

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИУСА СКОПЛЕНИЯ ПО РАДИАЛЬНОМУ ПРОФИЛЮ ПЛОТНОСТИ

М. В. Кулеш, А. Ф. Селезнев
Уральский федеральный университет

Представлен численный метод определения радиуса звездного скопления с помощью радиального профиля поверхностной плотности. Метод реализует алгоритм глазомерной оценки, но минимизирует субъективность, его результаты хорошо согласуются с глазомерными оценками радиуса рассеянного скопления NGC 2516.

METHOD FOR DETERMINATION OF CLUSTER RADIUS FROM RADIAL DENSITY PROFILE

M. V. Kulesh, A. F. Seleznev
Ural Federal University

We propose the numerical method for determining the radius of a star cluster using its radial surface density profile. The method realizes the algorithm of an eye estimate but minimizes a subjectivity; its result is in a good agreement with the eye estimate of the radius for the open cluster NGC 2516.

Введение

Радиус рассеянного скопления сложно определить однозначно. Тем не менее его оценка нужна для целого ряда задач: для построения функции светимости, оценки вероятности принадлежности звезд к скоплению, исследования динамики скопления, построения численных моделей скопления и др.

В предположении о сферической симметрии распределения звезд скопления радиус можно оценить с помощью радиальных профилей плотности по методике [1]. Радиальный профиль плотности — это зависимость поверхностной плотности $F(r)$ от расстояния r от центра скопления (рис. 1).

Радиус скопления определяется как расстояние от центра скопления, на котором профиль выходит на уровень плотности фона, после чего меняется слабо. Критерием для этого в [1] было предложено использовать равенство площадей фигур, заключенных между профилем плотности и линией плотности фона выше и ниже этой линии. В работах [1–3] для определения радиуса скоплений применялась глазомерная оценка выполнения этого критерия. Целью настоящей работы являются разработка и проверка численного алгоритма, формализующего эту процедуру.

Описание алгоритма

Через каждую точку радиального профиля плотности ($r, F(r)$) проведем горизонтальную прямую. Оценим разницу между площадью, заключенной между профилем и этой

прямой в фигурах над прямой, и площадью, заключенной между профилем и этой прямой в фигурах под прямой, справа от точки r . Для этого посчитаем следующий интеграл:

$$I_{diff}(r) = \int_r^{r_{max}} |F(r) - F(r')| dr', \quad (1)$$

где $I_{diff}(r)$ — искомая интегральная разница; r_{max} — максимальное расстояние от центра скопления.

Фрагмент графика интегральной разницы показан на рис. 2.

Радиусом скопления мы называем первую точку, на которой этот интеграл достигает локального минимума со значением в точке минимума меньше задаваемого нами порогового значения ϵ .

После определения R_{cl} значение средней плотности фона задается как $F_b = F(R_{cl})$; ошибки определения параметров определяются с помощью пересечения прямых $r = R_{cl}$ и $F = F_b$ границ доверительного интервала радиального профиля.

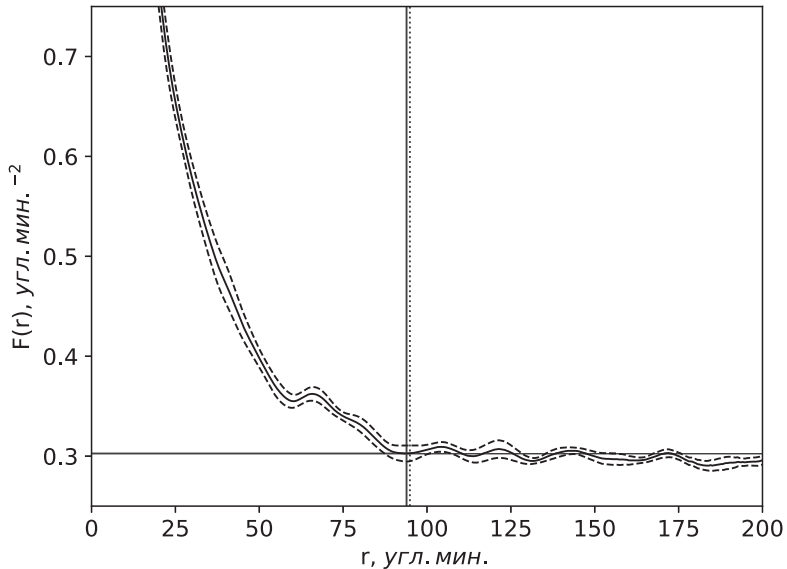


Рис. 1. Радиальный профиль скопления NGC 2516 (сплошная линия) и его доверительный интервал (штриховые линии). Горизонтальной прямой указан уровень фона $F_b = 0.30 \pm 0.01$, вертикальной сплошной прямой — значение радиуса $R_{cl} = 94 \pm 7'$, рассчитанного алгоритмом по первому локальному минимуму интеграла I_{diff} , который меньше $\epsilon = 1$, вертикальной пунктирной — значение радиуса $R_{cl} = 95 \pm 6'$, полученное с помощью глазомерной оценки, чтобы профиль над уровнем фона и под ним описывал примерно равную площадь

Алгоритм был реализован на языке Python, на его вход нужен таблично заданный радиальный профиль поверхностной плотности скопления вместе с границами доверительного

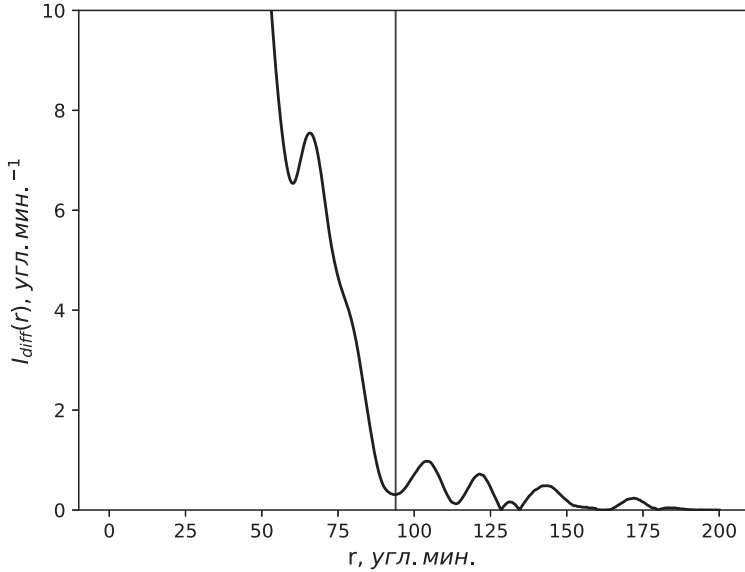


Рис. 2. Интегральная разница $I_{diff}(r)$: радиусом скопления (отмечен вертикальной прямой) считаем первый локальный минимум этой функции, который меньше выбранного нами порогового значения ε

интервала, на выходе получаются значения R_{cl} и F_b вместе с оценками ошибки их определения, а также график с соответствующим образом отмеченными прямыми, что позволяет визуально контролировать адекватность работы алгоритма. В рамках реализуемой программы $\varepsilon = 1$ при меньших параметрах R_{cl} слишком завышается по сравнению с глазомерными оценками.

Обсуждение и выводы

Как глазомерные оценки, так и предлагаемый численный метод основаны на сравнении площадей фигур, расположенных выше и ниже линии плотности фона и ограниченных линией профиля плотности [1]. Площадь фигуры может быть представлена как сумма площадей прямоугольников $\Delta r \cdot \Delta F = \Delta r \cdot (F(r) - F_b)$ при $\Delta r \rightarrow 0$. Таким образом, метод сравнения площадей аналогичен методу минимизации первой степени отклонения аппроксимируемой функции от модели (в данном случае от прямой линии). Согласно [4] минимизация степеней меньше 2 позволяет лучше выделить моду распределения в случае малых выборок и распределения минимизируемой величины, отличающегося от нормального, по сравнению с методом наименьших квадратов.

Работа предлагаемого численного метода была проверена на скоплении NGC 2516 с использованием данных Gaia DR2 [5, 6] до предельной величины $G = 18^m$. Это скопление было выбрано потому, что для него в работе [1] была получена глазомерная оценка радиуса

по данным каталога 2MASS [7], и потому, что на примере этого скопления авторы изучают различные методы выделения вероятных членов скопления.

Полученное с помощью предлагаемого алгоритма значение радиуса скопления NGC 2516 $R_{cl} = 94 \pm 7'$ в пределах ошибки неплохо соотносится со значениями $R_{cl} = 88-92'$, полученными для этого скопления в работе [1] для разных предельных величин по данным 2MASS, а также со значением $R_{cl} = 95 \pm 6'$, полученным для этого скопления с помощью глазомерной оценки по данным Gaia DR2 (см. рис. 1). Значение плотности фона для данных Gaia DR2, полученных с помощью глазомерной оценки и с помощью предлагаемого численного метода, не различается в пределах толщины линии на рис. 1.

Таким образом, предложенный в настоящей работе численный алгоритм для определения радиуса звездного скопления по его радиальному профилю поверхностной плотности хорошо воспроизводит результаты, полученные с помощью глазомерных оценок. При этом субъективный фактор сводится лишь к выбору порогового значения ϵ для минимума функции интегральной разницы.

Предложенный алгоритм можно использовать и в случае радиального профиля плотности, полученного в виде гистограммы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема No. FEUZ-2020-0030.

Библиографические ссылки

- [1] *Seleznev A. F.* Open-cluster density profiles derived using a kernel estimator // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2016. — Vol. 456, № 4. — P. 3757–3773.
- [2] *Yeh F. C., Carraro G., Montalto M., Seleznev A. F.* Ruprecht 147: A Paradigm of Dissolving Star Cluster // Astron. J. — 2019. — Vol. 157, № 3. — P. 115.
- [3] *Danilov V. M., Seleznev A. F.* On the motion of stars in the Pleiades according to Gaia DR2 data // Astrophysical Bulletin. — 2020. — Vol. 75, № 4. — P. 407–424.
- [4] *Loktin A. V.* Minimization of the small powers of deviations as one of the robust methods // Bulletin d'Information du Centre de Donnees Stellaires. — 1990. — Vol. 38. — P. 115–117.
- [5] *Gaia Collaboration, Prusti T., de Bruijne J. H. J. et al.* The Gaia mission // Astron. Astrophys. — 2016. — Vol. 595. — P. A1.
- [6] *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.
- [7] *Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R. et al.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // Astron. J. — 2006. — Vol. 131, № 2. — P. 1163–1183.