

УДК 524.47-17

О ПРОБЛЕМАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗВЕЗД В ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЯХ К ИХ ЦЕНТРУ

© 2024 С. Ж. Тураев^{1*}, С. Н. Нуриддинов^{1**}, А. С. Расторгуев^{2,3***}, И. У. Таджибаев^{4****}

¹Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Ташкент, 100174 Узбекистан

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

³Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

⁴Чирчикский государственный педагогический университет, Чирчик, 111700 Узбекистан

Поступила в редакцию 2 августа 2023 года; после доработки 10 ноября 2023 года; принята к публикации 15 ноября 2023 года

В этой работе мы анализируем данные наблюдений видимой поверхностной плотности 81 шарового скопления, предоставленные Gaia DR2. Обсуждаются проблемы анализа этих наблюдений и их отличия от аналогичных данных, полученных с помощью HST. На основании результатов этого анализа качества данных наблюдений и ряда физических соображений мы делим шаровые скопления на три класса и затем рассматриваем вопросы моделирования видимой поверхностной плотности от расстояния. Симплектическим методом минимизации найдены значения свободных параметров модели. При этом свободные параметры, в том числе параметр концентрации, впервые находятся с помощью предложенной нами четырехпараметрической обобщенной модели.

Ключевые слова: шаровые скопления — методы: анализ данных — методы: численные

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день идентифицировано 157 шаровых скоплений (ШС) звезд, но далеко не для всех из них выполнены наблюдения поверхностной плотности с помощью космических телескопов. Ранее, до XXI века, очень много работ по изучению структурных параметров ШС было выполнено на основе наземных телескопов (см., например, статьи Grillmair et al. (1995), Lehmann and Scholz (1997), Testa et al. (2000)) с использованием фотопластинок. Однако, поскольку внутренняя плотность ШС сильно возрастает по мере приближения к центру, при помощи наземных наблюдений очень трудно изучать их центральную область (Carballo-Bello et al., 2012). В редких случаях удается проводить достаточно полные наблюдения поверхностной плотности лишь отдельных ШС (Di Sacco et al., 2013). По состоянию на 2013 г. космические данные наблюдений поверхностной плотности выполнены только для 26 ШС в рамках программы HST (Miocchi et al., 2013). К 2019 г. наблюдения поверхностной плотности для 81 ШС были предоставлены Gaia DR2 (de Voer

et al., 2019). В работе Nuritdinov et al. (2021) даны результаты обработки космических данных наблюдений для 26 ШС и впервые решена проблема Шепли–Сойер классификации ШС (Shapley and Sawyer, 1927). Nuritdinov et al. (2021) использовали симплекс-метод минимизации суммы квадратов разности «наблюдение – модель» для данных Miocchi et al. (2013) и определили значения параметра, характеризующего степень концентрации звезд к центру ШС. На основе этих результатов им впервые удалось классифицировать ШС по параметру концентрации звезд к их центру и найти эмпирические формулы зависимости основных наблюдаемых характеристик ШС от данного параметра.

В настоящей работе мы анализируем данные наблюдений поверхностной плотности 81 ШС, полученные в рамках проекта Gaia DR2¹. Подробно обсуждены проблемы анализа данных наблюдений этих ШС и основные различия между результатами Gaia DR2 и HST. Так, нам удалось разделить 81 ШС, наблюдаемые с помощью Gaia DR2, на три класса и определить корреляции параметра концентрации с основными наблюдаемыми характеристиками ШС. Отметим, что данные наблюдений ШС, предоставленные Gaia DR2, требуют более

*E-mail: sobr8488@mail.ru

**E-mail: nur200848@mail.ru

***E-mail: alex.rastorguev@gmail.com

****E-mail: tadj_ikram@mail.ru

¹www.cosmic-lab.eu/catalog/

сложной модели, чем в работе Nuritdinov et al. (2021). Вот почему мы были вынуждены рассмотреть четырехпараметрическую модель, в которой имеется также параметр концентрации звезд к центру ШС. Таким путем мы обнаружили хорошие корреляции параметра концентрации λ со следующими характеристиками ШС: с радиусом ядра ШС (r_c), параметром Кинга (c), плотностью в центре ($\lg \rho_{r_c} [M_\odot \text{pc}^{-3}]$), временем релаксации ($\lg t_c$) и r^* , связанным с радиусом ядра скоплений r_c .

2. ОСНОВНЫЕ РАЗЛИЧИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ GAIA DR2 И HST

Считается, что концентрация звезд в ШС равномерно возрастает по направлению к центру. Однако некоторые ШС, наблюдаемые Gaia DR2, имеют очень неравномерный профиль плотности по направлению к центру. Это видно на примере NGC 7492 (рис. 1). Эта ситуация создает серьезные трудности при определении степени концентрации ШС.

Кроме того, центральные части многих ШС, наблюдаемых с помощью Gaia DR2, просматриваются плохо. Большинство ШС имеют профили плотности, начинающиеся не от центра, а, как минимум, с расстояния, где $\lg(r'') \approx 0.4$. Мы видим это, например, у NGC 6121 в сравнении с профилем NGC 6934 (рис. 2).

Наблюдения поверхностной плотности ШС, полученные вышеуказанными двумя космическими телескопами, очевидно, сильно различаются. Ниже мы отметим имеющиеся основные различия. Двадцать конкретных ШС наблюдались как Gaia DR2, так и HST. Профили поверхностной плотности большинства этих ШС, полученные с разных космических телескопов, явно различаются по звездным величинам. Они показывают, что видимая плотность звезд в ряде скоплений, изученных HST (например, в NGC 5024), почти в 10 раз больше, чем указанная в Gaia DR2 (рис. 3а). Эта разница может не оказывать сильного влияния на значение нашего параметра концентрации в расчетах, но серьезно влияет на значения других свободных параметров теоретической модели.

Кроме того, значения профиля плотности для отдельных ШС, найденные в рамках Gaia DR2, ведут себя явно неравномерно и даже как бы скачкообразно, тогда как аналогичные значения плотности для тех же ШС, наблюдаемые HST, возрастают довольно равномерно. Это отличие показано на примере NGC 6809 (рис. 3б). Отметим, что эти различия в профилях плотности ШС (в частности, указанные здесь «прогибы» плотности) можно легко объяснить, если сравнить инструментальные характеристики космических телескопов HST и

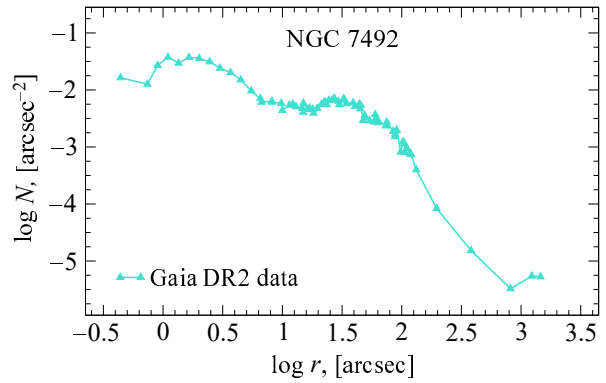


Рис. 1. Данные наблюдений $\sigma - \lg(r'')$ скопления Gaia DR2: NGC 7492.

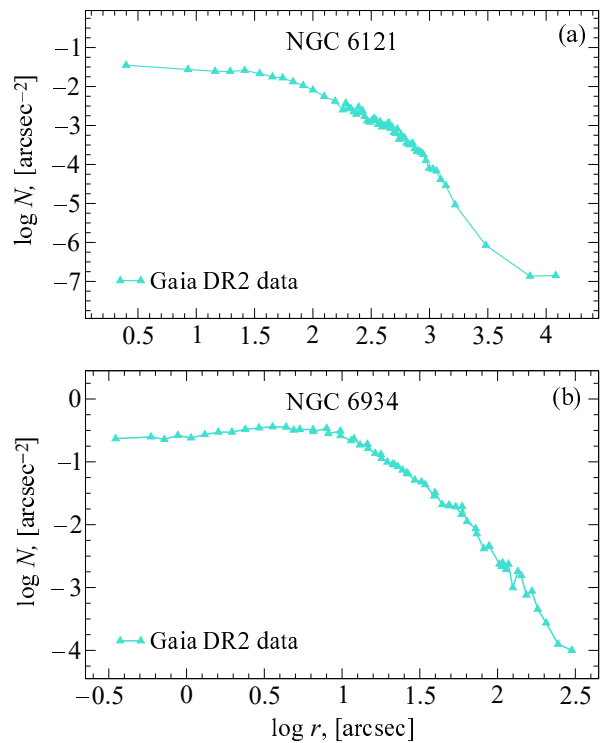


Рис. 2. Разность данных наблюдений Gaia для NGC 6121 и NGC 6934 для r'' .

Gaia DR2. Наконец, следует учесть также тот факт, что фотометрический предел HST более глубокий по сравнению с обзорами Gaia. Следовательно, можно сделать вывод, что качество наблюдений поверхностной плотности Gaia DR2 намного ниже по сравнению с наблюдениями HST. На основании этого мы делим ШС, наблюдаемые Gaia DR2, на следующие классы:

- 1) ШС, имеющие сильные и явно заметные колебания профиля плотности в центральной области, а также случаи, когда данные для центральной части отсутствуют (IC 1276,

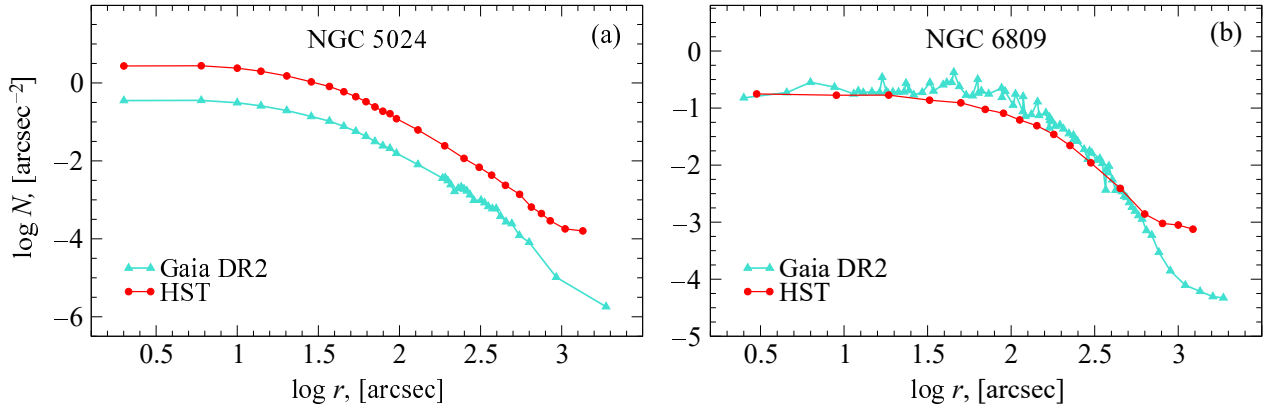


Рис. 3. Разница между профилями плотности, полученными по наблюдениям Gaia (треугольники) и HST (кружки) для NGC 5024 (a) и NGC 6809 (b).

NGC 5053, NGC 6144, NGC 7492, Pal 1, Pal 11, Pal 12, Terzan 8, NGC 4590, Pal 8);

- 2) скопления, имеющие «прогибы» и падение плотности к центру или весьма далекие от центра начальные точки наблюдения (NGC 5466, NGC 5986, NGC 6121, NGC 6229, NGC 6341, NGC 6637, NGC 6864, NGC 6934, NGC 7089);
- 3) ШС с равномерным увеличением концентрации к центру и хорошо наблюдаемой центральной частью (45 ШС).

Как видно, только те ШС, которые входят в последнюю группу, заслуживают определения для них значений параметра концентрации.

3. ПОИСК ПОДХОДЯЩЕЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА НАБЛЮДЕНИЙ GAIA DR2

В работе Nuritdinov et al. (2021) выполнено обобщение известной модели Кинга (King, 1966) и предложено следующее:

$$\sigma(r, \gamma, r^*, \sigma_0) = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{r}{r^*} \right)^2 \right]^{-\gamma}. \quad (1)$$

Здесь γ , r^* и σ_0 — свободные параметры: γ — концентрация звезд по направлению к центру ШС, r^* — значение, связанное с радиусом ядра скопления r_c , σ_0 — поверхностная плотность в центре.

Для нахождения значений свободных параметров в модели (1) Nuritdinov et al. (2021) использовали симплекс-метод (Ashurov and Nuritdinov, 2001) минимизации функции:

$$F(\gamma, r^*, \sigma_0) = \sum_k [\sigma(r, \gamma, r^*, \sigma_0) - \sigma_{\text{obs}}^k]^2, \quad (2)$$

где σ_{obs}^k — наблюдаемые плотности в кольцах вокруг центра скопления.

Таким образом, были рассчитаны значения свободных параметров для 26 ШС, наблюдаемых с помощью HST. Ими были получены хорошие корреляции между γ и основными физическими параметрами, известными из наблюдений. Значения γ найдены в интервале (0.67; 2.13), и этот интервал с целью классификации ШС был разделен на четыре класса: класс a — наиболее плотные (0.67; 0.9), класс b — плотные (0.9; 1.15), класс c — умеренно разреженные (1.15; 1.4), класс d — разреженные (1.4; 2.13).

С помощью указанного выше метода мы сначала вычислили свободные параметры модели (1), используя профили плотности ШС, полученные Gaia DR2.

Таким образом, профили плотности ШС, наблюдаемые HST², достаточно хорошо согласуются с моделью (1). Однако, как показывает анализ, профили плотности ШС, найденные по данным Gaia DR2, намного хуже описываются этой моделью. В частности, эта модель несовместима с внешней частью ШС. Это видно на примере NGC 6121 (рис. 4).

Эта ситуация требует поиска другой, более подходящей модели для анализа наблюдений поверхностной плотности ШС, полученных с помощью Gaia DR2. Анализ поверхностных плотностей ШС, наблюдаемых Gaia DR2, показывает, что более целесообразно брать обобщенную модель в виде

$$\sigma(r, \lambda_1, \lambda_2, r^*, \sigma_0) = \sigma_0 \left(\frac{r}{r^*} \right)^{-\lambda_1} \left(1 + \frac{r}{r^*} \right)^{-\lambda_2}. \quad (3)$$

При $\lambda_1 = \lambda_2 = 2$ мы имеем модель Jaffe (1983), если $\lambda_1 = 1$, а $\lambda_2 = 3$ — модель Hernquist (1990). Случай $\lambda_1 = 1$, но $\lambda_2 = 2$ соответствует модели Navarro et al. (1996).

²<https://gea.esac.esa.int/archive/>

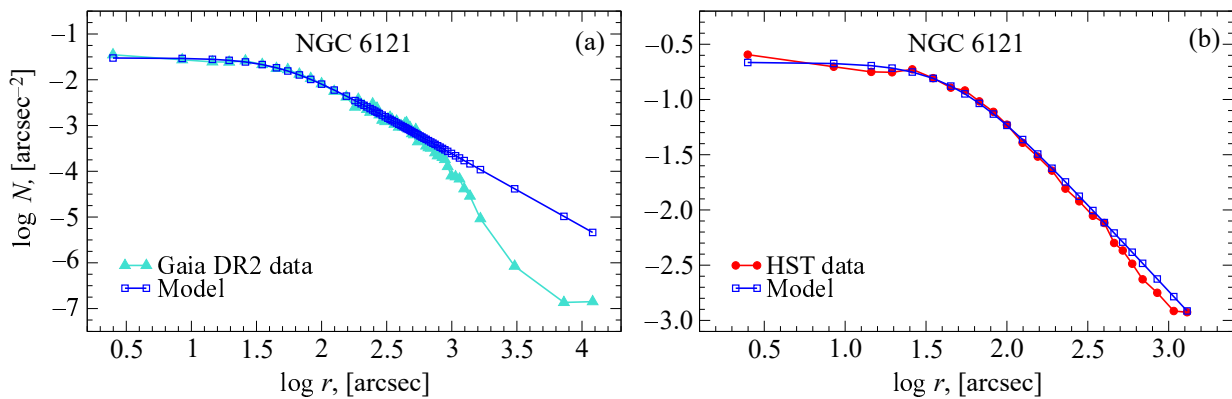


Рис. 4. Данные наблюдений Gaia и HST для NGC 6121. Профили плотности ШС по наблюдениям HST хорошо описываются моделью (1), в то время как для внешней части согласие данных Gaia с моделью плохое.

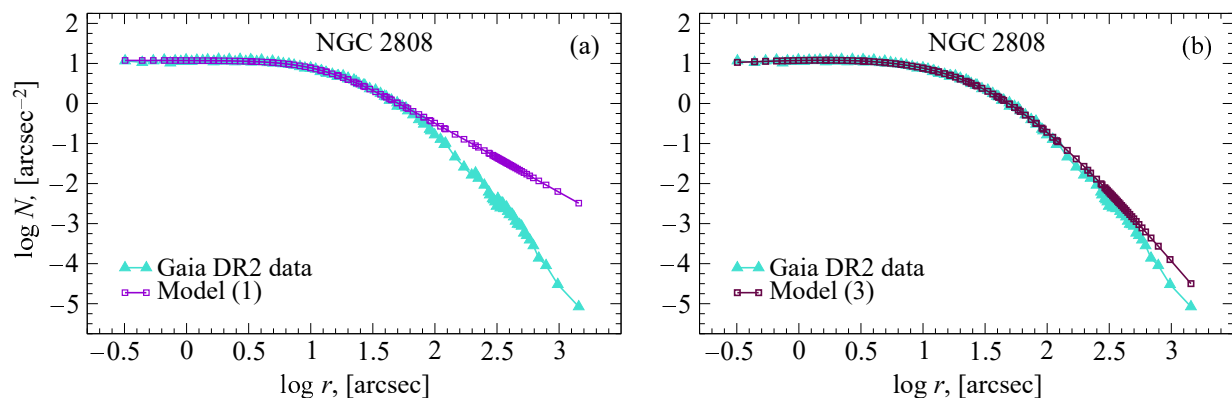


Рис. 5. Совместимость данных поверхностной плотности NGC 2808, полученных по наблюдениям с помощью Gaia DR2, с моделью (1) (a) и моделью (3) (b).

Теперь степень концентрации звезд в ШС будет характеризоваться величиной $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$. При сравнении модели (3) с профилями плотности ШС мы имеем лучшее согласие, чем с (1), что можно видеть на примере NGC 2808 (рис. 5).

4. РАСЧЕТ СВОБОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

В модели (3) мы имеем четыре свободных параметра: $\lambda_1, \lambda_2, r^*, \sigma_0$. Симплектическим методом эти свободные параметры находятся с помощью минимизации функции

$$F(\lambda_1, \lambda_2, r^*, \sigma_0) = \sum_k [\sigma(r, \lambda_1, \lambda_2, r^*, \sigma_0) - \sigma_{\text{obs}}^k]^2.$$

Значения свободных параметров, найденные с помощью минимизации по данным наблюдений, приведенным de Boer et al. (2019), представлены в таблице 1. Как видно из этой таблицы, средние значения λ_i равны: $\langle \lambda_1 \rangle = -0.24$, $\langle \lambda_2 \rangle = 3.57$.

По данным наблюдений ШС, полученных с помощью Gaia DR2, мы обнаружили корреляцию

параметра концентрации λ с такими физическими характеристиками, как параметр Кинга (c), радиус ядра (r_c), время релаксации ($\lg t_c$), центральная звездная плотность в ядре ($\lg \rho_{r_c} [M_\odot \text{pc}^{-3}]$) и r^* , связанный с радиусом ядра скоплений (r_c). Значения параметра Кинга, радиуса ядра и времени релаксации взяты из каталога Harris (2010). Значения центральной плотности взяты из каталога Baumgardt and Hilker (2018).

На рис. 6 показаны зависимости параметра концентрации λ с основными физическими характеристиками ШС. Ниже мы приводим эти эмпирические зависимости с указанными физическими параметрами.

Найдено, что коэффициент корреляции между λ и $\lg \rho_{r_c} [M_\odot \text{pc}^{-3}]$ равен $cc = -0.69$. Эмпирическая формула имеет вид:

$$\lambda = -0.72(\pm 0.15) \lg \rho_{r_c} + 6.44(\pm 0.67), \quad (4)$$

$$\lg \rho_{r_c} = -0.51(\pm 0.11)\lambda + 5.99(\pm 0.41). \quad (5)$$

Таблица 1. Свободные параметры модели (3)

ШС	λ_1	λ_2	r^*	σ_0	λ	ШС	λ_1	λ_2	r^*	σ_0	λ
NGC 1851	-0.08	2.54	7.86	33	2.46	NGC 6273	0.32	2.63	25.37	3.42	2.95
NGC 1904	-0.14	3.85	23.5	3.85	3.71	NGC 6293	-0.07	1.06	0.89	3.62	0.99
NGC 2808	0.15	3.84	38	22.97	3.99	NGC 6325	-2.68	3.97	0.26	2.69	1.29
NGC 288	0.19	6	310.5	0.33	5.8	NGC 6333	-0.42	4.61	47.1	22	4.19
NGC 3201	-0.26	3.67	140.8	2.73	3.41	NGC 6341	-0.43	1.98	7.6	6.7	1.55
NGC 362	-0.04	3.06	16.7	25	3.1	NGC 6388	-0.07	2.45	12.85	2.98	2.38
NGC 4147	-1.07	2.77	1.23	6.11	1.7	NGC 6397	-0.3	1.23	1.76	2.09	0.93
NGC 5024	-0.29	3.56	41	1.02	3.27	NGC 6402	0.21	3.98	104.6	0.66	4.19
NGC 5053	-0.27	6.9	214	0.19	6.63	NGC 6426	-0.61	2.37	8.91	0.16	1.76
NGC 5272	-0.01	3.6	77	1.78	3.59	NGC 6541	0.02	2.19	18.2	3.35	2.21
NGC 5286	-0.17	5.95	68.7	3.25	5.79	NGC 6569	-0.27	4.74	51.4	0.25	4.47
NGC 5634	0.80	2.49	1.6	4.2	3.29	NGC 6584	-0.06	1.19	4.73	1.28	1.13
NGC 5694	-0.42	2.9	3.93	4.05	2.48	NGC 6624	-0.47	1.75	1.06	6.33	1.28
NGC 5824	-0.13	4.4	11.17	12.43	4.27	NGC 6652	-0.32	2.2	3.62	7.11	1.89
NGC 5897	-0.29	10.18	503	0.25	8.89	NGC 6681	-0.38	1.63	0.85	14.2	1.25
NGC 5904	-0.05	3.65	72.28	2.86	3.6	NGC 6715	-0.14	4.72	21.1	8.13	4.58
NGC 6093	-0.3	3.54	13.31	19.19	3.24	NGC 6723	-0.35	3.69	69.8	1.63	3.34
NGC 6101	-0.19	4.85	190	0.12	4.66	NGC 6752	0.00	2.24	23.8	7.92	2.24
NGC 6121	0.04	0.03	407	0.19	5.48	NGC 6981	-0.83	4.07	21.38	2.00	3.24
NGC 6139	-0.46	2.4	6.85	0.46	1.94	NGC 7006	-0.54	8.79	45.6	1.9	8.25
NGC 6205	0.06	4.4	162.4	1.88	4.1	NGC 7078	0.07	1.36	4.36	17.2	1.43
NGC 6218	0.32	2.1	275	0.23	2.42	NGC 7089	-0.06	2.97	32.6	6	2.91
NGC 6254	-0.12	5.73	179.8	0.87	5.61	NGC 7099	-0.49	1.87	1.74	18.5	1.38
NGC 6266	0.23	1.84	6.94	5.95	2.07						

Коэффициент корреляции между λ и параметром Кинга $cc = -0.68$. Соответствующие эмпирические формулы таковы:

$$\lambda = -2.61(\pm 0.44)c + 7.71(\pm 0.78), \quad (6)$$

$$c = -0.12(\pm 0.03)\lambda + 2.11(\pm 0.12). \quad (7)$$

Обнаружена корреляция между λ и радиусом ядра, причем $cc = 0.63$, и между ними существует линейно пропорциональная связь. Эмпирические формулы таковы:

$$\lambda = 2.2(\pm 0.5)r_c + 2.36(\pm 0.31), \quad (8)$$

$$r_c = 0.13(\pm 0.03)\lambda - 0.02(\pm 0.01). \quad (9)$$

Между λ и временем релаксации ($\lg t_c$) существует корреляция ($cc = 0.69$). Эмпирические формулы:

$$\lambda = 0.83(\pm 0.17) \lg t_c - 3.13(\pm 1.33), \quad (10)$$

$$\lg t_c = 0.42(\pm 0.08)\lambda + 6.41(\pm 0.32). \quad (11)$$

Кроме того, имеется хорошая корреляция параметра концентрации с величиной r^* , значения которой найдены нами методом минимизации, причем в данном случае $cc = 0.69$. Здесь получены нами следующие эмпирические формулы:

$$\lambda = 0.012(\pm 0.002)r^* + 2.47(\pm 0.23), \quad (12)$$

$$r^* = 40.7(\pm 6.2)\lambda - 65.5(\pm 23.4). \quad (13)$$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами показано, что точность данных наблюдений Gaia DR2 поверхностной плотности ШС существенно меньше от точности аналогичных данных, полученных HST. В частности, упоминаемые выше наблюдаемые «прогибы» плотности можно объяснить различиями инструментальных характеристик космических телескопов HST и Gaia DR2. При анализе наблюдательных данных Gaia DR2 с использованием модели (1) были обнаружены слабые корреляции параметра концентрации с основными

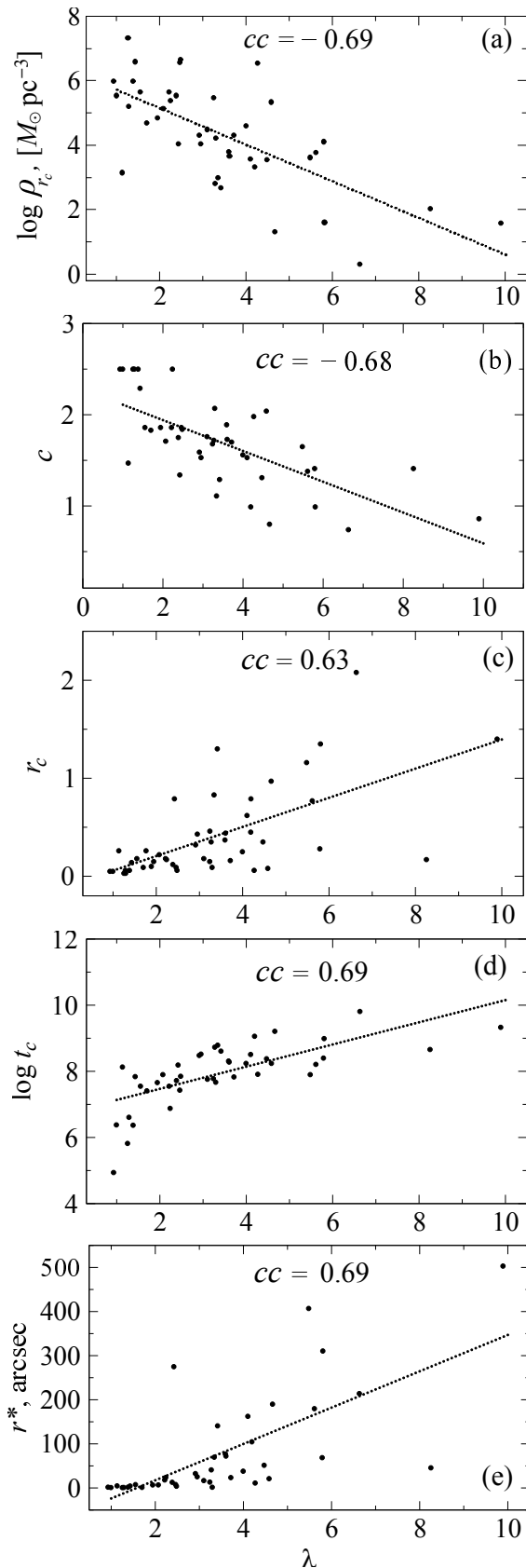


Рис. 6. Диаграммы зависимости между параметром концентрации λ и физическими характеристиками ШС ($\lg \rho_{r_c} [M_{\odot} \text{pc}^{-3}]$, c , r_c , $\lg t_c$, r^*).

физическими характеристиками. Поэтому в данной работе нами предложена обобщенная модель (3) для анализа данных наблюдений Gaia DR2. На основании поведения профиля плотности ШС по данным Gaia DR2 мы разделили рассмотренные 81 ШС на 3 класса. Были найдены корреляции параметра концентрации с другими физическими характеристиками, в том числе с параметром Кинга c , радиусом ядра r_c , временем релаксации $\lg t_c$, центральной плотностью ШС ($\lg \rho_{r_c} [M_{\odot} \text{pc}^{-3}]$) и r^* , связанным с радиусом ядра скоплений (r_c). На основании результатов этого анализа можно классифицировать ШС аналогично тому, как в работе Nuritdinov et al. (2021).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность рецензенту за ценные замечания, которые позволили нам существенно улучшить текст и содержание статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках гранта, финансируемого Агентством инновационного развития Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Ashurov and S. Nuritdinov, ASP Conf. Ser. **228**, 371 (2001). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0104038
2. H. Baumgardt and M. Hilker, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **478** (2), 1520 (2018). DOI:10.1093/mnras/sty1057
3. J. A. Carballo-Bello, M. Gieles, A. Sollima, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **419** (1), 14 (2012). DOI:10.1111/j.1365-2966.2011.19663.x
4. T. J. L. de Boer, M. Gieles, E. Balbinot, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **485** (4), 4906 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz651
5. A. Di Cecco, A. Zocchi, A. L. Varri, et al., Astron. J. **145** (4), article id. 103 (2013). DOI:10.1088/0004-6256/145/4/103
6. C. J. Grillmair, K. C. Freeman, M. Irwin, and P. J. Quinn, Astron. J. **109**, 2553 (1995). DOI:10.1086/117470
7. W. E. Harris, arXiv e-prints astro-ph:1012.3224 (2010). DOI:10.48550/arXiv.1012.3224

8. L. Hernquist, *Astrophys. J.* **356**, 359 (1990). DOI:10.1086/168845
9. W. Jaffe, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **202**, 995 (1983). DOI:10.1093/mnras/202.4.995
10. I. R. King, *Astron. J.* **71**, 276 (1966). DOI:10.1086/109918
11. I. Lehmann and R. D. Scholz, *Astron. and Astrophys.* **320**, 776 (1997).
12. P. Miocchi, B. Lanzoni, F. R. Ferraro, et al., *Astrophys. J.* **774** (2), article id. 151 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/774/2/151
13. J. F. Navarro, C. S. Frenk, and S. D. M. White, *Astrophys. J.* **462**, 563 (1996). DOI:10.1086/177173
14. S. N. Nuritdinov, I. U. Tadjibaev, and A. S. Rastorguev, *Astronomy Letters* **47** (3), 163 (2021). DOI:10.1134/S106377372103004X
15. H. Shapley and H. B. Sawyer, *Harvard College Observatory Bulletin* **849**, 11 (1927).
16. V. Testa, S. R. Zaggia, S. Andreon, et al., *Astron. and Astrophys.* **356**, 127 (2000). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0002280

Problems of Determining the Degree of Star Concentration Towards the Center of Globular Clusters

S. J. Turaev¹, S. N. Nuritdinov¹, A. S. Rastorguev^{2,3}, and I. U. Tadjibaev⁴

¹National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent, 100174 Uzbekistan

²Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

³Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

⁴Chirchik State Pedagogical University, Chirchik, 111700 Uzbekistan

In this paper, we analyze the apparent surface density observations of 81 globular clusters provided by Gaia DR2. The problems of analyzing these observations and their differences from similar data obtained using the HST are discussed. Based on the results of this analysis of the quality of observational data and a number of physical considerations, we separate globular clusters into three classes and then consider the issues of modeling the apparent surface density versus distance. The values of the free parameters of the model are found by the symplectic minimization method. The free parameters including the concentration parameter are for the first time found using the 4-parameter generalized model we propose.

Keywords: *globular clusters—methods: data analysis—methods: numerical*