УДК 524.47-54
МРНТИ 41.27.19

https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-3-258-272

[1]*Куватова Д.Б.,
MSc, ORCID ID: 0000-0002-5937-4985,
*e-mail: kuvatova@fai.kz
[2,3,1]Ищенко М.В.,
канд. физ.-мат. наук, PhD, ORCID ID: 0000-0002-6961-8170,
e-mail: marina@mao.kiev.ua
[3,1,4,2]Берцик П.П.,
Dr.Sci, ORCID ID: 0000-0002-5004-199X,
e-mail: berczik@mao.kiev.ua
[1]Омаров Ч.Т.,
профессор, PhD, ORCID ID: 0000-0002-1672-894X,
e-mail: chingis.omarov@fai.kz
[1,5]Каламбай М.Т.,
PhD, ORCID ID: 0000-0002-0570-7270,
e-mail: kalambay@aphi.kz

[1]Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, 050020, г. Алматы, Казахстан
[2]Главная астрономическая обсерватория, 01001, г. Киев, Украина
[3]Астрономический центр имени Николая Коперника Польской академии наук, 00001, г. Варшава, Польша
[4]Обсерватория Конколи, Исследовательский центр астрономии и наук о Земле, 1007, г. Будапешт, Венгрия
[5]Хериот-Уатт Международный факультет, Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, 030000, г. Актобе, Казахстан

ВЛИЯНИЕ ОШИБОК НАБЛЮДЕНИЙ ПО GAIA DR3 НА РЕКОНСТРУКЦИЮ ОРБИТ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ НА КОСМОЛОГИЧЕСКОЙ ВРЕМЕННОЙ ШКАЛЕ

Аннотация

В последнее время набирает популярность развивающаяся область астрономии, занимающаяся историей формирования галактик, – галактическая археология. Шаровые скопления принимали участие во многих ключевых процессах, происходивших в Млечном Пути, поэтому их изучение, в частности реконструкция орбит, имеет существенное значение в этой области. Каталог Gaia DR3 предоставляет параметры 165 шаровых скоплений, такие как собственные движения, радиальная скорость и гелиоцентрическое расстояние, с некоторой точностью, поэтому важно изучить влияние ошибок измерений данных параметров на начальные данные при преобразовании в галактоцентрическую систему координат и, как следствие, на форму орбит. Нами были проинтегрированы орбиты шаровых скоплений на 10 миллиардов лет назад. Для физической обоснованности при интегрировании использовался внешний динамический потенциал под индивидуальным номером 411321 из базы космологического моделирования IllustrisTNG-100, наилучшим образом воспроизводящий потенциал Млечного Пути. Интегрирование производилось с помощью параллельного N-body кода φ-GPU, основанного на схеме Эрмита четвертого порядка с иерархическими индивидуальными блок-временными шагами. Было создано 1000 рандомизаций начальных данных с учетом нормального распределения ошибок и рассмотрено влияние ошибок на разброс начальных скоростей и на форму орбит. Наибольшие относительные ошибки имеют собственные движения и радиальная скорость, наименьшие – гелиоцентрическое расстояние. Обнаружено, что 85% шаровых скоплений от общего числа имеют относительные ошибки по всем параметрам не более 10%, а 5.4% – не более 1%. Исследовав влияние ошибок измерений для скоплений с различными величинами относительных ошибок, мы пришли к выводу, что для

большинства шаровых скоплений влияние ошибок измерений на форму орбит не существенно и, следовательно, для них возможна реконструкция орбит с высокой точностью. Так как реконструкция орбит шаровых скоплений подразумевает космологические временные масштабы, то учет ошибок измерений является важным аспектом в подготовительной процедуре перед основным интегрированием.

Ключевые слова: шаровые скопления, Млечный Путь, внешний динамический потенциал IllustrisTNG-100**,** численное моделирование, Gaia DR3 каталог.

Введение

Изучение истории Млечного Пути составляет набирающую популярность область исследований – галактическую археологию. На основе наблюдательных данных [1–3], астрометрических и спектроскопических, а также построения численных моделей [4, 5] галактическая археология ставит себе целью понять эволюционный путь нашей Галактики, включая вклад ее соседей, начиная с самых ранних моментов Вселенной. Одним из инструментов этого исследования может быть изучение шаровых скоплений.

Шаровые скопления (ШС) – гравитационно связанные звездные системы, типичный возраст которых составляет более 10–12 млрд лет [6–8], а массы – порядка 10^5 $M_\odot$ [9–12]. Шаровые скопления нашей Галактики локализуются как в диске, так и в гало, причем некоторые из них ассоциируются с потоками, являющимися артефактами произошедших ранее столкновений Млечного Пути с близлежащими карликовыми галактиками [13, 14]. Подобные события, особенно в ранние моменты времени [15], несомненно, внесли большой вклад в эволюцию массы Млечного Пути. Изучение ШС, их состава, кинематики и динамики вокруг центральной части Галактики играет важную роль в понимании истории нашей Галактики [16].

Благодаря опубликованным каталогам Gaia [17, 18] появилась возможность детально исследовать фазовое пространство всей популяции ШС Млечного Пути. Эти данные позволяют астрономам получать ценную информацию о движении и поведении этих скоплений, что, в свою очередь, способствует построению гипотез об их возможных орбитах вокруг центра нашей Галактики.

Некоторые предшествующие работы по изучению орбит ШС строились на основе предположения осесимметричности и стационарности потенциала Галактики [19–21], однако в силу наличия у Млечного Пути перемычки и сложного (boxy/peanut) балджа [22, 23] использование данных предположений не может быть полностью корректным. Кроме того, для ШС в гало Галактики следует учитывать и влияние ближайших соседей Млечного Пути, например, Большого и Малого Магеллановых Облаков [24–26].

Помимо этого, прежде чем приступить к масштабному моделированию движения ШС, необходимо тщательно проанализировать влияние ошибок измерения на их орбиты. Ошибки измерения, такие как погрешности в определении собственного движения, радиальной скорости и пр., вносят некоторый вклад в неточности при генерации начальных условий. В процессе интегрирования эти ошибки могут существенно изменять форму орбиты [27].

В настоящей работе было исследовано влияние ошибок измерения для выборки из 159 ШС Млечного Пути. В разделе 2 описаны процедуры определения начальных данных из каталога ШС, подбора потенциала из базы моделирования IllustrisTNG-100 и интегрирования с помощью кода φ-GPU. В разделе 3 описано влияние ошибок измерений параметров ШС из каталога на подбор начальных параметров и форму орбит. В разделе 4 приведены основные результаты и заключение.

Материалы и методы

Начальные данные и процедура интегрирования

Выборка ШС. Для данного исследования с целью получения начальных условий для моделирования был использован текущий каталог по ШС [10, 28], содержащий информацию

о более чем 160 объектах. Текущий каталог доступен по ссылке[1]. Каталог содержит такие данные ШС, как: прямое восхождение (*RA*), склонение (*DEC*), гелиоцентрическое расстояние ($D_\odot$), собственные движения по прямому восхождению (*PMRA*) и склонению (*PMDEC*), а также радиальную скорость (*RV*), полученные из Gaia DR3 [2, 17]. Для того чтобы выполнить интегрирование орбит ШС, необходимо преобразовать данные параметры в координаты и скорости в галактоцентрической системе координат. Трансформация координат была произведена с учетом таких параметров и коэффициентов, как: галактоцентрическое расстояние Солнца $R_\odot = 8.178$ кпк [29], высота над галактической плоскостью $Z_\odot = 20.8$ пк [30] и скорость относительно Локального стандарта покоя (LSR) $V_{LSR} = 234.737$ км/с [31, 32].

Если обозначить координаты и скорости ШС в гелиоцентрической системе координат как (*X,Y,Z*) и (*U,V,W*) соответственно, то координаты и скорости в прямоугольной галактоцентрической системе координат (*x ,y ,z*) и (*u, v, w*) могут быть получены из формул**,** приведенных в работе [33]:

$$\begin{cases} x = X + X_\odot + X_{LSR}, \\ y = Y + Y_\odot + Y_{LSR}, \\ z = Z + Z_\odot + Z_{LSR}, \end{cases} \qquad \begin{cases} u = U + U_\odot + U_{LSR}, \\ v = V + V_\odot + V_{LSR}, \\ w = W + W_\odot + W_{LSR}, \end{cases} \tag{1}$$

где $U_{LSR} = W_{LSR} = 0$ и $Y_\odot = 0$.

Внешний динамический потенциал. Для того чтобы иметь физически обоснованный анализ результатов интегрирования орбит ШС на 10 млрд лет назад во времени, в наш код был включен внешний потенциал, динамически меняющийся со временем. Потенциалы были отобраны из базы данных космологического моделирования IllustrisTNG-100 [34]. Данная модель характеризуется кубом около 100 Мпк[3], обеспечивающим достаточное количество галактик с разрешением по массе 7.5×10^6 $M_\odot$ для темной материи и 1.4×10^6 $M_\odot$ для барионной материи.

Для получения пространственных масштабов диска и гало темной материи было использовано распределение массы согласно профилю Миямото-Нагаи [35] для диска и профилю Наварро-Френка-Уайта [36] для гало. Тогда общий потенциал является суммой потенциалов, создаваемых данными распределениями, $\Phi_d(R,z)$ и $\Phi_h(R,z)$, соответственно:

$$\Phi_{tot} = \Phi_d(R,z) + \Phi_h(R,z) = -\frac{GM_d}{\sqrt{R^2 + \left(a_d + \sqrt{z^2 + b_d^2}\right)^2}} - \frac{GM_h \ln\left(1 + \frac{\sqrt{R^2+z^2}}{b_h}\right)}{\sqrt{R^2+z^2}}, \tag{2}$$

где R – галактоцентрический радиус в плоскости Галактики, z – расстояние над плоскостью диска, G – гравитационная постоянная, a_d – пространственная характеристика по длине для диска, b_d и b_h – пространственные характеристики по высоте для диска и гало, соответственно, M_d и M_h – массы диска и гало соответственно. В результате анализа из 54 потенциалов было отобрано 5 потенциалов, примерно воспроизводящих динамику Млечного Пути в прошлом. Детальная процедура отбора потенциалов и построение их компонент приведены в работах [37, 38] и по ссылкам[2,3].

[1] Каталог ШС https://people.smp.uq.edu.au/HolgerBaumgardt/globular/orbits_table.txt
[2] Код ORIENT: https://github.com/Mohammad-Mardini/The-ORIENT
[3] Потенциалы из IllustrisTNG-100 https://sites.google.com/view/mw-type-sub-halos-from-illustr/TNG?authuser=0

Процедура интегрирования. Для численного моделирования был использован параллельный динамический N-body φ-GPU[1] код [39,40], основанный на интеграционной схеме Эрмита четвертого порядка с иерархическими индивидуальными блок-временными шагами. Было проинтегрировано 159 ШС, каждое – как физическая частица с постоянной массой, взятой из каталога. Скопление Mercer 5 не было включено в процедуру интегрирования, так как для него не определена текущая масса. Таким образом, была выполнена реконструкция орбит 159 ШС в одном из выбранных внешних динамических потенциалов под оригинальным номером 411321 в IllustrisTNG-100**.** Интегрирование выполнялось с учетом влияния самогравитации ШС. На рисунке 1 представлены примеры реконструкции орбит двух наиболее известных ШС: NGC 6656 (Мессье 22) и NGC 104 (47 Тукана) на протяжении 10 млрд лет назад во времени.

Как видно из рисунка 1, после ~8 млрд лет интегрирования (красные оттенки) орбита начинает отклонятся от своей основной формы. Это может быть объяснено плохим разрешением самого потенциала, которое наступает после 8 млрд лет. При этом первые 8 млрд лет реконструкция демонстрирует стабильную форму орбит.

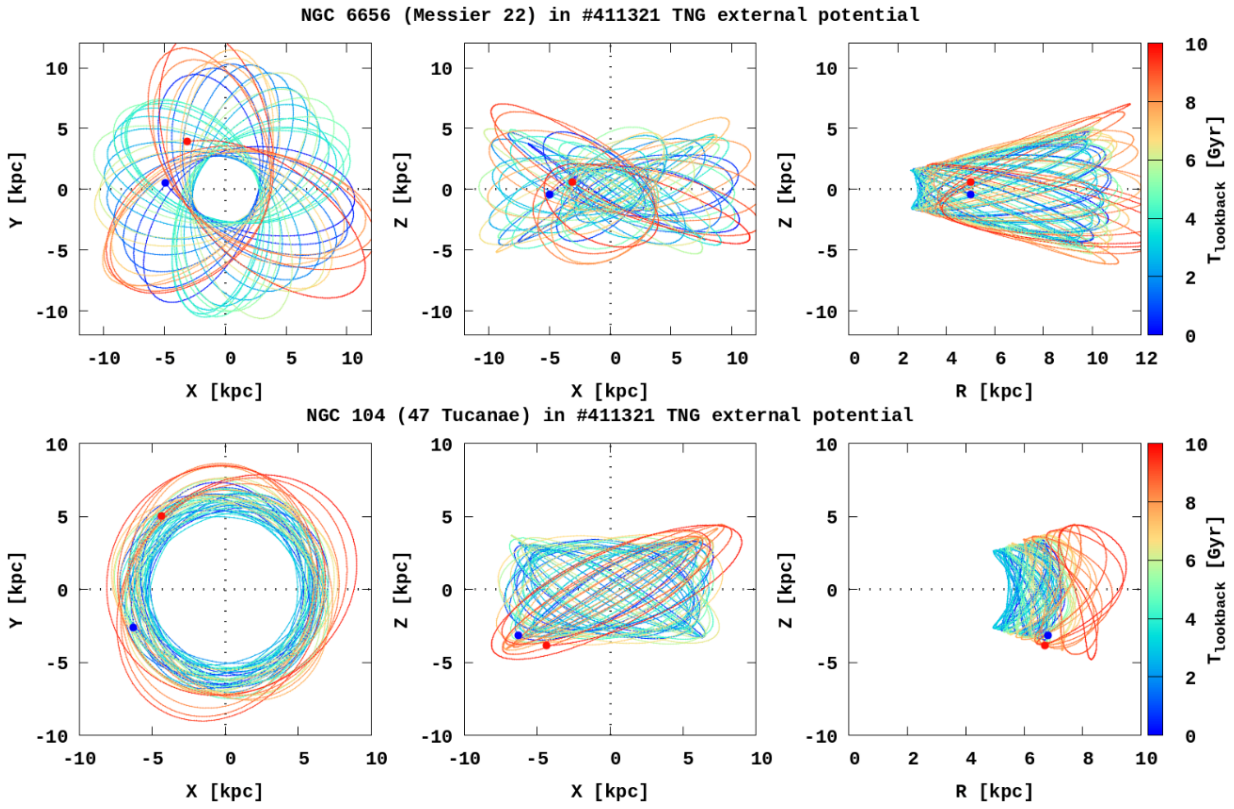


Рисунок 1 – Реконструкция орбит NGC 6656 и NGC 104 на 10 млрд лет назад во времени в динамическом потенциале 411321. Орбиты представлены в трех плоскостях слева направо: X-Y, X-Z и R-Z, где R – галактоцентрическое расстояние в плоскости. Цветом представлено время интегрирования. Синие точки обозначают положение скопления на сегодня, красные – на 10 млрд лет назад.

[1] N-body код φ-GPU https://github.com/berczik/phi-GPU-mole

Результаты и обсуждение

Влияние ошибок измерения ШС на реконструкцию орбиты

Проанализировав каталог с данными для ШС, определенными по Gaia DR3, видно, что ошибки наблюдения собственного движения по прямому восхождению (*PMRA*) и склонению (*PMDEC*), например, для ШС Crater, могут превышать 100%. На втором месте по ошибкам определения находятся величины радиальной скорости (*RV*) и на третьем – определение гелиоцентрического расстояния ($D_{\odot}$). Стоит отметить, что в приведенных выше формулах в преобразовании компонент скорости по V_x, V_y и V_z участвуют сразу три первых вышеперечисленных параметра. В то время как на компоненты положения *X*, *Y* и *Z*, помимо величин *RA* и *DEC*, еще влияют ошибки по $D_{\odot}$.

Чтобы оценить влияние ошибок в *PMRA*, *PMDEC* и *RV*, а также отдельно влияние ошибок $D_{\odot}$ на начальные положения и скорости ШС, был выполнен следующий анализ. Так, было создано два набора начальных положений и скоростей по 1000 файлов в каждом наборе с целью оценить уровень влияния ошибок наблюдения в каждом из случаев отдельно. В первом наборе начальные условия ШС варьировались с учетом нормального распределения ошибок по *PMRA*, *PMDEC*, *RV*. Во втором наборе – с учетом только варьирования значения $D_{\odot}$. В обоих наборах величины по *RA* и *DEC* оставались фиксированными для каждого скопления.

На рисунке 2 показано влияние ошибок измерения на компоненты скоростей в галактоцентрической системе отсчета. Как видно, 2 набора начальных условий в целом имеют одинаковый эффект на начальные скорости ШС.

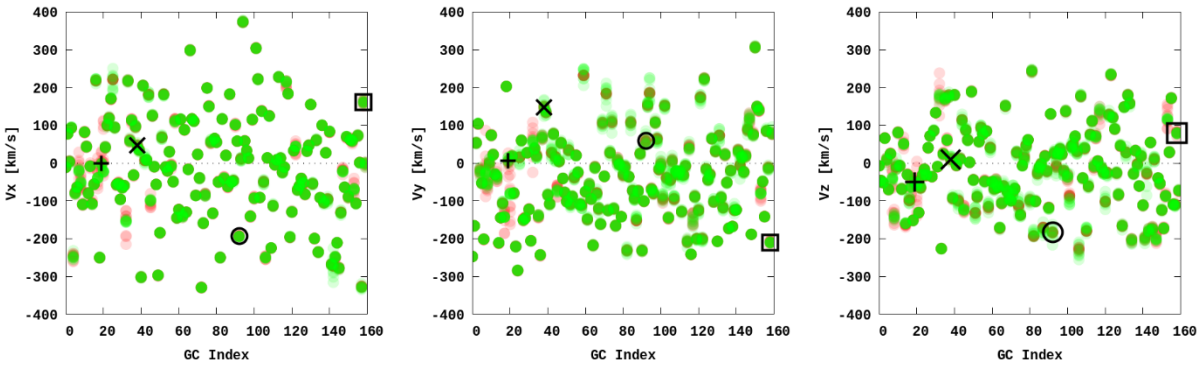


Рисунок 2 – Влияние ошибок наблюдений на компоненты скоростей в галактоцентрической системе координат с учетом 1000 начальных данных рандомизаций. Зеленые кружки демонстрируют распределение начальных данных с учетом только собственных движений и радиальной скорости (*PMRA*, *PMDEC* и *RV*). Красные – только с учетом рандомизации по гелиоцентрическому расстоянию ($D_{\odot}$). Значками «плюс», «крестик», незаполненные «квадрат» и «круг» отмечены скопления Palomar 4, 5, 6 и 13 соответственно

В таблице 1 приведены 4 группы скоплений, отсортированные на основе относительных ошибок по гелиоцентрическому расстоянию ($D_{\odot}$), лучевой скорости (*RV*) и собственным движениям (*PMRA*, *PMDEC*). Относительная ошибка вычислялась стандартно по формуле $(\Delta x/x)*100\%$. В первую группу относились скопления, если хотя бы по одному из параметров относительная ошибка составляла $\varepsilon > 50\%$. В эту группу попало 8 ШС, что составляет 5% от общего числа. Во вторую группу было отобрано всего лишь 3 ШС (2%), ошибки которых варьируются от $30\% \leq \varepsilon < 50\%$. В третью группу попало 13 ШС с ошибками от $10\% \leq \varepsilon < 30\%$, что составило 8%. Наиболее многочисленная группа из 141 ШС имеет относительную ошибку $\varepsilon < 10\%$, что является 85% от общего числа ШС.

Таблица 1 – Относительные величины ошибок наблюдений по гелиоцентрическому расстоянию ($D_{\odot}$), лучевой скорости (*RV*) и собственным движениям (*PMRA*, *PMDEC*)

ШС	$\varepsilon(D_{\odot})$, %	ε (*RV*), %	ε (*PMRA*), %	ε (*PMDEC*), %	ШС	$\varepsilon(D_{\odot})$, %	ε (*RV*), %	ε (*PMRA*), %	ε (*PMDEC*), %
Группа 1: $\varepsilon > 50\%$					Группа 3: $10\% \le \varepsilon < 30\%$				
Palomar 1	3	0.4	10	153	Whiting 1	4	1	21	2
NGC 2419	3	1	600	1	Eridanus	3	3	6	12
Palomar 3	3	1	66	31	Pyxis	2	1	2	13
Palomar 4	3	0.3	65	88	Gran 2	10	3	12	1
Crater	3	0.4	862	72	NGC 6453	2	1	13	0.4
AM 4	3	2	57	14	UKS 1	4	4	22	5
NGC 6553	2	126	4	3	VVV-CL001	18	0.3	3	5
NGC 6760	5	54	1	0.2	2MASS-GC01	18	1	21	13
Группа 2: $30\% \le \varepsilon < 50\%$					NGC 6584	1	1	10	0.1
					NGC 6624	1	1	11	0.2
AM 1	3	12	17	42	NGC 6638	3	23	0.4	0.2
NGC 6380	3	49	1	0.5	Palomar 10	13	1	0.2	0.1
Laevens 3	3	1	42	11	Palomar 13	2	1	2	28
Группа 4: $\varepsilon < 10\%$									
NGC 104	1	1	0.2	0.3	Terzan 4	4	3	1	1
NGC 288	1	0.3	0.1	0.1	HP 1	2	3	1	0.3
NGC 362	1	0.1	0.1	0.4	FSR 1758	7	0.3	0.3	0.3
NGC 1261	1	0.3	1	0.4	NGC 6362	1	1	0.1	0.1
Palomar 2	5	1	4	3	Liller 1	4	4	3	2
NGC 1851	1	0.5	0.4	1	Terzan 1	3	3	2	1
NGC 1904	1	0.1	0.3	1	Tonantzintla 2	5	1	0.3	2
NGC 2298	2	0.4	0.2	0.3	NGC 6388	1	1	1	0.3
NGC 2808	1	0.3	1	3	NGC 6402	3	1	0.2	0.1
E 3	3	4	1	0.4	NGC 6401	3	2	0.4	1
NGC 3201	1	0.01	0.1	0.3	NGC 6397	1	0.4	0.2	0.03
NGC 4147	1	0.2	1	1	Palomar 6	6	1	0.2	0.3
NGC 4372	4	0.4	0.1	0.2	NGC 6426	2	0.2	1	1
Rup 106	2	1	1	2	Djor 1	7	0.5	1	0.2
NGC 4590	1	0.2	0.2	0.3	Terzan 5	2	1	2	1
BH 140	5	0.4	0.5	6	NGC 6440	3	1	2	1
NGC 4833	1	0.2	0.1	1	Gran 5	6	6	1	0.5
NGC 5024	1	0.4	4	0.4	NGC 6441	1	3	1	0.4
NGC 5053	1	1	2	1	Terzan 6	5	1	1	1
NGC 5139	1	0.1	0.3	0.2	Gran 1	8	2	0.5	0.4
NGC 5272	1	0.2	5	0.3	NGC 6496	2	0.2	0.2	0.1
NGC 5286	1	1	4	4	Terzan 9	6	1	1	0.4
NGC 5466	1	0.2	0.1	0.5	Djor 2	2	1	3	1
NGC 5634	2	4	1	1	NGC 6517	6	5	1	0.4
NGC 5694	2	0.4	3	1	Terzan 10	4	1	0.4	1
IC 4499	1	1	2	1	NGC 6522	3	3	1	0.2
NGC 5824	2	2	1	0.4	NGC 6535	2	0.2	0.3	0.4
Palomar 5	2	0.3	1	1	NGC 6528	3	0.2	1	0.3
NGC 5897	2	0.2	0.1	0.2	NGC 6539	5	1	0.1	0.2
NGC 5904	1	0.5	0.1	0.1	NGC 6540	5	5	1	1
NGC 5927	1	0.3	0.1	0.2	VVV-CL160	7	0.3	7	1
NGC 5946	5	1	0.3	1	NGC 6544	2	2	1	0.1
NGC 5986	1	0.4	0.4	0.4	NGC 6541	1	0.3	2	0.1
FSR 1716	4	3	1	0.3	ESO 280-SC06	3	0.4	3	1
Palomar 14	2	0.2	8	9	2MASS-GC02	8	3	8	5
Lynga 7	2	5	2	1	NGC 6558	2	0.4	1	0.4
NGC 6093	1	4	0.3	0.2	IC 1276	5	0.4	1	0.3
NGC 6121	1	0.2	0.1	0	Terzan 12	7	1	0.3	0.4
NGC 6101	1	0.1	1	5	NGC 6569	2	1	0.2	0.1
NGC 6144	2	0.3	1	1	BH 261	4	4	1	1
NGC 6139	4	4	0.2	0.4	NGC 6626	2	5	6	0.2

Продолжение таблицы 1

Terzan 3	4	0.4	0.3	1		NGC 6637	1	2	0.1	0.1
NGC 6171	1	1	0.4	0.1		NGC 6642	2	2	7	0.3
ESO 452-SC11	3	3	2	0.3		NGC 6652	1	1	0.2	0.3
NGC 6205	1	0.1	0.2	0.2		NGC 6656	1	1	0.1	0.2
NGC 6229	2	1	1	4		Palomar 8	6	3	3	1
NGC 6218	1	0.3	3	0.1		NGC 6681	1	0.4	1	0.3
FSR 1735	6	7	1	3		NGC 6712	3	0.3	0.2	0.2
NGC 6235	3	0.3	1	0.4		NGC 6715	1	0.3	0.3	1
NGC 6254	1	0.3	0.2	0.2		NGC 6717	2	3	1	0.3
NGC 6256	4	1	1	1		NGC 6723	1	0.3	1	0.2
Palomar 15	3	2	6	3		NGC 6749	3	2	1	0.5
NGC 6266	1	1	1	1		NGC 6752	1	0.5	0.4	0.3
NGC 6273	2	0.4	0.3	1		NGC 6779	1	0.3	0.3	0.4
NGC 6284	3	3	0.4	1		Terzan 7	2	0.1	0.4	1
Gran 3	7	2	2	9.8		Arp 2	1	0.2	1	1
NGC 6287	5	1	0.2	0.5		NGC 6809	1	0.1	0.2	0.1
Patchick 126	6	1	1	0.5		Terzan 8	2	0.1	0.4	0.4
NGC 6293	3	0.3	2	0.5		Palomar 11	4	1	1	0.4
NGC 6304	2	0.4	0.3	1		Sagittarius II	2	0.2	6	3
NGC 6316	3	1	1	1		NGC 6838	1	1	0.3	0.4
NGC 6341	1	0.2	0.2	2		NGC 6864	2	1	3	1
NGC 6325	4	2	0.3	0.3		NGC 6934	1	0.2	0.3	0.1
NGC 6333	2	1	0.4	0.2		NGC 6981	1	0.4	1	0.1
NGC 6342	3	1	0.4	0.2		NGC 7006	1	0.2	9	1
NGC 6356	6	4	0.3	0.3		NGC 7078	1	0.3	1	0.2
NGC 6355	3	0.3	0.3	3		NGC 7089	1	8	0.3	0.4
NGC 6352	1	1	0.4	0.2		NGC 7099	1	0.1	1	0.1
IC 1257	5	1	2	1		Palomar 12	2	1	0.4	0.4
Terzan 2	4	1	1	0.4		NGC 7492	2	0.2	1	0.5
NGC 6366	1	0.2	2	0.2						

В целом, анализируя таблицу 1, видим, что относительная ошибка по $D_{\odot}$ практически не превышает 10%. Исключениями являются 4 ШС: Palomar 10, VVV-CL001, 2MASS-GC01 и Gran 2 с относительной ошибкой от 10% до 18%. На втором месте по количеству больших величин в относительных ошибках является *RV*. Так, более 10% имеют NGC 6553, NGC 6760, NGC 6380, NGC 6638 и AM 1, чьи значения варьируются от 12% до 126%. Хуже всего определяются собственным движения, так, например, для Crater относительная ошибка по *PMRA* составляет 862%. По *PMDEC* наибольшее значение относительной ошибки зафиксировано для Palomar 1 – 153%.

Как видно из таблицы 1, следующие скопления имеют относительные ошибки по всем параметрам $\varepsilon \leq 1\%$: NGC 104, NGC 3201, NGC 4590, NGC 5139, NGC 5466, NGC 5904, NGC 6397, NGC 6752 и NGC 6809, что от общего количества наблюдаемых ШС составляет 5.4%

На рисунке 3 показаны распределения компонент скоростей на примере 4 ШС (Palomar 4, 5, 6 и 13, отмечены серым цветом в таблице 1) для 1000 рандомизаций начальных условий с учетом ошибок измерений. Как видно, влияние ошибок измерений на компоненты скорости ШС Palomar 4 (группа 1) достаточно велики, что как раз связано с величиной относительных ошибок его параметров, тогда как ШС из групп 3 и 4 имеют меньший разброс. Яркая зеленая точка демонстрирует величины компонент для V_x, V_y и V_z, полученные из каталога. Красные точки – их величины, полученные в результате нормального распределения наблюдаемых ошибок по Gaia DR3.

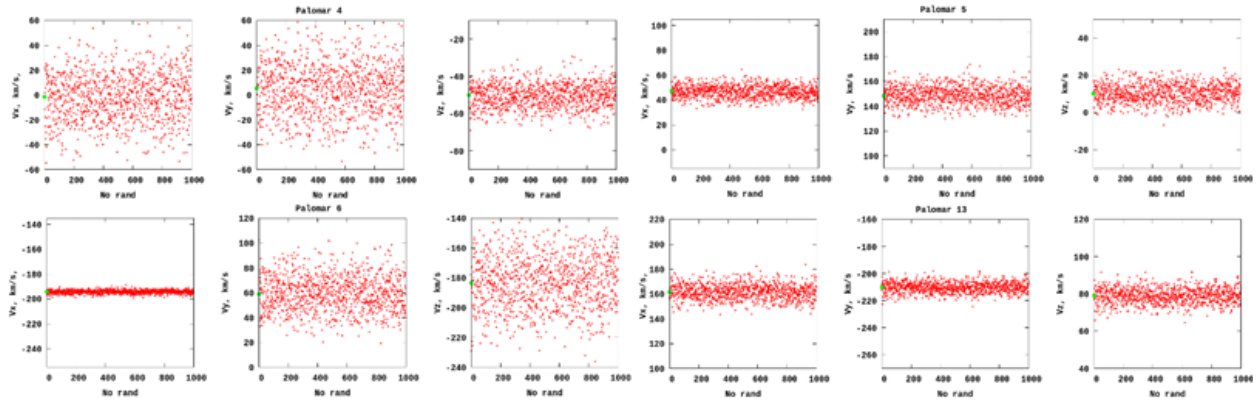


Рисунок 3 – Распределение компонент скоростей V_x, V_y и V_z ШС (Palomar 4, 5, 6 и 13) для 1000 рандомизаций начальных величин с учетом ошибок наблюдений. Зеленой точкой отмечены величины компонентов из каталога

Также в качестве иллюстрации примененного нами алгоритма нормального распределения компоненты скоростей с учетом ошибок наблюдений на рисунке 4 представлены ШС Palomar 4 и Palomar 13.

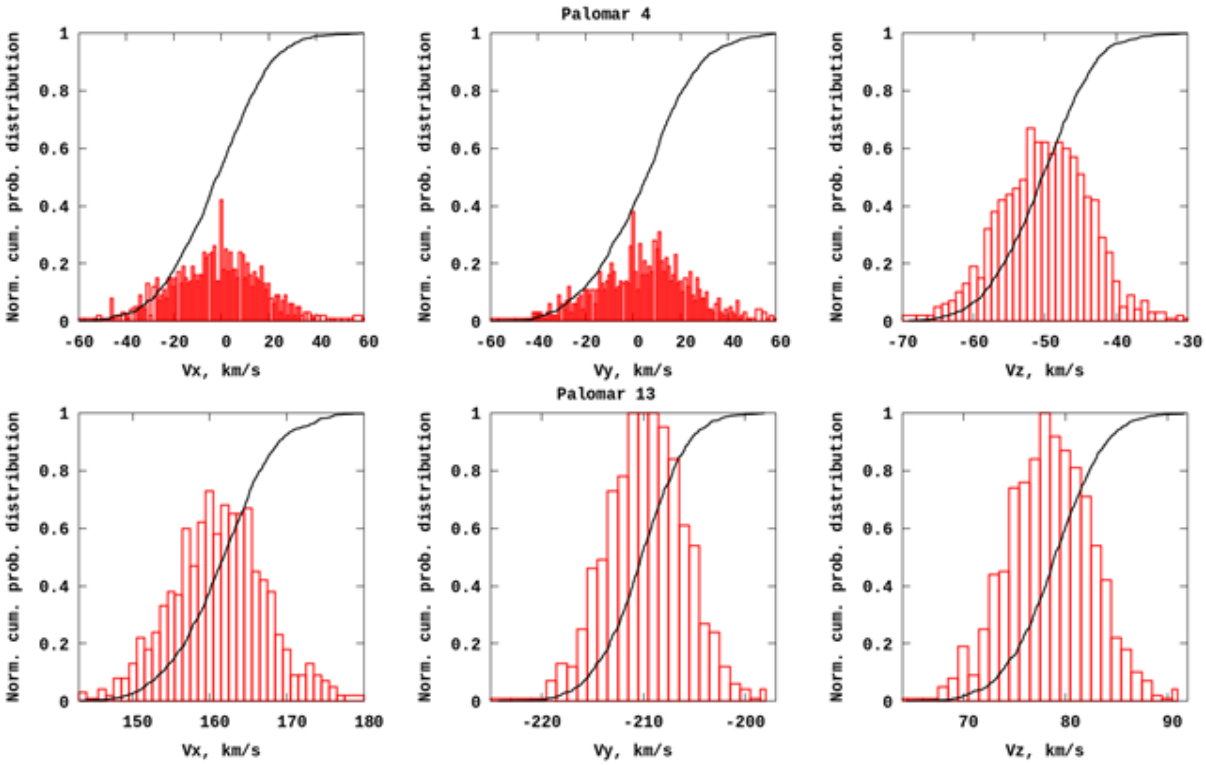


Рисунок 4 – Нормализованное кумулятивное вероятностное распределение начальных условий компонент скоростей по данным 1000 рандомизаций для Palomar 4 и 13. Биннинг – 1 км/с.

Palomar 4 относится к группе 1 и демонстрирует более широкий диапазон компонент скоростей, особенно по V_x, V_y. В то же время Palomar 13, относящийся к группе 4, имеет узкий диапазон значений и демонстрирует, в особенности по V_y и V_z, нормализованное кумулятивное вероятностное распределение начальных условий от 0 до 1 (черная линия).

Нами было исследовано влияние ошибок наблюдений при генерации начальных условий на возможное изменение формы орбиты, ее положение в различных структурах Галактики и даже на возможное изменение направления вращения орбиты. Для этого нами были выполнены реконструкции орбит ШС с учетом влияния ошибок на начальные данные. Из сгенерированных нами 1000 рандомизаций с начальными условиями было проинтегрировано 5 выбранных начальных данных.

На рисунке 5 представлены реконструкции орбит для 5 начальных условий четырех ШС: Palomar 4, 5, 6 и 13. Рандомизации представлены разным цветом.

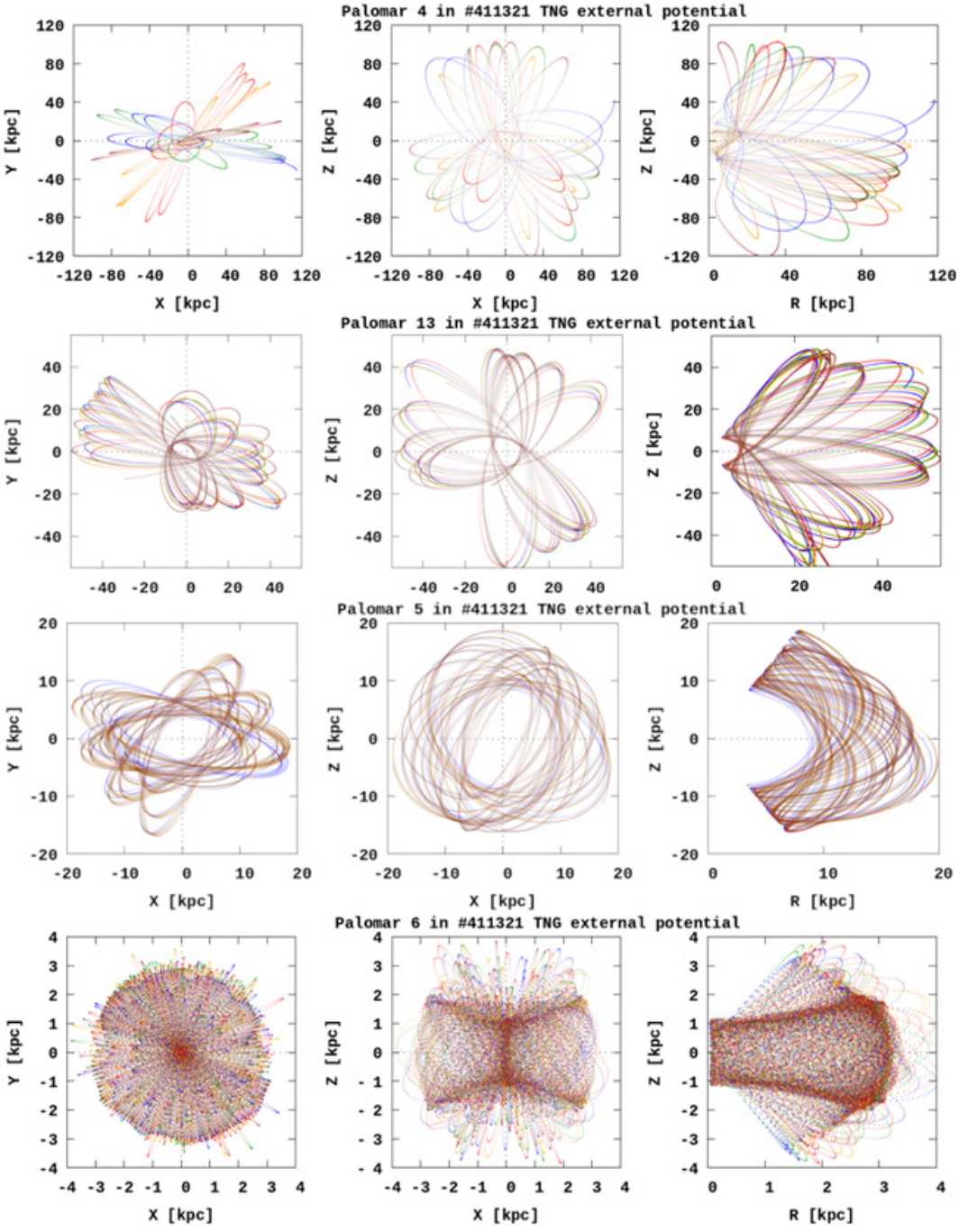


Рисунок 5 – Реконструкция орбит для 5 начальных условий для 4 ШС Palomar 4, 5, 6 и 13. Рандомизации представлены разным цветом. Время интегрирования – 10 млрд лет назад во времени в динамическом потенциале 411321 (IllustrisTNG-100).

Для Palomar 4, например, относительные ошибки по *PMRA*, *PMDEC*, *RV* и $D_{\odot}$. составляют 65%, 88%, 0.3%, 3% соответственно (см. таблицу 1, группа 1: ε > 50%), а на рисунке 3, особенно для V_x и V_y, разброс величин составляет ±60 км/с. Это является причиной того, что положение витков орбиты не совпадает с положением витков из другой рандомизации (рисунок 5). Особенно это заметно для орбит из группы «зеленый-синий» и «красный-рыжий» в плоскости *X*-*Y*. Учитывая, что скопление Palomar 4 принадлежит гало Млечного Пути и имеет одно из самых далеких расстояний в апоцентре, большие ошибки в наблюдениях приводят к невозможности реконструировать орбиту с высокой точностью на длительном промежутке времени.

На примере Palomar 6 относительные ошибки по *PMRA*, *PMDEC*, *RV* и $D_{\odot}$ составляют 0.2%, 0.3%, 1%, 6% соответственно (см. таблицу 1, группа 4: ε <10%). В то же время на рисунке 3 разброс составляет примерно ±20 км/с для всех трех компонент скоростей. Как результат, на рисунке 5 все 5 реконструкций орбиты с разными начальными условиями образуют единую форму орбиты и не меняют направление вращения на всех трех проекциях. Учитывая, что ошибки наблюдений Palomar 6 подобны ошибкам большинства других скоплений, можно предположить, что их орбиты также устойчивы к таким вариациям начальных условий, а значит, представляется возможным реконструировать их орбиты с высокой точностью на длительном промежутке времени. Также стоит отметить, что влияние относительных ошибок измерений гелиоцентрического расстояния $D_{\odot}$ на форму орбиты ШС менее значимо, в сравнении с ошибками по другим параметрам, в особенности по собственным значениям.

Также на рисунке 5 представлены еще два ШС: Palomar 5 и Palomar 13. Так, для ШС Palomar 13 (относится к группе 3, таблица 1) видно, что 4 из 5 реконструкций демонстрируют незначительные изменения в витках орбиты.

Отметим, что для этого ШС наибольшая величина относительной ошибки определена для *PMDEC* – 28%. Для остальных трех параметров она составляет не более 2%. Таким образом, форма орбиты сохраняется во всех 5 вариантах реконструкции орбит. Для Palomar 5, который относится к группе 4 в таблице 1, видно, что витки орбит имеют совпадения в их формах для 4 моделей, кроме орбиты, представленной синим цветом.

Заключение

Реконструкция орбит ШС играет важную роль в понимании истории Млечного Пути, так как возраст ШС сопоставим с возрастом Галактики, и они участвовали во многих процессах формирования структуры Млечного Пути, например в приросте массы центральной части Галактики. Кроме того, интересен вопрос об их роли в ранних слияниях Млечного Пути с близлежащими галактиками. Все это составляет предмет изучения галактической археологии – развивающейся области астрономической науки.

В данной статье было изучено влияние ошибок измерений параметров ШС на начальные условия для численного моделирования орбит ШС и на форму орбит. Для начальных положений, скоростей и массы были использованы значения из каталога ШС [28], содержащего фазовые координаты из Gaia DR3.

Величины из каталога были преобразованы в координаты и скорости в галактоцентрической системе координат. Для интегрирования орбит был использован параллельный динамический код высокого порядка φ−GPU. Интегрирование производилось в специально подобранном потенциале 411321 из космологической симуляции IllustrisTNG-100, являющимся динамически меняющимся во времени. Его использование делает моделирование наиболее физически обоснованным. Выбор именно этого потенциала обусловлен его схожестью с потенциалом Млечного Пути. Для получения пространственных масштабов диска и гало темной материи использовались распределения масс профилей Миямото-Нагаи и Наварро-Френка-Уайта. Интегрирование производилось до 10 млрд лет назад во времени.

В зависимости от величины относительных ошибок по параметрам *PMRA*, *PMDEC*, *RV* и $D_{\odot}$ ШС были отнесены в 4 группы, причем подавляющая часть ШС (85%) имеет относитель-

ные ошибки по всем параметрам не более 10%. Наибольшие ошибки имеют параметры *PMRA* и *PMDEC*, затем *RV*, затем $D_{\odot}$, причем относительная ошибка по $D_{\odot}$ для большинства ШС не превышает 10%. Стоит отметить, что 5,4% ШС имеют относительные ошибки менее 1%. Все эти величины участвуют в определении галактоцентрических координат и скоростей, поэтому важно понимать, каким образом они могут влиять на начальные данные и, следовательно, на форму орбиты.

Было определено, что ШС из групп 3 и 4 (показано на примере ШС Palomar 5, 6, 13) имеют меньший разброс величин компонент скоростей, в отличие от ШС с более большими относительными ошибками (Palomar 4). Также это прослеживается и на самих реконструкциях орбит – ШС из групп 3 и 4 образуют единую форму орбиты. Так как ШС с подобными ошибками подавляющее большинство, то можно предположить, что и их орбиты устойчивы к вариациям начальных данных. Следовательно, для них возможна реконструкция орбит с высокой точностью.

Информация о финансировании. Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP14869395).

ЛИТЕРАТУРА

1 Buder S. et al. The GALAH+ survey: Third data release. Mon. Not. R. Astron. Soc. Oxford Academic, 2021, vol. 506, no. 1, pp. 150–201. https://doi.org/10.1093/mnras/stab1242.

2 Vallenari A. et al. Gaia Data Release 3 - Summary of the content and survey properties. Astron. Astrophys. Suppl. Ser. EDP Sciences, 2023, vol. 674, p. A1. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243940.

3 Kollmeier J. et al. SDSS-V: Pioneering Panoptic Spectroscopy. arXiv: Astrophysics of Galaxies, 2017. https://assets.pubpub.org/nubevd6h/01598545751555.pdf.

4 Ackerl C. et al. Galaxy archaeology - The quest for ancient mergers, 2024, pp. 1.01.

5 Merrow A. et al. Did the Gaia Enceladus/Sausage merger form the Milky Way's bar? Mon. Not. R. Astron. Soc. Oxford University Press, 2024, p. stae1250. https://academic.oup.com/mnras/advance-article-abstract/doi/10.1093/mnras/stae1250/7671147.

6 Marin-Franch A. et al. THE ACS SURVEY OF GALACTIC GLOBULAR CLUSTERS. VII.* RELATIVE AGES. Astrophys. J. IOP Publishing, 2009, vol. 694, no. 2, p. 1498. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/694/2/1498/meta

7 Valcin D. et al. Inferring the Age of the Universe with Globular Clusters. arXiv [astro-ph.CO], 2020. https://doi.org/10.1088/1475-7516/2020/12/002

8 Vandenberg D.A. et al. The Ages of 55 Globular Clusters as Determined Using an Improved delta V_TO^HB Method Along with Color-Magnitude Diagram Constraints, and Their Implications for Broader Issues. arXiv [astro-ph.GA], 2013. https://doi.org/10.1088/0004-637X/775/2/134.

9 Baumgardt H. et al. Mean proper motions, space orbits, and velocity dispersion profiles of Galactic globular clusters derived from Gaia DR2 data, mnras, 2019, vol. 482, no. 4, pp. 5138–5155. https://doi.org/10.1093/mnras/sty2997

10 Baumgardt H., Vasiliev E. Accurate distances to Galactic globular clusters through a combination of Gaia EDR3, HST, and literature data, mnras, 2021, vol. 505, no. 4, pp. 5957–5977. https://doi.org/10.1093/mnras/stab1474.

11 Harris G.L.H., Poole G.B., Harris W.E. Globular clusters and supermassive black holes in galaxies: further analysis and a larger sample. Mon. Not. R. Astron. Soc. Oxford Academic, 2014, vol. 438, no. 3, pp. 2117–2130. https://doi.org/10.1093/mnras/stt2337.

12 Kharchenko N.V. et al. Global survey of star clusters in the Milky Way II. The catalogue of basic parameters. arXiv [astro-ph.GA], 2013. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322302.

13 Ibata R. et al. Charting the galactic acceleration field. I. a search for stellar streams with Gaia DR2 and EDR3 with follow-up from ESPaDOnS and UVES. Astrophys. J. American Astronomical Society, 2021, vol. 914, no. 2, pp. 123. https://doi.org/10.3847/1538-4357/abfcc2.

14 Mateu C. galstreams: A library of Milky Way stellar stream footprints and tracks. Mon. Not. R. Astron. Soc. Oxford Academic, 2023, vol. 520, no. 4, pp. 5225–5258. https://doi.org/10.1093/mnras/stad321.

15 Snaith O.N. et al. The dominant epoch of star formation in the Milky Way formed the thick disk. Astrophys. J. Lett. IOP Publishing, 2014, vol. 781, no. 2, p. L31. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2041-8205/781/2/L31/meta.

16 Xiang M., Rix H.-W. A time-resolved picture of our Milky Way's early formation history. Nature, 2022, vol. 603, no. 7902, pp. 599–603. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04496-5.

17 Brown A.G.A. et al. Gaia Early Data Release 3 - Summary of the contents and survey properties. Astron. Astrophys. Suppl. Ser. EDP Sciences, 2021, vol. 649, p. A1. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039657.

18 Gaia C. et al. Gaia data release 2 summary of the contents and survey properties. Astron. Astrophys. Suppl. Ser. EDP Sciences, 2018, vol. 616, no. 1. https://real.mtak.hu/84690/1/gaia6.pdf.

19 Malhan K. et al. The global dynamical atlas of the Milky Way mergers: Constraints from Gaia EDR3–based orbits of globular clusters, stellar streams, and satellite galaxies. Astrophys. J. American Astronomical Society, 2022, vol. 926, no. 2, p. 107. https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac4d2a.

20 Massari D., Koppelman H.H., Helmi A. Origin of the system of globular clusters in the Milky Way. Astron. Astrophys. Suppl. Ser. EDP Sciences, 2019, vol. 630, p. L4. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936135.

21 Myeong G.C. et al. Evidence for two early accretion events that built the Milky Way stellar halo. Mon. Not. R. Astron. Soc. Oxford Academic, 2019, vol. 488, no. 1, pp. 1235–1247. https://doi.org/10.1093/mnras/stz1770.

22 Dwek E., Arendt R.G., Hauser M.G. Morphology, near-infrared luminosity, and mass of the Galactic bulge from COBE DIRBE observations. Journal, Part 1 …. adsabs.harvard.edu, 1995. https://adsabs.harvard.edu/full/1995ApJ...445..716D.

23 Wegg C., Gerhard O. Mapping the three-dimensional density of the Galactic bulge with VVV red clump stars. Mon. Not. R. Astron. Soc. Oxford Academic, 2013, vol. 435, no. 3, pp.1874–1887. https://doi.org/10.1093/mnras/stt1376.

24 Conroy C. et al. All-sky dynamical response of the Galactic halo to the Large Magellanic Cloud. Nature, 2021, vol. 592, no. 7855, pp. 534–536. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03385-7.

25 Gómez F.A. et al. And yet it moves: the dangers of artificially fixing the Milky Way center of mass in the presence of a massive Large Magellanic Cloud. Astrophys. J. Iop Publishing, 2015, vol. 802, no. 2, p.128. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/802/2/128/meta.

26 Petersen M.S., Peñarrubia J. Detection of the Milky Way reflex motion due to the Large Magellanic Cloud infall. Nature Astronomy. Nature Publishing Group, 2020, vol. 5, no. 3, pp. 251–255. https://doi.org/10.1038/s41550-020-01254-3.

27 Bajkova A.T., Bobylev V.V. Orbits of 152 globular clusters of the Milky Way galaxy constructed from the Gaia DR2 data. arXiv [astro-ph.GA], 2020. https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/7/173/meta

28 Vasiliev E., Baumgardt H. Gaia EDR3 view on galactic globular clusters. Mon. Not. R. Astron. Soc. Oxford Academic, 2021, vol. 505, no. 4, pp. 5978–6002. https://doi.org/10.1093/mnras/stab1475.

29 Reid M.J., Brunthaler A. The proper motion of Sagittarius A*. ii. The mass of Sagittarius A. Astrophys. J. American Astronomical Society, 2004, vol. 616, no. 2, pp. 872–884. https://doi.org/10.1086/424960.

30 Bennett M., Bovy J. Vertical waves in the solar neighbourhood in Gaia DR2. Mon. Not. R. Astron. Soc. Oxford Academic, 2018, vol. 482, no. 1, pp. 1417–1425. https://doi.org/10.1093/mnras/sty2813.

31 Bovy J. et al. The Milky Way's circular-velocity curve between 4 and 14 kpc from APOGEE data. Astrophys. J. IOP Publishing, 2012, vol. 759, no. 2, p. 131. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/759/2/131/meta

32 Drimmel R., Poggio E. On the solar velocity. Res. Notes AAS. American Astronomical Society, 2018, vol. 2, no. 4, p. 210. https://doi.org/10.3847/2515-5172/aaef8b.

33 Chemerynska I.V. et al. Kinematic characteristics of the Milky Way globular clusters based on Gaia DR2 data. arXiv [astro-ph.GA], 2022. http://arxiv.org/abs/2201.07221.

34 Nelson D. et al. The IllustrisTNG simulations: public data release. Computational Astrophysics and Cosmology, 2019, vol. 6, no. 1, p. 2. https://doi.org/10.1186/s40668-019-0028-x

35 Miyamoto M., Nagai R. Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies, 1975, vol. 27, no. 4, pp. 533–543. adsabs.harvard.edu, 1975. https://adsabs.harvard.edu/full/1975PASJ...27..533M.

36 Navarro J.F., Frenk C.S., White S.D.M. A universal density profile from hierarchical clustering. Astrophys. J. American Astronomical Society, 1997, vol. 490, no. 2, pp. 493–508. https://doi.org/10.1086/304888.

37 Ishchenko M. et al. Milky Way globular clusters on cosmological timescales - I. Evolution of the orbital parameters in time-varying potentials. Astron. Astrophys. Suppl. Ser. EDP Sciences, 2023, vol. 673, p. A152. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245117.

38 Mardini M.K. et al. Cosmological insights into the early accretion of r-process-enhanced stars. I. a comprehensive chemodynamical analysis of LAMOST J1109+0754. Astrophys. J. American Astronomical Society, 2020, vol. 903, no. 2, p. 88. https://doi.org/10.3847/1538-4357/abbc13.

39 Berczik P. et al. High performance massively parallel direct N-body simulations on large GPU clusters. International conference on high performance computing, 2011, pp. 8–18. ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/berczik/phi-GPU/paper/1.1(8).pdf.

40 Berczik P. et al. Up to 700k GPU Cores, Kepler, and the Exascale Future for Simulations of Star Clusters Around Black Holes. Supercomputing. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 13–25. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38750-0_2.

[1]*Куватова Д.Б.,
MSc, ORCID ID: 0000-0002-5937-4985,
*e-mail: kuvatova@fai.kz
[2,3,1]Ищенко М.В.,
ф.-м.ғ.к., PhD, ORCID ID: 0000-0002-6961-8170,
e-mail: marina@mao.kiev.ua
[3,1,4,2]Берцик П.П.,
Dr.Sci, ORCID ID: 0000-0002-5004-199X,
e-mail: berczik@mao.kiev.ua
[1]Омаров Ч.Т.,
профессор, PhD, ORCID ID: 0000-0002-1672-894X,
e-mail: chingis.omarov@fai.kz
[1,5]Қаламбай М.Т.,
PhD, ORCID ID: 0000-0002-0570-7270,
e-mail: kalambay@aphi.kz

[1]В.Г. Фесенков атындағы астрофизикалық институты, 050020, Алматы қ., Қазақстан
[2]Басты астрономиялық обсерватория, 01001, Киев қ., Украина
[3]Николай Коперник атындағы астрономиялық Орталық Польша ғылым академиясы, 00001, Варшава қ., Польша
[4]Конколи обсерваториясы, астрономия және жер туралы ғылымдарды зерттеу орталығы, 1007, Будапешт қ., Венгрия
[5]Хериот-Уатт халықаралық факультеті, Жұбанов университеті, 030000, Ақтөбе қ., Қазақстан

GAIA DR3 БАҚЫЛАУ ҚАТЕЛІКТЕРІНІҢ КОСМОЛОГИЯЛЫҚ УАҚЫТ ШКАЛАСЫНДАҒЫ ШАР ТӘРІЗДІ ШОҒЫРЛАРДЫҢ ОРБИТАЛАРЫН ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУГЕ ӘСЕРІ

Андатпа

Жақында галактиканың пайда болу тарихымен айналысатын астрономияның өркендеп келе жатқан саласы – Галактикалық археология танымал бола бастады. Шар тәрізді шоғырлардың Құс Жолында болған көптеген негізгі процестерге қатысы бар, сондықтан оларды зерттеудің, атап айтқанда, олардың орбиталарын қалпына келтірудің маңызы зор. Gaia DR3 каталогы жұлдыздың меншікті қозғалысы, радиалды жылдамдығы және гелиоцентрлік қашықтығы секілді 165 шар тәрізді шоғырлардың параметрлерін қандайда бір дәлдікпен қамтамасыз етеді, сондықтан Галактоцентрлік координаттар жүйесіне түрлендіру кезінде бастапқы деректерге берілген параметрлерді өлшеу қателіктерінің әсерін зерттеу маңызды, нәтижесінде бұның орбита пішініне де әсері болады. Біз шар тәрізді шоғырлардың орбиталарын 10 миллиард жылға кері қарай интегралдадық. Ол үшін Құс Жолы потенциалына мейлінше жақын болатын IllustrisTNG-100

космологиялық модельдеу дерекқорындағы 411321 жеке нөмірі бойынша алынған сыртқы динамикалық потенциалды галактика пайдаланылды. Интегралдау уақытының иерархиялық жеке қадамдары бар төртінші ретті Эрмит схемасына негізделген N-денені параллель есептейтін φ-GPU коды арқылы жүзеге асырылды. Қателердің қалыпты таралуын ескере отырып, бастапқы деректердің 1000 кездейсоқтығы жасалды және қателіктердің бастапқы жылдамдықтардың таралуына және орбита пішініне әсері қарастырылды. Меншікті қозғалыстары мен радиалды жылдамдырының параметрлері бойынша – ең үлкен, ал гелиоцентрлік қашықтықтары бойынша – ең кіші салыстырмалы қателерге ие. Шар тәрізді шоғырлардың жалпы санының 85%-ында барлық параметрлер бойынша 10%-дан аспайтын, ал 5,4%-да 1%-дан аспайтын салыстырмалы қателер бар екені анықталды. Салыстырмалы қателіктердің әртүрлі мәндері бар кластерлер үшін өлшеу қателерінің әсерін зерттей отырып, біз көптеген шар тәрізді шоғырлар үшін өлшеу қателерінің орбиталардың пішініне әсері маңызды емес деген қорытындыға келдік, сондықтан аталған шоғырлар үшін орбиталарды жоғары дәлдікпен қалпына келтіру мүмкін болады. Шар тәрізді шоғырлардың орбиталарын қалпына келтіру ғарыштық уақыт шкалаларын қамтитындықтан, өлшеу қателіктерін ескеру негізгі интегралдауға дейінгі дайындық процедурасының маңызды аспектісі болады.

Тірек сөздер: Шар тәрізді шоғырлар, Құс Жолы, IllustrisTNG-100 сыртқы динамикалық потенциалы, сандық модельдеу, Gaia DR3 каталогы.

[1]*Kuvatova D.,
MSc, ORCID ID: 0000-0002-5937-4985,
*e-mail: kuvatova@fai.kz
[2,3,1]Ishchenko M.,
c.ph.-m.sc, PhD, ORCID ID: 0000-0002-6961-8170,
e-mail: marina@mao.kiev.ua
[3,1,4,2]Berczik P.,
Dr.Sci, ORCID ID: 0000-0002-5004-199X,
e-mail: berczik@mao.kiev.ua
[1]Omarov C.,
Professor, PhD, ORCID ID: 0000-0002-1672-894X,
e-mail: chingis.omarov@fai.kz
[1,5]Kalambay M.,
PhD, ORCID ID: 0000-0002-0570-7270,
e-mail: kalambay@aphi.kz

[1]Fesenkov Astrophysical Institute, 050020, Almaty, Kazakhstan
[2]Main Astronomical Observatory, 01001, Kyiv, Ukraine
[3]Nicolaus Copernicus Astronomical Centre Polish Academy of Sciences, 00001, Warsaw, Poland
[4]Konkoly Observatory, Research Centre for Astronomy and Earth Sciences,
1007, Budapest, Hungary
[5]Heriot-Watt International Faculty, Zhubanov University, 030000, Aktobe, Kazakhstan

THE INFLUENCE OF OBSERVATIONAL ERRORS IN GAIA DR3 ON THE RECONSTRUCTION OF GLOBULAR CLUSTER ORBITS ON A COSMOLOGICAL TIMESCALE

Abstract

In recent years, the emerging field of astronomy focused on the history of galaxy formation, known as Galactic Archaeology, has been gaining popularity. Globular clusters have been involved in many key processes occurring in the Milky Way, making their study, particularly the reconstruction of their orbits, significantly important. The Gaia DR3 catalog provides parameters for 165 globular clusters, such as proper motions, radial velocity, and heliocentric distance, with certain accuracy. Therefore, it is important to examine the influence of measurement errors in these parameters on the initial data when converting to the Galactocentric coordinate system and, consequently, on the shape of the orbits. We integrated the orbits of globular clusters 10 billion years lookback. For physical justification during the integration, we used the external dynamic potential with the individual number 411321 from

the cosmological simulation database IllustrisTNG-100, which best reproduces the potential of the Milky Way. The integration was performed using the parallel N-body code φ-GPU, based on a fourth-order Hermite scheme with hierarchical individual block timesteps. A total of 1,000 randomizations of the initial data were created considering a normal distribution of errors, and the influence of errors on the scatter of initial velocities and on the shape of the orbits was examined. The parameters with the largest relative errors are proper motions and radial velocity, while the smallest errors are in heliocentric distance. It was found that 85% of the globular clusters have relative errors in all parameters of no more than 10%, and 5.4% have errors of no more than 1%. Investigating the influence of measurement errors for clusters with different magnitudes of relative errors, we concluded that for most globular clusters, the influence of measurement errors on the shape of the orbits is not significant. Consequently, it is possible to reconstruct the orbits with high accuracy for these clusters. Since the reconstruction of globular cluster orbits involves cosmological timescales, accounting for measurement errors is an important aspect of the preparatory procedure before the main integration.

Key words: globular clusters, Milky Way, external dynamic potential IllustrisTNG-100, numerical simulation, Gaia DR3 catalog.

Дата поступления статьи в редакцию: 15.08.2024