

**Міністерство освіти та науки України**  
**Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна**  
**Фізичний факультет**  
**Кафедра астрономії та космічної інформатики**

“Допущено до захисту”  
Зав. кафедри астрономії та  
космічної інформатики  
проф. Юрій ШКУРАТОВ

14.06.2024.



Оцінка “\_відмінно\_”  
Голова ЕК  
проф. Віктор ТИШКОВЕЦЬ

21.06.2024 р.



Мотилько Валентина Олегівна

**Викривлення Галактичного диска за даними каталогу GAIA DR3**

Кваліфікаційна робота на здобуття  
освітньо-кваліфікаційного рівня  
“Бакалавр” спеціальність  
104 - “Фізика та астрономія”  
освітньо-професійна програма  
“Астрономія”



(підпис студента)

Науковий керівник:  
провідний науковий співробітник  
НДІ астрономії  
В. С. Ахметов



(підпис керівника)

**Харків 2024**

## Анотація

Мотилько В. О. Викривлення Галактичного диска за даними каталогу Gaia DR3. - Рукопис

Дипломна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня “Бакалавр” за спеціальністю 104 - “Фізика та астрономія”. - Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2024. - 55 с. та - Іл. 26

Дипломна робота присвячена виявленню викривлення Галактичного диска на основі каталогу Gaia DR3. Найперше було потрібно вибрати метод, що дасть змогу обчислити параметри викривлення. Такий алгоритм має спиратися на певну галактичну модель. На основі обраної моделі була складена система рівнянь із невідомими параметрами викривлення. Щоб її розв’язати, був реалізований метод Левенберга-Марквардта на мові програмування C/C++. Отримані параметри викривлення за моделлю вертикальної швидкості відповідають різним Галактичним ділянкам. Ці параметри викривлення найкраще збігаються з попередніми роботами інших дослідників на Галактичній ділянці  $R \in [10; 12]$ кпс,  $\phi \in [-30; 30]^\circ$ . Такий результат може свідчити про те, що використану модель вертикальної швидкості потрібно покращувати. Ненульова вертикальна швидкість є кінематична ознака викривлення. Тому додатково була проаналізована залежність вертикальної швидкості від Галактичної відстані та азимута. Через те, що опрацьовані об’єкти з каталогу Gaia DR3 не були відфільтровані за віком чи зоряною величиною, складно спростити чи підтвердити поширені гіпотези про зв’язок між віком зоряної популяції та викривленням.

Ключові слова: Галактика, Галактичний диск, Gaia DR3, метод Левенберга-Марквардта, Галактичне викривлення

## Abstract

Motylo V. O. Galactic disc warp according to the Gaia DR3 catalogue. - Manuscript

Diploma thesis for the degree of Bachelor, speciality 104 - Physics and Astronomy. - V. N. Karazin Kharkiv National University, 2024. - 55 p. ra - Ill. 26

This thesis is dedicated to the detection of the Galactic disc warp based on the Gaia DR3 catalogue. First of all, a method that would allow to calculate the warp parameters was chosen. Such an algorithm should be based on a certain galactic model. Based on the chosen model, a system of equations with unknown warp parameters was compiled. To solve it, the Levenberg-Marquardt method was implemented in the C/C++ programming language. The resulting warp parameters from the vertical velocity model correspond to different Galactic regions. These warp parameters are in the best agreement with the previous works of other researchers in the Galactic region  $R \in [10; 12] \text{ kpc}$ ,  $\phi \in [-30; 30]^\circ$ . This result may indicate that the used vertical velocity model needs to be improved. A non-zero vertical velocity is a kinematic sign of warp. Therefore, we additionally analysed the dependence of the vertical velocity on the Galactic distance and azimuth. Since the processed objects from the Gaia DR3 catalogue were not filtered by age or stellar magnitude, it is difficult to simplify or confirm the common hypotheses about the relationship between the age of the stellar population and the curvature.

Keywords: Galaxy, Galactic disc, Gaia DR3, Levenberg-Marquardt method, Galactic warp

## **Зміст**

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Вступ</b>                                                                   | <b>6</b>  |
| <b>Розділ 1. Огляд літератури</b>                                              | <b>8</b>  |
| <b>Розділ 2. Огляда Gaia</b>                                                   | <b>33</b> |
| <b>2.1. Космічна місія Gaia</b>                                                | <b>33</b> |
| <b>2.2. Каталог Gaia DR3</b>                                                   | <b>34</b> |
| <b>Розділ 3. Оброблення даних</b>                                              | <b>36</b> |
| <b>Розділ 4. Розв’язок нелінійних систем рівнянь</b>                           | <b>39</b> |
| <b>4.1. Метод Левенберга-Марквардта</b>                                        | <b>39</b> |
| <b>4.2. Програмування методу Левенберга-Марквардта</b>                         | <b>41</b> |
| <b>Розділ 5. Отримання параметрів Галактичного викривлення</b>                 | <b>43</b> |
| <b>5.1. Вибір моделі висоти та вертикального руху</b>                          | <b>43</b> |
| <b>5.2. Аналіз отриманих параметрів Галактичного викривлення</b>               | <b>43</b> |
| <b>5.3. Порівняння отриманих результатів із результатами інших дослідників</b> | <b>49</b> |
| <b>Висновок</b>                                                                | <b>51</b> |
| <b>Перелік використаних джерел</b>                                             | <b>53</b> |

## Умовні позначення

1. кпс — (англ. *kiloparsec*) кілопарсек
2. Муг — (англ. *megayear*) мегарік
3. Гуг — (англ. *gigayear*) гігарік
4. Gaia DR3 — (англ. *Gaia Data Release 3*) третій випуск даних Gaia
5. Gaia EDR3 — (англ. *Gaia Early Data Release 3*) ранній третій випуск даних Gaia
6. Gaia DR2 — (англ. *Gaia Data Release 2*) другий випуск даних Gaia
7. [PPMXL](#) — каталог положень, власних рухів, 2MASS- та оптичної фотометрії 900 мільйонів зір і галактик. Його мета — покрити небо до зоряної величини у фільтрі  $V = 20$ .
8. [2MASS](#) — (англ. *Two Micron All Sky Survey*) каталог, що містить астрономічний огляд усієї небесної сфери у трьох інфрачервоних діапазонах із довжиною хвилі приблизно 2 мікрометри.
9. НІ — нейтральний атомарний водень.
10. [WISE](#) — (англ. *Wide-field Infrared Survey Explorer*) каталог, що містить дані про небесні об'єкти на чотирьох інфрачервоних довжинах хвиль (3.4, 4.6, 12 та 22 мікрометри).
11. mas — (англ. *milliarcseconds*) міліарксекунди
12. OGLE — (англ. *Optical Gravitational Lensing Experiment*) польський астрономічний проєкт, що здійснює небесний огляд об'єктів із тривалою періодичністю.
13. [Hipparcos](#) — космічна астрометрична місія, що визначила положення більше ніж 100 000 зір з високою точністю (вони поміщені в каталог *Hipparcos*) та 1 000 000 зір з меншою точністю (вони поміщені в каталог *Tycho*).
14. mag — (англ. *magnitude*) міра яскравості об'єкта
15.  $\mu$ as — (англ. *microarcseconds*) мікроарксекунди

## Вступ

*Актуальність роботи.* Чумацький Шлях має складну структуру, проте завдяки розвитку спостережуваних технологій та появі широких оглядів стає можливо дослідити Галактичні компоненти, зокрема, Галактичний диск. Від середини минулого століття почали з'являтися дослідження про викривлення Галактичного диска. У їх великій частині йдеться про те, що диск починає викривлятися приблизно на відстані 10 кпс від центру Чумацького Шляху. Тому щоб працювати зі структурою Галактичного диска, потрібно мати точні відстані. Завдяки місії Gaia з'являються щоразу точніші та надійніші дані про Галактичні об'єкти. Доступні сьогодні каталоги дають змогу детальніше вивчити Галактичний диск і виявити його викривлення.

*Мета дослідження.* Мета цієї роботи — випробувати моделі Галактичного вертикального руху й виявити викривлення Галактичного диска, використовуючи каталог Gaia DR3.

*Об'єкт дослідження:* зорі в Галактиці та диск Чумацького Шляху.

*Предмет дослідження:* координати та швидкості зір, параметри Галактичного викривлення (амплітуда викривлення, відстань від Галактичного центру, де починається викривлення; азимут, де починається викривлення).

Щоб досягнути цілі, були виконані завдання:

1. Огляд та аналіз літератури: найперше був проведений аналіз літератури з питань Галактичного викривлення. Це дало змогу зрозуміти, що вже відомо вченим на дану тему, та які методи використовують, щоб виявити дискове викривлення.
2. Вибір моделі висоти, що дасть змогу отримати параметри викривлення.
3. Перед отриманням параметрів викривлення були перетворені дані Gaia DR3 зі сферичної до циліндричної системи координат.

4. Розрахунки параметрів Галактичного викривлення були проведені завдяки використанню мов програмування C/C++.
5. Щоб отримати точні параметри Галактичного викривлення, був використаний нелінійний метод найменших квадратів Левенберга-Марквардта.
6. Щоб перевірити надійність обраної моделі вертикального руху, були побудовані залежності квадрата різниці спостережуваної та обчисленої вертикальної швидкості від координат у прямокутній системі координат.
7. Порівняння отриманих даних: результати розрахунків були перевірені завдяки порівнянню їх із результатами, що отримали інші дослідники Галактичного викривлення.
8. Висновки: на основі отриманих результатів було виявлене несиметричне викривлення Галактичного диска, оцінена обрана модель Галактичного вертикального руху, проаналізовані чинники, що впливають на обчислені параметри.

*Наукова цінність отриманих результатів.* Найперше, отримані результати підтверджують те, що Галактичний диск викривлений. По-друге, вони дають змогу детальніше вивчити структуру Галактичного диска.

*Практична важливість отриманих результатів.* Отримані результати дають змогу розробити надійнішу модель Галактичного вертикального руху.

## Розділ 1. Огляд літератури

Орієнтація галактики відносно спостерігача впливає на можливість виявити викривлення. Якщо кут між галактикою і спостерігачем рівний  $90^\circ$  (галактика “на ребрі”), то деформований диск легко спостерігати. Але що менший цей кут, то можливість спостерігати викривлення падає. [1]

Уперше викривлення зоряного диска галактик виявили Van Der Kruit & Searle (1981) [2]. Щонайменше половина спостережуваних спіральних галактик викривлена (Sánchez-Saavedra, Battaner & Florido 1990 [3]; García-Ruiz, Sancisi & Kuijken 2002 [4]). Але через різні орієнтації галактик відносно спостерігача можна припустити, що більша частина галактик викривлена. Schwarzkopf & Dettmar (2001) [5] знайшли, що 93% галактик, що взаємодіють чи зливаються, викривлені. Також деформації мають різну форму: L-подібні, S-подібні, U-подібні. Вважають, що вона залежить від походження викривлення.

Тривалість викривлення складно визначити зі спостережень. Але за результатами симуляцій, деформації зберігаються від кількох мільйонів до кількох мільярдів років ([6], [7]). Це залежить від початкового чинника, що спричиняє викривлення.

Є багато запропонованих механізмів, що спричиняють Галактичне викривлення. Серед них акреція матерії на гало ([8], [9]) чи галактичний диск ([10], [11]), взаємодія між галактиками (зокрема, зі Стрільцем чи Магеллановими Хмарами) ([12], [13]), самочинне збудження викривлення чи інші внутрішні процеси в галактичному диску ([14], [15]), зсув внутрішнього зоряного диска відносно газового диска, темна матерія [16].

Найпростіший спосіб працювати з викривленим диском — розділити його на окремі нахилені кільця, що обертаються. Briggs (1990) [17] використав цей метод, щоб описати розподіл HI у спіральних галактиках. Він знайшов: деформація починається поблизу Холмберового радіуса й нахилена

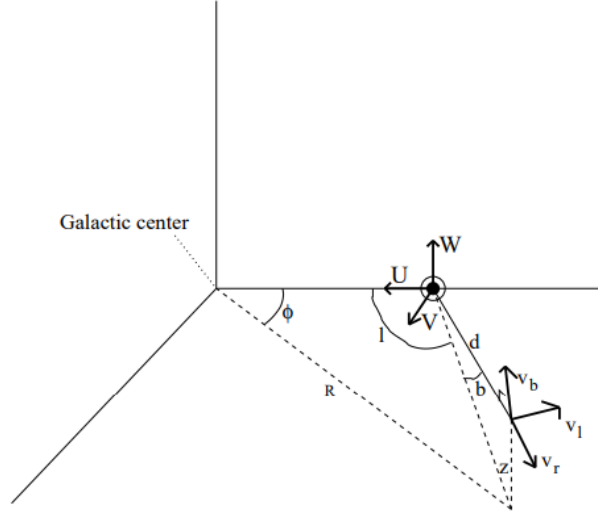
на кут  $5\text{--}20^\circ$  [Холмберовий радіус — галактичний радіус, що визначають за поверхневою яскравістю з видимою зоряною величиною  $+26.5$  на квадратну арксекунду в В-фільтрі]. Briggs (1990) [17] описав орієнтацію викривленого нахилу, сформулювавши правило Бріггза. Воно описує зміну лінії вузлів у галактиці.

Чумацький Шлях вивчають, використовуючи різні об'єкти: міжзоряний газ і пил, відкриті скупчення, зорі ранніх спектральних класів та червоні гіганти. Вони дають змогу краще дослідити структуру та кінематику в Галактиці. Завдяки різному віку та Галактичному положенню структур можна вивчати еволюцію Чумацького Шляху.

У Чумацькому Шлясі HI-викривлення спостерігають на  $\lambda = 21$  см ([18], [19], [20]). Burton (1988) [21] використали кінематичні відстані й знайшли, що це викривлення починається на  $R = 10$  кпс і його нахил росте ( $3^\circ$  на 16 кпс). Дослідники також виявили, що HI-деформація перекошена (*lopsided*) після 14.5 кпс.

Далі будуть детально розглянуті статті дослідників, що працювали над пошуком Галактичного викривлення. Це потрібно, щоб визначити методи виявлення галактичного викривлення та результати їх застосування.

У роботі López-Corredoira et al. (2014) [22] досліджують викривлення за кінематикою червоних гігантів. Автори використали каталоги PPMXL та 2MASS.



**Рис. 1.1** Схема зоряної кінематики відносно Сонця

Тривимірну швидкість зорі  $(v_r, v_l, v_b)$  обчислили у системі відліку  $(U, V, W)$  за формулами:

$$v_r = U_* \cos l \cos b + V_* \sin l \cos b + W_* \sin b$$

$$v_l = -U_* \sin l + V_* \cos l \quad (1.1)$$

$$v_b = -U_* \cos l \sin b - V_* \sin l \sin b + W_* \cos b$$

де  $(U_*, V_*, W_*)$  є швидкість зорі відносно Сонця в системі  $(U, V, W)$ . У цій системі Сонячна швидкість відносно Галактичного центру  $(U_\odot, V_{g,\odot}, W_\odot)$ :

$$V_{g,\odot} = \Omega(R_\odot, z = 0) + V_\odot \quad (1.2)$$

де  $\Omega(R_\odot, z = 0)$  — швидкість обертання місцевого стандарту спокою (*local standard of rest, LSR*) відносно Галактичного центру.

Далі López-Corredoira et al. (2014) [22] отримали компланарні швидкості зорі відносно Сонця як проєкцію колової швидкості,  $\Omega(R, z)$ :

$$U_* = -U_\odot + \Omega(R, z) \sin \phi,$$

$$V_* = -V_{g,\odot} + \Omega(R, z) \cos \phi \quad (1.3)$$

Вертикальна швидкість зорі в Галактоцентричній системі:

$$W = W_\odot + W_* \quad (1.4)$$

де  $\phi$  - зоряний азимут. Тоді

$$W = \frac{v_b}{\cos b} + W_{\odot} - U_{\odot} \cos l \tan b - V_{g,\odot} \sin l \tan b + \Omega(R, z) \sin(\phi + l) \tan b \quad (1.5)$$

Рівняння (1.5) дало змогу обчислити вертикальну швидкість, маючи лише власний рух у проєкції Галактичної широти та колову швидкість. Швидкості досліджували на малих  $b$ , тому три останні члени в (1.5) малі. Як наслідок,  $W$  слабо залежить від  $\Omega$ .

López-Corredoira et al. (2014) [22] вважали, що вертикальний рух виник через викривлення. За Галактичну модель узяли набір колових орбіт, що обертаються. Кожна з орбіт нахилена до Галактичної площини під кутом  $i_w(R)$ .

$$W = \Omega(R, z' = z - z_w) \sin[i_w(R)] \cos(\phi - \phi_w) + \bar{z}_w, \\ z_w(R, \phi) = R \tan[i_w(R)] \sin(\phi - \phi_w) \quad (1.6)$$

де  $\phi_w$  — азимут лінії вузлів,  $z_w$  — висота диска над  $b = 0$  площиною. Автори [22] припускають, що найбільшу висоту викривлення можна обчислити за наближеною формулою:

$$z_w(R > R_{\odot}, \phi = \phi_w + \pi/2) \approx \gamma(R - R_{\odot})^{\alpha} \quad (1.7)$$

Для сталої  $\Omega(R, z) = 238 \text{ km/s}$  та малих кутів  $i_w(R)$  вертикальну швидкість розраховують так:

$$W(R > R_{\odot}, \phi, z = 0) \approx \frac{(R - R_{\odot})^{\alpha}}{R} [\gamma \omega_{LSR} \cos(\phi - \phi_w) + \bar{\gamma} R \sin(\phi - \phi_w)] \quad (1.8)$$

López-Corredoira et al. (2014) [22] взяли  $\alpha = 1$ ,  $\phi_w = 5 \pm 10^\circ$ . Вони використали ділянку з  $R \geq 8 \text{ кпс}$ , щоб побудувати точнішу модель:

$$W_{best\ fit} = (54 \pm 38 \text{ km/s}) (1 - \frac{R_{\odot}}{R}) [\cos(\phi - \phi_w) - (0.14 \pm 0.07 \text{ kpc}^{-1}) R \sin(\phi - \phi_w)] \quad (1.9)$$

За спостережними даними про червоних гігантів із каталогів RPMXL та 2MASS автори [22] отримали такі параметри викривлення:

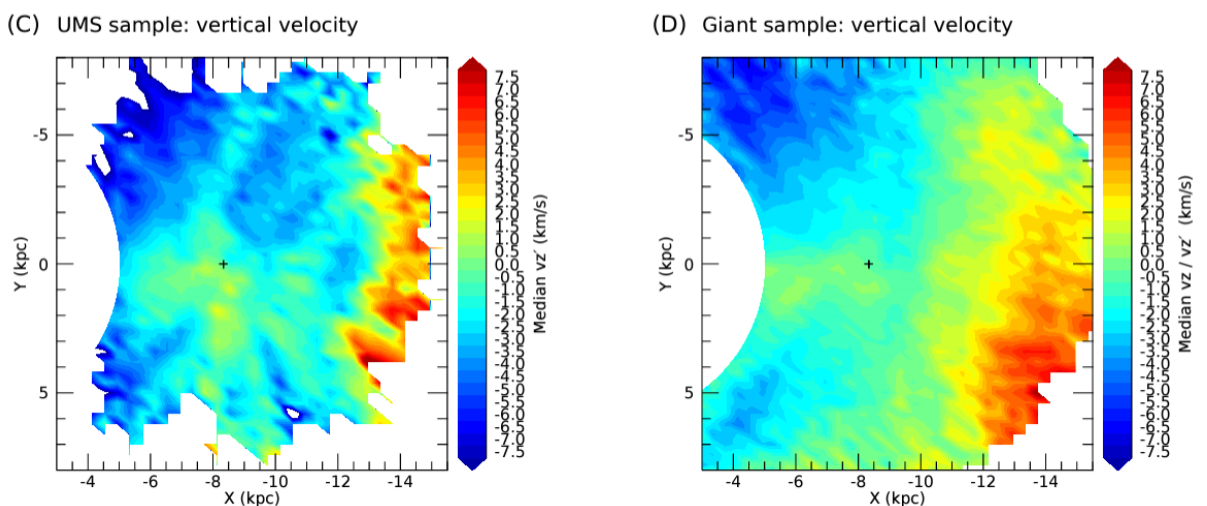
$$\gamma = 0.23 \pm 0.16,$$

$$\frac{\dot{\gamma}}{\gamma} = -34 \pm 17 \text{ Gyr}^{-1}$$

За формулою (1.7) автори [22] отримали найбільшу висоту  $0.92 \pm 0.56$  кпс на  $R = 12$  кпс,  $1.62 \pm 0.98$  кпс на  $R = 15$  кпс. Результати аналізу обертання еквівалентні моделі кілець, що обертаються навколо лінії вузлів з кутовою швидкістю  $[-4; -1]$  км/с/кпс у діапазоні відстаней  $R = [9; 16]$  кпс.

Poggio et al. (2018) [23] виявили Галактичне викривлення за даними Gaia DR2. Автори [23] працювали із 478 258 зорями у верхній частині головної послідовності (ВГП) та 6 373 188 гігантами. Вони використали дані Gaia DR2 і фотометрію 2MASS, щоб сформувати зоряну вибірку в Галактичній площині ( $|b| < 20^\circ$ ).

Poggio et al. (2018) [23] побудували графіки **C**, **D** (Рис. 1.2), де показали залежність градієнта середньої вертикальної швидкості від координат. Це ознака викривлення. Найбільші швидкості в обох вибірках напрямлені не точно в напрямку антицентру. Можливо, це можна пояснити тим, що Сонце підняте над Галактичною площиною.



**Рис. 1.2** Карта зміни вертикальної швидкості в ХУ-площині для вибірки зір з верхньої частини головної послідовності (зліва) та гігантів (справа)

Poggio et al. (2018) [23] визначили систематичне збільшення середньої вертикальної швидкості  $v_b^{corr} \approx 6 - 7 \text{ км с}^{-1}$  від  $R \sim 8 \text{ кпс}$  до  $14 \text{ кпс}$ .

Chen et al. (2019) [24] досліджували Галактичний диск, використавши класичні цефеїди з каталогу WISE. Їхня вибірка налічувала 1339 зір. Дослідники [24] запропонували дві моделі висоти: лінійну та степеневу за радіальною залежністю. Їх можна використати, щоб визначити розподіл Цефеїд і дослідити Галактичне викривлення. Лінійна модель краще підходить для  $R > 9.0 \text{ кпс}$ :

$$z_w = 0.148 \times (R - 9.26) \cdot \sin(\phi - 17.4) \quad (1.9)$$

Степенева модель краще підходить для  $R < 9.0 \text{ кпс}$ :

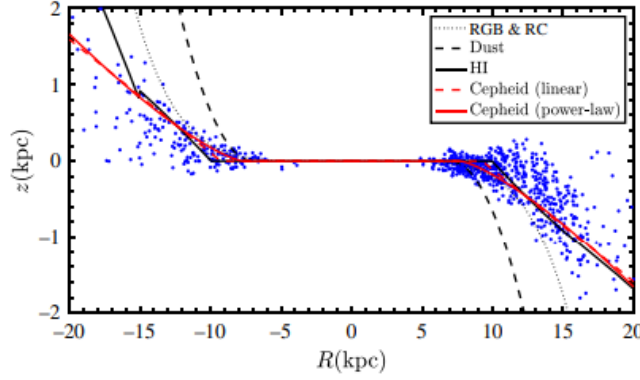
$$z_w = 0.060 \times (R - 7.72) \cdot \sin(\phi - 17.5) \quad (1.10)$$

Chen et al. (2019) [24] отримали такі результати для двох моделей:

| $z_w = a(R - R_w)^b \sin(\phi - \phi_w)$ |                     |                                  |                   |                 |       |
|------------------------------------------|---------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------|-------|
|                                          | $R_w \text{ (кпс)}$ | $\phi_w \text{ (}^\circ\text{)}$ | $a$               | $b = 1$         | RMSE  |
| All                                      | $9.26 \pm 0.19$     | $17.4 \pm 1.2$                   | $0.148 \pm 0.006$ |                 | 0.256 |
| WISE                                     | $9.31 \pm 0.20$     | $18.0 \pm 1.6$                   | $0.146 \pm 0.006$ |                 | 0.215 |
| Optical                                  | $9.01 \pm 0.40$     | $16.1 \pm 1.7$                   | $0.148 \pm 0.011$ |                 | 0.292 |
|                                          | $R_w \text{ (кпс)}$ | $\phi_w \text{ (}^\circ\text{)}$ | $a$               | $b$             | RMSE  |
| All                                      | $7.72 \pm 0.27$     | $17.5 \pm 1.0$                   | $0.060 \pm 0.012$ | $1.33 \pm 0.08$ | 0.210 |
| WISE                                     | $6.93 \pm 0.72$     | $18.6 \pm 1.4$                   | $0.028 \pm 0.015$ | $1.61 \pm 0.19$ | 0.188 |
| Optical                                  | $7.85 \pm 0.27$     | $15.8 \pm 1.3$                   | $0.093 \pm 0.019$ | $1.14 \pm 0.09$ | 0.225 |

**Таблиця 1.1** Параметри, отримані з лінійної та ступеневої моделі. RMSE: корінь із середньоквадратичного відхилення

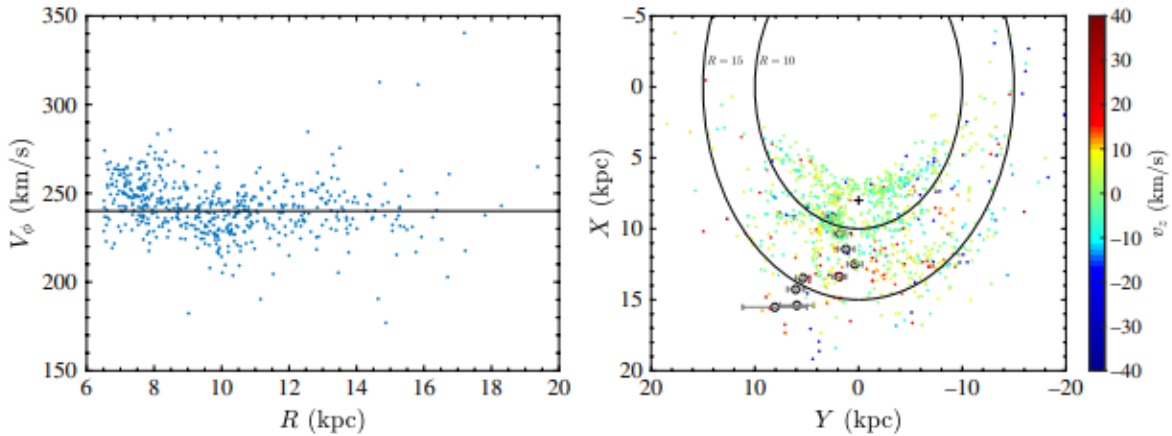
Автори [24] порівняли власні результати з іншими роботами. Вони відрізняються залежно від вибірки об'єктів (газу, червоних гігантів, Цефеїд):



**Рис. 1.3.** Порівняння різних амплітуд викривлення. Червона штрихована та суцільна лінії відображають амплітуди Цефеїдного викривлення відповідно до лінійної та степеневі моделей. Чорною суцільною, штрихованою та пунктирною лініями викривлення відстежене газом, пилом та червоними гігантами відповідно.

За 15 кпс від Галактоцентру викривлення ускладнюється: у розкладі  $z_w$  у ряду Фур'є потрібно врахувати гармоніку  $m = 2$ .

Chen et al. (2019) [24] також проаналізували рух Цефеїд, використавши дані *Gaia* DR2. Розподіл  $v_\phi$  узгоджується з плоскою оберальною кривою,  $v_r = 240 \text{ км с}^{-1}$ . У напрямку до Сонця, середня  $v_z$  збільшується. Це є кінематична ознака викривлення.



**Рис. 1.4.** Зліва оберальна швидкість Цефеїд (сині точки) та плоска оберальна крива (суцільна чорна лінія). Справа кольорові точки показують, як  $v_z$  розподілена в  $XY$ -площині

Chrobáková et al. (2020) [25] працювали з даними *Gaia* DR2. Вони вибрали 1.3 мільярда зір, що мають відомі 5 астрометричних параметрів.

## Мапи густини [25]

Потрібно мати кількість зір як функцію відстані, щоб обчислити зоряну густину. Проте що більші відстані до об'єктів, то щораз зростають похибки паралаксу. Щоб працювати з віддаленими зорями, застосовують метод, що розробили López-Corredoira & Sylos-Labini (2019) [26]. У ньому використовують метод зворотної згортки Люсі (Lucy 1974 [27]; Appendix A). Завдяки цьому алгоритму можна отримати точні відстані до  $R = 20$  кпс. Формула, щоб обчислити число зір на паралакс  $\bar{N}(\pi)$ :

$$\bar{N}(\pi) = \int_0^{\infty} d\pi' N(\pi') G_{\pi}(\pi' - \pi), \quad G_{\pi}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_{\pi}^2}} \quad (1.11)$$

$\sigma_{\pi}$  — похибка, що дорівнює усередненим похибкам кожної комірки за даними Gaia DR2.

Щоб перевірити надійність зворотної згортки, дослідники застосували метод Монте-Карло. За їхніми результатами оригінальні дані можна відновити аж до 50 кпс чи далі. Такий діапазон відстаней повністю задовольняє дослідників, що вивчають Чумацький Шлях. Завдяки цьому методу вдається отримати хороші результати до 20 кпс із похибкою  $[0.05; 0.4]$  mas.

Chrobáková et al. (2020) [25] застосували описані методи до даних *Gaia* DR2 по всьому небу. Усі дані розділили на комірки за Галактичною довготою  $l$ , Галактичною широтою  $b$  та видимим блиском  $m$ .

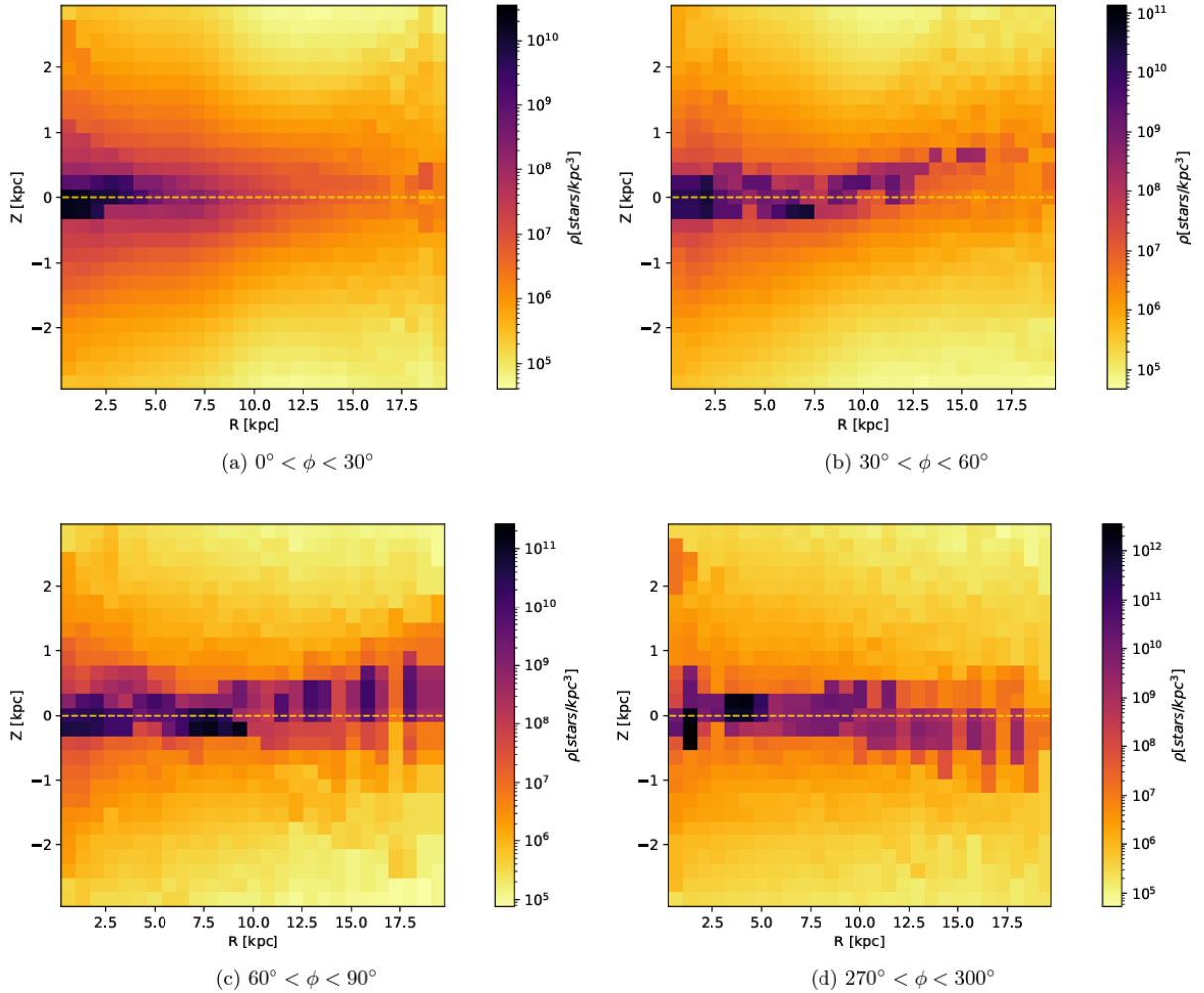
Кількість зір  $N(m)$  з видимим блиском  $m$  на одиничний тілесний кут і на одиничний інтервал зоряної величини виразили так (за статтею Chandrasekhar & Münch, 1951):

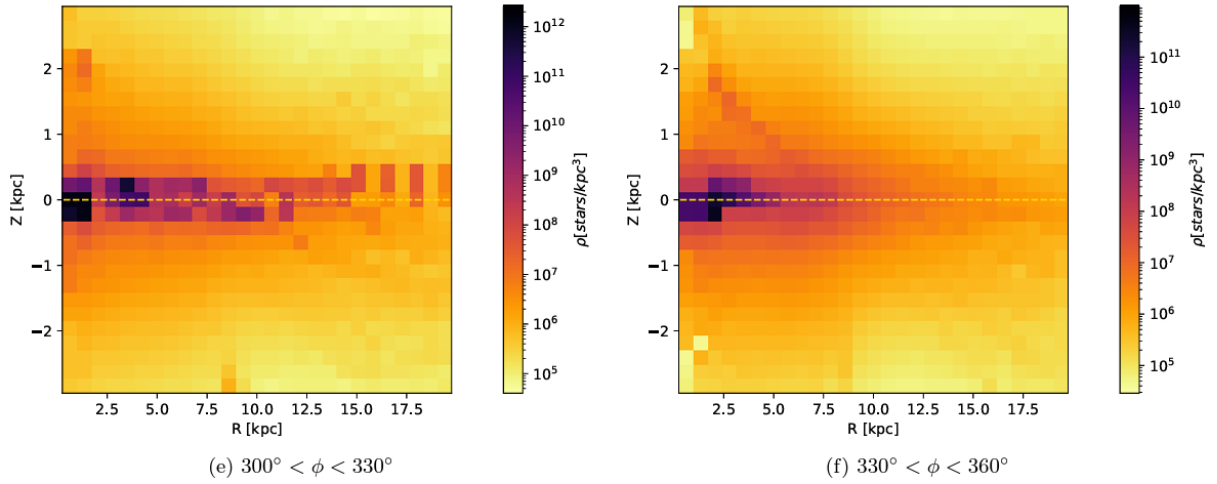
$$N(m) = \int_0^{\infty} \rho(r) \Phi(M) r^2 dr, \quad r(m) = (1/\pi) = 10^{(m-M+5-A_G(1/\pi))/5}$$

$$\rho(1/\pi) = \frac{N(\pi)\pi^4}{\Delta\pi\omega \int_{M_{G,low\ lim}}^{M_{G,low\ lim}+1} dM_G \Phi(M_G)} ,$$

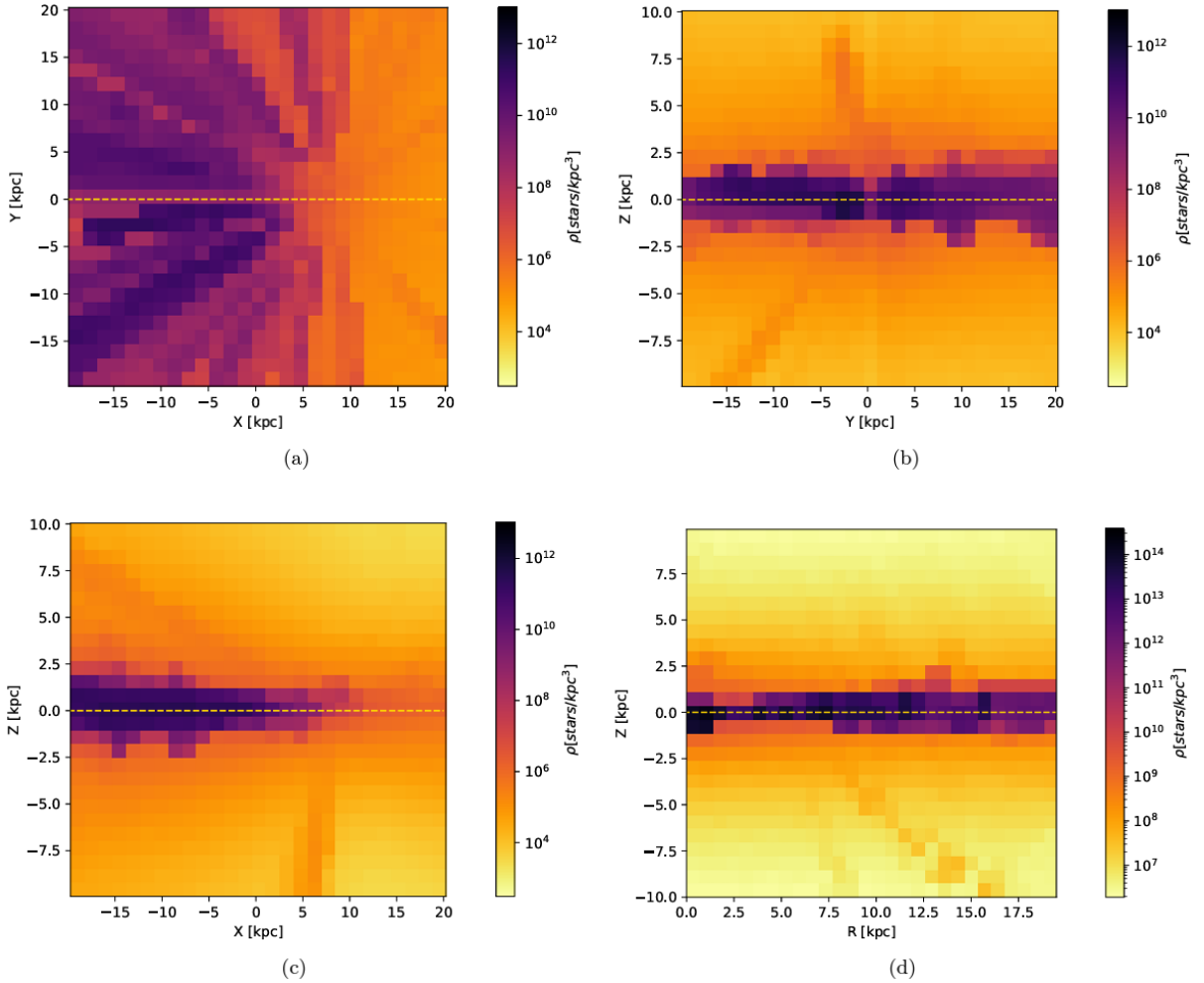
$$M_{G,low\ lim} = m_{G,low\ lim} - 5\log_{10}(1/\pi) - 10 - A_G(1/\pi) , \quad (1.12)$$

Тут  $\omega$  - покрита кутова поверхня,  $\Delta\pi$  - паралаксний інтервал,  $\Phi(M_G)$  - функція світності в G-фільтрі,  $m_{G,low\ lim}$  - межа найбільшої видимої зоряної величини,  $A_G(r)$  - поглинання, що залежить від відстані. Ось мапи густини, що отримали дослідники:





**Рис. 1.5.** Карты Галактичної густини [25] в діапазоні азимутів від  $0^\circ$  до  $360^\circ$



**Рис. 1.6.** Карты Галактичної густини [25]: (a), (b), (c) - у декартівській системі координат;  
(d) - у циліндричній системі координат

Загалом, карти густини Chrobáková et al. (2020) [25] показують повне число зір на одиницю об'єму, зважаючи на обчислену зоряну світність у даній

статті. На трьох графіках (Рис. 1.6. (b), (c), (d)) видно особливість, що лежить нижче за Галактичну площину. Chrobáková et al. (2020) [25] порівнюють власні карти густини з результатом Anders et al. (2019) [28]. У статті Anders et al. (2019) [28] припустити, що ці надгустини спричинені тим, що Молочний Шлях витягує зорі з Магелланових Хмар. Інша гіпотеза Chrobáková et al. (2020) [25] полягає в тому, що це слід Божого пальця (*the finger of God*), зумовлений пиловими хмарами спереду.

Chrobáková et al. (2020) [25] працювали з вертикальним рухом зір. Вертикальні рухи об'єктів можуть відобразити те, як утворилося викривлення. Poggio et al. (2018) [23] знайшли систематичне збільшення середньої вертикальної швидкості на приблизно 5-6 км/с від  $R \sim 8$  кпс до 14 кпс для зір у верхній частині головної послідовності та гігантів. За їхніми результатами, викривлення спричинене гравітаційними чинниками. Skrown et al. (2019b) [29] також знайшли великий градієнт вертикальних швидкостей, використовуючи дані про Цефеїди з огляду OGLE. Lopez-Corredoira et al. (2020) [30] дійшли до висновку: вертикальні рухи можуть породжувати зовнішні збурення чи злиття. Проте самого викривлення не достатньо, щоб пояснити спостережувані швидкості.

#### Аналіз викривлення в статті [25]

Мапи густини Chrobáková et al. (2020) [25] чітко показують північне викривлення на азимуті  $90^\circ$  і південне викривлення на азимуті  $270^\circ$  (Рис. 1.5.). Середня висота над площиною  $z_w$ :

$$z_w = \frac{\int_{z_{min}}^{z_{max}} \rho z dz}{\int_{z_{min}}^{z_{max}} \rho dz} \quad (1.13)$$

У першому наближенні для  $z_w$  використали модель López-Corredoira et al. 2002b [31] (р-ня 20):

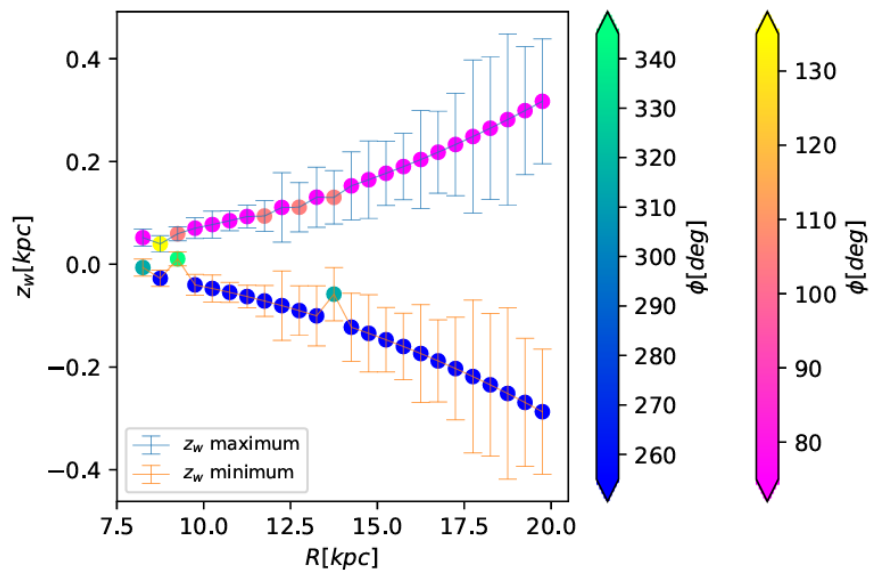
$$z_w = [C_w R(\text{пк})^{\epsilon_w} \sin(\phi - \phi_w) + 17] \text{пк}, \quad (1.14)$$

де 17 пк ураховують те, що Сонця підняте над Галактичною площиною;  $C_w$ ,  $\epsilon_w$ ,  $\phi_w$  — вільні параметри моделі, що визначають за спостережними даними. Chrobáková et al. (2020) [25] виявили асиметрію для північного та південного викривлення газу та молодії зоряної популяції. Амплітуда  $z_w = 0.317$  кпс для північного і  $z_w = -0.287$  кпс для південного викривлення на  $R = [19.5, 20]$  кпс. Отже, є невелика асиметрія.

Щоб отримати величини вільних параметрів для моделі (1.14), Chrobáková et al. (2020) [25] використали функцію *curve fit* із пакету *SciPy* (програмне забезпечення *Python*). Їхні результати для всієї вибірки такі:

$$\begin{aligned} C_w &= 1.17 \cdot 10^{-8} \text{пс} \pm 1.34 \cdot 10^{-9} \text{пс}(\text{stat.}) \\ &\quad - 2.9 \cdot 10^{-10} \text{пс}(\text{syst.}) , \\ \epsilon_w &= 2.42 \pm 0.76(\text{stat.}) + 0.129(\text{syst.}) , \\ \phi_w &= -9.31^\circ \pm 7.37^\circ(\text{stat.}) + 4.48^\circ(\text{syst.}) \end{aligned}$$

На Рис. 1.7. порівняли найменшу та найбільшу  $z_w(R)$  за моделлю (1.14). Середня висота площини найвища на азимутах  $[60^\circ, 90^\circ]$  і  $[90^\circ, 120^\circ]$ , а найменша — на азимутах  $[240^\circ, 270^\circ]$ .



**Рис. 1.7.** Найбільша та найменша середня висота над площиною як функції радіуса.

Модель викривлення спирається на рівняння (1.14)

Chrobáková et al. (2020) [25] також використали наближення з роботи Levine et al. (2006) [32]. У ній вивчали вертикальну структуру зовнішнього диска Чумацького Шляху, стежачи за нейтральним гідрогеном HI.

$$z_w = z_0 + z_1 \cdot \sin(\phi - \phi_1) + z_2 \cdot \sin(2\phi - \phi_2) \quad (1.15)$$

вираз для середньої висоти над площиною, що отримали Levine et al. (2006) [32]. Тут  $z_i$  — амплітуда викривлення,  $\phi_i$  — його фаза ( $i = 0, 1, 2$ ).

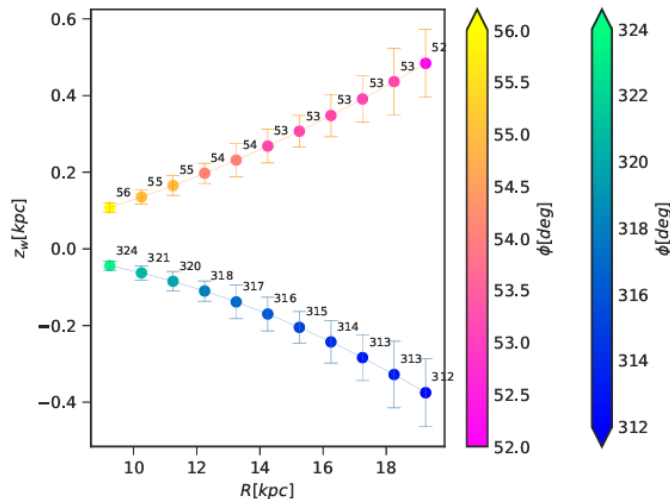
Залежність  $z_i$  від Галактоцентричної відстані така:

$$z_i = k_0 + k_1 \cdot (R - R_k) + k_2 \cdot (R - R_k)^2 \text{ для } i = 0, 1, 2, \quad (1.16)$$

де  $k_i$  та  $R_k$  — вільні параметри добору. Chrobáková et al. (2020) [25]

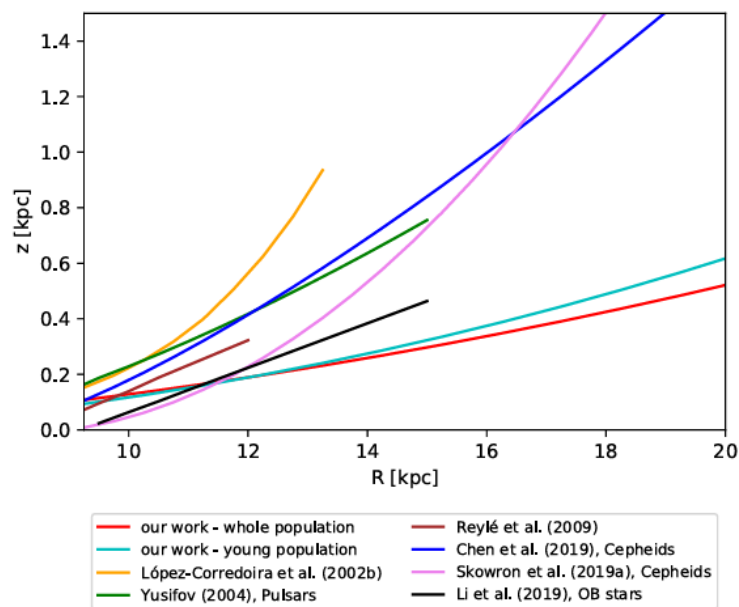
апроксимували дані для  $R < 20$  кпс, використовуючи рівняння (1.15), (1.16).

Їхні результати вказують на те, що азимут найбільшого північного викривлення лежить у межах  $52^\circ < \phi < 56^\circ$ , а найменшого південного викривлення —  $312^\circ < \phi < 324^\circ$ . Амплітуда північного та південного викривлення —  $z_w = 0.48$  кпс і  $z_w = -0.38$  кпс, відповідно.



**Рис. 1.8.** Найбільша та найменша середня висота над площиною як функції Галактоцентричної відстані. Модель викривлення спирається на рівняння (1.15)

Li et al. (2019) [33] використали OB-зорі з Gaia DR2, щоб визначити параметри Галактичного викривлення. Вони апроксимували дані, використовуючи синусоїдальну модель. Дослідники отримали викривлення з середньою амплітудою до  $z = 0.5$  кпс. Проте дослідники не врахували, що викривлення асиметричне. Chen et al. (2019) [24] використали дані про Цефеїди з каталогу WISE і відслідковували викривлення до  $R = 20$  кпс. За їхніми результатами викривлення простягається до  $|z| = 1.5$  кпс. Це узгоджується з результатами Chrobáková et al. (2020) [25].



**Рис. 1.9.** Порівняння найбільших амплітуд, отриманих у статті [25], з іншими за моделлю (1.15)

Різницю між амплітудами викривлення для різних популяцій можна пояснити так: викривлення утворюється через акрецію на диск (López-Corredoira et al. 2002a [34]), тому газ і молоді зорі сильніше викривляються, ніж старіші популяції.

Chrobáková et al. (2020) [25] також працювали з молодого популяцією. Вони дібрали зорі, що мають абсолютні зоряні величини, більші за  $M_G = -2$ . Щоб оцінити викривлення, автори використовували описані вище моделі  $z_w$  та методи. За їхніми результатами азимут найбільшого північного

викривлення лежить у межах  $50^\circ < \phi < 54^\circ$ , а найменшого південного викривлення —  $265^\circ < \phi < 315^\circ$ . Амплітуда північного й південного викривлення —  $z_w = 0.57$  кпс і  $z_w = -0.5$  кпс, відповідно.

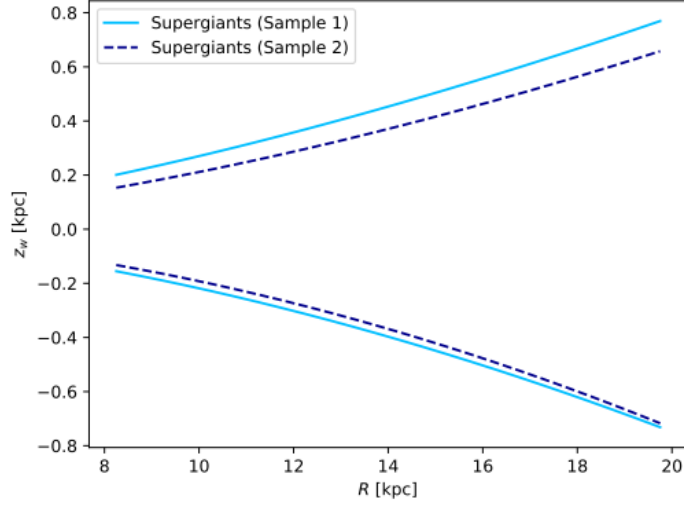
У статті Chrobáková et al. (2022) [35] автори працюють із вибірками зір, щоб знайти викривлення та потовщення Галактичного диска. Дослідники обчислили Галактичне викривлення, використавши дані Gaia EDR3, і порівняли викривлення різних вибірок. Це потрібно, щоб перевірити гіпотезу про залежність деформації від віку зоряних популяцій.

Chrobáková et al. (2022) [35] обчислили середню висоту над площиною, використовуючи рівняння (1.17) — вираз для викривленої моделі як набору кілець:

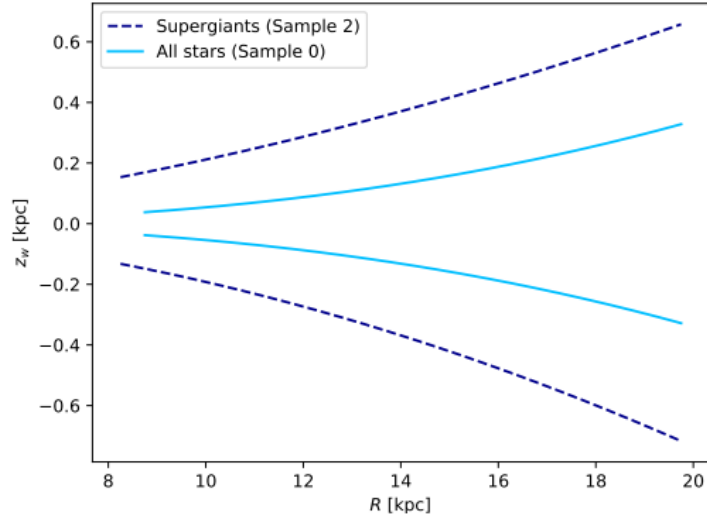
$$z_w = [C_w R(\text{пк})^{\epsilon_w} \sin(\phi - \phi_w)] \text{пк}, \quad (1.17)$$

де  $C_w$ ,  $\epsilon_w$ ,  $\phi_w$  — вільні параметри викривлення. Автори знайшли їх [35], використовуючи функцію *curve fit* із пакету *SciPy* (програмне забезпечення *Python*). Ця функція спирається на нелінійний метод найменших квадратів.

На *Рис. 1.10*. Chrobáková et al. (2022) [35] порівняли викривлення супергігантів із двох вибірок. Вони добре узгоджуються. На *Рис. 1.11*. побудований графік найбільшого й найменшого викривлення для всієї популяції та супергігантів. Автори одержали найбільше викривлення  $z_w = 0.360$  кпс і найменше —  $z_w = -0.375$  кпс на відстані  $R = [19.5, 20]$  кпс. Якщо порівняти з супергігантами, то викривлення супергігантів більше ніж викривлення усієї популяції. Воно вдвічі більше на  $R = [19.5, 20]$  кпс. Супергіганти — молоді зорі, їхній середній вік рівний кільком десятим Мр, а вік усієї популяції  $\sim 6\text{--}7$  Гр. Це підтверджує гіпотезу, що величина викривлення пов'язана з віком досліджуваної популяції.

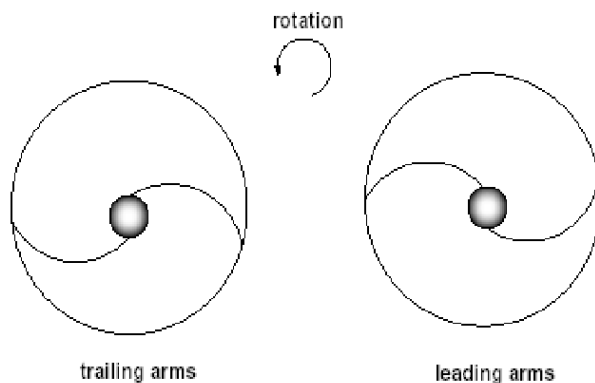


**Рис. 1.10.** Порівняння  $z_w$  найбільшого та найменшого викривлення для супергігантів, що мають різні наближення



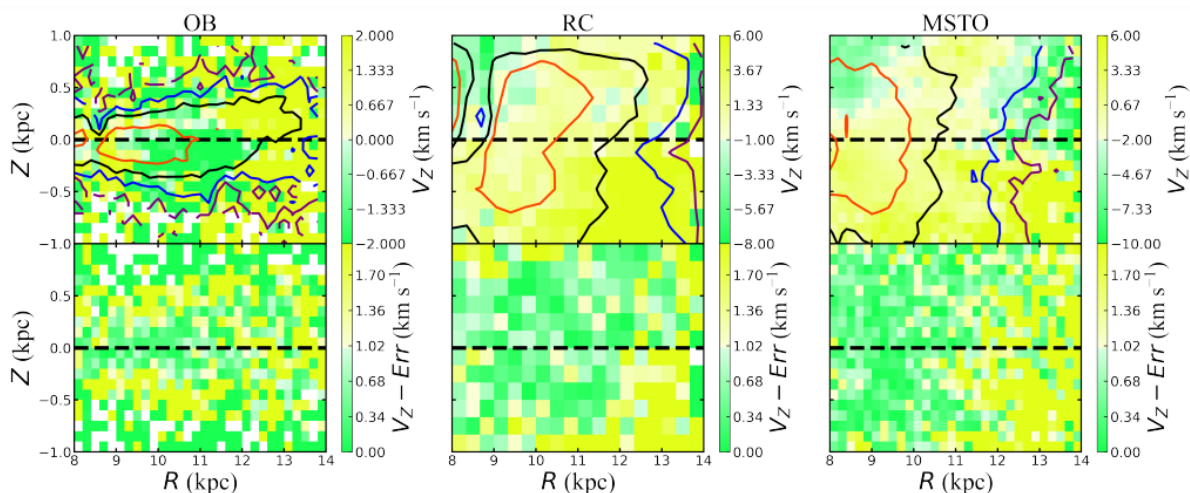
**Рис. 1.11.** Порівняння  $z_w$  найбільшого та найменшого викривлення для цілої популяції та супергігантів

У статті Chen et al. (2019) [24] аналізували викривлення за Цефеїдною вибіркою. Дослідники дібрали до викривлення модель із  $m = 1$  (у розкладі в ряд Фур'є) і розділили Цефеїди з вибірки на окремі комірки. Chen et al. (2019) [24] знайшли, що лінія вузлів радіально змінюється:  $\varphi_{lon} \sim 0^\circ$  на 12.5 кпс і збільшується до  $\varphi_{lon} \sim 20^\circ$  на  $R > 14.5$  кпс. За правилом Бріггза, утворюється провідна спіраль.



**Рис. 1.12.** Відображення правила Брігтза

У статті Li et al. (2022) [36] використали 3 різні зоряні вибірки: ОБ-зорі, червоні гіганти та зорі, що покидають головну послідовність (далі — ЗППП). Дані про об'єкти вони взяли з каталогів LAMOST DR5 та Gaia DR3. Загалом, автори працювали з 529 995 зорями, що покидають головну послідовність, 85 663 червоними гігантами та 12 865 ОБ-зорями.



**Рис. 1.13.** Дані 3 графіки показують вертикальний розподіл швидкості диска в  $R, Z$  площинах, а нижні 3 показують похибки вертикальної швидкості. ОБ-зорі є на лівому графіку, червоні гіганти - посередині, MSTO - справа

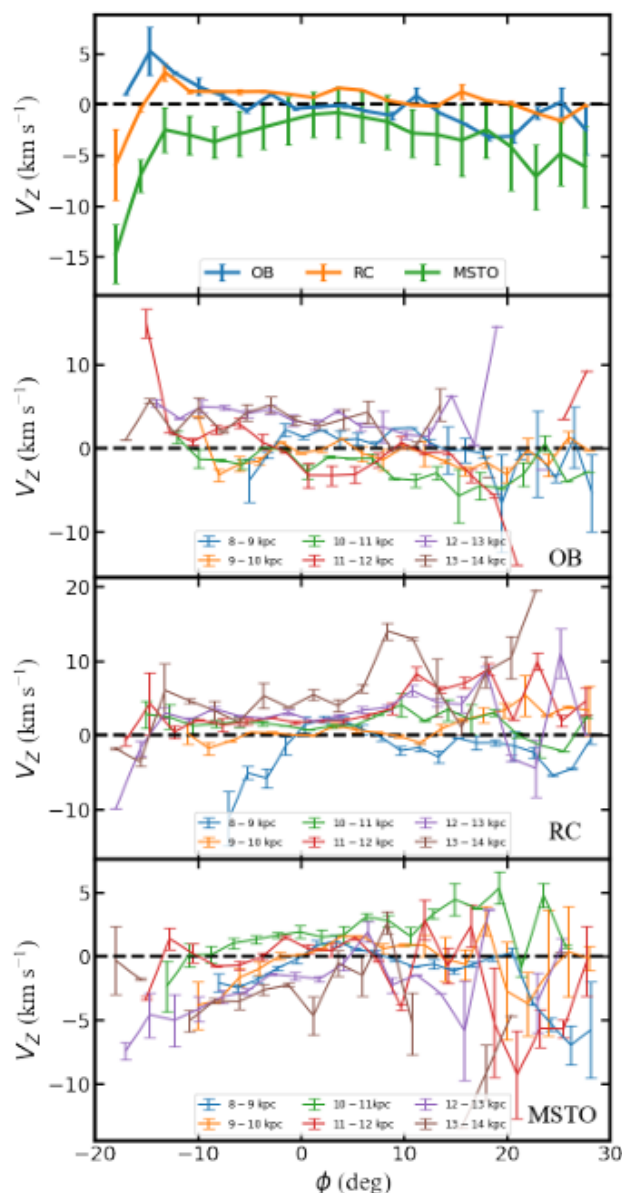
У першому наближенні Li et al. (2022) [36] вважали, що викривлення — головний чинник, що зумовлює вертикальні рухи. Автори використали звичну модель: набір кілець обертається, а їхні орбіти нахилені до Галактичної площини під змінним кутом  $i_w(t)$ . Ця ж модель (рівняння 1.8) є в статті López-Corredoira et al. (2014) [22].

Li et al. (2022) [36] припустили, що  $\alpha = 1$ ,  $\phi_w = 5^\circ$ , й отримали такі амплітуди викривлення:  $\gamma_{OB} = 0.119 \text{ кпс}^{-1}$ ,  $\gamma_{\text{чГ}} = -0.088 \text{ кпс}^{-1}$ ,  $\gamma_{\text{зПГП}} = 0.119 \text{ кпс}^{-1}$ . Від'ємні  $\gamma$  показують, що викривлення не можна описати тільки синусоїдою.

Коли Li et al. (2022) [36] припустили, що  $\alpha = 1$  і  $\phi_w$  — вільний параметр, то отримали інші амплітуди викривлення:  $\gamma_{OB} = 0.132 \text{ кпс}^{-1}$ ,  $\gamma_{\text{чГ}} = 0.069 \text{ кпс}^{-1}$ ,  $\gamma_{\text{зПГП}} = 0.022 \text{ кпс}^{-1}$ .

Li et al. (2022) [36] побудували графік залежності вертикальної швидкості від азимута, що на *Рис. 1.14*. На ньому зображено: вертикальна швидкість збільшується з азимутом і досягає максимуму на  $\phi = -10^\circ$ . Після цього вона зменшується, а азимут росте далі.

Li et al. (2022) [36] підбивають підсумок: якщо викривлення спричиняє вертикальні швидкості, то це викривлення - довгоживуча, непостійна та кривобока (*lopsided*) структура. За авторовими результатами, що молодша зоряна популяція, то більша амплітуда викривлення.



**Рис. 1.14.** Розподіл вертикальної швидкості вздовж азимута. Перший графік показує розподіли для всього зразка, решта - для OB, RC, MSTO

У статті Nurhidayat et al. (2022) [37] кінематично аналізували викривлення Чумацького Шляху. Автори використали RGB-зорі з каталогу Gaia DR2. Вони дібрали зорі з  $6 < R < 15$  кпс і  $-30^\circ < \phi < 30^\circ$ . Уся вибірка налічувала 2 296 373 зір.

Nurhidayat et al. (2022) [37] використали лінійну за радіальною залежністю функцію зі статті Chen et al. (2019) [24], щоб описати спостережуване викривлення:

$$Z = \gamma(R - R_w) \sin(\phi - \phi_w) \quad (1.18)$$

Коли  $R > R_w$ , диск починає викривлятися як функція  $R$  і Галактоцентричної довготи  $\phi$ .  $\phi$  відраховували від лінії *Галактичний центр-Сонце* в напрямку Галактичного обертання. Лінія вузлів,  $\phi_w$ , лежить на Галактоцентричній лінії, якщо  $\phi_w = 0^\circ$ .  $\gamma$  — амплітуда викривлення. Автори поєднали логістичну функцію та NUTS (*No U-turn Sampler*) алгоритм, щоб визначити параметри викривлення ( $\gamma, \phi_w, R_w$ ) із рівняння (1.18).

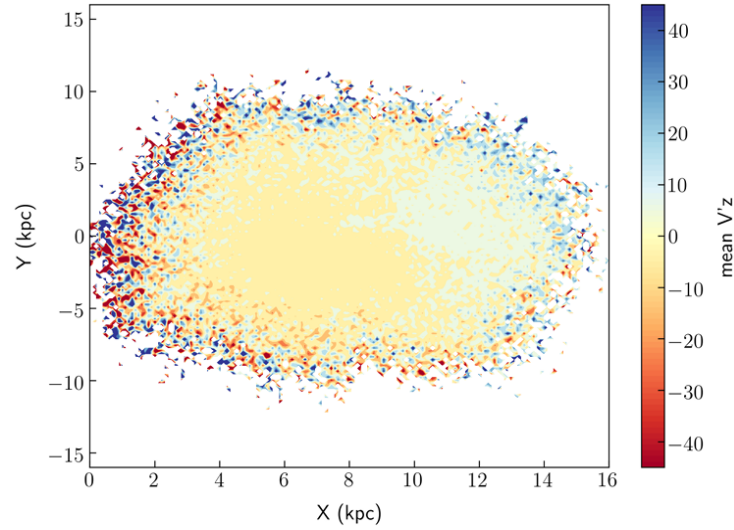
Nurhidayat et al. (2022) [37] спиралися на таку модель вертикального руху:

$$V_z = \frac{V_\phi}{R} \gamma (R - R_w) \cos(\phi - \phi_w) \quad (1.19)$$

Це є похідна за часом від висоти  $Z$ , рівняння 1.18. Автори припустили, що  $\gamma, R_w, \phi_w$  не змінюються з плином часу.  $V_z$  порівнювали зі спостережуваною вертикальною швидкістю  $V'_z$ :

$$V'_z = V_r \sin b + V_b \cos b + V_{z,\odot}, \quad (1.20)$$

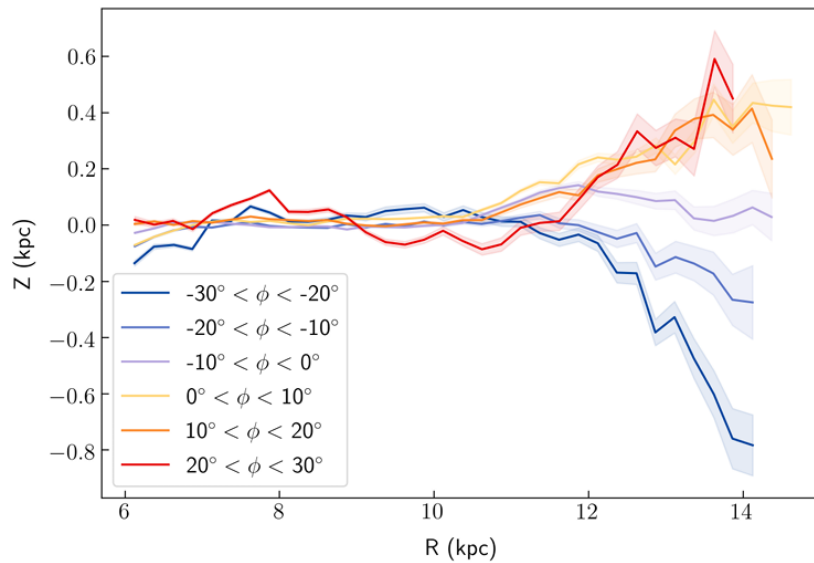
де  $V_r$  — радіальна швидкість кожної зорі;  $b$  — галактична довгота;  $V_b$  — швидкість вздовж  $b$ ;  $V_{z,\odot}$  - сонячний рух уздовж  $Z$ -осі.



**Рис. 1.15.** Двовимірна проєкція середнього  $V_z$  на площину

Nurhidayat et al. (2022) [37] дістали найбільшу за модулем амплітуду південного викривлення, рівну  $-0.8$  кпс, та амплітуду північного викривлення, рівну приблизно  $0.6$  кпс. Цей результат наводить на думку, що лінія вузлів не лежить на  $\phi = 0^\circ$ .

Застосувавши логістичну функцію та NUTS-алгоритм, дослідники отримали [37] такі параметри викривлення:  $\gamma = 0.39$ ,  $\phi_w = -5.24^\circ$ ,  $R_w = 10.72$  кпс.



**Рис. 1.16.** Розподіл висоти уздовж  $R$

Найбільша  $V_z'$  не більша за 12.5 км/с. Це менше ніж вертикальна швидкість у статичній моделі викривлення (1.19). Це наводить на думку, що Галактичне викривлення — перехідна ознака. Окрім цього, воно довгоживуче, бо дослідники спостерігають його для RGB-зір.

Викривлення Молочного Шляху не просте [38]. По-перше, розподіл НІ сильно перекошений і має значну  $m = 2$  компоненту (у розкладі  $Z$  у ряд Фур'є). По-друге, викривлений диск прецесує.

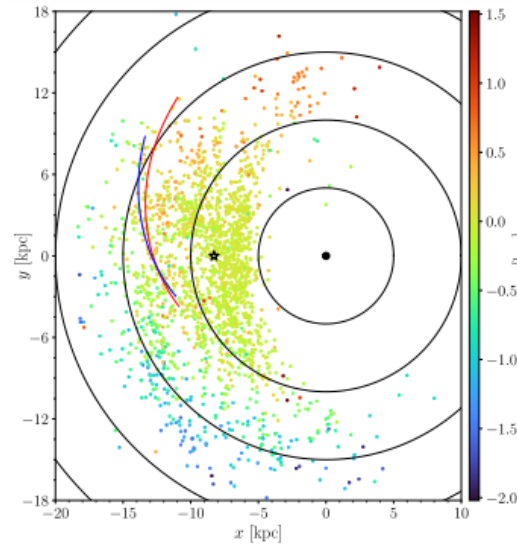
У статті Dehnen et al. (2023) [38] не припускали, що Галактичне викривлення стаціонарне. Воно проявлене на *Рис. 1.17*. як систематичний вертикальний зсув зір (у статті для опису радіального положення використовували радіус колової орбіти з таким самим моментом імпульсу  $R_g$  замість миттєвого радіуса).

Dehnen et al. (2023) [38] працювали з вибіркою класичних цефеїд, що містяться в Gaia DR3 та каталогах інших дослідників. Усього вибірка налічувала 2123 зір.

Dehnen et al. (2023) [38] визначили, що внутрішній диск на  $R_g \lesssim 11$  кпс не викривлений. Дослідники припускають: якщо викривлення виявили на  $R_g < 11$  кпс, то це спричинило пилове затемнення.

На  $R_g \gtrsim 11$  кпс є викривлення з величиною  $3^\circ - 4^\circ$  (дана вибірка Цефеїд майже не охоплює радіуси за  $R_g = 16$  кпс). Лінія вузлів закручена в напрямку обертання від  $\varphi_{lon} = -15^\circ$  на 12 кпс до  $45^\circ$  на 16.5 кпс. Це відповідає провідній спіралі згідно з правилом Бріггза.

Dehnen et al. (2023) [38] оцінили прецесію викривлення. Їхній аналіз показує швидку прецесію:  $\frac{d\varphi_{lon}}{dt} \approx 12 \text{ км с}^{-1} \text{ кпс}^{-1}$  на  $R_g = 12$  кпс; далі зменшується до  $\sim 6 \text{ км с}^{-1} \text{ кпс}^{-1}$  на  $R_g = 14$  кпс і майже не змінюється.



**Рис. 1.17.** Розподіл 2009 класичних Цефеїд у Галактичній площині. Дуги позначають викривлені лінії вузлів, знайдені з аналізів Цефеїдних орбітальних площин (червона) та Цефеїдних положень (синя)

Chen et al. (2019) [24] виміряли радіальну зміну  $\varphi_{lon}$ . Їхній результат найбільше узгоджується з Dehnen et al. (2023) [38]: лінія вузлів утворює провідну спіраль на  $R_g \gtrsim 12$  кпс. Але Dehnen et al. (2023) [38] знайшли, що  $\varphi_{lon}$  далі радіально збільшується до  $R_g = 16$  кпс. Chen et al. (2019) не знайшли прецесії на  $R_g \gtrsim 14$  кпс. Проте результати Dehnen et al. (2023) [38] надійніші, бо спираються на розширену вибірку Цефеїд.

Попередні оцінки прецесії викривлення робили, використовуючи відстані, що спиралися на менш точні астрометричні паралакси. Також припускали, що викривлення — нахилений диск, що когерентно прецесує, із радіально сталими  $\varphi_{lon}$  та  $\frac{d\varphi_{lon}}{dt}$ . Виміри Dehnen et al. (2023) [38]  $\frac{d\varphi_{lon}}{dt}$  узгоджуються з оцінками Poggio et al. (2020) [39]; Cheng et al. (2020) [40], але не узгоджується з Wang et al. (2020) [41]; Chrobáková & López-Corredoira (2021) [42], що знайшли  $\frac{d\varphi_{lon}}{dt} \sim 0$ .

У статті Li et al. (2019) [43] розраховали амплітуду викривлення та потовщення Галактичного диска. Автори вибрали ОБ-зорі з каталогу Gaia

DR2. Маючи паралакси, Li et al. (2019) [43] обчислили зоряні відстані. Звичайна похибка відстані приблизно рівна 6.5%.

Li et al. [43] працювали з ОБ-зорями, що переважно мають малу Галактичну широту й лежать у тонкому диску. Дослідники використали таку функцію описати зоряний розподіл у Галактичному диску:

$$\rho_{R,z} = \rho_0 \exp\left(-\frac{|z-z_w|}{h_z(R)} - \frac{R}{H_R}\right), \quad (1.21)$$

де  $h_z(R)$  — функція, що відображає зміну масштабної висоти,  $z_w$  — амплітуда викривлення в точці з координатами  $(R, \phi)$ . Використана модель  $z_w$

$$z_w = \begin{cases} a_w(R - R_w)\sin(\phi - \phi_w), & \text{if } R > R_w, \\ 0, & \text{if } R \leq R_w, \end{cases} \quad (1.22)$$

тут  $\phi$  — фазовий кут, що збільшується в протилежному напрямку до Галактичного обертання.  $a_w$  — амплітуда викривлення,  $\phi_w$  — фазовий кут викривлення,  $R_w$  — Галактоцентричний радіус, де починається викривлення.

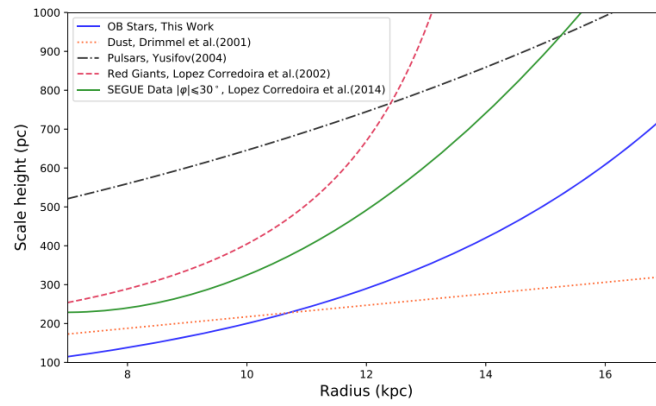
У цій моделі знехтували висотою Сонця над Галактичною площиною.

Використовуючи вдосконалену модель, Li et al. (2019) [43] дістали такі результати:

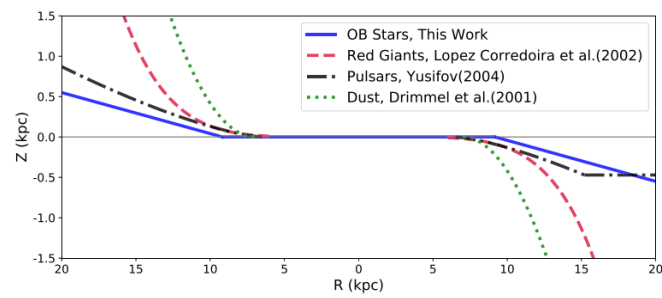
$$h_z(R_\odot) = 147 \text{ пк}; \quad H_{R,flare} = 5.39 \pm 0.04 \text{ кпс}$$

$$a_w = 0.08 \pm 0.01; \quad R_w = 9.2 \pm 0.2 \text{ кпс}; \quad \phi_w = 177^\circ \pm 3^\circ.$$

Дискова масштабна висота збільшується з Галактичним радіусом для всіх зоряних вибірок. Тому потовщення — властивість усього диска. Внутрішня частина диска пласка в усіх моделях, зовнішній диск викривлений догори на півночі та донизу на півдні. Викривлення більше для RGB-зір, аніж для ОБ-об'єктів.



**Рис. 1.18.** Залежність дискової масштабної висоти від Галактичного радіуса. Порівняння результатів кількох статей [43]



**Рис. 1.19.** Залежність середньої амплітуди викривлення від Галактичного радіуса. Порівняння результатів кількох статей [43]

## Розділ 2. Огляда Gaia

### 2.1. Космічна місія Gaia

Gaia — амбіційна місія Європейської космічної агенції, що має на меті скласти 3-вимірну Галактичну карту. Цю місію розпочали 19 грудня 2013 року з космодрому у Французькій Гвіані. Кілька разів учені вирішували продовжити роботу Gaia, спираючись на її технічні можливості та хороші результати. Зараз очікують, що місія триватиме до грудня 2025 року. [44]

Gaia зосереджується на важливій сучасній проблемі: дуже точна 3-вимірна карта приблизно півтора мільярда зір у Галактиці та поза нею. Упродовж усієї роботи телескоп спостерігатиме кілька десятків разів півтора мільярда об'єктів, щоразу записуючи їхню яскравість, положення, відстані та рухи. Ці дані дають змогу розв'язувати проблеми походження, структури й еволюції Чумацького Шляху. [44]

Космічний телескоп Gaia - наступник місії Hipparcos (1989-1993). Супутник Hipparcos був першим експериментом, що вимірював точні положення об'єктів на небесній сфері. Завдяки цій місії склали високоточний каталог Hipparcos, що налічує приблизно 118 200 зір, та менш точний TYCHO, що містить понад мільйон зір. [45]

Gaia запустила французька компанія *Arianespace*, використавши ракету *Soyuz ST-B*. Апарат прямував до Лагранжової точки  $L_2$ , розташованої приблизно за 1.5 мільйона кілометрів від Землі. У цьому місці супутник використовує орбіту Ліссажу, щоб Земля не закривала Сонце й сонячні панелі могли виробляти енергію. [45]

Супутник має 3 основні інструменти:

1. Астрометричний інструмент (*Astro*) точно визначає положення зір, яскравіших за 20 зоряну величину. Завдяки цим вимірам можливо обчислити зоряні паралакси, відстані та їхні власні рухи.

2. Фотометричний інструмент (*BP/RP*) вимірює зоряну світність для зоряних величин у межах 320-1000 нм. Синій та червоний фотометри визначають зоряні властивості (температура, маса, вік та хімічний склад).
3. Спектрометр променевої швидкості (*RVS*) вимірює швидкості об'єктів уздовж лінії зору завдяки спектру в смузі 847-874 нм. Променеві швидкості визначені з точністю між 1 км/с ( $V=11.5$ ) та 30 км/с ( $V=17.5$ ).

Gaia має 2 телескопи, що забезпечують 2 спостережувані напрямки з кутом  $106.5^\circ$  між ними. Апарат безперервно обертається навколо осі, перпендикулярної до двох телескопових ліній зору. Телескопи забезпечують визначення зоряних астрометричних параметрів: два кутові положення на небесній сфері, дві компоненти власного руху та паралакс. Для яскравіших зір є виміряна завдяки доплерівському ефекту променева швидкість. [45]

Найточніші паралакси, положення та власні рухи супутник отримує для зір із видимою зоряною величиною 3-12 mag. Стандартна похибка для цих зір рівна приблизно 6.7  $\mu$ as чи менша. Для віддаленіших зір похибка досягає 26.6  $\mu$ as для паралакса зір 15-ої mag й кількох сотень  $\mu$ as для зір 20-ої mag. [45]

Увесь обсяг спостережуваних даних зберігають у базі *InterSystems Caché*. Європейський консорціум, *Data Processing and Analysis Consortium*, відповідальний за оброблення даних Gaia. [45]

## 2.2. Каталог Gaia DR3

Gaia EDR3 — перша частина повного каталогу Gaia DR3. Вона містить астрометричні дані та широкосмугову фотометрію для 1.8 мільярда об'єктів на основі 34-місячної супутникової роботи. Променеві швидкості семи мільйонів джерел були взяті з Gaia DR2.

Gaia DR3 має визначені середні променеві швидкості для більше ніж 33 мільйонів зір, багатосмугову фотометрію для приблизно 12 мільйонів змінних зір [46].

Gaia DR3 доповнює Gaia EDR3. Повний DR3 опублікували в червні 2022 року. Серед нових даних цієї публікації є середні червоні фотометричні спектри (BP/RP) із низькою роздільною здатністю та високороздільні променеві швидкості (ВПШ, отримані зі спектрометричних спектрів); нові оцінки середніх променевих швидкостей до віддаленої обмежувальної величини; розшир ліній та хімічний склад зі спектрометра радіальних швидкостей; дані про змінні зорі. [46]

Gaia EDR3 забезпечує небесні положення та видиму яскравість у G-смузі для 1.8 мільярда об'єктів. Паралакси, власні рухи та кольори ( $G_{BP} - G_{RP}$ ) мають 1.5 мільярда цих джерел. Gaia DR3 містить 585 мільйонів об'єктів із 5 астрометричними параметрами (2 координати положення, паралакс, дві компоненти власного руху) і близько 882 мільйонів об'єктів із 6 астрометричними параметрами (до них доданий параметр псевдокольору). [46]

Систематичні помилки, що мали астрометричні та фотометричні дані в Gaia EDR3, перенесли до Gaia DR3. Дослідивши астрометрію в Gaia EDR3, дійшли до висновку, що загальний відхил паралаксу в Gaia DR3 рівний —  $17 \mu\text{as}$ . Середнє квадратичне кутових коваріацій паралаксу та власних рухів на малих масштабах —  $\sim 26 \mu\text{as}$  та  $\sim 33 \mu\text{as} \cdot \text{p}^{-1}$  відповідно. Відхил паралаксу й власного руху залежить від зоряної величини, кольору, небесного положення. [46]

### Розділ 3. Оброблення даних

Переходи між системами координат були зроблені на основі статті Akhmetov et al. (2023) [47].

Декартова система координат  $(x, y, z)$  зручна, бо не має особливих точок (наприклад, полюсів, що їх має сферична система координат). Її центр лежить у барицентрі Сонячної системи. Вісь  $x$  напрямлена до Галактичного центра, вісь  $y$  збігається з керунком Галактичного обертання, вісь  $z$  перпендикулярна до Галактичної площини. Цю систему називають геліоцентричною прямокутною Галактичною системою координат.

Щоб перейти від сферичних координат та компонентів швидкості  $(l, b, r, \mu_l, \mu_b, v_r)$  до прямокутних декартівських координат та компонентів швидкості  $(x, y, z, V_x, V_y, V_z)$ , використаємо формули:

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

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

$$z = r \sin b,$$

$$V_x = V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b,$$

$$V_y = V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b,$$

$$V_z = V_r \sin b + V_b \cos b,$$

де  $V_r$  це променева швидкість,  $V_l = k r \mu_l \cos b$ ,  $V_b = k r \mu_b$  є компоненти зоряного власного руху,  $k = 4.74057$  є коефіцієнт, щоб перейти від  $\text{mas} \cdot \text{p}^{-1}$  до  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kpc}^{-1}$ . Відстань обчислена як перевернутий паралакс,  $1/\varpi$ . [47]

Щоб обчислити компоненти швидкості кожної зорі відносно нерухомої Галактоцентричної координатної системи, використаємо формули:

$$V_{x, \text{гал}} = V_x + V_{x, \odot},$$

$$V_{y, \text{гал}} = V_y + V_{y, \odot},$$

$$V_{z, \text{гал}} = V_z + V_{z, \odot},$$

де  $V_x, V_y, V_z$  є компоненти швидкості кожної зорі відносно барицентра Сонячної системи; Сонячна швидкість має компоненти, рівні  $(V_x, V_y, V_z)_{\odot} = (9.5, 250.7, 8.56) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$  відносно Галактичного центра. [47]

Перехід від декартівської системи координат із центром у барицентрі Сонячної системи до Галактоцентричної циліндричної системи координат потребує знати відстань від Сонця до Галактичного центра  $R_{\odot} = 8.249$  кпс та Сонячну висоту над Галактичною площиною  $Z_{\odot} = 0.0208$  кпс. Щоб перейти до Галактичної циліндричної системи координат, застосуємо формули:

$$R = \sqrt{(R_{\odot} - x)^2 + y^2},$$

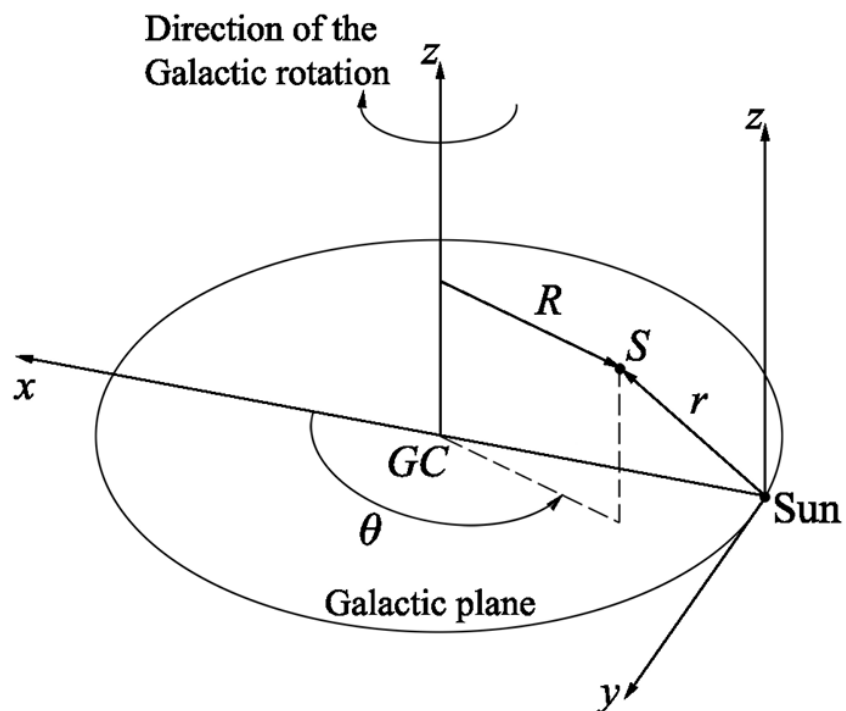
$$\varphi = \arctan2\left(\frac{y}{R_{\odot} - x}\right),$$

$$Z = z + Z_{\odot},$$

$$V_R = V_{x, \text{гал}} \cos \varphi + V_{y, \text{гал}} \sin \varphi,$$

$$V_{\varphi} = V_{y, \text{гал}} \cos \varphi - V_{x, \text{гал}} \sin \varphi,$$

$$V_z = V_{z, \text{гал}}.$$



**Рис. 3.1.** Місцева прямокутна Галактична  $(x, y, z)$  та циліндрична Галактоцентрична  $(R, \phi, z)$  системи координат.  $S$  позначає довільну зорю з геліоцентричною відстанню  $r$  [47]

## Розділ 4. Розв'язок нелінійних систем рівнянь

### 4.1. Метод Левенберга-Марквардта

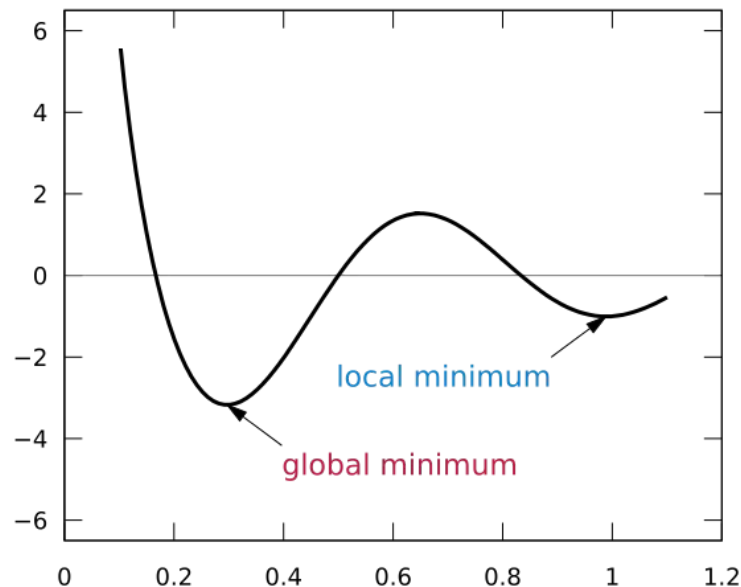
Метод найстрімкішого спуску має в основі мінімізацію, що оновлює шукані параметри в спадному напрямку. Цей спосіб добре збігається для задач із простими функціями (*objective functions*). Якщо задачі мають тисячі параметрів, метод градієнтного спуску інколи залишається єдиним робочим варіантом. [48]

Метод Гаусса-Ньютона використовують, щоб мінімізувати дисперсію функції, що з нею працюють. Він припускає, що функція приблизно квадратична за параметрами біля оптимального розв'язку. Для задач із помірною кількістю параметрів, метод Гаусса-Ньютона збігається значно швидше, аніж спосіб найстрімкішого спуску. [48]

Метод Левенберга-Марквардта (далі — ЛМ-алгоритм) знаходить параметри кривої, поєднуючи метод найстрімкішого спуску та метод Гаусса-Ньютона. Цей алгоритм містить спадний множник. Спочатку його встановлюють великим, щоб обчислювати параметри в спадному напрямку. Якщо будь-яка ітерація призводить до гіршого наближення, то спадний множник збільшують. В іншому випадку, коли шукані параметри щоразу кращають, цей множник зменшують і алгоритм ЛМ наближається до методу Гаусса-Ньютона. Тобто ЛМ-алгоритм працює переважно як метод градієнтного спуску, коли шукані параметри далеко від сприятливих значень. Коли параметри наближаються до розв'язку, то ЛМ-алгоритм діє подібно до методу Гаусса-Ньютона. [48, 49]

Алгоритм Левенберга-Марквардта знаходить місцевий мінімум, відштовхуючись від початково заданих величин параметрів. Якщо функція має тільки один мінімум, то метод збігається до глобального мінімуму навіть тоді, коли параметри задали довільно. [49]

Якщо функція має кілька мінімумів, то ЛМ-алгоритм імовірно знайде глобальний мінімум, якщо задані параметри близькі до розв'язку. В іншому випадку можна отримати набір розв'язків з різними наближеними параметрами й вибрати серед них результат із найменшим  $\chi^2$ .



**Рис. 4.1.** Графічна ілюстрація глобального та локального мінімуму

[49,48]

У коді, де використаний ЛМ-алгоритм, є такі змінні:

1.  $n$  — кількість параметрів у нелінійній функції (*inputs*);
2.  $m$  — кількість спостережуваних даних  $(x, f(x))$ . Їх називають *values*.
3.  $x$  — вектор із  $n$  елементами, що містять  $n$  шуканих параметрів. Спочатку він наповнений значеннями, що ми задаємо. Векторні елементи змінюються під час роботи алгоритму й у кінці процедури містять розв'язок.
4.  $fvec$  — вектор із  $m$  елементами, що містить похибки  $m$  виміряних даних. Похибка обчислена як різниця між спостережуваними величинами й значеннями функції.
5.  $fjac$  — матриця з розміром  $m$  на  $n$ , що містить якобіан похибок.

[49]

## 4.2. Програмування методу Левенберга-Марквардта

Я програмувала на мові C/C++. Частина каталогу Gaia DR3, що я з нею працювала, налічує майже 18 000 000 об'єктів. Тому було потрібно написати код, що надійно працюватиме з таким масивом даних. У програмі, крім стандартних бібліотек мови програмування C/C++, я під'єднала бібліотеку *Eigen*. Вона дає змогу працювати з матрицями різних розмірів, що містять різні типи даних. Бібліотека забезпечує різні операції над матрицями, нелінійну оптимізацію (містить ЛМ-алгоритм) тощо. [51]

Код, що я написала, працює таким чином:

1. Зчитати каталожні дані, не обмежуючи цей процес накладеними умовами на окремі координати (наприклад, на сферичну довготу чи широту). Вони визначені у сферичній системі координат.
2. Перейти від сферичної до прямокутної декартівської системи координат (її барицентр лежить у центрі Сонячної системи).
3. Перейти від прямокутної декартівської до Галактоцентричної системи координат.
4. Перейти від Галактоцентричної до циліндричної системи координат.
5. Записати дані до матриці з обчисленими координатами  $measVal(m, y)$ . Кількість координат та компонент швидкості визначає  $y$ .
6. Щоб працювати з Галактичним диском, потрібно обмежити висоту над Галактичною площиною  $Z$ , Галактоцентричну відстань  $R$ :  $R > 4$  кпс,  $|Z| < 2$  кпс. Lopez-Corredoira et al. (2014) на  $R > 4$  кпс знайшли не колові орбіти довгого бару. Для  $|Z| > 2$  кпс гало стає помітним і зоряна густина диска зменшується. Також обмеження  $Z$  дає змогу не працювати з об'єктами, що мають великі похибки спостережуваних даних.
7. Створити вектор  $x(n)$ , що міститиме шукані параметри викривлення. Щоб задати їхні початкові значення, можна використати результати зі статей інших дослідників.

8. Використати ЛМ-алгоритм із бібліотеки *Eigen*. Він вимагає мати структуру *LMFunctor*.
9. До  $x$  записані приблизні величини параметрів. Потрібно обчислити похибки, спираючись на ці параметри, і записати їх до  $fvec$ .
10. Обчислити якобіан похибок. Він буде записаний до  $fjac$ . У цьому випадку якобіан — частинні похідні кожної похибки відносно параметрів.
11. Створити об'єкт *Eigen::LevenbergMarquardt* і передати йому створений functor.
12. Викликати мінімізаційний метод, передаючи йому вектор  $x$  з початковими параметрами.
13. Записати оптимізаційний статус ЛМ-алгоритму. Далі вивести вектор  $x$  зі знайденими параметрами Галактичного викривлення та похибки їх розрахунку.

[50]

## Розділ 5. Отримання параметрів Галактичного викривлення

### 5.1. Вибір моделі висоти та вертикального руху

Вибрану модель висоти  $Z$  та вертикального руху  $V_z$  використовували, зокрема, в статті Nurhidayat et al.(2022) [37]. Її часто застосовують дослідники Галактичного викривлення ([24], [52], [43]). Ця модель ґрунтується на розгляді Галактичного диска як набору нахилених кілець, що мають різні радіуси та обертаються. Формула для вертикального руху  $V_z$  — похідна за часом від  $Z$ , що не враховує можливу прецесію Галактичного диска (або вважає її дуже малою).

$$Z = \gamma(R - R_w) \sin(\phi - \phi_w) \quad (5.1)$$

$$V_z = \frac{V_\phi}{R} \gamma(R - R_w) \cos(\phi - \phi_w) \quad (5.2)$$

Щоб знайти параметри викривлення за моделями (5.1) та (5.2), був застосований нелінійний метод найменших квадратів. Вибраний алгоритм — метод Левенберга-Марквардта. Використаний останній випуск даних місії Gaia — Gaia DR3.

### 5.2. Аналіз отриманих параметрів Галактичного викривлення

У цій роботі представлені параметри Галактичного викривлення за моделлю вертикального руху (5.2). Результати відрізняються для розглянутих Галактичних ділянок, тож варто проаналізувати їх окремо.

Зоряна вибірка не обмежена за зоряною величиною, кольором чи віком. Усього опрацьовані 18 мільйонів об'єктів, що обов'язково мають відомі 5 астрометричних параметрів  $(l, b, r, \mu_r, \mu_b)$  та променеву швидкість  $v_r$ .

Відстані до об'єктів були обчислені як обернений паралакс. Різниця між відстанню, обчисленою за Баєсовим методом та розрахованою як обернений паралакс, складає від 2% до 0.6% для 90% зір із  $\varpi/\sigma_\varpi > 5$ . [53]

Отже, для різних Галактичних ділянок результати такі:

| Кількість<br>об'єктів | $R_{\text{сер}}, \text{кпс}$ | $\varphi_{\text{сер}}, ^\circ$ | $\gamma$ | $err_{\gamma}$ | $R_w, \text{кпс}$ | $err_{R_w}$ | $\varphi_w, ^\circ$ | $err_{\varphi_w}$ |
|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|----------|----------------|-------------------|-------------|---------------------|-------------------|
| 3582447               | 7.531                        | -46,667                        | 0,047239 | 4.89224e-06    | 6,24855           | 0.000122383 | 69,2922             | 1.64025e-05       |
| 3147092               | 7.537                        | -37,840                        | 0,044709 | 0              | 6,39506           | 0           | 65,3051             | 0                 |
| 2238765               | 7.546                        | -26,595                        | 0,044515 | 2.06535e-05    | 6,38929           | 0.000405067 | 66,6105             | 0.000143558       |
| 3458850               | 8.462                        | -20,020                        | 0,032438 | 5.64664e-06    | 6,00517           | 0.000406509 | 59,3671             | 3.42602e-05       |
| 3202724               | 8.463                        | -5,881                         | 0,026753 | 0              | 5,78498           | 0           | 55,8323             | 0                 |
| 2493438               | 8.466                        | -14,986                        | 0,030093 | 0              | 5,83581           | 0           | 60,9945             | 0                 |
| 1706865               | 9.42                         | -36,270                        | 0,054913 | 5.14292e-05    | 7,90321           | 0.00123864  | 36,0751             | 0.000662709       |
| 1545074               | 9.414                        | -49,635                        | 0,047078 | 4.48845e-05    | 7,90194           | 0.00127012  | 25,8526             | 0.000974247       |
| 1129646               | 9.399                        | -54,973                        | 0,045060 | 5.06781e-05    | 7,63609           | 0.00150145  | 42,1781             | 0.000847386       |
| 705226                | 10.448                       | -12,836                        | 0,062304 | 9.5772e-05     | 8,24484           | 0.0033733   | 10,667              | 0.00118479        |
| 597796                | 10.447                       | -6,726                         | 0,061360 | 8.63977e-05    | 8,32744           | 0.00299649  | 2,87863             | 0.00133992        |
| 355516                | 10.441                       | -2,109                         | 0,054492 | 7.23554e-05    | 8,2506            | 0.00288155  | 8,66959             | 0.00189412        |
| 375797                | 11.446                       | -64,113                        | 0,101542 | 0.00016599     | 9,37702           | 0.00336858  | 7,88812             | 0.00138123        |
| 319033                | 11.447                       | -23,422                        | 0,101244 | 0.000143148    | 9,43504           | 0.00283622  | 6,13608             | 0.00138911        |
| 197142                | 11.451                       | -3,15                          | 0,089781 | 0.000112396    | 9,39367           | 0.00258156  | -2,4563             | 0.00190168        |
| 171933                | 12.418                       | -126,141                       | 0,049478 | 0.000301994    | 5,96428           | 0.0391389   | 19,2029             | 0.00145602        |
| 144547                | 12.414                       | -75,887                        | 0,046258 | 0.00025745     | 5,66343           | 0.037293    | 19,7554             | 0.00141026        |
| 89911                 | 12.411                       | -16,362                        | 0,042777 | 0.000209653    | 6,04423           | 0.0311115   | 6,70281             | 0.0022723         |

**Таблиця 5.2.1.** Отримані параметри викривлення для симетричних за азимутот  
Галактичних ділянок

Вони відповідають певній ділянці, обмеженій Галактичною відстанню та азимутот. Кожні 3 рядки відповідають симетричній за азимутот ділянці ( $\varphi \in [-30; 30]^\circ$ ,  $\varphi \in [-20; 20]^\circ$ ,  $\varphi \in [-10; 10]^\circ$ ) та відстані  $R$  із кроком в 1 кпс (загалом, охоплене  $R \in [7; 13]$ кпс). У таблиці після величини параметра викривлення ( $\gamma, R_w, \varphi_w$ ) слідує похибка його розрахунку.

Видно, що отримані параметри залежать від розглянутої Галактичної ділянки. Зокрема, на них впливає азимутальне обмеження. Якщо працювати

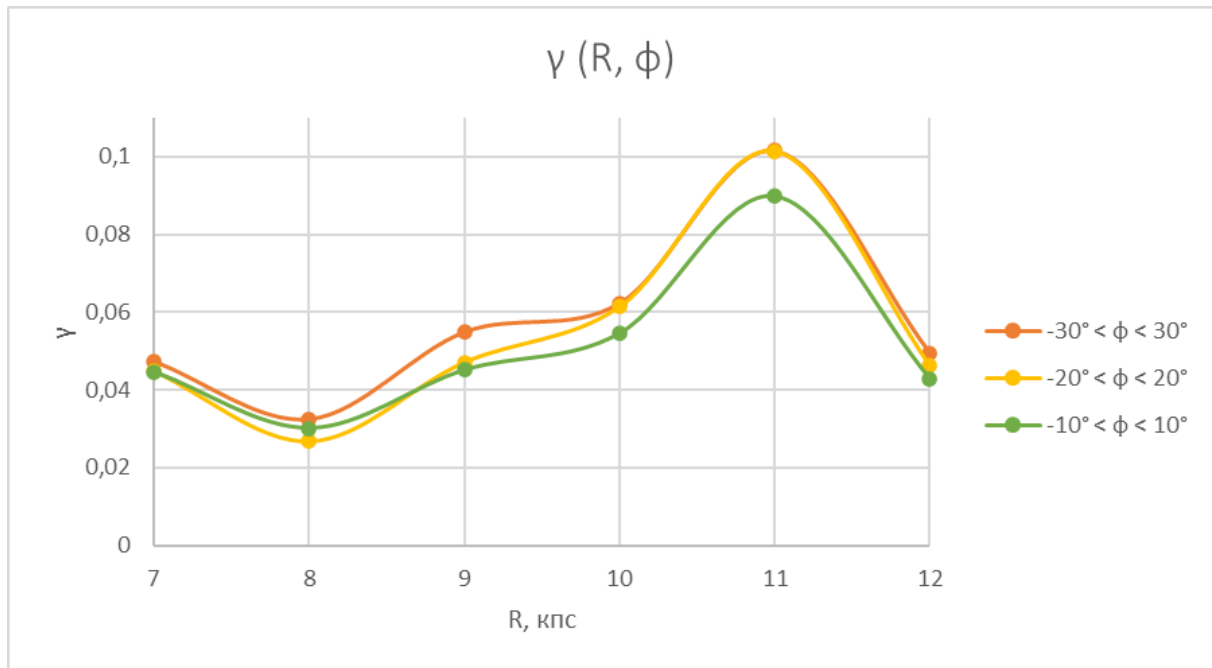
із зорями в не симетричній за азимуті зоні, то знайдене  $\varphi_w$  швидко змінюється:

| Кількість<br>об'єктів | $R_{\text{сер}}, \text{кпс}$ | $\varphi_{\text{сер}}, ^\circ$ | $\gamma$  | $err_\gamma$ | $R_w, \text{кпс}$ | $err_{R_w}$ | $\varphi_w, ^\circ$ | $err_{\varphi_w}$ |
|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------|--------------|-------------------|-------------|---------------------|-------------------|
| 56347                 | 10.4707                      | -23,85074                      | 0.186932  | 0.00361237   | 8.83225           | 0.0141117   | 20.4364             | 0.0180764         |
| 121651                | 10.4464                      | -14,69958                      | 0.39762   | 0.00204404   | 8.7035            | 0.0070289   | -89.955             | 0.000819599       |
| 180685                | 10.4294                      | -4,70850                       | 0.0819949 | 0.000381537  | 8.5018            | 0.00490316  | -46.9726            | 0.0042652         |
| 174831                | 10.4535                      | 4,79130                        | 0.0743173 | 0.000217481  | 7.85163           | 0.00520377  | 56.1763             | 0.0017501         |
| 120629                | 10.4636                      | 14,35082                       | 0.157298  | 0.000713132  | 7.78288           | 0.00953413  | 80.7334             | 0.00125388        |
| 51083                 | 10.431                       | 24,58940                       | 0.250359  | 0.00244993   | 7.15101           | 0.0278771   | 94.533              | 0.0017057         |
| 15975                 | 10.4713                      | 33,77162                       | 0.379067  | 0.0128032    | 9.00324           | 0.019483    | 80.4874             | 0.0274919         |

**Таблиця 5.2.2.** Отримані параметри викривлення для  $R \in [10; 11]$  кпс;  $\varphi \in [-30; 40]^\circ$

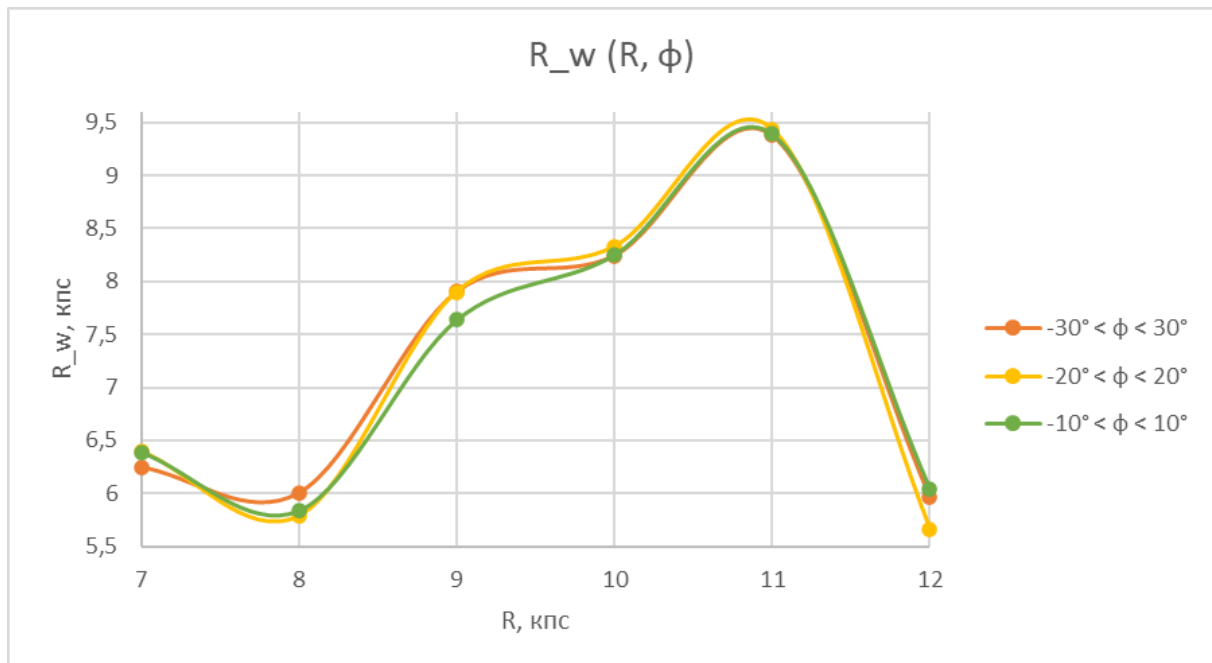
Це може бути пов'язано з роботою ЛМ-алгоритму. Це нелінійний метод, тому він може знайти локальний мінімум замість глобального й видати його за результат. Крім цього, різна точність обчислених координат та швидкостей в циліндричній системі координат, неоднакова кількість об'єктів на охоплених ділянках теж впливають на значення параметрів.

Амплітуда викривлення збільшується, коли віддалятися від Галактичного центру. Вона досягає максимуму на  $R \approx 11$  кпс, а далі зменшується.



**Рис. 5.2.1.** Залежність амплітуди викривлення  $\gamma$  від  $R$ ,  $\phi$

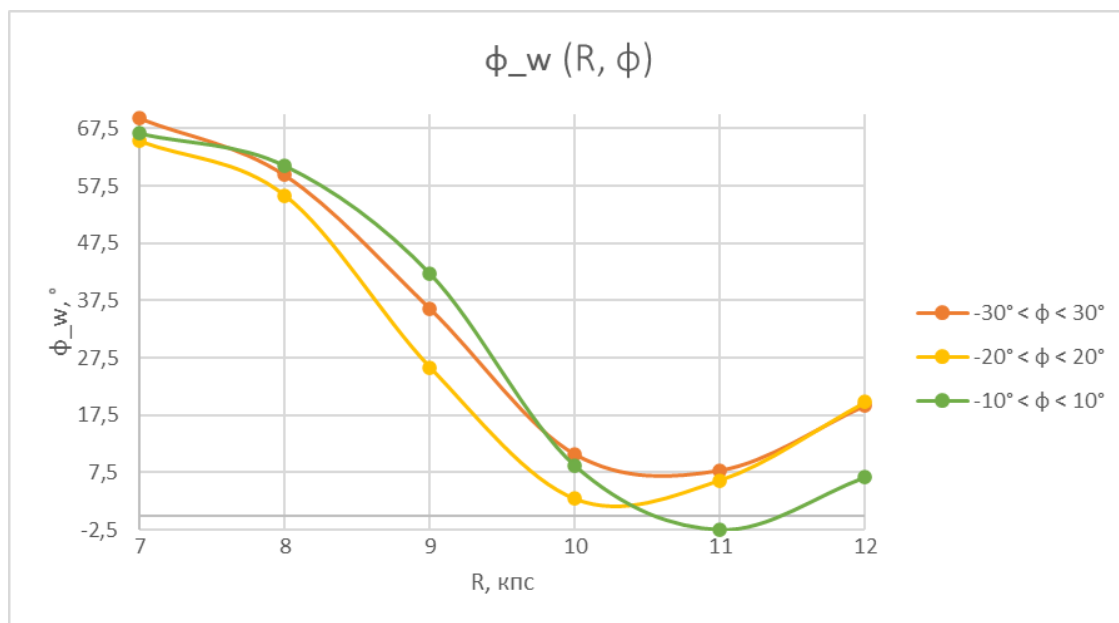
Галактоцентрична відстань, де починається викривлення, зростає, коли розглядати щоразу віддаленіші ділянки від центру. Вона досягає максимуму на ділянці  $R \in [10; 11]$ кпс.



**Рис. 5.2.2.** Залежність Галактоцентричної відстані  $R_w$ , де починається викривлення, від

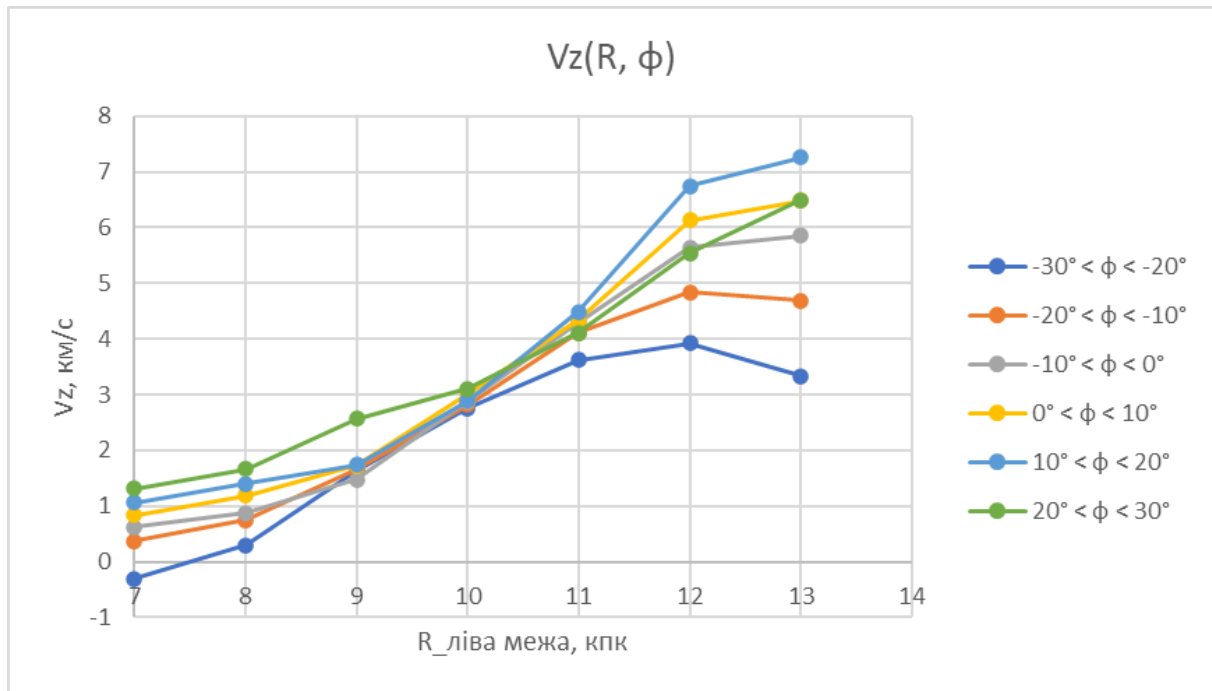
$R$ ,  $\phi$

Азимут, де починається викривлення, досягає найменшого значення на ділянці  $R \in [10; 11]$ кпс. Імовірно, що саме на  $R \in [10; 11]$ кпс функція вертикального руху має глобальний мінімум. Саме у цій дисковій частині він збігається з результатами дослідників (див. перший розділ “Огляд літератури”).



**Рис. 5.2.3.** Залежність азимута, де починається викривлення, від  $R$ ,  $\phi$

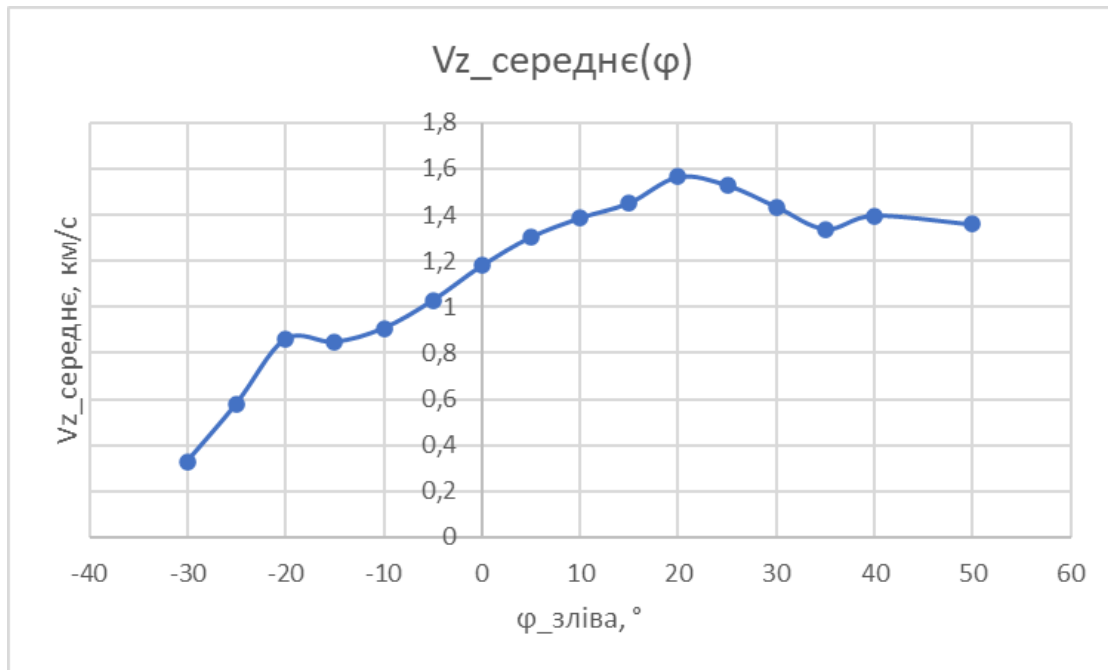
Були обчислені найменша та найбільша висота над Галактичним диском за моделлю (5.1). Найбільша (північна) висота рівна 0.36637 кпс, найменша (південна) висота — — 0.808436 кпс. Цей результат свідчить про несиметричне викривлення.



**Рис. 5.2.4.** Графік зміни вертикального руху  $V_z$  на різних Галактичних ділянках

На *Рис. 5.2.4.* видно, що на розглянутих Галактичних ділянках вертикальна швидкість збігається поблизу  $R \in [10; 11]$  кпс. Далі вона збільшується й досягає максимуму поблизу  $R = 14$  кпс,  $\phi \in [10; 20]^\circ$ . Найбільша спостережувана вертикальна швидкість рівна майже 7.5 км/с. Цей результат близький до того, що отримали Poggio et al. (2018) [23], Chen et al. (2019) [24], Nurhidayat et al. (2022) [37].

Вертикальний рух — кінематична ознака викривлення. Тому зважаючи на ненульову вертикальну швидкість, можна зробити висновок, що Галактичний диск викривлений. Імовірно, що амплітуда викривлення найбільша на  $R \in [10; 12]$  кпс.



**Рис. 5.2.5.** Графік залежності середнього вертикального руху  $V_z$  від азимута. Усереднення  $V_z$  було проведене в діапазоні  $\phi_{\text{межа зліва}} \in [-30; 50]^\circ$ , без обмежень Галактоцентричної відстані  $R$

Якщо досліджувати  $V_z$  і не обмежувати Галактоцентричну відстань  $R$ , то отриманий результат близький до наявних результатів параметрів. Імовірно, викривлення має найбільшу амплітуду в азимутних межах  $\phi \in [10; 30]^\circ$ .

### 5.3. Порівняння отриманих результатів із результатами інших дослідників

Отримані параметри Галактичного викривлення з моделі  $V_z$ :

1. збігаються за лінійною залежністю від Галактичної відстані; збігаються за  $\phi_w$  на Галактичній ділянці  $R \in [10; 12]$  кпс;  $\phi \in [-30; 30]^\circ$ ; збігається амплітуда викривлення в межах похибки зі статтею López-Corredoira et al. (2014) [22].
2. найкраще збігається з параметрами викривлення в лінійній моделі зі статті Chen et al. (2019) [24] на Галактичній ділянці  $R \in [11; 12]$  кпс;  $\phi \in [-30; 30]^\circ$ .

3. погано збігається з результатом зі статті Chrobáková et al. (2020) [25] через іншу обрану модель висоти;
4. збігається за лінійною залежністю від Галактичної відстані та додатними величинами амплітуди викривлення за статтею Li et al. (2022) [36];
5. близькі параметри викривлення на малій Галактичній ділянці,  $R \in [11; 12]$  кпс;  $\phi \in [-10; 10]^\circ$ , до результатів статті Nurhidayat et al. (2022) [37];
6. близькі параметри викривлення на Галактичній ділянці  $R \in [11; 12]$  кпс;  $\phi \in [-10; 10]^\circ$  до результатів статті Li et al. (2019) [43].

Середні параметри Галактичного викривлення на Галактичній ділянці  $R \in [7; 13]$  кпс,  $\phi \in [-30; 30]^\circ$ :  $\phi_w = 41.0003 \pm 0,005464^\circ$ ,  $R_w = 7.06574 \pm 0,000581$  кпс,  $\gamma = 0.047895 \pm 0,00000028$ , — добре збігаються зі степеневою моделлю зі статті Chen et al. (2019) [24].

## Висновок

Отже, було виявлене Галактичне викривлення з середніми параметрами:  $\phi_w = 41.0003 \pm 0,005464^\circ$ ,  $R_w = 7.06574 \pm 0,000581$  кпс,  $\gamma = 0.047895 \pm 0,00000028$ . Цей результат стосується всієї зоряної популяції, не обмеженої за зоряною величиною чи віком. Отримані параметри були отримані на основі даних Gaia DR3.

Північне викривлення лежить у межах  $-2,4563 \pm 0,004671^\circ < \phi < 69,2922 \pm 0,001137^\circ$ , і південне викривлення лежить у межах  $177,5437 \pm 0,004671^\circ < \phi < 249,2922 \pm 0,001137^\circ$ . Вони визначені, спираючись на кільцеву Галактичну модель, де північне та південне викривлення розділені в просторі 180 градусами. Найбільша (північна) висота над Галактичним диском рівна 0.36637 кпс, найменша (південна) висота — — 0.808436 кпс.

Отримані параметри викривлення відрізняються від тих, що отримували в інших статтях. Серед важливих чинників, що впливають на результат, можна виділити:

1. опорний каталог та точність його даних;
2. щоразу більша похибка обчисленої відстані, коли віддалятися від Сонця;
3. сталі величини (компоненти Сонячної швидкості, відстань до Сонця, висота Сонця над Галактичною площиною);
4. вибраний нелінійний метод найменших квадратів;
5. врахована чи не врахована прецесія Галактичного диска;
6. розглянута модель галактичного диска та (на її основі) модель висоти, вертикальної швидкості.

Гіпотези про причини появи галактичного викривлення можна сформулювати, якщо працювати з різними зоряними популяціями (червоними гігантами, ОВ-зорями, цефеїдами тощо). Такий аналіз вдасться зробити, знаючи про відмінності між ними. Поширена гіпотеза серед дослідників Галактичного викривлення полягає в залежності амплітуди викривлення від віку зоряної популяції. У майбутніх дослідженнях вона може бути або підтверджена, або спростована. Для цього потрібні точні положення та швидкості Галактичних об'єктів. Наступні випуски даних місії Gaia, ймовірно, можуть бути використані, щоб з'ясувати причину (чи причини) появи викривлення Чумацького Шляху.

## Перелік використаних джерел

1. J. Garcia de la Cruz, M. Martig, I. Minchev 2023, MNRAS 518, 5403-5413
2. Van Der Kruit P., Searle L., 1981, A&A, 95, 105
3. Sanchez-Saavedra M. L., Battaner E., Guijarro A., Lopez-Corredoira M., Castro-Rodriguez N., 2003, A&A , 399, 457
4. Garcia-Ruiz I., Sancisi R., Kuijken K., 2002, A&A , 394, 769
5. Schwarzkopf U., Dettmar R. J., 2001, A&A , 373, 402
6. Semczuk M., Lokas E. L., D’Onghia E., Athanassoula E., Debattista V. P., Hernquist L., 2020, MNRAS, 498, 3535
7. Shen J., Sellwood J. A., 2006, MNRAS , 370, 2
8. Ostriker E. C., Binney J. J., 1989, MNRAS , 237, 785
9. Jiang I. G., Binney J., 1999, MNRAS , 303, L7
10. Lopez-Corredoira M., Cabrera-Lavers A., Garzon F., Hammersley P. L., 2002, A&A , 394, 883
11. S. Haan, R. Braun 2014, MNRAS 440, L21-L25
12. Battaner E., Jimenez-Vicente J., 1998, A&A, 332, 809
13. Weinberg M. D., Blitz L., 2006, ApJ , 641, 33
14. Revaz Y., Pfenniger D., 2004, A&A , 425, 67
15. Sellwood J. A., Nelson R. W., Tremaine S., 1998, ApJ , 506, 590
16. Binney J. J., Tremaine S. D. Galactic Dynamics: підручник. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press, 2008. 920 p. Binney J. J., Tremaine S. D. Galactic Dynamics: підручник. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press, 2008. 920 p.
17. Briggs F. H. 1990, ApJ, 352, 15-29
18. Burke, Bernard F. 1957, ApJ, 62, 90
19. Westerhout G. 1957, B.A.N., 13, 201
20. Henderson A. P., Jackson P. D., Kerr F.J. 1982, ApJ, 263, 116-122

21. Burton, Butler W. 1988, Galactic and extragalactic radio astronomy (2nd edition) (A89-40409 17-90). Berlin and New York, Springer-Verlag, 1988, p. 295-358
22. López-Corredoira et al. 2014, A&A, 572, A101
23. Poggio et al. 2018, MNRAS 000, 1-5
24. Chen et al. 2019, Nature Astronomy, 3, 320-325
25. Chrobáková et al. 2020, A&A, 637, 17 pp.
26. López-Corredoira, M. & Sylos-Labini, F. 2019, A&A, 621, A48
27. Lucy, L. B. 1974, ApJ, 79, 745
28. Anders, F., Khalatyan, A., Chiappini, C., et al. 2019, A&A, 628, A94
29. Skowron, D. M., Skowron, J., Mróz, P., et al. 2019b, Acta Astron., 69, 305
30. López-Corredoira, M., Garzon, F., Wang, H. F., et al. 2020, A&A, 634, A66
31. López-Corredoira, M., Cabrera-Lavers, A., Garzón, F., & Hammersley, P. L. 2002b, A&A, 394, 883
32. Levine, E. S., Blitz, L., & Heiles, C. 2006, ApJ, 643, 881
33. Li, C., Zhao, G., Jia, Y., et al. 2019, ApJ, 871, 208
34. López-Corredoira, M., Cabrera-Lavers, A., Garzón, F., & Hammersley, P. L. 2002a, A&A, 394, 883
35. Chrobáková et al. 2022, A&A, 664, 10 pp.
36. Li et al. 2022, ApJ, arXiv:2212.06051v1
37. Nurhidayat et al. 2022, Journal of Physics: Conference Series, 2214 012010
38. Dehnen et al. 2023, MNRAS 523, 1556-1564
39. Poggio E. , Drimmel R., Andrae R., Bailer-Jones C. A. L., Fouesneau M., Lattanzi M. G., Smart R. L., Spagna A., 2020, Nat. Astron. , 4, 590
40. Cheng X. et al., 2020, ApJ, 905, 49
41. Wang H. F. et al., 2020, ApJ, 897, 119
42. Chrobáková Z., Lopez-Corredoira M., 2021, ApJ, 912, 130
43. Li C. et al., 2019, ApJ, 871, 208
44. <https://gaiaverse.eu/the-gaia-mission/>

45. [https://en.wikipedia.org/wiki/Gaia\\_\(spacecraft\)#Scientific\\_instruments](https://en.wikipedia.org/wiki/Gaia_(spacecraft)#Scientific_instruments)
46. Gaia Collaboration et al. 2023, A&A, 674, A1
47. Akhmetov et al. 2023, MNRAS, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.08527>
48. <https://people.duke.edu/~hpgavin/ExperimentalSystems/lm.pdf>
49. <https://medium.com/@sarvagya.vaish/levenberg-marquardt-optimization-part-1-981f5777b1d7>
50. <https://medium.com/@sarvagya.vaish/levenberg-marquardt-optimization-part-2-5a71f7db27a0>
51. [https://eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main\\_Page](https://eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main_Page)
52. Uppal et al. 2024, MNRAS 527, Issue 3, pp. 4863-4873
53. Antoja, T., Helmi, A., Romero-Gómez, M., Katz, D., Babusiaux, C., Drimmel, R., Evans, D. W., Figueras, F. et al. 2018, NATURE, 561
54. <https://dc.zah.uni-heidelberg.de/ppmxl/q/cone/info>
55. <https://irsa.ipac.caltech.edu/data/2MASS/docs/>
56. <https://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allsky/>
57. <https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos>