

УДК 524.45/47

ПОИСК ШАРОВЫХ И РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ С ВОЗМОЖНОЙ ЭВОЛЮЦИОННОЙ СВЯЗЬЮ

© 2019 В. В. Бобылев*, А. Т. Байкова

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 27 апреля 2018 года; после доработки 9 октября 2018 года; принята к публикации 9 октября 2018 года

По большой выборке из 133 галактических шаровых скоплений с измеренными пространственными скоростями получена новая оценка частоты ударов шаровых скоплений о плоскость Галактики, которая составляет 3 события за 1 млн лет. Наши расчеты с привлечением новых кинематических данных не подтверждают известную гипотезу о возможности возникновения рассеянного звездного скопления Stephenson 2 после прохождения через галактический диск массивного шарового скопления ω Cen. Также не находит подтверждения известная гипотеза о том, что шаровое скопление NGC 6397 могло инициировать образование рассеянного звездного скопления NGC 6231. Впервые найдены шесть шаровых скоплений, пересечение плоскости Галактики которыми могло привести к формированию рассеянного звездного скопления. Это шаровые скопления NGC 104, NGC 2808, NGC 6362, NGC 6540, NGC 6749 и NGC 6752. Для каждого из них указаны одно или несколько рассеянных звездных скоплений, возможно, образовавшихся по такому сценарию. Наиболее интересными с нашей точки зрения являются пары NGC 104–Ruprecht 129 и NGC 6362–Pismis 11.

Ключевые слова: Галактика: шаровые скопления: индивидуально: ω Cen, NGC 6397, NGC 104, NGC 6362 — Галактика: рассеянные звездные скопления: индивидуально: Stephenson 2, NGC 6231, Ruprecht 129, Pismis 11

1. ВВЕДЕНИЕ

Пересечение диска Галактики шаровым скоплением (ШС) способно стимулировать процессы звездообразования. В этом случае может возникнуть а) гравитационная фокусировка, при которой сближение с диском ШС приводит к стягиванию вещества диска к определенной точке и/или б) сильное сжатие вещества диска в определенном направлении. Во втором случае наибольший эффект сжатия будет наблюдаться при косом падении массивного тела, как это выяснили Комерон и Торра [1, 2] при моделировании пролета через галактический диск массивного высокоскоростного облака. Более того, как показали расчеты Леви [3], при пролете ШС через галактический диск в газе может возникнуть ударная волна. На основе модели гравитационной фокусировки газа Валлин и др. [4] пришли к выводу о том, что крупные ОВ-ассоциации могут сформироваться спустя приблизительно 30 Муг после пересечения диска шаровым скоплением.

В работе Броше и др. [5], по-видимому, впервые был поставлен вопрос об обнаружении каких-либо наблюдательных последствий пересечения

галактического диска двумя шаровыми скоплениями NGC 362 и NGC 6218. Например, скопление NGC 362 должно было пересечь диск с достаточно большой скоростью, поэтому не исключена возможность выброса материала из диска.

Для рассмотрения другого сценария Рис и Кудворт [6] предложили пару NGC 6397–NGC 6231 (шаровое скопление–молодое рассеянное звездное скопление). Эти авторы связали пересечение галактического диска шаровым скоплением с последующим образованием в этом месте рассеянного звездного скопления (РЗС).

Ванде Путте и Кроппер [7] проанализировали галактические траектории 54 шаровых скоплений с измеренными собственными движениями, лучевыми скоростями и расстояниями. Они нашли, что потенциально перспективными областями поиска являются шаровые скопления NGC 3201, NGC 6397 и NGC 6838. Вблизи мест пролета этих ШС располагаются ОВ-ассоциации, которые могли образоваться в результате воздействия ШС на диск. Салерно и др. [8] показали, что пролет сквозь галактический диск шарового скопления ω Cen мог послужить спусковым механизмом для образования рассеянных звездных скоплений Stephenson 2 и [BDS2003] 122.

*E-mail: vbobylev@gaoran.ru

Шаровые скопления могут быть причастными не только к образованию РЗС, но и к их разрушению. В работе [9] вычислены параметры взаимного сближения между известными шаровыми и рассеянными звездными скоплениями Галактики. Рекордсменом оказалась пара, состоящая из шарового скопления FSR 1767 (2MASS-GC04)¹ и молодого рассеянного звездного скопления Ruprecht 127, расстояние между которыми 22 млн лет назад составляло всего 36 пк. Эти авторы рассматривают данную пару в качестве примера разрушения скоплений из-за их взаимной близости.

Результаты исследования такого рода сильнее-шим образом зависят от измерительных ошибок наблюдаемых характеристик скоплений, в особенности от ошибок собственных движений. Поэтому публикация высокоточных абсолютных собственных движений для ряда галактических шаровых скоплений, вычисленных по данным наблюдений космического телескопа имени Хаббла [10–12], послужила одним из стимулов для выполнения настоящей работы.

Целью настоящей работы являются

- оценка частоты пролета шаровых скоплений через плоскость Галактики с использованием метода численного интегрирования орбит в наиболее реалистичной модели потенциала Галактики, учитывающей вклады как от осесимметричных компонент (балдж, диск, гало), так и бара, и спиральной структуры, с параметрами, определенными по самым современным наблюдательным данным;
- проверка некоторых известных результатов различных авторов;
- а главное, поиск на основе современных данных других возможных случаев возникновения РЗС в галактическом диске, инициированных пролетом через него ШС.

2. ДАННЫЕ

В качестве основы мы взяли каталог MWSC (Milky Way Star Clusters), представленный в работе [13]. В нем содержатся данные о положениях, собственных движениях и лучевых скоростях как рассеянных, так и шаровых скоплений Галактики. При анализе положений РЗС дополнительно используем более обширный каталог [14]. Объекты, помеченные в этих каталогах указателями типа «a», «n» и «s» (ассоциации, туманности и астеризмы), как правило, нами исключались.

¹ В электронной поисковой базе данных SIMBAD это скопление считается рассеянным.

Для вывода средних собственных движений скоплений в каталоге MWSC были использованы собственные движения звезд из каталога PPMXL [15], в котором их случайные ошибки довольно велики и составляют от 4 до 10 мсд год⁻¹. Одной из задач настоящей работы является построение галактических орбит шаровых и рассеянных скоплений на больших временных интервалах. Это требует как можно более точных значений исходных кинематических параметров. Поэтому для ряда шаровых скоплений мы взяли более надежные данные.

1. Мы использовали данные из работы [11], где вывод средних абсолютных собственных движений десяти избранных шаровых скоплений галактического балджа сделан на основе как наземных наблюдений на телескопах Европейской южной обсерватории, так и по данным космического телескопа имени Хаббла (КТХ). Средняя разность эпох составила 25 лет, средняя ошибка собственного движения одного скопления — около 0.5 мсд год⁻¹. Это шаровые скопления Terzan 1, Terzan 2, Terzan 4, Terzan 9, NGC 6522, NGC 6540, NGC 6558, NGC 6652, NGC 6681 и Palomar 6. Детальное исследование их индивидуальных орбит можно найти в работе [16]. Для скоплений Terzan 2, Terzan 4, NGC 6652, и Palomar 6 нами были учтены исправления, согласно [17].

2. Были взяты значения компонент абсолютного собственного движения и значение гелиоцентрического расстояния до шарового скопления ω Cen, полученные по наблюдениям на КТХ, представленные в работе [12]:

$$\begin{aligned}\mu_{\alpha} \cos \delta &= -3.238 \pm 0.028 \text{ мсд год}^{-1}, \\ \mu_{\delta} &= -6.716 \pm 0.043 \text{ мсд год}^{-1}, \\ r &= 5.20 \pm 0.25 \text{ кпк}.\end{aligned}\quad (1)$$

Значения компонент собственного движения (1) сильно отличаются от тех, что были использованы в [8]:

$$\begin{aligned}\mu_{\alpha} \cos \delta &= -5.08 \pm 0.35 \text{ мсд год}^{-1}, \\ \mu_{\delta} &= -3.57 \pm 0.34 \text{ мсд год}^{-1}, \\ r &= 5.3 \pm 0.5 \text{ кпк}\end{aligned}\quad (2)$$

при моделировании прохождения шарового скопления ω Cen через диск Галактики. Поэтому повторение исследования, предпринятого в [8], которое мы осуществляем в настоящей работе с использованием новых данных и другой модели галактического гравитационного потенциала, представляет большой интерес.

3. Мы использовали оценки собственных движений ШС NGC 104, NGC 5272, NGC 6121,

NGC 6397 и NGC 6656, полученные по данным каталога Gaia TGAS (Tycho–Gaia Astrometric Solution) в работе [18]. Для них определены также средние значения тригонометрических параллаксов. Однако основную ценность представляют именно их собственные движения. Что касается оценок расстояний, то они не обладают высокой точностью, поскольку для их определения использовано малое количество звезд в каждом скоплении. К тому же расстояния, превышающие 2 кпк, пока не могут быть надежно определены из-за ошибок параллаксов нынешнего релиза Gaia DR1.

4. Отметим для полноты картины использование нами новых измерений компонент абсолютного собственного движения шарового скопления NGC 2419:

$$(\mu_\alpha \cos \delta, \mu_\delta) = (-0.17 \pm 0.26; -0.49 \pm 0.17) \text{ мсд год}^{-1},$$

полученных по данным KTX и Gaia DR1 в работе [19]. Эти значения очень сильно отличаются от тех, что даны в каталоге [13].

5. Скопление NGC 6397 является одним из ближайших к Солнцу ШС. Как было отмечено в п. 3 настоящего раздела, мы используем для него новые высокоточные значения собственного движения из работы [18]. Кроме того, совсем недавно для этого скопления было определено [20] новое значение тригонометрического параллакса $\pi_{\text{trig}} = 0.418 \pm 0.018$ мсд по данным наблюдений на KTX. В итоге имеем возможность на новом уровне точности проверить гипотезу Риса и Кудворта [6].

3. МЕТОД

Метод решения поставленных задач по поиску РЗС, вероятно, возникших в результате соударения ШС с диском Галактики, основан на интегрировании орбит ШС и РЗС в галактическом гравитационном потенциале. Интегрирование орбит ШС позволяет нам определить координаты и время пересечения орбиты ШС диска Галактики. Интегрирование орбит РЗС в течение определенного интервала времени позволяет оценить степень их близости к найденным местам соударения и вероятного времени рождения РЗС. Использование статистического метода Монте-Карло позволяет получить целую область (X, Y) пересечений орбит ШС с диском Галактики, а также множество орбит рассматриваемого РЗС в результате учета ошибок в кинематических данных объектов и параметрах галактической модели. Это дает возможность оценить степень перекрываемости областей соударения ШС орбитами РЗС и, следовательно, вероятность рождения РЗС. Отметим, что во всех экспериментах, приведенных в данной статье, было использовано 1000 итераций Монте-Карло при

построении доверительной области точек пересечения ШС диска Галактики и 100 итераций при построении ансамбля орбит РЗС. Значения случайных ошибок определения расстояния до скоплений в каталоге MWSC не указаны, при моделировании и подготовке иллюстраций мы приняли значение таких ошибок 10% (кроме специально оговоренных случаев) для всех скоплений из этого каталога. Отметим, что доверительные области полученных множеств 1) точек пересечения ШС плоскости Галактики и 2) орбит РЗС оцениваются вероятностью 99.7% (3σ).

Описание избранной модели Галактики дается ниже. Наиболее реалистичной представляется уточненная нами по самым современным данным [21, 22] модель Наварро–Фрэнка–Уайта [23], дополненная членами, учитывающими влияние центрального бара и спиральной волны плотности.

3.1. Модель осесимметричного потенциала Галактики

Модель осесимметричного гравитационного потенциала 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 $\Phi_h(r(R, Z))$:

$$\Phi(R, Z) = \Phi_b(r(R, Z)) + \Phi_d(r(R, Z)) + \Phi_h(r(R, Z)). \quad (3)$$

Здесь используется цилиндрическая система координат (R, ψ, Z) с началом в центре Галактики. В прямоугольной системе координат (X, Y, Z) с началом в центре Галактики расстояние до звезды (сферический радиус) $r^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2 + Z^2$, при этом ось X направлена от галактического центра к Солнцу, 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 $M_{\text{gal}} = 2.325 \times 10^7 M_\odot$, соответствующей гравитационной постоянной $G = 1$.

Потенциалы балджа $\Phi_b(r(R, Z))$ и диска $\Phi_d(r(R, Z))$ представляются в форме, предложенной Миямото и Нагаи [24]:

$$\Phi_b(r) = -\frac{M_b}{(r^2 + b_b^2)^{1/2}}, \quad (4)$$

$$\Phi_d(R, Z) = -\frac{M_d}{\left[R^2 + \left(a_d + \sqrt{Z^2 + b_d^2} \right)^2 \right]^{1/2}}, \quad (5)$$

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

Параметры	Значения
M_b, M_{gal}	443 ± 27
M_d, M_{gal}	2798 ± 84
M_h, M_{gal}	12474 ± 3289
$b_b, \text{кпк}$	0.2672 ± 0.0090
$a_d, \text{кпк}$	4.40 ± 0.73
$b_d, \text{кпк}$	0.3084 ± 0.0050
$a_h, \text{кпк}$	7.7 ± 2.1

где M_b, M_d — массы компонент, b_b, a_d, b_d — масштабные параметры компонент в кпк. Компонента гало представляется согласно модели Наварро–Фрэнк–Уайта [23]:

$$\Phi_h(r) = -\frac{M_h}{r} \ln \left(1 + \frac{r}{a_h} \right). \quad (6)$$

В таблице 1 даны значения параметров модели галактического потенциала (4)–(6), которые были найдены в работах [21, 22] с использованием вращательных скоростей галактических объектов, расположенных на расстояниях до $R \sim 200$ кпк. Отметим, что при построении соответствующей кривой вращения Галактики были использованы значение галактоцентрического расстояния $R_0 = 8.3$ кпк и линейная скорость местного стандарта покоя вокруг центра Галактики $V_0 = 244 \text{ км с}^{-1}$.

3.2. Учет бара и спиральной структуры Галактики

В случае учета бара и спиральной структуры Галактики соответствующие члены, описывающие потенциал этих составляющих, добавляются в правую часть выражения (3). В качестве потенциала бара была выбрана модель трехосного эллипсоида, согласно [25]:

$$\Phi_B = -\frac{M_B}{(q_B^2 + X^2 + [Y a_B/b_B]^2 + [Z a_B/c_B]^2)^{1/2}}, \quad (7)$$

где M_B — масса бара, равная $43.1 \times M_{\text{gal}}$; a_B, b_B, c_B — три полуоси бара ($a_B/b_B = 2.381$, $a_B/c_B = 3.03$); q_B — длина бара; $X = R \cos \vartheta$, $Y = R \sin \vartheta$, где $\vartheta = \theta - \Omega_B t - \theta_B$, θ — начальный позиционный угол объекта: $\text{tg } \theta = Y_0/X_0$ (X_0, Y_0 — начальные координаты объекта в прямоугольной галактической системе координат в соответствии с (11)), Ω_B — круговая скорость

бара, t — время, 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. Оценки параметров бара $\Omega_B = 55 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, $q_B = 8$ кпк, $\theta_B = 45^\circ$ мы взяли из работы [26].

Потенциал спиральной волны плотности [27, 28] описывается выражением [29]:

$$\Phi_{\text{sp}}(R, \theta, t) = A \cos [m(\Omega_p t - \theta) + \chi(R)], \quad (8)$$

где

$$A = \frac{(R_0 \Omega_0)^2 f_{r0} \text{tg } i}{m},$$

$$\chi(R) = -\frac{m}{\text{tg } i} \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) + \chi_{\odot}.$$

Здесь A — амплитуда потенциала спиральной волны, f_{r0} — отношение между радиальной составляющей возмущения от спиральных рукавов и общим притяжением Галактики, Ω_p — угловая скорость твердотельного вращения волны, m — количество спиральных рукавов, i — угол закрутки рукавов, для закручивающегося узора $i < 0$, χ — фаза радиальной волны, тогда фазе $\chi = 0^\circ$ соответствует центр рукава, χ_{\odot} — радиальная фаза Солнца в спиральной волне. Нами были приняты следующие значения параметров спиральной волны:

$$\begin{aligned} m &= 4, \\ i &= -13^\circ, \\ f_{r0} &= 0.05, \\ \chi_{\odot} &= -120^\circ, \\ \Omega_p &= 20 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}. \end{aligned} \quad (9)$$

3.3. Уравнения движения

Уравнения движения пробной частицы в галактическом потенциале выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= p_X, \\ \dot{Y} &= p_Y, \\ \dot{Z} &= p_Z, \\ \dot{p}_X &= -\partial\Phi/\partial X, \\ \dot{p}_Y &= -\partial\Phi/\partial Y, \\ \dot{p}_Z &= -\partial\Phi/\partial Z, \end{aligned} \quad (10)$$

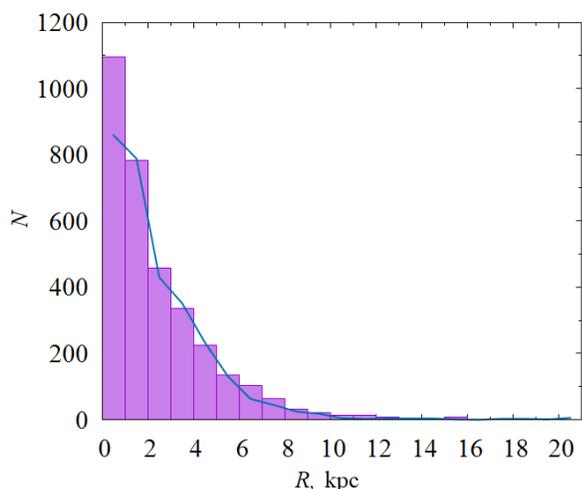


Рис. 1. Гистограмма (заливка) числа пересечений галактической плоскости XY шаровыми скоплениями за последний миллиард лет, построенная непосредственно по данным каталога MWSC [13], сплошная линия построена с использованием уточненных данных; по оси абсцисс — расстояние до оси вращения Галактики R .

где p_x, p_y, p_z — канонические моменты, точка означает производную по времени. Для интегрирования уравнений (10) мы использовали алгоритм Рунге—Кутты четвертого порядка.

Значение пекулярной скорости Солнца относительно местного стандарта покоя было принято равной $(u_\odot, v_\odot, w_\odot) = (11.1, 12.2, 7.3)$ км с⁻¹, согласно [30]. Здесь приведены гелиоцентрические скорости в подвижной прямоугольной системе координат: u направлена к центру Галактики, v — в сторону вращения Галактики, w — перпендикулярно к плоскости Галактики к северному галактическому полюсу.

Обозначим начальные значения положений и пространственных скоростей пробной частицы в гелиоцентрической системе координат следующим образом: $(x_o, y_o, z_o, u_o, v_o, w_o)$. Тогда в прямоугольной галактической системе координат начальные значения положений и скоростей пробной частицы определяются по формулам:

$$\begin{aligned} X_0 &= R_0 - x_o, \quad Y_0 = y_o, \quad Z_0 = z_o + h_\odot, \\ U &= -(u_o + u_\odot), \\ V &= v_o + v_\odot + V_0, \\ W &= w_o + w_\odot, \end{aligned} \quad (11)$$

где $h_\odot = 16$ пк — возвышение Солнца над плоскостью Галактики, согласно оценке [31].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Оценка частоты ударов ШС о плоскость Галактики

В каталоге MWSC для 133 шаровых скоплений имеется полный набор кинематических данных. Этот набор включает в себя оценку расстояния до ШС, координаты на небесной сфере, значения компонент собственного движения и лучевой скорости, а также ошибки их измерения. По этим, а также уточненным данным (см. раздел «ДАННЫЕ») для каждого ШС нами была построена галактическая орбита на интервале времени 1 млрд лет в прошлое.

Для оценки частоты ударов ШС о плоскость Галактики для каждого скопления мы фиксируем моменты при котором $Z = 0$ кпк. Имеются ШС, которые за последний миллиард лет ни разу не достигли галактической плоскости. Большинство ШС пересекли галактический диск множество раз. Так, например, ШС ω Cep пересекло диск Галактики за 1 млрд лет 26 раз. Рекордсменом является очень близкое к галактическому центру ($d = 8.1$ кпк) шаровое скопление VDBH 229 (ESO 455-11), которое пересекло диск Галактики за это же время 176 раз.

На рис. 1 показано количество пересечений галактической плоскости шаровыми скоплениями всей нашей выборки в течение последнего миллиарда лет в зависимости от расстояния до оси вращения Галактики. Для построения гистограмм были использованы данные двух следующих типов: а) взятые из каталога MWSC и б) с уточнениями, описанными в разделе «ДАННЫЕ» (сплошная линия). На рисунке можно видеть, что использование уточненных данных, несмотря на их относительную малочисленность, все же повлияло на область вблизи ($R < 1$ кпк) галактического центра.

В работах ряда авторов [7, 8] приводится, правда, без указания, каким методом она получена, оценка частоты ударов ШС о галактическую плоскость, которая составляет приблизительно одно событие за миллион лет. Мы нашли, что в среднем по всему диску Галактики происходят три пересечения за миллион лет.

В работе [8] при обсуждении эффективности процессов звездообразования, связанных с воздействием шаровых скоплений на галактический диск, говорится о том, что с высокой вероятностью можно ожидать воздействия удара ШС на образование РЗС в локальной области диска (радиусом около 1–2 кпк) в любом месте внутренней области Галактики примерно раз в 10 млн лет. Т.е. авторы говорят о равномерном характере звездообразования в области диска. Мы же можем предположить на основе полученного нами экспоненциального характера падения количества ударов ШС о диск,

показанного на рис. 1, что и эффективность звездообразования, вызванная пересечениями диска шаровыми скоплениями, экспоненциально снижается с удалением от галактического центра.

4.2. Проверка двух известных гипотез

Отметим, что должно пройти значительное время после удара ШС о галактическую плоскость, прежде чем образуется РЗС. Следуя [7], будем руководствоваться выражением:

$$t = t_C + t_{SF} + t_A, \quad (12)$$

где t — время, прошедшее после пересечения ШС галактического диска вплоть до настоящего момента, t_C — интервал времени с момента пересечения до начала звездообразования, t_{SF} — продолжительность звездообразования, t_A — возраст рассеянного скопления.

Конкретное значение первого слагаемого в формуле (12) известно с большой неопределенностью и заключено в интервале 0–30 млн лет. Например, согласно оценке [32], полученной при моделировании падения высокоскоростного облака на диск, $t_C = 15$ млн лет, а по мнению [4], величина этого отрезка времени составляет $t_C = 30$ млн лет. Значение второго слагаемого, согласно [33], составляет $t_{SF} = 0.2$ млн лет (для звезды с массой $M > M_\odot$), которое мало по сравнению с другими членами, таким образом, этим слагаемым при первых грубых оценках можно пренебречь.

Для каждого исследуемого объекта (ШС и РЗС) мы выполнили статистическое моделирование методом Монте-Карло. При этом случайные ошибки, распределенные по нормальному закону с нулевым средним и известным среднеквадратическим отклонением, добавлялись в координаты объекта (X, Y, Z), пространственные скорости (U, V, W), а также параметры модели гравитационного потенциала (см. таблицу 1). Скорости, координаты и их ошибки были определены в результате применения метода статистического моделирования Монте-Карло к данным измерений гелиоцентрических расстояний, собственных движений и лучевых скоростей объектов.

4.2.1. Пара ω Cen–Stephenson 2

На рис. 2 приведены две картинка, полученные для двух наборов измерительных данных о ШС ω Cen и РЗС Stephenson 2, о которых будет сказано ниже. На этих картинках показаны доверительные области точек пересечения галактической плоскости ХУ шаровым скоплением ω Cen (серые кружки), полученные с использованием метода Монте-Карло, учитывающего ошибки измерения параметров ШС, а также траектории — орбиты рассеянного звездного скопления Stephenson 2, построенные

на интервале времени от настоящего момента до момента t пересечения ШС диска Галактики, также с использованием метода Монте-Карло. Эти картинка дают представление о степени перекрытия множества точек пересечения диска Галактики ШС и множества концевых точек траекторий РЗС на момент времени t . Если имеется перекрытие таких множеств, то можно делать вывод о возможном инициировании образования РЗС шаровым скоплением. Если никакого перекрытия нет, то вывод отрицателен. Такой подход был реализован и при исследовании нами других пар ШС–РЗС, представленных ниже.

Значения параметров для ШС ω Cen были обсуждены выше, в разделе «ДАННЫЕ». Здесь рассмотрим параметры РЗС Stephenson 2. Согласно оценкам [34], возраст рассеянного звездного скопления Stephenson 2 составляет $t_A \sim 20$ млн лет, и расположено оно на расстоянии $d = 5.9$ кпк от Солнца. В хорошем согласии находятся и более поздние оценки [35]: возраст лежит в интервале $t_A = 12–17$ млн лет, а расстояние составляет $d = 5.8_{-0.8}^{+1.9}$ кпк. Важно отметить, что в работе [35] были получены оценки лучевых скоростей для 26 звезд рассеянного звездного скопления Stephenson 2. По ним было определено среднее значение лучевой скорости РЗС, $V_{LSR} \approx 110 \pm 4$ км с⁻¹, которое мы вместе со значением расстояния $d = 5.8 \pm 0.6$ кпк использовали для анализа трехмерного движения этого РЗС. Кроме того, мы использовали два набора значений собственных движений для скопления Stephenson 2:

$$\begin{aligned} \mu_\alpha \cos \delta &= 2.69 \pm 1.43 \text{ мсд год}^{-1}, \\ \mu_\delta &= -7.00 \pm 1.43 \text{ мсд год}^{-1}, \end{aligned} \quad (13)$$

согласно данным [13], и

$$\begin{aligned} \mu_\alpha \cos \delta &= -0.44 \pm 1.21 \text{ мсд год}^{-1}, \\ \mu_\delta &= 0.80 \pm 0.53 \text{ мсд год}^{-1}, \end{aligned} \quad (14)$$

согласно данным каталога [36]. Для вывода средних собственных движений РЗС в каталоге [36] были взяты собственные движения звезд из каталога UCAC4 [37], их случайные ошибки составляют от 1 до 4 мсд год⁻¹, они существенно меньше, чем приведенные в каталоге PPMXL [15].

Как уже говорилось, на рис. 2 приведены результаты для двух наборов данных, использованных при анализе пары ω Cen–Stephenson 2. «Старыми» мы называем комбинацию данных (2) для ω Cen и (13) для скопления Stephenson 2, «новыми» данными — комбинацию (1) и (14) соответственно.

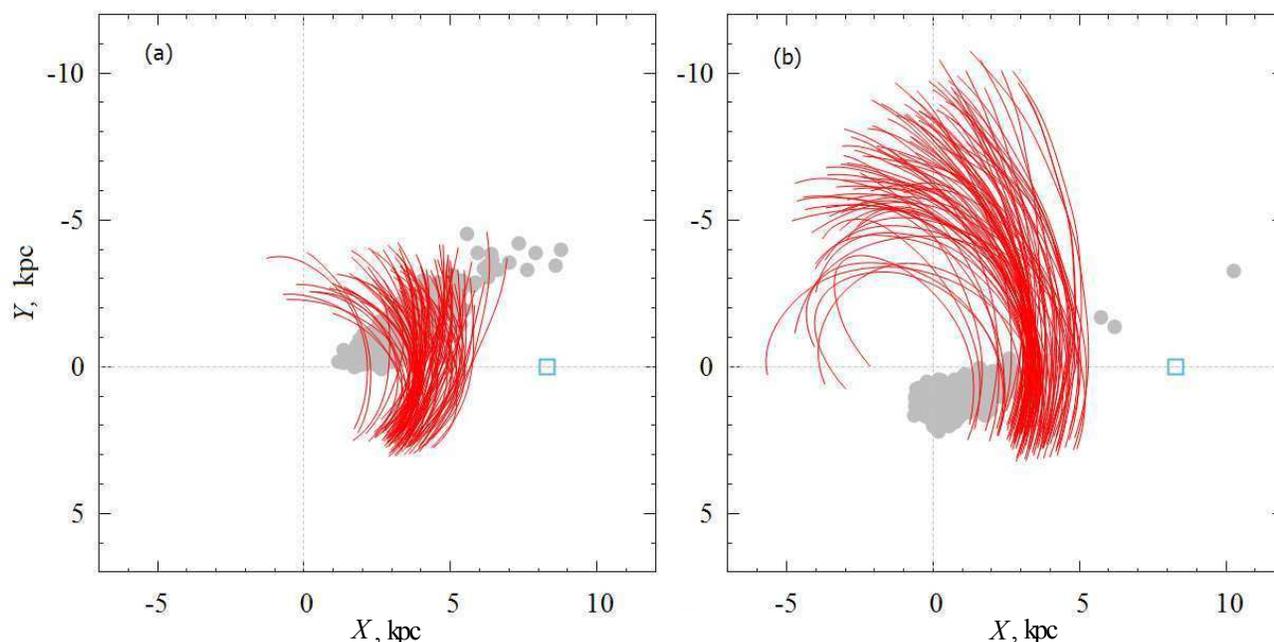


Рис. 2. Доверительные области точек пересечения галактической плоскости XY шаровым скоплением ω Cep (серые кружки) и ансамбли орбит (сплошные линии) рассеянного звездного скопления Stephenson 2, построенные с использованием метода Монте-Карло на интервале времени от последнего пересечения ШС диска Галактики до настоящего момента по «старым» (а) и «новым» (б) данным. Центр Галактики лежит в начале системы координат, квадратом отмечено положение Солнца. В настоящее время скопление Stephenson 2 расположено в первом галактическом квадранте.

Отметим, что наш подход отличается от подхода Салерно и др. [8] тем, что при вычислении пространственных скоростей Stephenson 2 мы использовали реальные измерения как собственных движений, так и лучевой скорости скопления. В работе же [8] были вычислены модельные скорости РЗС Stephenson 2 в предположении о его чисто круговом движении вокруг центра Галактики.

По набору «старых» данных мы нашли, что шаровое скопление ω Cep пересекло галактическую плоскость 27.5 млн лет назад. Это значение является номинальным и оно близко к значению $t = 24$ млн лет, полученному в работе [8]. Учитывая возраст скопления Stephenson 2 $t_A = 20$ млн лет [34], можем заключить, что гипотеза Салерно и др. [8] о том, что возникновение РЗС могло быть вызвано ударом ШС ω Cep о диск Галактики, верна, если дать время на формирование РЗС 7.5 млн лет в соответствии с соотношением (12). Слабое подтверждение этой гипотезы иллюстрирует рис. 2а: множество концевых точек траекторий РЗС, соответствующих времени $t = 27.5$ млн лет, в очень небольшой степени, но все-таки перекрывается областью точек пересечений галактического диска шаровым скоплением. В этом случае номинальное значение расстояния от орбиты РЗС до ШС в момент пересечения диска составляет 2.49 кпк (см. таблицу 2).

Абсолютно другая ситуация наблюдается в случае использования «нового» набора данных для ШС ω Cep и РЗС Stephenson 2. В этом случае номинальная оценка времени пересечения диска шаровым скоплением равна $t = 45.5$ млн лет, и мы интегрируем орбиты РЗС на это время. Как видно на рис. 2б, концы орбит рассеянного звездного скопления Stephenson 2 проходят довольно далеко от области пересечения плоскости XY шаровым скоплением ω Cep: номинальная величина расстояния от орбиты РЗС до ШС в момент пересечения диска оказывается равной 9.59 кпк (см. таблицу 2). Отсюда можем сделать вывод, что при новых данных о ШС ω Cep и РЗС Stephenson 2 гипотеза Салерно и др. [8] категорически не подтверждается.

Интересно отметить, что, согласно [13], возраст Stephenson 2 составляет $t_A = 1$ млн лет. При использовании этой оценки возраста для «нового» набора данных получим очень большое значение разности $t - t_A = 44.5$ млн лет, лежащее далеко за рамками принятого нами интервала. Это еще более укрепляет наш вывод об ошибочности выделения данных скоплений в пару.

4.2.2. Пара NGC 6397–NGC 6231

Согласно предположению [6], пролет шарового скопления NGC 6397 через плоскость Галактики мог инициировать образование рассеянного звездного скопления NGC 6231. Шаровое скопление

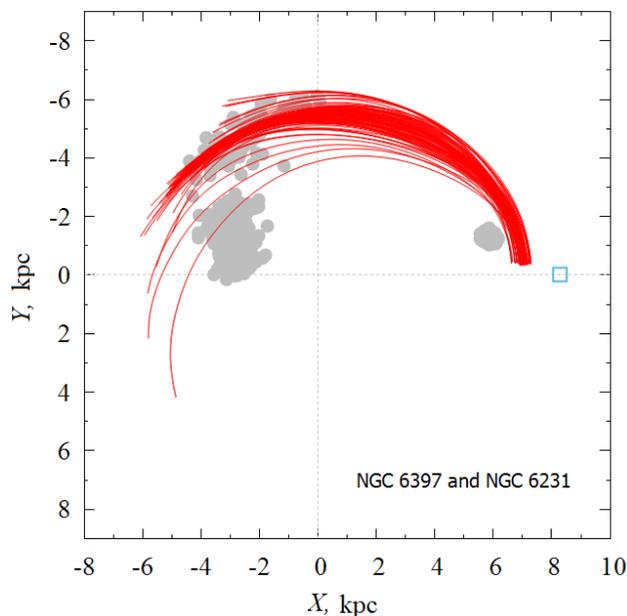


Рис. 3. Доверительные области двух последовательных пересечений галактической плоскости XY шаровым скоплением NGC 6397 (серые кружки) и ансамбль орбит (сплошные линии) РЗС NGC 6231, построенный на интервале 49.5 млн лет в прошлое с использованием метода Монте-Карло. В правой части рисунка показаны доверительные области последнего пересечения ШС (3.5 млн лет назад), в левой части — предыдущего пересечения (49.5 млн лет назад). Центр Галактики лежит в начале системы координат, квадратом отмечено положение Солнца. В настоящее время рассеянное скопление NGC 6231 расположено во втором галактическом квадранте вблизи Солнца.

NGC 6397 значится также в списке [7] в качестве кандидата для поиска каких-либо проявлений после пересечения им галактической плоскости. Эти авторы проанализировали возможность возникновения РЗС NGC 6231 и пришли к заключению, данное скопление, благодаря своему молодому возрасту ($t_A = 3\text{--}5$ млн лет) и значительной удаленности от места удара о диск ШС, не могло образоваться в результате прохода шарового скопления NGC 6397 через плоскость Галактики, произошедшего, согласно их оценке, 3.7 млн лет назад.

При анализе этой пары мы пришли к такому же выводу. Действительно, возраст рассеянного звездного скопления NGC 6231 составляет $t_A = 11.2$ млн лет [13], а шаровое скопление NGC 6397 в последний раз пересекло галактическую плоскость около 3.5 млн лет назад. То есть явно не выполняется соотношение (12).

Хотя проекции на плоскость XY траекторий галактических орбит обоих этих скоплений близки, в трехмерном пространстве они могут значительно отстоять друг от друга. Действитель-

но, скорость $W = -4.3 \pm 0.5$ км с⁻¹ рассеянного скопления NGC 6231 мала, поэтому его орбита практически лежит в плоскости Галактики. Аналогичная компонента скорости шарового скопления NGC 6397 значительно больше и составляет $W = -131.8 \pm 6.7$ км с⁻¹, поэтому его орбита высоко поднимается над галактической плоскостью (т.е. ШС может далеко уходить от РЗС NGC 6231 по оси Z). Отметим, что случайные ошибки кинематических характеристик обоих скоплений достаточно малы.

Как было отмечено в разделе «ДАННЫЕ», значения собственного движения шарового скопления NGC 6397 были вычислены [18] по данным каталога Gaia TGAS, то есть они достаточно надежны. Значение тригонометрического параллакса определено [20] с относительной ошибкой около 4%. В итоге при статистическом моделировании мы получаем компактные доверительные области пересечений для данного шарового скопления.

Построив галактические орбиты этих двух скоплений на интервале 50 млн лет в прошлое, мы неожиданно обнаружили, что они сближаются с ШС в момент предыдущего пересечения галактической плоскости 49.5 млн лет назад до номинального расстояния около 3.55 кпк (см. таблицу 2, где даны параметры сближения как для последнего пересечения — случай I, так и для предпоследнего пересечения — случай II). На рис. 3 приведены доверительные области точек пересечения галактической плоскости XY шаровым скоплением NGC 6397, а также траектории рассеянного звездного скопления NGC 6231, построенные на интервале 49.5 млн лет в прошлое, с учетом ошибок в данных методом статистического моделирования Монте-Карло. В правой части рисунка серые кружки заполняют область последнего пересечения ШС галактического диска, произошедшего 3.5 млн лет назад, а в левой части — область предыдущего пересечения, произошедшего 49.5 млн лет назад. На рисунке можно видеть перекрытие множества конечных точек орбит РЗС и области предыдущего пересечения ШС галактического диска, что указывает на то, что воздействие шарового скопления NGC 6397 в принципе могло инициировать образование рассеянного звездного скопления NGC 6231 около 49.5 млн лет назад при предыдущем своем пересечении плоскости Галактики. Однако в этом случае требуется нереально большой промежуток времени, прошедший после пересечения до начала звездообразования $t - t_A = 38$ млн лет. Это позволяет заключить, что даже сценарий NGC 6397 (II)—NGC 6231 маловероятен.

Таблица 2. Параметры пар вида ШС–РЗС, выделенных нами в качестве кандидатов на сближения в прошлом

ШС	РЗС	Δr_t ,	t , млн лет	t_A ,	$t - t_A$,
		кпк	в прошлом	млн лет	млн лет
ω Cep (старые данные)	Stephenson 2	2.49	27.5	20.0	7.5
ω Cep (новые данные)	Stephenson 2	9.59	45.5	20.0	25.0
NGC 6397 (I)	NGC 6231	0.96	3.5	11.2	-7.7
NGC 6397 (II)	NGC 6231	3.55	49.5	11.2	38.3
NGC 104	Ruprecht 129	0.25	52.5	31.6	20.9
NGC 104	FSR 52	0.52	52.5	31.6	20.9
NGC 104	Ruprecht 127	0.96	52.5	35.5	17.0
NGC 104	NGC 6396	0.90	52.5	32.0	20.5
NGC 104	Trumpler 27	1.44	52.5	38.0	14.5
NGC 2808	Pismis 20	1.39	41.5	31.6	9.9
NGC 2808	IRAS 6567	2.50	41.5	22.4	19.1
NGC 2808	Haffner 16	2.16	41.5	20.0	21.5
NGC 6362	Pismis 11	0.55	21.5	1.0	20.5
NGC 6540	[DBS2003] 102	0.57	15.5	1.3	14.2
NGC 6749 (II)	Trumpler 27	1.23	51.5	38.0	13.5
NGC 6749 (II)	Ruprecht 127	1.41	51.5	35.5	16.0
NGC 6749 (II)	Turner 3	1.77	51.5	28.8	23.3
NGC 6749 (II)	NGC 6396	1.88	51.5	32.0	19.5
NGC 6749 (II)	Ruprecht 129	1.96	51.5	31.6	19.9
NGC 6749 (II)	FSR 52	2.26	51.5	31.6	19.9
NGC 6752	[DBS2003] 115	0.90	47.5	24.0	23.5

4.3. Поиск новых кандидатов

Далее был осуществлен поиск новых пар-кандидатов вида ШС–РЗС. Для этого в дополнение к имеющейся выборке из 133 ШС была сформирована выборка из молодых ($\lg t < 7.6$) РЗС с измеренными собственными движениями, лучевыми скоростями и расстояниями. В эту выборку вошли 200 РЗС, распределенных по всему диску Галактики. Для каждой пары ШС–РЗС вычислялся так называемый параметр сближения Δr_t , который по существу равен номинальному расстоянию между ШС и РЗС на момент времени t , когда ШС пересекло галактическую плоскость.

Результаты поиска, полученные с ограничениями, о которых говорится ниже, приведены в таблице 2. Отметим, что в первых четырех строках таблицы даны параметры для уже рассмотренных на-

ми выше известных двух пар ШС–РЗС. Во второй (нижней) ее части приведены новые результаты.

Принятые ограничения заключаются в следующем: 1) величина Δr_t не должна превышать 20% от значения гелиоцентрического расстояния ШС до места пересечения (здесь мы ориентируемся на среднюю случайную ошибку фотометрического расстояния), 2) должно выполняться очевидное условие $t_A < t$ в соответствии с (12). Как следует из таблицы 2, даже при таких условиях для некоторых ШС имеется по несколько кандидатов РЗС.

Для новых кандидатов ШС рассмотрены РЗС, связанные с последним пересечением ШС галактического диска, а для ШС NGC 6749 рассмотрены РЗС, связанные с местом предпоследнего (II) пересечения, которое является более подходящим

для возникновения РЗС с точки зрения временных параметров.

На рис. 4–6 для ряда избранных пар ШС–РЗС представлены иллюстрации, показывающие степень перекрываемости доверительных областей пересечения ШС диска Галактики и концевых точек орбит РЗС, соответствующих моменту соударения. Анализ полученных результатов моделирования позволяет предположить для всех рассмотренных пар возможность рождения РЗС под воздействием ШС. Ниже даются комментарии по индивидуальным объектам.

4.3.1. Шаровое скопление NGC 104

Шаровое скопление NGC 104 расположено достаточно близко к Солнцу ($d = 4.50 \pm 0.05$ кпк), его кинематические характеристики хорошо известны. Мы использовали собственные движения этого шарового скопления, вычисленные в работе [18] по данным каталога Gaia TGAS. Масса NGC 104 составляет $0.84 \times 10^6 M_{\odot}$ [38]. Это значение выше, чем у большинства галактических ШС с известными оценками масс порядка $1–3 \times 10^5 M_{\odot}$ [7].

На рис. 4а показаны доверительные области точек пересечения галактической плоскости XY шаровым скоплением NGC 104, а также траекторий РЗС Ruprecht 129, построенные на интервале 52.5 млн лет в прошлое. Как видно на рисунке, имеет место надежное перекрытие областей пересечения ШС с галактической плоскостью с концевыми точками орбит рассмотренных РЗС, что говорит в пользу гипотезы происхождения РЗС вследствие прохождения ШС через галактический диск.

В работе Ванде Путте и Кроппера [7] для ряда шаровых скоплений были определены ожидаемые положения РЗС на настоящий момент времени, исходя из предположения о том, что они сформировались в результате последнего прохождения ШС через диск. Для каждого такого положения даны границы доверительных областей. Как показало непосредственное сравнение положений, все указанные в таблице 2 РЗС либо попадают, либо очень близки к доверительной области, найденной в работе [7] для ШС NGC 104. Интересно отметить, что авторы [7] использовали несколько моделей гравитационного потенциала Галактики. Например, в модели потенциала Флинна (у них эта модель обозначена как FL) для NGC 104 они нашли момент последнего пересечения галактической плоскости $t = 52.6 \pm 1.9$ млн лет, значение которого находится в очень хорошем согласии с найденным нами моментом $t = 52.5$ млн лет.

Координаты всех отмеченных в таблице 2 РЗС близки. Однако более всего выделяется пара РЗС с совершенно одинаковым возрастом: Ruprecht 129 и FSR 52. Поэтому закономерна постановка вопроса об их одновременном происхождении.

4.3.2. Шаровое скопление NGC 2808

Иллюстрация для пары NGC 2808–Pismis 20 дана на рис. 4б. Этот случай характеризуется сравнительно большой доверительной областью точек пересечений ШС. Распределение концевых точек РЗС почти на 100% перекрывается с доверительной областью пересечения ШС, что говорит о высокой вероятности происхождения РЗС в результате воздействия ШС. Эта пара также имеет приемлемые пространственные и временные характеристики сближения. Как видно из таблицы 2, эта пара выделяется благодаря рекордно короткому интервалу времени $t - t_A = 9.9$ млн лет.

4.3.3. Шаровые скопления NGC 6362 и NGC 6540

Иллюстрация к паре NGC 6362–Pismis 11 дана на рис. 5а. Для этой пары все показатели выглядят приемлемыми: имеются достаточно тесное сближение $\Delta r_t = 0.55$ кпк и реалистичная величина разности $t - t_A = 20.5$ млн лет. Как можно видеть на рисунке, все концевые точки траекторий РЗС находятся внутри доверительной области точек пересечения ШС, которая к тому же является достаточно компактной по сравнению с другими случаями. С этой точки зрения пара NGC 6362–Pismis 11 является одним из лучших кандидатов в нашем списке.

Иллюстрация к паре NGC 6540–[DBS2003] 102 дана на рис. 5б. Эта пара выгодно отличается компактной областью точек пересечения и практически 100% попаданием в эту область концов траекторий РЗС. Пара имеет достаточно тесное сближение, $\Delta r_t = 0.57$ кпк, и небольшую величину разности $t - t_A = 14.2$ млн лет.

4.3.4. Шаровые скопления NGC 6749 и NGC 6752

Шаровое скопление NGC 6749 интересно тем, что почти все соответствующие ему РЗС, указанные в таблице 2, тесно сближаются не только с местом его предпоследнего пересечения (II), но и с местом последнего пересечения галактического диска шаровым скоплением NGC 104.

На рис. 6а дана иллюстрация для пары NGC 6749(II)–FSR 52, а на рис. 6б — для пары NGC 6752–[DBS2003] 115. Для обеих этих пар характерна небольшая, примерно 50%, вероятность попадания траекторий РЗС в область точек пересечения ШС.

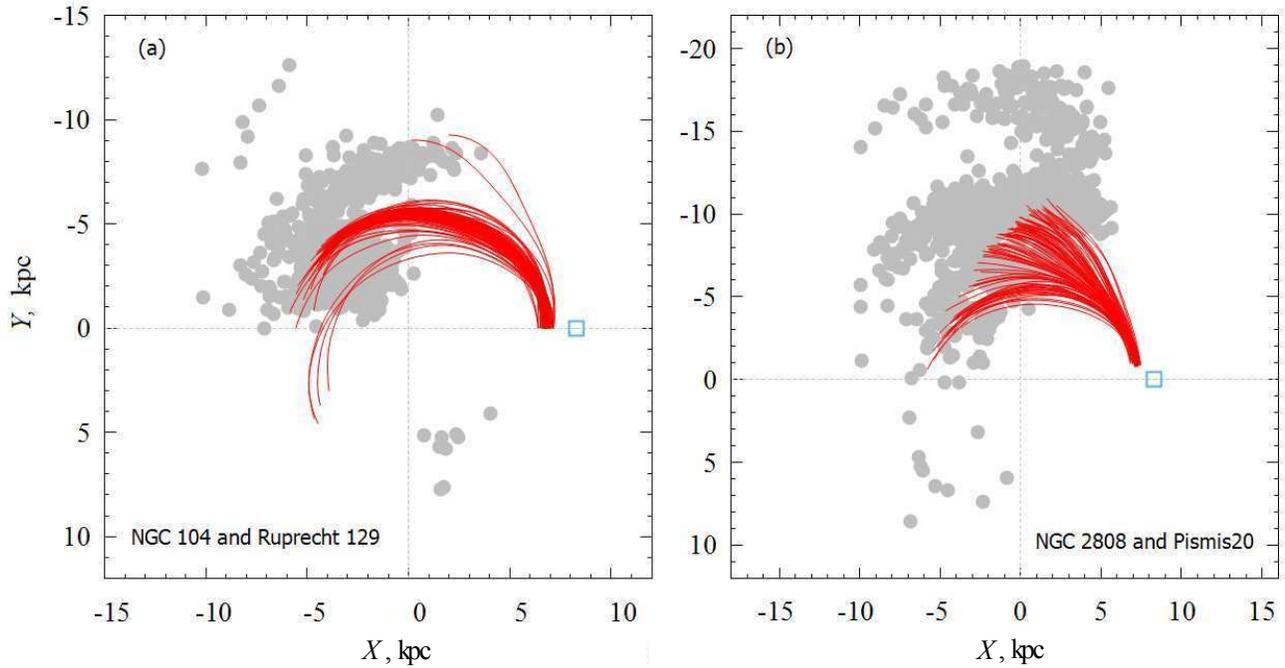


Рис. 4. Доверительные области точек пересечения галактической плоскости XY ШС (серые кружки) и ансамбли орбит РЗС (сплошные линии): (а) для пары NGC 104–Ruprecht 129, построенные на интервале времени 52.5 млн лет в прошлое с использованием метода Монте-Карло, (б) для пары NGC 2808–Pismis 20, построенные на интервале времени 41.5 млн лет в прошлое. Центр Галактики лежит в начале системы координат; квадратом отмечено положение Солнца.

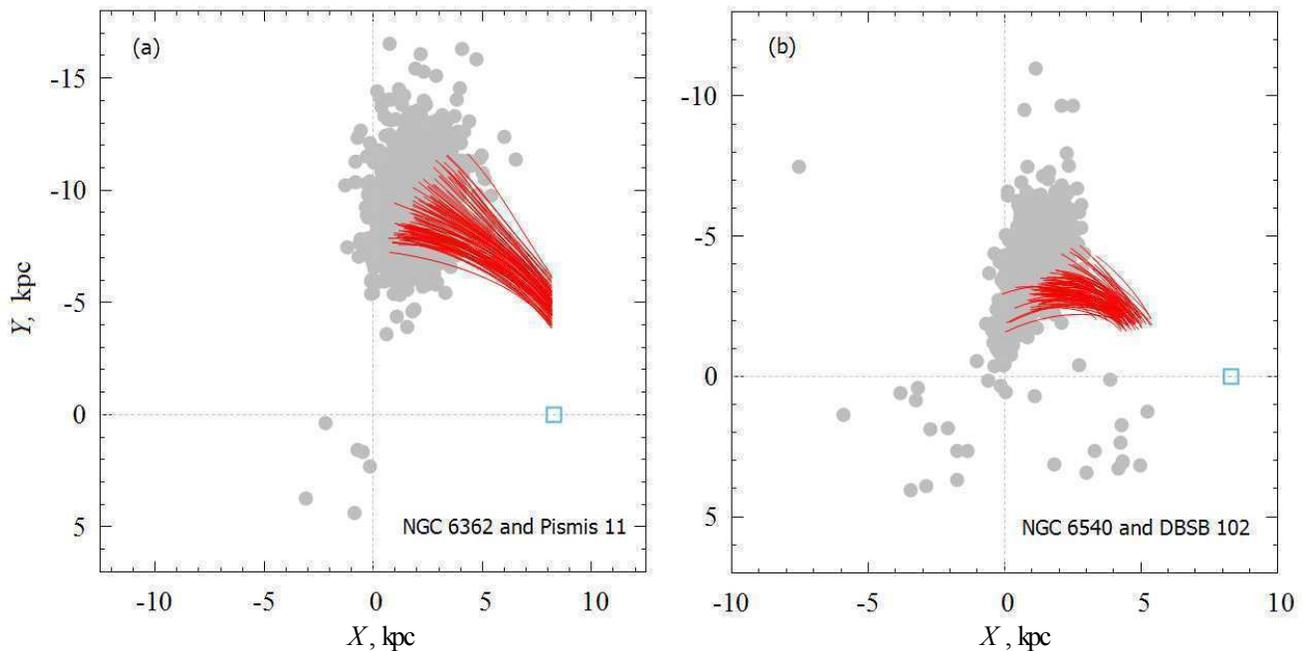


Рис. 5. Доверительные области точек пересечения галактической плоскости XY ШС (серые кружки) и ансамбли орбит РЗС (сплошные линии): (а) для пары NGC 6362–Pismis 11, построенные на интервале времени 21.5 млн лет в прошлое с использованием метода Монте-Карло, (б) для пары NGC 6540–[DBS2003] 102, построенные на интервале времени 15.5 млн лет в прошлое. Центр Галактики лежит в начале системы координат; квадратом отмечено положение Солнца.

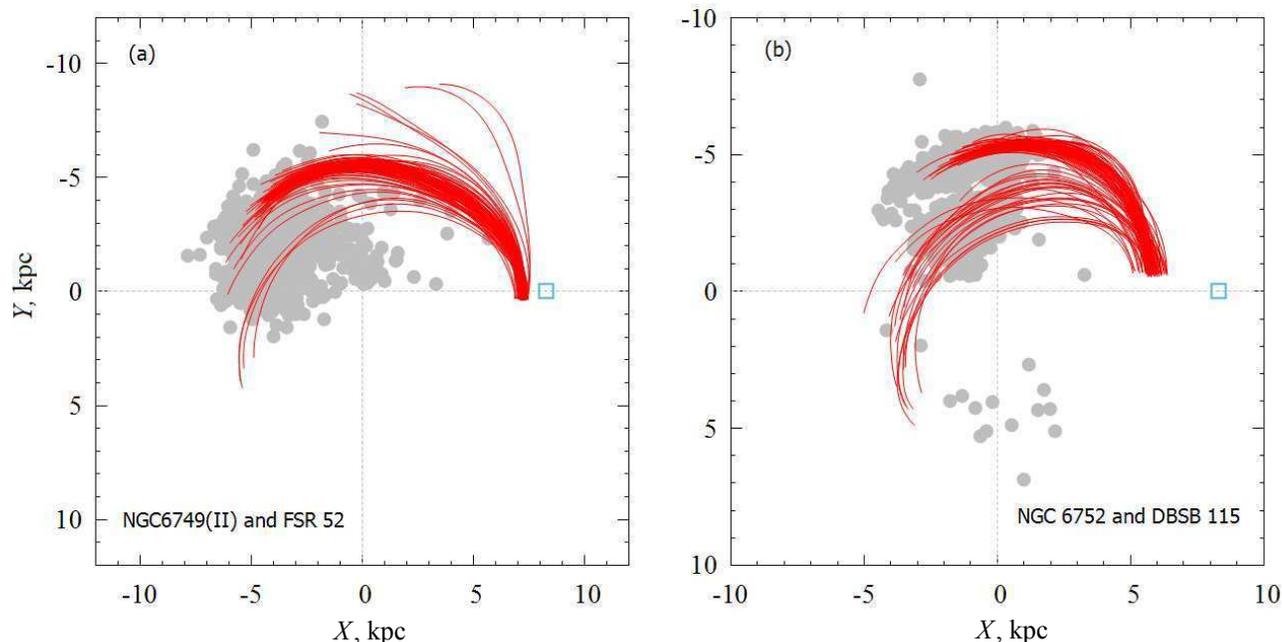


Рис. 6. Доверительные области точек пересечения галактической плоскости XY ШС (серые кружки) и ансамбли орбит РЗС (сплошные линии): (а) для пары NGC 6749(II)—FSR 52, построенные на интервале времени 51.5 млн лет в прошлое с использованием метода Монте-Карло, (б) для пары NGC 6752—[DBS2003]115, построенные на интервале времени 47.5 млн лет в прошлое. Центр Галактики лежит в начале системы координат; квадратом отмечено положение Солнца.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построены галактические орбиты 133 шаровых скоплений. Интегрирование орбит выполнено в гравитационном потенциале Галактики, ранее уточненном нами по современным данным. Получена новая оценка частоты ударов шарового скопления о плоскость Галактики, составляющая 3 события за 1 млн лет. Показано, что количество таких событий удовлетворяет экспоненциальному закону распределения с максимумом в центральной части Галактики, быстро спадающая с удалением от центра. Поэтому следует ожидать, что эффективность звездообразования, вызванная «бомбардировками» галактического диска шаровыми скоплениями, должна также сильно зависеть от галактоцентрического расстояния. Другой вытекающий из этого вывод заключается в том, что эффективнее искать возможные пары ШС—РЗС во внутренних областях Галактики, и такой поиск будет более результативным после завершения космической миссии Gaia [39].

Выполнена проверка двух известных гипотез об образовании рассеянного звездного скопления в результате пересечения шаровым скоплением галактического диска.

Использование современных кинематических данных показало, что не подтверждается гипотеза Салерно и др. [8] о том, что рассеянное звездное скопление Stephenson 2 могло возникнуть после

прохождения через галактический диск массивного шарового скопления ω Cep.

Гипотеза Риса и Кудворта [6] о том, что пролет шарового скопления NGC 6397 через плоскость Галактики мог инициировать образование рассеянного звездного скопления NGC 6231, могла бы быть верной не для последнего прохождения NGC 6397 через плоскость Галактики, состоявшегося 3.5 млн лет назад, как предполагали авторы гипотезы, а для предыдущего — около 49.5 млн лет назад. Однако в этом случае требуется нереально большой промежуток времени, прошедший от момента пересечения до начала звездообразования $t - t_A = 38$ млн лет. Это позволяет заключить, что сценарий Риса и Кудворта [6] маловероятен.

Осуществлен поиск новых пар-кандидатов ШС—РЗС с использованием выборок из 133 шаровых и из 200 рассеянных звездных скоплений на основе оценки сближений ШС—РЗС по принципу «каждый с каждым». В итоге выделены шесть шаровых скоплений с указанием одного или нескольких конкретных рассеянных звездных скоплений (все они перечислены в таблице 2) в рамках сценария, при котором возникновение рассеянного звездного скопления могло быть вызвано прохождением через галактический диск массивного шарового скопления. Это следующие ШС: NGC 104, NGC 2808, NGC 6362, NGC 6540, NGC 6749 и NGC 6752. Рекордсменом по степени

близости ШС и РЗС в момент пересечения шаровым скоплением галактического диска является пара NGC 104–Ruprecht 129, имеющая также непротиворечивые временные характеристики. Таким образом, вероятен сценарий, при котором 52.5 млн лет назад произошел пролет через галактический диск шарового скопления NGC 104, послуживший спусковым механизмом для начала процесса звездообразования в месте пролета. Спустя 20.9 млн лет после этого образовалось рассеянное звездное скопление Ruprecht 129, возраст которого оценивается в 31.6 млн лет. Можно также отметить пару ШС–РЗС NGC 6362–Pismis 11, которая имеет согласующиеся между собой показатели для реализации аналогичного сценария.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению статьи. Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН П–28, подпрограмма «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. Comeron and J. Torra, *Astron. and Astrophys.* **261**, 94 (1992).
2. F. Comeron and J. Torra, *Astron. and Astrophys.* **281**, 35 (1994).
3. V. V. Levy, *Astron. Astrophys. Transactions* **18**, 621 (2000).
4. J. F. Wallin, J. L. Higdon, and L. Staveley-Smith, *Astrophys. J.* **459**, 555 (1996).
5. P. Brosche, H.-J. Tucholke, A. R. Klemola, et al., *Astron. J.* **102**, 2022 (1991).
6. R. F. Rees and K. M. Cudworth, *BAAS* **35**, 1219 (2003).
7. D. Vande Putte and M. Cropper, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **392**, 113 (2009).
8. G. M. Salerno, E. Bica, C. Bonatto, and I. Rodrigues, *Astron. and Astrophys.* **498**, 419 (2009).
9. R. de la Fuente Marcos, C. de la Fuente Marcos, and D. Reilly, *Astrophys. and Space Sci.* **349**, 379 (2014).
10. D. Massari, A. Bellini, F. R. Ferraro, et al., *Astrophys. J.* **779**, 81 (2013).
11. L. J. Rossi, S. Ortolani, B. Barbuy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **450**, 3270 (2015).
12. M. Libralato, A. Bellini, L. R. Bedin, et al., *Astrophys. J.* **854**, 45 (2018).
13. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, E. Schilbach, et al., *Astron. and Astrophys.* **558**, A53 (2013).
14. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, E. Schilbach, et al., *Astron. and Astrophys.* **585**, A101 (2016).
15. S. Roeser, M. Demleitner, and E. Schilbach, *Astron. J.* **139**, 2440 (2010).
16. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Astronomy Reports* **61**, 551 (2017).
17. A. Pérez-Villegas, L. Rossi, S. Ortolani, et al., *Publ. Astron. Soc. Australia* **35**, e021 (2018).
18. L. L. Watkins and R. P. van der Marel, *Astrophys. J.* **839**, 89 (2017).
19. D. Massari, L. Posti, A. Helmi, et al., *Astron. and Astrophys.* **598**, L9 (2017).
20. T. M. Brown, S. Casertano, J. Strader, et al., *Astrophys. J. Lett.* **856**, L6 (2018).
21. A. T. Bajkova and V. V. Bobylev, *Astronomy Letters* **42**, 567 (2016).
22. A. Bajkova and V. Bobylev, *Open Astronomy* **26**, 72 (2017).
23. J. F. Navarro, C. S. Frenk, and S. D. M. White, *Astrophys. J.* **490**, 493 (1997).
24. M. Miyamoto and R. Nagai, *Publ. Astron. Soc. Japan* **27**, 533 (1975).
25. J. Palous, B. Jungwiert, and J. Kopecky, *Astron. and Astrophys.* **274**, 189 (1993).
26. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Astronomy Letters* **42**, 228 (2016).
27. C. C. Lin and F. H. Shu, *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).
28. C. C. Lin, C. Yuan, and F. H. Shu, *Astrophys. J.* **155**, 721 (1969).
29. D. Fernández, F. Figueras, and J. Torra, *Astron. and Astrophys.* **480**, 735 (2008).
30. R. Schönrich, J. Binney, and W. Dehnen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **403**, 1829 (2010).
31. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Astronomy Letters* **42**, 1 (2016).
32. J. R. D. Lepine and G. Duvert, *Astron. and Astrophys.* **286**, 60 (1994).
33. C. F. McKee and J. C. Tan, *Nature* **416**, 59 (2002).
34. S. Ortolani, E. Bica, B. Barbuy, and Y. Momany, *Astron. and Astrophys.* **390**, 931 (2002).
35. B. Davies, D. F. Figer, R.-P. Kudritzki, et al., *Astrophys. J.* **671**, 781 (2007).
36. W. S. Dias, H. Monteiro, T. C. Caetano, et al., *Astron. and Astrophys.* **564**, A79 (2014).
37. N. Zacharias, C. T. Finch, T. M. Girard, et al., *Astron. J.* **145**, 44 (2013).
38. A. Bellini, P. Bianchini, A. L. Varri, et al., *Astrophys. J.* **844**, 167 (2017).
39. Gaia Collab., T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al., *Astron. and Astrophys.* **595**, A1 (2016).

Search for Possibly Evolutionary Linked Globular and Open Clusters**V. V. Bobylev and A. T. Bajkova**

Based on a large sample of 133 Galactic globular clusters we obtained a new estimate of the frequency of globular-cluster impacts onto the Galactic plane, which we found to be equal to three events per 1 Myr. Our computations involving new kinematical data do not support the well-known hypothesis about the possible origin of the open cluster Stephenson 2 as a result of the massive globular cluster ω Cen crossing the Galactic disk. Our results also do not support the well-known hypothesis that the globular cluster NGC 6397 could trigger the formation of the open cluster NGC 6231. We found for the first time six globular clusters, which could have triggered the formation of an open cluster when crossing the Galactic plane. These are the globular clusters NGC 104, NGC 2808, NGC 6362, NGC 6540, NGC 6749, and NGC 6752. For each of these clusters we identify one or several open clusters, which were possibly born via such scenario. In our opinion, of greatest interest are the pairs NGC 104—Ruprecht 129, and NGC 6362—Pismis 11.

Keywords: *Galaxy: globular clusters: individual: ω Cen, NGC 6397, NGC 104, NGC 6362—Galaxy: open clusters and associations: individual: Stephenson 2, NGC 6231, Ruprecht 129, Pismis 11*