. G. W. Stellarum duplicium et multiplicium mensurae micrometricae per magnum Fraunhoferi tubum annis a 1824 ad 1837 in Specula Dorpatensi institutae: Adjecta est synopsis observationum de stellis compositis Dorpati annis 1814 ad 1824 par minora instrumenta perfectarum. Petropoli : Typographia Academica, 1837. 331 p.
19. Bessel F. W. On the parallax of 61 Cygni // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1838. Vol. 4. P.152–161.

20. Kapteyn J. C. On the mean parallax of stars of determined proper motion and magnitude // Publ. Astron. Lab. Groningen. 1900. Vol. 8. P. 1–31.
21. Gill D., Finlay W. H., de Sitter W., Lowinger V. A. Researches on stellar parallax made with the Cape heliometer. Annals of the Roy. Obs., Cape of Good Hope. Vol. 8. Edinburgh : Neil and Company, 1900. 191 p.
22. Kapteyn J. C., Weersma H. A. List of parallax determinations compiled by Prof. J. C. Kapteyn and Dr. H. A. Weersma // Publ. Astron. Lab. Groningen. 1900. Vol. 24. P. 1–32.
23. Perryman M. A. C. The history of astrometry // Eur. Phys. J. 2012. Vol. 37, No. 5. P. 745–792.
24. van Altena W. F., Lee J. T., Hoffleit E. D. The general catalogue of trigonometric [stellar] parallaxes. New haven, CT : Yale University Observatory, 1995. 256 p.
25. Strömberg G. The motions of giant M stars // Astrophys. J. 1927. Vol. 65. P. 238–265.
26. Bailer-Jones C. A. Estimating distances from parallaxes // Astron. Soc. Pac. 2015. Vol. 127. P. 994–1009.
27. Astraatmadja T. L., Bailer-Jones C. A. L. Estimating distances from parallaxes. III. Distances of two million stars in the Gaia DR1 catalogue // Astrophys. J. 2016. Vol. 833. Art. 119.
28. McMillan P. J. Simple Distance Estimates for Gaia DR2 Stars with Radial Velocities // Res. Notes AAS. 2018. Vol. 2, No. 2. Art. 51.
29. Schönrich, R., McMillan P., Laurent E. Distances and parallax bias in Gaia DR2 // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2019. Vol. 487. P. 3568–3580.
30. Bailer-Jones C. A., Rybizki J., Fouesneau M., Mantelet G., Andrae R. Estimating Distance from Parallaxes. IV. Distances to 1.33 Billion Stars in Gaia Data Release 2 // Astron J. 2018. Vol. 156, No. 2. Art. 58.
31. Hearnshaw J. B. The analysis of starlight. Two centuries of astronomical spectroscopy. Cambridge : Cambridge Univercity Press, 2014. 382. p.

32. Moore J. H. A general catalogue of the radial velocities of stars, nebulae and clusters. Lick Obs. Publ. Vol. 18. Michigan : University of Michigan Library, 1932. 231 p.
33. Wilson R. E. General catalogue of stellar radial velocities. Washington : Carnegie Institution of Washington Publications, 1953. 344 p.
34. Pearce M. J. A. Report of Sub-commission 30a on radial velocities standards // Transactions of the IAU. 1957. Vol. 9. P. 441.
35. Griffin R. F., Batten A. H., Bouigue R., Duflot M., Gollnow H., Heard J. F., Oetken L., Philip A. G. D., Rubin V. 30. Radial velocities // Transactions of the IAU. 1976. Vol. 16, No. 2. P. 157–160.
36. Stefanik R. P., Latham D. W., Torres G. Radial-velocity standard stars // ASP Conf. Ser. 1999. Vol. 185. P. 354–366.
37. Gontcharov G. A. Pulkovo Compilation of Radial Velocities for 35495 Hipparcos Stars in a Common System // Astron. Lett. 2006. Vol. 32, No. 11. P. 759–771.
38. Soubiran C., Jasiewicz G., Chemin L., Crifo F., Udry S., Hestroffer D., Katz D. The catalogue of radial velocity standard stars for Gaia. I. Pre-launch release // Astron. Astrophys. 2013. Vol. 552. Art. A64.
39. Bradley J. A letter to the right honourable George Earl of macclesfield concerning an apparent motion observed in some of the fixed stars // Philos. Trans. R. Soc. Lon. 1748. Vol. 45. P. 1–43.
40. Herschel W. On the proper motion of the Sun and Solar system. With an account of several changes that have happened among the fixed stars since the time of Mr. Flamstead // Philos. Trans. R. Soc. Lon. 1783. Vol. 73. P. 736–738.
41. Hoskin M. The construction of the heavens. William Herschel’s cosmology. Cambridge : Cambridge university press. 2012. 214 p.
42. Ryan T. C. The Solar apex // Popular astronomy. 1907. Vol. 15. P. 205–210.

43. Macpherson H. C. A century's progress in astronomy. Edinburgh : W. Blackwood and sons. 1906. 246 p.
44. Argelander F. W. A. Extract of a letter relative to his account of the motion of the solar system // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1837. Vol. 4. P. 82.
45. Airy G. B. On the movement of the solar system in space // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1859. Vol. 19. P. 175–180.
46. Airy G. B. On the movement of the solar system in space // Mem. R. Astron. Soc. 1860. Vol. 28. P. 143–171.
47. Ковальский М. А. Sur les lois du mouvement propre des étoiles du catalogue de Bradley // Учёные записки, издаваемые императорским Казанским университетом. 1860. Т. 1. С. 47–136.
48. Ковальский М. А. Избранные работы по астрономии. М.-Л. : Гос. изд-во технико-теоретич. литературы. 1951. 216 с.
49. Campbell W. W. A preliminary determination of the motion of the Solar system // Publ. Astron. Soc. Pac. 1901. Vol. 13, No. 78. P. 51–60.
50. Walkey O. R. An abstract on the solar apex // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1946. Vol. 106. P. 274–279.
51. Vyssotsky A. N., Williams E. T. R. The variation of the solar motion with spectral class // Publications of the Leander McCormick Observatory. 1948. Vol. 10. P. 41–47.
52. Boss L. Precession and solar motion. Third paper. Relation of systematic motions to spectral types // Astron. J. 1911. Vol. 26. P. 187–201.
53. Boss L. Systematic motion of stars of type G // Astron. J. 1913. Vol. 28. P. 12–15.
54. Boss L. Dependence of solar motion upon spectral type // Astron. J. 1914. Vol. 28. P. 163–167.
55. Boss L. Preliminary General Catalogue of 6188 stars for the epoch 1900. Washington, D. C. : Carnegie institution of Washington. 1910. 392 p.

56. Perrine C. D. On some peculiarities of the residual velocities of stars of different spectral classes and their relation to the solar motion // *Astrophys. J.* 1915. Vol. 42. P. 305–311.
57. Campbell W. W. On the motions of the brighter class B stars // *Lick Obs. Publ.* 1911. Vol. 6, No. 195. P. 101–124.
58. Campbell W. W. Preliminary radial velocities of 212 brighter class A stars // *Lick Obs. Publ.* 1912. Vol. 7, No. 211. P. 19–29.
59. Campbell W. W. The radial velocities of 915 stars // *Lick Obs. Publ.* 1913. Vol. 7, No. 229. P. 113–128.
60. Adams W. S., Kohlschütter A. The radial velocities of one hundred stars with measured parallaxes // *Astrophys. J.* 1914. Vol. 39. P. 341–249.
61. Boss B. Systematic corrections to and weight of stellar parallax // *Popular Astronomy.* 1918. Vol. 26. P. 686.
62. Adams W. S., Joy A. H. The motions in space of some stars of high radial velocity // *Astrophys. J.* 1919. Vol. 49. P. 179–185.
63. Strömberg G. The distribution of the velocities of stars of spectral types F to M // *Astrophys. J.* 1922. Vol. 56. P. 265–294.
64. Boss B. On the real motions of the stars (Paper 3) // *Astrophys. J.* 1923. Vol. 35. P. 26–34.
65. Strömberg G. The asymmetry in stellar motions and the existence of a velocity-restrictions in space // *Astrophys. J.* 1924. Vol. 59. P. 228–251.
66. Strömberg G. The asymmetry in stellar motions as determined from radial velocities // *Astrophys. J.* 1925. Vol. 61. P. 363–288.
67. Lindblad B. Star-streaming and the structure of the stellar system // *Arkiv. mat. astron. fysik.* 1925. Vol. 19A, No. 21. P. 1–8.
68. Eddington A. S. The systematic motions of the stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1906. Vol. 67. P. 34–63.

69. Jeans J. H. The motions of the stars in a Kapteyn-universe // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1922. Vol. 82. P. 122–132.
70. Lindblad B. On the cause of star-streaming // Astrophys. J. 1925. Vol. 62. P. 191–197.
71. Паренаго П. П. Исследование пространственных скоростей звёзд // Астрон. ж. 1950. Т. 27, № 3. С. 150–167.
72. Dehnen W., Binney J. J. Local stellar kinematics from Hipparcos data // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1998. Vol. 298, No. 2. P. 387–394.
73. Delhaye J. Die Bewegungen der Sterne ihre Bedeutung in der galaktischen Astronomie // Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft. 1982. Vol. 57. P. 123–133.
74. Rancken F. Ueber die Eigenbewegungen der Fixsterne // Astron. Nach. 1883. Vol. 104. P. 149–156.
75. Bolte F. G. Untersuchungen über die Präcessionsconstante auf grund der sterncataloge von Lalande und Schjellerup. // Bonn : Universitätsbuchdruckerei von C. Georg, 1883. 253 p.
76. Lalande J., Lindhagen G. Über die Genauigkeit der Sternörter in Lalande's Catalog, von Dr. Lindhagen // Astron. Nach. 1848. Vol. 28, No. 9. P. 129–138.
77. Schjellerup F. C. Zweiter Catalog der rothen, isolirten Sterne, vervollstaendigt und fortgefuehrt bis zum Schluss des Jahres 1874 // Vierteljahresschrift der Astr. Ges. 1874. Vol. 9, No. 4. P. 252–287.
78. Struve L. Bestimmung der Constante der Pracection und der Eigenen Bewegung des Sonnesystems // Mémoires de l'Académie Impérisale des sciences de St.-Pétersbourg, VIIe série. 1887. Vol. 25, No. 3. P. 1–34.
79. Høg E., Fabricius C., Makarov V. V., Urban S., Corbin T., Wycoff G., Bastian U., Schwekendiek P., Wicenec A. The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars // Astron. Astrophys. 2000. Vol. 355. P. L27–L30.

80. Lindblad B. Cosmogonic consequences of a theory of the stellar system // Arkiv for Matematik, Astronomi och Fysik. 1926. Vol. 19A, No. 35. P. 1–15.
81. 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, No. 120. P. 275–282.
82. Куликовский П. Г. Звездная астрономия. Москва, 1985. 272 с.
83. Огородников К. Ф. О динамике звездных движений в галактической системе на основе теории потоков // Астрон. ж. 1932. Vol. 4. P. 180–195.
84. Milne E. A. Stellar kinematics and the K-effect // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1935. Vol. 95. P. 560–573.
85. Stokes G. G. On theories of the internal friction of fluids in motion of the equilibrium and motion of elastic bodies // Transactions of the Cambridge Philosophical Society. 1845. Vol. 8. P.287–319.
86. Edmondson F. K. Stellar kinematics and mean parallaxes // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1937. Vol. 97. P. 473–485.
87. Огородников К. Ф. Динамика звездных систем. М : Физматлит, 1958. 616 с.
88. Arfken G. B., Weber H. J. Mathematical methods for physicists. Amsterdam : Elsevier Academic Press, 2005. 1182 с.
89. Brosche P. Programs for the Determination of Systematic Differences and Application to W3₅₀ – FK4. Heidelberg : Veröffentlichungen Astronomisches Rechen-Institut, 1966. 16 p.
90. Brosche P. Representation of Systematic Differences in Positions and Proper Motions of Stars by Spherical Harmonics. Heidelberg : Veröffentlichungen Astronomisches Rechen-Institut, 1970. 27 p.
91. Mignard F., Morando B. Analyse de catalogues stellaires au moyen des harmoniques vectorielles // Journées 1990: Systèmes de référence spatio-temporels. 1990. P. 151–158.

92. Mignard F., Klioner S. Analysis of astrometric catalogues with vector spherical harmonics // *Astron. Astrophys.* 2012. Vol. 547. Art. A59.
93. Vityazev V. V., Shuksto A. K. Stellar Kinematics by Vectorial Harmonics // *Order and chaos in stellar and planetary systems ASP conference series.* 2004. Vol. 316. P. 230–233.
94. Витязев В. В., Шуксто А. К. Применение векторных сферических функций для анализа собственных движений звезд // *Вестн. СПб.* 2005. Т. 1, № 1. С. 116–124.
95. Makarov V. V., Murphy D. W. The Local Stellar Velocity Field via Vector Spherical Harmonics // *Astron. J.* 2007. Vol. 134, No. 1. P. 367–375.
96. Vityazev V. V., Tsvetkov A. S. Analysis of the three-dimensional stellar velocity field using vector spherical functions // *Astron. Lett.* 2009. Vol. 35, No. 2. P. 100–113.
97. Vityazev V. V., Tsvetkov A. S. Distortion of the stellar velocity field parameters due to systematic variations of parallaxes over the celestial sphere // *Astron. Lett.* 2014. Vol. 40, No. 1. P. 46–58.
98. Vityazev V. V., Tsvetkov A. S. UCAC4: Stellar kinematics with vector spherical functions // *Astron. Nachr.* 2013. Vol. 334, No. 8. P. 760–768.
99. Majewski S. R. Precision astrometry, galactic mergers, halo substructure and local dark matter // *Proceedings of the IAU.* 2008. Vol. 248. P. 450–457.
100. Mihalas D., Binney J. *Galactic astronomy: structure and kinematics.* San Francisco : Freeman, 1981. 591 p.
101. Cox A. N. *Allen's astrophysical quantities*, 4th edition. Los Alamos : Springer, 1999. 719 p.
102. Francis C., Anderson E. The local standard of rest and the well in the velocity distribution // *Celestial mechanics and dynamical astronomy.* 2014. Vol. 118, No. 4 P. 399–413.
103. Delhaye J. *Solar motion and velocity distribution of common stars. Galactic structure.* Chicago : University of Chicago Press, 1965. P. 61–84

104. Бобылев В. В., Байкова А. Т. Исследование поля скоростей F- и G-карликов околосолнечной окрестности в зависимости от возраста // Астрон. ж. 2007. Т. 84, № 5. С. 418–428.
105. Coşkunoğlu B., Ak S., Bilir S., Karaali S., Yaz E., Gilmore G., Seabroke G. M., Bienaymé O., Bland-Hawthorn J., Campbell R., Freeman G. M., Gibson B., Grebel E. K., Munari U., Navarro J. F., Parker Q. A., Siebert A., Siviero A., Steinmetz M., Watson F. G., Wyse R. F. G., Zwitter T. Local stellar kinematics from RAVE data - I. Local standard of rest // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2011. Vol. 412. P. 1237–1245.
106. Golubov O., Just A., Bienaymé O., Bland-Hawthorn J., Gibson B. K., Grebel E. K., Munari U., Navarro J. F., Parker Q., Seabroke G., Reid W., Siviero A., Steinmetz M., Williams M., Watson F., Zwitter T. The asymmetric drift, the local standard of rest, and implications from RAVE data // Astron. Astrophys. 2013. Vol. 557. Art. A29.
107. Schönrich R., Binney J., Dehnen W. Local kinematics and the local standard of rest // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2010. Vol. 403, No. 4. P. 1829–1833.
108. Ding P.-J., Zhu Z., Liu J. -C. Local standard of rest based on Gaia DR2 catalog // Reserch Astron. Astrophys. 2019. Vol. 19, No. 5. Art. 68.
109. Bobylev V. V., Bajkova A. T. Galactic parameters from masers with trigonometric parallaxes // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2010. Vol. 408, No. 3. P. 1788–1795.
110. Bobylev V. V., Bajkova A. T. Kinematics of the Galaxy from OB stars with proper moions from the Gaia DR1 catalogue // Astron. Lett. 2017. Vol. 43, No. 3. P. 159–166.
111. Nordström B., Mayor M., Andersen J., Holmberg J., Pont F., Jørgensen B. R., Olsen E. H., Udry S., Mowlavi N. The Geneva-Copenhagen survey of the Solar neighborhood. Ages, metallicities, and kinematic properties of ~14000 F and G dwarfs // Astron. Astrophys. 2004. Vol. 418. P. 989–1019.

112. Aumer M., Binney J. J. Kinematics and history of the solar neighborhood revisited // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2009. Vol. 397. P. 1286–1301.
113. Reid M. J., Menten K. M., Zheng X. W., Brunthaler A., Moscadelli L., Xu Y., Zhang B., Satol M., Honma M., Hirota T., Hachisuka K., Choi Y. K., Moellenbrock G. A., Bartkiewicz A. Trigonometric parallaxes of massive star-forming regions. VI. Galactic structure, fundamental parameters, and noncircular motions // *Astrophys. J.* 2009. Vol. 700. P. 137–148.
114. Huang Y., Liu X. -W., Yuan H. -B., Xiang M. -S., Huo Z. -Y., Chen B. -Q., Zhang Y., Hou Y. -H. Determination of the local standard of rest using the LSS-GAO DR1 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2015. Vol. 449. P. 162–174.
115. Bovy J., Prieto C. A., Beers T. C., Bizyaev D., da Costa L. N., Cunha K., Ebelke G. L., Eisenstein D. J., Frinchaboy P. M., García Pérez A. E., Girardi L., Harty F. R., Hogg D. W., Holtzman J., Maia M. A. G., Majewski S. R., Malanushenko E., Malanushenko V., Mészáros S., Nidever D. L., O’Connell R. W., O’Donnell C., Oravetz A., Pan K., Rocha-Pinto H. J., Schiavon R. P., Schneider D. P., Schultheis M., Skrutskie M., Smith V. V., Weinberg D. H., Wilson J. C., Zasowski G. The Milky Way’s circular-velocity curve between 4 and 14 kpc from apogee data // *Astrophys. J.* 2012. Vol. 759. Art. 131.
116. Shapley H. Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters. VII. The distances, distribution in space, and dimensions of 69 globular clusters // *Astrophys. J.* 1918. Vol. 48. P. 154–182.
117. Reid M. J. The distance to the center of the Galaxy // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1993. Vol. 31. P. 345–372.
118. Genzel R., Eisenhauer F., Gillessen S. The galactic center massive black hole and nuclear star cluster // *Rev. Mod. Phys.* 2010. Vol. 82. P. 3121–3195.
119. Kerr F. J., Lynden-Bell D. Review of galactic constants // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1986. Vol. 221. P. 1023–1038.

120. Gillessen S., Eisenhauer F., Fritz T. K., Pfuhl O., Ott T., Genzel R. The distance to the galactic center // Proceedings of the IAU. 2013. Vol. 289. P. 29–35.
121. Malkin Z. Statistical analysis of the determinations of the Sun’s galactocentric distance // Proceedings of the IAU. 2013. Vol. 289. P. 406–409.
122. Vallee J. P. Recent advances in the determination of some Galactic constants in the Milky Way // Astrophys. Space Sci. 2017. Vol. 362. Art. 79.
123. Oort J. H. The stars of high velocity. Publications of the Kapteyn Astronomical Laboratory Groningen. Vol. 40. Groningen : Hoitsema brothers, 1926. 83 p.
124. Gilmore G., Reid N. New light on faint stars - III. Galactic structure towards the South Pole and the Galactic disk // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1983. Vol. 202. P. 1025–1047.
125. Schneider P. Extragalactic astronomy and cosmology. An introduction. Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. 459 p.
126. Padmanabhan T. Galaxies and cosmology. Theoretical astrophysics. Vol. 3. Cambridge : Cambridge Univ. Press., 2002. 640 p.
127. Carollo D., Chiba M., Ishigak M., Freeman K., Beers T. C., Lee Y. S., Tissera P., Battistini C., Primas F. Evidence for the third stellar population in the Milky Way’s disk // Astrophys. J. 2019. Vol. 887. Art. 22.
128. Buser R. The formation of the Milky Way Galaxy // Science. 2000. Vol. 287. P. 69–74.
129. Adibekyan V. Zh., Sousa S. G., Santos N. C., Mena E. D., Hernández J. I. G., Israelian G., Mayor M., Khachatryan G. Chemical abundances of 1111 FGK stars from the HARPS GTO planet search program. Galactic stellar populations and planets // Astron. Astrophys. 2012. Vol. 545. Art. 32.
130. Poleski R. Transformation of the equatorial proper motion to the galactic system // arXiv: 1306.2945v3. 2018.

131. Бобылев В. В. Кинематический анализ местной системы звёзд: дис. на здобуття наукового ступеня доктора фіз.-мат. наук : 01.03.01 – Астрометрія і небесна механіка, Санкт-Петербург, 2004. 272 с.
132. Miyamoto M., Soma M. Is the Vorticity Vector of the Galaxy Perpendicular to the Galactic Plane? I. Precessional Correction and Equinoctial Motion Correction to the FK5 System // *Astron. J.* 1993. Vol. 105, No. 2. P. 691–701.
133. Miyamoto M., Zhu Z. Galactic Interior Motions Derived from HIPPARCOS Proper Motions. I. Young Disk Population // *Astron. J.* 1998. Vol. 115, No. 4. P. 1483–1491.
134. Vityazev V. V., Popov A. V., Tsvetkov A. S., Petrov S. D., Trofimov D. A., Kiyaev V. I. Kinematics of stars from the TGAS (Gaia DR1) catalogue // *Astron. Lett.* 2018. Vol. 44. P. 236–247.
135. Gorski K. M., Hivon E., Banday A. J., Wandelt B. D., Hansen F. K., Reinecke M., Bartelmann M. HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere // *Astron. J.* 2005. Vol. 622, No. 2. P. 759–771.
136. Vityazev V. V. Tsvetkov A. S. Application of vector spherical harmonics for kinematic analysis of stars from zonal catalogues // *Astron. Lett.* 2011. Vol. 37. P. 874–887.
137. Vityazev V. V. Tsvetkov A. S. Kinematics of stars in the northern and southern galactic hemispheres // *Astron. Lett.* 2012. Vol. 38. P. 411–427.
138. Velichko A. B., Akhmetov V. S., Fedorov P. N. Kinematics of our Galaxy from the PMA and TGAS catalogues // *Proceedings of the IAU.* 2018. Vol. 330. P. 100–103.
139. Velichko A. B., Fedorov P. N. Kinematics of the Milky Way from velocities of young red clump giants using the PMA and Gaia DR2 data // *Odessa Astr. Publ.* 2018. Vol. 31. P. 123–127.

140. Velichko A. B., Fedorov P. N., Akhmetov V. S. Kinematics of main-sequence stars from the Gaia DR2 and PMA proper motions // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2020. Vol. 494. P. 1430–1447.
141. Lindegren L., Hernández J., Bombrun A., Klioner S., et. al. Gaia data release 2. The astrometric solution // Astron. Astrophys. 2018. Vol. 616. Art. A2.
142. Gaia collaboration. The Gaia mission // Astron. Astrophys. 2016. Vol. 595. Art. A1.
143. Gaia collaboration. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties // Astron. Astrophys. 2016. Vol. 595. Art. A2.
144. Kovalevsky J., Lindegren L., Perryman M. A. C., Hemenway P. D., Johnston K. J., Kislyuk V. S., Lestrade J. F., Morrison L. V., Platais I., Röser S., Schilbach E., Tucholke H.-J., de Vegt C., Vondrák J., Arias F., Gontier A. M., Arenou F., Brosche P., Florkowski D. R., Garrington S. T., Preston R. A., Ron C., Rybka S. P., Scholz R. -D., Zacharias N. The HIPPARCOS catalogue as a realization of the extragalactic reference system // Astron. Astrophys. 1997. Vol. 323. P. 620–633.
145. Gaia collaboration. Gaia Data Release 2. The celestial reference frame (Gaia-CRF2) // Astron. Astrophys. 2018. Vol. 616. Art. A14.
146. Michalik D., Lindegren L., Hobbs D. The Tycho-Gaia astrometric solution . How to get 2.5 million parallaxes with less than one year of Gaia data // Astron. Astrophys. 2015. Vol. 574. Art. A115.
147. Sartoretti P., Katz D., Cropper P., Panuzzo P. et al. Gaia Data Release 2. Processing the spectroscopic data // Astron. Astrophys. 2018. Vol. 616. Art. A6.
148. Katz D., Sartoretti P., Cropper M., Panuzzo P. Gaia Data Release 2. Properties and validation of the radial velocities // Astron. Astrophys. 2019. Vol. 622. Art. A205.

149. Fedorov P. N., Akhmetov V. S., Velichko A. B. Testing stellar proper motions of TGAS stars using data from the HSOY, UCAC5 and PMA catalogues // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2018. Vol. 476. P. 2743–2750.
150. Lindegren L., Lammers U., Bastian U., Hernández J. et al. Gaia data release 1. Astrometry: one billion positions, two million proper motions and parallaxes // Astron. Astrophys. 2016. Vol. 595. Art. A4.
151. Jao, W. -C., Henry T. J., Riedel A. R. Distance-dependent Offsets between Parallaxes for Nearby Stars and Gaia DR1 Parallaxes // Astrophys. J. Let. 2016. Vol. 832. Art. L18.
152. Stassun S. K., Torres G. Eclipsing Binaries as Benchmarks for Trigonometric Parallaxes in the Gaia Era // Astron. J. 2016. Vol. 152, No. 6. Art. L6.
153. De Ridder J., Molenberghs G., Eyer L., Aerts C. Asteroseismic versus Gaia distances: A first comparison // Astron. Astrophys. 2016. Vol. 595. Art. L3.
154. Schönrich R., Aumer M. Assessing distances and consistency of kinematics in *Gaia*/TGAS // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2017. Vol. 472. P. 3979–3998.
155. McMillan P. J., Kordopatis G., Kunder A., Binney J., Wojno J., Zwitter T., Steinmetz M., Bland-Hawthorn J., Gibson B. K., Gilmore G., Grebe E. K., Helmi A., Munari U., Navarro J. F., Parker Q. A., Seabroke G., Watson F., Wyse R. F. G. Improved distances and ages for stars common to TGAS and RAVE // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2018. Vol. 477, No. 4. P. 5279–5300.
156. Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R., Weinberg M. D., Schneider S., Carpenter J. M., Beichman C., Capps R., Chester T., Elias J., Huchra J., Liebert J., Lonsdale C., Monet D. G., Price S., Seitzer P., Jarrett T., Kirkpatrick J. D., Gizis J. E., Howard E., Evans T., Fowler J., Fullmer L., Hurt R., Light R., Kopan E. L., Marsh K. A., McCallon H. L., Tam R., Van Dyk S., Wheelock S. The two micron all sky survey (2MASS) // Astron. J. 2017. Vol. 131. P. 1163–1183.
157. Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S. The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction // Astrophys. J. 1989. Vol. 345, No. 1. P. 245–256.

158. Gontcharov G. A. 3D stellar reddening map from 2MASS photometry: An improved version // *Astron. Lett.* 2017. Vol. 43, No. 7. P. 472–488.
159. Lallement R., Babusiaux C., Vergely J. L., Katz D., Arenou F., Valette B., Hottier C., Capitanio L. Gaia-2MASS 3D maps of galactic interstellar dust within 3 kpc // *Astron. Astrophys.* 2019. Vol. 625. Art. 135.
160. Rieke G. H., Lebofsky M. J. The interstellar extinction law from 1 to 13 microns // *Astrophys. J.* 1985. Vol. 288. P. 618–621.
161. Girardi L., Groenewegen M. A. T., Achim W., Maurizio S. Fine structure of the red giant clump from Hipparcos data, and distance determinations based on its mean magnitude // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1998. Vol. 301. P. 149–160.
162. Girardi L. A secondary clump of red giant stars: why and where // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1999. Vol. 308. P. 818–832.
163. Гончаров Г. А. Пространственное распределение звезд, их кинематика и межзвездное поглощение в ближайшем килопарсеке: дис. на здобуття наукового ступеня доктора фіз.-мат. наук : 01.03.02 – Астрофізика і зоряна астрономія, Санкт-Петербург, 2012. 385 с.
164. Woosley S. E., Heger A., Weaver T. A. The evolution and explosion of massive stars // *Rev. Mod. Phys.* 2002. Vol. 74. P. 1015–1071.
165. Karakas A., Lattanzio J. C. Stellar models and yields of asymptotic giant branch stars // *Pub. Astr. Soc. Austr.* 2007. Vol. 24, No. 3. P. 103–117.
166. Gontcharov G. A. Dependence of kinematics on the age of stars in the solar neighborhood // *Astron. Lett.* 2012. Vol. 38, No. 12. P. 771–782.
167. Bovy J. Galactic rotation in Gaia DR1 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2017. Vol. 468, No. 1. P. 63–67.
168. Williams A. A., Belokurov V., Casey A. R., Evans N. W. On the run: mapping the escape speed across the Galaxy with SDSS // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2017. Vol. 468, No. 2. P. 2359–2371.

169. Паренаго П. П. Динамика звёздных систем. Москва, 1954. 458 с.
170. Poggio E., Drimmel R., Lattanzi M. G., Smart R. L. et al. The Galactic warp revealed by Gaia DR2 kinematics // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2018. Vol. 481, No. 1. P. L21–L25.
171. Chengdong L., Zhao G., Jia Y., Liao S., Yang C., Wang Q. Flare and warp of galactic disk with OB stars from Gaia DR2 // *Astrophys. J.* 2019. Vol. 871. Art. 2.
172. Chen X., Wang S., Deng L., de Grijs R., Liu C., Tian H. An intuitive 3D map of the Galactic warp's precession traced by classical Cepheids // *Nature Astronomy.* 2019. Vol. 3. P. 320–325.
173. Soubiran C. Kinematics of the Galaxy's stellar populations from a proper motion survey // *Astron. Astrophys.* 1993. Vol. 274. P. 181–188.
174. Haywood M. The structure and formation of the Milky Way disks // *Mem. S. A. It. Suppl.* 2013. Vol. 25. P. 11–16.
175. Jurić M., Ivezić Ž., Brooks A., Lupton R. H., Schlegel D., Finkbeiner D., Padmanabhan N., Bond N., Sesar B., Rockosi C. M., Knapp G. R., Gunn J. E., Sumi T., Schneider D. P., Barentine J. C., Brewington H. J., Brinkmann J., Fukugita M., Harvanek M., Kleinman S. J., Krzesinski J., Long D., Neilsen E. H., Nitta A., Snedden S. A., York D. G. The Milky Way tomography with SDSS. I. Stellar number density distribution // *Astrophys. J.* 2008. Vol. 673, No. 2. P. 864–914.
176. Chang C. -K., Ko C. -M., Peng T. -H. Information on the Milky Way from the two micron all sky survey whole sky star count: the structure parameters // *Astrophys. J.* 2011. Vol. 740. Art. 34.
177. van Vledder I., van der Vlugt D., Holwerda B. W. The size and shape of the Milky Way disc and halo from M-type brown dwarfs in the BoRG survey // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2016. Vol. 458. P. 425–437.
178. Мишенина Т. В. Галактика, ее строение и обогащение химическими элементами. Одесса : Астропринт, 2017. 168 с.

179. Bensby T., Feltzing S., Landström I. Elemental abundance trends in the Galactic thin and thick disks as traced by nearby F and G dwarf stars // Astron. Astrophys. 2003. Vol. 410. P. 527–551.
180. Mashonkina L. I., Vinogradova A. B., Ptitsyn D. A., Khokhlova V. S., Chernetsova T. A. Neutron-capture elements in halo, thick-disk, and thin-disk stars. Strontium, yttrium, zirconium, cerium // Astron. Rep. 2007. Vol. 51, No. 11. P. 903–919.
181. Hanson R. B. Lick Northern Proper Motion Program: Solar Motion vs. Distance from the Galactic Plane // Bull. Amer. Astron. Soc. 1989. Vol. 21. P. 1107.
182. Spagna A., Lattanzi M. G., Lasker B. M., McLean B. J., Massone G., Lanteri L. Galactic structure along the main meridional section of the Galaxy. I. The North Galactic Pole (N321) field // Astron. Astrophys. 1996. Vol. 311. P. 758–777.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Публікація у науковому фаховому виданні України

1. **Velichko A. B.**, Fedorov P. N. Kinematics of the Milky Way from velocities of young red clump giants using the PMA and Gaia DR2 data // Odessa Astron. Publ. 2018. Vol. 31. P. 123–127.

DOI: <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2018.31.144742>

(Особистий внесок здобувача: самостійно поставила задачу, з використанням власного програмного забезпечення виконала розрахунки кінематичних параметрів моделі $O-M$ для молодих гігантів червоного згущення за власними рухами зірок Gaia DR2 і PMA, а також за променевими швидкостями Gaia DR2. Автор брала участь в обговоренні отриманих результатів, їх фізичній інтерпретації, підготувала текст статті.)

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

2. Akhmetov V. S., Fedorov P. N., **Velichko A. B.**, Shulga V. M. The PMA Catalogue: 420 million positions and absolute proper motions // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2017. Vol. 469, Iss. 1. P. 763–773. (Scopus).

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85036516892&origin=resultslist>

(Особистий внесок здобувача: приймала участь в постановці, обговоренні та вирішенні поставленої задачі, проводила дослідження рівняння блиску в каталозі PMA, створила програмне забезпечення для візуалізації отриманих результатів.)

3. Fedorov P. N., Akhmetov V. S., **Velichko A. B.** Testing stellar proper motions of TGAS stars using data from the HSOY, UCAC5 and PMA catalogues // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2018. Vol. 476, Iss. 2. P. 2743–2750. (Scopus).

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85048532582&origin=resultslist>

(Особистий внесок здобувача: приймала участь в обробці даних за допомогою власного програмного забезпечення, порівнянні систем власних рухів каталогів TGAS, HSOY, UCAC5 і PMA, приймала участь в обговоренні результатів, їх фізичній інтерпретації та приймала участь в написанні тексту статті.)

4. **Velichko A. B.**, Fedorov P. N., Akhmetov V. S. Kinematics of main sequence stars from the Gaia DR2 and PMA proper motions // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2020. Vol. 494, Iss. 1. P. 1430–1447. (Scopus).

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85085394243&origin=resultslist>

(Особистий внесок здобувача: поставила задачу, створила програмне забезпечення для застосування метода ЗВСФ, та з використанням нього за власними рухами зірок Gaia DR2 і PMA виконала розрахунки кінематичних параметрів моделі $O-M$ і коефіцієнтів розкладання за ВСФ і ЗВСФ для зірок головної послідовності; виконала моделювання поля швидкостей зірок з використанням власного програмного забезпечення. Автор брала участь в обговоренні результатів, їх фізичній інтерпретації, підготувала текст статті.)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Akhmetov V. S., Fedorov P. N., **Velichko A. B.** The PMA catalogue. astrometric and multiband photometric data for more than 400 millions objects // KOLOS 2016 : International meeting on variable stars research, December 1–3 2016. : abstr. Stakčín, Slovakia, 2016. P. 1.

(Особистий внесок здобувача: дослідження рівняння блиску в каталогах PMA і UCAC5.)

6. **Velichko A.B.**, Akhmetov V. S., Fedorov P. N. Kinematics of our Galaxy from the PMA and TGAS catalogues // Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology, cosmomicrophysics, astroparticle physics, radioastronomy and astrobiology : 17th Gamow Conference-school, August 12–20 2017. : abstr. Odesa, 2017. P. 23.

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, отримання та аналіз кінематичних параметрів).

7. **Velichko A. B.**, Akhmetov V. S., Fedorov P. N. Kinematics of our Galaxy from the PMA and TGAS catalogues // Astrometry and Astrophysics in the Gaia sky : International Astronomical Union Symposium 330, April 24–28 2017. : abstr. Nice, France, 2017. P. 39.

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, отримання та аналіз кінематичних параметрів.)

8. Akhmetov V. S., Fedorov P. N., **Velichko A. B.** The PMA catalogue as a realization of the extragalactic reference system in optical and near infrared wavelegths // Astrometry and Astrophysics in the Gaia sky : International Astronomical Union Symposium 330, April 24–28 2017. : abstr. Nice, France, 2017. P. 1. *(Особистий внесок здобувача: візуалізація результатів.)*

9. **Velichko A. B.**, Akhmetov V. S., Fedorov P. N. Kinematics of our Galaxy from the PMA and TGAS catalogues // Астрономія та фізика космосу в Київському університеті : міжнародна конференція, 23–26 травня 2017 р. : Київ, 2017. С. 86.

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, отримання та аналіз кінематичних параметрів.)

10. **Velichko A. B.** Kinematics of our Galaxy from stellar proper motions of modern catalogues // KOLOS 2017 : International meeting on variable stars research, November 30–December 2 2017. : abstr. Stakčín, Slovakia, 2017. P. 21.

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, отримання та аналіз кінематичних параметрів.)

11. **Velichko A. B.**, Akhmetov V. S., Fedorov P. N. Kinematics of our Galaxy from the PMA and TGAS catalogues // Astrometry and Astrophysics in the Gaia sky : Proceedings of the International Astronomical Union Symposium 330, April 24–28 2017, Nice, France, 2018. P. 100–103. (Scopus).

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85044975115&origin=resultslist>

(Особистий внесок здобувача: створила програмне забезпечення для застосування методу розкладання поля швидкостей зірок за ВСФ, що дозволило отримати кінематичні параметри за власними рухами зірок з каталогів PMA і TGAS. Автор брала участь в обговоренні результатів, їх фізичній інтерпретації та підготувала основну частину тексту статті.)

- 11a. Akhmetov V. S., Fedorov P. N., **Velichko A. B.** The PMA Catalogue as a realization of the extragalactic reference system in optical and near infrared wavelengths // Astrometry and Astrophysics in the Gaia sky : Proceedings of the International Astronomical Union Symposium 330, April 24–28 2017, Nice, France, 2018. P. 81–82. (Scopus).

URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85044990810&origin=resultslist>

(Особистий внесок здобувача: приймала участь в постановці, обговоренні та вирішенні поставленої задачі, створила програмне забезпечення для візуалізації отриманих результатів.)

12. **Величко Г. Б.** Кінематика нашої Галактики за даними сучасних каталогів // XIII Барабашовські обласні наукові читання з астрономії учнів та студентів : конференція 14 квітня 2018 р. : тези доп. Харків, 2018. С. 4.

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, отримання та аналіз кінематичних параметрів.)

13. **Velichko A. B.**, Fedorov P. N. Kinematics of the Milky Way from velocities of young red clump giants using the PMA and Gaia DR2 data // Astronomy

and beyond: astrophysics, cosmology, cosmomicrophysics, astroparticle physics, radioastronomy and astrobiology : 18th Odessa international astronomical Gamow Conference–school, August 12–18 2018. : abstr. Odesa, 2018. P. 25.

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, відбір молодих ЧГ, отримання та аналіз кінематичних параметрів.)

14. **Velichko A. B.**, Fedorov P. N. 3D kinematics of the Galactic thin disc stars from the Gaia DR2 and PMA data // XXXth General Assembly of the International Astronomical Union : International conference, August 20–31 2018. : abstr. Vienna, Austria, 2018.

URL: <https://astronomy2018.univie.ac.at/posterabstracts/all-posterabstracts-sorted>

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, відбір зірок тонкого диску Галактики, отримання та аналіз кінематичних параметрів.)

15. **Velichko A. B.**, Fedorov P. N. Kinematics of main sequence stars from the Gaia DR2 and PMA proper motions // New Trends in Astrophysics, Cosmology and Radioastronomy after Gamow : 6th Gamow International Conference in Odessa : Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Radioastronomy and Astrobiology : 19th Gamow Summer School, August 11–18 2019. : abstr. Odesa, 2019. P. 23.

(Особистий внесок здобувача: розробка програмного забезпечення, відбір зірок ГП, отримання та аналіз кінематичних параметрів, моделювання поля швидкостей зірок.)