



Влияние бара на хаотическую динамику шаровых скоплений в центральной области Галактики

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

¹ ГАО РАН

Поступила в редакцию 31 октября 2024 / Принята к публикации 26 ноября 2024

Аннотация

Работа посвящена анализу влияния галактического бара на характер орбитального движения (хаотическое или регулярное) шаровых скоплений в центральной области Галактики радиусом 3.5 кпк, подверженных наибольшему воздействию бара. Выборка включает 45 шаровых скоплений. 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. Приняты следующие, наиболее реалистичные параметры бара: масса $10^{10} M_{\odot}$, длина большой полуоси 5 кпк, угол поворота оси бара 25° , угловая скорость вращения 40 км/с/кпк. Проведен анализ хаотичности/регулярности орбитального движения в обоих потенциалах с использованием одного из самых эффективных методов, а именно, частотного метода, заключающегося в вычислении дрейфа фундаментальных частот. В результате произведена оценка влияния бара на динамику каждого ШС выборки. Выявлено 8 ШС, изменивших под воздействием бара регулярную динамику на хаотическую, и 9 ШС, изменивших хаотическую динамику на регулярную.

ключевые слова: Галактика, бар, шаровые скопления, хаотическая и регулярная орбитальная динамика

Введение

Данная работа является продолжением серии работ авторов [1,2,3,4,5,6,7], посвященных исследованию орбитальной динамики шаровых скоплений (ШС). Так, в работе [1] представлен каталог орбит 152 галактических шаровых скоплений по новейшим астрометрическим данным со спутника Gaia (Gaia EDR3) [8], а также новым уточненным средним расстояниям [9]. В работе [2] был проведен анализ (по тем же данным) влияния галактического бара на орбитальное движение шаровых скоплений в центральной области Галактики. Для этой задачи было отобрано 45 шаровых скоплений в центральной галактической области радиусом 3.5 кпк. Список из этих ШС приводится далее в таблице с результатами анализа. Были получены орбиты шаровых скоплений как в осесимметричном потенциале, так и в потенциале, включающем модель бара в виде трехосного эллипсоида. При этом варьировались масса, угловая скорость вращения и размеры бара. Было произведено сравнение таких орбитальных параметров как алоцентрическое и перигцентрическое расстояния, эксцентриситет и максимальное расстояние от галактической плоскости.

Второй этап исследований, направленных на изучение влияния бара на орбитальное движение шаровых скоплений, был посвящен задаче выявления объектов, захваченных баром, с использованием методов спектральной динамики [3,4,5,6].

* e-mail: bajkova@gaoran.ru

Третий этап исследований посвящен анализу регулярности/хаотичности орбит всех 45 отобранных ШС с использованием различных методов [7]. А именно, 1) методов вычисления максимальных характеристических показателей Ляпунова (МХПЛ) (в классическом варианте и в варианте с перенормировкой "теневой" орбиты, соответствующей возмущенным начальным фазовым точкам, относительно "опорной" орбиты с заданными начальными фазовыми точками), 2) сечений Пуанкаре, 3) частотного метода, основанного на вычислении фундаментальных частот, а также 4) визуальной оценки по изображениям "опорной" и "теневой" орбит. При этом в качестве модели бара была принята модель вытянутого трехосного эллипсоида с наиболее вероятными параметрами, известными из литературы (см., например, [10, 11]): массой $10^{10} M_{\odot}$, длиной большой полуоси 5 кпк, углом наклона к галактической оси X 25° , угловой скоростью вращения 40 км/с/кпк.

Поскольку ШС в центральной области Галактики подвержены наибольшему воздействию со стороны вытянутого вращающегося бара, то вопрос о характере орбитального движения ШС – регулярного или хаотического – представляет большой интерес. Так, например, в работе [12] показано, что основная доля хаотических орбит должна быть именно в области бара.

Данная работа по существу является продолжением третьего этапа, посвященного исследованию хаотической динамики ШС в центральной области Галактики. Если в работе [7] мы исследовали орбитальную динамику ШС только в потенциале с баром, то в данной работе ставится задача сравнения орбитальной динамики ШС в осесимметричном потенциале и в неосесимметричном потенциале с тем, чтобы определить, как бар воздействует на степень хаотизации орбит ШС. Если в предыдущей работе мы использовали несколько методов анализа регулярности/хаотичности орбит, то в данной работе мы ограничиваемся использованием наиболее эффективного метода, а именно, частотного метода. Для дополнительного контроля полученных результатов мы также используем метод сечений Пуанкаре, результат применения которого, как выяснилось в работе [7], дает наибольшую корреляцию (около 96%) с результатами применения частотного метода.

Работа структурирована следующим образом. В первом разделе дается краткое описание принятых моделей потенциала – осесимметричного потенциала и неосесимметричного потенциала, включающего бар. Во втором разделе даются ссылки на использованные астрометрические данные, а также на способ формирования выборки ШС. В третьем разделе дается описание двух методов оценки регулярности/хаотичности движения – метода сечений Пуанкаре и частотного метода. В четвертом разделе дается анализ полученных результатов. В Заключение сформулированы основные выводы работы.

1 Модель галактического потенциала

1.1 Осесимметричный потенциал

Осесимметричный гравитационный потенциал Галактики, традиционно используемый нами (см., например, [1]) для интегрирования орбит ШС, представляется в виде суммы трех составляющих – центрального сферического балджа $\Phi_b(r)$, диска $\Phi_d(R, Z)$ и массивного сферического гало темной материи $\Phi_h(r)$:

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

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 (X, Y) 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 $M_{gal} = 2.325 \times 10^7 M_{\odot}$, соответствующей гравитационной постоянной $G = 1$.

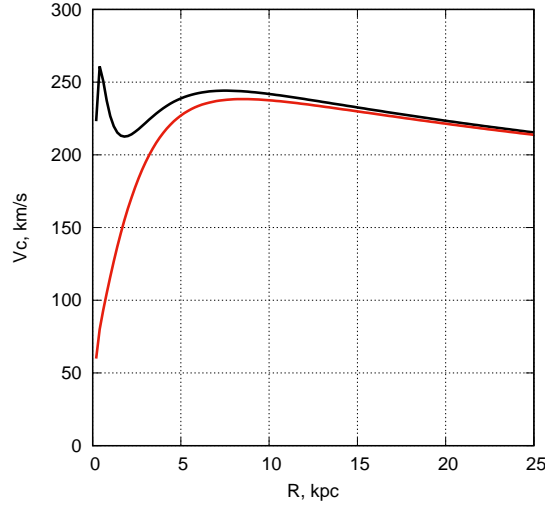


Рис. 1: Кривая вращения Галактики с осесимметричным потенциалом без бара (черная линия) и неосесимметричным потенциалом, включающем бар (красная линия).

Осесимметричные потенциалы балджа $\Phi_b(r(R, Z))$ и диска $\Phi_d(r(R, Z))$ представляются в форме, предложенной Миямото, Нагаи [13]:

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

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

где M_b, M_d — массы компонент, b_b, a_d, b_d — масштабные параметры компонент в кпк. Компонента гало (NFW) представляется согласно работе [14]:

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

В таблице 1 приведены значения параметров модели галактического потенциала (2)–(4), которые были найдены Байковой, Бобылевым [15] с использованием кривой вращения Галактики [16], 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 [5] модель (2)–(4) обозначена как модель III. Принятая модель потенциала является наилучшей среди рассмотренных в работе [17] шести моделей, поскольку обеспечила наименьшую невязку между данными и модельной кривой вращения.

1.2 Модель бара

В качестве потенциала центрального бара была выбрана модель трехосного эллипсоида [10]:

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

где $X = R \cos \vartheta, Y = R \sin \vartheta, a, b, c$ — три полуоси бара, q_b — масштабный параметр бара (длина наибольшей полуоси бара); $\vartheta = \theta - \Omega_b t - \theta_b, tg(\theta) = Y/X, \Omega_b$ — круговая скорость бара, t —

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

M_b	443 M_{gal}
M_d	2798 M_{gal}
M_h	12474 M_{gal}
b_b	0.2672 кпк
a_d	4.40 кпк
b_d	0.3084 кпк
a_h	7.7 кпк
M_{bar}	430 M_{gal}
Ω_b	40 км/с/кпк
q_b	5.0 кпк
θ_b	25°
a/b	2.38
a/c	3.03

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.

Исходя из информации в многочисленной литературе, в частности, в [10], в качестве параметров бара были использованы следующие: $M_{bar} = 430 M_{gal}$, $\Omega_b = 40$ км/с/кпк, $q_b = 5$ кпк, $\theta_b = 25^\circ$. Принятые параметры бара перечислены в таблице 1.

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 [18]. Возвышение Солнца над плоскостью Галактики принято равным 16 пк в соответствии с работой [19].

На рис. 1 для сравнения приведены полученные модельные кривые вращения: осесимметричного потенциала (черная линия) и потенциала с баром (красная линия).

2 Данные

Данные о собственных движениях ШС взяты из нового каталога Васильева и Баумгардта, 2021 [8], составленного на основе наблюдений Gaia EDR3. Координаты ШС и лучевые скорости взяты из работы [21]. Средние значения расстояний до шаровых скоплений взяты из работы Баумгардта и Васильева, 2021 [9]. Сравнительный анализ новых данных о собственных движениях и расстояниях с предыдущими версиями каталогов дан, например, в работе [1].

Имеющийся в нашем распоряжении каталог ШС [1] насчитывает 152 объекта. Выделение шаровых скоплений из этого множества, принадлежащих области балджа/бара, было произведено в соответствии с чисто геометрическим критерием, рассмотренным в работе [21], а также использованным нами в работе [22]. Он очень прост и заключается в отборе ШС, апоцентрическое расстояние орбит которых не превышает радиуса балджа, который обычно принимается равным 3.5 кпк. Орбиты вычисляются в осесимметричном потенциале. Полный список из 45 объектов нашей выборки перечислен в таблице 2, где приводятся результаты анализа хаотичности/регулярности орбиты ШС (в первой колонке дается порядковый номер ШС, во второй — наименование ШС).

3 Методы анализа регулярности/хаотичности орбитальной динамики ШС

3.1 Сечения Пуанкаре

Одним из методов определения характера движения (регулярного или хаотического) является анализ сечений Пуанкаре [23]. Алгоритм, использованный нами для построения отображений, заключается в следующем:

1. Рассматриваем фазовое пространство (X, Y, V_x, V_y) .
2. Исключаем V_y используя закон сохранения обобщенного интеграла энергии (интеграла Якоби) и переходим в пространство (X, Y, V_x) .
3. Определяем плоскость $Y = 0$, точки пересечения с орбитой обозначим на плоскости (X, V_x) . Берем только те точки, в которых $V_y > 0$.

Аналогично может быть рассмотрено фазовое пространство (Y, Z, V_y, V_z) или (R, Z, V_R, V_z) . Тогда сечения Пуанкаре будут отражены на плоскости (Y, V_y) или (R, V_R) , соответственно.

Если точки пересечения плоскости складываются в непрерывную гладкую линию (или несколько разделенных линий), то движение считается регулярным. В случае хаотического движения вместо того, чтобы располагаться на гладкой кривой, точки заполняют двумерную область фазового пространства, причем иногда возникает эффект прилипания точек к границам островов, соответствующих упорядоченному движению [23].

Важно отметить, что для неосесимметричных моделей потенциала, к каким относится и один из рассматриваемых в данной работе потенциалов, включающий вращающийся центральный бар, сечения Пуанкаре имеют более сложную структуру, чем в случае осесимметричной модели. Если в случае осесимметричных моделей для регулярных орбит сечения Пуанкаре, как правило, представляют собой ровную линию, то в случае неосесимметричных моделей для многих орбит получаются более сложные рисунки. Такие орбиты неверно было бы назвать хаотическими, так как в расположении точек наблюдаются очевидные закономерности, однако одиночную линию они уже могут не образовывать. Таким образом, задача разделения орбит на регулярные и хаотические на основе сечений Пуанкаре заметно усложняется и не лишена черт субъективности. Поэтому приобретает большое значение привлечение, наряду с сечениями Пуанкаре, других методов анализа и вынесение решения о характере движения объектов по результатам использования нескольких независимых подходов. В данном случае мы используем частотный метод, описанный в следующем параграфе, который явился основным при вынесении решения о регулярности (R) или хаотичности (C) каждой орбиты ШС из нашей выборки.

3.2 Частотный метод

Описываемый способ изучения регулярности/хаотичности орбит связан с использованием орбитальных частот [24,25] (см. раздел 3.1 в последней работе). Авторы этих работ показали, что можно измерить стохастичность орбиты на основе сдвига фундаментальных частот, определенных в течение двух последовательных интервалов времени. Для каждой частотной компоненты f_i вычисляется параметр, который называется дрейфом частоты:

$$\lg(\Delta f_i) = \lg \left| \frac{\Omega_i(t_1) - \Omega_i(t_2)}{\Omega_i(t_1)} \right|, \quad (6)$$

где i определяет частотную составляющую в декартовых координатах (т.е. $\lg(\Delta f_x), \lg(\Delta f_y)$ и $\lg(\Delta f_z)$). Затем наибольшее значение этих трех параметров дрейфа частоты $\lg(\Delta f_x)$ приписывается параметру дрейфа частоты $\lg(\Delta f)$. Чем выше значение $\lg(\Delta f)$, тем хаотичнее орбита. Однако, как показано в [25], точность частотного анализа требует не менее 20 периодов колебаний, чтобы избежать ошибок в классификации.

Мы вычислили параметр дрейфа частоты $\lg(\Delta f)$ для всех 45 ШС в обоих потенциалах, по которому определили характер их движения – (R) или (C). Ряды $x(t_n), y(t_n), z(t_n)$ были определены на интервале времени $[0, 120]$ млрд лет. Первый амплитудный спектр каждого ШС был

вычислен на интервале времени $[0, 60]$ млрд лет, второй – на $[60, 120]$ млрд лет. Затем вычислялись параметры дрейфа частоты для каждого временного ряда $x(t_n), y(t_n), z(t_n)$ по формуле (6). Наибольшее значение из них было принято в качестве параметра дрейфа частоты $\lg(\Delta f)$. В случае совпадения фундаментальных частот $\Omega_i(t_1) = \Omega_i(t_2)$ мы искусственно полагали параметр дрейфа частоты равным -4 .

4 Результаты

Полученные результаты применения метода сечений Пуанкаре и частотного метода для определения характера орбитальной динамики ШС в центре Галактики нашли свое отражение в таблице 2 и на рис. 2 (см. подпись к рисунку).

Решения о регулярности (R) или хаотичности (C) орбитального движения всех 45 ШС, полученные на основе анализа сечений Пуанкаре на плоскости (X, V_x) в осесимметричном и неосесимметричном потенциале с баром, приведены в таблице 2 в 3-ей и 4-ой колонках соответственно. Графическая иллюстрация метода сечений Пуанкаре приведена на рис. 2 во 2-м и 5-м вертикальных рядах панелей для осесимметричного и неосесимметричного потенциалов соответственно.

Результаты вычисления параметра дрейфа частоты для всех 45 ШС, как в осесимметричном потенциале, так и потенциале с баром приведены в таблице 2 в колонках 5 и 6 соответственно. Графическая иллюстрация частотного метода, а именно, результатов вычисления амплитудных спектров приведена на рис. 2 в 3-м и 6-м вертикальных рядах панелей для осесимметричного и неосесимметричного потенциалов соответственно.

Решение о характере движения (регулярного (R) или хаотического (C)) при использовании частотного метода было вынесено в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [7] (только при пороговом значении параметра дрейфа частоты, равном -2.14). Меньшей величине соответствуют регулярные орбиты, большей – хаотические, за исключением двух ШС: Terzan 3 и NGC 6316, у которых $\lg(\Delta f) \approx -2$, которые отнесены по результатам визуального анализа амплитудных спектров (рис. 2) к ШС с регулярными орбитами, хотя они показывают слабую степень хаотичности. Так сделано и в предыдущей работе [7].

Разность параметров дрейфа частоты в осесимметричном и неосесимметричном потенциалах дается в 7-ой колонке таблицы 2. Отрицательная величина разности говорит о возрастании степени хаотичности орбитального движения в потенциале с баром, а положительная величина – о снижении степени хаотичности.

Окончательное решение о характере движения и его изменения в зависимости от наличия центрального бара в Галактике принято на основе частотного метода и отражено в 8-ой колонке таблицы 2. При этом отметим, что корреляция между результатами метода сечений Пуанкаре и частотного метода для обоих потенциалов составила 96%, что совпадает с результатом, полученным нами с работе [7] для неосесимметричного потенциала с баром.

Как показывает анализ последней колонки таблицы 2, включение бара в осесимметричный потенциал заметно повлияло на орбитальную динамику ШС нашей выборки. Так, у 8 ШС (NGC 6144, NGC 6273, NGC 6342, NGC 6355, NGC 6558, NGC 6256, NGC 6304, NGC 6388) регулярная динамика сменилась хаотической (обозначено как $R \rightarrow C$); у 9 ШС (Terzan 4, Liller1, NGC 6380, Terzan 5, NGC 6440, Terzan 6, Terzan 9, NGC 6624, NGC 6637) хаотическая динамика сменилась регулярной ($C \rightarrow R$); у 17 ШС незначительно изменилась степень хаотизации, не приведшая к изменению статуса регулярного или хаотического движения (у 12 повысилась: $C \uparrow$), а у 5 понизилась: ($C \downarrow$)) и только у 11 ШС (NGC 6266, Terzan 1, NGC 6522, NGC 6717, NGC 6723, Pismis 26, NGC 6569, NGC 6540, NGC 6171, NGC 6539, NGC 6553) регулярная динамика осталась без всяких изменений (=).

Как показывает анализ рис. 2, наибольшему влиянию бара подверглись ШС с вытянутыми в радиальном направлении орбитами (большими эксцентриситетами и малыми перицентрическими расстояниями и высокими радиальными скоростями), что совпадает с выводами предыдущей нашей работы [7].

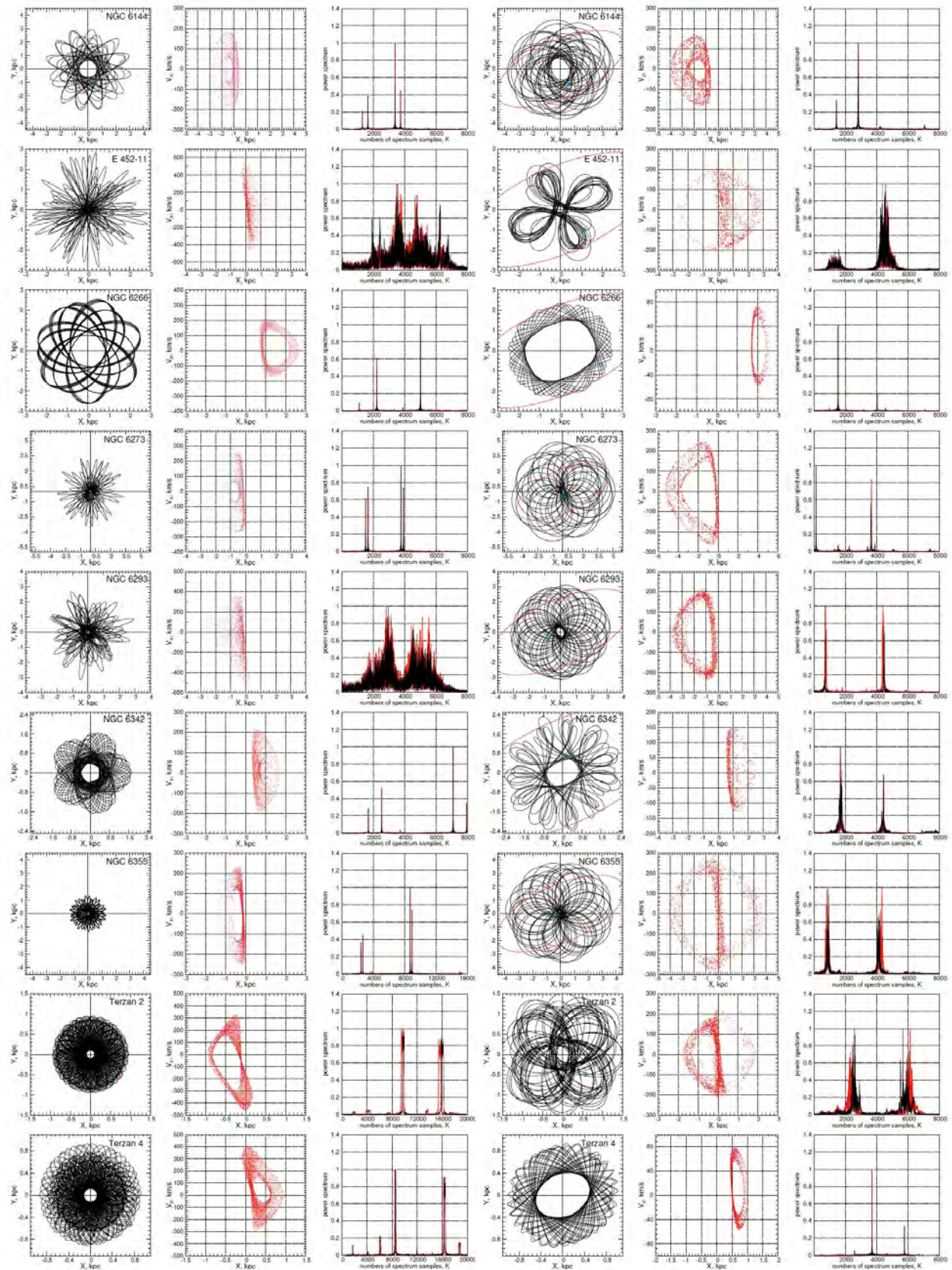


Рис. 2: Графическая иллюстрация орбитальной динамики 45 ШС в осесимметричном (левая тройка вертикальных рядов панелей) и потенциале с баром (правая тройка вертикальных рядов панелей). Слева направо для каждого потенциала показаны проекции орбит на галактическую плоскость (X, Y) (во втором случае показаны в системе вращающегося бара, а красными линиями – сечения бара); сечения Пуанкаре на плоскости (X, V_x); амплитудные спектры временных последовательностей к частотному методу (красный цвет относится к первой половине последовательности, черный – ко второй).

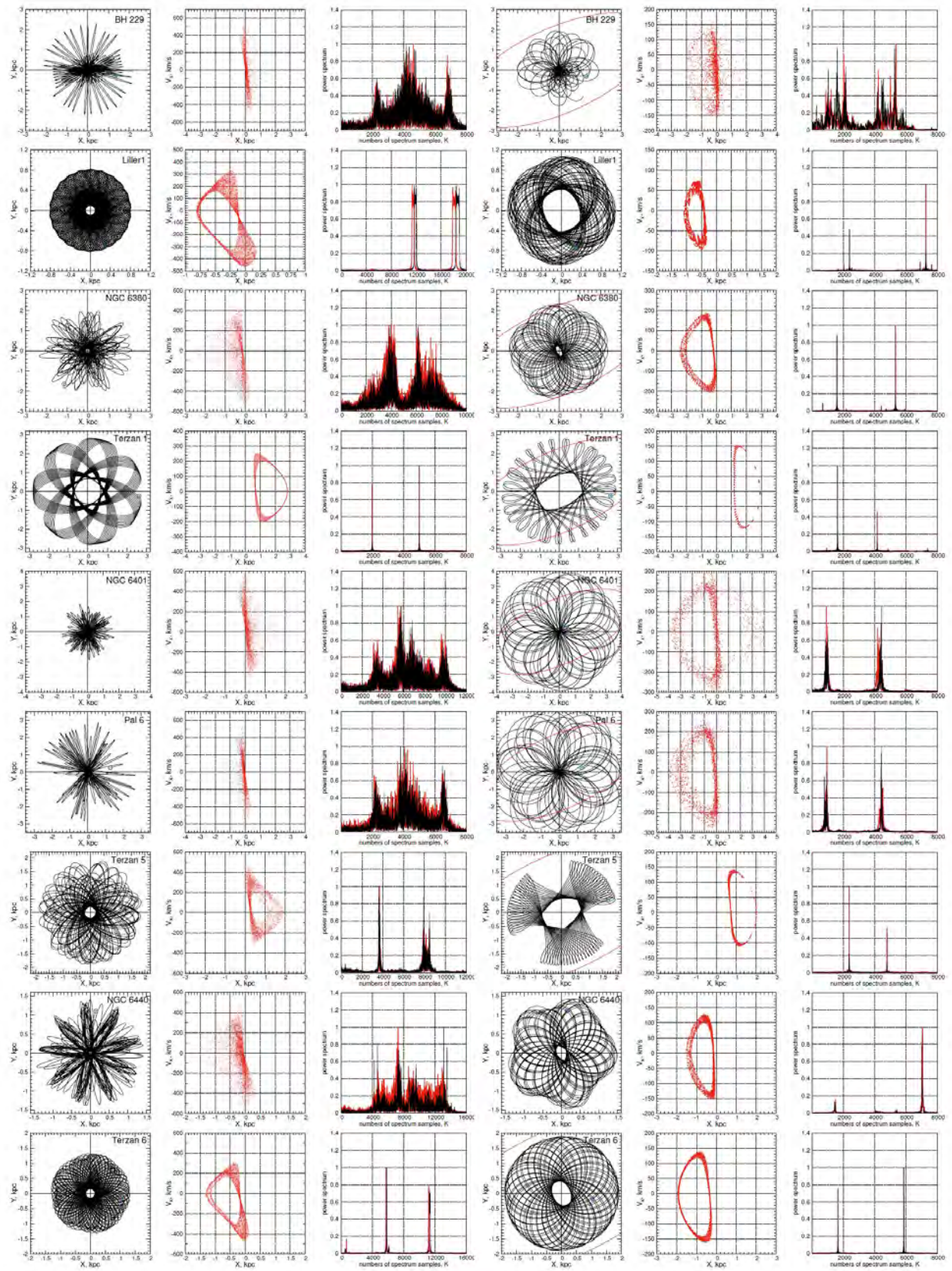


Рис. 2. Продолжение.

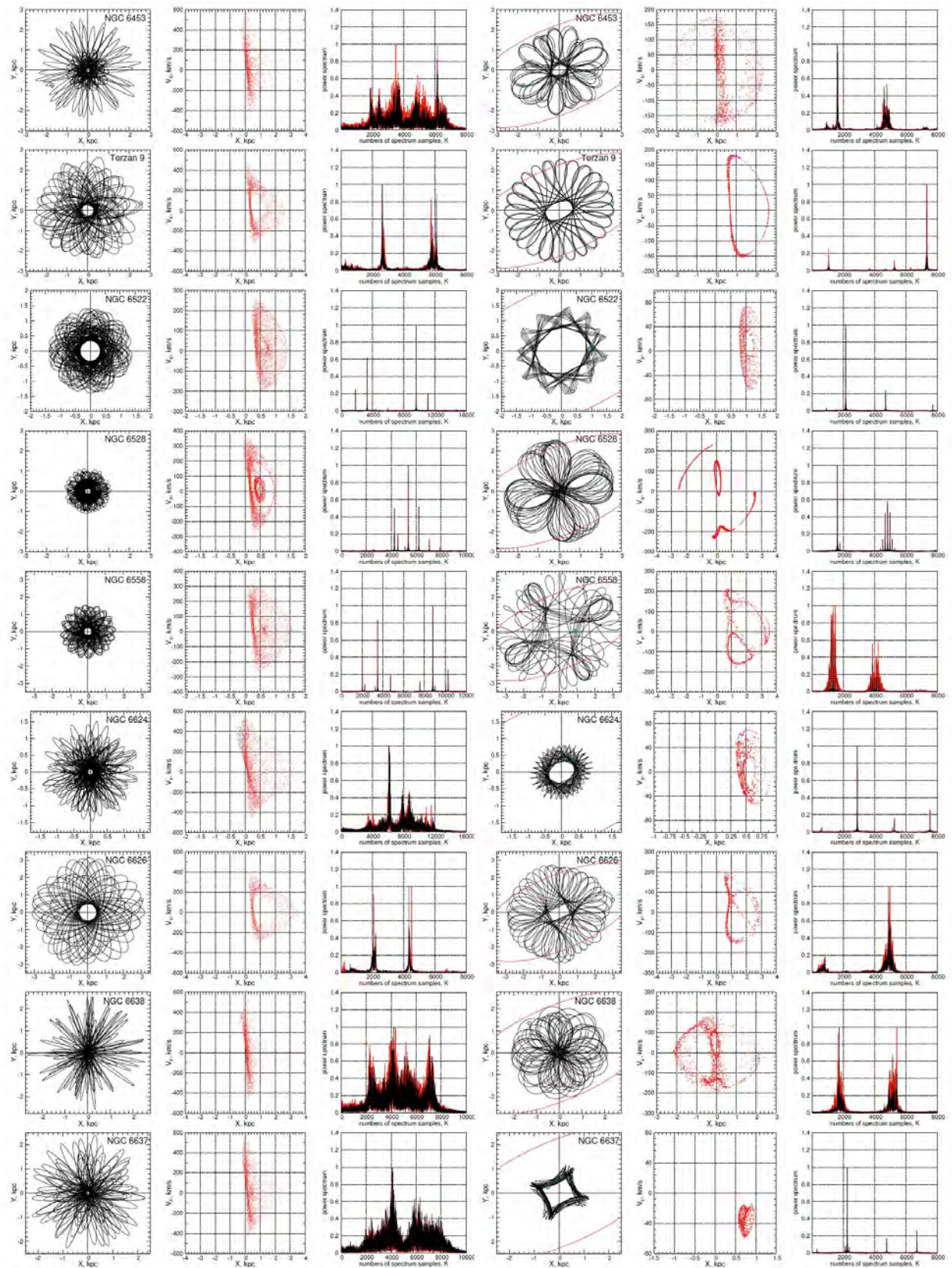


Рис. 2. Продолжение.

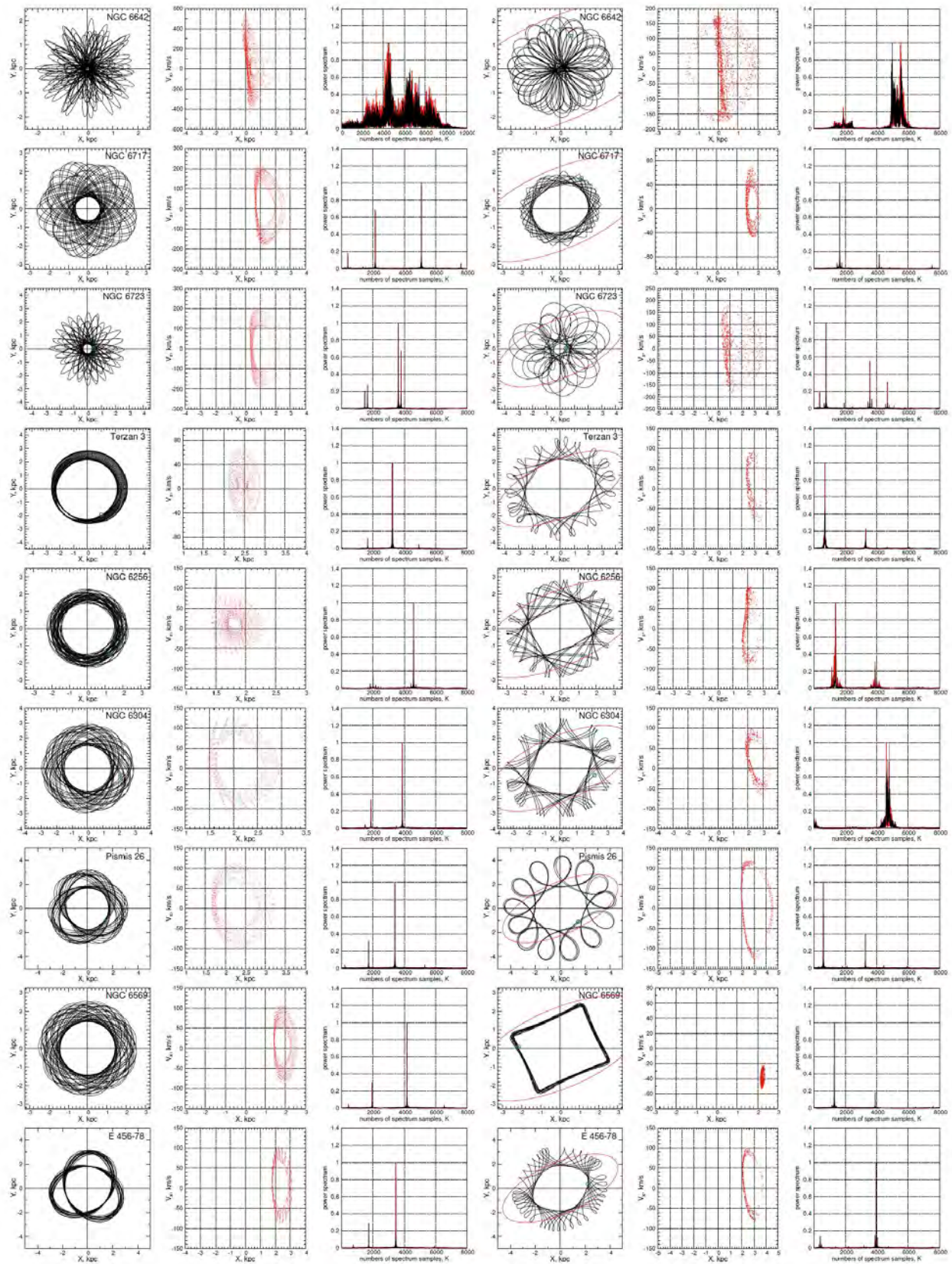


Рис. 2. Продолжение.

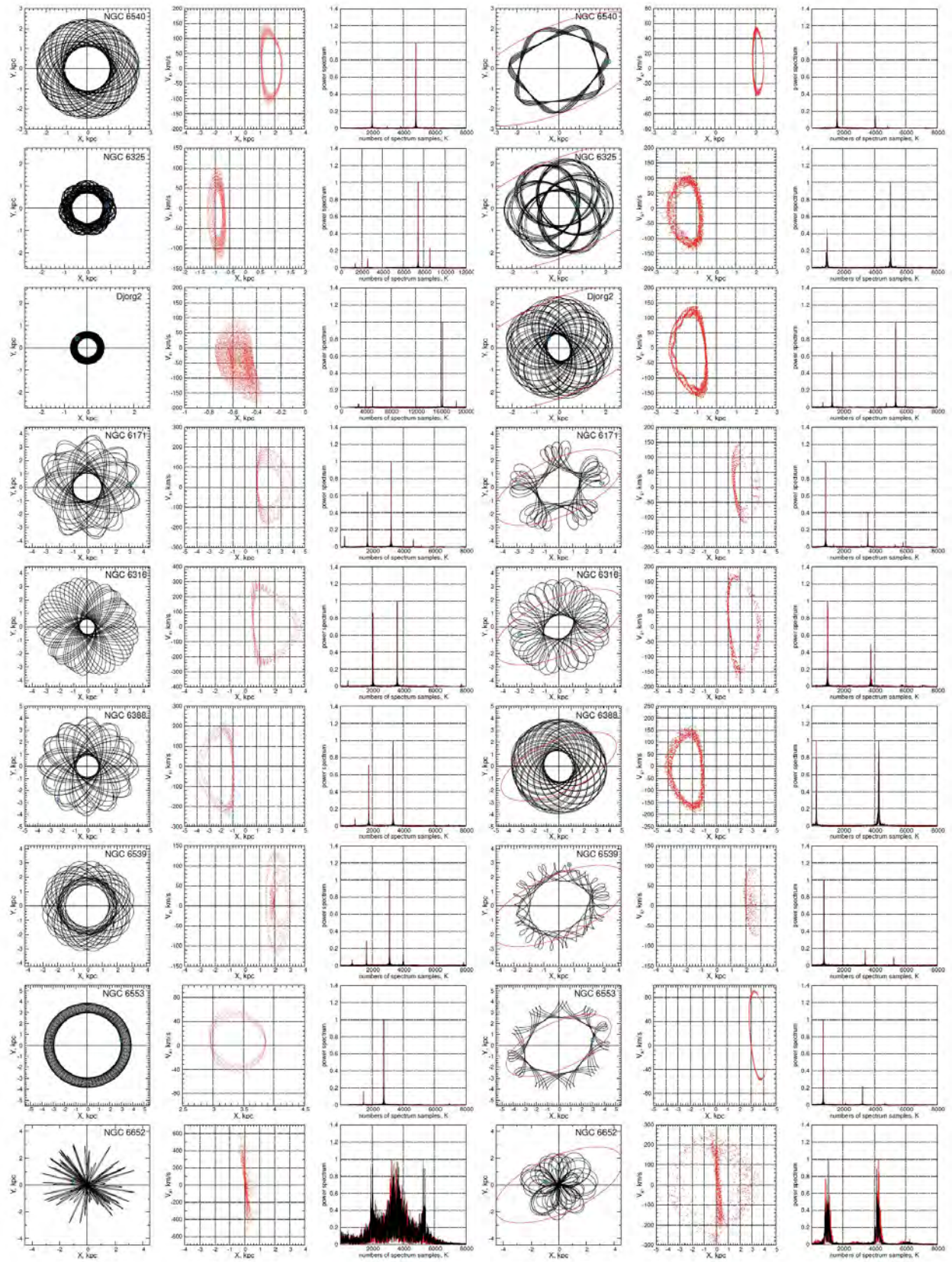


Рис. 2. Продолжение.

5 Заключение

В работе решалась задача исследования влияния галактического бара на орбитальную динамику шаровых скоплений в центральной области Галактики радиусом 3.5 кпк. Для решения этой задачи были построены орбиты как в осесимметричном, так и неосесимметричном потенциале, включающем бар. Были приняты следующие, наиболее реалистичные параметры модели бара в виде трехосного эллипсоида [10]: масса $10^{10} M_{\odot}$, длина большой полуоси 5 кпк, угол поворота оси бара 25° , угловая угловая скорость вращения 40 км/с/кпк. Использовалась выборка из 45 шаровых скоплений, сформированная нами ранее в работе [2]. Для интегрирования орбит использованы самые точные на сегодняшний день астрометрические данные со спутника Gaia (EDR3) [8], а также новые уточненные средние расстояния до шаровых скоплений [9].

Для анализа и принятия окончательного решения о хаотичности/регулярности орбитального движения шаровых скоплений в обоих потенциалах использован один из самых эффективных методов, а именно, частотный метод, заключающийся в вычислении дрейфа фундаментальных частот. Для контроля был использован также метод сечений Пуанкаре. Корреляция между этими двумя методами составила 96%. В результате произведена оценка влияния бара на динамику каждого ШС нашей выборки. Выявлено 8 ШС (NGC 6144, NGC 6273, NGC 6342, NGC 6355, NGC 6558, NGC 6256, NGC 6304, NGC 6388), изменивших под воздействием бара регулярную динамику на хаотическую и 9 ШС (Terzan 4, Liller1, NGC 6380, Terzan5, NGC 6440, Terzan 6, Terzan 9, NGC 6624, NGC 6637) – хаотическую динамику на регулярную. У 11 ШС (NGC 6266, Terzan 1, NGC 6522, NGC 6717, NGC 6723, Pismis 26, NGC 6569, NGC 6540, NGC 6171, NGC 6539, NGC 6553) регулярная динамика осталась абсолютно без всяких изменений. У остальных ШС орбитальная динамика претерпела незначительные изменения, не приведшие к изменению статуса регулярного или хаотического движения.

Как показал анализ полученного графического материала (рис. 2), наибольшему влиянию бара подверглись ШС с вытянутыми радиальными орбитами (большими эксцентриситетами и малыми перицентрическими расстояниями и высокими радиальными скоростями), что совпадает с выводами предыдущей нашей работы [7].

Благодарности

Авторы благодарны рецензенту за ряд полезных замечаний, позволивших устранить неточности в классификации орбит ШС и, тем самым, значительно улучшить статью.

Список литературы

1. Байкова А. Т., Бобылев В. В. Новый каталог орбит 152 галактических шаровых скоплений по данным Gaia EDR3. // Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове. — 2022. — №.227. — С. 1–15. DOI:10.31725/0367-7966-2022-227-2, arXiv:2212.00739.
2. Байкова А. Т., Смирнов А. А., Бобылев В. В. Шаровые скопления в центральной области Млечного Пути I. Влияние бара на параметры орбит по данным Gaia EDR3. // Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове. — 2023. — №.228. — С. 1–31. DOI:10.31725/0367-7966-2023-228-1, arXiv: 2305.05012.
3. Байкова А. Т., Смирнов А. А., Бобылев В. В. Шаровые скопления в центральной области Млечного Пути. II. Частотный анализ орбит, построенных по данным Gaia EDR3. // Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове. — 2023. — №.229. — С. 1–12. DOI:10.31725/0367-7966-2023-229-1.
4. Смирнов А. А., Байкова А. Т., Бобылев В. В. Шаровые скопления, захваченные баром Млечного Пути. Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове. — 2023. — №.228. — С. 157–165. DOI:10.31725/0367-7966-2023-228-12.
5. Байкова А. Т., Смирнов А. А., Бобылев В. В. Влияние бара на динамику шаровых скоплений в центральной области Млечного Пути. Частотный анализ орбит по данным Gaia EDR3. // Астрофизический бюллетень. — 2023. — Т. 78. — №.4. — С. 525–540, arXiv: 2311.14789.

6. Smirnov A. A., Bajkova A. T., Bobylev V. V. Globular clusters and bar: captured or not captured? // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2024. — V. 528. — Issue 2. — P. 1422-1437, arXiv: 2310.18172.
7. Байкова А. Т., Смирнов А. А., Бобылев В. В. Анализ регулярности/хаотичности динамики шаровых скоплений в центральной области Млечного Пути. // Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове. — 2024. — №. 233. — С. 1–28, arXiv: 2406.15590.
8. Vasiliev E., Baumgardt H. Gaia EDR3 view on galactic globular clusters. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2021. — V. 505. — Issue 4. — P. 5978-6002, arXiv: 2102.09568.
9. Baumgardt H., Vasiliev E. Accurate distances to Galactic globular clusters through a combination of Gaia EDR3, HST, and literature data. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2021. — V. 505. — Issue 4. — P. 5957-5977, arXiv: 2105.09526.
10. Palous J., Jungwiert B., Kopecky J. Formation of rings in weak bars: inelastic collisions and star formation. // Astronomy and Astrophysics. — 1993. — V. 274. — P. 189-202.
11. Sanders J. L., Smith L., Evans N. W., Lucas P. Transverse kinematics of the Galactic bar-bulge from VVV and Gaia. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2019. — V. 487. — Issue 4. — P. 5188-5208, arXiv: 1903.02008.
12. Machado R. E. G., Manos T. Chaotic motion and the evolution of morphological components in a time-dependent model of a barred galaxy within a dark matter halo. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2016. — V. 458. — Issue 4. — P. 3578-3591, arXiv: 1603.02294.
13. Miyamoto M., Nagai R. Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies. // Publications of the Astronomical Society of Japan. — 1975. — V. 27. — P. 533-543.
14. Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M. A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering. // Astrophysical Journal. — 1997. — V. 490. — Issue 2. — P. 493–508.
15. Bajkova A. T., Bobylev V. V. Rotation curve and mass distribution in the Galaxy from the velocities of objects at distances up to 200 kpc. // Astronomy Letters. — 2016 — V. 42. — Issue 9. — p. 567–582.
16. Bhattacharjee P., Chaudhury S., Kundu S. (2014). Rotation Curve of the Milky Way out to 200 kpc. // Astrophysical Journal. — 2014. — V. 785. — Issue 1 — p. 63.
17. Bajkova A. Bobylev V. Parameters of Six Selected Galactic Potential Models. // Open Astronomy. — 2017. — V. 26. — Issue 1. — P. 72-79.
18. Schönrich R., Binney J., Dehnen W. Local kinematics and the local standard of rest. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2010. — V. 403. — Issue 4. — P. 1829-1833.
19. Bobylev V.V., Bajkova A. T. Analysis of the Z distribution of young objects in the Galactic thin disk. // Astronomy Letters. — 2016. — V. 42. — Issue 1. — P. 1-9.
20. Vasiliev E. Proper motions and dynamics of the Milky Way globular cluster system from Gaia DR2. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2019. — V. 484. — issue 2. — P. 2832-2850.
21. Massari D., Koppelman H. H., Helmi A. Origin of the system of globular clusters in the Milky Way. // Astronomy and Astrophysics. — 2019. — V. 630. — P. L4.
22. Bajkova, A. T., Carraro G., Korchagin V. I., Budanova N. O., Bobylev V. V. Milky Way Subsystems from Globular Cluster Kinematics Using Gaia DR2 and HST Data. // Astrophysical Journal. — 2020 — V. 895. — Issue 1. — P. 69.
23. Морбиделли А. // Современная небесная механика. Аспекты динамики Солнечной системы. — 2014. — Ижевск: Ин-т компьютерных исслед. — 432 С.
24. Nieuwmunster N., Schultheis M., Sormani M., Fragkoudi F., Nogueras-Lara F., Schodel R., McMillan P. Orbital analysis of stars in the nuclear stellar disc of the Milky Way // arXiv:2403.00761. — 2024.
25. Valluri M., Debattista V. P., Quinn T., Moore B. The orbital evolution induced by barionic condensation in triaxial halos. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2010. — V. 403. — Issue 1. — P. 525-544, arXiv: 0906.4784.

The influence of the bar on the chaotic dynamics of globular clusters in the central region of the Galaxy

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

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Received 31 October 2024 / Accepted 26 November 2024

Abstract

The paper is devoted to the analysis of the influence of the galactic bar on the nature of the orbital motion (chaotic or regular) of globular clusters in the central region of the Galaxy with a radius of 3.5 kpc, which are subject to the greatest influence of the bar. The sample includes 45 globular clusters. To form the 6D phase space required for integrating the orbits, the most accurate astrometric data to date from the Gaia satellite (Vasiliev, Baumgardt, 2021) were used, as well as new refined average distances (Baumgardt, Vasiliev, 2021). The orbits of the globular clusters were obtained both in an axisymmetric potential and in a potential including the bar. The following, most realistic, bar parameters were adopted: mass $10^{10} M_{\odot}$, semi-major axis length 5 kpc, bar axis rotation angle 25° , angular rotation velocity 40 km/s/kpc. The analysis of the chaoticity/regularity of the orbital motion in both potentials was carried out using one of the most effective methods, namely, the frequency method, which consists in calculating the drift of fundamental frequencies. As a result, the influence of the bar on the dynamics of each GC of the sample was assessed. We established that 8 GCs changed regular dynamics to chaotic under the influence of the bar, and 9 GCs changed chaotic dynamics to regular.

key words: Galaxy, bar, globular clusters, chaotic orbital dynamics

Таблица 2: Влияние бара на динамику орбит 45 ШС.

№	Название ШС	Сечения Пуанкаре в осесимметричном потенциале	Сечения Пуанкаре в потенциале с баром	Дрейф частоты в осесимметричном потенциале	Дрейф частоты в потенциале с баром	Разность дрейфа частот Δ	Характер изменения динамики
1	NGC6144	(R)	(C)	-4.00 (R)	-2.08 (C)	-1.91	R→C
2	E452-11	(C)	(C)	-1.70 (C)	-1.37 (C)	-0.32	C↑
3	NGC6266	(R)	(R)	-4.00 (R)	-4.00 (R)	0.00	=
4	NGC6273	(R)	(C)	-4.00 (R)	-1.77 (C)	-2.22	R→C
5	NGC6293	(C)	(C)	-1.34 (C)	-0.07 (C)	-1.27	C↑
6	NGC6342	(R)	(C)	-4.00 (R)	-2.14 (C)	-1.85	R→C
7	NGC6355	(R)	(C)	-4.00 (R)	-0.10 (C)	-3.89	R→C
8	Terzan2	(R)	(C)	-1.61 (C)	-0.23 (C)	-1.37	C↑
9	Terzan4	(C)	(R)	-1.97 (C)	-4.00 (R)	2.02	C→R
10	BH229	(C)	(C)	-1.00 (C)	-1.81 (C)	0.80	C↓
11	Liller1	(C)	(R)	-1.49 (C)	-4.00 (R)	2.50	C→R
12	NGC6380	(C)	(R)	-0.41 (C)	-3.72 (R)	3.30	C→R
13	Terzan1	(R)	(R)	-4.00 (R)	-4.00 (R)	0.00	=
14	NGC6401	(C)	(C)	-1.26 (C)	-0.09 (C)	-1.16	C↑
15	Pal6	(C)	(C)	-0.42 (C)	-0.10 (C)	-0.32	C↑
16	Terzan5	(C)	(R)	-1.78 (C)	-4.00 (R)	2.21	C→R
17	NGC6440	(C)	(R)	-0.35 (C)	-2.26 (R)	1.91	C→R
18	Terzan6	(R)	(R)	-0.08 (C)	-4.00 (R)	3.91	C→R
19	NGC6453	(C)	(C)	-0.36 (C)	-1.92 (C)	1.56	C↓
20	Terzan9	(C)	(R)	-0.00 (C)	-3.86 (R)	3.86	C→R
21	NGC6522	(R)	(R)	-3.98 (R)	-4.00 (R)	0.01	≈
22	NGC6528	(R)	(R)	-2.71 (R)	-4.00 (R)	1.28	C↓
23	NGC6558	(R)	(C)	-3.09 (R)	-1.03 (C)	-2.06	R→C
24	NGC6624	(C)	(R)	-2.11 (C)	-4.00 (R)	1.88	C→R
25	NGC6626	(C)	(C)	-0.00 (C)	-1.78 (C)	1.78	C↓
26	NGC6638	(C)	(C)	-1.49 (C)	-0.16 (C)	-1.32	C↑
27	NGC6637	(C)	(R)	-1.68 (C)	-4.00 (R)	2.31	C→R
28	NGC6642	(C)	(C)	-1.66 (C)	-1.01 (C)	-0.65	C↑
29	NGC6717	(R)	(R)	-4.00 (R)	-4.00 (R)	0.00	=
30	NGC6723	(R)	(R)	-4.00 (R)	-4.00 (R)	0.00	=
31	Terzan3	(R)	(R)	-4.00 (R)	-1.89 (R)	-2.10	C↑
32	NGC6256	(R)	(C)	-4.00 (R)	-1.93 (C)	-2.06	R→C
33	NGC6304	(R)	(C)	-4.00 (R)	-1.38 (C)	-2.61	R→C
34	Pismis26	(R)	(R)	-4.00 (R)	-4.00 (R)	0.00	=
35	NGC6569	(R)	(R)	-4.00 (R)	-4.00 (R)	0.00	=
36	E456-78	(R)	(R)	-4.00 (R)	-3.59 (R)	-0.40	C↑
37	NGC6540	(R)	(R)	-4.00 (R)	-4.00 (R)	0.00	=
38	NGC6325	(R)	(C)	-4.00 (R)	-3.22 (R)	-0.77	C↑
39	Djorg2	(R)	(R)	-3.90 (R)	-4.00 (R)	0.09	C↓
40	NGC6171	(R)	(R)	-4.00 (R)	-4.00 (R)	0.00	=
41	NGC6316	(R)	(R)	-4.00 (R)	-1.96 (R)	-2.03	C↑
42	NGC6388	(R)	(C)	-4.00 (R)	-0.03 (C)	-3.97	R→C
43	NGC6539	(R)	(R)	-4.00 (R)	-4.00 (R)	0.00	=
44	NGC6553	(R)	(R)	-4.00 (R)	-4.00 (R)	0.00	=
45	NGC6652	(C)	(C)	-0.39 (C)	-0.12 (C)	-0.26	C↑