



Шаровые скопления, захваченные баром Млечного Пути

А.А. Смирнов^{1*}, А.Т. Байкова¹, В.В. Бобылев¹

¹ ГАО РАН

Аннотация

Уравнения движения для тридцати шаровых скоплений из центральной области Млечного Пути проинтегрированы назад во времени на 5 млрд. лет. Рассматривалось два типа потенциалов, один, полученный по подгонке кривой вращения Млечного Пути, и второй, полученный на основе N -body модели Млечного Пути. Проведен анализ полученных орбит методами спектральной динамики: определены характерные частоты f_x и f_R осцилляций соответствующих скоплений по координате x и цилиндрическому расстоянию R . Найдено, что шесть из рассмотренных скоплений (NGC 6266, NGC 6642, Terzan 1, Terzan 2, Terzan 4 и Terzan 5) имеют отношение частот $f_R/f_x \approx 2$, то есть поддерживают структуру бара в рассмотренных моделях.

Введение

Шаровые скопления — скопления звезд с общей массой порядка $(10^5 - 10^6)M_\odot$, связанных гравитационно и имеющих схожую кинематику. Другие важные характеристики, такие как металличности и возраста, для звезд одного и того же скопления могут систематически различаться. Так, в одном скоплении, может существовать несколько популяций звезд с различными металличностями (например, в NGC 6752, см. обсуждение в обзоре Bastian и Lardo, 2018).

Несмотря на возможное наличие нескольких популяций звезд, шаровые скопления нашей Галактики в целом представляют из себя весьма старые объекты возрастом порядка 10 млрд. лет. Это означает, что если скопление образовалось, например, в диске Млечного Пути, то свойства такого скопления (структура, металличности) должны так или иначе отражать то, как образовался диск нашей Галактики. Такая же связь, по-видимому, должна прослеживаться и у шаровых скоплений, образовавшихся в других динамических компонентах Млечного Пути, таких как гало или центральный балдж. Поэтому важной становится задача об определении того, к какой динамической компоненте Млечного Пути принадлежит то или иное скопление.

Одним из методов классификации скоплений является анализ параметров орбит шаровых скоплений, таких как эксцентриситеты, апоцентры, или, например, характерные частоты осцилляций звезды по орбите. Сами орбиты получаются интегрированием назад или вперед по времени уравнений движения для скоплений с известными положениями и скоростями в потенциале Млечного Пути (Cote, 1999; Bica, Ortolani и Barbuy, 2016; Pasquato и Chung, 2019; Ortolani, Nardiello и др., 2019; Ortolani, Held и др., 2019; Perez-Villegas и др., 2020; A. T. Bajkova, Carraro и др., 2020; Sun и др., 2023).

При использовании описанного выше подхода существует несколько трудностей. Во-первых, и расстояния, и скорости скоплений на текущую эпоху известны с некоторой ошибкой. Поэтому в некоторых работах использовался метод Монте-Карло, то есть рассматривалась не одна орбита для каждого скопления, а целый их набор, и результаты классификации затем усреднялись для всего полученного набора орбит (Ortolani, Nardiello и др., 2019; Ortolani, Held и др., 2019; Perez-Villegas и др., 2020). Во-вторых, сам потенциал Млечного Пути известен неточно. Особенно это

*e-mail:zeleniikot@gmail.com

касается центральных областей, где большая экстинкция (поглощение и рассеивание света) из-за влияния пыли (Bland-Hawthorn и Gerhard, 2016). Так, например, до сих пор нет однозначного ответа на вопрос, если ли в нашей Галактике так называемый классический балдж (центральная сферическая компонента, которая, предположительно, образуется за счет малых слияний с другими галактиками, там же). Кроме того, оценки параметров бара, который необходимо учитывать при интегрировании орбит в центральных областях, также сильно разнятся от работы к работе. Например, для скоростей узора бара разными авторами были получены оценки от 30 км/с/кпк до 70 км/с/кпк (Minchev, Nordhaus и Quillen, 2007; Li и др., 2022; Clarke и Gerhard, 2022; Antoja и др., 2014; Portail, Gerhard и др., 2017; Vovy и др., 2019; Sanders, Smith и Evans, 2019; Binney, 2020; Asano и др., 2020; Kawata и др., 2021; Chiba и Schönrich, 2021).

Из сказанного выше следует, что при классификации орбит скоплений нужно, вообще говоря, учитывать различные виды ошибок, возникающие как за счет неопределенности в координатах и скоростях самих скоплений, так и за счет ошибок в потенциале. В настоящей работе мы хотели бы более подробно рассмотреть частный вопрос о том, как именно учитывается бар-компонента при моделировании потенциала в подобных задачах. В недавних работах (Ortolani, Nardiello и др., 2019; Ortolani, Held и др., 2019; Perez-Villegas и др., 2020) использовался следующий подход. Вся балдж-компонента конвертировалась в бар, то есть сферически симметричный балдж, параметры которого получаются при подгонке кривой вращения Млечного Пути, заменялся на трехосный эллипсоид такой же массы с некоторым специфичным распределением плотности. Далее, для потенциала с таким баром определялось, захвачены ли конкретные скопления баром или нет. В настоящей работе мы хотим проверить, изменятся ли результаты относительно захвата орбит скоплений баром, если вместо предложенного подхода использовать модель потенциала Млечного Пути, полученную на основе N -body расчетов. Важным отличием такой модели от модели, используемой в цитируемых работах, является то, что она самосогласованная, то есть бар-компонента не просто “накладывается” поверх диска, а естественным образом формируется за счет неустойчивости звездного диска относительно бароподобных возмущений.

1 Симуляции

Рассматривались две модели распределения массы Млечного Пути. Первая модель — модель из работ А. Т. Vajkova и V. V. Bobylev, 2016; А. Vajkova и V. Bobylev, 2017, полученная подгонкой модельной кривой вращения к распределению скоростей объектов в пределах 200 кпк от центра Галактики (облаков молекулярного водорода, мазеров Млечного Пути, цефеид и других, см. также Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014) Для краткости будем называть далее эту модель BB2016. Модель состоит из трех компонент: диска Миямото-Нагаи (Miyamoto и Nagai, 1975), гало Наварро-Френка-Вайта (Navarro, Frenk и White, 1996) и пламмеровского балджа (Plummer, 1911). Потенциалы этих компонент записываются следующим образом

$$\Phi_{\text{bulge}}(r) = -\frac{M_b}{(r^2 + b_b^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

$$\Phi_{\text{disc}}(R, Z) = -\frac{M_d}{\left[R^2 + \left(a_d + \sqrt{Z^2 + b_d^2} \right)^2 \right]^{1/2}}, \quad (2)$$

$$\Phi_{\text{halo}}(r) = -\frac{M_h}{r} \ln \left(1 + \frac{r}{a_h} \right). \quad (3)$$

Описание параметров и их значения приведены в Таблице 1.

Для представления бара использовалась модель трехосного эллипсоида Феррера, профиль плотности которого описывается следующим образом:

$$\rho = \frac{105M_{\text{bar}}}{32\pi r q a^3} \left[1 - \left(\frac{\tilde{r}}{a_{\text{bar}}} \right)^2 \right]^2, \quad (4)$$

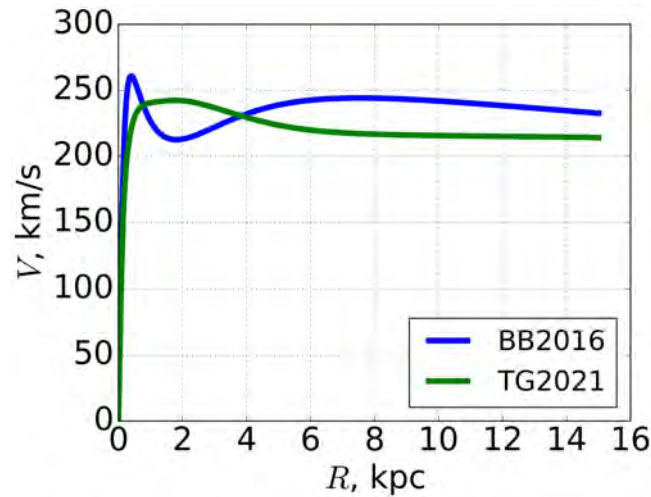


Рис. 1: Кривые вращения для двух моделей Млечного Пути, рассматриваемых в настоящей работе, синим цветом — модель из работ А. Т. Vajkova и V. V. Bobylev, 2016; А. Vajkova и V. Bobylev, 2017 (BB2016), зеленым — из работы Teppar-Garcia и др., 2021 (TG2021), усредненная по азимуту.

где $\tilde{r} = \sqrt{x^2 + (y/p)^2 + (z/q)^2}$. Описание параметров бара и их значения также приведены в Таблице 1. Отметим, что, при добавлении бара в модель, значение массы бара M_{bar} вычиталось из массы балджа M_b (таким же образом добавлялся бар в уже упоминавшихся работах Ortolani, Nardiello и др., 2019; Ortolani, Held и др., 2019; Perez-Villegas и др., 2020).

Вторая рассматриваемая модель Млечного Пути - это N -body модель из работы Teppar-Garcia и др., 2021. Для краткости будем называть далее эту модель TG2021. Авторы цитируемой работы специально подготовили численную модель, которая по измеряемым значениям физических параметров соответствует Млечному Пути. Среди таких параметров, например, масса в центральной области ($R < 5$ кпк), соотношение масс компонент (диск/гало), дисперсия скоростей в солнечной окрестности и т. д. (см. Таблицу 4 цитируемой работы). Важно отметить две особенности. Во-первых, указанная численная модель имеет очень хорошее пространственное разрешение (50 млн. частиц в диске). Вторая особенность, важная для настоящей работы, состоит в том, что в ходе вековой эволюции численной модели в ней естественным образом формируется бар. То есть при интегрировании орбит нет необходимости как-либо искусственно включать в модель бар-компоненту. Снапшоты модели TG2021 доступны в общем доступе на различные моменты времени (http://www.physics.usyd.edu.au/~tepper/proj_mwbar.html#) вплоть до 4.3 млрд лет. В настоящей работе мы рассматривали снапшот модели на 4.3 млрд лет.

Кривые вращения для рассматриваемых моделей приведены на Рис. 1.

В настоящей работе мы будем рассматривать всего 30 шаровых скопления, которые ранее в работе А. Т. Vajkova, Carrago и др., 2020 были идентифицированы, как принадлежащие бару или балджу (см. Таблицу 1). Данные по положениям и скоростям для скоплений брались из каталогов Vasiliev, 2019a; Baumgardt и Vasiliev, 2021; Vasiliev и Baumgardt, 2021, сформированных на основе Gaia DR2 и Gaia EDR3. При этом, следуя А. Т. Vajkova и V. V. Bobylev, 2016; А. Vajkova и V. Bobylev, 2017, предполагалось, что расстояние от центра Галактики до Солнца $R_{\odot} = 8.3$ кпк, сдвиг Солнца относительно плоскости диска $Z_{\odot} = 17$ пк, скорость локального стандарта покоя $V_{\odot} = 244$ км/с и пекулярные скорости Солнца $(u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}) = (-11.1, 12.2, 7.3)$ км/с (Schönrich, Binney и Dehnen, 2010).

Каждая орбита интегрировалась на 5 млрд лет назад во времени. Интегрирование проводилось с помощью пакета AGAMA (Vasiliev, 2019b) для языка python во вращающейся системе отсчета, связанной с баром. Для модели BB2016 рассматривался набор скоростей узора бара, $\Omega_{\text{bar}} = (30, 45, 60)$ км/с/кпк. Для модели TG2021 скорость узора бара фиксирована $\Omega_{\text{bar}} = 39$ км/с/кпк в отличие от модели BB2016. Это объясняется тем, что в случае N -body модели скорость узора меряется напрямую по смещению бара и с гораздо меньшими ошибками.

Параметр	Описание	Значение
M_b	Масса балджа	$1.0 \cdot 10^{10} M_\odot$
r_b	Линейный масштаб балджа	0.27 кпк
M_d	Масса звездного диска	$6.5 \cdot 10^{10} M_\odot$
a_d	Масштаб звездного диска в плоскости	4.4 кпк
b_d	Вертикальный масштаб звездного диска	0.3 кпк
M_h	Масса темного гало	$2.9 \cdot 10^{11} M_\odot$
M_h	Линейный масштаб темного гало	7.7 кпк
M_{bar}	Масса бара	$0.95 M_b$
a_{bar}	Большая полуось бара	5.0 кпк
p	Отношение большой к малой оси бара	2.0
q	Сплюснутость бара в вертикальном направлении	3.0

Таблица 1: Описание параметров модели

ID \ Ω_{bar} , км/с/кпк	BB2016			TG2021
	30	45	60	39
BH 229	1.51	3.68	3.77	1.67
ESO 452-11	2.59	3.49	4.39	2.33
Liller 1	1.45	1.35	1.26	1.49
NGC 6144	4.03	5.36	10.11	1.41
NGC 6266	2.00	3.21	4.39	2.02
NGC 6273	3.27	4.92	1.00	1.49
NGC 6293	2.65	3.71	5.90	2.29
NGC 6342	1.43	4.42	6.11	2.49
NGC 6355	2.72	3.54	5.52	2.46
NGC 6380	2.67	3.20	4.22	2.39
NGC 6401	2.63	3.46	5.12	1.81
NGC 6440	2.47	2.79	3.38	1.80
NGC 6453	2.77	3.74	4.92	0.87
NGC 6522	2.48	1.92	3.62	1.77
NGC 6528	2.70	3.53	4.44	2.16
NGC 6558	2.58	3.17	4.19	2.26
NGC 6624	2.67	2.79	3.58	2.26
NGC 6626	2.83	4.15	6.40	2.41
NGC 6638	2.80	3.28	4.48	2.57
NGC 6637	1.40	1.54	1.41	2.26
NGC 6642	2.57	3.05	3.71	2.00
NGC 6717	2.88	3.37	5.30	0.91
NGC 6723	3.41	6.12	13.04	3.34
Pal 6	3.17	4.40	8.91	2.11
Terzan 1	2.57	3.23	4.43	2.00
Terzan 2	2.50	2.69	3.16	2.00
Terzan 4	2.01	2.60	2.89	2.00
Terzan 5	2.53	2.96	3.71	2.01
Terzan 6	2.60	3.05	4.00	2.77
Terzan 9	2.65	3.33	4.58	2.26

Таблица 2: Список скоплений, орбиты которых исследовались в настоящей работе, и отношения характерных частот f_R/f_x орбит для разных скоростей узора в модели BB2016 (со второй по четвертую колонку) и модели TG2021 (пятая колонка).

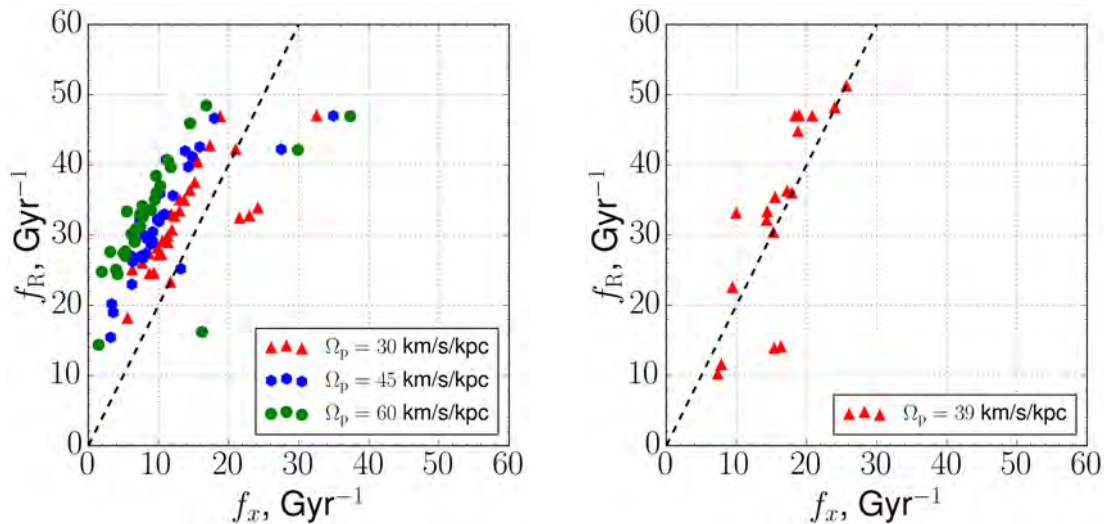


Рис. 2: Характерные частоты f_R и f_x для орбит скоплений для модели А. Т. Вайкова и V. V. Bobylev, 2016; А. Вайкова и V. Bobylev, 2017 (слева) для разных скоростей узора Ω_{bar} (разным цветом, см. легенду) и N -body модели Террег-Гарсиа и др., 2021. Линией на обоих графиках показана прямая, соответствующая отношению $f_R/f_x = 2.0$.

2 Классификация орбит

Для классификации орбит в настоящей работе применялись методы так называемой спектральной динамики (Binney и Spergel, 1982). Суть этого подхода в следующем. Каждой орбите можно поставить в соответствие характерные частоты f_x и f_R осцилляций по x и цилиндрическому расстоянию R , соответственно. При этом частоты находятся следующим образом. Для каждой из исследуемых орбит строятся периодограммы временных рядов $x(t)$ и $R(t)$ и затем находятся частоты линий с наибольшими амплитудами. Эти частоты и есть искомые f_x и f_R . Подобный анализ был проделан нами для всех исследуемых орбит. Далее, если отношение $f_R/f_x \approx 2$, то орбита считается захваченной в бар. Сильно же меньшие или большие значения характерны для орбит диска или, например, так называемых барлинз (внутренней округлой части, наблюдаемой у некоторых баров Smirnov, Tikhonenko и Sotnikova, 2021). Отметим, что четкую границу в отношениях частот, при которой орбита считается захваченной, указать сложно. Здесь мы будем следовать работам Smirnov, Tikhonenko и Sotnikova, 2021; Portail, Wegg и Gerhard, 2015; Parul, Smirnov и Sotnikova, 2020, где предполагалось, что, если $f_R/f_x = 2.0 \pm 0.1$, то орбита захвачена в бар.

На Рис. 2 приведено распределение частот f_R и f_x для моделей ВВ2016 (слева) и ТГ2021 (справа). Сами значения отношений приведены в Таблице 2. Для модели ВВ2016 всего два скопления оказываются захваченными баром, NGC 6266 и Terzan 6, при скорости узора $\Omega_{\text{bar}} = 30$ км/с/кпк. При этом с увеличением скорости узора наблюдается явная систематика: отношения частот для орбит оказываются все дальше и дальше от двойки, причем отличие может быть как в большую, так и в меньшую сторону. Орбиты захваченных в бар скоплений для этой модели показаны на Рис. 3.

В N -body модели орбит с отношениями частот, близкими к двум, оказывается больше. Таких скоплений шесть, это NGC 6266, NGC 6642, Terzan 1, Terzan 2, Terzan 4 и Terzan 5. Изображения этих орбит приведены на Рис. 4. Дополнительный анализ показал, что в данном случае, по-видимому, необходимо исключить орбиту NGC 6266 из списка захваченных баром. Орбита этого скопления напоминает по своему профилю типичную хаотическую орбиту. При этом измеренный показатель Ляпунова для неё оказывается больше нуля ($\lambda \approx 0.2$), что подтверждает то, что орбита является хаотичной. Возможно, однако, что полученная орбита принадлежит к классу “липких” хаотических орбит, однако уточнение этого факта требует более детального анализа.

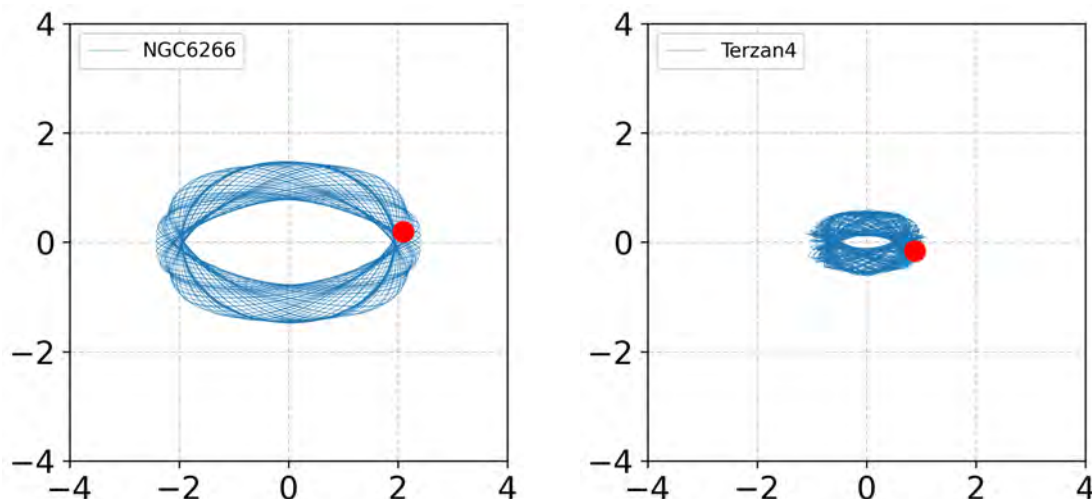


Рис. 3: Орбиты двух скоплений в плоскости звездного диска (вид XY), захваченных баром, для модели ВВ2016 и скорости узора $\Omega_{\text{бар}} = 30$ км/с/кпк. Отсчеты по осям даны в килопарсеках, большая ось бара (здесь не нарисованного) идет вдоль оси абсцисс. Красной точкой отмечено положение скопления, от которого начиналось интегрирование назад во времени.

3 Выводы

Методами спектральной динамики были исследованы орбиты 30 шаровых скоплений из центральной области Млечного Пути. Для модели Млечного Пути из работ А. Т. Vajkova и V. V. Bobylev, 2016; А. Vajkova и V. Bobylev, 2017 было найдено, что всего две орбиты (NGC 6266 и Terzan 4) из рассмотренных оказываются захваченным в бар и поддерживают его структуру. Причем это верно только для скорости узора $\Omega_{\text{бар}} = 30$ км/с/кпк. Если скорость узора больше, то указанные орбиты перестают поддерживать бар. Для все остальных скоплений было найдено, что чем больше скорости узора, тем более отношение соответствующих частот f_R/f_x отличается от двойки.

Анализ орбит той же выборки скоплений, но для потенциала N -body модели Terreg-Garcia и др., 2021 выявил ещё несколько скоплений, которые, по-видимому, могут также поддерживать бар. Это скопления NGC 6642, Terzan 1, Terzan 2, Terzan 4 и Terzan 5. При этом оказалось, что орбита скопления NGC 6266 для такого потенциала перестает поддерживать структуру бара и становится хаотичной.

В целом, полученные различия для двух рассмотренных потенциалов говорят о том, что от того, как учитывается бар в модели потенциала, результаты классификации скоплений могут меняться. Причем для потенциалов рассмотренных в настоящей работе в модели, основанной на N -body расчетах, получается больше скоплений, захваченных в бар. Отметим, что ранее в работах Perez-Villegas и др., 2020 и Ortolani, Nardiello и др., 2019 было найдено, что почти все орбиты шаровых скоплений, заключенные в центральной области Млечного Пути ($R < 5$ кпк), хотя и должны, по-видимому, принадлежать бару/балджу, тем не менее не поддерживают структуру бара. Возможно, что захваченных скоплений оказывается мало как раз из-за используемой цитируемыми авторами модели бара. Это планируется исследовать в дальнейшем.

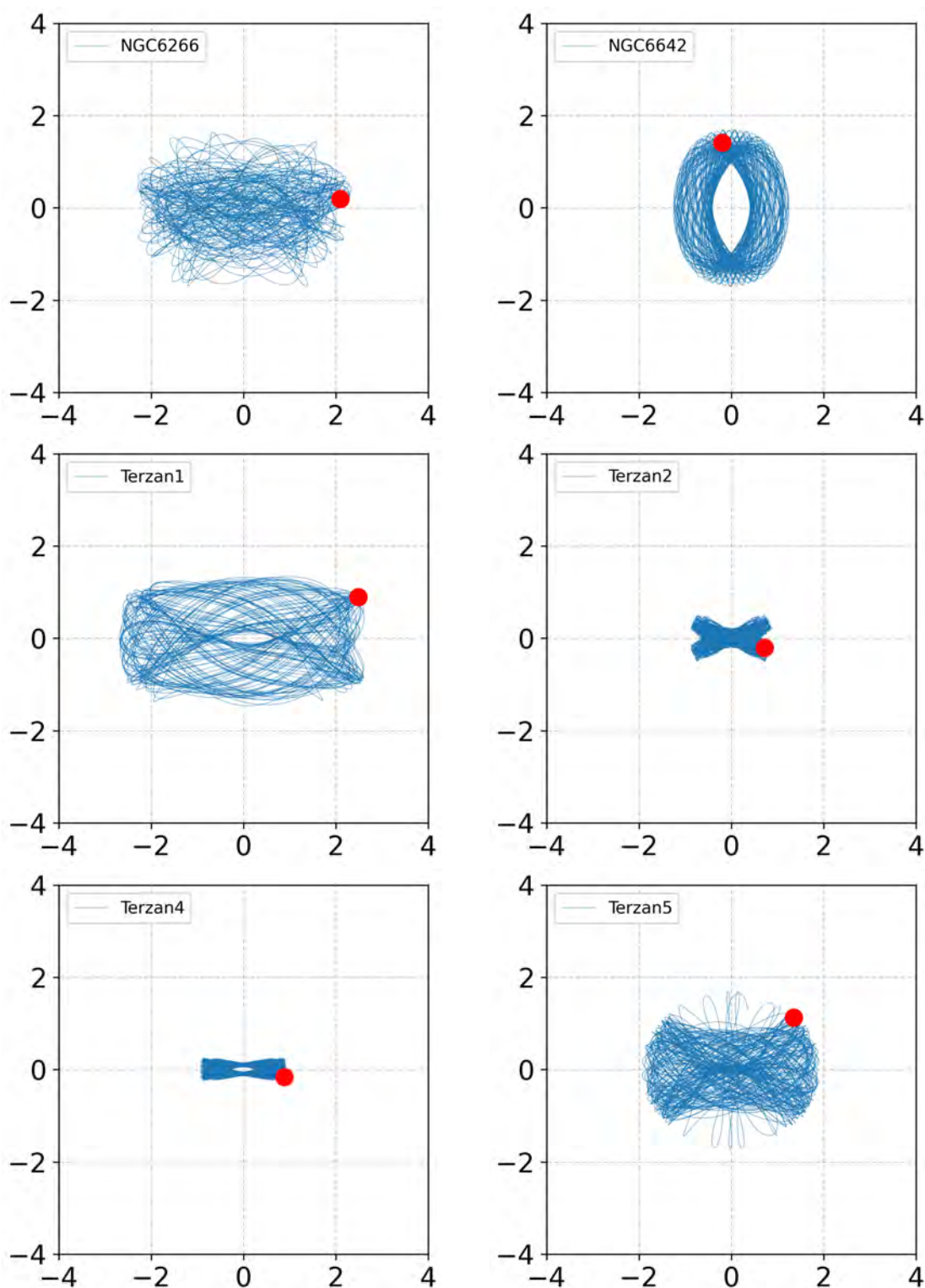


Рис. 4: Орбиты скоплений в плоскости звездного диска (вид XY) с отношениями $f_R/f_x \approx 2$ для модели TG2021 и скорости узора $\Omega_{\text{bar}} = 39$ км/с/кпк. Отсчеты по осям даны в килопарсеках, большая ось бара (здесь не нарисованного) идет вдоль оси абсцисс. Красной точкой отмечено положение скопления, от которого начиналось интегрирование назад во времени.

Список литературы

- Bastian, N. и C. Lardo (2018). [Multiple Stellar Populations in Globular Clusters](#). *ARA&A* 56, с. 83—136.
- Cote, P. (1999). [Kinematics of the Galactic Globular Cluster System: New Radial Velocities for Clusters in the Direction of the Inner Galaxy](#). *AJ* 118.1, с. 406—420.
- Bica, E., S. Ortolani и B. Barbuy (2016). [Globular Clusters in the Galactic Bulge](#). *PASA* 33, e028, e028.
- Pasquato, M. и C. Chung (2019). [Clustering clusters: unsupervised machine learning on globular cluster structural parameters](#). *MNRAS* 490.3, с. 3392—3403.
- Ortolani, S., D. Nardiello, A. Perez-Villegas, E. Bica и B. Barbuy (2019). [Halo intruders in the Galactic bulge revealed by HST and Gaia: the globular clusters Terzan 10 and Djorgovski 1](#). *A&A* 622, A94, A94.
- Ortolani, S., E. V. Held, D. Nardiello, S. O. Souza, B. Barbuy, A. Perez-Villegas, S. Cassisi, E. Bica, Y. Momany и I. Saviane (2019). [Another relic bulge globular cluster: ESO 456-SC38 \(Djorgovski 2\)](#). *A&A* 627, A145, A145.
- Perez-Villegas, A., B. Barbuy, L. O. Kerber, S. Ortolani, S. O. Souza и E. Bica (2020). [Globular clusters in the inner Galaxy classified from dynamical orbital criteria](#). *MNRAS* 491.3, с. 3251—3265.
- Bajkova, A. T., G. Carraro, V. I. Korchagin, N. O. Budanova и V. V. Bobylev (2020). [Milky Way Subsystems from Globular Cluster Kinematics Using Gaia DR2 and HST Data](#). *ApJ* 895.1, 69, с. 69.
- Sun, G., Y. Wang, C. Liu, R. J. Long, X. Chen и Q. Gao (2023). [Classifying Globular Clusters and Applying them to Estimate the mass of the Milky Way](#). *Research in Astronomy and Astrophysics* 23.1, 015013, с. 015013.
- Bland-Hawthorn, J. и O. Gerhard (2016). [The Galaxy in Context: Structural, Kinematic, and Integrated Properties](#). *ARA&A* 54, с. 529—596.
- Minchev, I., J. Nordhaus и A. C. Quillen (2007). [New Constraints on the Galactic Bar](#). *ApJ* 664.1, с. L31—L34.
- Li, Z., J. Shen, O. Gerhard и J. P. Clarke (2022). [Gas Dynamics in the Galaxy: Total Mass Distribution and the Bar Pattern Speed](#). *ApJ* 925.1, 71, с. 71.
- Clarke, J. P. и O. Gerhard (2022). [The pattern speed of the Milky Way bar/bulge from VIRAC and Gaia](#). *MNRAS* 512.2, с. 2171—2188.
- Antoja, T., A. Helmi, W. Dehnen, O. Bienayme, J. Bland-Hawthorn, B. Famaey, K. Freeman, B. K. Gibson, G. Gilmore, E. K. Grebel, G. Kordopatis, A. Kunder, I. Minchev, U. Munari, J. Navarro, Q. Parker, W. A. Reid, G. Seabroke, A. Siebert, M. Steinmetz, F. Watson, R. F. G. Wyse и T. Zwitter (2014). [Constraints on the Galactic bar from the Hercules stream as traced with RAVE across the Galaxy](#). *A&A* 563, A60, A60.
- Portail, M., O. Gerhard, C. Wegg и M. Ness (2017). [Dynamical modelling of the galactic bulge and bar: the Milky Way's pattern speed, stellar and dark matter mass distribution](#). *MNRAS* 465.2, с. 1621—1644.
- Bovy, J., H. W. Leung, J. A. S. Hunt, J. T. Mackereth, D. A. Garcia-Hernandez и A. Roman-Lopes (2019). [Life in the fast lane: a direct view of the dynamics, formation, and evolution of the Milky Way's bar](#). *MNRAS* 490.4, с. 4740—4747.
- Sanders, J. L., L. Smith и N. W. Evans (2019). [The pattern speed of the Milky Way bar from transverse velocities](#). *MNRAS* 488.4, с. 4552—4564.
- Binney, J. (2020). [Trapped orbits and solar-neighbourhood kinematics](#). *MNRAS* 495.1, с. 895—904.
- Asano, T., M. S. Fujii, J. Baba, J. Bedorf, E. Sellentin и S. Portegies Zwart (2020). [Trimodal structure of Hercules stream explained by originating from bar resonances](#). *MNRAS* 499.2, с. 2416—2425.
- Kawata, D., J. Baba, J. A. S. Hunt, R. Schönrich, I. Ciucă, J. Fricke, G. Seabroke и M. Cropper (2021). [Galactic bar resonances inferred from kinematically hot stars in Gaia EDR3](#). *MNRAS* 508.1, с. 728—736.

- Chiba, R. и R. Schönrich (2021). [Tree-ring structure of Galactic bar resonance](#). MNRAS 505.2, с. 2412—2426.
- Bajkova, A. T. и V. V. Bobylev (2016). [Rotation curve and mass distribution in the Galaxy from the velocities of objects at distances up to 200 kpc](#). Astronomy Letters 42.9, с. 567—582.
- Bajkova, A. и V. Bobylev (2017). [Parameters of Six Selected Galactic Potential Models](#). Open Astronomy 26.1, с. 72—79.
- Bhattacharjee, P., S. Chaudhury и S. Kundu (2014). [Rotation Curve of the Milky Way out to ~200 kpc](#). ApJ 785.1, 63, с. 63.
- Miyamoto, M. и R. Nagai (1975). [Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies](#). PASJ 27, с. 533—543.
- Navarro, J. F., C. S. Frenk и S. D. M. White (1996). [The Structure of Cold Dark Matter Halos](#). ApJ 462, с. 563.
- Plummer, H. C. (1911). [On the problem of distribution in globular star clusters](#). MNRAS 71, с. 460—470.
- Tepper-Garcia, T., J. Bland-Hawthorn, E. Vasiliev, E. Athanassoula, O. Gerhard, A. Quillen, P. McMillan, K. Freeman, G. F. Lewis, R. Teyssier, S. Sharma, M. R. Hayden и S. Buder (2021). [A barred Milky Way surrogate from an N-body simulation](#). arXiv e-prints, arXiv:2111.05466, arXiv:2111.05466.
- Vasiliev, E. (2019a). [Proper motions and dynamics of the Milky Way globular cluster system from Gaia DR2](#). MNRAS 484.2, с. 2832—2850.
- Baumgardt, H. и E. Vasiliev (2021). [Accurate distances to Galactic globular clusters through a combination of Gaia EDR3, HST, and literature data](#). MNRAS 505.4, с. 5957—5977.
- Vasiliev, E. и H. Baumgardt (2021). [Gaia EDR3 view on galactic globular clusters](#). MNRAS 505.4, с. 5978—6002.
- Schönrich, R., J. Binney и W. Dehnen (2010). [Local kinematics and the local standard of rest](#). MNRAS 403.4, с. 1829—1833.
- Vasiliev, E. (2019b). [AGAMA: action-based galaxy modelling architecture](#). MNRAS 482.2, с. 1525—1544.
- Binney, J. и D. Spergel (1982). [Spectral stellar dynamics](#). ApJ 252, с. 308—321.
- Smirnov, A. A., I. S. Tikhonenko и N. Y. Sotnikova (2021). [Face-on structure of barlenses and boxy bars: an insight from spectral dynamics](#). MNRAS 502.4, с. 4689—4707.
- Portail, M., C. Wegg и O. Gerhard (2015). [Peanuts, brezels and bananas: food for thought on the orbital structure of the Galactic bulge](#). MNRAS 450, с. L66—L70.
- Parul, H. D., A. A. Smirnov и N. Y. Sotnikova (2020). [Orbital Ingredients for Cooking X-structures in Edge-on Galaxies](#). ApJ 895.1, 12, с. 12.

Globular clusters captured by the Milky Way’s bar

A.A. Smirnov¹, A.T. Bajkova¹, V.V. Bobylev¹

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Abstract

Equations of motion are integrated backwards in time by 5 Gyr for thirty globular clusters from the central parts of the Milky Way. We considered two models of the potential, one, which is obtained by fitting the velocity curve of the Milky Way, and the second one, which is based on the results of N -body simulations. Obtained orbits were studied within the approach of spectral dynamics: main frequency of oscillations f_x and f_R were calculated for each of the orbits. Our analysis showed that six of the studied globular clusters (NGC 6266, NGC 6642, Terzan 1, Terzan 2, Terzan 4, and Terzan 5) have frequencies ratios $f_R/f_x \approx 2$, that is, they can support the bar in the considered models.