

О МАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫРАХ В ЦЕНТРАХ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ. I

© 2025 г. С. Н. Нуритдинов^{1,*}, С. Ж. Тураев^{1,**}, К. Т. Миргаджиева^{1,2,***}

¹Кафедра астрономии и астрофизики НУУз, Узбекистан, Ташкент

²Астрономический институт АН РУз, Узбекистан, Ташкент

*e-mail: nur200848@mail.ru

**e-mail: sobr8488@mail.ru

***e-mail: mkt1959@mail.ru

Поступила в редакцию 31.07.2024 г.

После доработки 04.10.2024 г.

Принята к публикации 14.10.2024 г.

В работе создана выборка шаровых скоплений (ШС), для которых из наблюдений известны значения массы черных дыр в их центрах. Изучена зависимость основных характеристик ШС от значений массы черных дыр. На основе наблюдательных данных о поверхностной плотности ШС определена степень концентрации звезд к их центру. Полученная степень концентрации использована как индикатор присутствия черных дыр.

Ключевые слова: центральные черные дыры, шаровые скопления, параметр концентрации звезд к центру, поверхностные плотности скоплений

DOI: 10.31857/S0004629925020036, EDN: GHMMGK

1. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе приведены результаты поиска возможной зависимости основных физических характеристик ШС от масс центральных черных дыр промежуточной массы (ЧДПМ), значения которых находятся в интервале 10^2 – $10^6 M_{\odot}$, расположенном между черными дырами звездной массы и сверхмассивными черными дырами (СМЧД) в центрах галактик [1, 2]. Заметим, что выявление ЧДПМ из наблюдений является сложной задачей, использующей надежные методы, связанные с движением различных “пробных” тел вблизи их центра, а также ряд спектральных методов измерения ширины линий излучения и поглощения.

Опубликованные к настоящему времени статьи о массах ЧДПМ можно разделить по методу определения их значений на две группы. В первую группу входят работы, в которых значения массы ЧДПМ определены из наблюдательных данных (см., напр., [3–8] и ссылки там), а во второй можно отнести статьи, где массы ЧДПМ определены путем численного моделирования ШС (см., напр., [9–11]). Поскольку нас интересует только наблюдаемые значения ЧДПМ, мы не будем останавливаться на статьях, связанных со второй группой опубликованных работ.

В данной работе создана выборка ШС с надежно известными значениями масс ЧДПМ. На основе этих данных найдены корреляции между массами ЧДПМ и значениями основных характери-

стик ШС, включая определенный нами параметр концентрации звезд к центру скопления.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Анализируя литературу, мы, прежде всего, интересовались найденными значениями масс ЧДПМ, полученными на основе наблюдений. При этом большинство значений масс ЧДПМ были определены [3, 4, 12–21] путем экстраполяции имеющейся зависимости между дисперсией скоростей звезд балджа и массой СМЧД галактик [22, 23]. Кроме того, некоторые из этих авторов использовали также фотометрические и/или кинематические методы определения массы ЧДПМ. В результате выяснилось, что в настоящее время значения масс ЧДПМ известны всего лишь для 16 ШС. Эти значения приведены в табл. 1. Отметим, что во многих работах из этого списка отсутствует анализ погрешностей определения найденных значений масс, и поэтому мы их не приводим.

Далее, нас интересуют корреляции значений масс центральных ЧДПМ в ШС, приведенных в табл. 1, с их основными физическими характеристиками. Начнем с параметра концентрации звезд к центру.

Параметр концентрации мы определили по данным наблюдений профилей поверхностной плотности скоплений, полученных в рамках GAIA DR2 [24], с использованием модели Нукера–Джаффе [25, 26]:

Таблица 1. Значения масс для 16 ЧДПМ

Название	$\log(M_{\bullet}/M_{\odot})$	Ссылка
NGC 104	3.362	[16]
NGC 1851	3.000	[12]
NGC 1904	3.477	[17]
NGC 2808	4.000	[12]
NGC 5139	4.699	[17]
NGC 5286	3.591	[18]
NGC 6093	3.204	[3]
NGC 6121	2.903	[19]
NGC 6266	3.301	[15]
NGC 6388	3.755	[14]
NGC 6397	2.778	[20]
NGC 6441	3.068	[11]
NGC 6715	3.973	[4]
NGC 6752	3.000	[5]
NGC 7078	3.000	[5]
Pal 2	2.301	[12]

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

Здесь σ_0 , r^* , λ_1 и λ_2 — свободные параметры, причем σ_0 — центральная поверхностная плотность скопления, r^* характеризует радиус ядерной области ШС так же, как в модели Кинга, $\sigma \sim \left(1 + \left(\frac{r}{r^*}\right)^2\right)^{-1}$. Очевидно, величина $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ имеет смысл параметра концентрации звезд к центру ШС. Свободные параметры модели (1) находим путем минимизации функции (см. напр., [27])

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

которая описывает поведение суммы квадратов разности между теоретическими, σ , и наблюдаемыми, $\sigma_{\text{obs}}^{(k)}$, значениями плотности в кольцах вокруг

центра скопления в соответствии с профилями, полученными Gaia DR2 [24]. Минимизацию выражения (2) проводим, используя стандартную программу симплектического метода, которая уже давно хорошо апробирована во многих задачах астрофизики. Как видно из табл. 2, значения параметра концентрации λ расположены в интервале [0.93, 6.42]. Значения r^* даны в угловых секундах.

3. ПОИСК ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

С точки зрения физики и эволюции ШС представляет большой интерес расчет зависимости основных физических характеристик ШС от массы ЧДПМ. Коэффициент корреляции, например, между значением массы центральных ЧДПМ и параметром концентрации λ оказался

Таблица 2. Вычисленные значения свободных параметров модели (1)

Параметры	λ	r^*	σ_0
NGC 104	1.10	11.26	2.95
NGC 1851	2.66	7.77	33.23
NGC 1904	3.71	23.50	3.85
NGC 2808	3.99	38.00	22.97
NGC 5139	6.42	912.70	1.43
NGC 5286	5.79	68.70	3.28
NGC 6093	3.24	13.31	19.19
NGC 6121	3.84	101.89	0.06
NGC 6266	2.07	6.95	5.95
NGC 6388	2.38	12.85	2.98
NGC 6397	0.93	1.76	2.09
NGC 6441	3.87	44.95	76.05
NGC 6715	4.58	21.08	8.13
NGC 6752	2.24	23.79	7.29
NGC 7078	1.43	4.36	17.23
Pal 2	1.04	11.37	1.24

равным $cc = 0.72$, а соответствующая эмпирическая формула найдена нами в следующем виде:

$$\log(M_{\bullet}/M_{\odot}) = 0.25(\pm 0.06)\lambda + 2.56(\pm 0.22). \quad (3)$$

Диаграмма зависимости параметра концентрации от массы ЧДПМ приведена на рис. 1.

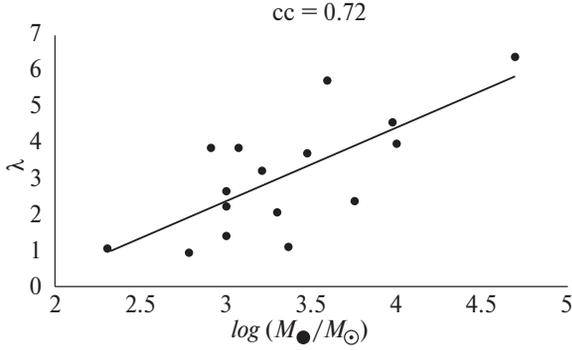


Рис. 1. Диаграмма зависимости параметра концентрации от массы ЧДПМ

Из рисунка можно сделать вывод о том, что значение параметра концентрации растет с увеличением массы центральной ЧДПМ. Нами впервые обнаружена данная связь с параметром концентрации ШС. Массы центральных ЧДПМ, определенные по наблюдениям для 16 скоплений, оказывается, имеют хорошие корреляции с массой скопления, индексом Кукаркина, абсолютной звездной величиной, центральной концентрацией скопления, дисперсией скоростей и скоростями убегания. Значения перечисленных физических характеристик ШС взяты из каталогов [28, 29]. На рис. 2 представлены зависимости масс ЧДПМ от основных физических характеристик ШС. Корреляции и эмпирические формулы приведены ниже.

Корреляция между значением массы центральных ЧДПМ в ШС и индексом Кукаркина IR равна $cc = 0.66$, а эмпирическая формула есть

$$\log(M_{\bullet}/M_{\odot}) = 1.91(\pm 0.45)IR + 2.15(\pm 0.66). \quad (4)$$

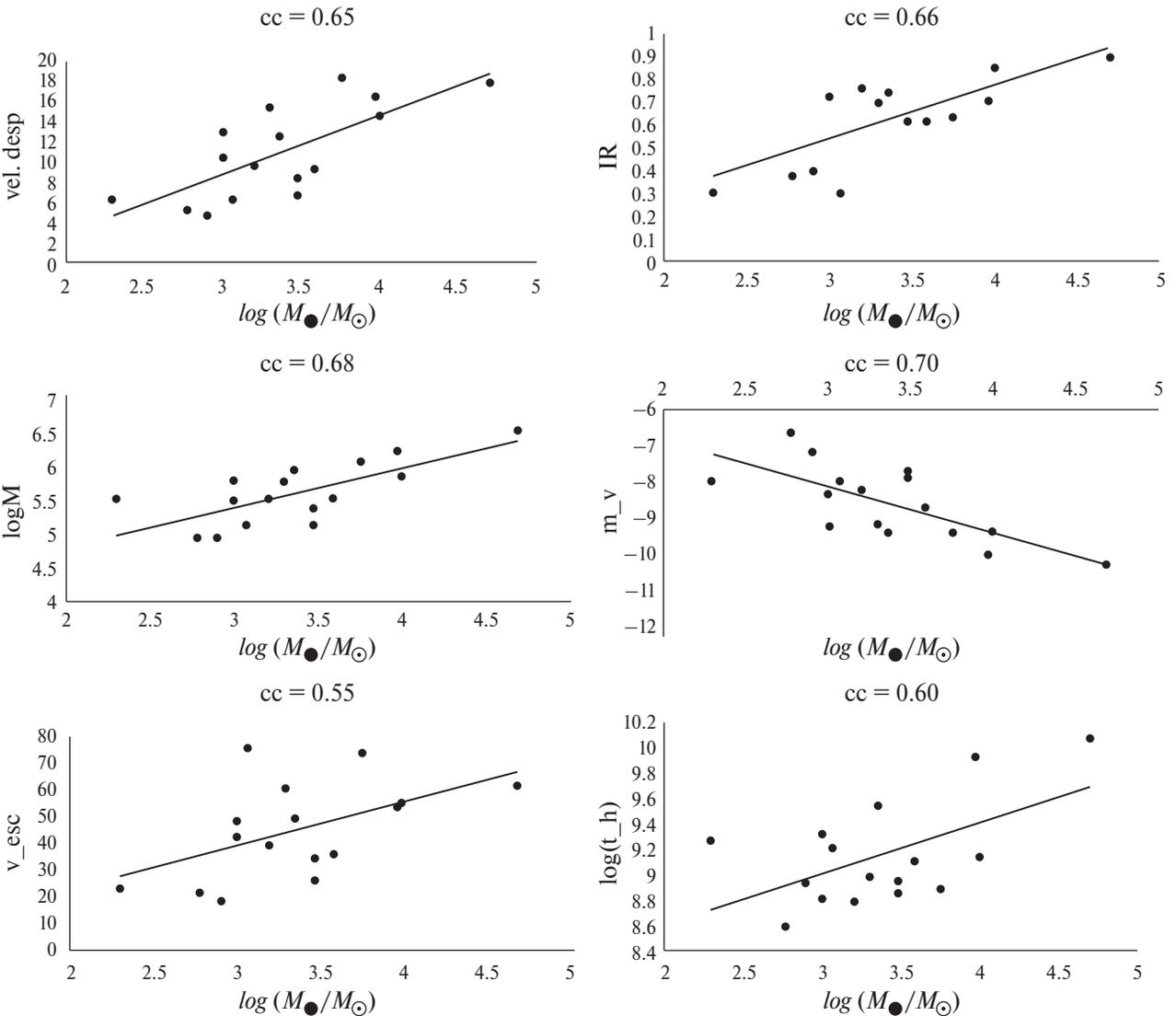


Рис. 2. Диаграмма зависимости параметра концентрации от массы ЧДПМ

Коэффициент корреляции между значением массы центральной ЧДПМ в ШС и временем релаксации t_c равен $cc = 0.60$. Полученная в данной работе эмпирическая формула имеет вид

$$\log(M_{\bullet}/M_{\odot}) = 0.85(\pm 0.30) \log(t_c) - 4.47(\pm 2.75). \quad (5)$$

Имеется также хорошая корреляция между значением массы центральных ЧДПМ и массой ШС, $cc = 0.68$, а эмпирическая формула связи между ними такова:

$$\log(M_{\bullet}/M_{\odot}) = 0.87(\pm 0.25) \log M - 1.59(\pm 1.03). \quad (6)$$

Сравнительно слабая корреляция обнаружена между значением массы центральных ЧДПМ в ШС и центральной скоростью убегания v_{esc} , $cc = 0.55$, а эмпирическая формула такова:

$$\log(M_{\bullet}/M_{\odot}) = 0.02(\pm 0.007)v_{\text{esc}} + 2.55(\pm 0.35). \quad (7)$$

Существует хорошая корреляция между значением массы ЧДПМ и абсолютной звездной величиной M_V , $cc = -0.70$, а эмпирическая формула имеет следующий вид:

$$\log(M_{\bullet}/M_{\odot}) = -0.39(\pm 0.10)M_V - 0.06(\pm 0.02). \quad (8)$$

Коэффициент корреляции между значением массы центральных ЧДПМ и дисперсией скоростей звезд в ШС σ_* равен $cc = 0.65$, а эмпирическая формула между этими параметрами имеет вид

$$\log(M_{\bullet}/M_{\odot}) = 0.08(\pm 0.02)\sigma_* + 2.43(\pm 0.31). \quad (9)$$

Как видно, с ростом значения дисперсии скоростей в центральной области ШС (σ_*) масса черной дыры также растет.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы обнаружили, что существует связь между параметром концентрации, который представляет собой темп нарастания звездной плотности к центру в ШС, и центральной массой ЧДПМ (рис. 1). Найденное значение параметра концентрации рассчитывалось нами симплекс-методом на основе модели Нукера–Джаффе по данным наблюдений поверхностной плотности GAIA DR2. Кроме того, были обнаружены корреляции между значениями центральной массы ЧДПМ и другими физическими параметрами ШС, включая массу скопления, абсолютную звездную величину, индекс Кукаркина, время релаксации и дисперсию скоростей. Нуритдинов и др. [30] впервые предложили классификацию ШС по параметру концентрации. Наши результаты подтверждают их классификацию по данному параметру. Найденные нами корреляции и эмпирические зависимости, очевидно, дают возможность лучше понять динамику и физические свойства ШС.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках гранта FZ-2020092851, финансируемого Агентством

инновационного развития Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A.M. Черпащук, С.О. Алексеев, А.А. Белинский*, Многоканальная астрономия (М.: Из-во “Век-2”, 2019), с. 451.
2. *A.M. Черпащук*, в кн. Астрономия: Традиции, настоящее и будущее, под ред. В.В. Орлова, В.П. Решетникова, Н.Я. Сотниковой (Санкт-Петербург: Из-во ГУ Астрон. ин-т им. В.В. Соболева, 2007), с. 198.
3. *F.N. Bash, K. Gebhardt, W.M. Goss, and P.A. Vanden Bout*, *Astron. J.* 135(1), 182 (2008).
4. *R. Ibata, M. Bellazzini, S.C. Chapman, E. D’Alessandro, et al.*, *Astrophys. J. Letters* 699(2), L169 (2009).
5. *M. Colpi, M. Mapelli, and A. Possenti*, *Astrophys. J.* 599(2), 1260 (2003).
6. *R. de Vita, M. Trenti, P. Bianchini, A. Askar, M. Giersz, and G. van de Ven*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 467(4), 4057 (2017).
7. *Y.-Q. Lou and Y.-H. Wu*, arXiv:1201.5693 [astro-ph.HE] (2012).
8. *M. Häberle, N. Neumayer, A. Seth, A. Bellini, et al.*, *Nature* 631(8020), 285 (2024).
9. *A.S. Manuel, A. Askar, and M. Giersz*, arXiv:1905.00902 [astro-ph.GA] (2019).
10. *Y. Shi, M.Y. Grudić, and P.F. Hopkins*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 505(2), 2753 (2021).
11. *H. Baumgardt*, *Mem. Soc. Astron. Ital.* 87, 622 (2016).
12. *M. Häberle, M. Libralato, A. Bellini, L.L. Watkins, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 503(1), 1490 (2021).
13. *T.J. Maccarone and M. Servillat*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 389(1), 379 (2008).
14. *R.P. van der Marel*, arXiv:astro-ph/0001342 (2000).
15. *N. Lützgendorf, M. Kissler-Patig, E. Noyola, B. Jalali, P.T. de Zeeuw, K. Gebhardt, and H. Baumgardt*, *Astron. and Astrophys.* 533, id. A36 (2011).
16. *N. Lützgendorf, M. Kissler-Patig, K. Gebhardt, H. Baumgardt, et al.*, *Astron. and Astrophys.* 552(1), id. A49 (2013).
17. *B. Kiziltan, H. Baumgardt, and A. Loeb*, *Nature* 542(7640), 203 (2017).
18. *E. Noyola, K. Gebhardt, and M. Bergmann*, in *Dynamical Evolution of Dense Stellar Systems*, IAU Symposium, Proc. IAU 246, 341 (2008).

19. *A. Feldmeier, N. Lützgendorf, N. Neumayer, M. Kissler-Patig, et al.*, *Astron. and Astrophys.* 554, id. A63 (2013).
20. *E. Vitral, M. Libralato, K. Kremer, G.A. Mamon, A. Bellini, L.R. Bedin, and J. Anderson*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 522(4), 5740 (2023).
21. *S. Kamann, T.O. Husser, J. Brinchmann, E. Em-sellem, et al.*, *Astron. and Astrophys.* 588, id. A149 (2016).
22. *Z. Schutte, A.E. Reines, and J.E. Greene*, *Astrophys. J.* 887(2), id. 245 (2019).
23. *F.U. Botirov, S.N. Nuritdinov, and A.E. Ashurov*, *Astron. Rep.* 67(5), 448 (2023).
24. *T.J.L. de Boer, M. Gieles, E. Balbinot, V. Henault-Brunet, A. Sollima, L.L. Watkins, and I. Claydon*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 485(4), 4906 (2019).
25. *W. Jaffe*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 202, 995 (1983).
26. *P. Crane, M. Stiavelli, I.R. King, J.M. Deharveng, et al.*, *Astron. J.* 106, 1371 (1993).
27. *A. Ashurov and S. Nuritdinov*, in *Dynamics of Star Clusters and the Milky Way*, ASP Conf. Ser. 228; edited by S. Deiters, B. Fuchs, R. Spurzem, A. Just, and R. Wielen (San Francisco: ASP, 2001), p. 371.
28. *W.E. Harris*, arXiv:1012.3224 [astro-ph.GA] (2010).
29. *H. Baumgardt and M. Hilker*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 478(2), 1520 (2018).
30. *S.N. Nuritdinov, I.U. Tatjibaev, and A.S. Rastorguev*, *Astron. Letters* 47(3), 163 (2021).

ON MASSIVE BLACK HOLES IN THE CENTERS OF GLOBULAR CLUSTERS. I

© 2025 S. N. Nuritdinov^{a,*}, S. J. Turaev^{a,**}, K. T. Mirtadjieva^{a,b,***}

^a *Department of Astronomy and Astrophysics NUUZ, Uzbekistan, Tashkent*

^b *Astronomical Institute of the Uzbek Academy of Sciences, Uzbekistan, Tashkent*

* *e-mail: nur200848@mail.ru*

** *e-mail: sobr8488@mail.ru*

*** *e-mail: mkt1959@mail.ru*

In this paper, a sample of globular clusters (GCs) is created for which the masses of black holes in their centers are known from observations. The dependence of the main characteristics of GCs on the mass of black holes is studied. Based on observational data on the surface density of GCs, the degree of concentration of stars to their center is determined. The obtained degree of concentration is used as an indicator of the presence of black holes.

Keywords: central black holes, globular clusters, concentration parameter of stars to the center, surface densities of clusters