

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 окремі 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 O–M, тоді як природа інших коефіцієнтів залишається неясною. Тому одним із важливих завдань є визначення фізичного сенсу значущих позамоделних коефіцієнтів. У ряді досліджень було показано, що в полі швидкостей зірок, крім модельних параметрів, присутні позамоделні 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 O–M, 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 O–M, 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 O–M 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 O–M 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 O–M, 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 O–M 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 O–M і коефіцієнтів розкладання за ВСФ та ЗВСФ, а також вертикального градієнта, що виведений за власними рухами зірок *Gaia* DR2 і PMA. 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 PMA 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 $\approx 20 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ при $0.3^{\text{m}} \leq (J - K_S)_0 < 0.4^{\text{m}}$ і далі знаходиться приблизно на цьому 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 PMA. 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 $\approx 4.2 \text{ км с}^{-1}$. 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 $\partial V_{\text{tot}}/\partial z$, 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. – Qualifying scientific work, the 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 $r < 1.2$ 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 $0.0^m \leq (J - K_S)_0 < 0.4^m$, 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 ($r < 0.5$ 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 $r < 0.5$ 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 $\approx 20 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ 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.