Определение членства и базовых параметров рассеянных звёздных скоплений на основе Big Data Gaia EDR3; рассеянное скопление Praesepe

А.С. Ходжаев*, Р.А. Гайсин, Р.Г. Каримов

Астрономический институт им. Улугбека АН РУз, ул. Астрономическая, 33, 100052, Ташкент, Узбекистан

Получена 10.05.2022, revised 12.12.2022

* Corresponding author: e-mail ash@astrin.uz Phone: +998 71 235 05 21

Детально изучено рассеянное звёздное скопление Praesepe на основе современных высокоточных данных наблюдений. Проведены обработка и анализ астрометрических, кинематических и фотометрических данных в широкой области небесной сферы, охватывающей рассеянное звёздное скопление Praesepe и его окрестности. В работе использованы наблюдательные данные из VLDB-хранилища данных космической обсерватории Gaia (EDR3 релиз от 11.2021). Обработка и анализ данных произведёны посредством программных продуктов ASteCA, TOPCAT в среде AstroPython, основанные на элементах искусственного интеллекта (принципы распределённого облачного вычислений в нейронных сетях и машинного обучения, BigData). Обнаружено 640 новых физических членов скопления. Полное число членов скопления Praesepe оценено нами как 1048. Рассчитаны базовые фундаментальные астрофизические параметры скопления. Полная масса скопления равна (560±13) M_o. Возраст скопления 737.9 млн. лет. Избыток цвета $E_{(B-V)}$=0.044±0.046, модуль расстояния $(m\text{-}M)_0$=6.357±0.001. Доля двойных звёзд в скоплении ~0.1±0.06. Анализ возможностей VLDB Gaia EDR3 показал полный охват $12\div17^m$ G, астрометрический предел 21^m G, фотометрический предел 20^m G, охват по лучевым скоростям $4\div13^m$ G с высокой точностью измерений, являющихся функцией блеска объекта. Построены прецизионные двумерная и векторная диаграммы собственных движений звёзд, карта распределения наиболее вероятных физических членов скопления, функция распределения их параллаксов, диаграмма цвет-светимость скопления и произведены расчёты по определению основных фундаментальных астрофизических параметров самого скопления.

Ключевые слова: Gaia (EDR3), рассеянные звёздные скопления, параметры.

The Praesepe open star cluster is studied in detail based on high-precision observational data. Processing and analysis of all astrometric, kinematic and photometric data are made in a wide area covering the Praesepe open star cluster and its environs. Observational data from the VLDB data of Gaia space observatory (EDR3 dated 11.2021) were used in the work. Processing and analysis of data were carried out using ASteCA, TOPCAT software, based on artificial intelligence basics (principles of distributed cloud computing in neural networks and machine learning, BigData). We discovered 640 new physical members of the cluster. The total number of the Praesepe cluster members is estimated by us as 1048. The basic fundamental astrophysical parameters of cluster have been calculated. The total mass of the cluster is (560±13) M_o. The age of the cluster is 737.9 Myrs. Color excess $E_{(B-V)}$=0.044±0.046, distance modulus $(m\text{-}M)_0$=6.357±0.001. The fraction of binary stars in the cluster is ~0.1±0.06. Gaia EDR3 capabilities analysis showed a complete coverage of $12\div17^m$G, an astrometric limit of 21^mG, a photometric limit of 20^mG, a radial velocity coverage of $4\div13^m$G with high measurement accuracy, which is a function of the object's brightness. In addition, we have built preci-

sion two-dimensional and vector proper motion diagrams of stars, a map of most probable physical cluster members, the parallax distribution function, cluster HRD, and made calculations to determine the main fundamental astrophysical parameters of the cluster itself.

Keywords: Gaia (EDR3), open star clusters, parameters.

DOI: https//doi.org/10.52304/.v24i4.376

I. Введение

Стремительное и мощное развитие инструментальной базы астрономических исследований, связанное, в первую очередь, с введением в строй и эффективной эксплуатацией современных крупных наземных адаптивных телескопов и многофункциональных космических телескопов привело к формированию сверхбольших (петабайтных) баз астрономических данных VLDB (Very Large Data Base), относящихся к классу Big Data, и возникновению принципиально нового метода изучения астрофизических объектов, получившего название Data Mining (см., н-р., [1-7]). Это, в свою очередь, потребовало разработки принципиально новых методов их обработки и анализа с применением элементов искусственного интеллекта (нейронные сети, распределённые (облачные) вычисления, машинное обучение разного уровня и т.п.) и способствовало ускорению разработок в этой новой области – астроинформатике [2, 3, 5-12]. Появилась система взаимодействующих архивов данных и программных инструментов, которые используют Интернет для формирования особой среды, в которой могут осуществляться оригинальные астрономические исследования – виртуальная обсерватория [13, 14]. Среди наиболее продуктивных космических проектов последних лет особо выделяется космическая обсерватория Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) [15], наблюдательные данные которой, согласно последним публикациям в журналах, входящих в WoS Q1, всё более становятся базой для глубокого и тонкого исследования звёздной составляющей нашей Галактики. В рамках совместного проекта с ведущим мировым и главным индийским центром астрофизических и космических исследований ARIES (Aryabhatta Research Institute of observational Sciences) по поиску и изучению нестационарных звёзд в скоплениях, нами была поставлена задача исследования ряда рассеянных звёздных скоплений, точного определения полного количества их членов, возможно полного набора звёздных характеристик всех членов, базовых астрофизических параметров самих скоплений, важных для определения их кинематики, динамики и эволюции на фоне Галактики путём тщательной обработки и анализа астрометрических, кинематических и астрофизических параметров звёзд в широком поле на небесной сфере, охватывающем эти скопления.

II. Описание объекта и методов исследования

II. 1. Объектная постановка задачи

В качестве первоначального объекта нами было выбрано рассеянное скопление Praesepe (в переводе на русский язык – Ясли, хотя имеется и другое название – Улей) в созвездии Рака. Астрономическая идентификация скопления NGC 2632 =M 44=Melotte 88=MWSC 1527. Небесные координаты центра скопления в экваториальной и галактической системах координат таковы: прямое восхождение α = RA(J2000)=08h 40m 13.0s, склонение δ = DEC(J2000)=+19°37′16″; галактическая долгота l = 205°,9195, галактическая широта b=+32°,4843. Это рассеянное звёздное скопление, одно из ближайших к Земле (по уточнённым данным его расстояние от Солнца около 187 пк [16, 17]) богатых скоплений, наряду с рядом других рассеянных скоплений Местного рукава Галактики или Рукава Ориона. В последнее время интенсивность всесторонних исследований этого скопления резко увеличилась, особенно с использованием данных космических обсерваторий Kepler, TESS и других. Применяются методы гирохронологии [18], производится поиск вспыхивающих звёзд в нём [19], определяются ограничения возраста скопления по амплитуде фотометрической переменности [20], исследуются карлики спектральных классов F, G, K, M – их активность, вращение, XUV-эволюция, экзопланеты вокруг них [21-23] и т.п. Всего согласно нашему библиографическому анализу только за период 01.2021-04.2022 гг. были опубликованы 92 статьи в изданиях WoS Q1, рассматривающие скопление Praesepe. Всё это указывает на то, что рассеянное звёздное скопление Praesepe всё еще является весьма актуальным, интересным и удобным для всестороннего исследования объектом, а также

©Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan, 2022

весьма важным в качестве экспериментальной лаборатории для отработки современных методик в рамках выполняемого нами международного проекта, для тестирования и отработки методик исследования звездных скоплений и ассоциаций. Следует также отметить, что рассеянное скопление имеет видимый диаметр около 70 минут дуги [24], но наиболее вероятно, что корона скопления (или в другой терминологии гало скопления) выходит далеко за видимые контуры скопления.

II.2. Базы данных проекта Gaia

Глубокое изучение кинематики и физики скоплений и их членов стало возможным на основе анализа VLDB орбитальной обсерватории Gaia [15, 25], его последнего (раннего) релиза Gaia EDR3 [26], который мы использовали в настоящей работе. За эталонную эпоху для Gaia DR3 (как Gaia EDR3, так и ожидаемого в скором времени полного релиза Gaia DR3), принята эпоха 2016.0. Позиции и собственные движения относятся к ICRS, с которой выравнивается оптический опорный кадр, определенный Gaia EDR3. Координата времени для Gaia EDR3 – это барицентрическая координата времени (TCB). Источники в каталоге Gaia однозначно отождествляются с помощью идентификатора источника Gaia, т.е. поля source_id в различных таблицах базы Gaia, с привязкой по координатам к более ранним обзорам, таким как HIPPARCOS, Pan-STARSS, SDSS и др. Полосы пропускания Gaia EDR3, описывающие фотометрическую систему, взяты из [27]. Здесь надо иметь в виду, что данные Gaia DR1 и Gaia DR2 представляются со своим собственным набором полос пропускания. Доступ к данным таков:

1. Gaia Archive [28] является основной точкой доступа к Gaia EDR3, но данные также подаются из центров VLDB партнеров (CDS, SSDC, AIP, ARI и др.) и ESASky. Данные могут быть извлечены из архива Gaia выполнением базового поиска с использованием веб-формы или выполнения запросов ADQL с последующей загрузкой соответствующих таблиц результатов. Также доступен программный доступ к архиву Gaia.

2. Набор данных Gaia EDR3 можно загрузить в сжатом формате CSV (~1,3 ТБ). Увеличенный размер по сравнению с Gaia DR2 в основном связан с добавлением дополнительной информации из генератора объектов Gaia (GOG) и снимка модели Вселенной Gaia (GUMS), а также с увеличением количества источников в каталоге.

II.3. Методы обработки и анализа данных

В связи с тем, что нами в работе были использованы VLDB (Big Data) космической обсерватории Gaia, в процессе обработки и анализа были применены современные программные продукты TOPCAT, ASteCA, использующие принципы распределённого расчёта в нейронных сетях и машинного обучения. Для определения основных параметров скопления мы использовали пакет автоматизированного анализа звездных скоплений ASteCA (Automated Stellar Cluster Analysis) [29]. ASteCA включает в себя байесовский анализ и алгоритм отсеивания звезд поля, способный определять вероятность членства, используя статистические оценки выделения истинного, физического, связанного скопления от случайных сверхплотностей (сгущений) в распределении звезд поля. Включенный в код набор функций использует астрометрические и фотометрические данные для получения точных и объективных значений для заданных координат центра скопления, радиуса, функции яркости и интегральной величины показателя цвета. ASteCA также предоставляет точные оценки фундаментальных параметров скоплений, таких как: металличность, возраст, покраснение и расстояние до скопления, методом подбора изохрон, основанном на генерации синтетических точек скопления из теоретических изохрон, и подбора максимального соответствия с помощью генетического алгоритма.

III. Результаты и обсуждение

III.1. Анализ предельных возможностей VLDB Gaia

Для определения степени охвата базой данных Gaia EDR3 рассматриваемых параметров, а также оценки предельных величин и точностей Gaia EDR3 нами проведён анализ совокупности данных, доступных в хранилищах и архивах баз данных по проекту Gaia.

Полнота обзора по блеску источников. Каталог Gaia EDR3 практически полон между $G=12^m$ и $G=17^m$ [30]. На ярком конце шкалы величин список источников может оказаться неполным из-за эффектов сатурации, а предельная величина возможности регистрации источника, как показал анализ всей совокупности данных, полученных миссией Gaia EDR3, зависит от положения его на небе. Однако, в поставленной нами задаче влияние этих эффектов несущественно, так как звёзды в рассматриваемой области не пре-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

дельно яркие, а из-за относительно небольшого размера площадки на небесной сфере, где расположено скопление, предельная величина по слабым звёздам практически одинакова в пределах всей площадки.

Комбинация охвата закона сканирования Gaia и фильтрации по качеству данных, которая была выполнена до релиза Gaia EDR3, действительно приводит к тому, что в некоторых областях неба отображаются флуктуации плотности источников, которые отражают структуру закона сканирования. Кроме того, в распределении источников существуют небольшие промежутки, например, вблизи ярких звезд. Однако на наше исследование, вследствие отсутствия таких ярких источников в выделенной нами площадке и с учётом того, что в используемом нами релизе проведена фильтрация за ложные флуктуации и артефакты, влияние этих эффектов исключено.

Точности определения астрометрических параметров. Неопределенности положения в используемом нами релизе составляют 0.01–0.02 миллисекунд дуги для звёзд с величиной $G<15^m$, 0.05 миллисекунд дуги около $G=17^m$, 0.4 миллисекунд дуги около $G=20^m$ и 1.0 миллисекунд дуги около $G=21^m$. Погрешности параллакса составляют 0.02–0.03 миллисекунд дуги для $G<15^m$, 0.07 миллисекунд дуги около $G=17^m$, 0.5 миллисекунд дуги около $G=20^m$ и 1.3 миллисекунд дуги около $G=21^m$.

Неопределенности собственного движения μ составляют 0.02–0.03 миллисекунд дуги/год для $G<15^m$, 0.07 миллисекунд дуги/год около $G=17^m$, 0.5 миллисекунд дуги/год около $G=20^m$ и 1.4 миллисекунд дуги/год около $G=21^m$.

В последнем релизе, используемом в настоящем исследовании, достигнуто значительное общее улучшение точности (сокращение систематических ошибок). Например, нулевая точка параллакса, полученная из привязки к внегалактическим источникам (галактикам, квазарам), составляет около 17 миллисекунд дуги. Как показал наш анализ, значительное уменьшение астрометрических погрешностей используемого релиза по сравнению с другими базами данных, включая более ранние релизы миссии Gaia, позволяют на порядок более точное определение положения звёзд и их собственных движений, а значит и их скоростей, и кинематики в целом.

Фотометрические точности. Погрешности фотометрии в G-полосе составляют ~0.3 миллимагнитуды. Фотометрические погрешности в полосе G_{BP} составляют ~0.9 миллимагнитуды для $G<13^m$, 12 миллимагнитуд при $G=17^m$ и 108 миллимагнитуд при $G=20^m$. Погрешности фотометрии в полосе G_{RP} составляют ~0.6 миллимагнитуды для $G<13^m$, 6 миллимагнитуд при $G=17^m$ и 52 миллимагнитуды при $G=20^m$. Указанные ошибки измерений блеска звёзд в среднеполосной фотометрической системе лучше доступных измерений с наземными инструментами, что позволяет значительно точнее судить о блеске, светимости и цветовых характеристиках звёзд.

Охват и ошибки измерения лучевых скоростей Vr. Как оказалось, Gaia EDR3 содержит медианные лучевые скорости Gaia DR2 для примерно 7.21 миллиона звезд со средней величиной G (блеском) от ~4^m до ~13^m и с эффективной температурой (T_{eff}) в диапазоне от ~3550 К до 6900 К. При этом средняя точность определения лучевых скоростей для ярких звёзд ~200÷300 м с$^{-1}$, а в случае слабых звёзд ~ 1.2 км с$^{-1}$, для звёзд с T_{eff}=4750 К и ~3.5 км с$^{-1}$ для звёзд с T_{eff}=6500 К. Перед релизом Gaia EDR3 проведена дополнительная фильтрация лучевых скоростей, в результате которой удалено около 4000 источников с неточно или некорректно определёнными лучевыми скоростями. Эти характеристики учтены в настоящем исследовании. Однако малая доля звёзд с измеренными лучевыми скоростями в исследуемой области неба, как и в VLDB Gaia в целом (≤0.4%), уменьшающие статистическую значимость результатов, получаемых на основе анализа лучевых скоростей, привели нас к решению не использовать лучевые скорости для отдельного специального рассмотрения, а привлекать только в процессе общего обсуждения.

III.2. Рассеянное скопление Praesepe

На основе таргетной обработки данных по звёздам в области звёздного скопления Praesepe были построены двумерное распределение членов скопления в проекции на картинную плоскость небесной сферы, скалярная и векторная диаграммы собственных движений, гистограммы распределения звёзд скопления по собственным движениям, лучевым скоростям, параллаксам, начальная функция масс и функция светимости для членов скопления. На рис. 1 представлена классическая двумерная (скалярная) диаграмма распределения собственных движений звёзд на площадке 100 квадратных градусов дуги (10×10°) с центром

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

RA(J2000)=$08^h40^m13^s.0$, DEC(J2000) =+19°37′16″, полностью охватывающей как ядро, так и внешние области скопления, включая гало-корону.

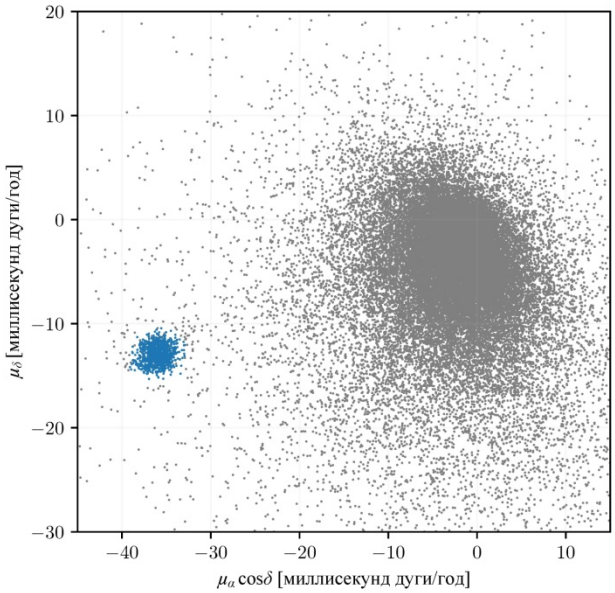


Рисунок 1. Диаграмма собственных движений звёзд в области рассеянного звёздного скопления Praesepe.

Как явно видно из рис. 1, звёзды общего поля (совокупности объектов переднего ближнего фона и заднего дальнего фона), не связанные со скоплением Praesepe, тесно группируются вокруг малых значений собственных движений μ, близких к нулю, охватывая достаточно большой диапазон значений μ по прямому восхождению и склонению (тёмное сгущение), в то время как члены скопления чётко группируются как тёмное пятно, меньшее по размеру, около значений с центром $\mu_\alpha\cos\delta|\mu_\delta$={–36.383; –12.654} милисекунд дуги/год, с разбросом в диапазоне $\Delta\mu_\alpha\cos\delta$=(–32.582÷–40.185) миллисекунд дуги/год и $\Delta\mu_\delta$=(–12.424÷–12.885) миллисекунд дуги/год. Они на рисунке располагаются чуть ниже и значительно левее звёзд поля. Всего нами было обнаружено 1048 звезд в пределах площадки 10°×10°, охватывающей ядро и гало-корону скопления Praesepe, имеющих вероятность физической связи со скоплением, определённую согласно апробированным и общепринятым критериям, описанным в работе [29] в диапазоне 70÷100%, из которых только 408 звезд совпадают по координатам с известными, обнаруженными до нашего исследования членами скопления, каталогизируемыми в режиме реального времени во всемирной онлайн базе данных SIMBAD@CDS [31]. Таким образом, обнаружено 640 новых вероятных членов скопления, что существенно превосходит число обнаруженных до нас, согласно [31], и значительно превышает число членов (70), открытых до 2015 г. и представленных в онлайн каталоге Dias+ 2002–2015 оптически видимых рассеянных скоплений [32]. По предварительным оценкам ряда авторов [33, 34] и в согласии с полученными нами результатами, полное число членов гораздо больше данных [31, 32], всего в скоплении содержится не менее 1000 гравитационно-связанных звезд.

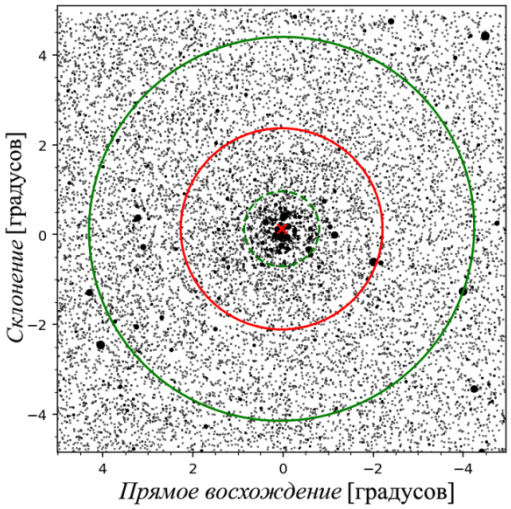


Рисунок 2. Карта распределения вероятных членов рассеянного звёздного скопления Praesepe.

Карта распределения выделенных вероятных членов звёздного скопления, включая обнаруженные нами новые члены, показана на рис. 2. Кругами указаны апертуры, используемые в анализе (1, 4 и 8 градусов дуги).

Для звёзд, наиболее вероятных членов скопления Praesepe, построена двумерная диаграмма векторов собственных движения звёзд (так называемая векторная диаграмма собственных движений скопления), которая показана на рис. 3.

Ясно видна строгая коллинеарность движения звёзд с незначительными различиями по абсолютным значениям скоростей этого движения. Лучевые скорости, полученные разными группами исследователей [35, 36], совпадают в пределах ошибок измерений и указывают на удаление скопления Praesepe от Солнца со средней скоростью V_r=+34.61 км/с. Рассчитанные нами по собственным движениям линейные тангенциальные скорости скопления Praesepe в картинной плоскости V_{RA}=–32.28757 км/сек и V_{DEC}=–11.22961 км/сек,

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

т.е V_t=–34.18698 км/сек, примерно такого же порядка и приводят к абсолютному значению пространственной скорости скопления V=48.65 км/сек.

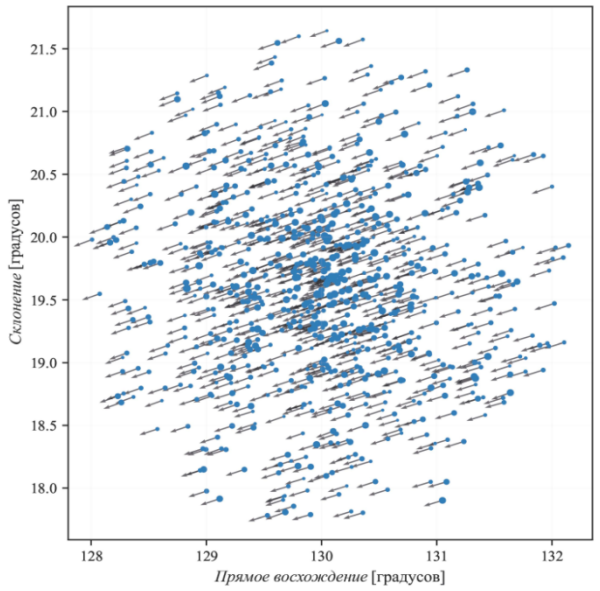


Рисунок 3. Диаграмма векторов собственных движения звёзд скопления Praesepe.

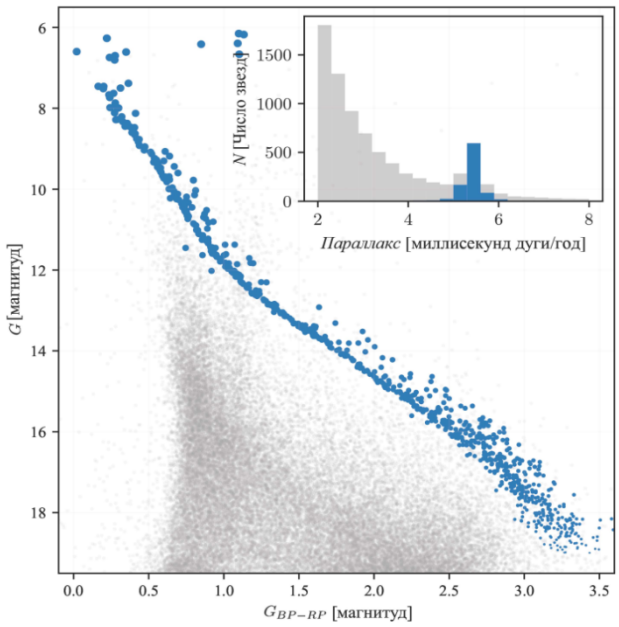


Рисунок 4. ГРД и параллаксы для звёзд в области рассеянного звёздного скопления Praesepe.

На основе данных фотометрических измерений VLDB Gaia EDR3 нами построена диаграмма цвет-светимость, представляющая аналог классической эволюционной диаграммы Герцшпрунга-Рассела (ГРД) звёзд в области скопления Praesepe, которая показана на рис. 4. В правом верхнем углу встроена гистограмма распределения параллаксов звёзд-членов рассеянного скопления Praesepe, соответствующая выделенным нами вероятным членам скопления. Гистограмма параллаксов имеет пик на значении 5.44 миллисекунд дуги. Средний параллакс звёзд скопления оказался 5.38 миллисекунд дуги. Видно тесное группирование вокруг этого значения, что может свидетельствовать о компактности самого скопления в пространстве.

Более крупными тёмными (синими) точками на рис. 4 отображены звёзды-члены скопления Praesepe. Серыми точками отображены звёзды общего поля. Высокая точность фотометрических данных Gaia EDR3 позволила наилучшим образом воспроизвести саму диаграмму и все её основные детали. Наблюдательными данными чётко прочерчивается главная последовательность (ГП) нулевого возраста, хорошо выделяется ветвь красных гигантов, видны и так называемые голубые страгглеры (*blue stragglers* или «голубые бродяги»), а также субкарлики и вероятные белые карлики (расположены, согласно присущим им светимостям и цветовым показателям, ниже ГП). В правой нижней области ГРД имеется группа звёзд пониженной светимости и температуры – потенциальных коричневых карликов. Кроме перечисленных выше звёзд также чётко выделяется последовательность двойных и кратных звёзд, расположенная выше ГП. Здесь следует отметить, что к настоящему времени идентифицировано одиннадцать белых карликов – членов скопления, представляющих заключительную фазу эволюции самых массивных звезд скопления, которые изначально принадлежали к спектральному классу B [37]. Однако считалось, что коричневые карлики чрезвычайно редки в этом скоплении [38], вероятно потому, что они были потеряны из-за приливов и отливов из гало [34]. По характеристическим параметрам нами были выявлены звёзды, с наибольшей вероятностью могущие относиться к указанным выше классам звёзд для возможного их дальнейшего более детального исследования.

Расчётная ГРД звёзд скопления Praesepe с изохроной, наложенной на выделенные вероятные члены скопления методом подбора теоретических изохрон с учетом корреляции с основными фундаментальными параметрами, протестированными байессовским анализом, и результаты расчетов основных фундаментальных астрофизических па-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

раметров скопления, приведены на рис. 5 и таблице.

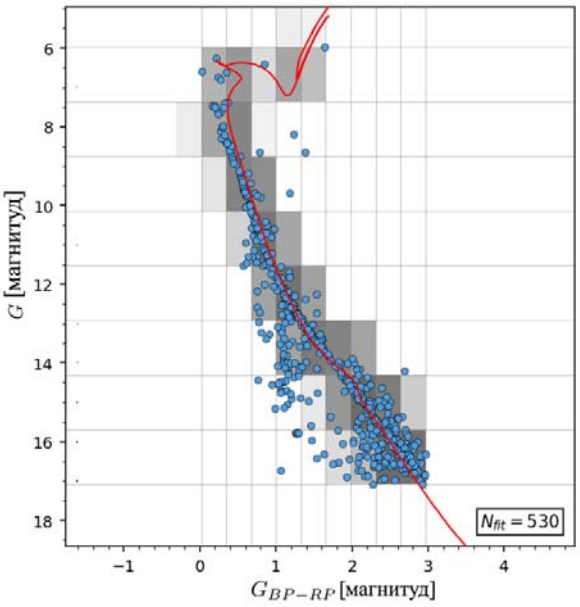


Рисунок 5. ГРД для звёзд области рассеянного звёздного скопления Praesepe с изохроной.

Таблица. Расчетные основные фундаментальные параметры скопления Praesepe.

Log (age)	$E(B\text{-}V)$	$(m\text{-}M)_0$	M [M_o]	b_{frac}
8,868 ± 0,009	0,044 ± 0,046	6,357 ± 0,001	560 ± 13	0,1± 0,06

При расчётах изохронного приближения и основных фундаментальных астрофизических параметров скопления были также использованы данные из работы Кроупа [39]. Как следует из рис. 5, теоретическая изохрона однозначно ложится на ГП скопления, что увеличило точность наших расчётов и привело к хорошему соответствию наблюдательным данным. В столбцах таблицы последовательно приведены логарифм возраста, избыток цвета, модуль расстояния, полная масса скопления и доля двойных звёзд в скоплении. Наши вычисления дали соответствующий предыдущим оценкам, но более уточнённый, возраст для скопления, равный 737.9 млн лет. Это указывает на то, что скопление не старое и продолжает активно эволюционировать. В результате ожидается возникновение новых красных гигантов (формированию ветви гигантов) и новых белых карликов. Малый избыток цвета свидетельствует как о незначительной фракции межзвёздного газово-пылевого вещества в направлении от Солнца к скоплению, так и об отсутствии (вследствие переработки в звёздный контент и «выметании» за пределы скопления остатков) этой материи внутри самого скопления.

Расчёты расстояния до скопления осуществлены нами двумя способами: методом параллакса и с помощью ГРД (используя исправленный на поглощение модуль расстояния $(m\text{-}M)_0$), что дополнительно повысило точность его вычисления. Полученное значение 186.828 пс = $5.764909711554\times10^{15}$ км соответствует более ранним оценкам [16, 17], немного их уточняя. Рассчитанная нами полная масса скопления оказалась в пределах динамического диапазона устойчивости рассеянного скопления Praesepe в поле приливных сил Галактики, что приводит к сохранению формы скопления и отсутствию комы (хвоста), как у некоторых других рассеянных и даже шаровых скоплений. Такое явление может привести к распаду и диссипации скопления с комой в течение нескольких оборотов его вокруг галактического центра. Так, недавние исследования Каррера и др. [40] показали, что с точки зрения динамики, большинство рассеянных скоплений подвергаются диссипации в поле приливных сил Галактики в более короткие сроки ≈1 млрд. лет. Вместе с тем, в скоплении обнаружено явление динамической сегрегации масс [41]. Кроме этого, наши расчёты для скопления Praesepe также показали, что не менее десятой части его членов являются двойными (и кратными) звёздами. Это полностью соответствует выводам, сделанным на основе анализа ГРД.

Результаты настоящего исследования подтверждают гипотезу, что рассеянные звёздные скопления Pleiades и Hyades предположительно генетически связаны со скоплением Praesepe, т.к. имеют близкую локализацию в пространстве, одинаковую кинематику и вектор скорости движения в пространстве, т.е. возникли в одном общем родительском молекулярном облаке, относящемся к классу Гигантских молекулярных облаков. В свою очередь, скопление Pleiades связано так называемыми «слоновыми хоботами» с комплексом Тёмных облаков в созвездии Тельца – Taurus Dark Clouds (четыре Т-ассоциации, молекулярные и газо-пылевые облака), близким по локализации и кинематике к Pleiades. Очевидно, что совместное исследование упомянутых объектов может дать ключ к разгадке их происхождения и дальнейшей эволюции.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

IV. Заключение

На основе обработки и анализа VLDB-данных космической обсерватории Gaia (последний EDR3 релиз) с применением современных методов, основанных на элементах искусственного интеллекта, были построены прецизионные двумерная и векторная диаграммы собственных движений звёзд в широкой области небесной сферы, охватывающей рассеянное звёздное скопление Praesepe, карта распределения наиболее вероятных физических членов скопления, гистограмма распределения их параллаксов, диаграмма цвет-светимость скопления и произведены расчёты по определению основных фундаментальных астрофизических параметров самого скопления. Полученные нами основные результаты в данной работе таковы.

Проведена оценка полного числа членов с широким охватом окрестностей оптически видимог контура скопления для учёта его физических членов не только в ядерной и центральных частях скопления, но и в его короне (гало). При видимых угловых размерах скопления примерно в 1.2 градуса нашим анализом был охвачен сегмент небесной сферы 10×10°. Выявлены 1048 звёзд, вероятных членов скопления Praesepe, из которых 640 впервые.

Определены основные астрофизические параметры скопления, такие как полная масса и возраст скопления, избыток цвета, модуль расстояния и доля двойных звёзд в скоплении. Полученные параметры указывают, что звёздное скопление Praesepe относится по возрасту к среднему по возрастам классу рассеянных звёздных скоплений, т.е. является промежуточным между молодыми (10^5–10^6 лет и старыми 10^9–10^{10} лет). Полная расчётная масса скопления достаточна для относительной устойчивости скопления в поле приливных возмущений Галактики. Малый показатель цвета свидетельствует о незначительном поглощении по лучу зрения на скопление. Практическое отсутствие межзвёздной материи как в направлении до, так и внутри скопления также указывает на отсутствие условий для вторичного индуцированного (триггерного) процесса звездообразования в скоплении. Наши исследования показали, что не менее десятой части членов скопления являются физически двойными системами. Точные определения прецессии членов скопления в совокупности с прецизионно вычисленным по ГРД модулем расстояния до скопления позволили независимыми методами уточнить линейное расстояние от Солнца до рассеянного звёздного скопления Praesepe.

Оценены предельные и точностные возможности VLDB Gaia EDR3, используемой в настоящей работе. Беспрецедентная проницающая сила, предельная звёздная величина и точности измерений миссии Gaia EDR3 позволяют надёжно выделять физические члены скоплений и определять ряд их астрофизических свойств на порядок лучше, чем при предыдущих аналогичных обзорах неба.

На основе результатов настоящего исследования поставлены новые задачи для дальнейшего изучения как самого рассеянного звёздного скопления Praesepe, так и ряда других, в том числе и предположительно связанных с этим скоплением общностью происхождения и эволюции, а также поиска и детального исследования отдельных классов или типов звёзд, упомянутых в разделе **III.2** настоящей статьи.

Благодарности. В этом исследовании использовались данные миссии Gaia Европейского космического агентства, отредуцированные Консорциумом обработки и анализа данных Gaia (DPAC (http://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium). В работе также использовались база данных SIMBAD и инструменты доступа к каталогу VizieR, Центра астрономических данных, Страсбург, Франция. Настоящая работа выполнена при частичном финансировании за счёт бюджетной тематики по исследованиям в области астрономии и проекта UZB-Ind-2021-99 Министерства инновационного развития РУз, за что авторы выражают свою благодарность.

Метаданные

Study of membership and basic parameters of open star clusters based on BigData Gaia EDR3. Open Cluster Praesepe

A.S. Khojaev, R.A. Gaisin, R.G. Karimov

Ulugh Beg Astronomical Institute, AS RUz, Yunusabad district, Astronomicheskaya, 33, 100052, Tashkent, Uzbekistan

The Praesepe open star cluster is studied in detail based on high-precision observational data. Processing and analysis of all astrometric, kinematic and photometric data are made in a wide area covering the Praesepe open star cluster and its environs. Observational data from the VLDB

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

data of Gaia space observatory (EDR3 dated 11.2021) were used in the work. Processing and analysis of data were carried out using ASteCA, TOPCAT software, based on artificial intelligence basics (principles of distributed cloud computing in neural networks and machine learning, BigData). We discovered 640 new physical members of the cluster. The total number of the Praesepe cluster members is estimated by us as 1048. The basic fundamental astrophysical parameters of cluster have been calculated. The total mass of the cluster is (560±13) M_o. The age of the cluster is 737.9 Myrs. Color excess $E_{(B-V)}$=0.044±0.046, distance modulus $(m-M)_0$=6.357±0.001. The fraction of binary stars in the cluster is ~0.1±0.06. Gaia EDR3 capabilities analysis showed a complete coverage of 12÷17^{m}G, an astrometric limit of 21^{m}G, a photometric limit of 20^{m}G, a radial velocity coverage of 4÷13^{m}G with high measurement accuracy, which is a function of the object's brightness. In addition, we have built precision two-dimensional and vector proper motion diagrams of stars, a map of most probable physical cluster members, the parallax distribution function, cluster HRD, and made calculations to determine the main fundamental astrophysical parameters of the cluster itself.

Keywords: Gaia (EDR3), open star clusters - parameters

Литература (References)

[1] C.Q. Choi. Nature **584**, 159 (2020). DOI: 10.1038/d41586-020-02284-7
[2] R. Norris. IOP Publishing Ltd, 12-1, (2022). DOI: 10.1088/2514-3433/ac2256ch12
[3] S. Sen, S. Agarwal, P. Chakraborty, K.P. Singh. ExA, **53**, 1 (2022). DOI: 10.1007/s10686-021-09827-4
[4] O. Vaduvescu, L. Curelaru, M. Popescu. A&C **30**, 100356. (2020).. DOI: 10.1016/j.ascom.2019.100356
[5] K.D. Borne. Data Mining and Knowledge Discovery Series (Taylor & Francis: CRC Press, Boca Raton, FL, Ch. 5, pp. 91-114 2009). arXiv/0911.0505.
[6] N.M. Ball, R.J. Brunner. IJMPD **19**, 1049 (2010). DOI:10.1142/S0218271810017160.
[7] Y. Zhang and Y. Zhao. Data Science Journal **14**, 11, 1-9 (2015). DOI: 10.5334/dsj-2015-011.
[8] R. Tagliaferri, G. Longo, L. Milano, F. Acernese, F. Barone, A. Ciaramella, R. DeRosa, C. Donalek, A. Eleuteri, G. Raiconi, S. Sessa, A. Staiano, A. Volpicelli. Neural Networks **16**, 297 (2003). DOI:10.1016/S0893-6080(03)00028-5
[9] K. Borne. The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey: P6, (2009). arXiv:0909.3892
[10] M. Way, J.D. Scargle, K.M. Ali, A.N. Srivastava, (Eds.) Advances in Machine Learning and Data Mining for Astronomy. Data Mining and Knowledge Discovery Series (CRC Press: Boca Raton, FL. 2012).
[11] K.D. Borne. ESI **3**, No.1-2, 5-17 (2015). DOI:10.1007/s12145-010-0055-2
[12] S.V. Gerasimov, A.V. Mesheryakov, I.Yu. Kolosov, E.S. Glotov. Trudy ISP RAN **27**, 6, 315–334 (2015,). DOI: 10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-20
[13] A. Szalay, J. Gray. Science V **293**, 2037 (2001). DOI: 10.1126/science.293.5537.2037
[14] J. González-Payo, M. Cortés-Contreras, N. Lodieu, E. Solano, Z.H. Zhang, M. Gálvez-Ortiz. A&A A **650**,190 (2021). DOI: 10.1051/0004-6361/202140493
[15] Gaia-project https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia
[16] Zhen-Yu Wu, Xu Zhou, Jun Ma, Cui-Hua Du. MNRAS **399**, 2146 (2009). DOI:10.1111/j.1365-2966.2009. 15416.x
[17] Gaia Collaboration. A&A **616A**, No.10 (2018). DOI: 10.1051/0004-6361/201832843
[18] S. Messina, D. Nardiello, S. Desidera, M. Baratella, S. Benatti, K. Biazzo, V. D'Orazi. A&A **657**, L3 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202142276
[19] E. Ilin, S.J. Schmidt, K. Poppenhager, J.R.A. Davenport, M.H. Kristiansen, M. Omohundro. A&A **645A**, 42 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039198
[20] S. Messina. A&A **645A**, 144. (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202038739
[21] C.P. Johnstone, M. Bartel, M. Gudel. A&A, **649A,** 96 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202038407
[22] G. Vejar, S.C. Schuler, K.G. Stassun. ApJ **919**, 100 (2010). DOI:10.3847/1538-4357/ac10c3
[23] B.F. Healy, P.R. Mccullough, K.C. Schlaufman, ApJ, **923,** 23. (2021) DOI:10.3847/1538-4357/ac281d
[24] P.F. Wang, W.P. Chen, C. Lin, A.K. Pandey, C.K. Huang, N. Panwar, C.H. Lee, M.F. Tsai, C.-H. Tang, B. Goldman, W.S. Burgett, K.C. Chambers, P.W. Draper, H. Flewelling, T. Grav, J.N. Heasley, K.W. Hodapp, M.E. Huber, R. Jedicke, N. Kaiser, R.-P. Kudritzki, G.A. Luppino, R.H. Lupton, E.A. Magnier, N. Metcalfe, D.G. Monet, J.S. Morgan, P.M. Onaka, P.A. Price, C.W. Stubbs, W. Sweeney, J.L. Tonry, R.J. Wainscoat, C. Waters. ApJ **784**, 10pp, (2014). DOI:10.1088/0004-637X/784/1/57
[25] Gaia Collaboration A&A **595**, A2, 23pp. (2016). DOI: 10.1051/0004-6361/201629512
[26] Gaia-database https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/data. DOI: 10.5270/esa-1ugzkg7
[27] Gaia EDR3 passbands https://www-cosmos-esa-int/web/Gaia/edr3-passbands
[28] Gaia Archive https://gea.esac.esa.int/archive/
[29] G.I. Perren, R.A. Vázquez, A.E. Piatti. A&A **576,** A6, (2015). DOI:10.1051/0004-6361/201424946
[30] Gaia Collaboration. A&A **649**, A1 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039657
[31] SIMBAD http://simbad.u-strasbg.fr/
[32] VizieR http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=B/ocl
[33] I.D. Adams, J.R. Stauffer, M.F. Skrutskie, et al. AJ **124** (3), 1570 (2002). DOI:10.1086/342016
[34] A.L. Kraus; L.A. Hillenbrand, AJ **134** (6), 2340. (2007). DOI:10.1086/522831
[35] C. Conrad, R.-D. Scholz, N.V. Kharchenko, A.E. Piskunov, S. Roser, E. Schilbach, R.S. De Jong, O. Schnurr, M. Steinmetz, E.K. Grebel, T. Zwitter, O. Bienayme, J. Bland-Hawthorn, B.K. Gibson, G. Gilmore, G. Kordopatis, A. Kunder, J.F. Navarro, Q. Parker, W. Reid, G. Seabroke, A. Siviero, F. Watson, R. Wyse. A&A **600A**, 106 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201630012

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

[36] C. Soubiran, T. Cantat-Gaudin, M. Romero-Gomez, L. Casamiquela, C. Jordi, A. Vallenari, T. Antoja, L. Balaguer-Nunez, D. Bossini, A. Bragaglia, R. Carrera, A. Castro-Ginard, F. Figueras, U. Heiter, D. Katz, A. Krone-Martins, J.-F. Le Campion, A. Moitinho, R. Sordo. A&A **619A**, 155 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201834020

[37] P.D. Dobbie, R. Napiwotzki, M.R Burleigh, M.A. Barstow, D.D. Boyce, S.L. Casewell, R.F. Jameson, I. Hubeny, G. Fontaine. MNRAS **369** (1): 383 (2006). DOI:10.1111/j.1365-2966.2006. 10311.x

[38] B.M. González-García, M.R. Zapatero Osorio, V.J.S. Béjar, G. Bihain, D.B.Y. Navascués, J.A. Caballero, M. Morales-Calderón. A&A **460** (3): 799–810 (2006). DOI:10.1051/0004-6361:20065909

[39] P. Kroupa. Science **295** 82 (2002). DOI:10.1126/science.1067524

[40] P. Carrera, M. Pasquato, A. Vallenari, L. Balaguer-Núñez, T. Cantat-Gaudin, M. Mapelli, A. Bragaglia, D. Bossini, C. Jordi, D. Galadí-Enríquez, E.Solano. A&A **627**, A119, 1 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201935599

[41] S. Dib, S. Schmeja, R.J. Parker. MNRAS **473**, 849 (2018). DOI:10.1093/mnras/stx2413

BigData Gaia EDR3 асосида тарқоқ юлдуз тўдаларни аъзолиги ва асосий параметрларини ўрганиш. Praesepe тарқоқ тўдаси

А.С.Хўжаев, Р.А.Гайсин, Р.Г.Каримов

ЎзР ФА Улугбек номидаги Астрономия институти, Юнусобод тумани, Астрономическая кўчаси, 33, 100052, Тошкент, Ўзбекистон.

Ушбу тадқиқотнинг мақсади юқори аниқликдаги кузатув маълумотларга асосланган тақоқ юлдуз тўдасини батафсил ўрганишдир. Вазифа Praesepe очиқ тўдасини ва унинг атрофини қамраб олган кенг майдонда барча астрометрик, кинематик ва фотометрик маълумотларни юклаб олиш, қайта ишлаш ва таҳлил қилишдир. Мақолада Gaia космик обсерваториясининг VLDB маълумотларидан (EDR3 11.2021й) кузатув маълумотлари ишлатилган. Маълумотларни қайта ишлаш ва таҳлил қилиш сунъий интеллект элементларига асосланган ASteCA, TOPCAT дастурлари ёрдамида амалга оширилди (нейрон тармоқларда тарқатилган булутли ҳисоблаш тамойиллари ва machine learning, BigData). Биз тўдадаги 640 янги жисмоний аъзоларини кашф этдик. Praesepe тўдасини аъзоларининг умумий сони биз томонидан 1048 йил деб баҳоланмоқда. Тўданинг асосий фундаментал астрофизик параметрлари ҳисоблаб чиқилган. Тўданинг умумий массаси (560 ± 13) $M_{\odot}$, уни yoshi 737.9 млн.йил. Ранг эксцеси $E_{(B-V)}$= 0.044±0.046, масофа модули $(m\text{-}M)_0$=6.357±0,001. Тўдадаги қўшалоқ юлдузлар айирмаси ~0.1±0.06. Gaia EDR3 қамров ва қобилият таҳлили кўрсатишига кўра $12\div17^{m}$G, астрометрик чегараси 21^{m}G, фотометрик чегараси 20^{m}G, радиал тезлиги қамрови $4\div13^{m}$G. Бундан ташқари, биз юлдузларнинг аниқ икки ўлчовли ва векторли тўғри ҳаракат диаграммаларини, енг ехтимолий физик тўда аъзоларининг харитасини, параллакс тарқатиш функциясини, ҲРД кластерини қурдик ва тўданинг асосий астрофизик параметрларини аниқлаш учун ҳисоб-китобларни амалга оширдик

Калит сўзлар: Gaia (EDR3), тарқоқ юлдуз тўдалари, параметрлар,

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.