АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
БЮРАКАНСКАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

ВСПЫХИВАЮЩИЕ ЗВЕЗДЫ, ФУОРЫ И ОБЪЕКТЫ ХЕРБИГА-АРО

ТРУДЫ СИМПОЗИУМА МНОГОСТОРОННЕГО СОТРУДНИЧЕСТВА АКАДЕМИЙ НАУК СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ СТРАН ПО ПРОБЛЕМЕ «ФИЗИКА И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД»

Бюракан, 22—24 мая 1979 года

Под редакцией Л. В. МИРЗОЯНА

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
ЕРЕВАН
1980

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВСПЫХИВАЮЩИХ ЗВЕЗД В АГРЕГАТЕ ПЛЕЯДЫ*

SPACE DISTRIBUTION OF FLARE STARS IN THE PLEIADES AGGREGATE

Л. В. МИРЗОЯН, М. А. МНАЦАКАНЯН, Г. Б. ОГАНЯН

Бюраканская астрофизическая обсерватория Армянской АН, СССР

Abstract: The results of a study of spatial distribution of flare stars in Pleiades are given assuming the spherical symmetry of Pleiades.

Mathematically the problem is to reconstruct the three-dimensional spatial distribution from the observed two-dimensional distribution of stars in the sky. Since the spatial distribution obtained is very sensitive of small changes of the initial two-dimensional distribution, special methods of solution of the problem are used (see Appendix).

The study of the spatial distribution of flare stars in Pleiades was carried out periodically during last ten years, as the number of discovered stars was increasing. In the first years a „cavity" was found in the central region having about a quarter of the cluster radius, where flare stars were absent completely. The maximum of flare star density was located at the edge of this „cavity". Later on this „cavity" began to be filled up and later disappeared completely (Fig. 1 and 2).

The reason for such changes is the original correlation between the mean flare frequency of flare stars and their distance from the centre of the aggregate (Fig. 3). In the central region of the Pleiades the mean flare frequency is small and during the first observations practically no flare stars were registered there. With the increasing of the observation time, flare stars showing rare flares were discovered. This conclusion is confirmed by the spatial distribution of the ordinal number of flare stars, concerning the chronological sequence of their detection and corresponding to about their mean flare frequency (Fig. 4).

Рассматриваемая в этом докладе задача имеет десятилетнюю историю и состоит в том, чтобы по распределению вспыхивающих звезд в области агрегата Плеяды в проекции на небесную сферу восстановить их пространственное распределение. При этом предполагается сферическая симметрия пространственного распределения вспыхивающих звезд, на что указывает круговая симметрия их двумерного распределения на небесной сфере.

* Доклад был представлен М. А. Мнацаканяном.

Первое определение пространственного распределения вспыхивающих звезд в Плеядах было выполнено в 1969 г. (см. [1]), когда число известных вспыхивающих звезд в этой области было порядка сотни, причем все они считались членами агрегата. Результат оказался весьма неожиданным: в центральной области системы радиусом 1.5пс (радиус всего агрегата составляет ~6 пс) вспыхивающие звезды полностью отсутствовали, а резкий максимум их пространственной плотности имел место на краю «полости», на расстоянии ~ 1.5 пс от центра агрегата. Решение задачи повторялось в последующие годы, после обнаружения каждой новой группы вспыхивающих звезд. По мере возрастания числа известных вспыхивающих звезд «полость» проявляла себя сильнее и весомей.

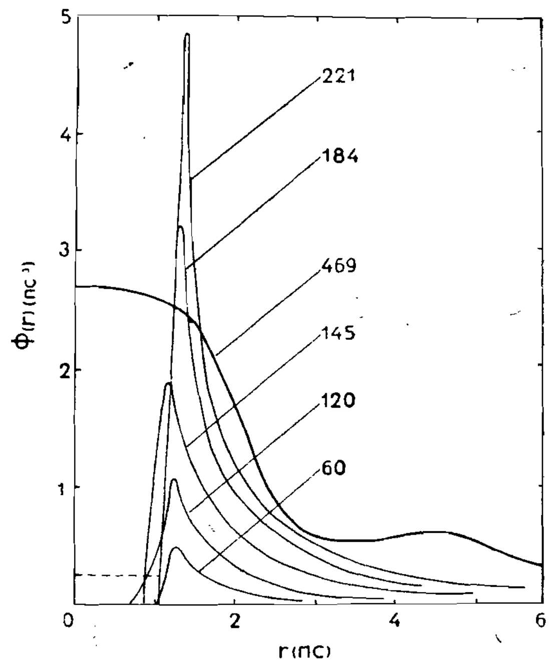

Рис. 1 Пространственная плотность вспыхивающих звезд в агрегате Плеяды для групп известных в разные годы вспыхивающих звезд (числами отмечено соответствующее количество звезд).

На рис. 1 представлены распределения пространственной плотности для, соответственно, 60, 120, 145, 184 и 221 вспыхивающих звезд. Наиболее четко полость проявилась в 1971 г., когда число известных вспыхивающих звезд достигло 221. При этом число вспыхивающих звезд внутри самой полости по нашим оценкам не превышало 5 — соответствующее ему значение плотности отмечено на рис. 1 пунктирной линией.

Здесь уместно напомнить о методе решения задачи. Так как это решение очень чувствительно относительно исходного двумерного распределения, небольшие изменения которого приводят к сильным изменениям в пространственном распределении, то обычно используемые методы решения задачи могут привести к очень большим ошибкам. Примером того, как велики могут быть ошибки стандартных методов, использующих разбиения наблюдаемой картины на ряд колец или полосок для определения соответствующих плотностей, служат работы Холопова [2], в которых на основе того же самого наблюдательного материала был получен вывод об очень сильной концентрации вспыхивающих звезд в Плеядах к центру скопления. Во избежание таких ошибок для решения задачи нами был разработан специальный метод (см. Приложение), лишенный некорректностей, присущих обычным методам решения этой задачи.

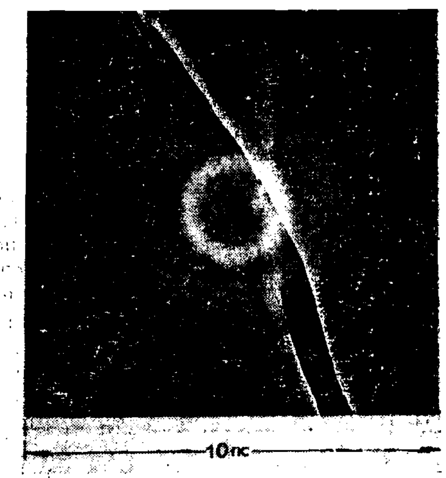

Рис. 2. Фотография, иллюстрирующая наличие на расстоянии ~ 1.5 пс от центра агрегата максимума плотности в распределении группы из 221 вспыхивающей звезды.

Чтобы сделать более убедительным результат о наличии «полости» для группы из 221 вспыхивающей звезды, мы поступили следующим образом. Карту Плеяд мы нанесли на непрозрачную пластинку и в местах расположения вспыхивающих звезд просверлили отверстия. Затем пластинка приводилась в быстрое вращение и фотографировалась «на свет». В результате вращения распределение яркости света на фотографии должно быть пропорционально двумерной плотности распределения вспыхивающих звезд Плеяд. Можно показать, что максимумы плотности в двумерном распределении соответствуют максимумам плотности в трехмерном распределении. На рис. 2, полученном таким образом, видно яркое кольцо, расположенное на расстоянии ~1.5 пс от центра агрегата. Этот снимок позволяет наглядно убедиться, что в пространственном распределении 221 вспыхивающей звезды агрегата Плеяды имеется максимум плотности, приходящийся на расстояние ~1.5 пс.

Как можно интерпретировать наличие указанной «полости» в распределении вспыхивающих звезд в агрегате Плеяды?

«Полость» не могла быть результатом селекции или наличия в Плеядах поглощающего облака. Как показали расчеты, она существует и для группы вспыхивающих звезд, ярче $18^m.5$ в минимуме блеска, а также для группы вспыхивающих звезд, ярче 16^m в максимуме блеска. «Полость» не могла быть результатом также флуктуаций, связанных со случайным характером процесса обнаружения вспыхивающих звезд — анализ показал, что вероятность такого события меньше 10^{-2}. Другие эффекты — наличие возможного фона вспыхивающих звезд, неправильный выбор центра симметрии, могут, наоборот, привести лишь к заполнению «полости». Эти соображения дали основание в 1971 г. опубликовать краткое сообщение о необычном распределении вспыхивающих звезд в Плеядах [1].

Однако, вопрос об интерпретации наличия «полости» в пространственном распределении вспыхивающих звезд в этом агрегате оставался открытым. Трудно было утверждать, что в центральной части агрегата Плеяды вспыхивающие звезды вообще отсутствуют, основываясь только на данных об известных в то время вспыхивающих звездах, которые по статистическим оценкам (см., например, [3]) составляли менее одной четверти всех звезд этого класса. Дело в том, что они, вообще говоря, не представляют собой однородную выборку из всех вспыхивающих звезд, а являются наиболее часто вспыхивающими среди них.

Кроме того, в строгой постановке вопроса, само понятие вспыхивающей звезды оказывается лишенным смысла, если не указывается средняя частота вспышек. В конце концов, каждая звезда может считаться вспыхивающей, но со средней частотой, близкой к нулю. Распределение же всех звезд, а не только вспыхивающих, в агрегате Плеяды показывает сильную концентрацию в центре. Поэтому естественнее было ожидать, что со временем, вследствие обнаружения редко вспыхивающих звезд, полость могла заполниться. Так оно и произошло. С обнаружением новых вспыхивающих звезд в последующие годы полость начала постепенно заполняться. Она была уже наполовину заполнена, когда количество известных вспыхивающих звезд в агрегате Плеяды достигло 300. Наконец, когда их число достигло 469 [3], указанная полость полностью исчезла и уже заметно небольшое возрастание плотности вспыхивающих звезд к центру скопления (см. рис. 1).

Рассмотрим возможную интерпретацию происшедшего явления. Как отмечалось выше, при строгой постановке задачи необходимо учитывать среднюю частоту вспышек звезд. Метод, разработанный в [4], позволяет решать задачу о пространственном распределении вокруг центра любой скалярной величины в сферически симметричной системе (см. Приложение), например, количества вспышек в единице объема, средней частоты и амплитуды вспышек, светимости звезд и т. д.

На рис. 3 представлена зависимость наблюдаемой средней частоты вспышек от расстояния до центра агрегата Плеяды, которая показывает, что она меньше в области наблюдаемой ранее «полости» и велика

на ее краю, на расстоянии 1.5 пс от центра системы. Именно в этой зависимости средней частоты вспышек $\bar{\nu}(r)$ от пространственного расстояния r до центра агрегата Плеяды и заключается основной результат настоящей работы. Заметим, что истинная средняя частота вспышек в области «полости» на самом деле должна быть ниже, чем наблюденная, поскольку там, по-видимому, имеется еще значительное число необнаруженных вспыхивающих звезд.

В первый период исследования вспыхивающие звезды обнаруживались в тех частях агрегата, где средняя частота вспышек наибольшая, поэтому и наблюдалась полость. Затем процесс обнаружения новых вспыхивающих звезд в областях с высокими частотами достиг насыщения (т. е. все они были обнаружены), а в областях с меньшими частотами он продолжался. Это привело к постепенному заполнению полости.

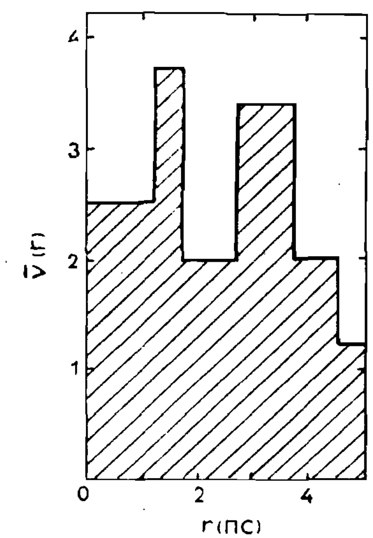

Рис. 3. Зависимость средней наблюдаемой частоты $\bar{\nu}$ вспышек для вспыхивающих звезд агрегата Плеяды от пространственного расстояния r от центра системы.

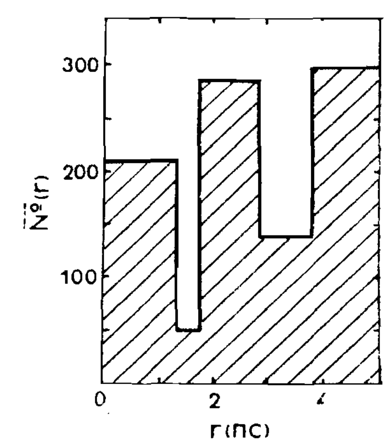

Рис. 4. Зависимость среднего порядкового номера № вспыхивающих звезд агрегата Плеяды от пространственного расстояния r до центра системы.

Историю с «полостью» в пространственном распределении вспыхивающих звезд в агрегате Плеяды и ее исчезновение можно наглядно проиллюстрировать следующим образом. Рассмотрим задачу о пространственном распределении среднего порядкового номера ($\overline{№}$) вспыхивающей звезды по единой нумерации, имея в виду, что чем больше номер вспыхивающей звезды, тем позже она была обнаружена и тем меньше, в среднем, частота ее вспышек.

На рис. 4 представлена зависимость среднего порядкового номера $\overline{N}$ (r) вспыхивающей звезды от расстояния до центра системы. Из нее следует, что звезды, расположенные на краю «полости» ($r \sim 1.5$ пс) имеют средний номер, равный 50 (они были обнаружены раньше), а звезды, попавшие в «полость», имеют средний номер значительно больше — 220 (они были обнаружены только позже). Этот результат является независимым подтверждением факта существования первоначальной «полости» и объясняет ее исчезновение в последующем.

ПРИЛОЖЕНИЕ

О методе решения задачи. Решение задачи восстановления пространственного распределения звезд скопления по наблюдаемой картине двумерного распределения в проекции на небесную сферу содержит некорректность. Она обусловлена тем, что пространственная плотность звезд выражается через производную от наблюдаемой плотности в проекции, вследствие чего двум близким распределениям звезд в проекции могут соответствовать сильно различающиеся друг от друга пространственные распределения. Поэтому требуется по возможности более точное описание исходного наблюдаемого распределения звезд в проекции.

В известных методах это исходное распределение строится путем разбиения картины распределения звезд в проекции на некоторое число колец или полосок для определения двумерной или одномерной плотности распределения в виде гистограммы. При этом каждый такой интервал разбиения должен быть достаточно большим, чтобы содержать достаточное количество звезд во избежание сильных флуктуаций их числа. С другой стороны, при малом количестве интервалов получается весьма неполное представление о наблюдаемом распределении как функции расстояния. Кроме того, имеется некоторая неопределенность, обусловленная тем, что неизвестно, какому расстоянию приписать соответствующее вычисленное значение средней плотности. В результате разные способы разбиений плоского распределения звезд могут привести к отличающимся друг от друга гистограммам. По этой причине определение пространственного распределения упомянутыми выше методами чревато большими погрешностями.

В работе одного из авторов [4] был предложен метод построения одномерной функции F(x) распределения звезд — числа звезд в полосе $(-x, x)$, содержащей центр $x=0$, лишенный указанных выше некорректностей. Новый метод основан на требовании круговой симметрии двумерного распределения и точного учета положения каждой звезды в проекции. В этом случае справедлива следующая формула [4]:

$$F(x) = N_0 - \frac{2}{\pi} \sum_{\rho_i > x} \arccos \frac{x}{\rho_i}, \tag{1}$$

где ρ_i — расстояние i — той звезды от центра системы в двумерной проекции, а N_0 — полное число звезд в ней.

Аналогичная формула справедлива для произвольной скалярной величины s, связанной со звездой и распределенной в пространстве сферически-симметрично [3]:

$$F_s(x) = \sum_i s_i - \frac{2}{\pi} \sum_{\rho_i > x} s_i \arccos \frac{x_i}{\rho_i}. \tag{2}$$

В частности, если все $s_i = 1$, формула (2) переходит в формулу (1)*.

Функции F(x) и $F_s(x)$ являются непрерывными и численное их определение сводилось к их аналитическому усреднению с шагом $\Delta x = 0.1$ пс.

Решение задачи получается следующим образом.

Пространственная плотность величины s по второй производной известной функции $F_s(x)$ определяется формулой

$$\Phi_s(r) = -\frac{1}{4\pi r} F_s''(r), \tag{3}$$

а ее среднее значение на пространственном расстоянии r от центра системы — отношением

$$\bar{s}(r) = \frac{F_s''(r)}{F''(r)}. \tag{4}$$

Сумма величин s_i (или число звезд, если все $s_i = 1$) для звезд, находящихся внутри сферы радиуса r вокруг центра, определяется выражением

$$N_s(r) = F_s(r) - rF_s'(r), \tag{5}$$

которое получается из очевидной формулы

$$N_s(r) = 4\pi \int_0^r r^2 \Phi_s(r) dr,$$

после подстановки в нее значения $\Phi_s(r)$ из (3) и интегрирования по частям.

Практически удобно $N_s(r)$ определять графически. Легко видеть, что касательная к кривой $F_s(x)$ в точке $x = r$ пересекает ось ординат в точке $N_s(r)$. Далее, по разности $N_s(r)$ в данных точках r_1 и r_2 находятся соответствующие величины (суммы), а следовательно и средние значения $\bar{s}$ на любом интервале (r_1, r_2).

Для более точных оценок числа звезд в центральной сфере радиуса r целесообразно использовать функцию

$$L(x) = \int_0^x N(r) dr = 2 \int_0^x F(t) dt - xF(x). \tag{6}$$

* Приведенные здесь функции F(x) и $F_s(x)$ отличаются от соответствующих в [4] нормировочными множителями $N_0/2$ и $\sum_i s_i/2$.

Нетрудно видеть, что величина $L(x)$ определяется удвоенной площадью, заключенной между дугой $F(x)$ и хордой, стягивающей ее, с концами в точках 0 и x. Чем меньше эта площадь, то есть, чем ближе поведение $L(x)$ к линейному, тем меньше звезд в сфере радиуса r.

Подставляя выражение (5) для $s_i = 1$ ($i = 1, 2, \ldots$) в (6) и меняя порядок интегрирования, имеем

$$L(r) = 4\pi \int_0^r (r-t)\Phi(t)t^2 dt = \sum_{r_i<r} (r - r_i). \quad (7)$$

Отсюда следует, что $L(r)$ представляет собой сумму расстояний звезд, находящихся внутри сферы радиуса r, до поверхности этой сферы. Сама функция $L(x)$ определяется из выражения

$$L(x) = xF(x) + \frac{4}{\pi}\left(\sum_{\rho_i > x} \sqrt{\rho_i^2 - x^2} - \sum_i \rho_i\right). \quad (8)$$

следующего из формулы (6), после подстановки в нее выражения (1). Из формулы (7) в предположении о невозрастающей от центра плотности $\Phi(r)$, для $N(r)$ — числа звезд внутри сферы радиуса r, следует оценка

$$N(r) \leqslant \frac{4}{r} L(r). \quad (9)$$

Знак равенства достигается при $\Phi(r) = \text{Const}$. Формулу (9) можно использовать для оценки сверху количества звезд в любом центральном шаре. Аналогичные формулы справедливы для величины $L_s(x)$.

В отличие от $N(x)$ функция $L(x)$ менее подвержена флуктуациям и лишена ошибок, связанных с численным дифференцированием функций, поскольку она определяется по наблюдаемым величинам только операциями суммирования.

Анализ формул для $L(x)$ и $L_s(x)$ позволяет оценить погрешность численных решений задачи.

В частности, в задаче определения пространственного распределения вспыхивающих звезд и звездных вспышек в агрегате Плеяды вокруг центра этой системы погрешность эта составляет 2—3 звезды и, соответственно, 5—6 вспышек на интервалах расстояний представленных на рис. 1, 3 и 4. При вычислении пространственного распределения для той или иной группы звезд, мы независимо определяли пространственные распределения для нескольких ее подгрупп (разбиением этой группы, например, на слабые и яркие, на звезды, вспыхнувшие только один раз, только два раза и три и более раз и т. д.). Сравнение этих решений друг с другом подтверждает указанную выше оценку для ошибок вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *L. V. Mirzoyan, M. A. Mnatsakanian*, IBVS, No. 528, 604, 1971.
2. *П. Н. Холопов*, Астрон. ж., **48**, 529, 1971; **51**, 116, 1979; IBVS No. 566, 1971.
3. *Л. В. Мирзоян и др.*, Астрофизика, **13**, 205, 1977.
4. *М. А. Мнацаканян*, ДАН Арм. ССР, **49**, 33, 1969.

ДИСКУССИЯ ПО ДОКЛАДУ Л. В. МИРЗОЯНА, М. А. МНАЦАКАНЯНА И Г. Б. ОГАНЯН

В. С. Осканян. Известно, что частота вспышек меньше у более ярких звезд из-за наблюдательной селекции. Не обнаружили ли Вы зависимость между яркостями звезд и их распределением в пространстве, т. е. являются ли звезды в центральной части Плеяд более яркими, чем звезды, более удаленные от центра, так как вспыхивающие звезды в центре открыты позднее?

М. А. Мнацаканян. Мы исследовали также пространственное распределение средней величины вспыхивающих звезд. В области «полости», действительно, звезды сравнительно ярче, чем, скажем, у края «полости». Вообще, в центральной области, примерно до расстояний $r \sim 3.5$ *пс* наблюдается четкая прямая корреляция между звездной величиной и средней частотой вспышек. Дальше этого расстояния корреляция обратная.

Г. А. Гурзадян. Можно ли представить пространственную концентрацию вспыхивающих звезд в агрегатах степенной зависимостью от расстояния до центра, и если да, то какова численная величина степени?

М. А. Мнацаканян. Когда число вспыхивающих звезд в Плеядах составляло 221, пространственная плотность их за полостью (после расстояния $r \sim 1.5$ *пс*) падала по закону $\sim r^{-2}$, причем этот закон очень хорошо выполнялся также и для плотности распределения количества вспышек в пространстве. С увеличением данных о вспыхивающих звездах этот закон нарушился — падение стало несколько слабее, но мы его не исследовали.

Г. А. Гурзадян. Задача о пространственном распределении вспыхивающих звезд в агрегатах была рассмотрена и нами несколько лет тому назад. Здесь я хочу представить некоторые неопубликованные результаты.

Постановка задачи следующая: можно ли представить пространственную концентрацию вспыхивающих и вообще нестационарных звезд данного типа в агрегатах законом вида $n(r) \sim r^{-n}$, и если да, то какова численная величина показателя n. Принимается, что система обладает сферически-концентрической симметрией, а исходными данными является видимое распределение данного типа нестационарных звезд в агрегате.

Решение задачи получается в виде:

$$\frac{N(r)}{N_0} = \int_r^{r_0} \frac{x^{1-n}dx}{\sqrt{x^2 - r^2}},$$

где r_0 — радиус агрегата, $N(r)$ полное число звезд, спроектированных на небе внутри данной зоны, то есть кольца радиуса r и единичной ширины, N_0 — полное число звезд в центральной зоне. По сути дела, $N(r)/N_0$ есть *видимое* распределение звезд внутри агрегата.

Теоретические кривые $N(r)/N_0$ при значениях $n = 0$, 1, 2 и 3 показаны на рис. 1, там же нанесены наблюдательные точки для вспыхива-