



Шаровые скопления в центральной области Млечного Пути I. Влияние бара на параметры орбит по данным Gaia EDR3

А.Т. Байкова^{1*}, А.А. Смирнов¹, В.В. Бобылев¹

¹ ГАО РАН

Аннотация

Работа посвящена анализу влияния галактического бара на орбитальное движение шаровых скоплений в центральной области Галактики. Для этой задачи было отобрано 45 шаровых скоплений, 34 из которых принадлежат балджу и 11 – диску. Для формирования 6D фазового пространства, требуемого для интегрирования орбит, использованы самые точные на сегодняшний день астрометрические данные со спутника Gaia (Vasiliev, Baumgardt, 2021), а также новые уточненные средние расстояния (Baumgardt, Vasiliev, 2021). Получены орбиты шаровых скоплений как в осесимметричном потенциале, так и в потенциале, включающем бар. При этом варьировались масса, скорость вращения и размеры бара. Произведено сравнение таких орбитальных параметров как апоцентрическое и перифрическое расстояния, эксцентриситет и максимальное расстояние от галактической плоскости. Показано, что наибольшее влияние на орбитальное движение оказывает масса бара, которое выражается в основном в увеличении как апоцентрического, так и перифрического расстояния у подавляющего большинства шаровых скоплений. Эксцентриситеты орбит у подавляющего большинства также изменяются значительно, причем наблюдается изменение как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения, особенно в диапазоне значений от 0.2 до 0.8. Наибольшие изменения параметров наблюдаются у шаровых скоплений с большими радиальными скоростями и малыми перифрическими расстояниями. Менее выражено изменение орбитальных параметров от скорости вращения бара. Влияние геометрических параметров бара незначительно в принятом диапазоне их изменений. На нескольких примерах показано, что шаровые скопления балджа более подвержены влиянию бара, чем принадлежащие диску.

Введение

В настоящее время известно около 170 галактических шаровых скоплений (ШС). По теоретическим оценкам их число в Галактике может достигать 200 (Огородников, 1958). Более 150 ШС имеют полные астрометрические (позиционные) и кинематические измерения (собственные движения и лучевые скорости) для формирования 6D фазового пространства, необходимого для построения орбит. Изучение орбитального движения ШС имеет огромное значение для изучения эволюции Галактики, поскольку они являются старейшими объектами, возраст которых достигает 13 млрд лет.

В большинстве исследований движение галактических шаровых скоплений рассматривается в осесимметричном стационарном потенциале. Однако реальный потенциал нашей галактики не является ни осесимметричным, ни стационарным. И в первую очередь это связано с тем, что в центре Галактики располагается вращающийся вытянутый бар.

Целью данной работы является исследование орбитального движения ШС как в осесимметричном потенциале, так и потенциале, включающем бар. Поскольку параметры бара известны с большой неопределенностью, то мы проводим анализ влияния бара при различных значениях его

*e-mail:bajkova@gaoran.ru

параметров. Очевидно, что наибольшему влиянию подвержены орбиты, занимающие центральную часть Галактики, преимущественно, область балджа, диаметром около 4 кпк (Gontcharov и А. Т. Вайкова, 2013).

Для формирования 6D фазового пространства, необходимого для интегрирования орбит, мы используем последнюю, наиболее точную версию каталога собственных движений ШС Vasiliev и Baumgardt 2021, основанную на данных измерений Gaia EDR3, а также новые средние расстояния ШС Baumgardt и Vasiliev 2021.

Отметим, что эта работа представляет собой только первый этап исследований, который посвящен сравнению таких параметров орбит как апоцентрическое и перигцентрическое расстояния, эксцентриситет и максимальное расстояние от галактической плоскости, полученных интегрированием в различных потенциалах. Второй этап работы будет посвящен изучению влияния бара на частотные характеристики орбит с целью выявления шаровых скоплений, захваченных баром.

Работа структурирована следующим образом. В первом разделе дается краткое описание принятых моделей потенциала – осесимметричного потенциала и потенциала с баром. Во втором разделе даются ссылки на использованные астрометрические данные. Третий раздел посвящен отбору шаровых скоплений. В четвертом разделе дается сравнительный анализ результатов интегрирования орбит. В Заключении сформулированы основные выводы.

1 Модель галактического потенциала

1.1 Осесимметричный потенциал

Осесимметричный гравитационный потенциал Галактики представляется в виде суммы трех составляющих — центрального сферического балджа $\Phi_b(r(R, Z))$, диска $\Phi_d(r(R, Z))$ и массивного сферического гало темной материи $\Phi_h(r(R, Z))$:

$$\Phi(R, Z) = \Phi_b(r(R, Z)) + \Phi_d(r(R, Z)) + \Phi_h(r(R, Z)). \quad (1)$$

Здесь используется цилиндрическая система координат (R, ψ, Z) с началом координат в центре Галактики. В прямоугольной системе координат (X, Y, Z) с началом координат в центре Галактики расстояние до звезды (сферический радиус) будет $r^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2 + Z^2$, при этом ось X направлена от Солнца к галактическому центру, ось Y – перпендикулярно к оси X в сторону вращения Галактики, ось Z – перпендикулярно к галактической плоскости XY в сторону северного галактического полюса. Гравитационный потенциал выражается в единицах $100 \text{ км}^2/\text{с}^2$, расстояния – в кпк, массы – в единицах галактической массы $M_G = 2.325 \times 10^7 M_\odot$ (M_\odot – масса Солнца), соответствующей гравитационной постоянной $G = 1$.

Потенциалы балджа $\Phi_b(r(R, Z))$ и диска $\Phi_d(r(R, Z))$ представляются в форме, предложенной Миямото, Нагаи (Miyamoto и Nagai, 1975):

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

$$\Phi_d(R, Z) = -\frac{M_d}{\left[R^2 + \left(a_d + \sqrt{Z^2 + b_d^2} \right)^2 \right]^{1/2}}, \quad (3)$$

где M_b, M_d – массы, b_b, a_d, b_d – масштабные параметры компонентов в кпк. Компонент гало представляется согласно работе Наварро, Френка и Уайта Navarro, Frenk и White, 1997:

$$\Phi_h(r) = -\frac{M_h}{r} \ln \left(1 + \frac{r}{a_h} \right). \quad (4)$$

В таблице 1 даны значения параметров модели галактического потенциала (2)–(4), которые были найдены Байковой, Бобылевым (А. Т. Вайкова и V. V. Bobylev, 2016) с использованием кривой

Таблица 1: Значения параметров модели галактического потенциала, $M_G = 2.325 \times 10^7 M_\odot$

M_b	443 M_G
M_d	2798 M_G
M_h	12474 M_G
b_b	0.2672 кпк
a_d	4.40 кпк
b_d	0.3084 кпк
a_h	7.7 кпк
M_{bar}	430, 280, 130 M_G
Ω_b	30, 40, 50 км/с/кпк
q_b	4.5, 5.0, 5.5 кпк
θ_b	25°
a/b	2.38, 3.33, 2.50, 2.50, 3.33
a/c	3.03, 2.50, 3.33, 2.50, 3.33
Варианты	V0, V1, V2, V3, V4

вращения Галактики Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014, построенной по объектам, расположенным на расстояниях R до ~ 200 кпк. Отметим, что при построении этой кривой вращения Галактики были использованы следующие значения локальных параметров $R_\odot = 8.3$ кпк и $V_\odot = 244$ км/с. В работе А. Т. Вайкова и V. V. Bobylev, 2016 модель (2)–(4) обозначена как модель III. Принятая модель потенциала является наилучшей среди рассмотренных в работе А. Вайкова и V. Bobylev, 2017 шести моделей, поскольку обеспечивает наименьшую невязку между данными и модельной кривой вращения.

1.2 Модель бара

В качестве потенциала центрального бара была выбрана модель трехосного эллипсоида (Palous, Jungwiert и Kopecky, 1993):

$$\Phi_{bar} = -\frac{M_{bar}}{(q_b^2 + X^2 + [Ya/b]^2 + [Za/c]^2)^{1/2}}, \quad (5)$$

где $X = R \cos \vartheta$, $Y = R \sin \vartheta$, a, b, c — три полуоси бара, q_b — масштабный параметр бара; $\vartheta = \theta - \Omega_b t - \theta_b$, $tg(\theta) = Y/X$, Ω_b — круговая скорость бара, t — время интегрирования, θ_b — угол ориентации бара относительно галактических осей X, Y , отсчитывается от линии, соединяющей Солнце и центр Галактики (ось X) до большой оси бара по направлению вращения Галактики.

Моделирование галактического потенциала с баром проведено при варьировании всех параметров модели бара. Было рассмотрено три значения массы бара: $M_{bar} = 430, 280, 130 M_G$ (при этом масса бара вычиталась из массы балджа с тем, чтобы кривая вращения оставалась практически неизменной), три значения скорости вращения бара: $\Omega_b = 30, 40, 50$ км/с/кпк, три значения длины бара: $q_b = 4.5, 5.0, 5.5$ кпк и 5 вариантов (V0, V1, V2, V3, V4) для соотношений полуосей эллипсоида, задающих форму бара (Таблица 1). Исходя из информации в многочисленной литературе, в качестве базовых параметров бара были использованы следующие: $M_{bar} = 430 M_G$, $\Omega_b = 40$ км/с/кпк, $q_b = 5$ кпк, $\theta_b = 25^\circ$, соотношение осей эллипсоида V0. Последние три параметра приняты, в частности, в Palous, Jungwiert и Kopecky, 1993.

Для интегрирования уравнений движения мы использовали алгоритм Рунге-Кутты четвертого порядка.

Значение пекулярной скорости Солнца относительно местного стандарта покоя было принято равной $(u_\odot, v_\odot, w_\odot) = (11.1, 12.2, 7.3) \pm (0.7, 0.5, 0.4)$ км/с согласно работе Schönrich, Binney и

Dehnen, 2010. Возвышение Солнца над плоскостью Галактики принято равным 17 пк в соответствии с работой V. V. Bobylev и A. T. Vajkova, 2016.

2 Данные

Данные о собственных движениях шаровых скоплений взяты из нового каталога Vasiliev и Baumgardt, 2021, составленного на основе наблюдений Gaia EDR3. Лучевые скорости взяты из работы Vasiliev, 2019, которые, в свою очередь, были взяты в основном из работы Baumgardt, Hilker и др., 2019. Новые средние значения расстояний до шаровых скоплений взяты из работы Baumgardt и Vasiliev, 2021. Сравнительный анализ новых данных о собственных движениях и расстояниях с предыдущими версиями каталогов дан, например, в работе A. T. Vajkova и V. V. Bobylev, 2022. Здесь отметим лишь, что точность измерения новых собственных движений в среднем повысилась в два раза по сравнению с измерениями Gaia DR2. Как показывает анализ лучевых скоростей, представленных в каталоге Vasiliev, 2019, их ошибки не являются существенными и составляют для подавляющего большинства ШС нашей выборки меньше 1% от значений самих скоростей. Более существенными ошибками отягощены все еще собственные движения и расстояния. Все неопределенности в данных (о положениях, расстояниях, собственных движениях, лучевых скоростях) нами учтены методом Монте-Карло (1000 реализаций) при вычислении неопределенностей компонент 6D пространства $(x_o, y_o, z_o, u_o, v_o, w_o)$ (см. обозначения в A. T. Vajkova и V. V. Bobylev 2022), в дальнейшем использованного для вычисления орбит. Неопределенности параметров орбит: апоцентрического расстояния, перицентрического расстояния, эксцентриситета и максимального расстояния от галактической плоскости ($apo, peri, Z_{max}$ и ecc , соответственно) были вычислены также с использованием метода Монте-Карло (1000 реализаций), с учетом неопределенностей компонент 6D пространства, а также неопределенностей вектора пекулярной скорости Солнца по Шонриху (Schönrich, Binney и Dehnen, 2010). Уравнения движения пробной частицы в гравитационном потенциале Галактики подробно представлены в работе A. T. Vajkova и V. V. Bobylev, 2022. Результаты вычислений параметров орбит и их неопределенностей, произведенных как в осесимметричном потенциале, так и потенциале с баром с различными параметрами, приведены в Таблицах 2-6.

3 Отбор шаровых скоплений

Имеющийся в нашем распоряжении каталог ШС (A. T. Vajkova и V. V. Bobylev, 2022) насчитывает 152 объекта. Выделение шаровых скоплений из этого множества, принадлежащих области балджа/бара, было произведено в соответствии с чисто геометрическим критерием, рассмотренным в работе Massari, Koppelman и Helmi, 2019 и использованным также нами в работе A. T. Vajkova, Carrago и др., 2020. Он очень прост и заключается в отборе ШС, апоцентрическое расстояние орбит которых не превышает 3.5 кпк. Орбиты вычисляются в осесимметричном потенциале.

Отметим, что использование результатов классификации, полученных в работах [16,17] по собственным движениям из каталога Gaia DR2 и расстояниям Харриса (Harris, 1996) по версии данных каталога Harris, 2010, не совсем корректно в настоящей работе, поскольку мы имеем дело с новыми данными. Изменения в данных (особенно расстояниях) могут сильно повлиять на орбитальные характеристики ШС. Поэтому мы провели новую классификацию. Применение ограничения на апоцентрическое расстояние ШС ($apo \leq 3.5$ кпк) позволило выделить 39 объектов, большинство из которых совпало с результатами прежней классификации [17,20], но имеются и различия.

Далее мы из полученного множества ШС выделили ШС, принадлежащие дисковой составляющей Галактики. Для этого мы применили предложенный нами в работе A. T. Vajkova, Carrago и др., 2020 вероятностный метод разделения ШС на подсистемы Галактики. Он основан на бимодальности распределения параметра L_Z/ecc , где L_Z - вертикальная (Z) составляющая углового момента, ecc - эксцентриситет орбиты. Иллюстрация метода показана на верхней левой панели

Рис. 1. В результате применения этого метода удалось выделить 9 ШС, принадлежащих диску. Остальные 30 принадлежат непосредственно балджу. К полученной выборке из 39 объектов мы присоединили еще 6 ШС, принадлежащих области балджа по классификации Massari, Koppelman и Helmi, 2019, но не вошедших в нашу выборку из-за незначительного превышения апоцентрического расстояния орбит.

Таким образом, мы сформировали выборку из 45 ШС в центральной области Галактики, из которых 34 принадлежат балджу, 9 – диску (ESO 456-SC78, Terzan 3, Pismis 26, NGC 6256, 6304, 6569, 6540, 6539, 6553), и еще 2 объекта (NGC 6325, Djorg 2), имеющие значительные отрицательные вращательные скорости, предположительно тоже принадлежат диску. Полный список из 45 объектов перечислен ниже, в первой колонке Таблиц 2–6 с вычисленными параметрами орбит. В верхней части таблиц представлены 34 объекта балджа, в нижней части – 11 перечисленных выше объектов диска. Первые 30 объектов балджа представляют собой ШС, выявленные в результате применения вероятностного метода разделения, остальные 4 – ШС по классификации Массари и др. (2019). Обозначения орбитальных параметров и формулы для их вычисления можно найти, в частности, в работе А. Т. Vajkova и V. V. Bobylev, 2022, где также приводится таблица с полным набором параметров, вычисленных в принятом нами осесимметричном потенциале. На Рис. 1 приводятся также диаграммы " L_Z/ecc – полная энергия E " "круговая скорость – эксцентриситет" и "радиальная скорость – круговая скорость из которых ясно видно разделение ШС на подсистемы балджа и диска.

На Рис. 2 показано распределение отобранных 45 ШС в проекциях $X - Y$ и $X - Z$ галактической системы координат. На рисунке также показаны сечения трехосного эллипсоида, которым описывается бар, с параметрами $q_b = 5$ кпк, $\theta_b = 25^\circ$ и соотношением осей V_0 .

4 Результаты интегрирования орбит в различных потенциалах

В данном разделе приводится весь табличный и графический материал, отражающий проведенное моделирование орбитального движения 45 ШС в различных потенциалах.

В ПРИЛОЖЕНИИ приводятся изображения орбит в проекциях $X - Y$ и $X - Z$ галактической системы координат. На левых панелях показаны орбиты, полученные в осесимметричном потенциале, на правых – в потенциале, включающем бар с базовыми параметрами: $M_b = 430M_G$, $\Omega_b = 40$ км/с/кпк, $q_b = 5$ кпк, $\theta_b = 25^\circ$, соотношение осей V_0 . Во втором случае орбиты построены в системе вращающегося бара. Красной линией показана проекция трехосного эллипсоида, которым описывается бар. Интегрирование орбит произведено на 2.5 млрд лет назад. Приведенные изображения позволяют визуально оценить степень изменения орбитального движения. В Таблице 2 приводятся параметры орбит ($apo, peri, ecc, Z_{max}$) и их неопределенности, вычисленные как в осесимметричном потенциале, так и потенциале с баром. На Рис. 3 приводятся соответствующие диаграммы сравнения. Как видно из рисунка, в результате воздействия бара параметры орбит претерпели существенные изменения. Причем у подавляющего большинства ШС существенно увеличились апоцентрические расстояния. Периферические расстояния преимущественно увеличились у объектов с малым значением в осесимметричном потенциале. Менее существенно изменились максимальные расстояния от галактической плоскости Z_{max} . Эксцентриситеты орбит у подавляющего большинства изменились значительно, причем наблюдается изменение как в сторону увеличения, так и уменьшения, особенно в диапазоне значений от 0.2 до 0.8. У высокоэксцентричных ШС изменение менее значительно. Как следует из приведенного в ПРИЛОЖЕНИИ каталога орбит, наибольшие изменения параметров наблюдаются у ШС с большими радиальными скоростями и малыми периферическими расстояниями.

Далее было исследовано влияние отдельных параметров бара на орбитальные характеристики ШС в пределах вариаций, приведенных в Таблице 1. Для каждого варьируемого параметра бара приводятся таблицы орбитальных параметров и их неопределенностей, а также диаграммы сравнения.

Так, в Таблице 3 приводятся параметры орбит, построенных в потенциале с баром с различной

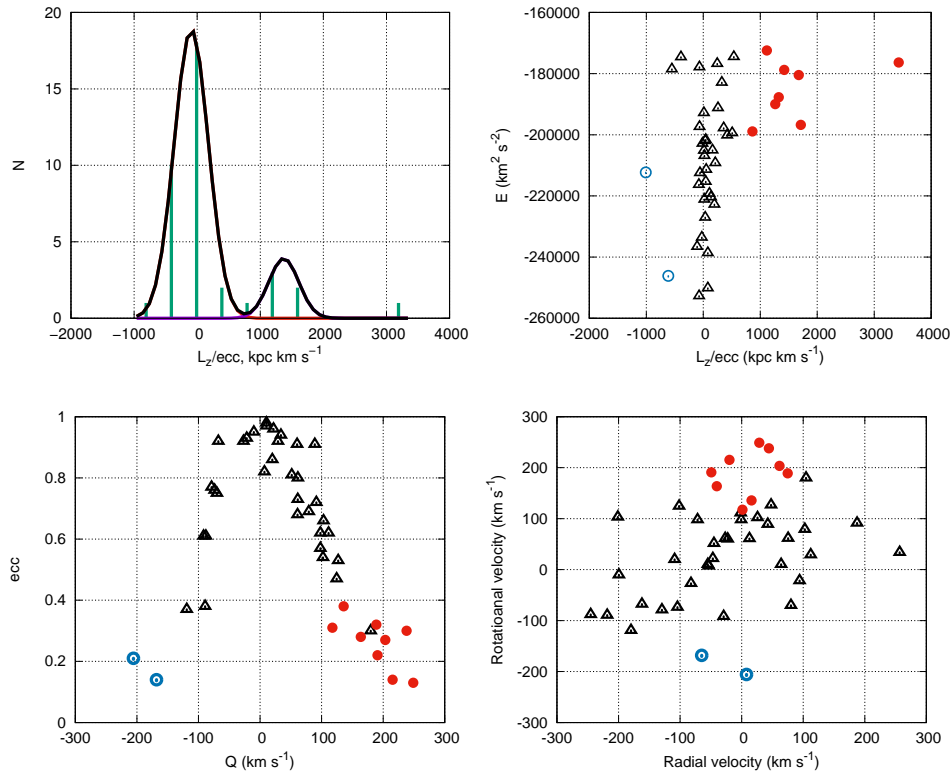


Рис. 1: Выделение ШС, принадлежащих балджу/бару, с использованием вероятностного критерия, предложенного в работе Massari, Koppelman и Helmi, 2019. На верхней левой панели изображена гистограмма распределения ШС по параметру L_z/ecc . Четко прослеживается бимодальность распределения. Левая гауссиана определяет вероятность принадлежности ШС балджу, правая гауссиана – диску. На верхней правой панели изображена диаграмма " L_z/ecc – полная энергия E " для полученной выборки из 45 ШС. На нижней левой панели изображена диаграмма "круговая скорость – эксцентриситет". На нижней правой панели изображена диаграмма "радиальная скорость – круговая скорость". Черными треугольниками обозначены ШС, принадлежащие балджу, красными закрытыми кружочками – ШС, принадлежащие диску, голубыми открытыми кружочками – ШС с ретроградными орбитами, также принадлежащие диску.

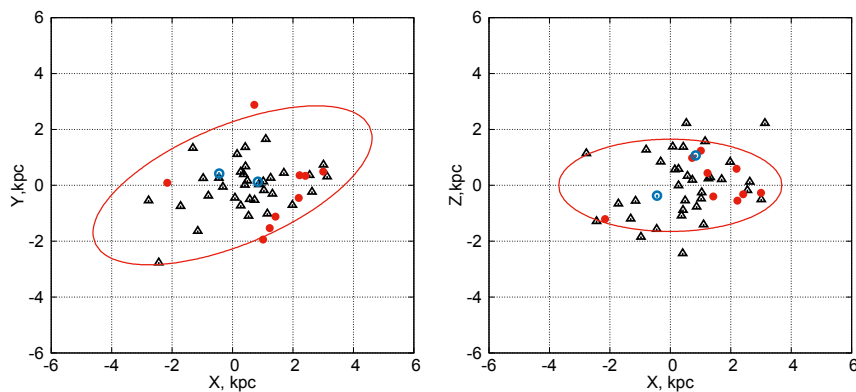


Рис. 2: Распределение отобранных 45 ШС в проекциях X – Y (левая панель) и X – Z (правая панель) галактической системы координат. Обозначения объектов те же, что и на предыдущем рисунке. Красной линией показано сечение бара (трехосного эллипсоида) с параметрами: $q_b = 5$ кпк, $\theta_b = 25^\circ$, соотношение осей V_0 .

массой, в Таблице 4 – с различной скоростью вращения бара, в Таблице 5 – с различной длиной бара, в Таблице 6 – с различным соотношением осей бара. На Рис. 4,5,6,7 приводятся соответствующие диаграммы сравнения, которые дают представление о степени влияния параметра бара на орбитальные свойства ШС.

Анализ полученных результатов говорит о том, что влияние на параметры орбит определяется, в основном, массой бара, что ясно видно из сравнения Рис. 4 и Рис. 3, в которых наблюдается схожесть характера изменения орбитальных параметров. При этом, чем больше масса бара, тем сильнее изменение параметров, что явилось вполне ожидаемым результатом. Наиболее ярко это выражено для объектов балджа, менее ярко – для объектов диска. Изменение вращательной скорости бара на величину ± 10 км/с/кпк оказывает умеренное влияние на изменение орбитальных параметров. Наиболее заметным оно является для объектов диска. И совсем небольшое влияние на рассматриваемые орбитальные параметры оказывает изменение размера и формы бара в заданных пределах. Так что основным фактором большого разброса параметров орбит, полученных в осесимметричном и неосесимметричном потенциалах (Рис.3), относительно линии сравнения является большая масса бара, фактически равная массе всего балджа.

На Рис. 8 и 9 приведена иллюстрация сделанных выводов на примере 6 объектов. Так, на Рис.8 изображены орбиты для ШС NGC6266, NGC 6522, Terzan 4, принадлежащих балджу, а на Рис. 9 – для ШС NGC 6540, NGC 6553, NGC 6569, принадлежащих диску. На этих рисунках слева направо даны орбиты 1) для различных масс бара: $M_b = 430, 280, 130$ (в единицах M_G), показанных фиолетовым, зеленым и горчичным цветом, соответственно; 2) для различных угловых скоростей вращения бара: $\Omega_b = 30, 40, 50$ км/с/кпк (фиолетовый, зеленый и горчичный цвета); 3) для различной длины бара: $q = 4.5, 5.0, 5.5$ кпк (фиолетовый, зеленый и горчичный цвета); 4) для различных соотношений осей бара: V0 V1, V2, V3, V4 (фиолетовый, зеленый, горчичный, желтый и синий цвета).

Как видно из Рис. 8, действительно, наиболее сильным на орбитальное движение ШС балджа является влияние массы бара (особенно заметно для Terzan 4), затем идет влияние скорости вращения бара (заметно для NGC 6522), влияние остальных параметров бара незначительно. В случае объектов диска (Рис. 9) влияние массы бара слабее, чем на объекты балджа, но все-таки является заметным, незначительно только для NGC 6553. Сильнее проявляется влияние скорости вращения бара (особенно для NGC 6569). Остальные параметры бара влияют незначительно. В случае ретроградных дисковых объектов (NGC 6325, Djorg2), как следует из Таблиц 3 и 4, влияние массы бара значительно, а влияние изменения скорости вращения бара незначительно.

5 Заключение

В данной работе рассмотрено влияние бара на орбитальное движение шаровых скоплений в центральной области нашей галактики на основе новейших данных о собственных движениях из каталога Gaia EDR3 (Vasiliev и Baumgardt, 2021) и новых средних расстояниях (Baumgardt и Vasiliev, 2021). Произведен отбор 45 шаровых скоплений, 34 из которых принадлежат балджу и 11 – диску Галактики. Проведено сравнение орбитальных характеристик ШС, полученных в осесимметричном потенциале и потенциале, включающем бар в виде трехосного эллипсоида. Интегрирование орбит производится на 2.5 млрд лет в прошлое. В работе представлен весь численный и графический материал по проведенному моделированию движения ШС в потенциале Галактики с различными параметрами бара. Исследована степень влияния бара на орбитальные параметры ШС в целом, а также каждого отдельного параметра (массы, скорости вращения, формы и размера бара) путем варьирования параметров в разумных пределах исходя из информации, известной из литературы.

Моделирование показало, что наибольшее влияние на орбитальное движение оказывает масса бара, которое выражается в основном в увеличении как апоцентрического, так и перигрического расстояния у подавляющего большинства ШС. Эксцентриситеты орбит у подавляющего большинства также изменяются значительно, причем наблюдается изменение как в сторону уве-

личения, так и в сторону уменьшения, особенно в диапазоне значений от 0.2 до 0.8. Как следует из приведенного в ПРИЛОЖЕНИИ каталога орбит, наибольшие изменения параметров наблюдаются у ШС с большими радиальными скоростями и малыми перицентрическими расстояниями. Менее выражено изменение орбитальных параметров от скорости вращения бара. Влияние геометрических параметров бара незначительно в принятом диапазоне их изменений. На нескольких примерах показано, что ШС балджа более подвержены влиянию бара, чем дисковые.

Авторы благодарны рецензенту за ряд полезных замечаний, позволивших улучшить статью.

Список литературы

- Огородников, К. Ф. (1958). *Динамика звездных систем*. М.:Физматгиз.
- Gontcharov, G. A. и А. Т. Bajkova (2013). *Galactic orbits of Hipparcos stars: Classification of stars*. *Astronomy Letters* 39.10, с. 689—702.
- Vasiliev, E. и Н. Baumgardt (2021). *Gaia EDR3 view on galactic globular clusters*. *MNRAS* 505.4, с. 5978—6002.
- Baumgardt, Н. 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.
- Miyamoto, М. 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 (1997). *A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering*. *ApJ* 490.2, с. 493—508.
- Bajkova, А. Т. 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.
- Bhattacharjee, P., S. Chaudhury и S. Kundu (2014). *Rotation Curve of the Milky Way out to ~200 kpc*. *ApJ* 785.1, с. 63.
- Bajkova, А. и V. Bobylev (2017). *Parameters of Six Selected Galactic Potential Models*. *Open Astronomy* 26.1, с. 72—79.
- Palous, J., B. Jungwiert и J. Kopecky (1993). *Formation of rings in weak bars : inelastic collisions and star formation*. *A&A* 274, с. 189—202.
- Schönrich, R., J. Binney и W. Dehnen (2010). *Local kinematics and the local standard of rest*. *MNRAS* 403.4, с. 1829—1833.
- Bobylev, V. V. и А. Т. Bajkova (2016). *Hercules and Wolf 630 stellar streams and galactic bar kinematics*. *Astronomy Letters* 42.4, с. 228—239.
- Vasiliev, E. (2019). *Proper motions and dynamics of the Milky Way globular cluster system from Gaia DR2*. *MNRAS* 484.2, с. 2832—2850.
- Baumgardt, Н., M. Hilker, A. Sollima и A. Bellini (2019). *Mean proper motions, space orbits, and velocity dispersion profiles of Galactic globular clusters derived from Gaia DR2 data*. *MNRAS* 482.4, с. 5138—5155.
- Bajkova, А. Т. и V. V. Bobylev (2022). *A New Catalog of orbits of 152 Globular Clusters from Gaia EDR3*. arXiv e-prints, arXiv:2212.00739.
- Massari, D., Н. Н. Koppelman и A. Helmi (2019). *Origin of the system of globular clusters in the Milky Way*. *A&A* 630, с. L4.
- Bajkova, А. Т., 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, с. 69.
- Harris, W. E. (1996). *A Catalog of Parameters for Globular Clusters in the Milky Way*. *AJ* 112, с. 1487.
- (2010). *A New Catalog of Globular Clusters in the Milky Way*. arXiv e-prints, arXiv:1012.3224.

Globular clusters in the central region of the Milky way galaxy. I. Bar influence on the orbit parameters according to Gaia EDR3

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

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Abstract

The work is devoted to the analysis of the influence of the galactic bar on the orbital motion of globular clusters in the central region of the Galaxy. For this task, 45 globular clusters were selected, 34 of which belong to the bulge and 11 to the disk. The most accurate astrometric data from the Gaia satellite (Vasiliev and Baumgardt, 2021), as well as new refined average distances (Baumgardt and Vasiliev, 2021), were used to form the 6D phase space required for orbit integration. The orbits of globular clusters are obtained both in an axisymmetric potential and in a potential including a bar. In this case, the mass, rotation speed, shape and scale length of the bar were varied. A comparison is made of such orbital parameters as apocentric and pericentric distances, eccentricity and maximum distance from the galactic plane. It is shown that the mass of the bar exerts the greatest influence on the orbital motion, which is expressed mainly in an increase in both the apocentric and pericentric distances in the vast majority of globular clusters. The eccentricities of the orbits in the overwhelming majority also change significantly, and there is a change both upward and downward, especially in the range of values from 0.2 to 0.8. The greatest changes in parameters are observed in globular clusters with high radial velocities and small pericentric distances. The change in orbital parameters depending on the bar rotation speed is less pronounced. The influence of the geometric parameters of the bar is insignificant in the accepted range of their changes. Several examples show that globular clusters in the bulge are more affected by the bar than those belonging to the disk.

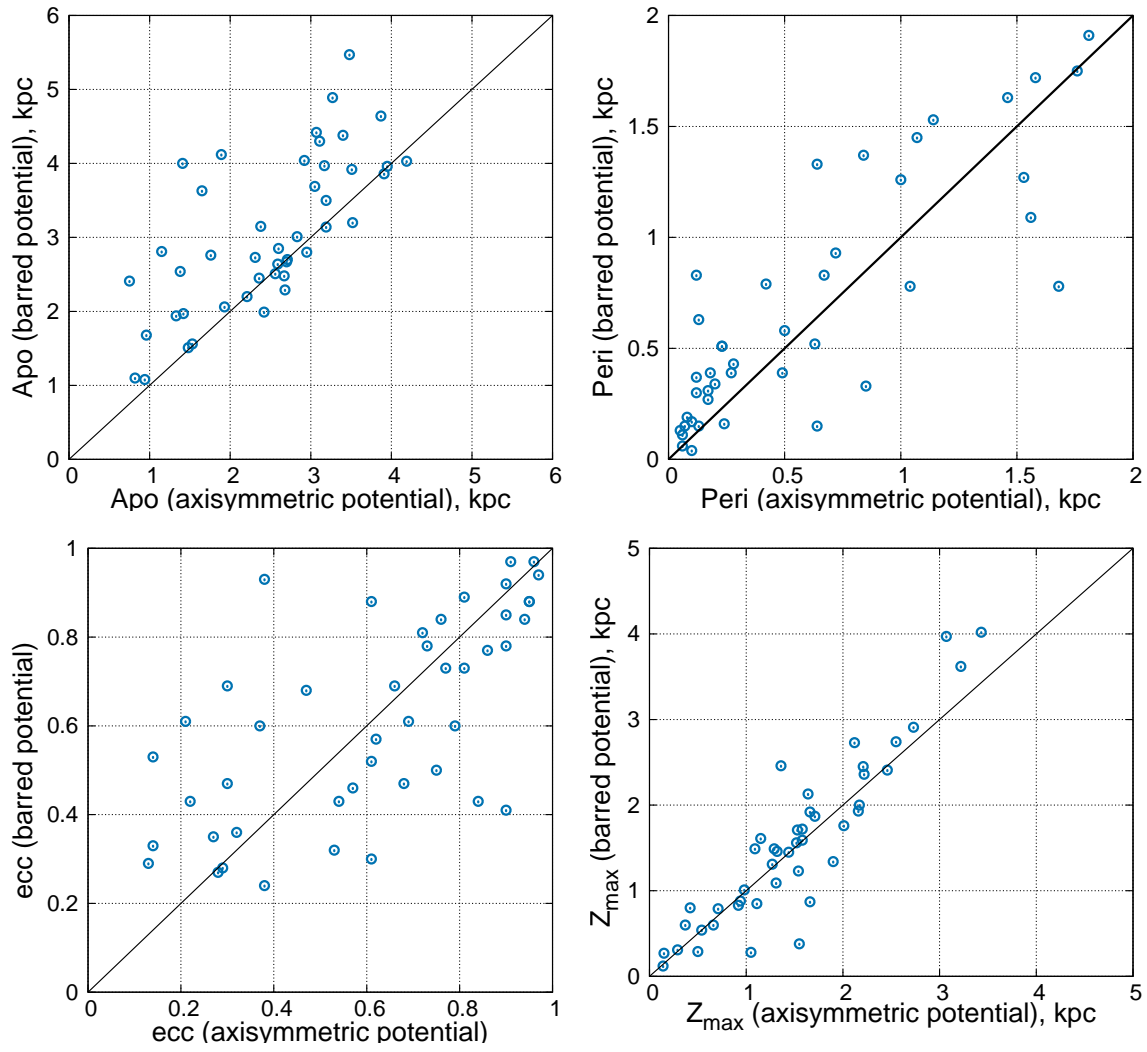


Рис. 3: Сравнение орбитальных параметров ШС в осесимметричном потенциале и потенциале с баром. Параметры бара: $M_b = 430M_G$, $\Omega_b = 40$ км/с/кпк, $q_b = 5$ кпк, $\theta_b = 25^\circ$, соотношение осей V_0 . На каждой панели нанесена линия совпадения.

Таблица 3: Параметры орбит 45 ШС в погониале с баром в зависимости от массы бара: $M_b = 430M_G$ (индекс "1"), $M_b = 280M_G$ (индекс "2"), $M_b = 130M_G$ (индекс "3").

Table with 14 columns: Имя ШС, apo^1 , apo^2 , apo^3 , $peri^1$, $peri^2$, $peri^3$, ecc^1 , ecc^2 , ecc^3 , Z_{max}^1 , Z_{max}^2 , Z_{max}^3 . Rows list star clusters like NGC 6144, E452-11, NGC 6266, etc., with their orbital parameters for three different bar masses.

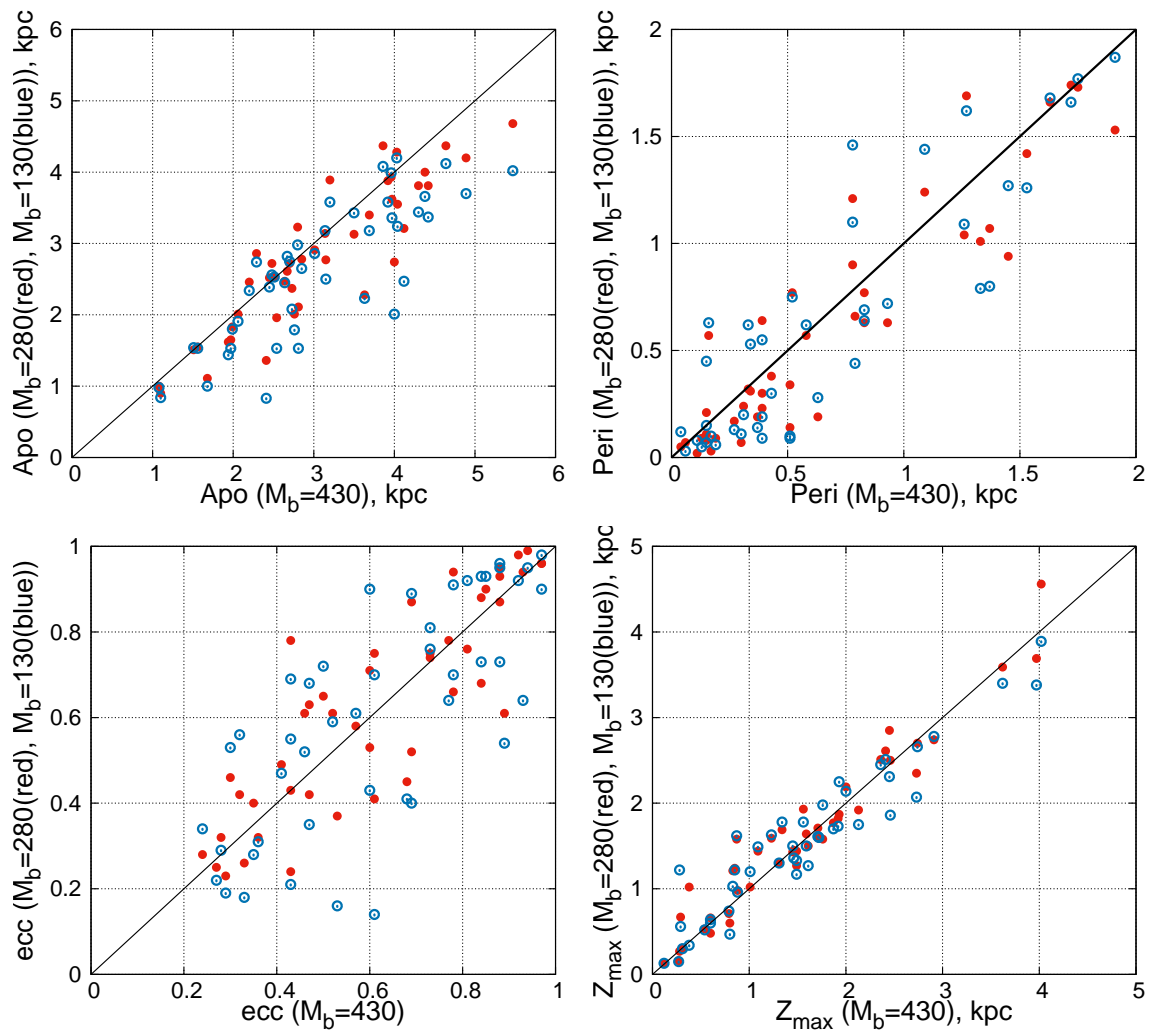


Рис. 4: Сравнение орбитальных параметров ШС в потенциале с баром с различной массой. Другие параметры бара: $\Omega_b = 40$ км/с/кпк, $q_b = 5$ кпк, $\theta_b = 25^\circ$, соотношение осей V0.

Таблица 4: Параметры орбит 45 ШС в потенциале с баром в зависимости от скорости вращения бара: $\Omega_b = 30$ км/с/кпк (индекс "1"), $\Omega_b = 40$ км/с/кпк (индекс "2"), $\Omega_b = 50$ км/с/кпк (индекс "3").

Table with 12 columns: Имя, арг1, арг2, арг3, рери1, рери2, рери3, есс, есс2, есс3, Z1, Z2, Z3. Rows list 45 star clusters including NGC 144, NGC 6266, NGC 6273, NGC 6293, NGC 6342, NGC 6355, Terzan 2, Terzan 4, BH 229, Liller 1, NGC 6380, Terzan 1, NGC 6401, Pal 6, Terzan 5, NGC 6440, Terzan 6, NGC 6453, Terzan 9, NGC 6522, NGC 6528, NGC 6558, NGC 6624, NGC 6626, NGC 6638, NGC 6637, NGC 6642, NGC 6717, NGC 6723, NGC 6171, NGC 6316, NGC 6388, NGC 6539, NGC 6553, NGC 6652, Terzan 3, NGC 6256, NGC 6304, Pismis 26, NGC 6540, NGC 6569, NGC 6579, NGC 6325, Djorg 2.

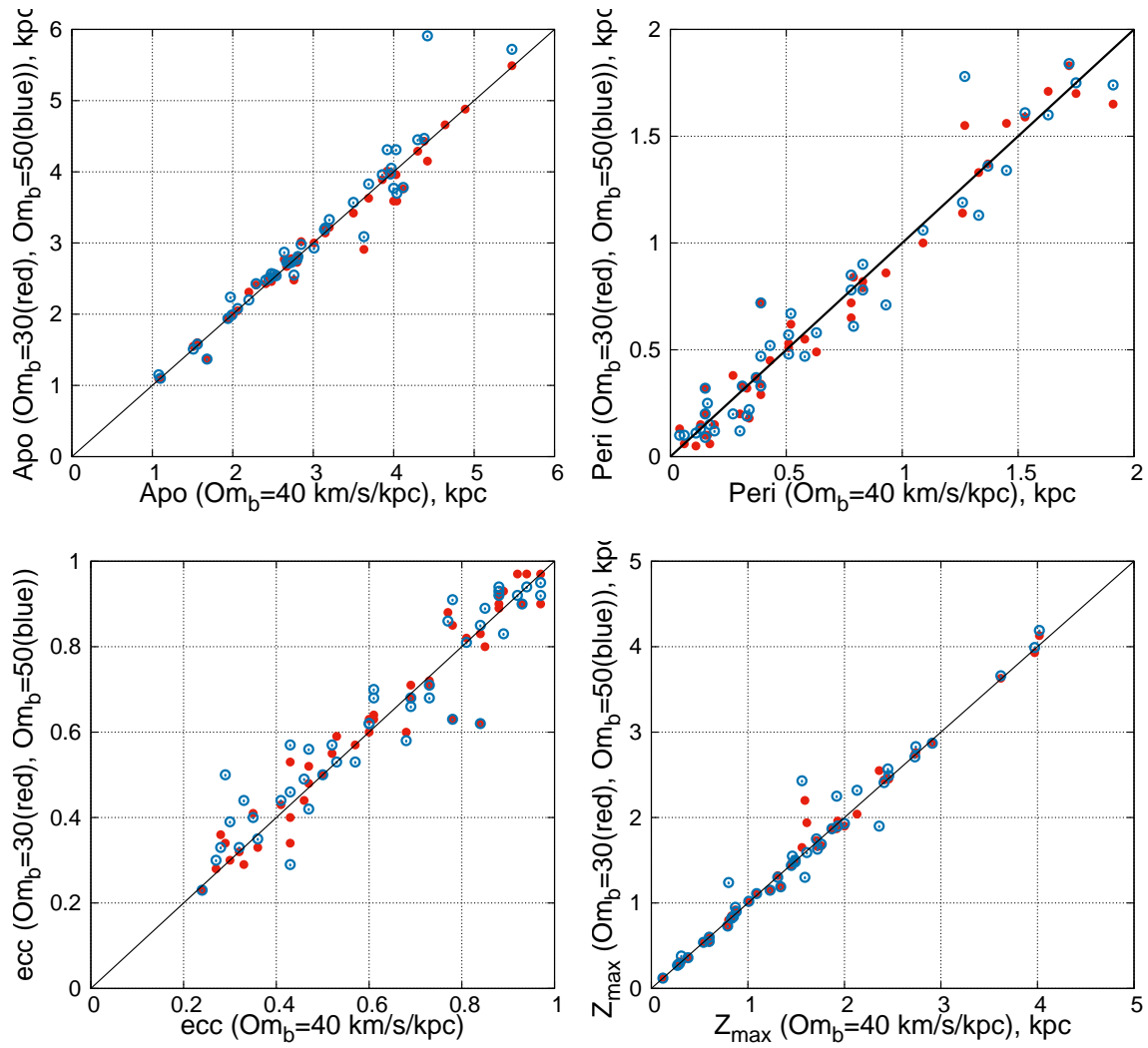


Рис. 5: Сравнение орбитальных параметров ШС в потенциале с баром с различной скоростью вращения. Другие параметры бара: $M_b = 430M_G$, $q_b = 5$ кпк, $\theta_b = 25^\circ$, соотношение осей V0.

Таблица 5: Параметры орбит 45 ШС в погониале с баром в зависимости от длины бара:
ϕ_b = 4.5 кпк (индекс "1"), ϕ_b = 5 кпк (индекс "2"), ϕ_b = 5.5 кпк (индекс "3").

Table with columns: Имя ШС, aσ0^1, aσ0^2, aσ0^3, perr^1, perr^2, perr^3, ecc^1, ecc^2, ecc^3, Z1_max, Z2_max, Z3_max [кпк].

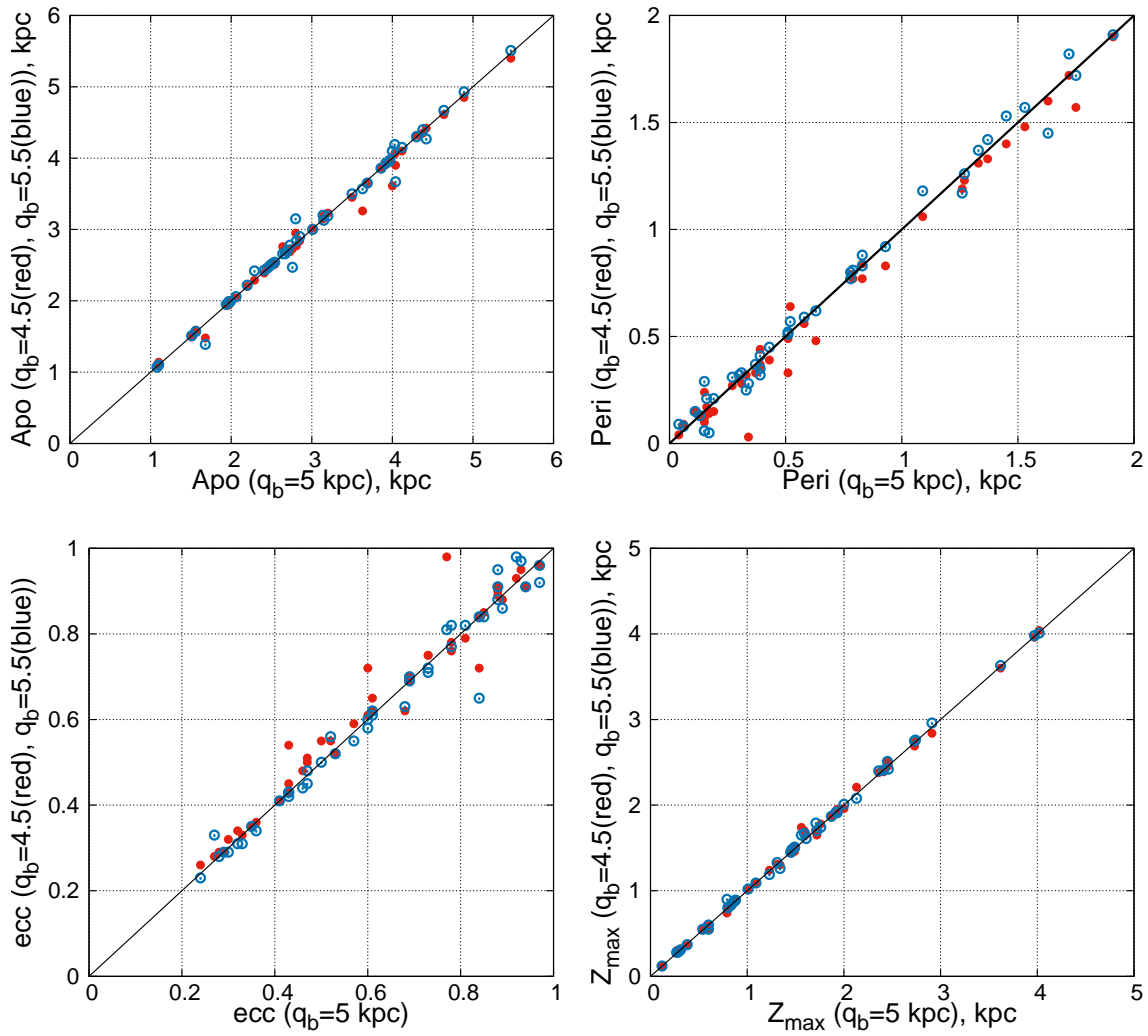


Рис. 6: Сравнение орбитальных параметров ШС в потенциале с баром различной длины. Другие параметры бара: $M_b = 430M_G$, $\Omega_b = 40$ км/с/кпк, $\theta_b = 25^\circ$, соотношение осей V0.

Таблица 6: Параметры орбит 45 ШС в потенциале с баром с различным соотношением осей: V1 ("1"), V2 ("2"), V3 ("3"), V4 ("4").

Table with 15 columns: Имя ШС, apo1, apo2, apo3, apo4, peri1, peri2, peri3, peri4, ecc1, ecc2, ecc3, ecc4, Z1, Z2, Z3, Z4. Rows list various star clusters like NGC 6144, E452-11, NGC 6266, etc.

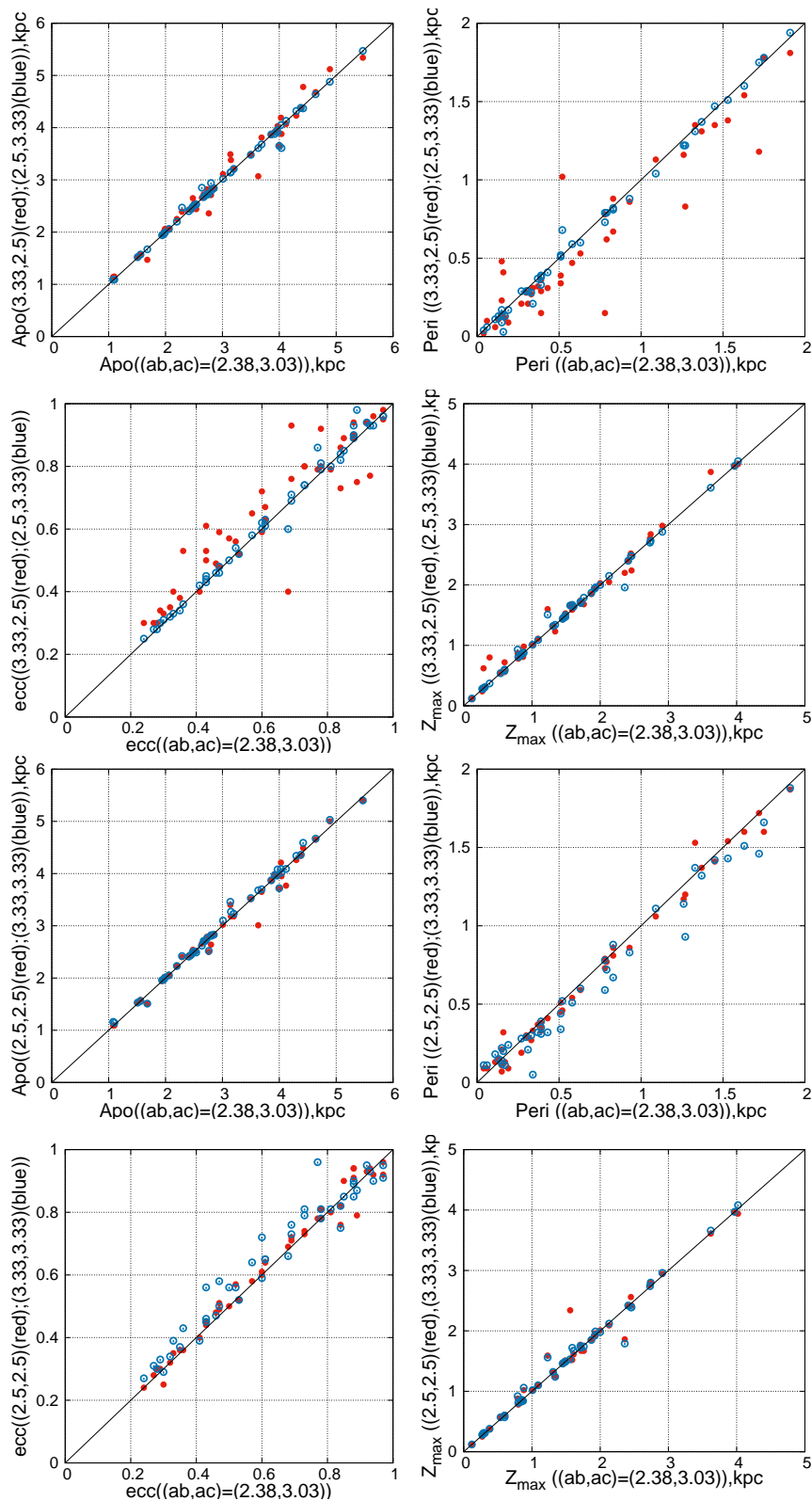


Рис. 7: Сравнение орбитальных параметров ШС в потенциале с баром с различным соотношением осей. Другие параметры бара: $M_b = 430M_G$, $\Omega_b = 40$ км/с/кпк, $q_b = 5$ кпк, $\theta_b = 25^\circ$.

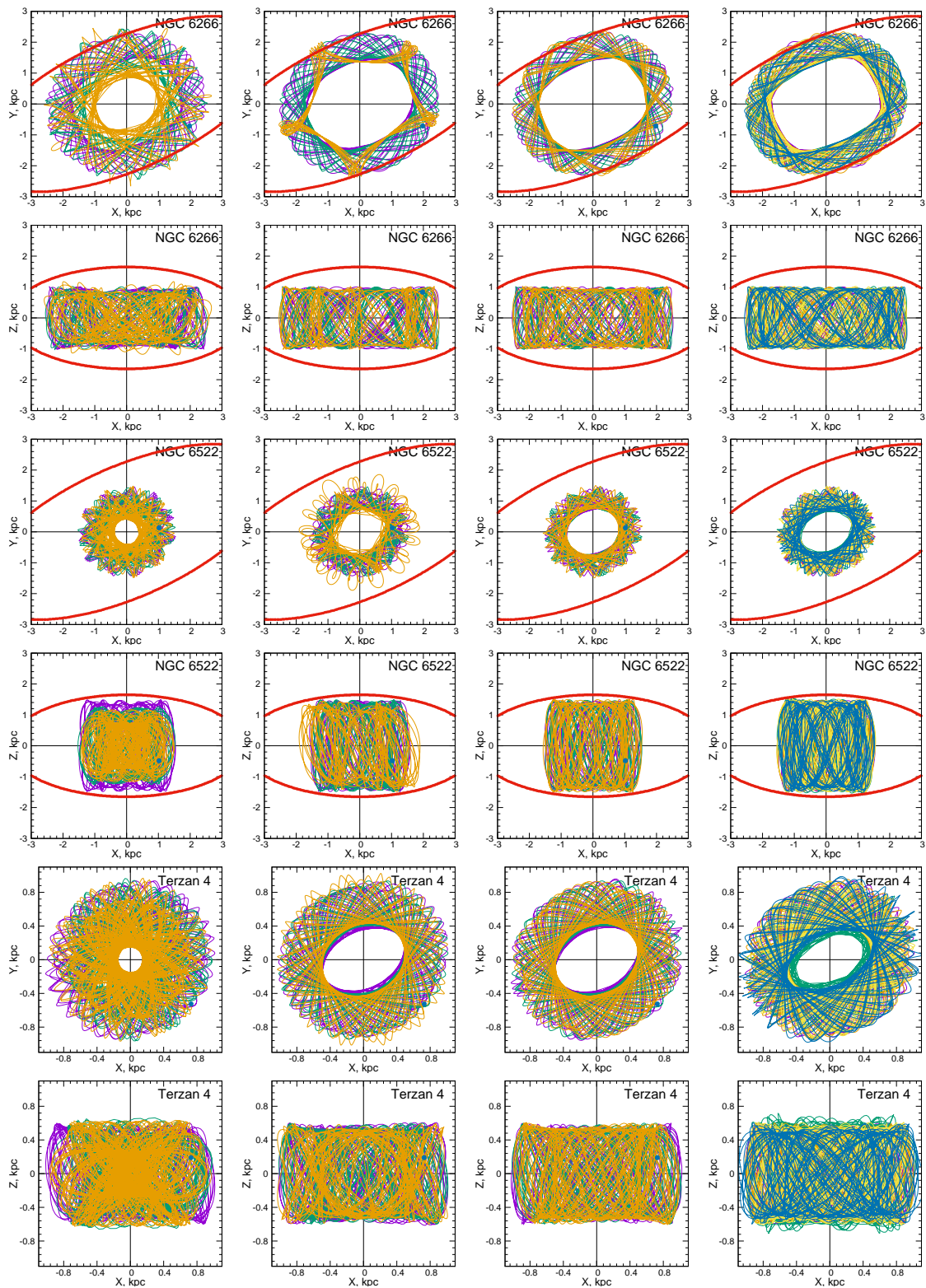


Рис. 8: Орбиты (в системе вращающегося бара) ШС NGC 6266, NGC 6522, Terzan 4, принадлежащих балджу, в проекциях на X-Y и X-Z галактические плоскости (верхний и нижний ряды для каждого ШС, соответственно). Красными линиями показаны сечения бара. Синим кружочком обозначено начало орбиты. Расшифровка цветов орбит дана в тексте статьи.

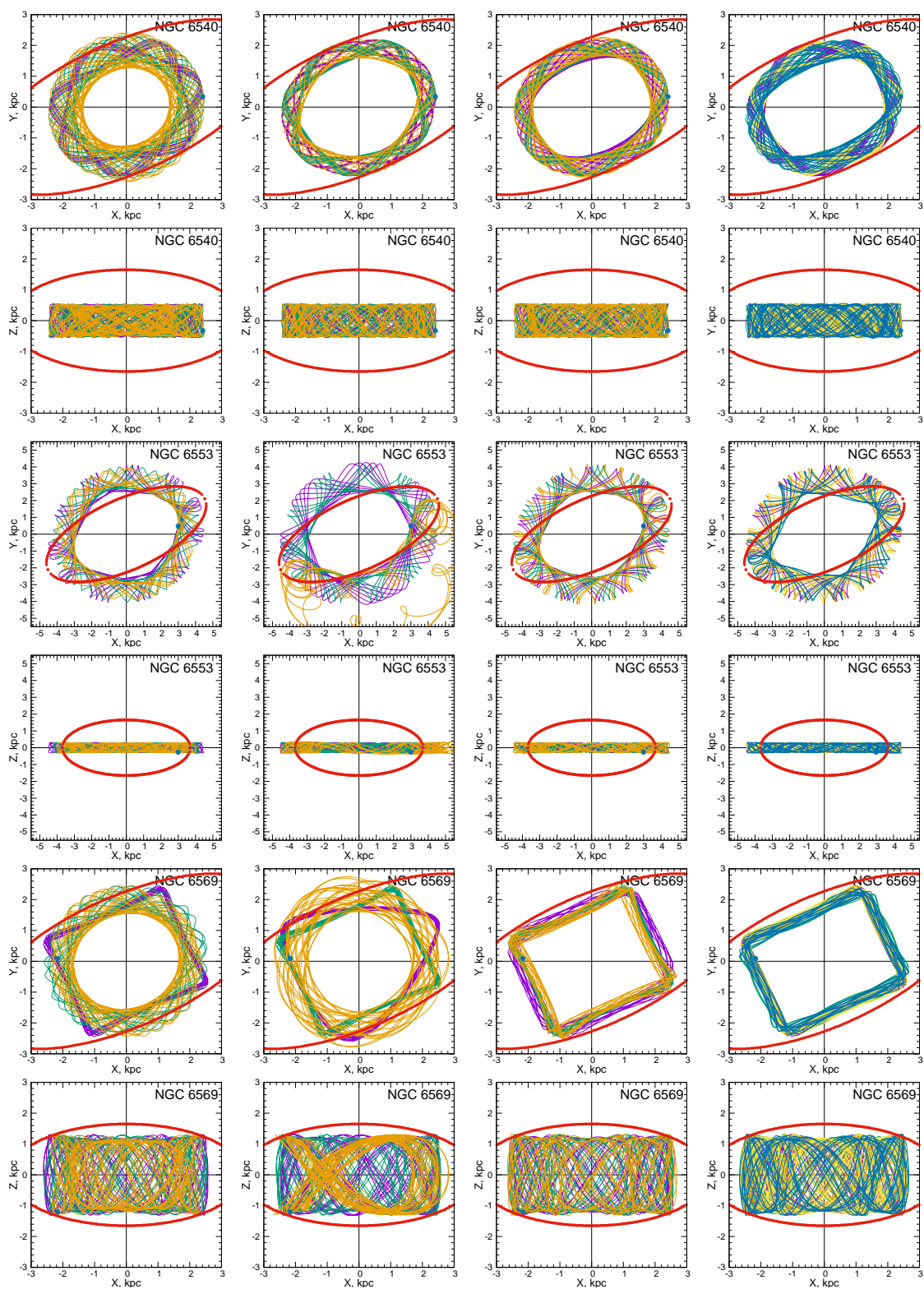
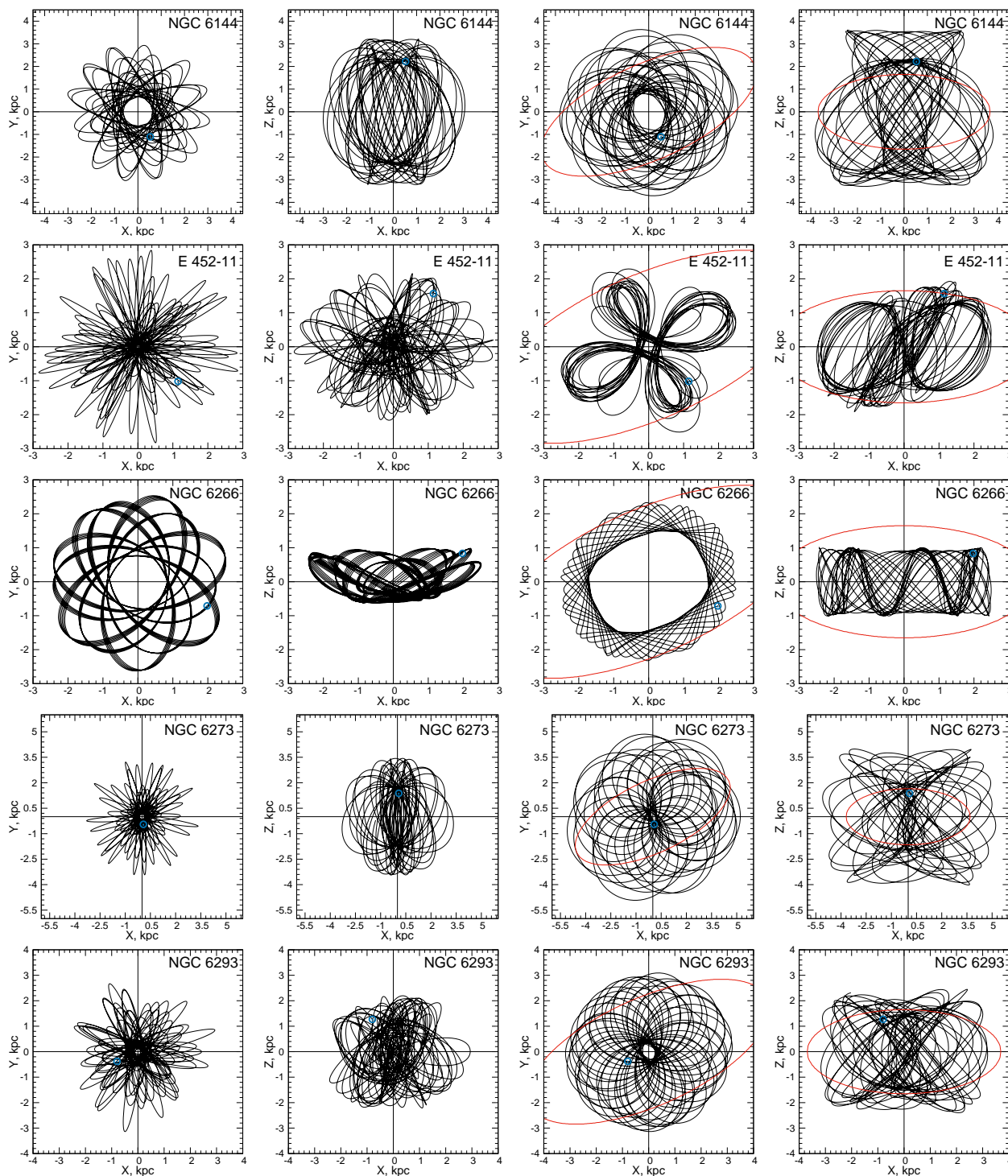


Рис. 9: Орбиты в системе вращающегося бара ШС NGC 6540, NGC 6553, NGC 6569, принадлежащих диску. Все обозначения как на предыдущем рисунке.

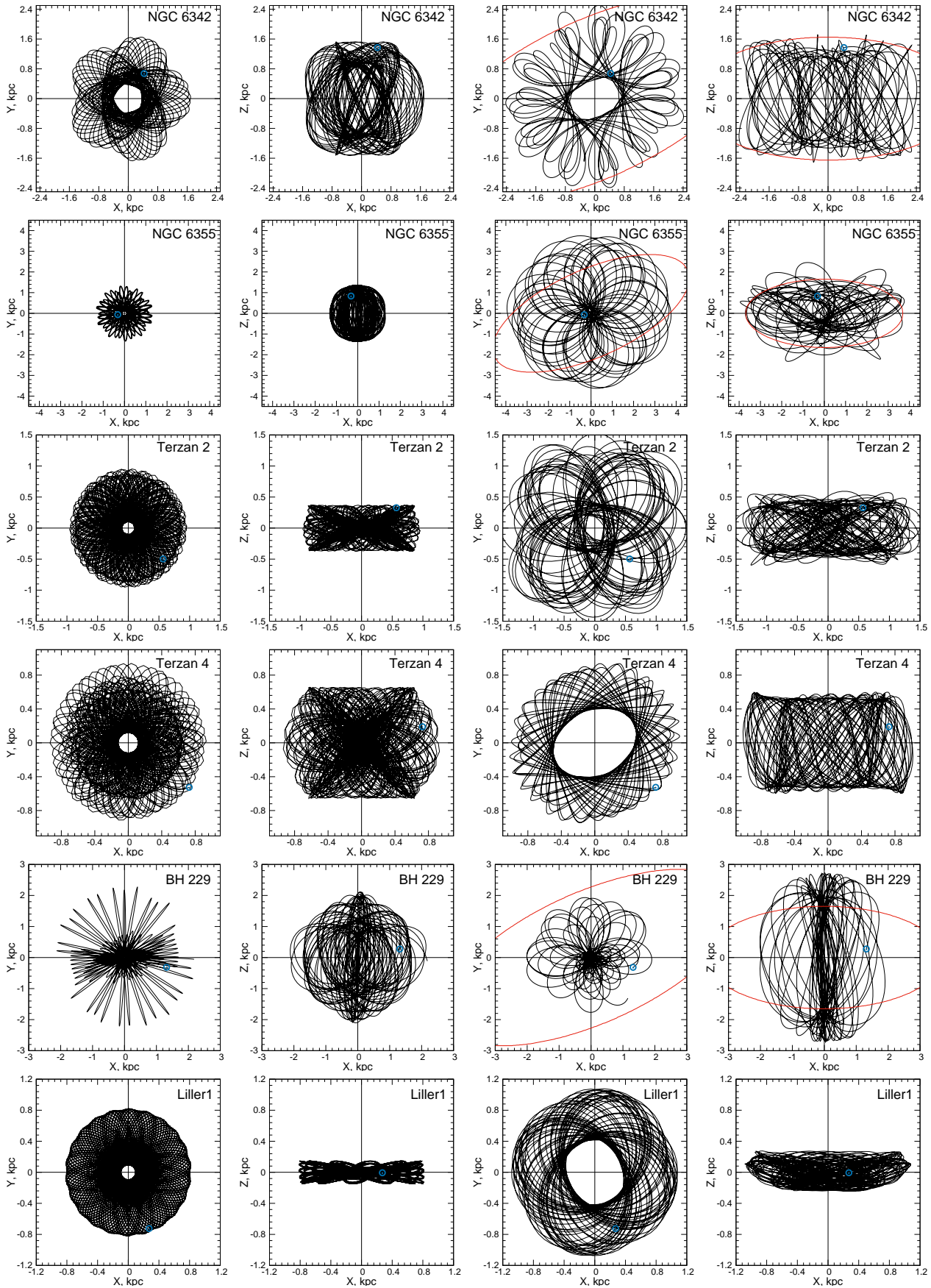
ПРИЛОЖЕНИЕ

-

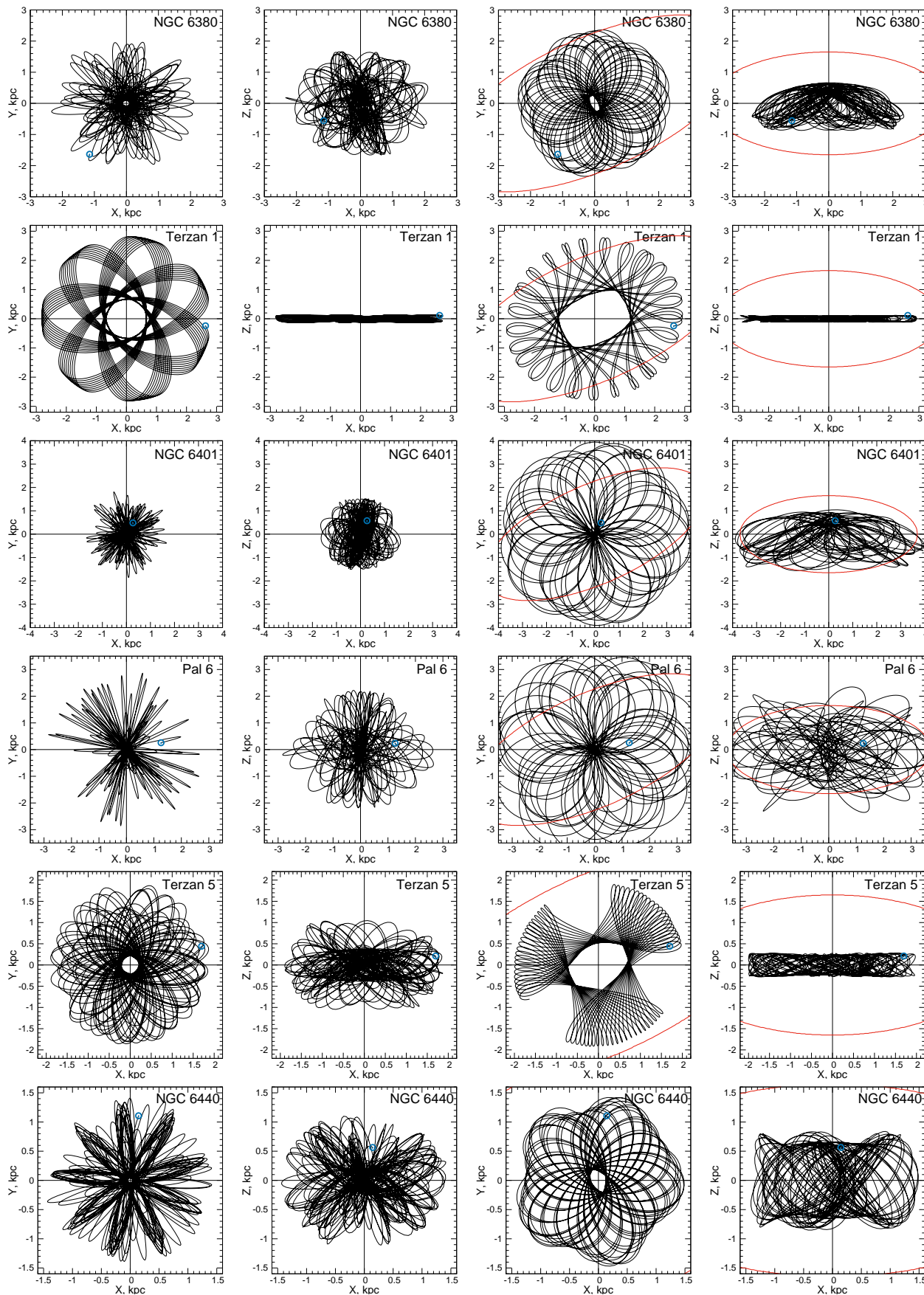
Орбиты отобранных 45 ШС в проекциях $X - Y$ и $X - Z$ галактической системы координат. На левых панелях показаны орбиты, полученные в осесимметричном потенциале, на правых панелях – в потенциале, включающем бар с параметрами: $M_b = 430M_G$, $\Omega_b = 40$ км/с/кпк, $q_b = 5$ кпк, $\theta_b = 25^\circ$, соотношение осей $V0$. Во втором случае орбиты построены в системе вращающегося бара. Красной линией показаны сечения бара. Интегрирование орбит произведено на 2.5 млрд лет назад. Начало орбит обозначено синим кружочком.



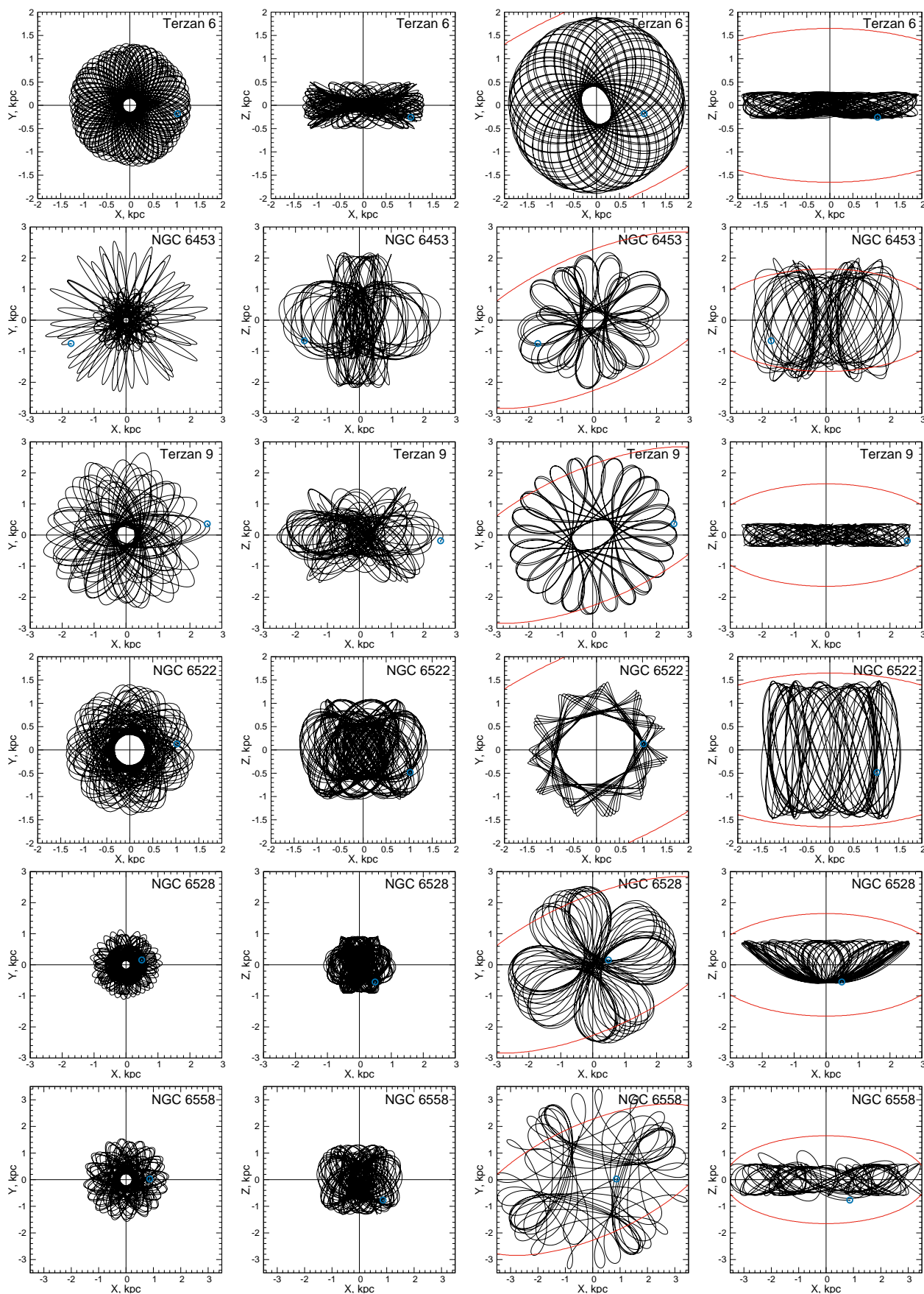
ПРИЛОЖЕНИЕ



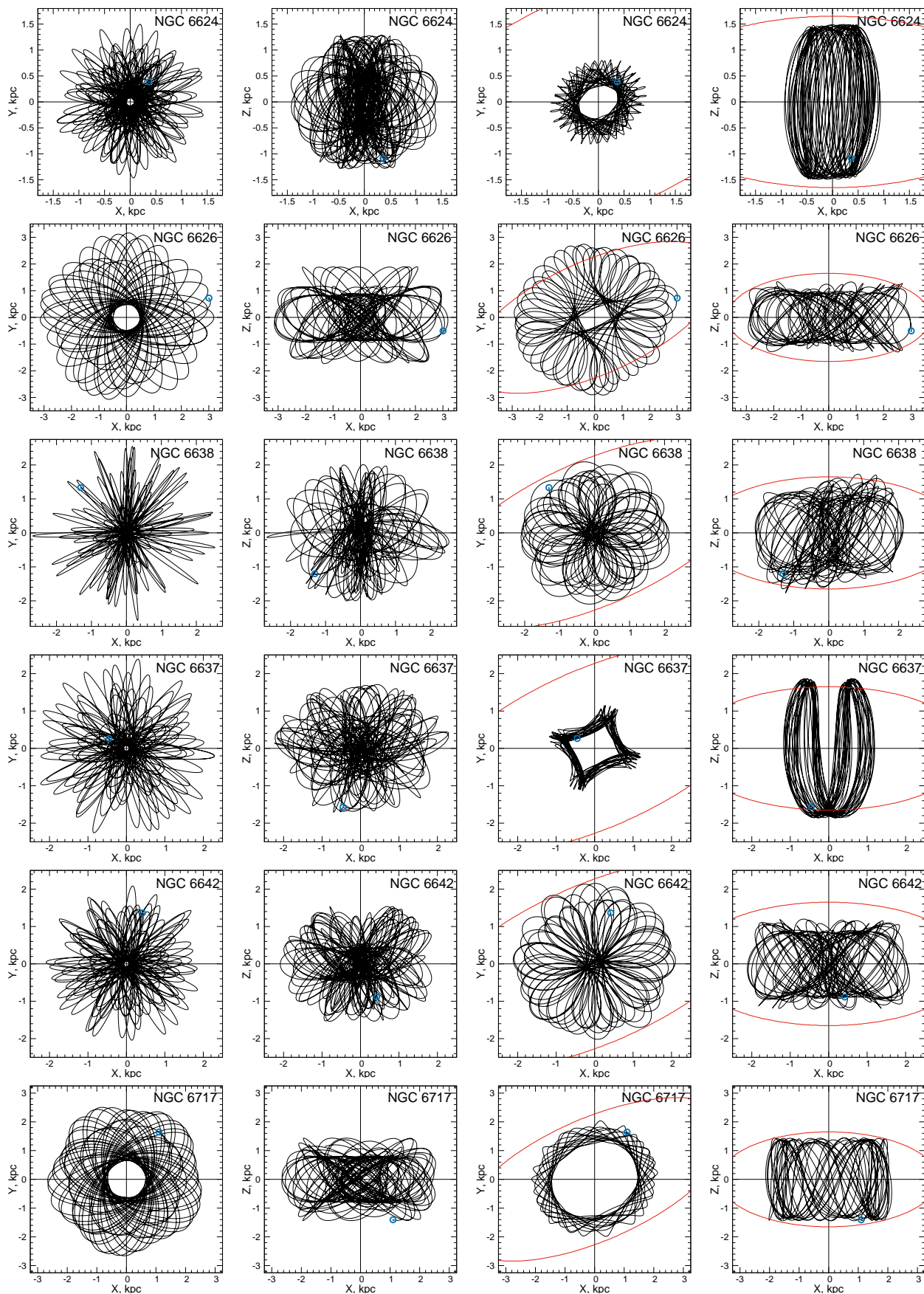
ПРИЛОЖЕНИЕ. Продолжение



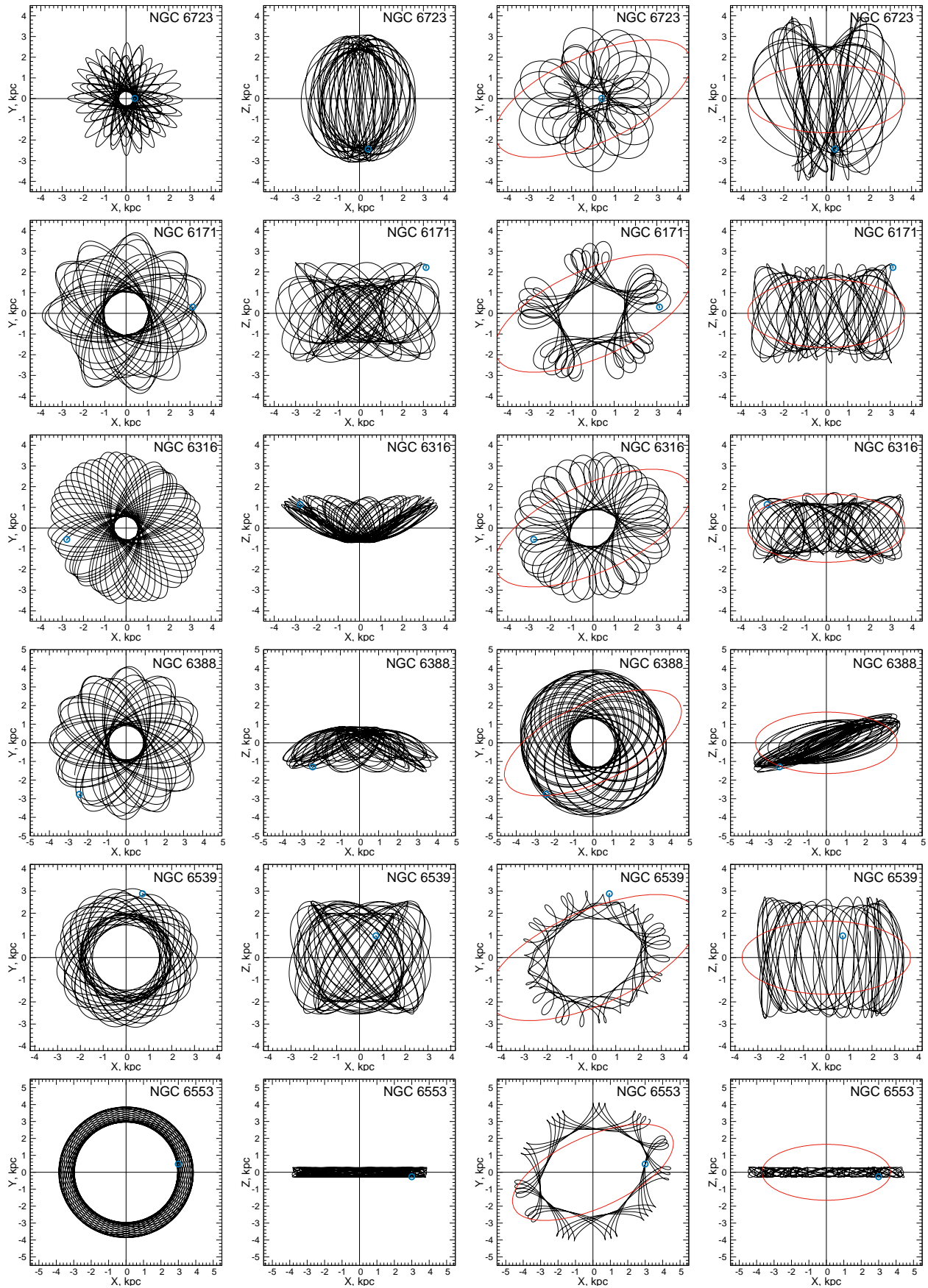
ПРИЛОЖЕНИЕ. Продолжение



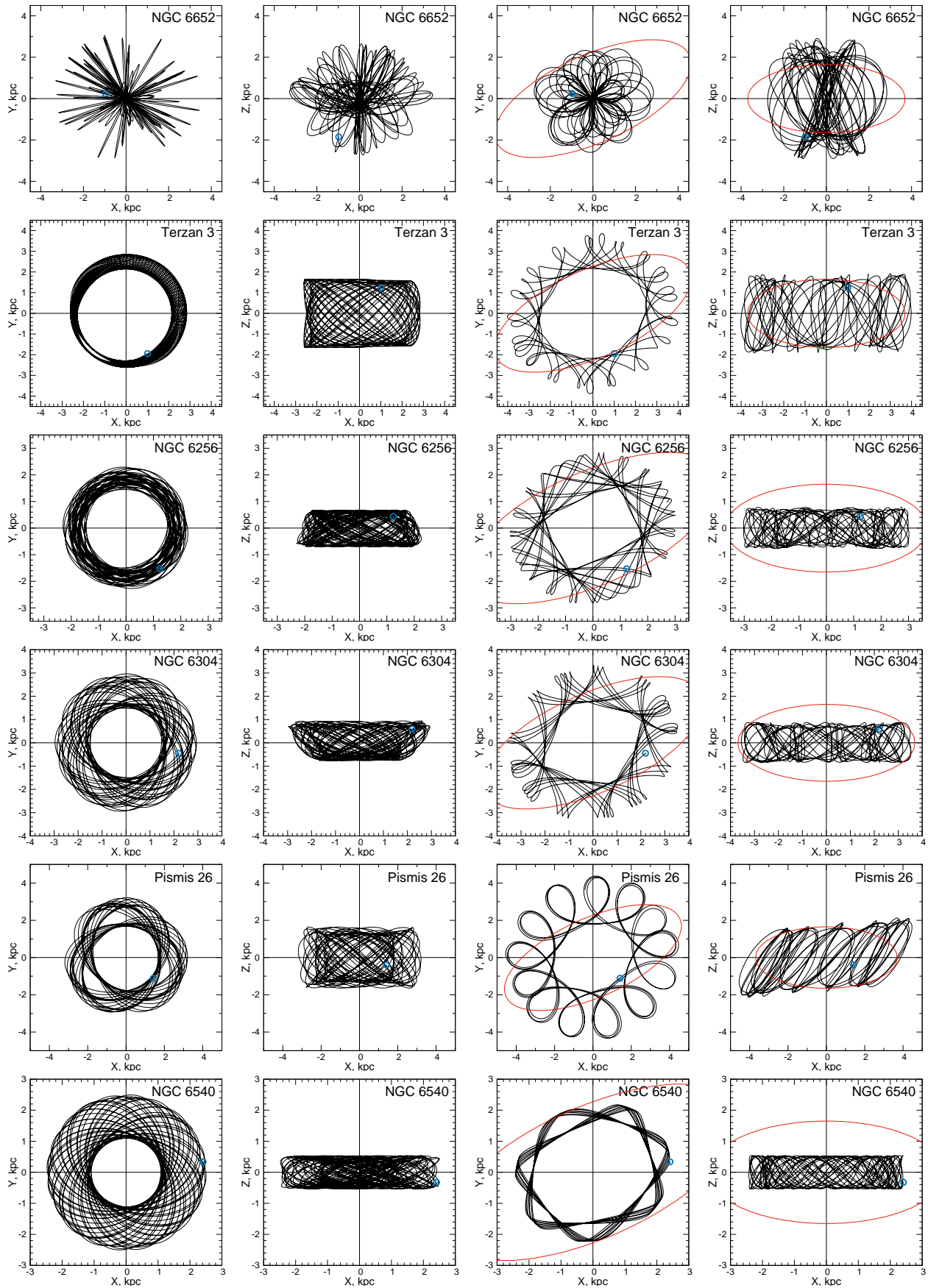
ПРИЛОЖЕНИЕ. Продолжение



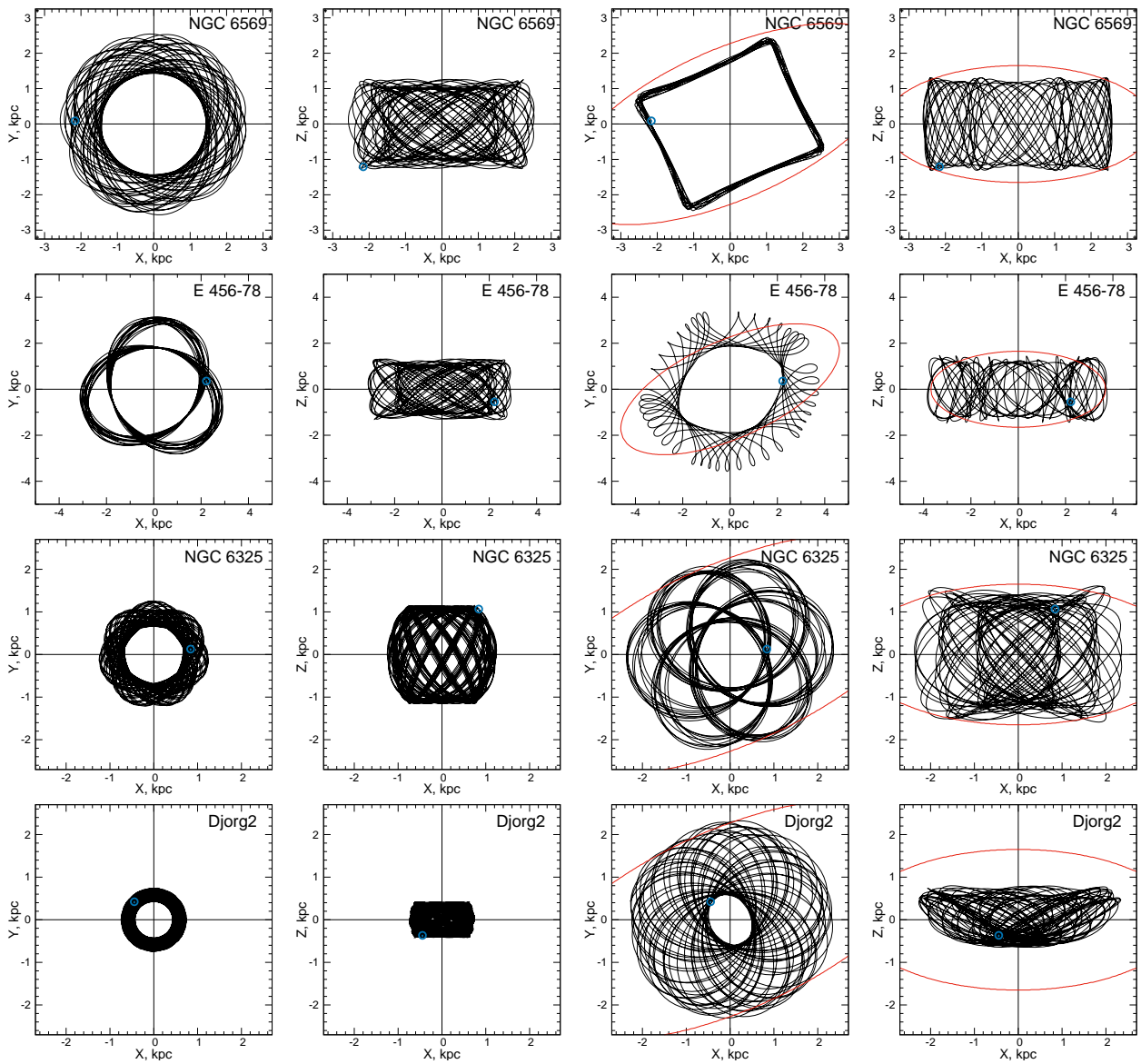
ПРИЛОЖЕНИЕ. Продолжение



ПРИЛОЖЕНИЕ. Продолжение



ПРИЛОЖЕНИЕ. Продолжение



ПРИЛОЖЕНИЕ. Конец