

ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА КУМУЛЯТИВНОЙ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

К. А. Лызенко^{1,2}, А. Д. Калинин^{1,2}, Н. Е. Кондратьев^{1,2}
¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
²Институт астрономии РАН

В данной работе описывается метод определения угловых размеров рассеянных звездных скоплений, основанный на анализе и обработке кумулятивной функции распределения (КФР). КФР сглаживается и дважды дифференцируется, после чего по виду второй производной оцениваются размеры скоплений. Описанный метод позволяет получать оценки радиусов ядер, средних размеров скоплений и размеров их внешних оболочек. Исходя из полученных данных, можно оценить также количество звезд, принадлежащих ядру и всему скоплению. Метод был применен к 46 рассеянным скоплениям, выбранным из каталога [1].

ESTIMATION OF THE SIZE OF OPEN STAR CLUSTERS BY ANALYZING THEIR CUMULATIVE DISTRIBUTION FUNCTIONS

K. A. Lyzenko^{1,2}, A. D. Kalinkin^{1,2}, N. E. Kondratev^{1,2}
¹Lomonosov Moscow State University,
²Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

This work describes a method for determining the angular size of open star clusters based on the analysis and processing of cumulative distribution functions. Cumulative distribution function is smoothed and differentiated twice, after which the size of clusters is determined by the form of the second derivative. The described method makes it possible to obtain estimates of the nuclei radii, average radii of clusters and the size of their outer shells. Based on the data obtained, it is also possible to estimate the number of stars belonging to the core and the entire cluster. The method was applied to 46 open clusters selected from [1].

Введение

Пространственная структура рассеянных звездных скоплений такова, что четкое определение их размеров является трудной задачей. Поэтому в разных исследованиях используются разные характеристики их размеров, такие как R_{50} — радиус заключающий 50 % вероятных членов скопления; R_t — приливной радиус скопления; R_c — радиус ядра скопления и другие [2–4].

Авторами предлагается метод оценки угловых размеров скоплений, основанный на анализе кумулятивной функции распределения и ее производных. В своей работе мы обращаемся к данным каталога Cantat-Gaudin et al. 2020 [1], основанного на данных каталога Gaia DR2 [5], чтобы выбрать скопления для предстоящего исследования. Мы выбрали близкие скопления с параллаксом больше $0.02''$ и количеством членов больше 100 для улучшения статистической значимости наших оценок и лучшей отладки предлагаемого метода. Для дальнейшей работы нами используются данные каталога Gaia DR3 [6]. Сначала методом радианта [7, 8] мы оцениваем вероятности членства звезд, взятых из каталога Gaia DR3, в выбранных скоплениях, а затем на основе наших оценок строим кумулятивные функции распределения. Для анализа мы используем звезды с вероятностями членства больше 50 %, рассчитанными по методу радианта.

Идея метода

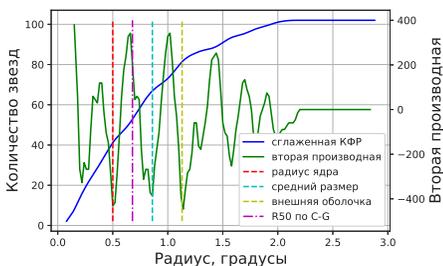


Рис. 1. Наложение второй производной на сглаженную КФР для скопления ASCC_41. Синяя сплошная — сглаженная КФР; зеленая сплошная — вторая производная; красная, голубая и желтая пунктирные линии — значения радиуса ядра, среднего размера скопления и его внешних оболочек, определенные «на глаз», соответственно; фиолетовая штрих-пунктирная линия — R_{50} , взятый для сравнения из работы Cantat-Gaudin et al. 2020 [1]

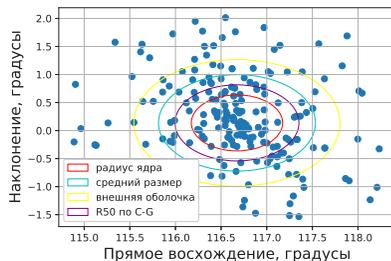


Рис. 2. Вероятные члены скопления ASCC_41 на сетке координат, полученные нами из данных Gaia DR3 [6]. Кругами отмечены области, соответствующие определенным «на глаз» радиусам: красный — область ядра; голубой — средний размер скопления; желтый — внешняя оболочка скопления; фиолетовый — область с радиусом R_{50} , взятым для сравнения из работы Cantat-Gaudin et al. 2020 [1]

Кумулятивной функцией распределения называется диаграмма, показывающая количество звезд, принадлежащих скоплению, на разных расстояниях от его центра. После рассмотрения некоторого количества КФР разных скоплений, нами было отмечено, что все они имеют схожий вид — присутствуют перегибы, которые соответствуют переходу от более плотных областей скопления к менее плотным. Мы трактуем это как переход от ядра скопления к звездам его периферии. Если сгладить КФР — убрать флуктуации, вызванные неравномерным накоплением звезд (рис. 1. Синяя сплошная линия), — то первый локальный минимум второй производной сглаженной КФР должен соответствовать радиусу ядра скопления, второй — среднему радиусу скопления, третий — радиусу внешней оболочки. После нахождения искомым радиусов дополнительно есть возможность определить количество звезд, содержащихся в соответствующих областях.

Алгоритм применения метода

- 1) Выбирается скопление.
- 2) Определяются вероятные члены из данных Gaia DR3 [6].
- 3) Задается параметр s , который определяет число шагов для построения последующих графиков (индивидуален для каждого скопления):

$$s = 50 * R^{\max}, \quad (1)$$

где R^{\max} — расстояние в deg до самого удаленного от центра вероятного члена.

- 4) Шаг по радиусу выбирается 0.02 deg.

- 5) Считается количество звезд в кругах, радиусы которых отличаются на 0.02 deg.
- 6) Полученные данные заносятся в массивы, по которым строятся КФР.
- 7) На основе количества звезд в скоплении N_* выбирается параметр сглаживания m . Он определяет, сколько точек графика КФР будет браться для усреднения:

$$m = 10, \quad (2)$$

если $100 < N_* < 150$,

$$m = N_*/15, \quad (3)$$

если $150 < N_* < 450$,

$$m = 30, \quad (4)$$

если $N_* > 450$, чтобы не было слишком большого или слишком малого количества усредняемых точек. Такие параметры были подобраны после анализа процесса сглаживания.

- 8) Проводится сглаживание КФР методом скользящего среднего.
- 9) Считается первая производная (от сглаженной КФР) методом двусторонней разности по формуле:

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2 \cdot \Delta x}, \quad (5)$$

где $f(x)$ — это зависимость количества звезд от углового расстояния до центра скопления или $N_*(R)$; Δx — шаг дифференцирования, равный 0.02 deg; x_0 — точка, в которой производится дифференцирование.

- 10) Считается вторая производная методом двусторонней разности.
- 11) Вычисляются положения локальных минимумов второй производной: 1-й — радиус ядра; 2-й — средний радиус скопления; 3-й — радиус внешних оболочек.
- 12) Из исходной КФР берется число звезд, заключенное в полученных радиусах.
- 13) Проводится сравнение полученных радиусов и количества членов скопления с результатами, представленными в работе Cantat-Gaudin et al. 2020 [1].

Итоги

Нами определены структурные параметры для 46 рассеянных скоплений, выбранных из Cantat-Gaudin et al. 2020 [1]. Проведено сравнение с радиусами R_{50} , представленными в работе Cantat-Gaudin et al. 2020.

Серьезной проблемой нашего метода является то, что вторая производная — флуктуирующая функция, из-за чего машинный метод определения параметров скопления выдает ошибочные результаты. Сглаженная КФР дает вторую производную, которая имеет локальные минимумы, не соответствующие физически корректным параметрам скопления (рис. 1). Иными словами, первый, второй и третий локальные минимумы смещены ближе к центру скопления и не отражают искомые радиус ядра, средний размер и радиус внешних оболочек скопления. Отмеченные на представленных рисунках (рис. 1, 2) радиус ядра, средний размер и радиус внешних оболочек скопления являются нашими оценками «на глаз» в то время как, наши действительные оценки получаются значительно меньше. Также мы обратили внимание на то, что определенный по второй производной «на

глаз» радиус внешних оболочек не охватывает все вероятные члены, определенные нашим методом.

В дальнейшем мы попытаемся устранить недочеты метода, чтобы получить более корректные оценки искомых радиусов, а также пересмотрим критерии определения радиуса внешних оболочек. Дополнительно мы проведем оценки R_{50} , рассчитанные по выделенным нами вероятным членам, чтобы корректно сравнивать с результатами работы Cantat-Gaudin et al. 2020 [1] и другими авторами.

Благодарности

Коллектив авторов благодарит Д. А. Ковалеву за научное руководство.

Библиографические ссылки

- [1] *Cantat-Gaudin T., Anders F., Castro-Ginard A. et al.* Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 640. — P. A1. 2004.07274.
- [2] *Kharchenko N. V., Piskunov A. E., Schilbach E. et al.* Global survey of star clusters in the Milky Way. II. The catalogue of basic parameters // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 558. — P. A53. 1308.5822.
- [3] *Seleznev Anton F.* Open-cluster density profiles derived using a kernel estimator // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2016. — Vol. 456, № 4. — P. 3757–3773.
- [4] *Tarricq Y., Soubiran C., Casamiquela L. et al.* Structural parameters of 389 local open clusters // *Astron. Astrophys.* — 2022. — Vol. 659. — P. A59. 2111.05291.
- [5] *Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A. et al.* Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. A1. 1804.09365.
- [6] *Gaia Collaboration, Vallenari A., Brown A. G. A. et al.* Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties // *Astron. Astrophys.* — 2023. — Vol. 674. — P. A1. 2208.00211.
- [7] *van Leeuwen F.* Parallaxes and proper motions for 20 open clusters as based on the new Hipparcos catalogue // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 497, № 1. — P. 209–242. 0902.1039.
- [8] *Röser S., Schilbach E., Piskunov A. E. et al.* A deep all-sky census of the Hyades // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 531. — P. A92. 1105.6093.