

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.01.049>

УДК 524.6

М. Іщенко¹, М. Соболенко¹, П. Берцик^{2,1,3}, Т. Панамарьов^{4,5}

¹Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України,
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

²Астрономічний Інститут, Гейдельберзький університет,
Монхофштрассе 12-14, 69120, Гейдельберг, Німеччина

³Обсерваторія Конколи, Науково-дослідний центр астрономії і Науки про Землю,
дослідницька мережа Етвеш Лоранд, Центр передового досвіду ВАН,
Конколь Тхеге Міклош 15-17, 1121 Будапешт, Угорщина

⁴Астрофізичний інститут ім. Фесенкова
Обсерваторія 23, Алмати, Казахстан, 050020

⁵Центр теоретичної фізики Рудольфа Пайерлза,
Паркс Роуд, ОХ1 3РУ, Оксфорд, Великобританія

E-mail: marina@mao.kiev.ua

Статистичний аналіз ймовірності взаємодії кулястих скупчень одне з одним та з Галактичним центром за даними Gaia DR2 на космологічній часовій шкалі

Мета роботи — дослідження динамічної еволюції орбіт кулястих скупчень (КС). Для інтегрування орбіт назад у часі ми застосували моделі змінних у часі потенціалів, отриманих в результаті космологічного моделювання, які є найближчими до потенціалу Галактики. Це дає нам можливість оцінити ймовірність близьких проходжень («зіткнень») КС одне з одним та з Галактичним центром (ГЦ) в Галактиці, що динамічно змінювалась у минулому. Для відтворення динаміки Галактики у часі ми використали п'ять з 54 потенціалів, які були попередньо відібрані з великомасштабної космологічної бази даних IllustrisTNG-100 та які за своїми характеристиками (маса та розміри диску і гало) подібні до фізичних величин Молочного Шляху на цей час. У цих змінних в часі потенціалах за допомогою нашого власного N-тільного паралельного динамічного коду високого порядку «-GPU» ми відтворили орбітальні траєкторії 143 КС на 10 млрд років назад у часі. Кожне КС вважалось однією окремою фізичною частинкою, якій були призначені положення та швидкість центра КС зі спостережень Gaia DR2. Для кожного з потенціалів генерувались 1000 початкових умов з рандомізованими початковими швидкостями для КС у межах похибок спостережних даних. В цій роботі близькими

© М. ІЩЕНКО, М. СОБОЛЕНКО, П. П. БЕРЦИК, Т. ПАНАМАРЬОВ, 2023

проходженнями ми вважаємо такі проходження, яким характерні відносні відстані, менші за 100 пк, та відносні швидкості, менші за 250 км/с. Проходження скупчень на більш далеких відстанях та/або з вищими швидкостями не мають істотного динамічного впливу на орбіти КС. На наш погляд, найбільші зміни у орбітах скупчень можуть викликатися проходженнями скупчень з низькими швидкостями на відстанях, менших, ніж чотири суми радіусів півмас скупчень. Тому ми розглядаємо такі близькі проходження окремо (для стислості, такі проходження ми називатимемо «зіткненнями»). Для відбору скупчень, які мали близькі проходження з ГЦ, ми застосували критерій тільки по відносній відстані: вона має бути меншою за 100 пк. Застосовуючи наведені вище критерії, ми отримали статистично суттєві темпи близьких проходжень КС одне з одним та з ГЦ і встановили, що під час своєї еволюції КС зазнають в середньому приблизно 10 проходжень одне з одним та приблизно 3-4 близьких проходжень КС поблизу ГЦ за 1 млрд років на відстані в 50 пк для кожного з обраних потенціалів.

Ключові слова: чисельні методи, Галактичні кулясті скупчення, еволюція Галактики, «IllustrisTNG-100», кінематика та динаміка Галактики, центр Галактики

ВСТУП

Згідно з космологічною моделлю Λ CDM кулясті скупчення (КС) є першими зоряними асоціаціями, що утворилися в ранньому Всесвіті та є гравітаційно зв'язаними зоряними системами за віком старше 10...12 млрд років (10...12 гігароків) [28] і з середніми теперішніми масами порядку $10^5 M_{\odot}$ [17]. Ці древні залишки зберігають в собі відбиток ранньої активної епохи формування нашої Галактики [12]. Таким чином, ці об'єкти можна використовувати як потужний інструмент для вивчення галактичної структури та історії формування самої Галактики в різних масштабах — від утворення зоряних скупчень до ієрархічних подій «галактичного канібалізму» [18].

Беручи до уваги час, який скупчення проводять у нашій Галактиці, ми припускаємо, що під час своєї орбітальної еволюції вони мали можливість близьких проходжень одне з одним та навіть могли взаємодіяти одне з одним під час «зіткнень», обмінюючись зоряним населенням. Ми також припускаємо, що певний тип орбіт КС мав проходити поблизу Галактичного центра (ГЦ). Також варто відмітити, що такі близькі проходження КС поблизу ГЦ могли стати джерелом втрати КС зоряного населення, яке частково могло перейти до області ядерного зоряного скупчення в ГЦ.

Для того щоб спробувати відтворити, хоча б наближено, структуру Галактики, ми взяли дані з бази космологічного моделювання «IllustrisTNG-100» та методом наближення (апроксимація) створили

декілька чисельних потенціалів, що змінюються у часі. Ці космологічні моделі є одними з найкращих на сьогодні [25]. Отримані нами динамічні потенціали мають основні параметри, що є близькими до параметрів нашої Галактики, таких як маса і розмір гало, а також сучасна маса і розмір диска [20].

Для відтворення орбітального інтегрування КС назад у часі ми використали зведений каталог, створений на основі каталогів [6, 32]. Об'єднаний каталог має 152 об'єкти та зберігає повну просторово-фазову 6D-інформацію для кожного з них. Високоточні астрометричні вимірювання, такі як положення та швидкість з цих каталогів, отримані з Gaia Data Release 2 [11], дозволяють нам реконструювати траєкторію орбіт КС з високою точністю при інтегруванні до 10 млрд років назад у часі.

Варто відмітити, що з появою досить точних оцінок положень та швидкостей КС в останні роки почали з'являтися роботи, присвячені дослідженню кінематики та хімічного складу КС. Так, у роботі [3] було використано інтегрування орбіт у часі для дослідження залежності типу параметрів орбіт від вмісту металів, що міститься у КС, і отримано висновок, що орбіти більшість багатих на метали скупчень мають малий ексцентриситет і кутові моменти та орбітальні площини, як у диску Галактики.

В роботах [26, 27] виконувалось інтегрування КС у незмінному потенціалі і встановлено, що приблизно 30 % скупчень, що вважались належними до балджу на основі їхніх положень, — в дійсності лише проходять повз внутрішню зону Галактики. Скоріше за все, вони належать до внутрішнього гало або компонента товстого диска. Більшість КС, які, як підтверджено, належать балджу, не дотримуються структури бару і є старшими за епоху формування самого бару.

Цікавими є роботи [1, 2, 13, 22, 29], у яких методом інтегрування КС у несиметричному потенціалі з такими компонентами, як бар та спіральні рукави, що є подібними до нашої Галактики, досліджувались орбітальні характеристики та швидкості руйнування КС внаслідок проходження через диск та балдж.

ЗВЕДЕНИЙ КАТАЛОГ КУЛЯСТИХ СКУПЧЕНЬ

Перед тим як почати виконувати орбітальне інтегрування КС, ми виконали оцінку даних спостережень, що наведено в каталогах [6, 32] за даними Gaia Data Release 2 (DR2). Каталоги містять просторово-фазову 6D-інформацію для кожного з 152 КС, а саме: пряме сходження RA , схилення DEC і геліоцентричну відстань D_{\odot} ; власні рухи за прямим сходженням $PMRA$, за схиленням $PMDEC$ та радіальну швидкість V_R . Зосередивши аналіз похибок саме для власних рухів КС, ми відкинули з подальшого інтегрування ті об'єкти, що мали відносну похибку більше 30 % для радіальної швидкості та власних рухів [10].

Для перетворення положень і швидкостей, отриманих із названих каталогів, у галактоцентричну систему відліку [16] ми прийняли відстань Сонця від ГЦ як $X_{\odot} = 8.178$ кпк [14] та $Z_{\odot} = 20.8$ пк. Швидкість локального стандарту спокою (ЛСС) $V_{\text{ЛСС}} = 234.737$ км/с [20], а також пекулярну швидкість Сонця відносно ЛСС, $U_{\odot} = 11.1$ км/с, $V_{\odot} = 12.24$ км/с, $W_{\odot} = 7.25$ км/с [31]. Таким чином, ми отримали зведений каталог зі 143 КС для подальшого дослідження.

Для того щоб перевірити можливий вплив похибок вимірювань на отримані результати, перш за все вплив похибок власних рухів та радіальної швидкості, ми згенерували 1000 випадкових реалізацій початкових умов для кожного КС. В кожній реалізації положення (RA , DEC , D_{\odot}) залишались незмінними, а для власних рухів $PMRA$, $PMDEC$ та радіальної швидкості V_R ми застосували функцію нормального розподілу у межах ± 1 . Значення похибок власних рухів $ePMRA$ і $ePMDEC$ та радіальної швидкості eV_R ми взяли з каталогу [32].

Для виконання орбітального інтегрування ми використали паралельний динамічний N -тільний код високого порядку «-GPU», який базується на схемі інтегрування Ерміта четвертого порядку з ієрархічною схемою індивідуальних блочних кроків [7, 15]. Кожне КС приймалось як одна фізична частинка, якій були призначені положення та швидкість центру КС зі спостережень, яка інтегрувалась до 10 млрд років назад у часі з власною масою (постійна в часі), отриманою на сьогодні з каталогу [6]. Під час інтегрування орбіт також бралась до уваги гравітаційна взаємодія КС між собою.

ЗМІННІ В ЧАСІ ПОТЕНЦІАЛИ

Для того щоб прив'язати інтегрування орбіт КС до реальної структури Галактики, ми використали дані з бази космологічного моделювання «IllustrisTNG-100» та методом наближення (апроксимація) отримали зовнішні динамічні потенціали. База даних «IllustrisTNG-100» має характерний об'єм 100 Мпк^3 та є другим за роздільною здатністю космологічним моделюванням TNG із загальнодоступних даних. Таким чином, «IllustrisTNG-100» достатньо об'ємний, щоб вмістити багато розділених галактик, подібних до Молочного Шляху. Роздільна здатність по масі в TNG-100 становить $7.5 \cdot 10^6 M_{\odot}$ і $1.4 \cdot 10^6 M_{\odot}$ для темної матерії та баріонних частинок відповідно. Враховуючи, що галактики, подібні до Молочного Шляху, мають гало темної матерії масою порядку $10^{12} M_{\odot}$ і диск масою порядку $10^{10} M_{\odot}$, ми ідентифікуємо моделі галактик-кандидатів з $N = 10^5 \dots 10^6$ темної матерії та $N = 10^3 \dots 10^4$ баріонної матерії.

Для апроксимації складеного Галактичного потенціалу за даними TNG-100 ми застосували формулу, де диск Міямото — Нагаї [21] та гало Наварро — Френка — Вайта [24] представлено у вигляді

$$\Phi_{tot}(R, z) = \Phi_D(R, z) + \Phi_H(R, z) = \frac{GM_D}{\sqrt{R^2 + (a_D + \sqrt{z^2 + b_D^2})^2}} + \frac{GM_H \ln(1 + \sqrt{R^2 + z^2} / b_H)}{\sqrt{R^2 + z^2}},$$

де $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ — відстань у галактоцентричній площині $X—Y$, z — висотна складова диску, G — гравітаційна стала, a_D — характерна горизонтальна довжина диску, $b_{D,H}$ — характерна вертикальна довжина диску та гало відповідно, M_D та $M_H = 4 \rho_0 b_0^3$ — маса диска та гало відповідно (ρ_0 — центральна щільність гало).

Щоб отримати силу тяжіння, що залежить від часу, ми виконали інтерпольовання між параметрами кожного часового зрізу (снэпшоту) у 1 млн років. Такими чином, з 54* потенціалів ми відібрали п'ять, подібних за своїми характеристиками до сучасних параметрів Молочного Шляху [4, 8, 9]. У табл. 1 для п'яти обраних потенціалів наведено значення повних динамічних мас диска та гало M_D та M_H , характерних довжин для диска та гало a_D , b_D , b_H . Детально ця процедура описана в роботі [20].

Таблиця 1. Параметри потенціалів, що змінюються у часі, обрані з космологічної бази даних «IllustrisTNG-100»

Параметр	Значення	Потенціал				
		#411321	#441327	#451323	#462077	#474170
M_D	$10^{10} M_\odot$	7.110	7.970	7.670	7.758	5.825
M_H	$10^{12} M_\odot$	1.190	1.020	1.024	1.028	0.898
a_D	1 кпк	2.073	2.630	2.630	1.859	1.738
b_D	1 кпк	1.126	1.356	1.258	1.359	1.359
b_H	10 кпк	2.848	1.981	2.035	2.356	1.858

На рис. 1 наведено еволюцію головних характеристик диска та гало для TNG-потенціалу #4113217, а на рис. 2 — еволюцію колової швидкості на відстані Сонця ($R_\odot = 8$ кпк) в галактичному диску як функції назад у часі T_{back} . Видно, що за декілька останніх гігароків значення основних параметрів TNG-потенціалу не змінювались у часі та приблизно збігаються з сучасними значеннями параметрів нашої Галактики.

ОЦІНКА ЙМОВІРНОСТІ ВЗАЄМОДІЇ КУЛЯСТИХ СКУПЧЕНЬ ОДНЕ З ОДНИМ

Враховуючи вік таких об'єктів у Галактиці, як КС, можна передбачити, що під час своєї орбітальної еволюції вони мали певний відсоток ймовірності того, щоб провзаємодіяти одне з одним. Також можливо

* <https://sites.google.com/view/mw-type-sub-halos-from-illustr/>

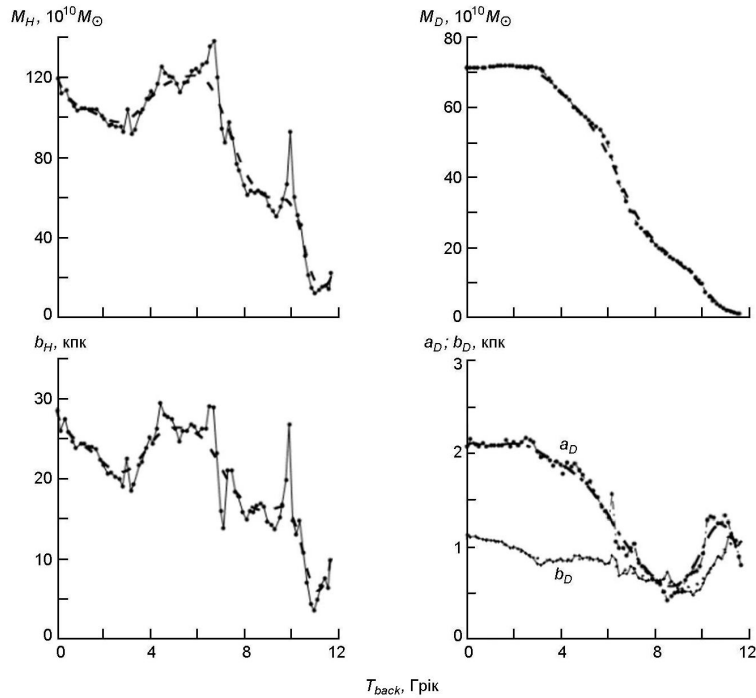


Рис. 1. Еволюція маси гало M_H , маси диску M_D , вертикальної довжини гало b_H , горизонтальної та вертикальної довжин диску a_D та b_D у випадку TNG-потенціалу #411321. Точки — оригінальні дані IllustrisTNG-100, штрихові лінії — згладжені апроксимаційні значення, використані в роботі

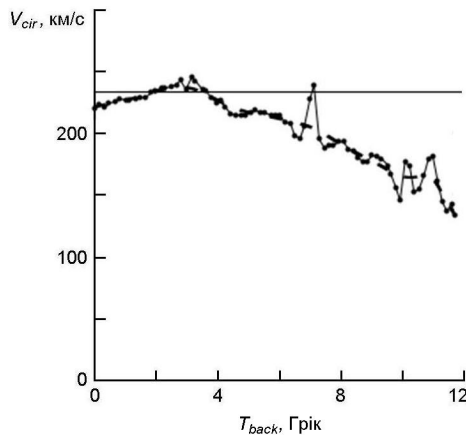


Рис. 2. Еволюція колової швидкості на відстані Сонця ($R_{\odot} = 8$ кпк) в Галактичному диску як функція назад у часі. Горизонтальна пряма — сучасна швидкість обертання Сонця ($V_{\odot} = 235$ км/с [20])

припустити обмін зоряним населенням під час близького проходження одне з одним. Мета нашого першого дослідження полягає у перевірці цього припущення зі статистичної точки зору.

Для виконання цього дослідження ми використали паралельний динамічний N -тільний код високого порядку «-GPU» [7, 15]. Орбітальне інтегрування було виконано для 143 систем КС з нашого зведеного каталогу на 10 млрд років назад у часі (T_{back}). Кожне КС інтегрувалося як одна окрема фізична частинка, яка має власну масу, значення якої взято з каталогу [6].

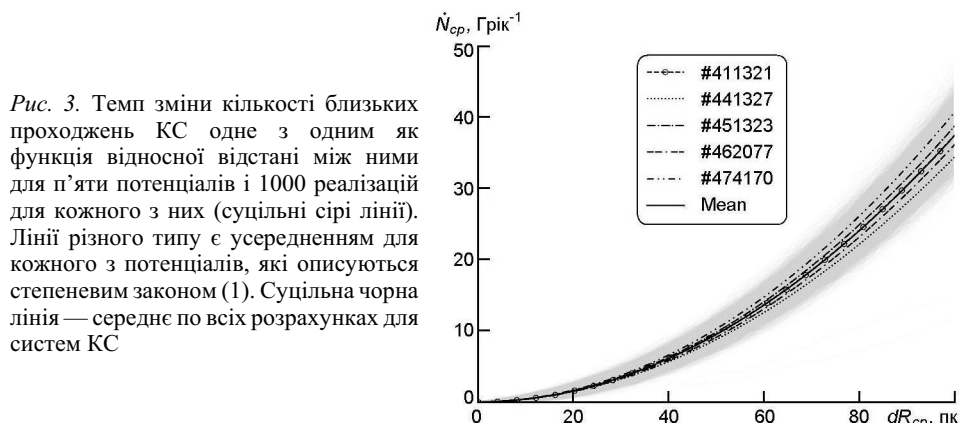


Рис. 3. Темп зміни кількості близьких проходжень КС одне з одним як функція відносної відстані між ними для п'яти потенціалів і 1000 реалізацій для кожного з них (суцільні сірі лінії). Лінії різного типу є усередненням для кожного з потенціалів, які описуються степеневим законом (1). Суцільна чорна лінія — середне по всіх розрахунках для систем КС

Використовуючи 1000 реалізацій з різними початковими швидкостями, ми можемо приблизно оцінити, наскільки велика ймовірність отримати близьке проходження КС одне з одним під час еволюції. Такі моделювання були виконані для п'яти обраних нами зовнішніх галактичних потенціалів, щоб відтворити структуру зміни потенціалу Галактики.

Ближкими проходженнями (close passage - cp) ми вважаємо такі проходження, що мають відносну відстань, меншу за 100 пк, та відносну швидкість, меншу за 250 км/с [5]. Ми вважаємо, що проходження скупчень на більших відстанях та/або з більшими швидкостями не мають істотного впливу на орбіти КС. Тому такі проходження не аналізуються в цій роботі.

Для аналізу загальної кількості близьких проходжень КС одне з одним ми підраховали кумулятивне число $\dot{N}_{cp} = dN_{cp}/dt$ проходжень КС як функцію мінімального прицільного параметра dR_{cp} , представлено на рис. 3. Як і очікувалось, розподіл може бути описаний простою степеневою функцією прицільного параметра:

$$\dot{N}_{cp} = \frac{dN_{cp}}{dt}(dR_{cp}) = 10^{a \lg(dR_{cp}) + b}, \quad (1)$$

де N_{cp} — кількість близьких проходжень КС одне з одним, a та b — параметри степеневої функції (див. табл. 2).

Як можна бачити з табл. 2, для всіх п'яти потенціалів параметри a та b степеневої функції (рівняння 1) мають малий розкид: $a = 1.98 \pm 0.14$ та $b = -2.39 \pm 0.29$. Тобто, темп проходжень описується простою квадратичною формулою $dN_{cp}/dt = (dR_{cp})^2$, що з загальних міркувань є наслідком формули площі перерізу КС, яку може перетнути інше КС. узагальнюючи дані рис. 3, можна зробити висновок, що на відносній відстані в 50 пк в середньому очікуємо приблизно 10 проходжень КС за 1 млрд років.

На наш погляд, найбільші зміни у орбітах можуть бути викликані проходженнями скупчень з низькими швидкостями на відстанях,

Таблиця 2. Параметри a та b для темпу взаємодії КС одне з одним (рівняння 1) для п'яти потенціалів

Номер потенціалу	a	b
#411321	1.98 ± 0.16	-2.38 ± 0.31
#441327	1.97 ± 0.17	-2.41 ± 0.34
#451323	1.99 ± 0.11	-2.38 ± 0.23
#462077	1.99 ± 0.15	-2.43 ± 0.30
#474170	1.99 ± 0.14	-2.37 ± 0.28
Середнє	1.98 ± 0.14	-2.39 ± 0.29

менших, ніж декілька сум радіусів півмас скупчень i та j . Далі ми розглядаємо такі проходження, для яких виконується умова $dR_{cp} < 4(R_{hm,i} + R_{hm,j})$. Для стислості такі проходження ми називатимемо «зіткненнями».

Для аналізу статистичної ймовірності таких «зіткнень» КС одне з одним ми використали 3D-Мортон-послідовність для їхнього сортування [19, 23, 30]. На рис. 4 градацією сірого кольору приведено значення статистичної ймовірності p зіткнень на основі величин енергії E , повного кутового моменту L та z -складової кутового моменту L_z для кожного КС. Застосування цього аналізу дозволяє замінити тривимірний розподіл на одновимірний. Вздовж цього одновимірного розподілу ми сортуємо систему КС. У правому нижньому куті рис. 4 наведено положення індивідуальних КС у тривимірному просторі нормованих величин $E-L-L_z$ для потенціалу #411321. Градацією сірого кольору позначено порядок КС після Мортон-аналізу.

Як можна бачити з розподілу ймовірності на рис. 4, певні групи КС, відсортовані за фізичними параметрами (енергія, повний кутовий момент, z -складова кутового моменту), утворюють досить високий відсоток ймовірності «зіткнення» за результатами 1000 реалізацій моделювань.

Проаналізувавши результати для 1000 моделей і для кожного з п'яти потенціалів, ми визначили ймовірний відсоток, при якому могла відбутись така подія. У табл. 3 наведено приклади КС, які з високою ймовірністю мають «зіткнення» одне з одним для усіх п'яти потенціалів. Відсоток пораховано для всіх п'яти потенціалів та наведена середня величина. Також наведені величини радіусів півмаси для відповідних КС у пк.

Таким чином, ми проаналізували статистичні дані ймовірності взаємодії КС одне з одним, отримані з 1000 реалізацій з різними початковими умовами (варіювання швидкостей по трьох координатних компонентах у галактоцентричній системі відліку у межах похибки вимірювань). Інтегрування орбіт КС було виконано на 10 млрд років назад у часі з використанням п'яти потенціалів для відтворення реалістичності зміни фізичних параметрів Галактики. Дослідивши функцію відносної відстані між всіма КС, відібраних за двома критеріями (взаємна відстань та швидкість між КС), ми маємо приблизно 10

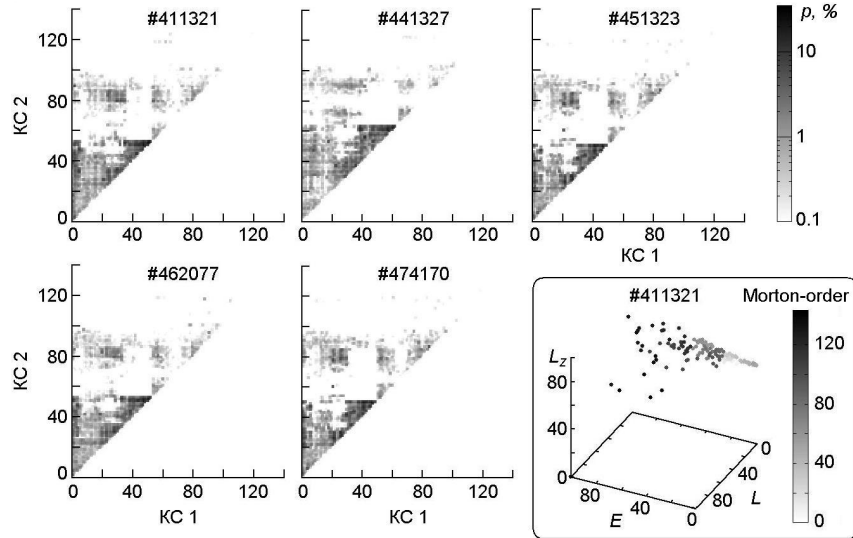


Рис. 4. Статистична ймовірність p «зіткнення» (у градаціях сірого; чорному кольору відповідає значення $p = 30\%$) КС одне з одним для п'яти потенціалів після сортування об'єктів методом Мортон-аналізу. Числа по осях — індекси КС, отримані методом Мортон-аналізу. Справа внизу — положення індивідуальних КС у тривимірному просторі нормованих величин $E-L-L_z$ для потенціалу #411321. Градацією сірого кольору позначено порядок КС після Мортон-аналізу

Таблиця 3. Приклад декількох КС, які мають високий відсоток ймовірності події «зіткнення» одне з одним для п'яти потенціалів

КС 1	R_{hm1} , пк	КС 2	R_{hm2} , пк	$p, \%$					Середнє
				#411321	#441327	#451323	#462077	#474170	
Terzan 4	4.13	NGC 6440	2.20	25.0	24.0	29.1	22.8	30.0	26.2 ± 3.2
		Terzan 5	2.22	20.0	11.0	21.2	15.4	22.4	18.0 ± 4.7
		Terzan 9	1.83	27.5	16.3	21.4	25.7	28.3	23.8 ± 5.0
		NGC 6624	2.57	21.5	13.0	22.4	23.9	25.2	21.2 ± 4.8
Terzan 2	3.70	Terzan 4	4.13	21.3	20.3	28.7	21.8	21.8	22.8 ± 3.4
		Terzan 6	2.58	15.8	12.3	19.9	13.4	21.4	16.6 ± 4.0

близьких проходжень за 1 млрд років на відстані менш ніж 50 пк для кожного з потенціалів. За умови застосування трьох критеріїв (додаткове обмеження на взаємну відстань) ми отримали значну ймовірність «зіткнення» до 30% одне з одним для деяких КС, наведених у табл. 3.

ОЦІНКА ЙМОВІРНОСТІ ВЗАЄМОДІЇ КУЛЯСТИХ СКУПЧЕНЬ З ГАЛАКТИЧНИМ ЦЕНТРОМ

Друга мета нашого дослідження полягає у визначенні ймовірності подій близького проходження КС з ГЦ.

Для того щоб підрахувати кількість проходжень КС з ГЦ, ми застосували критерій мінімальної відстані КС до ГЦ, яка не повинна

перевищувати 100 пк. Для цього завдання ми також використали паралельний динамічний N -тільний код високого порядку «-GPU». Орбітальне інтегрування було виконано також для 143 систем КС на 10 млрд років назад у часі.

Використовуючи 1000 реалізацій з початковими умовами ми можемо приблизно оцінити ймовірність близького проходу КС поблизу ГЦ під час своєї еволюції. Такі моделювання були виконані для п'яти обраних нами раніше зовнішніх галактичних потенціалів. Проаналізувавши результати отриманих проходжень КС поблизу ГЦ для 1000 реалізацій, ми визначили середній відсоток ймовірності, при якому могли відбутися такі події.

У табл. 4 наведено перелік КС, що мають різний відсоток ймовірності близьких проходжень з ГЦ для усіх п'яти потенціалів. Відсоток пораховано для кожного з КС для всіх потенціалів та визначено середнє значення для кожного з КС.

На рис. 5 наведено приклади еволюції орбіт скупчень NGC 1904, Pal 6, NGC 6642 та NGC 6981, що задовольняють вимогу близького проходження біля ГЦ до 100 пк для потенціалу #411321. Орбіти наведено у трьох координатних площинах $X—Y$, $X—Z$ та $R—Z$, де $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ — відстань у галактоцентричній площині $X—Y$. Видно, що орбіти КС еволюціонують з часом. Зі зменшенням загальної маси диску та гало Галактики орбіти КС відходять з часом на більшу відстань.

На рис. 6 показано зміни відстані від ГЦ до КС NGC 1904, Pal 6, NGC 6642 та NGC 6981 для двох потенціалів з різними значеннями параметрів (a — #411321, b — #441231). Галактоцентричну відстань розраховано за формулою $D_G = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Видно, що близькі проходження відбуваються майже під час всієї орбітальної еволюції КС. Варто відмітити, що на графіку не завжди можна побачити проходження КС за межу в 100 пк. Це викликано тим, що для побудови графіків використано дані з відносно великим часовим кроком в 1.22 млн років, тоді як фіксування проходження КС до 100 пк відбувається «моментально» під час інтегрування орбіти аналізатором, вбудованим у сам код. Із порівняння відхилень галактоцентричної відстані для двох потенціалів видно, що є невеликі зміни у відстанях, викликані різними значеннями енергії потенціалів.

Таблиця 4. Ймовірність проходження поблизу ГЦ кількох вибраних КС (для п'яти потенціалів)

КС	$p, \%$					Середнє
	#411321	#441327	#451323	#462077	#474170	
NGC 1904	28.1	29.8	34.1	30.1	29.7	30.4 ± 2.2
Pal 6	0.7	0.6	25.1	12.4	0.8	7.9 ± 10.9
NGC 6642	64.3	30.3	96.7	85.1	95.9	75.6 ± 27.9
NGC 6981	45.8	43.6	54.0	41.9	52.6	47.6 ± 5.4

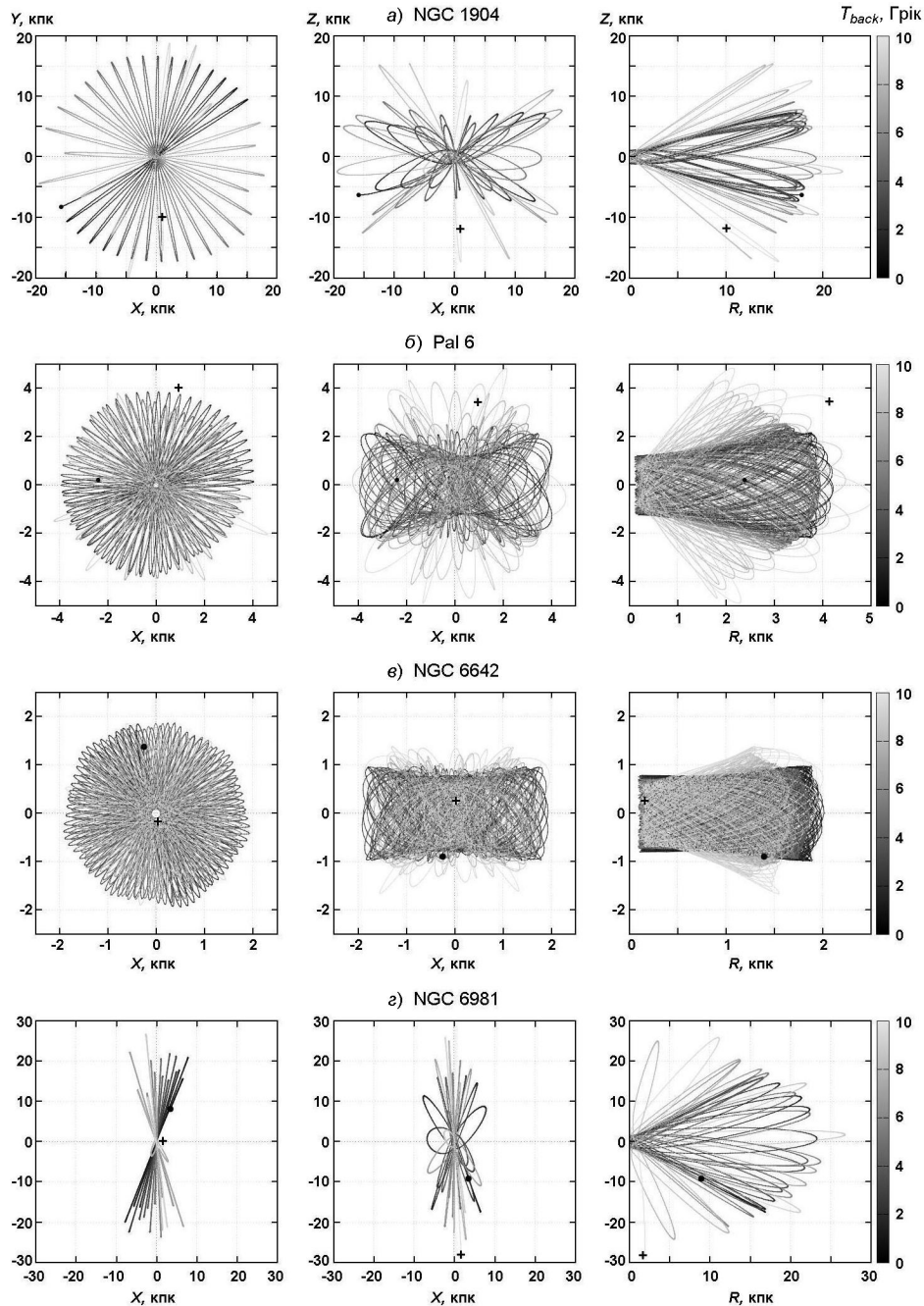


Рис. 5. Еволюції орбіт деяких КС, що мають близькі проходження біля ГЦ на відстані до 100 пк для потенціалу #411321: *a* — NGC 1904, *b* — Pal 6, *в* — NGC 6642, *г* — NGC 6981. Градацією сірого кольору позначено час інтегрування (до 10 млрд років назад у часі). Чорна точка та хрестик — початкові та кінцеві координати КС під час інтегрування у часі

Також ми оцінили кумулятивну величину взаємодії КС $\dot{N} \sim dN/dt$ з ГЦ, представивши її як функцію мінімального прицільного параметра D_G (рис. 7). Значення параметрів a , b апроксимації цієї функції степеним законом (1) приведено у табл. 5.

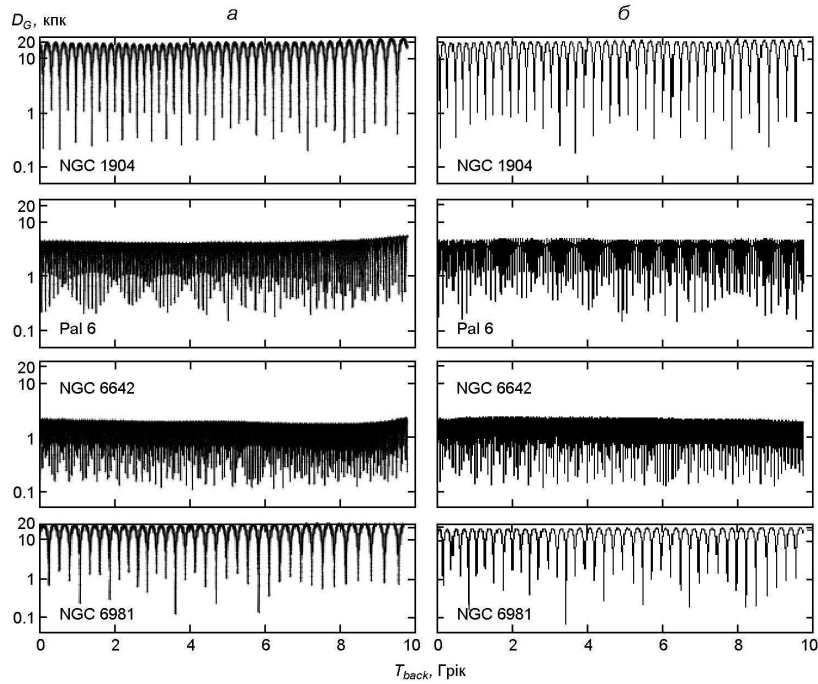


Рис. 6. Зміна галактоцентричної відстані $D_G = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ від ГЦ для КС NGC 1904, Pal 6, NGC 6642 та NGC 6981 під час орбітальної еволюції для потенціалів #411321 (а) та #441231 (б)

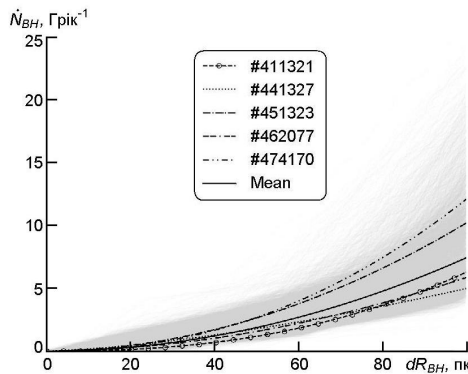


Рис. 7. Залежність темпу взаємодії КС з ГЦ від відносної відстані D_G до ГЦ для п'яти моделей потенціалів і 1000 реалізацій для кожного з них (суцільні сірі лінії). Суцільна чорна лінія — усереднена функція по всіх моделюваннях (див. табл. 5)

Як можна бачити з табл. 5, середні для всіх п'яти моделей потенціалів параметри a та b степеневі функції (1): $a = 2.00 \pm 0.54$ та $b = -3.12 \pm 1.01$. Тобто, темп близьких проходжень також наближено описується простою квадратичною формулою $dN_{cp}/dt \propto (D_G)^2$, але на відміну від даних табл. 2 бачимо значні відхилення від простої квадратичної залежності. Аналізуючи рис. 7, також можна зробити загальний висновок, що, наприклад, на відстані в 50 пк між КС та ГЦ відбуваються 3-4 близьких проходжень за 1 млрд років.

Таким чином, ми проаналізували статистичні дані ймовірності близьких проходжень КС поблизу ГЦ, отримані з 1000 реалізацій з різними початковими умовами. Інтегрування орбіт 143 КС було виконано на 10 млрд років назад у часі з використанням п'яти потенціалів.

Таблиця 5. Значення параметрів a та b апроксимації (1) для темпу взаємодії КС з ГЦ (для п'яти потенціалів)

Номер потенціалу	a	b
#411321	2.43 ± 0.67	-4.06 ± 1.26
#441327	1.91 ± 0.53	-3.06 ± 1.00
#451323	2.18 ± 0.55	-3.28 ± 1.01
#462077	1.96 ± 0.62	-2.90 ± 1.16
#474170	1.50 ± 0.35	-2.29 ± 0.65
Середнє	2.00 ± 0.54	-3.12 ± 1.01

За умови застосування критерію близького проходження КС поблизу ГЦ до 100 пк ми отримали високу ймовірність таких подій для деяких КС. Дослідивши функцію відносної відстані між КС та ГЦ, ми зафіксували, що приблизно 3-4 близьких проходжень за 1 млрд років відбувається на відстані до 50 пк для кожного з потенціалів.

ВИСНОВКИ

Ми дослідили динамічну еволюцію орбіт КС назад у часі на 10 млрд років, використовуючи змінні у часі потенціали, найближчі до фізичних параметрів потенціалу нашої Галактики. Інтегрування орбіт для 143 КС було виконано за допомогою нашого власного N -тільного паралельного динамічного коду високого порядку «-GPU». Для кожного з потенціалів генерувались 1000 вхідних файлів з рандомізованими початковими швидкостями для КС у межах похибок спостережних даних.

Для виявлення скупчень, які мають близькі проходження, ми використали два критерії: 1) відстань між КС повинна бути меншою за 100 пк, 2) значення відносної швидкості між КС має не перевищувати 250 км/с. Для виявлення КС, які мали потенційну можливість «зіштовхнутися» під час своєї еволюції, ми додали третій критерій, згідно з яким відстань між КС повинна бути меншою за чотири суми радіусів півмас цих скупчень.

Для виявлення скупчень, які мали близькі проходження з ГЦ, ми застосували критерій 1): вона має бути меншою за 100 пк.

Отримані результати дали позитивну відповідь на питання про можливість таких подій, а також дали змогу оцінити ймовірність близьких проходжень та можливість «зіткнення» КС одне з одним та з центральною надмасивною чорною дірою у минулому. Застосовуючи наведені вище критерії, ми отримали статистично суттєві темпи близьких проходжень КС одне з одним та з ГЦ на відстанях, менших за 100 пк. Ми встановили, що під час еволюції КС мають приблизно 10 близьких проходжень одне з одним та приблизно 3-4 проходжень поблизу ГЦ за 1 млрд років на відстані до 50 пк для кожного з потенціалів. Є також групи КС, що мають певні значення фізичних пара-

метрів (енергія, повний кутовий момент, z -складова кутового моменту), для яких ймовірність «зіткнень» доволі висока.

ПОДЯКИ

Автори вдячні рецензенту за зауваження, що покращили дослідження.

Частково робота Берцика П. та Панамарьова Т. підтримувалась в рамках фінансування Науковим комітетом Міністерства освіти і науки Республіки Казахстан (грант № AP08856184). Робота Іщенко М. та Соколенко М. підтримувалась в рамках науково-дослідного проєкту молодих вчених Національної академії наук України № 0121U111799. Роботу Берцика П. та Іщенко М. частково виконано за підтримки в рамках спільного гранту М/32-23.05. 2022 Міністерства освіти і науки України. Робота Берцика П., Іщенко М. та Соколенко М. частково виконувалась за підтримки «Volkswagen Foundation» в рамках гранту партнерства № 97778; П. Берцик вдячний за підтримку гранту 9В870. Роботу Берцика П. та Іщенко М. частково виконано за підтримки проєкту обчислювального кластера GPU № 13.2021.ММ Національної академії наук України. Соколенко М. вдячна за підтримку в рамках стипендії Національної академії наук України у 2020—2022 рр. Берцик П. та Іщенко М. висловлюють велику подяку за гостинність Астрономічному центру імені Миколая Коперника Польської академії наук, де було виконано частину робіт.

У цій роботі використано дані місії Європейського космічного агентства (ESA) GAIA (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), оброблених Консорціумом з обробки та аналізу даних GAIA (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). Фінансування DPAC було надано національними установами, зокрема установами, які беруть участь у Багатосторонній угоді GAIA.

REFERENCES

1. Allen C., Moreno E., Pichardo B. (2006) The orbits of 48 globular clusters in a Milky Way-like barred galaxy. *Astrophys. J.* 652 (2). 1150—1169.
2. Allen C., Moreno E., Pichardo B. (2008) Six new galactic orbits of globular clusters in a Milky Way-like galaxy. *Astrophys. J.* 674 (1). 237—246.
3. Armstrong B. M., Bekki K., Ludlow A. D. (2021) The orbital evolution of UFDs and GCs in an evolving Galactic potential. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 500 (3). 2937—2957.
4. Banik N., Bovy J. (2021) On N-body simulations of globular cluster streams. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 504 (1). 648—653.
5. Bajkova A., Bobylev V. (2021) Orbits of 152 globular clusters of the Milky Way galaxy constructed from Gaia DR2. *Res. Astron. and Astrophys.* 21 (7). 173—188.
6. Baumgardt H., Hilker M., Sollima A., et al. (2019) Mean proper motions, space orbits, and velocity dispersion profiles of Galactic globular clusters derived from Gaia DR2 data. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 482 (4). 5138—5155.
7. Berczik P., Nitadori K., Zhong S., et al. (2011) *High performance massively parallel direct N-body simulations on large GPU clusters*. International conference on High Performance Computing, Kyiv, Ukraine, October 8-10. 8—18.

8. Bovy J. (2015) galpy: A python library for Galactic dynamics. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 216 (2). id. 29, 27.
9. Bovy J., Kawata D., Hunt J. (2018) Made-to-measure modelling of observed galaxy dynamics. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 473 (2). 2288—2303.
10. Chemerynska I. V., Ishchenko M. V., Sobolenko M. O., et al. (2022) Kinematic characteristics of the Milky Way globular clusters based on Gaia DR-2 data. *Adv. Astron. and Space Phys.* 12 (1-2).
11. Gaia Collaboration, Helmi A., van Leeuwen F., et al. (2018) Gaia Data Release 2. Kinematics of globular clusters and dwarf galaxies around the Milky Way. *Astron. and Astrophys.* 616. A12—A59.
12. Garro E. R., Minniti D., Gymez M., et al. (2022) Inspection of 19 globular cluster candidates in the galactic bulge with the VVV survey. *Astron. and Astrophys.* 658. A120—A146.
13. Gnedin O. Y., Ostriker J. P. (1997) Destruction of the galactic globular cluster system. *Astrophys. J.* 474 (1). 223—255.
14. Gravity Collaboration, Abuter R., Amorim A., et al. (2019) A geometric distance measurement to the Galactic center black hole with 0.3 % uncertainty. *Astron. and Astrophys.* 625. L10—L20.
15. Harfst S., Gualandris A., Merritt D., et al. (2007) Performance analysis of direct N-body algorithms on special-purpose supercomputers. *New Astron.* 12 (5). 357—377.
16. Johnson D. R. H., Soderblom D. R. (1987) Calculating galactic space velocities and their uncertainties, with an application to the Ursa Major group. *Astron. J.* 93. 864—867.
17. Kharchenko N. V., Piskunov A. E., Schilbach E., et al. (2013) Global survey of star clusters in the Milky Way. II. The catalogue of basic parameters. *Astron. and Astrophys.* 558. A53—A61.
18. Kruijssen J. M. D., Pfeffer J. L., Chevance M., et al. (2020) Kraken reveals itself — the merger history of the Milky Way reconstructed with the E-MOSAICS simulations. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 498 (2). 2472—2491.
19. Lebesgue H. L. (1904) *Leçons sur l'intégration et la recherche des fonctions primitives*. Gauthier-Villars, Paris, France. 138.
20. Mardini M. K., Placco V. M., Meiron Y., et al. (2020) Cosmological insights into the early accretion of r-process-enhanced stars. I. A comprehensive chemodynamical analysis of LAMOST J1109+0754. *Astrophys. J.* 903 (2). 88—106.
21. Miyamoto M., Nagai R. (1975) Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies. *Publs Astron. Soc. Jap.* 27. 533—543.
22. Moreno E., Pichardo B., Velázquez H. (2014) Tidal radii and destruction rates of globular clusters in the Milky Way due to bulge-bar and disk shocking. *Astrophys. J.* 793 (2). 110—131.
23. Morton G. M. (1966) *A computer oriented geodetic database and a new technique in file sequencing*. IBM Ltd., Ottawa, Ontario, Canada. 20.
24. Navarro F., Frenk C., White S. (1997) A universal density profile from hierarchical clustering. *Astrophys. J.* 490(2). 493—508.
25. Nelson D., Springel V., Pillepich A., et al. (2019) The IllustrisTNG simulations: public data release. *Comput. Astrophys. and Cosmol.* 6 (1). 2—31.
26. Pérez-Villegas A., Barbuy B., Kerber L. O., et al. (2020) Globular clusters in the inner Galaxy classified from dynamical orbital criteria. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 491 (3). 3251—3265.
27. Pérez-Villegas A., Rossi L., Ortolani S., et al. (2018) Orbits of selected globular clusters in the Galactic Bulge. *Publs Astron. Soc. Austral.* 35. e021. 11.
28. Phipps F., Khochfar S., Varri A. L. (2020) *Hunting for globular clusters in the early universe*. Proc. IAU: Star Clusters: From the Milky Way to the Early Universe. 351. 212—215.
29. Pichardo B., Martos M., Moreno E. (2004) Models for the gravitational field of the

- galactic bar: An application to stellar orbits in the galactic plane and orbits of some globular clusters. *Astrophys. J.* 609 (1). 144—165.
30. Sagan H. (1994) *Space-filling curves*. Springer. New York. 193.
31. Schönrich R., Binney J., Dehnen W. (2010) Local kinematics and the local standard of rest. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 403 (4). 1829—1833.
32. Vasiliev E. (2019) Proper motions and dynamics of the Milky Way globular cluster system from Gaia DR2. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 484 (2). 2832—2850.

*M. Ishchenko*¹, *M. Sobolenko*¹, *P. Berczik*^{2,1,3}, *T. Panamarev*^{4,5}

¹Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine

²Astronomisches Rechen-Institut, Zentrum für Astronomie, University of Heidelberg, Heidelberg, Germany

³Konkoly Observatory, Research Centre for Astronomy and Earth Sciences, Eotvos Lorand Research Network (ELKH), MTA Centre of Excellence, Budapest, Hungary

⁴Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan

⁵Rudolf Peierls Centre for Theoretical Physics, Oxford, United Kingdom

STATISTICAL ANALYSIS OF THE PROBABILITY
OF GLOBULAR CLUSTERS INTERACTIONS WITH EACH OTHER
AND WITH THE GALACTIC CENTRE ACCORDING TO GAIA DR2 DATA
ON THE COSMOLOGICAL TIME SCALE

The main idea of the work is to study the dynamic evolution of the orbits of globular clusters (GCs) lookback in time obtained from the cosmological models that are closest to the potential of the Galaxy. This allows us to estimate the probability of close passages (“collisions”) of the GC with each other and with the Galactic central in the Galaxy that dynamically changed in the past. To reproduce the dynamics of the Galaxy in time, we used five from 54 potentials, which were selected from the large-scale cosmological database IllustrisTNG-100, and which in their characteristics (mass and size of disk and halo) are similar to the physical values of the Milky Way. In these potentials variable in time, we reproduced the orbital trajectories of 143 GC in 10 Gyr lookback in time using our own high-order N-body parallel dynamic code -GPU. Each GCs was treated as a single physical particle assigned the position and velocity of the GCs center from the Gaia DR2 observations. For each of the potentials, 1000 initial data were generated with randomized initial velocities for the GC within the observation data errors. We assumed that passages with a relative distance of less than 100 pc and a relative velocity of less than 250 km/s are close passages. Clusters passages at farther distances and/or with more high velocities do not have a significant dynamical effect on GCs orbits. In our opinion, more changes in GCs’ orbits can be produced by clusters passages with low velocities and at distances less than (as an example, 4) several sums of half-mass radii. Therefore, we analyse such close passages aside (for short, such passages we name “collisions”). To identify clusters that had close passages with GC, we used the criteria of relative distance: it must be less than 100 pc. Applying these criteria, we obtained statistically significant rates of close passages of the GCs with each other and with the SMBH. We found that during their evolution, GCs have on average approximately 10 passages from each other and approximately 3-4 close passages of GCs near the Galactic central for 1 Gyr at a distance of 50 pc for each of the obtained potentials.

Keywords: numerical methods, Galactic globular clusters, evolution of the Galaxy, IllustrisTNG-100, kinematics and dynamics of the Galaxy, center of the Galaxy.

Стаття надійшла до редакції 15.06.2022

Після доопрацювання 14.07.2022

Прийнята до друку 12.10.2022