

ЭВОЛЮЦИОННАЯ СВЯЗЬ МЕЖДУ ШАРОВЫМИ И РАССЕЯННЫМИ СКОПЛЕНИЯМИ ПО ДАНЫМ GAIA DR2

Байкова А.Т., Бобылев В.В.

ГАО РАН

Современная звездная астрономия-2019

● 9 октября ● 2019 ●

ВВЕДЕНИЕ

Пересечение диска Галактики шаровым скоплением (ШС) способно стимулировать процессы звездообразования. При этом может возникать либо т.н. гравитационная фокусировка, либо сильное сжатие вещества в определенном направлении. Согласно Леви (2000), при пролете ШС через галактический диск в газе может возникнуть ударная волна. На основе модели гравитационной фокусировки газа Валлин и др. (1996) пришли к выводу о том, что крупные ОБ-ассоциации могут сформироваться спустя приблизительно 30 Myr после пересечения диска шаровым скоплением.

Броше и др. (1991), по-видимому, впервые поставили вопрос об обнаружении каких-либо наблюдательных последствий пересечения галактического диска двумя шаровыми скоплениями NGC362 и NGC6218. Рис, Кудворт (2003) предложили пару: ШС NGC6397 - РЗС NGC6231, связав пересечение галактического диска шаровым скоплением с последующим образованием в этом месте рассеянного звездного скопления.

Ванде Путте, Кроппер (2009) изучили траектории 54 ШС и нашли, что потенциально перспективными областями поиска являются шаровые скопления NGC3201, NGC6397 и NGC6838, вблизи мест пролета которых располагаются ОБ-ассоциации, возможно образовавшиеся в результате воздействия ШС на диск. Салерно и др. (2009) показали, что пролет сквозь галактический диск шарового скопления ω Cen мог послужить спусковым механизмом для образования рассеянных звездных скоплений Stephenson2 и [BDS2003] 122.

ВВЕДЕНИЕ

422

G. M. Salerno et al.: Massive open clusters generated by ω Centauri?

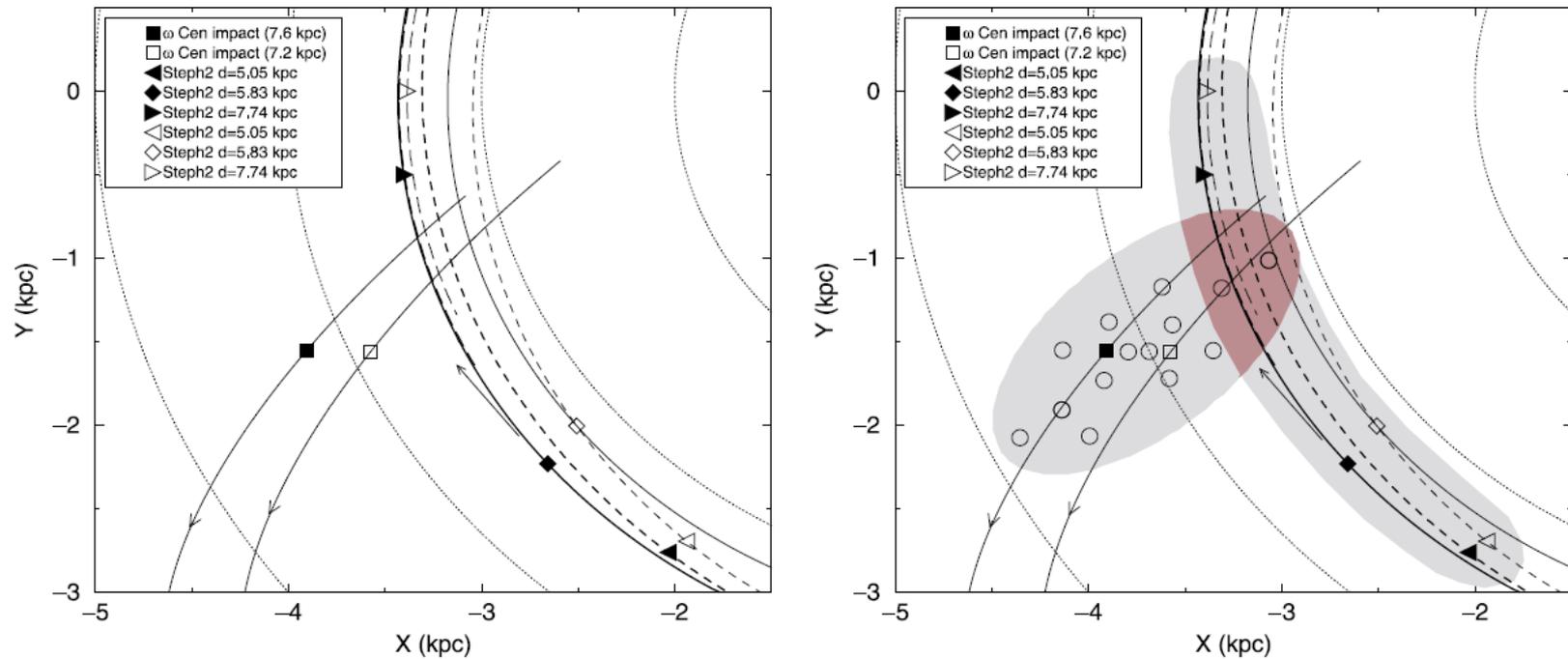


Fig. 4. Close-up of the impact site. *Left panel:* orbits computed with $R_{GC} = 7.2$ kpc (empty symbols) and $R_{GC} = 7.6$ kpc (filled symbols). *Right:* same as left panel but including error distribution for the ω Centauri impact site and Stephenson 2 proto-cluster position. A random selection of impact sites (open circles) is shown within the ω Centauri error ellipsoid.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

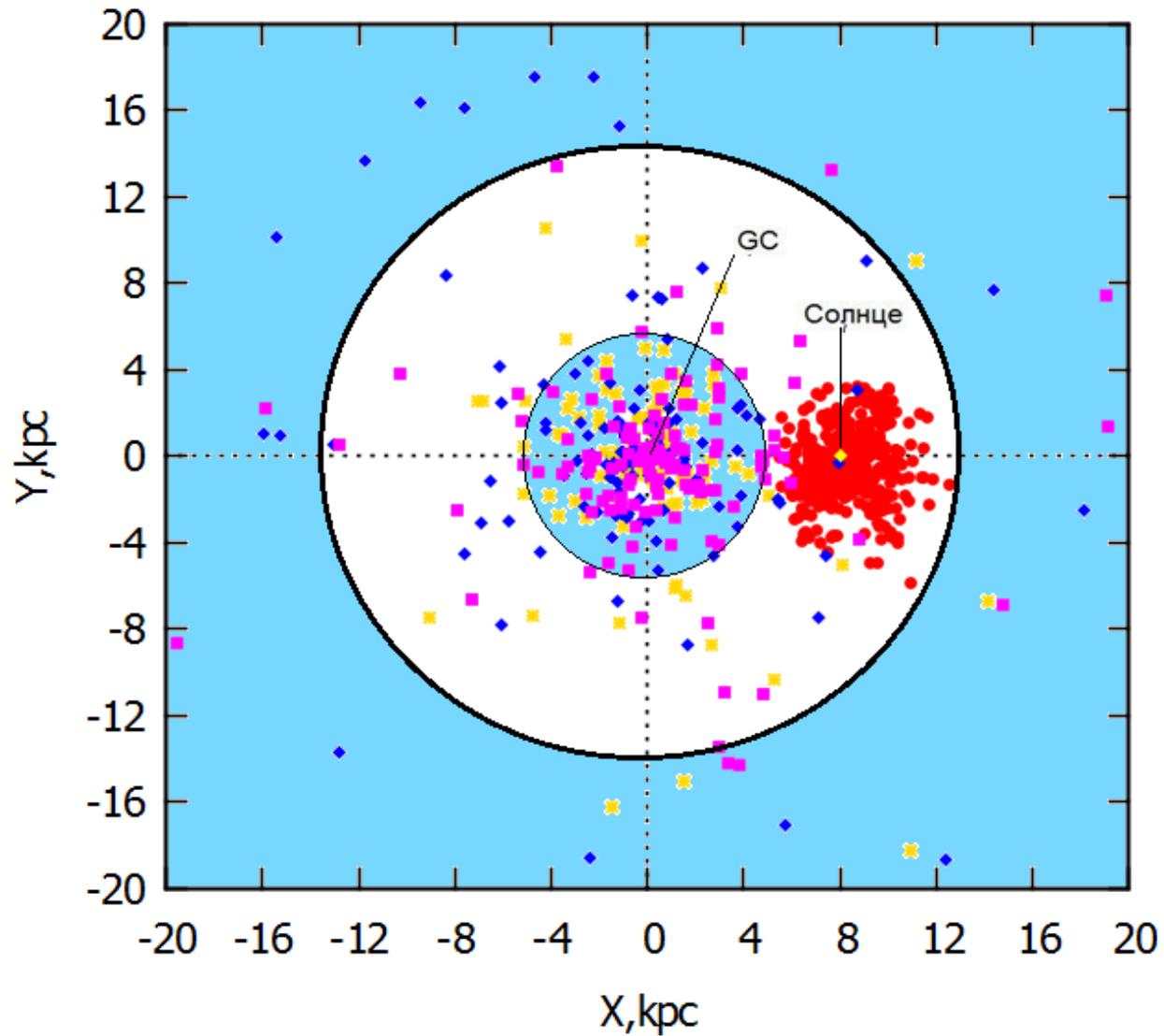
Целью настоящей работы является оценка частоты пролета шаровых скоплений через плоскость Галактики с использованием метода численного интегрирования орбит в наиболее реалистичной модели потенциала Галактики, учитывающей вклады как от осесимметричных компонент (балдж, диск, гало), так и бара и спиральной 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, спровоцированных пролетом через него ШС.

ДААННЫЕ

В качестве источника данных о шаровых скоплениях используем каталог Васильева (E. Vasiliev, MNRAS, 2018), в котором содержатся сведения о положениях, собственных движениях и лучевых скоростях 150 шаровых скоплений Галактики. Вывод средних значений собственных движений каждого ШС в этом каталоге был осуществлен по данным каталога Gaia DR2 (2018).

В качестве источника данных о рассеянных скоплениях используем каталог Кантат-Гудина и др. (Cantat-Gaudin T. et al., A&A, 618, 93, 2018), где средние значения собственных движений и параллаксов РЗС вычислены по данным каталога Gaia DR2.

Распределение ШС и РЗС в проекции на галактическую плоскость XY



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

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

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

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

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

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

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]:

$$\Phi_{bar} = -\frac{M_{bar}}{(q_b^2 + X^2 + [Y a_b/b_b]^2 + [Z a_b/c_b]^2)^{1/2}}, \quad (7)$$

где $X = R \cos \vartheta$, $Y = R \sin \vartheta$, a_b, b_b, c_b — три полуоси бара, q_b — длина бара; $\vartheta = \theta - \Omega_{bar} t - \theta_{bar}$, $tg(\theta) = Y/X$, Ω_{bar} — круговая скорость бара, t — время интегрирования, θ_{bar} — 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. Значение круговой скорости бара $\Omega_{bar} = 55$ км/с/кпк мы взяли согласно оценке [26].

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

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

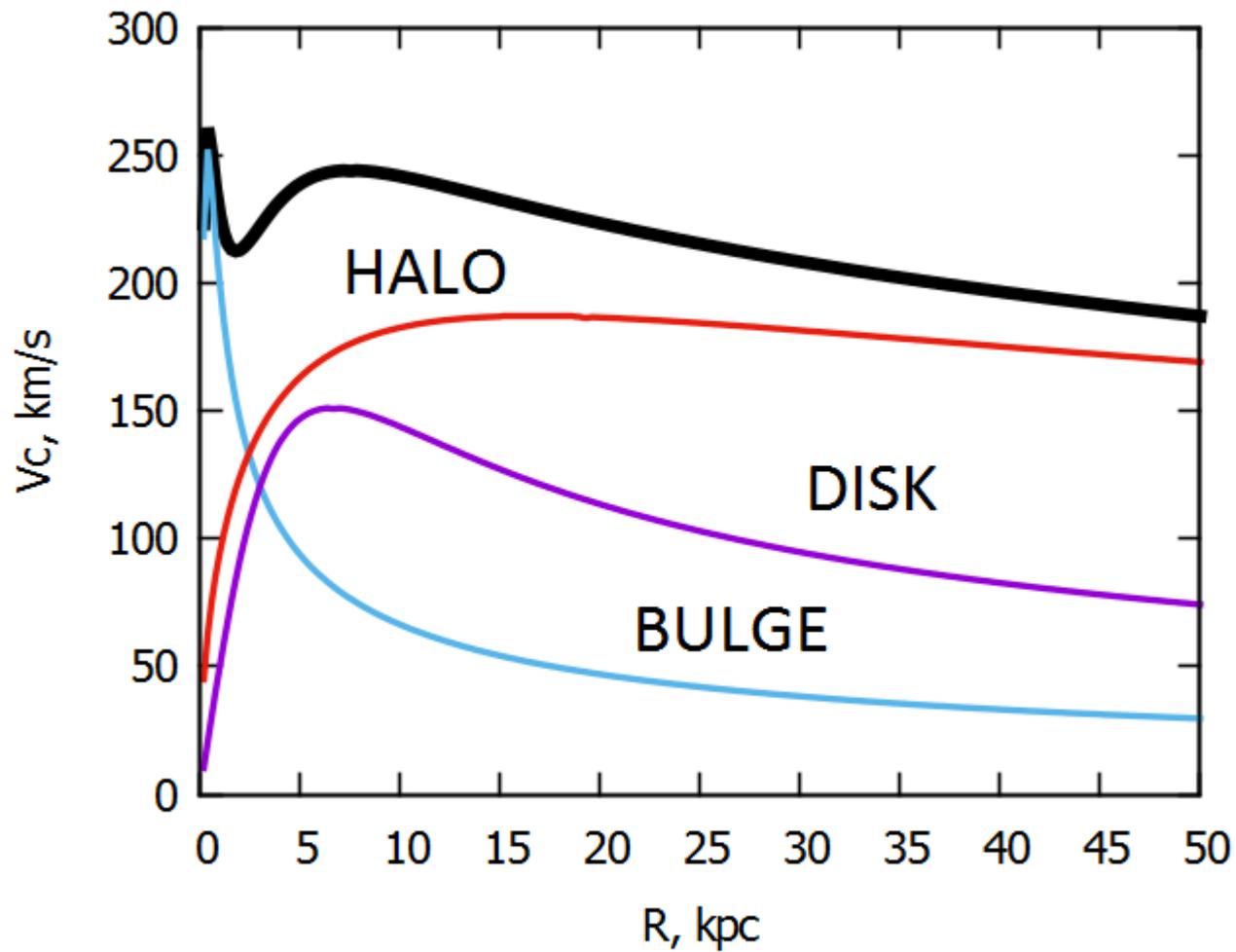
где

$$A = \frac{(R_0 \Omega_0)^2 f_{r0} \tan i}{m}, \quad \chi(R) = -\frac{m}{\tan i} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) + \chi_{\odot},$$

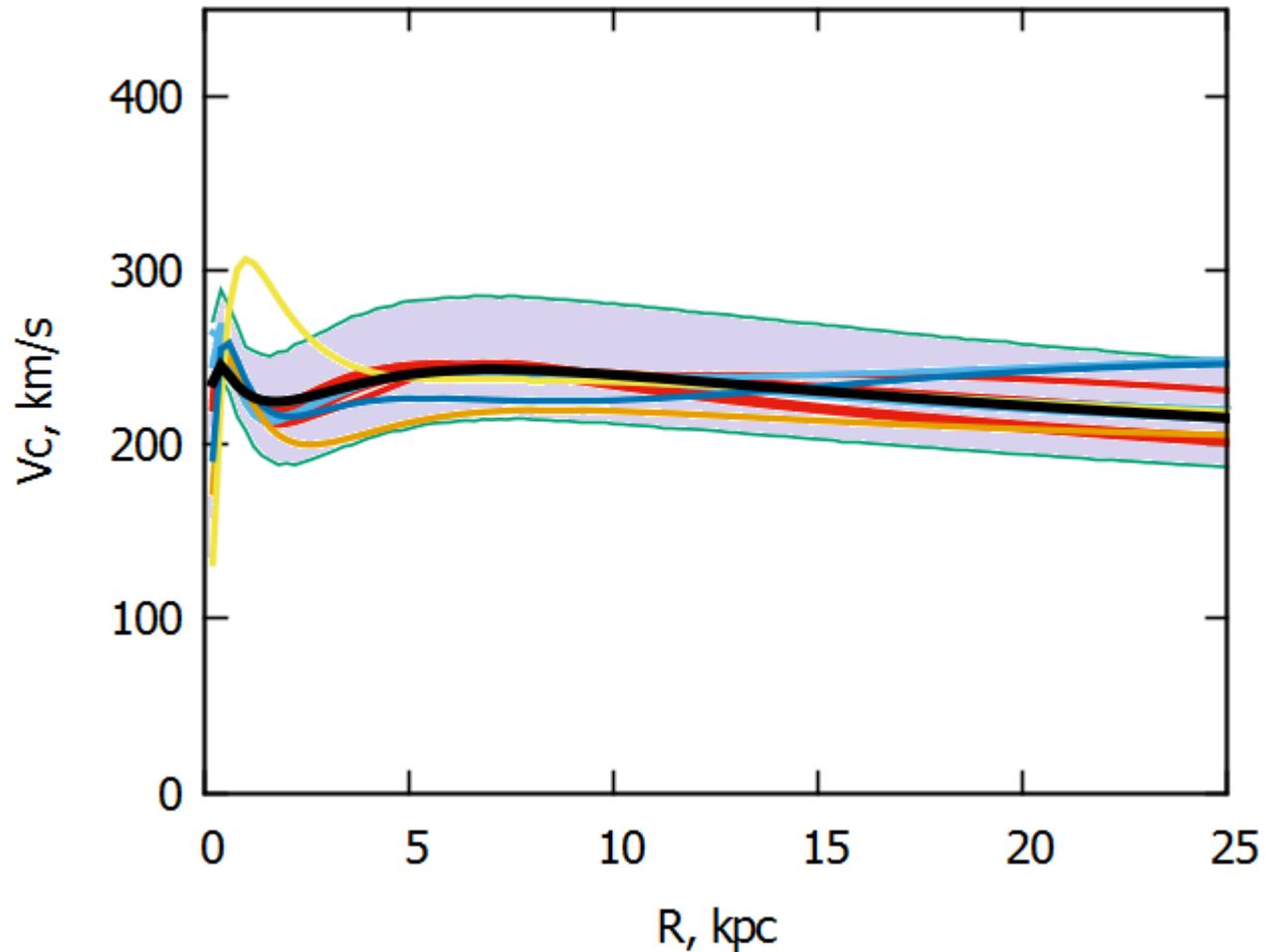
здесь A — амплитуда потенциала спиральной волны, f_{r0} — отношение между радиальной составляющей возмущения от спиральных рукавов и общим притяжением Галактики, Ω_p — угловая скорость твердотельного вращения волны, m — количество спиральных рукавов, i — угол закрутки рукавов, для закручивающегося узора $i < 0$, 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:

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

Осесимметричный потенциал Галактики



Кривая вращения Галактики с доверительной областью, соответствующей уровню 1σ



Построение галактической орбиты на примере ШС ω Cen

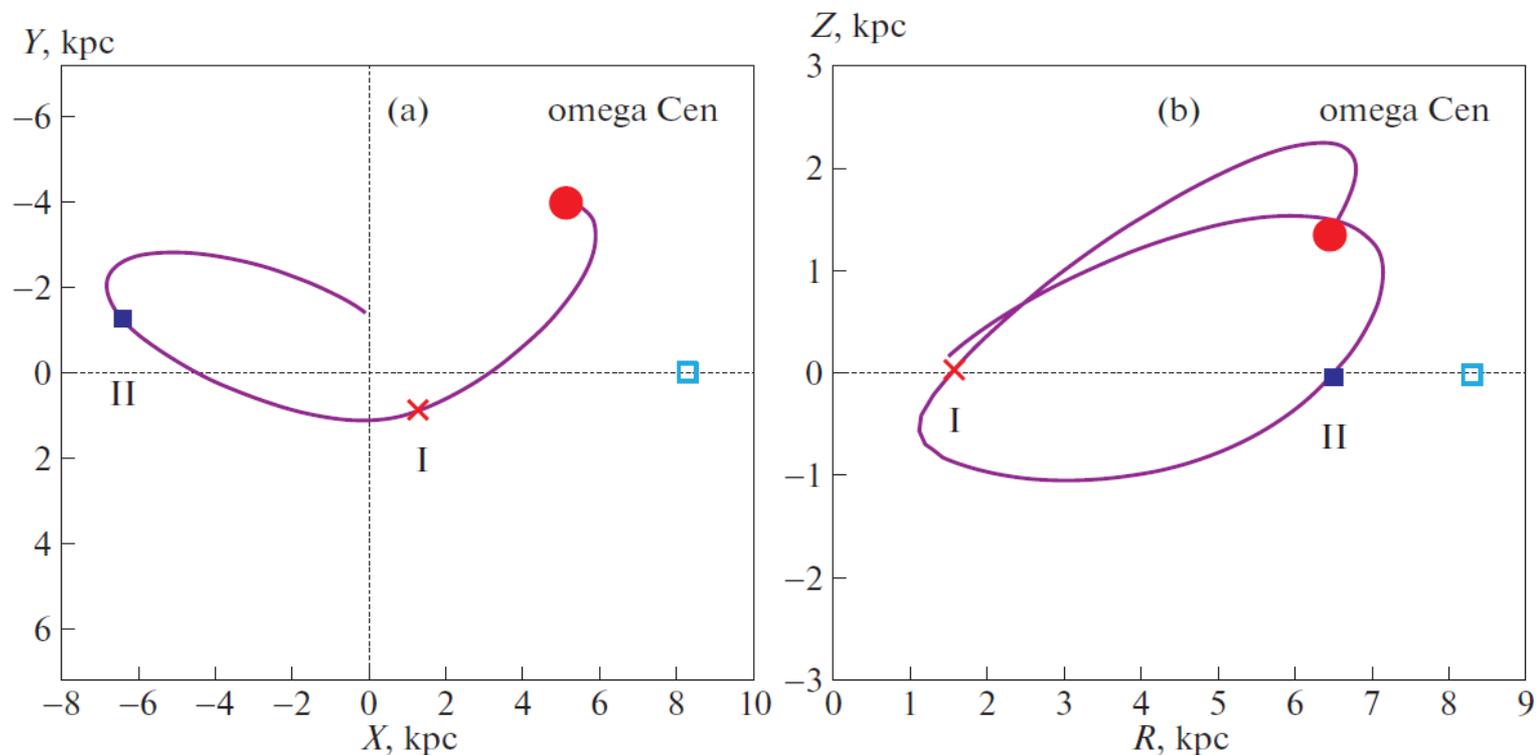


Fig. 1. Проекция орбиты шарового скопления ω Cen на галактическую плоскость XY (а) и на сопутствующую плоскость RZ (б), орбита построена на интервале 130 млн лет в прошлое с использованием модели осесимметричного потенциала, центр Галактики лежит в начале системы координат, квадратом отмечено положение Солнца, косыми крестами и римскими цифрами отмечены моменты пересечения галактической плоскости, современное положение ω Cen отмечено серым кружком.

Оценка частоты ударов ШС о диск Галактики

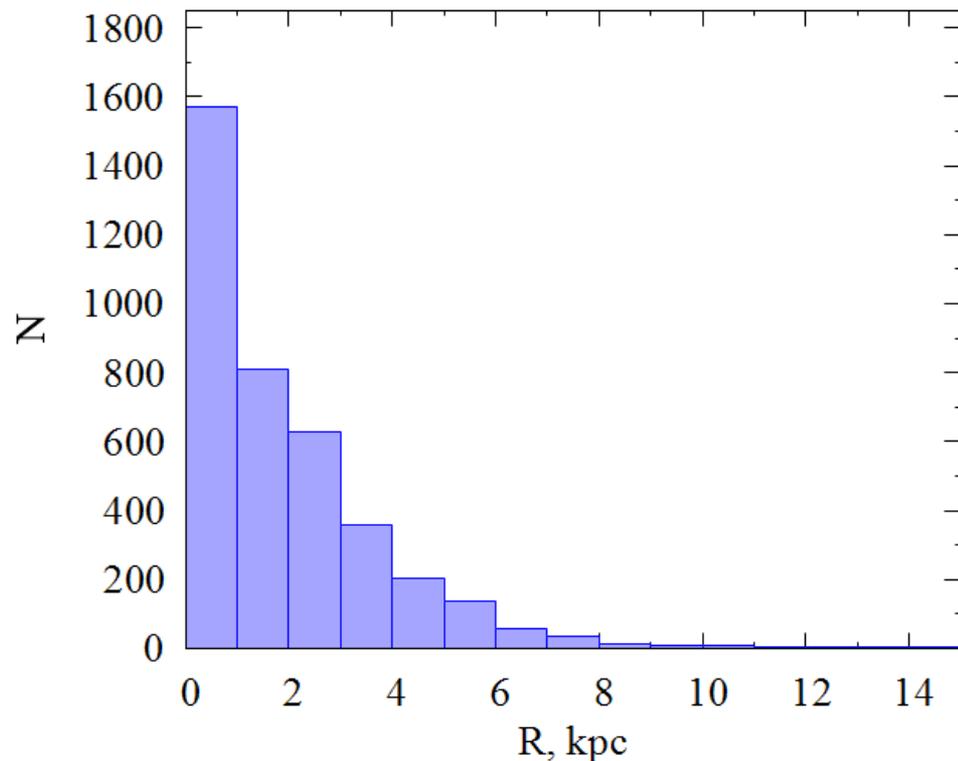


Fig. 2. Гистограмма числа пересечений галактической плоскости ХУ шаровыми скоплениями за последний миллиард лет, по оси абсцисс отложено расстояние до оси вращения Галактики, R. В среднем получается 4 события в млн лет.

Временные характеристики звездообразования

Ясно, что должно пройти определенное время после удара ШС о галактическую плоскость прежде чем образуются звезды. Следуя Ванде Путте, Кропшеру [36], мы будем опираться на следующее соотношение:

$$t = t_C + t_{SF} + t_A, \quad (10)$$

где t — время, прошедшее после пересечения ШС галактического диска вплоть до настоящего момента, t_C — время, прошедшее после пересечения и началом звездообразования, t_{SF} — продолжительность звездообразования, t_A — возраст сформировавшегося объекта (пояса Гулда, в частности).

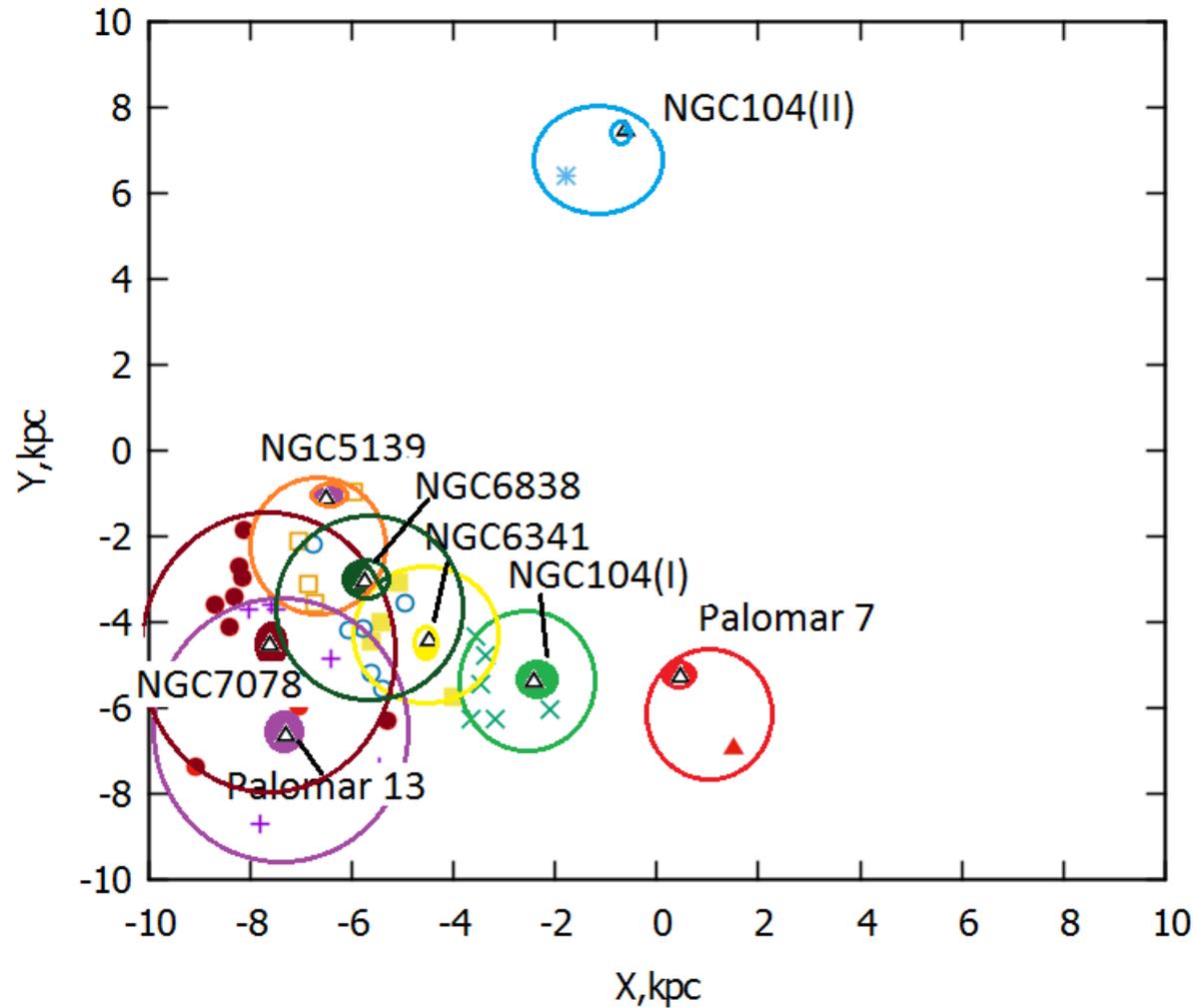
Конкретное значение первого слагаемого в формуле (10) известно с большой неопределенностью, и заключено в интервале 0–30 млн лет. Например, $t_C = 15$ млн лет, согласно оценке [14], которая получена при моделировании падения высокоскоростного облака на диск. По мнению Валлина и др. [37], значение этого отрезка времени составляет $t_C = 30$ млн лет. В модельных расчетах Бекки [18] значение отрезка времени, отведенного на звездообразование, заключено в интервале $t_C = 7–15$ млн лет. Значение второго слагаемого, согласно [38] составляет $t_{SF} = 0.2$ млн лет (для звезды с массой $M > M_\odot$), которое мало по сравнению с другими членами, поэтому этим слагаемым при первых грубых оценках можно пренебречь.

Параметры выделенных кандидатов на сближения в прошлом

Table 2. Parameters of GC–OC pairs with a possible evolutionary coupling according to Gaia DR2 data.

| GC | OC | Δr_t (kpc) in ASGP | Δr_t (kpc) in NASGP | t backwards (Myr) in ASP | t_A (Myr) | $t - t_A$, (Myr) | N_{cr} |
|------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------|----------|
| NGC 104 | NGC 5606 | 1.16 | 1.37 | 51.5 | 22.4 | 29.1 | I |
| NGC 104 | NGC 6396 | 1.61 | 0.94 | 51.5 | 32.0 | 19.5 | I |
| NGC 104 | Ruprecht 127 | 1.18 | 0.74 | 51.5 | 35.5 | 16.0 | I |
| NGC 104 | Turner 3 | 0.73 | 0.63 | 51.5 | 28.8 | 22.7 | I |
| NGC 104 | Lynga 6 | 1.52 | 1.62 | 51.5 | 28.2 | 23.3 | I |
| NGC 104 | vdBergh-Hagen 202 | 1.10 | 1.15 | 51.5 | 39.8 | 11.7 | I |
| Palomar 13 | NGC 433 | 1.87 | 1.83 | 93.5 | 64.6 | 28.9 | I |
| Palomar 13 | NGC 7654 | 1.51 | 1.51 | 93.5 | 79.4 | 14.1 | I |
| NGC 5139 | NGC 6520 | 0.95 | 0.67 | 81.5 | 56.9 | 24.6 | II |
| NGC 5139 | Trumpler 17 | 0.68 | 0.65 | 81.5 | 59.6 | 21.9 | II |
| NGC 6341 | NGC 6613 | 1.44 | 0.59 | 61.5 | 50.7 | 10.8 | II |
| NGC 6341 | Ruprecht 127 | 1.51 | 1.63 | 61.5 | 35.5 | 26.0 | II |
| NGC 6341 | Ruprecht 164 | 1.29 | 1.16 | 61.5 | 50.1 | 11.4 | II |
| NGC 6341 | vdBergh-Hagen 202 | 1.17 | 1.64 | 61.5 | 39.8 | 21.7 | II |
| Palomar 7 | NGC 6910 | 1.96 | 1.80 | 53.5 | 33.9 | 19.6 | II |
| NGC 6838 | NGC 6520 | 1.25 | 0.79 | 71.5 | 56.9 | 14.6 | II |
| NGC 6838 | NGC 6613 | 1.18 | 0.63 | 71.5 | 50.7 | 20.8 | II |
| NGC 6838 | Ruprecht 164 | 1.26 | 1.47 | 71.5 | 50.1 | 21.4 | II |
| NGC 6838 | Trumpler 17 | 0.99 | 1.09 | 71.5 | 59.6 | 11.9 | II |
| NGC 7078 | Basel 8 | 1.49 | 0.68 | 101.5 | 84.1 | 17.4 | II |
| NGC 7078 | NGC 7654 | 1.49 | 0.62 | 101.5 | 79.4 | 22.1 | II |
| NGC 7078 | Trumpler 2 | 1.38 | 1.18 | 101.5 | 84.1 | 17.4 | II |
| NGC 7078 | ASCC 113 | 1.72 | 1.33 | 101.5 | 85.1 | 16.4 | II |
| NGC 7078 | NGC 7063 | 0.96 | 0.50 | 101.5 | 90.2 | 11.3 | II |
| NGC 6760 | Ruprecht 127 | 0.71 | 0.48 | 64.5 | 35.5 | 29.0 | III |
| NGC 6760 | vdBergh-Hagen 202 | 1.85 | 1.32 | 64.5 | 39.8 | 24.7 | III |

Подтверждена идея о возможности образования целых ассоциаций

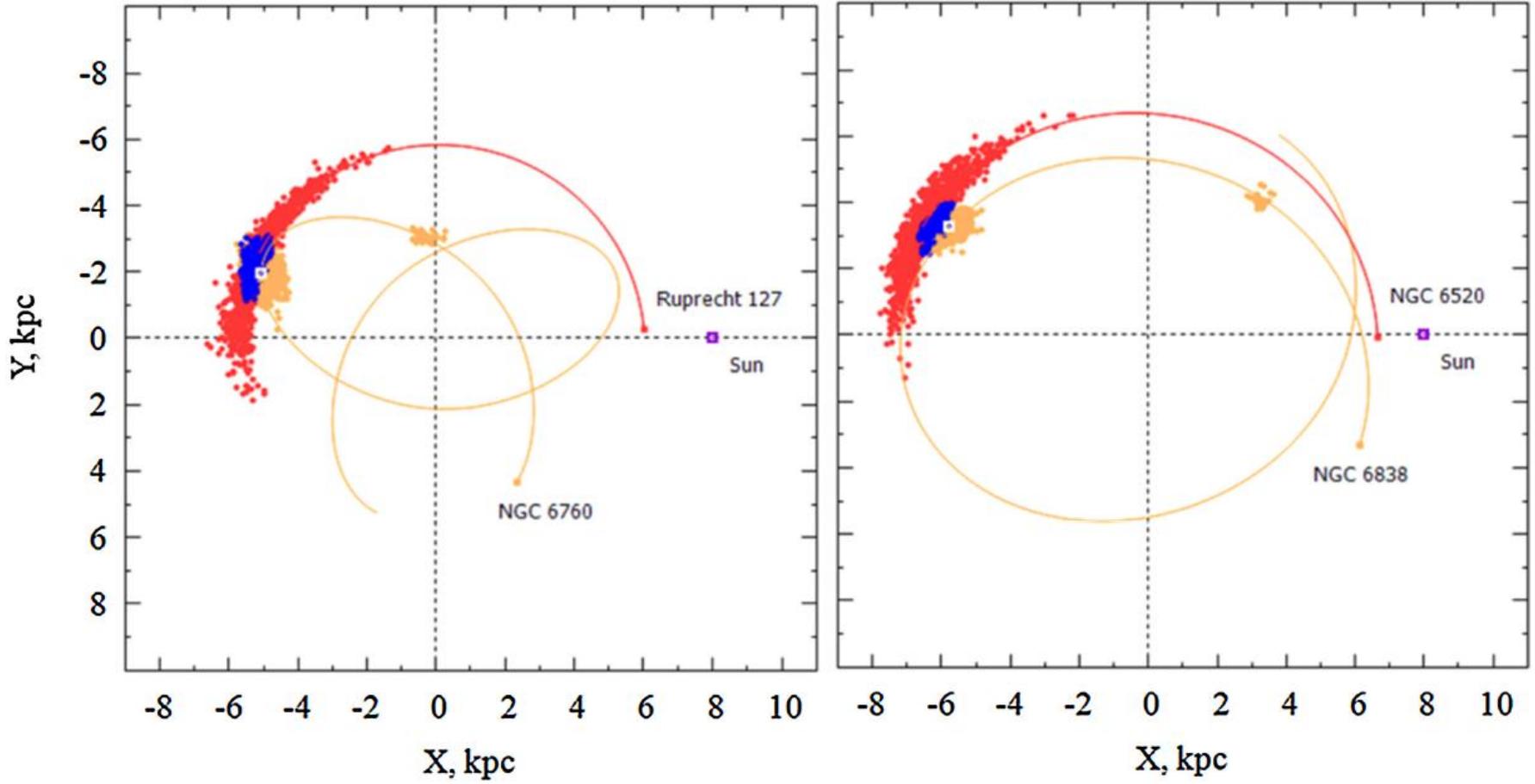


NGC104
NGC5139
NGC6341
NGC6838
NGC7078
Palomar 13

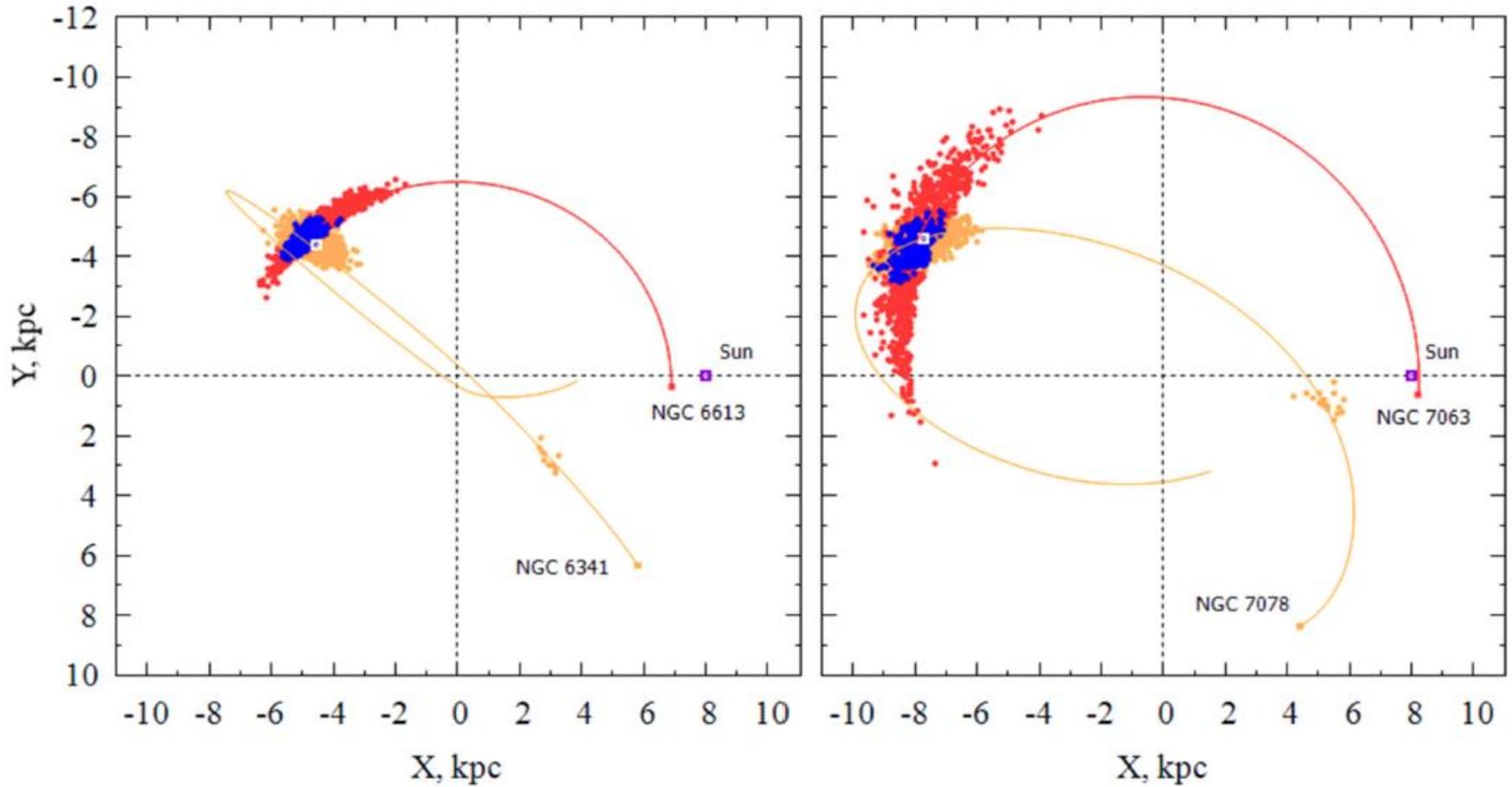
Параметры 9 пар у которых обнаружены наиболее тесные (менее 1 кпк) сближения

| GC | OC | Δr_t (kpc) | t backwards (Myr) | t_A (Myr) | $t - t_A$ (Myr) | ϕ_{cr} (deg) | V_{cr} (km s ⁻¹) | Mass of GC (10 ⁶ M _⊙) | Relative impact energy of GC | P |
|----------|--------------|-----------------------|------------------------|----------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|---|---------------------------------|------|
| NGC 104 | Turner 3 | 0.63 | 51.5 | 28.8 | 22.7 | 34 | 173 | 0.78 | 0.0500 | 0.51 |
| NGC 104 | NGC 6396 | 0.94 | 51.5 | 32.0 | 19.5 | 34 | 166 | 0.78 | 0.0480 | 0.33 |
| NGC 104 | Ruprecht 127 | 0.74 | 51.5 | 35.5 | 16.0 | 34 | 166 | 0.78 | 0.0480 | 0.33 |
| NGC 5139 | Trumpler 17 | 0.65 | 83.5 | 59.6 | 23.9 | 39 | 353 | 3.55 | 1.0000 | 0.33 |
| NGC 5139 | NGC 6520 | 0.67 | 83.5 | 56.9 | 26.6 | 39 | 319 | 3.55 | 0.8200 | 0.21 |
| NGC 6341 | NGC 6613 | 0.59 | 62.5 | 50.7 | 11.8 | 34 | 327 | 0.33 | 0.0800 | 0.51 |
| NGC 6838 | NGC 6520 | 0.79 | 73.5 | 56.9 | 16.6 | 12 | 73 | 0.05 | 0.0006 | 0.15 |
| NGC 6760 | Ruprecht 127 | 0.48 | 64.5 | 35.5 | 29.0 | 19 | 137 | 0.25 | 0.0100 | 0.33 |
| NGC 7078 | NGC 7063 | 0.50 | 102.5 | 90.2 | 12.3 | 35 | 393 | 0.80 | 0.2800 | 0.30 |

NGC 6760(III) – Ruprecht 127; NGC 6838 – NGC 6520



NGC 6341(II) – NGC 6613; NGC 7078 – NGC 7063



ВЫВОДЫ

Получена новая оценка частоты ударов ШС о диск Галактики. Эта оценка составляет 4 события за 1 миллион лет. Показано, что большинство этих ударов произошло в центральной области Галактического диска.

Найдены параметры следующих 9 пар ШС – РЗС с возможной эволюционной связью, показывающие максимальное сближение (<1 кпк) за последние 100 млн лет в уточненной нами модели гравитационного потенциала NFW, с баром и спиральной волной плотности, на основе данных Gaia DR2: NGC 104 – Turner 3, NGC 104 – Ruprecht 127, NGC 104 – NGC 6396, NGC 5139 – Trumpler 17, NGC 5139 – NGC 6520, NGC 6341 – NGC 6613, NGC 6838 – NGC 6520, NGC 7078 – NGC 7063, NGC 6760 – Ruprecht 127.

ВЫВОДЫ

Для всех этих пар методом Монте-Карло была получена вероятность возникновения РЗС вследствие удара ШС о диск Галактики. Максимальная вероятность, равная 0.51, определена для пар NGC 104 – Turner 3 и NGC 6341 – NGC 6613.

Шаровое скопление NGC 5139 (ω Cen) показывает максимальную энергию удара в парах с рассеянными скоплениями Trumpler 17 и NGC 6520.

Vajkova, Bobylev, MNRAS 488, 3474 (2019)

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!