УДК 524.4:[520.82+521.95]

ГЛУБОКОЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ И АСТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЗВЕЗДНОГО СКОПЛЕНИЯ STOCK 3 С ПОМОЩЬЮ GAIA DR3

© 2025 А. М. Х. Ахмед^{1*}, А. Р. Юссеф¹, М. С. Эль-Навави¹, В. Х. Эльсанхури²

¹ Каирский университет, Гиза, 12613 Египет ² Университет Северной Границы, Арар, 91431 Саудовская Аравия Поступила в редакцию 7 июля 2024 года; после доработки 19 января 2025 года; принята к публикации 4 февраля 2025 года

В работе представлен фотометрический и кинематический анализ с использованием Gaia DR3 нестационарного рассеянного скопления Stock 3, которое оказалось расположенным на расстоянии 2.95 ± 0.70 кпк и имеющим возраст 16 ± 4 млн лет. Проведен анализ данных, чтобы установить принадлежность звезд к скоплению и таким образом определить его полную массу, начальную функцию масс, а также динамический и кинематический статусы.

Ключевые слова: астрономические базы данных: каталоги — методики: фотометрическая — параллаксы — собственные движения — звезды: функция светимости, функция масс — Галактика: рассеянные скопления и ассоциации: отдельные: Stock 3

1. ВВЕДЕНИЕ

Глубокий анализ рассеянных звездных скоплений значительно улучшает наше понимание эволюции звезд. Кроме того, он расширяет наши знания о структуре и эволюции тонкого диска Млечного Пути (Gilmore et al., 2012). Stock 3 — это молодое звездное скопление, которое, как ожидается, претерпит физическую и динамическую эволюцию, например сегрегацию масс, и, следовательно, его изучение может помочь ответить на многие вопросы, связанные с эволюцией звездных скоплений и общей эволюцией Галактического диска. Звездное скопление Stock 3, расположенное в созвездии Кассиопея в северной части Млечного Пути, является одним из 21 рассеянного скопления, которые впервые обнаружил немецкий астроном Юрген Шток в начале 1950-х годов в обсерватории Серро-Тололо в Чили. Было составлено несколько обширных каталогов, содержащих параметры, полученные для этого скопления, например Dias et al. (2002, 2014), Kharchenko et al. (2013), Sampedro et al. (2017). Результаты нескольких недавних исследований скопления приведены в таблице 1.

Согласно базе данных Webda, небесные координаты Stock 3 находятся на прямом восхождении $\alpha = 01^{h}12^{m}18^{s}00$ и склонении $\delta = 62^{\circ}20'00''_{0}0$, что соответствует галактическим координатам $l = 125^{\circ}.351$ и $b = -0^{\circ}.440$. Kharchenko et al. (2013) представили параметры Stock 3 в своем каталоге звездных скоплений Млечного Пути (Milky Way Star Clusters, MWSC), основанном на базах данных 2MASS и PPMXL. Используя тот же каталог, Joshi et al. (2016) рассчитали галактические координаты для Stock 3. Sampedro et al. (2017) получили компоненты собственного движения Stock 3 по каталогу UCAC4. Также Monteiro et al. (2020) проанализировали Stock 3 на основе Gaia DR2. Результаты этих исследований представлены в таблице 1.

Как показано в таблице 1, существуют огромные различия между оценками астрофизических параметров. Это может быть связано с использованием различных наборов данных, методов наблюдения и различных статистических подходов для отбора членов скопления. Это также согласуется с выводами Netopil et al. (2015), которые провели обширное сравнение результатов многих предыдущих исследований (например Bukowiecki et al. (2011), Kharchenko et al. (2013)), где были получены оценки основных параметров для большого числа рассеянных скоплений. Они сравнили измеренные возрасты, расстояния и цветовые избытки одних и тех же рассеянных звездных скоплений и обнаружили, что между полученными значениями имеются расхождения. Целью данной работы является уточнение параметров для рассматриваемого рассеянного скопления с использованием самого свежего набора данных — Gaia DR3.

^{*}E-mail: ahamza@sci.cu.edu.eg

Таблица 1. В колонках таблицы по литературным данным представлены параметры Stock 3: (1), (2) — α , δ ; (3) — радиус; (4) — возраст; (5) — расстояние; (6) — избыток цвета; (7) — параллакс; (8), (9) — компоненты собственного движения; (10) — количество звезд; (11) — ссылки на литературу

α(J2000),	δ(J2000),	r,	Возраст,	<i>d</i> ,	E(B-V),	$\overline{\omega},$	$\mu_{lpha}\cos\delta,$	$\mu_{\delta},$	N	Ссылки
deg	deg	arcmin	Myr	pc	mag	mas	$\mathrm{mas}\mathrm{yr}^{-1}$	$\mathrm{mas}\mathrm{yr}^{-1}$	11	CODIMAN
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
18.075	62.334	3.50	_		_	—	$-1.94{\pm}3.73$	$1.54{\pm}2.49$	59	[1]
18.038	62.258	-	70.79	1363	0.708	—	—	—	—	[2]
18.037	62.258	6.60	70.79	1363	0.708	—	-0.13	-0.64	90	[3]
18.060	62.319	-	$16.80{\pm}3.40$	2747	—	$0.265 {\pm} 0.132$	$-1.895 {\pm} 0.326$	$-0.357 {\pm} 0.296$	114	[4]
18.075	62.334	4.00	70.79	1363	0.71	—	$-1.96{\pm}0.62$	$1.68 {\pm} 0.5$	64	[5]

[1] Dias et al. (2014), [2] Joshi et al. (2016), [3] Kharchenko et al. (2013), [4] Monteiro et al. (2020), [5] Sampedro et al. (2017).

Статья организована следующим образом. Используемые данные описаны в разделе 2. Измеренные центр и радиус представлены в разделе 3. Выбор возможных членов скопления из базы данных Gaia DR3, а также их собственные движения и параллаксы обсуждаются в разделах 4 и 5 соответственно. Оценки возраста и расстояния до скопления приведены в разделе 6. Функция светимости и функция масс, а также динамический статус скопления рассматриваются в разделах 7 и 8 соответственно. Раздел 9 посвящен параметрам эллипсоида скорости. В конце мы приводим выводы в разделе 10.

2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

В данной работе мы использовали Gaia DR3¹ (Prusti et al., 2016; Brown et al., 2021; Rowell et al., 2021; Arenou, 2023; Bailer-Jones et al., 2023; Vallenari et al., 2023) для сбора астрометрических и фотометрических данных по Stock 3.

Запуск миссии Gaia Европейского космического агентства открыл новую главу в астрономии. Миссия предоставила пятипараметрическую фотометрию примерно для 1.8 млрд источников, а также их положения на небе (α , δ), параллаксы (ϖ) и компоненты собственного движения по RA и Dec ($\mu_{\alpha} \cos \delta$, μ_{δ}) с предельной звездной величиной $G = 21^{\text{m}}$. Погрешности в компонентах собственного движения составляют до 0.02–0.03 мсд год⁻¹ (для $G < 15^{\text{m}}$), 0.07 мсд год⁻¹ (для $G \sim 17^{\text{m}}$), 0.50 мсд год⁻¹ (для $G \sim 20^{\text{m}}$) и 1.40 мсд год⁻¹ (для $G = 21^{\text{m}}$). Погрешности в значениях параллакса составляют $\sigma_{\varpi} \sim 0.02$ –0.03 мсд для источников с $G < 15^{\text{m}}$, $\sigma_{\varpi} \sim 0.07$ мсд для $G = 17^{\text{m}}$, $\sigma_{\varpi} \sim 0.50$ мсд для $G = 20^{\text{m}}$ и $\sigma_{\varpi} \sim 1.30$ мсд для $G = 21^{\text{m}}$. Проводя анализ и визуализацию с помощью программы **ТОРСАТ**², мы выбрали исходные



Рис. 1. Профиль радиальной плотности, представленный синей сплошной линией. Красная пунктирная линия представляет собой аппроксимацию моделью King (1962), а черная сплошная линия и пунктирные линии обозначают плотность фона $f_{\rm bg}$ и погрешности плотности фона соответственно.

данные из Gaia DR3, указав область радиуса 10' вокруг центральных координат скопления таким образом, чтобы превысить его заявленный радиус. Gaia DR3 демонстрирует значительные улучшения по сравнению с Gaia DR2: точность измерения параллаксов увеличилась на 30%, а точность измерения собственных движений — в два раза.

3. ЦЕНТР И РАДИУС STOCK3

Центр скопления можно определить, найдя область с наибольшей плотностью звезд. Для этого мы построили гистограммы α и δ , разделив выделенную область на ячейки одинакового размера и применив гауссову аппроксимацию; центр скопления оказался в точке $\alpha = 01^{\rm h}12^{\rm m}9^{\rm s}.40$ и $\delta = +62^{\circ}15'23''.08$, что согласуется с литературными данными.

¹https:://www.cosmos.esa.int/gaia

²http://www.starlink.ac.uk/topcat/

Для изучения структуры скопления мы построили профиль радиальной плотности, как показано на рис. 1, разделив наблюдаемую область на концентрические оболочки от центра скопления с равными шагами 0'20. Плотность в каждой зоне ρ_i (количество звезд на квадратную угловую минуту) была рассчитана путем деления количества звезд в ней на ее площадь, т.е. $\rho_i = N_i/A_i$. Погрешности в расчетах плотности были определены на основе статистических данных выборки в соответствии с распределением Пуассона $(1/\sqrt{N_i})$. Радиус скопления определяется как расстояние, на котором плотность звезд совпадает с плотностью звезд поля (Tadross, 2005). По эмпирической модели Кинга (King, 1962) функция плотности ρ_r может быть представлена в виде

$$\rho_r = f_{\rm bg} + \frac{f_0}{1 + (r/r_c)^2},\tag{1}$$

где f_{bg} , f_0 и r_c — соответственно плотность фона, плотность звезд в центре и радиус ядра скопления (расстояние, на котором плотность звезд падает до половины центральной плотности). Наилучшей моделью является модель с самым высоким коэффициентом определения:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\rm res}}{SS_{\rm tot}};\tag{2}$$

здесь $SS_{\rm res}$ — это остаточная сумма квадратов, вычисленная по формуле $SS_{res} = \sum_i (y_i - f_i)^2$, где y_i представляет собой наблюдаемый профиль радиальной плотности, *f_i* — профиль по модели Кинга; SS_{tot} — общая сумма квадратов, вычисленная как $SS_{ ext{tot}} = \sum_i (y_i - \overline{y})^2$, где \overline{y} — среднее значение наблюдаемых данных, $\overline{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_i$.

Найдено, что предельный радиус Stock 3 равен 5.60 ± 0.43 , что не слишком отличается от Kharchenko et al. (2013); $f_{\rm bg} = 19.93 \pm 0.35$ звезд на квадратную угловую минуту и $r_c = 0.79 \pm 0.13$. Как показано в таблице 1, оценки радиуса, полученные с использованием ИК-данных, заметно больше, чем расчеты по оптическим данным (Joshi et al., 2015).

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ К СКОПЛЕНИЮ С ПОМОЩЬЮ GAIA DR3

Следующим важным шагом в определении всех астрофизических параметров является нахождение наиболее вероятных членов скопления. Подход, основанный на собственных движениях, предпочтительнее, чем подход, основанный на лучевых скоростях, поскольку в первом случае движения отображаются в двух измерениях, а не только в одном, как во втором случае (Tian et al., 1998).

АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ том 80 № 2 2025

Принадлежность к скоплению была определена в соответствии со статистическим подходом Yadav et al. (2013), который основан на процедуре Tian et al. (1998). Процедура Yadav et al. (2013) начинается с идентификации зоны скопления на векторноточечной диаграмме, что достигается путем построения соответствующих компонентов собственного движения ($\mu_{\alpha} \cos \delta$, μ_{δ}) для различных интервалов величин G, как показано на рис. 2. Область с наибольшей плотностью звездного населения по сравнению с остальной частью поля рассматривается как область скопления, что хорошо видно для интервалов $G \le 17$ и $17 < G \le 19$. Эта область находится внутри радиуса $0.50 \text{ мсд год}^{-1}$ с центром в точке $\mu_{\alpha} \cos \delta = -2.10$, $\mu_{\delta} = -0.50 \text{ мсд год}^{-1}$. Звезды, находящиеся за пределами этой области, рассматривались как звезды поля.

Следующим шагом является вычисление вероятностей принадлежности к скоплению звезд, которые находятся в пределах расчетного радиуса скопления. Мы начали с расчета частотных распределений для звезд скопления (ϕ_c^{ν}) и для звезд поля (ϕ_f^{ν}) , используя уравнения (3) и (4) из Tian et al. (1998). В этих уравнениях дисперсии собственного движения звезд, входящих в состав скопления, было присвоено значение 0.075 мсдгод⁻¹, что основывается на предположении Girard et al. (1989) о том, что дисперсии лучевых скоростей внутри рассеянных скоплений оцениваются в 1 km s⁻¹ (Sinha et al., 2020). Мы обнаружили, что средние значения компонент собственных движений всех звезд поля и их соответствующие дисперсии составляют $\mu_{xf} = -0.66 \text{ мсд год}^{-1}, \ \mu_{yf} = -0.42 \text{ мсд год}^{-1}, \ \sigma_{xf} = 4.25 \text{ мсд год}^{-1} \text{ и } \sigma_{yf} = 2.05 \text{ мсд год}^{-1}.$

Распределение всех звезд может быть получено как

$$\Phi = n_c \,\phi_c^\nu + n_f \,\phi_f^\nu \,, \tag{3}$$

где n_c и n_f обозначают нормализованные числа звезд скопления и поля соответственно, которые равны 0.08 и 0.92, имея в виду, что $n_c + n_f = 1$. Таким образом, вероятность принадлежности *i*-й звезды определяется по формуле

$$P_{\mu}(i) = \frac{\phi_c(i)}{\phi(i)}.$$
(4)

Вероятности принадлежности к скоплению и параллаксы в зависимости от G показаны на рис. 3. Звезды с вероятностью, равной или превышающей 80%, отмечены красными квадратами, а синие треугольники на панели (b) представляют собой звезды с высокоточными измерениями параллакса, $\varpi_{\rm err} \leq 0.05$ мсд.

217



Рис. 2. Векторно-точечные диаграммы для звезд (с заданными звездными величинами *G*), которые находятся в пределах расчетного радиуса скопления. Красными точками обозначены звезды, находящиеся в пределах выбранной зоны, соответствующей звездам скопления.

В данной работе мы нашли 73 звезды с вероятностью принадлежности к скоплению $P_{\mu} \ge 80\%$ и величинами G вплоть до $20^{\text{m}}2$, как показано на рис. 3. На рис. 3b оценки параллакса вероятных членов скопления, отмеченных красными квадратами, имеют меньшую дисперсию по сравнению с дисперсией для звезд поля. Рисунок также показывает, что звезды скопления с высокоточными измерениями параллакса, отмеченные синими треугольниками, имеют еще меньшую дисперсию. По измеренным компонентам собственного движения вероятных членов скопления мы построили на рис. 4 график совместного движения звезд; он демонстрирует единообразие направления и равенство скоростей.

Для оценки эффективности определения принадлежности к скоплению мы использовали формулу Shao and Zhao (1996):

$$E = 1 - \frac{N \sum_{i=1}^{N} [P(i)(1 - P(i))]}{\sum_{i=1}^{N} P(i) \sum_{i=1}^{N} (1 - P(i))},$$
(5)

где более высокие значения E отражают высокую эффективность процедуры. Исследование Shao and Zhao (1996) показывает, что E варьируется от 0.2 до 0.9 и имеет оптимальное значение 0.55. Эффективность определения принадлежности к скоплению составила 0.54. Это свидетельствует о том, что эффективность отбора членов скопления достаточно высока.

5. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СКОПЛЕНИЯ

Собственное движение и параллакс скопления были рассчитаны по данным выбранных членов скопления. Мы построили гистограммы астрометрических данных для звезд с вероятностью принадлежности к скоплению 80% и применили гауссову аппроксимацию к этим гистограммам; средние значения компонентов собственного движения Stock 3 составляют -2.067 ± 0.017 мсд год $^{-1}$ и $-0.466 \pm 0.019 \text{ мсд год}^{-1}$ по прямому восхождению и склонению соответственно, как показано на рис. 5. Наши оценки компонентов собственного движения хорошо согласуются с расчетами Monteiro et al. (2020). Наши результаты также согласуются с результатами Dias et al. (2014) и Sampedro et al. (2017), полученными с использованием отличающихся наборов данных, но они имеют более высокие погрешности. Напротив, наши значения существенно отличаются от результатов Kharchenko et al. (2013), поскольку они использовали базу данных PPMXL, у которой гораздо



Рис. 3. Вероятность принадлежности к скоплению P_{μ} (а) и параллакс ϖ (b) в зависимости от G. Черными точками обозначены все звезды, а красными квадратами на обеих панелях отмечены звезды с вероятностью принадлежности $P_{\mu} \ge 80\%$ (над горизонтальной линией или на ней). Синими треугольниками на графике параллаксов помечены звезды скопления с погрешностями параллакса, равными или меньшими 0.05 мсд.

менее точные измерения собственных движений по сравнению как с Gaia DR3, так и с Gaia DR2.

Согласно Rowell et al. (2021), измерения параллакса в проекте Gaia являются смещенными из-за проблем с прибором и обработкой данных. Авторы обнаружили, что смещение в измерениях параллакса наблюдаемых источников зависит от их величин G, показателей цвета $G_{BP} - G_{RP}$, эклиптической широты, а также эффективной длины волны и псевдоцвета при наблюдении. Rowell et al. (2021) сформулировали две функции для вычисления смещений в измеренных параллаксах источников Gaia DR3 с помощью либо пятипараметрического, либо шестипараметрического решения (Z_5 и Z_6). Скорректированные параллаксы вычисляются



Рис. 4. Совместное движение звезд. Синими стрелками обозначены звезды с вероятностями принадлежности к скоплению, равными или превышающими 80%.

как $\varpi_i^{\text{corr}} = \varpi_i - Z(x_i)$. Авторы обнаружили, что смещения параллакса источников, имеющих пятипараметрические решения, варьируются от -94 до 36 µas, а смещения параллакса источников, имеющих шестипараметрические решения, - от -151 до 130 µas. Реализации этих двух функций на языке Python (gaiadr3-zeropoint) доступны на веб-странице Gaia³ (Rowell et al., 2021) и использовались в этом исследовании для вычисления смещений параллакса выбранных вероятных членов скопления. Мы обнаружили, что средняя нулевая точка для параллакса вероятных членов скопления равна -26.2 µаs. Скорректированное значение параллакса равно 0.312 ± 0.035 мсд, как показано на рис. 6; соответствующее ему расстояние (модуль расстояния) равно 3.20 ± 0.36 кпк $(12 \stackrel{\rm m}{.} 20 \pm 0 \stackrel{\rm m}{.} 26).$

Наши результаты вполне согласуются с результатами Monteiro et al. (2020) (которые основаны на данных Gaia DR2). Однако, благодаря использованию более точных данных Gaia DR3, мы получили более точные оценки собственного движения и параллакса скопления.

6. ДИАГРАММА «ЦВЕТ-ЗВЕЗДНАЯ ВЕЛИЧИНА», ВОЗРАСТ И РАССТОЯНИЕ

Наиболее фундаментальные параметры скопления, такие как возраст, расстояние, покраснение и металличность, могут быть определены одновременно путем сопоставления теоретических изохрон и наблюдаемой диаграммы «цвет – звездная величина». В настоящей работе мы использовали теоретические изохроны Marigo et al. (2017) с металличностью Z = 0.0152. По звездам скопления мы построили диаграмму «цвет – звездная

³https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/edr3-code

220



Рис. 5. Распределения собственных движений по RA и Dec. Гауссова аппроксимация бинов показана красными линиями.



Рис. 6. Гистограмма параллаксов. Гауссова аппроксимация бинов показана красной линией.

величина», G в зависимости от $(G_{BP} - G_{RP})$, как показано на рис. 7. После визуального сравнения наблюдаемых данных с изохронами разного возраста наиболее подходящей оказывается изохрона 16.00 млн лет, а наблюдаемый модуль расстояния для скопления равен 15.0 ± 0.3 . Избыток цвета $E(G_{BP} - G_{RP})$ колеблется от 1.^m15 до 1^m35, поэтому мы приняли среднее значение 1.25; избыток цвета E(B-V) может быть вычислен как $E(B - V) = 0.775 E(G_{BP} - G_{RP})$ (Cardelli et al., 1989) и составляет 0^m97. Коэффициент экстинкции вдоль луча зрения вычислялся как $A_G = 2.74 E(B - V)$ (Casagrande and VandenBerg, 2018; Zhong et al., 2019) и равен 2^m66. Расстояние до скопления может быть получено по измеренному модулю расстояния:

$$d = 10^{((m-M)_{\rm obs} - A_G + 5)/5}.$$
 (6)

Расстояние до Stock 3 после коррекции за экстинкцию в межзвездной среде составляет 2945 ± 700 пк, что в пределах погрешности согла-



Рис. 7. Диаграмма «цвет – звездная величина», G в зависимости от G_{BP} - G_{RP}. Открытыми кружками отмечены все звезды, находящиеся в зоне скопления; заполненные красным кружки обозначают звезды скопления, у которых $P_{\mu} \geq 80\%$.

суется с расстоянием, измеренным по параллаксу. Более того, наша оценка возраста Stock 3 хорошо согласуется с оценкой Monteiro et al. (2020) $(16.8 \pm 3.4$ млн лет).

С помощью расстояния, измеренного по параллаксу, расстояние скопления от плоскости Галактики (Z_{\odot}), проекции расстояния от Солнца на плоскость Галактики (X_{\odot} и Y_{\odot}), а также расстояние от центра Галактики (R_{GC}) были рассчитаны как

$$X_{\odot} = d\cos b\cos l, Y_{\odot} = d\cos b\sin l,$$

$$Z_{\odot} = d\sin b, \tag{7}$$

$$R_{\rm GC} = \sqrt{R_{\odot}^2 + (d\cos b)^2 - 2R_{\odot}^2 d\cos b\cos l}, \quad (8)$$

где d — расстояние от Солнца в парсеках, а R_{\odot} — расстояние между Солнцем и центром Галактики. Согласно Bland-Hawthorn et al. (2019), $R_\odot = 8.20 \pm 0.10$ кпк.



Рис. 8. Функция светимости с интервалом 1^т (для звезд с вероятностью принадлежности к скоплению, равной или превышающей 80%).



Рис. 9. Функция масс скопления. Значение ϕ представляет собой dN/dM, погрешности измерений — статистические ошибки, вычисленные как $1/\sqrt{N}$; пунктирная красная линия показывает аппроксимацию методом наименьших квадратов по всему диапазону масс.

Значения X_{\odot} , Y_{\odot} и Z_{\odot} равны -1.85, 2.61 и -0.03 кпк (± 0.20 кпк) соответственно. Следовательно, расстояние до скопления от центра Галактики ($R_{\rm GC}$) составляет 10.39 \pm 0.10 кпк.

7. ФУНКЦИЯ СВЕТИМОСТИ И ФУНКЦИЯ МАСС

После определения вероятных членов скопления легко получить функцию светимости и функцию масс скопления. Вычисленный модуль расстояния можно использовать для вычисления абсолютных величин звезд скопления, M_G , по их наблюдаемым величинам G. На рис. 8 показана функция светимости, которая отражает неполноту фотометрии в диапазонах M_G от 1^m до 3^m и приблизительно более 4^m. Затем по выбранным из Marigo et al. (2017) изохронам мы построили зависимость «массасветимость» путем аппроксимации полиномом четвертой степени данных о массе и светимости в интервале абсолютных величин между –4^m00 и 5^m00. Данный интервал охватывает полученные абсолютные величины звезд скопления. Далее это полиномиальное уравнение было использовано для получения оценок масс вероятных членов скопления. Зависимость «масса-светимость» рассчитывалась следующим образом:

$$M_{\text{Stock 3}} = 3.930 - 1.587 M_G + 0.262 M_G^2 - 0.013 M_G^3 - 0.005 M_G^4.$$
(9)

Массы вероятных членов скопления варьируются от 1.00 до $9.50 M_{\odot}$.

Таблица 2 содержит выборку звезд скопления с оценками их масс и вероятностей принадлежности к скоплению. Наши оценки масс звезд скопления показывают, что Stock 3 включает в себя 9 звезд В-типа и 64 звезды более поздних типов.

Солпитер (Salpeter, 1955) обнаружил, что количество звезд уменьшается с увеличением звездной массы по степенному закону с индексом α , равным 2.35. Наклон функции масс для конкретного скопления может быть получен с помощью уравнения Bisht et al. (2020):

$$\log \frac{dN}{dM} = -(1+\Gamma)\log M + \text{const.}$$
(10)

В уравнении (10) индекс α степенного закона Солпитера равен 1 + Г. Общая масса скопления ($M_{\rm cl}$) в единицах массы Солнца была рассчитана путем суммирования масс всех членов скопления и оказалась равной 135.54 ± 15.13 M_{\odot} , где ошибки связаны с погрешностями модуля расстояния и возраста. Наклон функции масс (Г) равен 1.24, как показано на рис. 9. Это значение близко к значению Солпитера ($\Gamma + 1 = 2.35$) для диапазона масс $0.40 \leq M/M_{\odot} < 10.00$ (Salpeter, 1955).

8. ДИНАМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СКОПЛЕНИЯ

Многие наблюдаемые звездные скопления демонстрируют сегрегацию масс в распределении звезд по расстоянию от центра: массивные звезды расположены ближе к центру, в то время как маломассивные — ближе к внешнему краю скопления. До сих пор ведутся споры о том, является ли это наблюдаемое разделение масс результатом динамических взаимодействий звезд внутри скоплений или звезды скопления сформировались таким образом.

АХМЕД и др.

Таблица 2. Вероятности принадлежности к скоплению (*P*) и массы для выборки звезд скопления, а также их астрометрические и фотометрические данные, полученные из Gaia DR3

ID	RA(J2000),	Dec (J2000),	$\varpi_{ m cor},$	$\mu_{\alpha}\cos\delta,$	$\mu_{\delta},$	G,	$G_{RB} - G_{PB},$	Ρ,	Mass,
ID	deg	deg	mas	$mas yr^{-1}$	$ m mas \ yr^{-1}$	mag	mag	%	M_{\odot}
M 1	18.033360	62.188053	$0.3429 {\pm} 0.0279$	-2.110 ± 0.022	-0.534 ± 0.029	15.433	0.863	99	3.29 ± 0.42
M 2	18.001565	62.292879	$0.3692{\pm}0.0212$	$-2.139 {\pm} 0.018$	-0.482 ± 0.023	14.895	0.920	99	$4.10 {\pm} 0.52$
М3	18.190841	62.220717	$0.3940{\pm}0.0341$	-2.117 ± 0.028	-0.468 ± 0.036	16.007	1.239	99	$2.61 {\pm} 0.32$
M4	17.999354	62.296598	$0.4147 {\pm} 0.0317$	-2.148 ± 0.027	-0.524 ± 0.035	15.819	1.010	99	2.81 ± 0.35
M 5	18.012249	62.262776	$0.3350{\pm}0.0151$	-2.150 ± 0.012	$-0.572 {\pm} 0.016$	13.825	0.998	99	$6.12 {\pm} 0.78$
M 6	18.003116	62.234682	$0.2512{\pm}0.0446$	-2.180 ± 0.035	-0.492 ± 0.048	16.402	1.216	98.7	$2.24 {\pm} 0.26$
Μ7	17.988047	62.276175	$0.2990{\pm}0.0234$	-2.181 ± 0.019	-0.552 ± 0.025	14.299	0.992	98.5	$5.17 {\pm} 0.65$
M 8	18.049098	62.250730	$0.3427 {\pm} 0.0349$	-2.039 ± 0.028	-0.587 ± 0.040	15.854	0.997	98.2	$2.77 {\pm} 0.34$
M 9	18.051791	62.270672	$0.3630{\pm}0.0316$	-2.047 ± 0.026	-0.600 ± 0.034	15.658	0.954	98.0	$3.00 {\pm} 0.38$
M 10	18.092336	62.222435	$0.3911{\pm}0.0961$	-2.195 ± 0.077	-0.505 ± 0.110	17.848	1.972	97.6	$1.49 {\pm} 0.09$
M 11	18.199686	62.233640	$0.0591{\pm}0.1099$	-2.072 ± 0.088	-0.614 ± 0.109	18.033	2.434	97.4	$1.45 {\pm} 0.08$
M 12	17.985401	62.265805	$0.0588{\pm}0.1395$	-2.103 ± 0.118	-0.541 ± 0.156	18.468	2.155	97.2	$1.36 {\pm} 0.07$
M 13	18.165948	62.207072	$0.3470{\pm}0.1290$	-2.011 ± 0.105	-0.549 ± 0.127	18.395	1.828	97.1	$1.38 {\pm} 0.07$
M 14	18.080444	62.255369	$0.3513{\pm}0.0390$	$-2.101\!\pm\!0.031$	-0.355 ± 0.042	15.542	1.028	96.8	$3.15 {\pm} 0.40$
M 15	18.114796	62.288802	$0.3734{\pm}0.0658$	-1.979 ± 0.057	$-0.419 {\pm} 0.072$	17.155	1.561	96.6	$1.74 {\pm} 0.16$
M 16	18.076004	62.170732	$0.4012{\pm}0.0677$	-1.999 ± 0.056	-0.614 ± 0.071	17.176	1.570	96.4	$1.73 {\pm} 0.15$
M 17	18.108481	62.267351	$0.0031 {\pm} 0.0998$	$-2.220 {\pm} 0.081$	$-0.588 {\pm} 0.107$	17.833	1.641	96.4	$1.49 {\pm} 0.09$
M 18	18.090203	62.293549	$0.4084{\pm}0.0836$	-1.961 ± 0.073	-0.446 ± 0.093	17.622	1.572	96.2	$1.56 {\pm} 0.11$
M 19	18.032473	62.276228	$0.3867 {\pm} 0.0145$	-2.058 ± 0.012	-0.640 ± 0.015	12.661	0.829	96.0	8.74 ± 1.17
M 20	17.945727	62.316061	$0.2124{\pm}0.1739$	-2.023 ± 0.144	-0.511 ± 0.187	18.847	1.825	95.9	$1.30 {\pm} 0.09$
M 21	17.918209	62.242541	$0.1459{\pm}0.0304$	$-1.957 {\pm} 0.025$	-0.536 ± 0.032	15.602	2.513	95.9	$3.07 {\pm} 0.39$
M 22	18.028096	62.168123	$0.3065 {\pm} 0.1257$	-2.246 ± 0.100	-0.529 ± 0.135	18.276	1.590	95.7	$1.40 {\pm} 0.08$
M 23	18.189424	62.220897	-0.0060 ± 0.1454	$-1.965 {\pm} 0.117$	-0.559 ± 0.147	18.522	1.681	95.6	$1.35\!\pm\!0.08$
M 24	17.955728	62.252166	$0.7792 {\pm} 0.0644$	-2.160 ± 0.052	$-0.337 {\pm} 0.069$	17.187	1.790	95.4	$1.73 {\pm} 0.15$
M 25	18.041020	62.260487	$0.6040 {\pm} 0.1449$	-2.016 ± 0.119	-0.645 ± 0.156	18.390	1.780	95.4	$1.38 {\pm} 0.07$
M 26	18.055294	62.332940	$0.2182{\pm}0.1372$	-1.971 ± 0.118	-0.411 ± 0.153	16.707	1.268	95.3	$2.00 {\pm} 0.22$
M 27	18.177466	62.302115	$0.0930{\pm}0.1609$	-2.192 ± 0.138	-0.641 ± 0.177	18.734	2.081	94.9	$1.32 {\pm} 0.08$
M 28	18.063141	62.178147	$0.4231{\pm}0.0168$	$-1.952 {\pm} 0.013$	-0.453 ± 0.019	14.048	0.794	94.8	$5.66 {\pm} 0.72$
M 29	18.030045	62.252563	$0.4678 {\pm} 0.2098$	$-2.167 {\pm} 0.169$	-0.456 ± 0.231	19.079	1.825	94.7	$1.25 {\pm} 0.10$
M 30	17.929619	62.219423	$0.2547{\pm}0.1779$	-2.181 ± 0.146	-0.625 ± 0.218	18.824	1.735	94.6	$1.30 {\pm} 0.08$
M 31	18.128008	62.176308	$0.3471 {\pm} 0.0700$	-2.006 ± 0.058	$-0.658 {\pm} 0.069$	17.148	1.590	94.2	$1.75 {\pm} 0.16$
M 32	18.119462	62.326469	$0.2921{\pm}0.0498$	-1.931 ± 0.043	-0.483 ± 0.059	16.447	1.395	93.8	$2.20 {\pm} 0.25$
M 33	18.165378	62.291995	$0.1830{\pm}0.1899$	-2.012 ± 0.163	-0.685 ± 0.202	18.999	2.167	93.2	$1.27 {\pm} 0.10$
M 34	18.028749	62.244270	$0.4332{\pm}0.0419$	-2.052 ± 0.034	-0.679 ± 0.046	16.299	1.427	92.7	$2.32 {\pm} 0.28$
M 35	17.922002	62.254292	$0.3231{\pm}0.1603$	-2.246 ± 0.134	-0.680 ± 0.190	18.724	2.124	92.4	$1.32 {\pm} 0.08$
M 36	18.048491	62.289197	$0.4413 {\pm} 0.1880$	-1.930 ± 0.156	-0.393 ± 0.212	18.892	1.729	92.4	$1.29 {\pm} 0.09$
M 37	17.980910	62.317252	$0.3259{\pm}0.1863$	-2.140 ± 0.159	-0.247 ± 0.209	18.835	1.669	91.9	$1.30 {\pm} 0.09$

ID	RA (J2000),	Dec.(J2000),	$arpi_{ m cor},$	$\mu_{lpha}\cos\delta,$	$\mu_{\delta},$	G,	$G_{RB}-G_{PB},$	Ρ,	Mass,
12	deg	deg	mas	${ m mas yr^{-1}}$	${ m mas yr^{-1}}$	mag	mag	%	M_{\odot}
M 38	18.127082	62.323350	$0.7179 {\pm} 0.2464$	-2.241 ± 0.218	-0.479 ± 0.284	19.309	1.876	91.5	$1.20 {\pm} 0.13$
M 39	18.185621	62.234327	$1.1786{\pm}0.2880$	-2.036 ± 0.234	-0.637 ± 0.289	19.630	2.278	91.2	$1.10 {\pm} 0.18$
M 40	17.861802	62.280902	$0.5282{\pm}0.1077$	-1.901 ± 0.088	-0.431 ± 0.125	18.084	2.013	91.1	$1.43 {\pm} 0.08$
M 41	17.902191	62.193858	$-0.1844{\pm}0.2093$	-2.297 ± 0.167	-0.373 ± 0.226	18.921	1.766	90.8	$1.29 {\pm} 0.09$
M 42	17.952629	62.322621	$0.1726{\pm}0.2353$	-1.925 ± 0.202	-0.638 ± 0.249	19.226	1.764	90.6	$1.22 {\pm} 0.12$
M 43	18.017274	62.187161	$0.2323 {\pm} 0.2283$	-1.900 ± 0.184	-0.401 ± 0.248	19.180	1.729	90.3	$1.23 {\pm} 0.11$
M 44	17.845777	62.249741	$0.2451{\pm}0.1001$	-2.298 ± 0.082	-0.396 ± 0.110	17.919	2.111	89.9	$1.47 {\pm} 0.09$
M 45	18.075897	62.347114	$-0.3882{\pm}0.1798$	-1.886 ± 0.164	-0.358 ± 0.208	18.938	1.543	89.6	$1.28 {\pm} 0.09$
M 46	17.955663	62.242836	-0.0404 ± 0.3028	-2.281 ± 0.255	-0.446 ± 0.331	19.703	1.894	88.5	$1.07 {\pm} 0.19$
M 47	18.124155	62.265090	$0.2594{\pm}0.2984$	-1.911 ± 0.249	-0.520 ± 0.325	19.543	1.951	88.4	$1.13 {\pm} 0.16$
M 48	17.916705	62.241938	$-0.3559{\pm}0.1919$	-1.857 ± 0.155	-0.382 ± 0.206	18.590	1.688	87.8	$1.34 {\pm} 0.08$
M 49	18.174166	62.221762	$0.8250 {\pm} 0.2941$	-2.350 ± 0.239	-0.499 ± 0.295	19.632	2.039	87.6	$1.10 {\pm} 0.18$
M 50	17.959972	62.190651	$0.3470 {\pm} 0.0584$	-1.936 ± 0.047	-0.634 ± 0.062	16.917	1.656	87.4	$1.87 {\pm} 0.19$
M 51	18.130693	62.231212	$0.2172{\pm}0.1501$	-2.209 ± 0.118	-0.200 ± 0.168	18.577	1.676	86.9	$1.34 {\pm} 0.08$
M 52	17.938467	62.235975	$0.1792{\pm}0.0431$	-1.975 ± 0.035	-0.666 ± 0.048	16.425	2.302	86.7	$2.22 {\pm} 0.26$
M 53	17.998020	62.289981	$0.0678 {\pm} 0.3277$	-1.954 ± 0.278	-0.336 ± 0.358	19.674	1.891	86.7	$1.08\!\pm\!0.18$
M 54	17.847371	62.274113	$0.2910{\pm}0.2265$	-2.381 ± 0.190	-0.436 ± 0.249	19.232	2.121	86.3	$1.22 {\pm} 0.12$
M 55	18.107245	62.316725	$0.5939{\pm}0.3206$	-2.343 ± 0.286	-0.520 ± 0.363	19.691	1.895	85.3	$1.07 {\pm} 0.19$
M 56	18.178108	62.322607	-0.1442 ± 0.2478	-1.857 ± 0.216	$-0.297 {\pm} 0.276$	19.331	1.952	85.2	$1.19{\pm}0.13$
M 57	17.995652	62.178465	$0.1112{\pm}0.1228$	-1.868 ± 0.097	-0.626 ± 0.131	18.224	1.584	84.4	$1.41 {\pm} 0.08$
M 58	17.899680	62.280466	$0.8160 {\pm} 0.2073$	-1.806 ± 0.179	-0.613 ± 0.220	15.719	2.065	84.2	$2.93 {\pm} 0.37$
M 59	17.959140	62.303710	$0.2670{\pm}0.1801$	-1.818 ± 0.152	-0.603 ± 0.209	18.798	1.883	83.6	$1.31 {\pm} 0.08$
M 60	18.077182	62.297597	$0.5738{\pm}0.2599$	-1.837 ± 0.220	-0.290 ± 0.291	19.445	2.080	83.5	$1.16 {\pm} 0.15$
M 61	18.109482	62.281200	$0.1421 {\pm} 0.3858$	-1.928 ± 0.328	-0.518 ± 0.452	19.834	1.985	83.2	$1.01 {\pm} 0.22$
M 62	18.140830	62.308497	$0.2839 {\pm} 0.0908$	-2.197 ± 0.079	-0.241 ± 0.099	17.765	1.497	83.1	$1.51 {\pm} 0.10$
M 63	18.180971	62.255607	-0.1612 ± 0.3393	-2.238 ± 0.283	-0.165 ± 0.344	19.790	1.947	83.1	$1.03 {\pm} 0.21$
M 64	17.902869	62.320813	$1.3493{\pm}0.2768$	-2.173 ± 0.237	-0.077 ± 0.353	19.426	2.647	82.7	$1.17 {\pm} 0.14$
M 65	17.847287	62.281685	$0.7053 {\pm} 0.4090$	-2.078 ± 0.354	-0.280 ± 0.452	20.104	2.499	82.6	$0.85 {\pm} 0.29$
M 66	17.988429	62.204938	$0.2250{\pm}0.2747$	-2.142 ± 0.223	-0.080 ± 0.296	19.420	2.002	82.4	$1.17 {\pm} 0.14$
M 67	17.927347	62.218965	$0.6577 {\pm} 0.3011$	-2.280 ± 0.248	-0.148 ± 0.342	19.617	1.835	82.3	$1.10 {\pm} 0.17$
M 68	18.139300	62.204755	$0.0461 {\pm} 0.2121$	$-1.789 {\pm} 0.167$	-0.581 ± 0.213	19.092	1.924	82.0	$1.25 {\pm} 0.10$
M 69	17.901626	62.278894	$0.8274{\pm}0.4518$	-2.217 ± 0.374	-0.391 ± 0.485	20.182	2.015	81.7	$0.80 {\pm} 0.31$
M 70	18.146204	62.224356	$-0.0819{\pm}0.3053$	-2.257 ± 0.254	-0.118 ± 0.331	19.723	1.877	81.5	$1.06 {\pm} 0.20$
M 71	17.850667	62.283103	$-0.0474{\pm}0.3613$	-1.989 ± 0.310	-0.129 ± 0.386	19.849	1.864	80.8	$1.00 {\pm} 0.22$
M 72	18.007184	62.173593	$0.5696{\pm}0.2156$	$-1.956 {\pm} 0.171$	-0.120 ± 0.233	19.070	1.976	80.8	$1.26 {\pm} 0.10$
M 73	17.864819	62.288952	0.0292 ± 0.2056	-1.843 ± 0.168	-0.755 ± 0.238	19.105	1.886	80.7	$1.25 {\pm} 0.10$

Таблица 2. (Продолжение)

Наличие сегрегации масс может быть установлено путем построения радиальных функций распределения звезд скопления для различных диапазонов масс и поиска различий между этими



Рис. 10. Радиальные функции распределения звезд Stock 3 для двух разных диапазонов масс: $M < 2.00 M_{\odot}$ и $M \ge 2.00 M_{\odot}$.

распределениями. Далее вычисляется временная шкала релаксации скопления. Если возраст скопления меньше времени релаксации и в его структуре наблюдается явная массовая сегрегация, это указывает на то, что скопление образовалось таким образом. С другой стороны, если возраст скопления меньше времени релаксации и в его структуре нет признаков сегрегация масс, то можно сделать вывод, что сегрегация масс является результатом динамических взаимодействий. Если возраст скопления больше, чем время релаксации, мы не сможем прийти к определенному заключению.

Для поиска сегрегации масс мы использовали критерий Колмогорова—Смирнова. Статистика Колмогорова—Смирнова определяется максимальной разностью между функциями распределения двух выборок с размерами *n* и *m*:

$$D_{n,m} = \sup_{x} |F(x) - G(x)|.$$
 (11)

Нулевая гипотеза о том, что два распределения схожи, отвергается, если $D_{n,m}$ больше критического значения $D_{\rm crit}$, вычисленного для соответствующих размеров выборок и для определенного уровня значимости α .

На рис. 10 представлены радиальные функции распределения звезд скопления для двух различных диапазонов масс: $M < 2.00 M_{\odot}$ и $M \ge 2.00 M_{\odot}$. Рисунок показывает, что распределения статистически различаются на уровне значимости 5%. Вероятность сходства, *p*-значение, равна 3.4

Чтобы узнать, является скопление динамически стационарным или нет, мы оценили время релаксации T_R , которое можно определить как время, за которое распределение скоростей звезд становится максвелловским, и рассчитывается по следующему уравнению:

$$T_R = \frac{8.9 \times 10^5 \sqrt{N} r_h^{1.5}}{\sqrt{\langle m \rangle} \log(0.4N)},\tag{12}$$

где N — число вероятных звезд скопления, а r_h — радиус половины массы в парсеках, вычисляемый с помощью уравнения из Larsen (2006):

$$r_h = 0.547 r_c \left(\frac{r_t}{r_c}\right)^{0.486},$$
 (13)

где r_t — это приливной радиус, который будет определен в следующем разделе. Средняя масса звезд скопления в единицах солнечной массы в уравнении (12) может быть вычислена с помощью соотношения $\langle m \rangle = M_{\rm cl}/N$, где $M_{\rm cl}$ масса скопления, что дает $\langle m \rangle$ равную 1.86 M_{\odot} . Скопление считается динамически стационарным, если $\tau = \text{Age}/T_R \gg 1$, где τ известен как параметр динамической эволюции. Время релаксации для Stock 3 составляет 5.28 ± 0.94 млн лет, что близко к его возрасту, следовательно, оно еще не является динамически стационарным. Скопление демонстрирует сегрегацию масс в своей внутренней структуре, однако его возраст больше, чем время релаксации, и, как следствие, такой результат не может разрешить дискуссию о феномене сегрегации масс.

9. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЛИПСОИДА СКОРОСТЕЙ И ТОЧКА СХОЖДЕНИЯ

9.1. Движение звезд и кинематическая структура

Мы оценили время испарения ($\tau_{\rm ev} \approx 10^2 T_R$), которое определяется как время, необходимое для выброса всех звезд скопления в результате внутренних взаимодействий (Adams and Myers, 2001); звезды с малой массой продолжают покидать скопление — в основном с низкими скоростями через точки Лагранжа (Кüpper et al., 2008). Чтобы скопление оставалось гравитационно-связанным при наличии разрушительных эффектов в Галактике, скорости должны быть меньше, чем скорость убегания $V_{\rm esc}$, равная

$$V_{\rm esc} = R_{\rm gc} \sqrt{\frac{2GM_{\rm cl}}{3r_t^3}},$$

которая является функцией общей массы скопления и приливного радиуса (Elsanhoury et al., 2018; Elsanhoury, 2021; Bisht et al., 2020; 2021; 2022). Приливной радиус определяется как расстояние, на котором нейтрализуются две противоположные силы: одна, вызванная собственной гравитацией скопления, и другая вследствие гравитационного притяжения к центру Галактики. Приливной радиус



Рис. 11. Графики *UVW*-компонент пространственной скорости по галактическим координатам для звезд скопления Stock 3. *U* направлена к антицентру Галактики, *V* — в направлении вращения Галактики, а *W* — к Северному полюсу Галактики.



Рис. 12. АД-диаграмма. Красным плюсом отмечено положение апекса.

может быть вычислен с помощью уравнения из Jeffries et al. (2001):

$$r_t = 1.46 M_{\rm cl}^{1/3}.$$
 (14)

Найдено, что приливной радиус равен 7.50 ± 0.28 пк.

Чтобы выделить гравитационно-связанную систему звезд, характеризующуюся параллельностью и равенством их движений в ограниченном объеме пространства внутри Галактики, мы исследовали параметры эллипсоида скоростей с помощью вычислительного алгоритма, разработанного Elsanhoury et al. (2018), Bisht et al. (2020, 2021, 2022), Elsanhoury (2021). У звезд скопления общие скорости вдоль луча зрения Vr. Лучевая скорость Stock 3 равна -6.00 км^{-1} (Kharchenko et al., 2013). Компоненты скорости (V_x, V_y, V_z) вдоль осей x, y и z в системе координат относительно Солнца вычислены с использованием уравнения (9) из Elsanhoury et al. (2022). Вычисления в этом разделе

АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ том 80 № 2 2025

выполнялись только по звездам скопления с положительными параллаксами.

Компоненты пространственных скоростей (U, V, W) звезд скопления рассчитаны по уравнению (10) из Elsanhoury et al. (2022). Распределения этих пространственных скоростей показаны на рис. 11. Из рисунка можно сделать вывод, что у рассеянного скопления Stock 3 протяженный диапазон скоростей по UVW. Можно вычислить положение апекса, который определяется как точка (A, D) на небесной сфере, к которой сходятся векторы скоростей. Мы использовали метод AD-диаграмм, предложенный Chupina et al. (2001; 2006), где они рассчитывали экваториальные координаты точки схождения путем усреднения компонент пространственных скоростей (V_x, V_y, V_z) звезд скопления следующим образом:

$$A = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\overline{V}_y}{\overline{V}_x}\right), \quad D = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\overline{V}_z}{\sqrt{\overline{V}_x^2 + \overline{V}_y^2}}\right).$$
(15)

На рис. 12 показаны экваториальные координаты (A, D) апекса Stock 3; численные результаты, а также параметры эллипсоида скорости приведены в таблице 3.

9.2. Другие параметры кинематической структуры 9.2.1. Центр скопления (x_c, y_c, z_c)

Положение центра скопления было рассчитано по уравнению (12) из Elsanhoury et al. (2022).

9.2.2. Компоненты скорости Солнца

Компоненты скорости Солнца ($U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}$) задаются как $U_{\odot} = -\overline{U}, V_{\odot} = -\overline{V}, W_{\odot} = -\overline{W}$.

$$S_{\odot} = \sqrt{\overline{U}^2 + \overline{V}^2 + \overline{W}^2}, \qquad (16)$$



Рис. 13. Пространственная морфология Stock 3 в гелиоцентрических декартовых координатах.

а положение апекса Солнца (l_A, b_A) в галактических координатах определяется пространственной скоростью:

$$l_A = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{-\overline{V}}{\overline{U}}\right), \quad b_A = \sin^{-1}\left(\frac{-\overline{W}}{S_{\odot}}\right).$$
 (17)

Теперь, если мы рассмотрим положение вдоль осей x, y, z прямоугольных координат, связанных с экваториальной системой, то компоненты скорости Солнца $\dot{X}_{\odot} = -\overline{V}_x, \ \dot{Y}_{\odot} = -\overline{V}_y, \ \dot{Z}_{\odot} = -\overline{V}_z$. Аналогично

$$S_{\odot} = \sqrt{(\dot{X}_{\odot})^2 + (\dot{Y}_{\odot})^2 + (\dot{Z}_{\odot})^2}, \qquad (18)$$

$$\alpha_A = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\dot{Y_{\odot}}}{\dot{X_{\odot}}} \right),$$

$$\delta_A = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\dot{Z_{\odot}}}{\sqrt{(\dot{X_{\odot}})^2 + (\dot{Y_{\odot}})^2}} \right), \quad (19)$$

где α_A и δ_A — прямое восхождение и склонение апекса Солнца, а S_{\odot} рассматривается как абсолютное значение скорости Солнца относительно исследуемой группы.

9.2.3. Пространственная морфология Stock 3

Мы проанализировали пространственное положение звезд скопления в гелиоцентрических декартовых координатах (X, Y, Z):

$$X = d\cos\delta\cos\alpha, \ Y = d\cos\delta\sin\alpha, \ Z = d\sin\delta.$$
(20)

Таблица 3. Полученные динамические и кинематические параметры Stock 3

Параметр	Значение					
T_R , Myr	5.28 ± 0.94					
$ au_{ m ev}$, Myr	528 ± 94					
au	3.03					
$V_{ m esc},{ m kms^{-1}}$	315.29 ± 17.76					
\overline{V}_x , km s ⁻¹	21.04 ± 4.59					
\overline{V}_y , km s ⁻¹	-39.76 ± 6.31					
\overline{V}_z , km s ⁻¹	-10.83 ± 3.29					
A, deg	-62.12 ± 0.13					
D, deg	-13.54 ± 0.28					
\overline{U} , km s ⁻¹	38.85 ± 6.23					
\overline{V} , km s ⁻¹	19.86 ± 4.46					
\overline{W} , km s ⁻¹	-15.37 ± 3.92					
x_c , pc	2056.30 ± 45.35					
y_c , pc	669.13 ± 25.87					
<i>z_c</i> , pc	4111.43 ± 64.12					
S_{\odot} , km s ⁻¹	46.26 ± 6.8					
(l_A, b_A) , deg	-27.08, 19.41					
(α_A, δ_A) , deg	-62.12, 13.54					

Трехмерная морфология скопления показана на рис. 13, и заметно, что звезды скопления расположены вдоль вытянутой пространственной области, особенно в XZ-плоскости. Эту вытянутость можно рассматривать как быстрый выброс газа и вириализацию (Pang et al., 2021).

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе мы рассчитали фотометрические и астрометрические параметры рассеянного звездного скопления Stock 3, используя Gaia DR3. Мы нашли 73 наиболее вероятные звезды скопления с вероятностью принадлежности $P_{\mu} \ge 80\%$. Все параметры были получены с использованием этих звезд. Наши результаты довольно хорошо согласуются с параметрами, полученными в самых последних исследованиях, приведенных в таблице 1. Основные выводы данной работы можно резюмировать следующим образом.

Координаты центра скопления:

 $\alpha = 01^{h}12^{m}9.40, \quad \delta = +62^{\circ}15'23.08.$

Радиус скопления оценивается как 5.60 ± 0.43 . Радиус представляет собой расстояние от центра

скопления, на котором плотность скопления сливается с плотностью фона.

Используя наиболее вероятные звезды скопления, идентифицированные с помощью данных Gaia DR3 о собственных движениях, мы построили гистограммы собственных движений и параллаксов. Результаты расчетов:

> $\mu_{\alpha} \cos \delta = -2.067 \pm 0.017 \text{ Mcg rog}^{-1},$ $\mu_{\delta} = 0.466 \pm 0.019 \text{ Mcg rog}^{-1},$ $\varpi_{\text{corr}} = 0.312 \pm 0.035 \text{ Mcg};$

соответствующее расстояние $d = 3.20 \pm 0.36$ кпк.

Используя Gaia DR3, мы построили диаграмму «цвет—звездная величина» и сопоставили ее с теоретическими изохронами Marigo et al. (2017), определив возраст скопления как 16 ± 4 млн лет. Расстояние по изохронам составляет 2945 ± 700 пк, что близко к расстоянию, полученному по параллаксу.

Затем мы вычислили расстояние скопления от плоскости Галактики (Z_{\odot}), проекции его расстояния от Солнца на плоскость Галактики (X_{\odot} и Y_{\odot}), а также расстояние от Галактического центра ($R_{\rm GC}$); все результаты перечислены в таблице 4.

Были получены общая масса скопления и наклон начальной функции масс, который хорошо согласуется со значением Солпитера (Salpeter, 1955):

$$M_{\text{Stock 3}} = 135.54 \pm 15.13 \ M_{\odot}, \quad \alpha = 2.24 \pm 0.69.$$
(21)

Вычисленное время релаксации для Stock 3 показало, что скопление не является динамически стационарным. У него также статистически значимая сегрегация масс. Наблюдаемая сегрегация масс может быть связана с динамическими взаимодействиями между звездами скопления.

Мы представили оценки компонент пространственной скорости UVW, которые использованы для определения скорости Солнца относительно скопления, S_{\odot} , равной 46.26 км с⁻¹.

Наконец, получены кинематические параметры и параметры эллипсоида скоростей, а также определено положение апекса Stock 3 ($-62^{\circ}12$, $-13^{\circ}54$) с помощью метода AD-диаграмм. Также по пространственным положениям звезд (X, Y, Z) представлена морфология скопления.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим анонимного рецензента за ценные комментарии и предложения. В этой работе использовались данные миссии Gaia Европейского космического агентства (https://www.cosmos. esa.int/gaia), обработанные Консорциумом по обработке и анализу данных Gaia (DPAC,

АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ том 80 № 2 2

Таблица 4. Сводка результатов, полученных для Stock 3 в настоящей работе

Параметр	Значение				
α , deg	18.039268				
δ , deg	62.25641				
l, b, \deg	125.335, -0.520				
r, arcmin	5.60 ± 0.43				
$(m-M)_{\rm obs},$ mag	15.0 ± 0.3				
$E(G_{BP} - G_{RP})$, mag	1.25 ± 0.1				
E(B-V), mag	0.97 ± 0.1				
A_G , mag	2.66 ± 0.24				
d(m-M), kpc	2.945 ± 0.700				
Age, Myr	16.00 ± 4.00				
arpi, мсд	0.3122 ± 0.0351				
d(arpi), kpc	3.2031 ± 0.3601				
$\mu_{\alpha}\cos\delta$, мсдгод ⁻¹	-2.0673 ± 0.0173				
μ_{δ} , мсдгод $^{-1}$	-0.4657 ± 0.0192				
$N_{ m stars}$	73				
X_{\odot} , kpc	-1.85 ± 0.20				
Y_{\odot} , kpc	2.61 ± 0.20				
Z_{\odot} , kpc	-0.03 ± 0.20				
$R_{ m GC}$, kpc	10.39 ± 0.10				
$M_{ m cluster}, M_{\odot}$	135.54 ± 15.13				
α	2.24 ± 0.69				

https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/ consortium). Финансирование DPAC было предоставлено национальными учреждениями, в частности учреждениями, участвующими в Многостороннем соглашении Gaia.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы выражают свою признательность деканату по научным исследованиям Университета Северной Границы, Арар, Королевство Саудовская Аравия, за финансирование этой исследовательской работы через проект NBU-FFR-2025-237-01.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

2025

- 1. F. C. Adams and P. C. Myers, Astrophys. J. **553** (2), 744 (2001). DOI:10.1086/320941
- 2. G. C. Arenou et al. (Gaia Collab.), Astron. and Astrophys. 674, id. A34 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243782
- 3. C. A. L. Bailer-Jones, D. Teyssier, L. Delchambre, et al., Astron. and Astrophys. 674, id. A41 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243232
- 4. D. Bisht, W. H. Elsanhoury, Q. Zhu, et al., Astron. J. 160 (3), id. 119 (2020). DOI:10.3847/1538-3881/ab9ffd
- 5. D. Bisht, Q. Zhu, W. H. Elsanhoury, et al., Publ. Astron. Soc. Japan **73** (3), 677 (2021). DOI:10.1093/pasj/psab029
- D. Bisht, Q. Zhu, W. H. Elsanhoury, et al., Astron. J. 164 (5), id. 171 (2022). DOI:10.3847/1538-3881/ac8cf4
- 7. J. Bland-Hawthorn, S. Sharma, T. Tepper-Garcia, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. 486 (1), 1167 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz217
- 8. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), Astron. and Astrophys. 649, id. A1 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039657
- 9. Ł. Bukowiecki, G. Maciejewski, P. Konorski, and A. Strobel, Acta Astronomica **61** (3), 231 (2011). DOI:10.48550/arXiv.1107.5119
- 10. J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis, Astrophys. J. **345**, 245 (1989). DOI:10.1086/167900
- L. Casagrande and D. A. VandenBerg, Monthly Notices Royal Astron. Soc. 479 (1), L102 (2018). DOI:10.1093/mnrasl/sly104
- N. V. Chupina, V. G. Reva, and S. V. Vereshchagin, Astron. and Astrophys. **371**, 115 (2001). DOI:10.1051/0004-6361:20010337
- N. V. Chupina, V. G. Reva, and S. V. Vereshchagin, Astron. and Astrophys. 451 (3), 909 (2006). DOI:10.1051/0004-6361:20054009
- W. S. Dias, B. S. Alessi, H. Monteiro, and J. R. D. Lépine, Astron. and Astrophys. 389, 871 (2002). DOI:10.1051/0004-6361:20020668
- W. S. Dias, H. Monteiro, T. C. Caetano, et al., Astron. and Astrophys. 564, id. A79 (2014). DOI:10.1051/0004-6361/201323226
- W. H. Elsanhoury, J. Astrophys. and Astron. 42 (2), article id. 90 (2021). DOI:10.1007/s12036-021-09771-x
- W. H. Elsanhoury, M. Y. Amin, A. A. Haroon, and Z. Awad, J. Astrophys. and Astron. 43 (1), article id. 26 (2022). DOI:10.1007/s12036-022-09810-1
- W. H. Elsanhoury, E. S. Postnikova, N. V. Chupina, et al., Astrophys. and Space Sci. 363 (3), article id. 58 (2018). DOI:10.1007/s10509-018-3268-3
- 19. M. Fich and S. Tremaine, Annual Rev. Astron. Astrophys. **29**, 409 (1991). DOI:10.1146/annurev.aa.29.090191.002205

- 20. T. Fukushige and D. C. Heggie, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **318** (3), 753 (2000). DOI:10.1046/j.1365-8711.2000.03811.x
- G. Gilmore, S. Randich, M. Asplund, et al., The Messenger 147, 25 (2012).
- 22. T. M. Girard, W. M. Grundy, C. E. Lopez, and W. F. van Altena, Astron. J. 98, 227 (1989). DOI:10.1086/115139
- 23. R. D. Jeffries, M. R. Thurston, and N. C. Hambly, Astron. and Astrophys. **375**, 863 (2001). DOI:10.1051/0004-6361:20010918
- 24. G. C. Joshi, Y. C. Joshi, S. Joshi, and R. K. Tyagi, New Astronomy 40, 68 (2015). DOI:10.1016/j.newast.2015.04.003
- 25. Y. C. Joshi, A. K. Dambis, A. K. Pandey, and S. Joshi, Astron. and Astrophys. **593**, id. A116 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201628944
- 26. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, E. Schilbach, et al., Astron. and Astrophys. **558**, id. A53 (2013). DOI:10.1051/0004-6361/201322302
- 27. I. King, Astron. J. **67**, 471 (1962). DOI:10.1086/108756
- 28. A. H. W. Küpper, A. MacLeod, and D. C. Heggie, Monthly Notices Royal Astron. Soc. 387 (3), 1248 (2008). DOI:10.1111/j.1365-2966.2008.13323.x
- 29. S. S. Larsen, arXiv e-prints astro-ph/0606625 (2006). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0606625
- D. J. MacConnell, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conf. Ser., 25, 73 (2006).
- P. Marigo, L. Girardi, A. Bressan, et al., Astrophys. J. 835 (1), article id. 77 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/835/1/77
- 32. H. Monteiro, W. S. Dias, A. Moitinho, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **499** (2), 1874 (2020). DOI:10.1093/mnras/staa2983
- 33. M. Netopil, E. Paunzen, and G. Carraro, Astron. and Astrophys. 582, id. A19 (2015). DOI:10.1051/0004-6361/201526372
- 34. X. Pang, Z. Yu, S.-Y. Tang, et al., Astrophys. J. 923 (1), id. 20 (2021). DOI:10.3847/1538-4357/ac2838
- 35. T. Prusti et al. (Gaia Collab.), Astron. and Astrophys. 595, id. A1 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201629272
- 36. S. Roeser, M. Demleitner, and E. Schilbach, Astron. J. 139 (6), 2440 (2010). DOI:10.1088/0004-6256/139/6/2440
- 37. N. Rowell, M. Davidson, L. Lindegren, et al., Astron. and Astrophys. 649, id. A11 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039448
- 38. E. E. Salpeter, Astrophys. J. 121, 161 (1955). DOI:10.1086/145971
- 39. L. Sampedro, W. S. Dias, E. J. Alfaro, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **470** (4), 3937 (2017). DOI:10.1093/mnras/stx1485
- 40. Z. Shao and J. Zhao, Acta Astronomica Sinica **37**, 377 (1996).

- 41. T. Sinha, S. Sharma, A. K. Pandey, et al., Monthly 4
 Notices Royal Astron. Soc. 493 (1), 267 (2020).
 DOI:10.1093/mnras/staa206
- 42. A. L. Tadross, Astronomische Nachrichten **326**(1), 19 (2005). DOI:10.1002/asna.200410335
- 43. K. P. Tian, J. L. Zhao, Z. Y. Shao, and P. B. Stetson, Astron. and Astrophys. Suppl. 131, 89 (1998). DOI:10.1051/aas:1998253
- 44. S. Tonkin, *Binocular Astronomy* (Springer-Verlag, London, 2007).
- 45. R. K. S. Yadav, D. P. Sariya, and R. Sagar, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **430** (4), 3350 (2013). DOI:10.1093/mnras/stt136
- 46. J. Zhong, L. Chen, M. B. N. Kouwenhoven, et al., Astron. and Astrophys. 624, id. A34 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201834334
- 47. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), Astron. and Astrophys. **674**, id. A1 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243940

Deep Photometric and Astrometric Investigation of the Non-relaxed Star Cluster Stock 3 using Gaia DR3

A. M. H. Ahmed¹, A. R. Youssef¹, M. S. El-Nawawy¹, W. H. Elsanhoury²

¹Cairo University, Giza, 12613 Egypt ²College of Science, Northern Borders University, Arar, 91431 Saudi Arabia

The study presents both photometric and kinematic Gaia DR3 analyses of the nonrelaxed open cluster Stock 3, which is found to be located at a distance of 2.95 ± 0.70 kpc and to have an age of 16 ± 4 Myr. We analyze the data to infer the cluster membership and thus determine the total mass, initial mass function, and the dynamical and kinematical status.

Keywords: astronomical databases: catalogues—techniques: photometric—parallaxes—proper motions—stars: luminosity function, mass function—Galaxy: open clusters and associations: individual: Stock 3