АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 6 АВГУСТ, 1970 ВЫПУСК 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ О—В ЗВЕЗД В АССОЦИАЦИЯХ

Л. В. МИРЗОЯН, М. А. МНАЦАКАНЯН

Поступила 15 августа 1969

Исследовано распределение величин пространственных скоростей О—В звезд в синтетической ассоциации. Предложен метод для определения величины средней пространственной скорости звезд в сферически-симметричных системах на разных расстояниях от центра системы на основе их остаточных лучевых скоростей и распределения в проекции на небесную сферу. Применением этого метода к синтетической ассоциации показано, что зависимость $v(r)$ средней величины пространственной скорости звезд от расстояния до центра системы представляет собой линейно возрастающую функцию. Обсуждены возможные интерпретации этой зависимости. Единственная интерпретация, не противоречащая наблюдательным данным (распределению звездной плотности в ассоциациях, их массам и т. д.), исходит из допущения о расширении ассоциаций. Это приводит к выводу, что полученная линейно возрастающая зависимость $v(r)$ является веским доводом в пользу расширения ассоциаций и свидетельствует о динамической неустойчивости большинства известных звездных ассоциаций.

Введение. Внутренние движения О—В звезд в ассоциациях, обусловленные главным образом скоростями, приобретенными ими в период зарождения [1], содержат определенную информацию о звездообразовательном процессе. Уже первые исследования собственных движений звезд в ближайших О-ассоциациях [2, 3] подтвердили теоретически предсказанное расширение [1] этих систем. Однако, из-за больших расстояний О-ассоциаций собственные движения О—В звезд—их членов, обычно малы и отягощены большими относительными ошибками. Поэтому основой для исследования движений О—В звезд могут во многих случаях служить только их лучевые скорости.

В работе одного из авторов [4] было показано, что данные об остаточных лучевых скоростях О—В звезд определенно свидетельствуют о расширении звездных ассоциаций. Этот вывод был основан на статистическом исследовании распределения остаточных лучевых скоростей звезд спектральных классов O—B0 в синтетической ассоциации, построенной посредством суперпозиции подсистем указанных звезд вокруг ядер звездных ассоциаций.

Оказалось, что дисперсия остаточных лучевых скоростей звезд и среднее значение их абсолютных величин возрастают с расстоянием до центра синтетической ассоциации, что можно рассматривать как следствие непрерывного возникновения и ухода звезд с различными скоростями из ядер ассоциаций — центров звездообразования. Наблюдаемое распределение звезд вокруг центра синтетической ассоциации хорошо согласуется с представлением о стационарности потока звезд от центра для всей синтетической ассоциации, то есть, стационарности совокупности звездных ассоциаций относительно процесса звездообразования, по крайней мере, за время существования современных ассоциаций.

В настоящей работе представлены результаты исследования распределения пространственных скоростей O—B звезд в синтетической ассоциации на основе их остаточных лучевых скоростей и распределения в проекции на небесную сферу с помощью нового метода, изложение которого приводится ниже.

Постановка задачи. Рассмотрим расширяющуюся звездную ассоциацию со сферическим распределением звезд вокруг ее центра. Большая дисперсия скоростей вылета звезд при разновременном выходе звезд из порождающего ядра приводит к тому, что в каждой сферической оболочке $(r, r+dr)$ вокруг центра всегда имеются звезды, обладающие отличающимися друг от друга скоростями. Так как молодые звезды, обладающие малыми скоростями, не могут значительно удаляться от ядра (время их жизни для этого недостаточно), то в расширяющейся системе молодых звезд данного возраста *средняя скорость* должна расти с возрастанием расстояния r от ее центра.

Предположим, что скорости всех звезд направлены радиально относительно центра ассоциации*, и обозначим посредством $v(r)$ среднее значение абсолютной величины скорости удаления от центра для звезд, находящихся в сферическом слое $(r, r+dr)$. Нашей задачей является определение функции

$$v = v(r),$$

* Как показано в дальнейшем изложении, это допущение не является ограничением. Полученные при этом допущении выводы о поведении функции $v(r)$, оказываются справедливыми и при других, более общих предположениях относительно направлений скоростей.

представляющей собой *зависимость средней скорости расширения ассоциации от расстояния до ее центра.*

В качестве исходных данных в настоящей работе используются наблюдаемое распределение звезд ассоциации в проекции на небесную сферу и их лучевые скорости *относительно центра ассоциации.*

Обозначим посредством $w(\rho)$ сумму абсолютных величин наблюдаемых остаточных лучевых скоростей звезд, принадлежащих единичной площадке, находящейся на расстоянии ρ от центра ассоциации в проекции на небесную сферу.

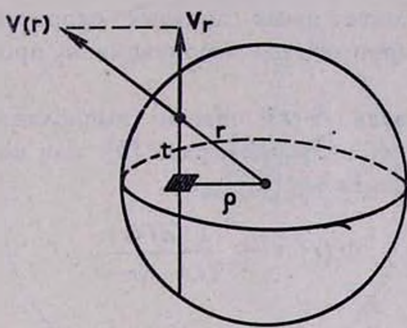

Рис. 1.

Величина $w(\rho)$, как видно из рис. 1, равна

$$w(\rho) = 2\int_0^\infty v_r \Phi(r)\, dt, \tag{1}$$

где $\Phi(r)$ — пространственная плотность звезд в ассоциации на расстоянии r от ее центра, а v_r — средняя остаточная лучевая скорость. Подстановка в интеграл (1) вместо v_r ее значения

$$v_r = v(r)\frac{t}{r}$$

и замена переменной интегрирования t через r:

$$t = \sqrt{r^2 - \rho^2},$$

приводит к следующему соотношению между w и v:

$$w(\rho) = 2\int_\rho^\infty v(r)\Phi(r)\, dr. \tag{2}$$

Дифференцируя (2) по ρ и заменяя ρ на r, получаем

$$v(r) = -\frac{1}{2\Phi(r)}\frac{dw(r)}{dr}. \qquad (3)$$

Функцию $w(\rho)$ можно определить по формуле

$$w(\rho) = \frac{1}{2\pi\rho}\frac{dW(\rho)}{d\rho}, \qquad (4)$$

где $W(\rho)$ — вычисленная на основе наблюдательных данных сумма абсолютных величин остаточных лучевых скоростей звезд, лежащих в круге радиуса ρ вокруг центра ассоциации в проекции на небесную сферу.

Звездная плотность $\Phi(r)$ обычно вычисляется по двумерному распределению звезд на небесной сфере [5] или по одномерному распределению $F(x)$ по формуле [6]:

$$\Phi(r) = -\frac{1}{2\pi r}\frac{df(r)}{dr}. \qquad (5)$$

Здесь

$$f(x) = -\frac{dF(x)}{dx}, \qquad (6)$$

а $F(x)$ — число звезд в полосе (x, ∞), то есть, в полуплоскости с границей, отстоящей на расстояние x от центра ассоциации.

Формула (3), в принципе, дает решение поставленной задачи: нахождения функции $v(r)$. Однако точность практического применения этой формулы невысокая, так как в ней фигурируют вторые производные от наблюдаемых функций $F(x)$ и $W(\rho)$.

Задача значительно упрощается, если ограничиться исследованием только качественного поведения функции $v(r)$. Оказывается, что для этого достаточно определить зависимость $\bar{v}$ от $\bar{r}$, где $\bar{v}$ — средняя пространственная скорость, а $\bar{r}$ — среднее расстояние от центра системы звезд, принадлежащих определенным образом выбранным ее группировкам.

Вывод расчетных формул. Рассмотрим звезды ассоциации, находящиеся в плоскопараллельном слое единичной толщины, проходящем на растоянии x от центра ассоциации (рис. 2). Число звезд в нем равно $f(x)$, а сумма их расстояний до центра

$$\sum_{x}^{x+1} r = 2\pi\int_0^\infty r\Phi(r)\,tdt = 2\pi\int_x^\infty r^2\Phi(r)\,dr, \tag{7}$$

то есть, равна половине числа звезд ассоциации вне сферы радиуса x. Символ $\sum_{x_1}^{x_2}$ обозначает сумму соответствующих величин для звезд, находящихся в полосе (x_1, x_2).

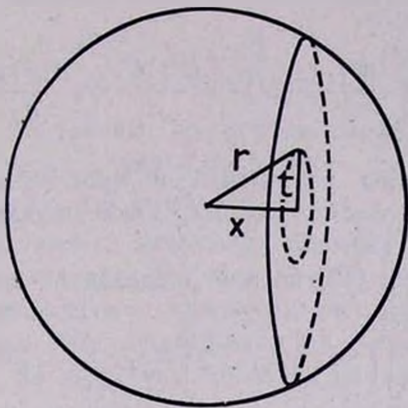

Рис. 2.

Используя формулы (5) и (6), эту сумму можно представить посредством $F(x)$:

$$\sum_{x}^{x+1} r = F(x) - x\frac{dF(x)}{dx}. \tag{8}$$

Здесь и далее мы принимаем

$$f(\infty)=0,\ F(\infty)=0,\ W(0)=0,\ W(\infty)=\text{const},\ w(\infty)=0. \tag{9}$$

Сумма абсолютных значений пространственных скоростей* звезд, заключенных в указанном слое, определяется формулой

$$\sum_{x}^{x+1} v = 2\pi\int_0^\infty v(r)\,\Phi(r)\,tdt = 2\pi\int_x^\infty v(r)\,\Phi(r)\,rdr, \tag{10}$$

* Везде речь идет о пространственных скоростях относительно центра ассоциации.

которую с помощью (3) можно выразить через функцию $w(\rho)$:

$$\sum_{x}^{x+1} v = -\pi \int_{x}^{\infty} r \frac{dw(r)}{dr} dr. \tag{11}$$

Интегрируя (11) по частям и учитывая (4), имеем

$$\sum_{x}^{x+1} v = \pi \int_{x}^{\infty} w(r)\, dr + \pi x w(x) = \frac{1}{2} \int_{x}^{\infty} \frac{1}{r} \frac{dW(r)}{dr} + \frac{1}{2} \frac{dW(x)}{dx} =$$

$$= \frac{1}{2} \left[\int_{x}^{\infty} \frac{W(r)}{r^2} dr - \frac{W(x)}{x} + \frac{dW(x)}{dx} \right]. \tag{12}$$

Определим суммы расстояний и пространственных скоростей звезд, находящихся в слое (x, ∞). По определению, число звезд в слое (x, ∞) равно $F(x)$.

Интегрируя (8) и (12) по x в пределах от x до ∞, имеем

$$\sum_{x}^{\infty} r = \int_{x}^{\infty} \left(\sum_{x}^{x+1} r \right) dx = 2 \int_{x}^{\infty} F(x)\, dx + xF(x) \tag{13}$$

для суммы расстояний и

$$\sum_{x}^{\infty} v = \int_{x}^{\infty} \left(\sum_{x}^{x+1} v \right) dx =$$

$$= \frac{1}{2} \left[\int_{x}^{\infty} \int_{z}^{\infty} \frac{W(\rho)}{\rho^2} d\rho dz - \int_{x}^{\infty} \frac{W(\rho)}{\rho} d\rho + W(\infty) - W(x) \right] \tag{14}$$

для суммы пространственных скоростей.

Соответствующие суммы и число звезд, заключенных в произвольном слое (x_1, x_2), определяются разностями

$$\sum_{x_1}^{\infty} r - \sum_{x_2}^{\infty} r, \quad \sum_{x_1}^{\infty} v - \sum_{x_2}^{\infty} v, \quad F(x_1) - F(x_2). \tag{15}$$

Разделив суммы расстояний и скоростей на число звезд в данном слое, мы находим средние значения $\bar{r}$ и $\bar{v}$. Меняя ширину слоя и его положение в ассоциации, мы получаем параметрическую зависимость (параметром является x) между $\bar{v}$ и $\bar{r}$: $\bar{v} = \bar{v}(\bar{r})$.

Формулы (13)—(15) позволяют выразить зависимость $\bar{v}(\bar{r})$ посредством наблюдаемых функций $F(x)$ и $W(\rho)$ и интегралы от них. Функция $\bar{v}(\bar{r})$, как следует из дальнейшего изложения, дает определенное представление о поведении искомой функции $v(r)$. Например, можно показать, что если $\bar{v}(\bar{r})$ является возрастающей функцией, то функция, $v(r)$ также должна быть возрастающей.

Нужно заметить, что область изменения $\bar{r}$ при всевозможных изменениях x_1 и x_2, согласно (7), ограничена снизу величиной

$$\bar{r}_{\min} = \frac{F(0)}{f(0)}, \tag{16}$$

равной среднему расстоянию до центра звезд бесконечно тонкого слоя, проходящего через центр ассоциации.

Для определения $\bar{v}(\bar{r})$ в области $\bar{r} < \bar{r}_{\min}$ можно рассматривать другие группировки звезд, например, звезды, заключенные внутри сфер различных радиусов r. В этом случае средние расстояния и скорости можно вычислить с помощью функций $F(x)$ и $W(\rho)$ и их первых производных. Мы не приводим соответствующие выражения, так как ниже нам не придется пользоваться ими. Дело в том, что плотность $\Phi(r)$, от которой зависит $\bar{r}_{\min}$, очень сильно возрастает к центру синтетической ассоциации. Вследствие этого значение $\bar{r}_{\min}$ оказывается достаточно малым.

Определение функции $\bar{v}(\bar{r})$. Для определения $\bar{v}(\bar{r})$ нами были использованы лучевые скорости 290 О—В1 звезд из каталога Вилсона [7]. Распределение этих звезд вокруг соответствующих ядер было определено на основе их расстояний от ближайших ядер в проекции на небесную сферу. При составлении синтетической ассоциации данные об ассоциациях и их ядрах взяты из каталога звездных ассоциаций Рупрехта [8], а расстояния звезд — из списка Хилтнера [9]. Наблюдательный материал: абсолютные значения остаточных (исправленных за движение центров ассоциаций и движение Солнца) лучевых скоростей и расстояния звезд от центров ассоциаций в проекции на небесную сферу, лежащие в основе наших расчетов, представлены на рис. 3. Для большинства звезд (~ 100), находящихся в окрестности $\rho < 50$ *пс* от центра ассоциации, расстояния ρ_i весьма неопределенны. Мы расположили их в левой части рис. 3, чтобы указать их лучевые скорости. При вычислениях, ρ_i для этих звезд приняты равными нулю.

При численном решении задачи мы приняли радиус ассоциации конечным (R) и, соответственно, преобразовали формулу (14).

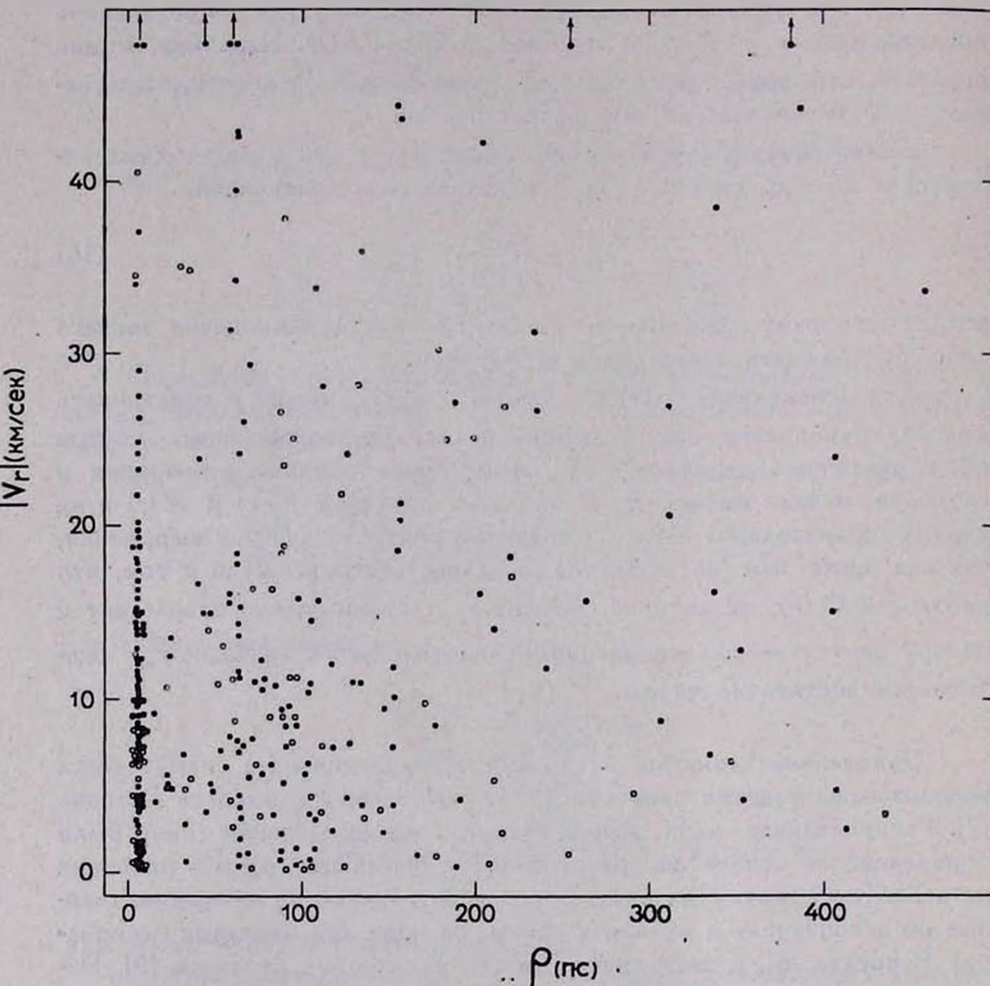

Рис. 3. Наблюдательные данные для использованных 290 O—B1 звезд: ρ_l — расстояние от центра синтетической ассоциации в проекции на небесную сферу и $|v_r|$ — абсолютное значение остаточной лучевой скорости. Черные кружки — O—B0, светлые — B0.5—B1 звезды. Для 102 звезд с $\rho < 50$ *пс* расстояния неопределенны. Лучевые скорости этих звезд нанесены в левой части рисунка.

В этой формуле, интеграл $\int\limits_x^\infty$ заменив суммой $\int\limits_x^R + \int\limits_R^\infty$, а повторный интеграл представив в виде

$$\int\limits_x^\infty\int\limits_z^\infty = \int\limits_x^R\int\limits_z^R + \int\limits_x^R\int\limits_R^\infty + \int\limits_R^\infty\int\limits_z^\infty \tag{17}$$

и учитывая, что

$$\text{при } \rho > R \quad W(\rho) = W(\infty) = \text{const} = W(R), \tag{18}$$

для суммы пространственных скоростей вместо (14) получим

$$\sum_x^R v = W(R) + \frac{1}{2}\left[\int\limits_x^R\int\limits_z^R \frac{W(\rho)}{\rho^2}\, d\rho dz - \int\limits_x^R \frac{W(\rho)}{\rho}\, d\rho - \frac{W(R)}{R}\, x - W(x)\right]. \tag{19}$$

Заметим, что в (19) формальная подстановка $R = \infty$ незаконна и не приводит к выражению (14). Введение функции $W^*(\rho) = W(R) - W(\rho)$ делает очевидным тождественность формул (14) и (19).

Функцию $F(x)$ мы определили, исходя из двумерного распределения звезд на небесной сфере. Если ρ_i — расстояние i-ой звезды от центра ассоциации в проекции, то число звезд в интервале (x, R), как показано одним из авторов [10], равно

$$F(x) = \frac{1}{\pi} \sum_{\rho_i > x} \arc\cos\frac{x}{\rho_i}. \tag{20}$$

Подставляя (20) в (13) и интегрируя по частям, имеем

$$\sum_x^R r = \frac{2}{\pi} \sum_{\rho_i > x} \sqrt{\rho_i^2 - x^2} - xF(x). \tag{21}$$

При вычислениях полезно иметь в виду, что

$$\sum_0^R r = \frac{2}{\pi}\sum_i \rho_i, \qquad \sum_0^R v = W(R). \tag{22}$$

Определение зависимости $\overline{v}(\overline{r})$ проводилось вычислением средних $\overline{v}$ и $\overline{r}$ для слоев конечной толщины $(0, x)$, где величина x менялась от $x = 0$ до $x = R = 500$* *пс* с шагом $\Delta x = 20$ *пс*. При этом

* Мы принимаем радиус синтетической ассоциации равным 500 *пс*. Результаты расчетов не изменятся, если взять произвольное значение $R > 500$ *пс*. Так как на этих расстояниях функция $F(x)$ ничтожно мала и $W(\rho)$ постоянна, то выражения (19)—(21) не зависят от численного значения R, превышающего 500 *пс*.

величина $\bar{r}$ изменялась от $\bar{r}_{min} = 30$ *пс* до 100 *пс*. Затем рассматривался конечный слой (x, R), где переменная x также менялась с шагом в 20 *пс*. При этом получалась зависимость $\bar{v}(\bar{r})$ для области 170 *пс* $< \bar{r} <$ 500 *пс*. Область 100 *пс* $< \bar{r} <$ 170 *пс* отсутствует опять же из-за неопределенности ρ_l для большинства звезд с $\rho <$ 50 *пс*. Для этой области мы рассмотрели с помощью формулы (15) только два слоя (20 *пс*, 100 *пс*) и (40 *пс*, 140 *пс*) со средними расстояниями соответствующих звезд $\bar{r} = 132$ *пс* и 145 *пс**. Интегралы в (19) вычислялись по формуле трапеций также с шагом $\Delta x = 20$ *пс*.

Результаты вычислений, относящиеся ко всем O—B1 звездам синтетической ассоциации (290 звезд), а также отдельно к звездам спектральных классов O—B0 (222) и B0.5—B1 (68), графически представлены на рис. 4. Заметим, что зависимость $\bar{v}(\bar{r})$, получаемая с помощью формул (16)—(21) даже при малом числе использованных звезд, практически является непрерывной. На рис. 4 отложены только дискретные значения этой функции.

Во всех трех случаях $\bar{v}(\bar{r})$ является возрастающей функцией**. Прямые линии на рис. 4 проведены методом наименьших квадратов. Значения постоянных a и b в уравнениях этих прямых: $\bar{v} = a\bar{r} + b$ приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Звезды	Число звезд	a (*км/сек. кпс*)	b (*км/сек*)
O—B0	222	102.56	18.34
B0.5—B1	68	37.96	15.83
O—B1	290	88.94	17.31

Таким образом, численные расчеты, основанные на наблюдательных данных, показывают, что зависимость $\bar{v}(\bar{r})$ в синтетической ассоциации с достаточной точностью является линейной.

* Функция $\bar{v}(\bar{r})$ в интервалах 170—500 *пс* и 100—170 *пс*, в принципе, полностью определяется значениями в интервале 30—100 *пс*. Мы проводим эти вычисления лишь для того, чтобы получить лучшее представление о поведении этой функции.

** Следует отметить, что достаточным (но не необходимым) условием возрастания $\bar{v}(\bar{r})$ является неубывание средней лучевой скорости с удалением от центра ассоциации в проекции на небесную сферу. Как видно из рис. 3, это условие выполняется для рассмотренных нами случаев O—B0 и B0.5—B1 звезд.

Можно показать (см. Приложение I), что в этом частном случае, когда $\bar{v}(\bar{r})$ является линейной, искомая функция $v(r)$ также должна быть линейной, причем с теми же параметрами, что и $\bar{v}(\bar{r})$. Иначе говоря, в этом случае указанные функции тождественно равны: $v(r) \equiv \bar{v}(\bar{r})$. Хотя, вообще говоря, две группы звезд, в среднем одинаково удаленные от центра ассоциации, не обладают одинаковой средней пространственной скоростью, однако, в этом случае, независимо от способа выбора групп, для которых определяются $\bar{v}$ и $\bar{r}$, линейная функция $\bar{v}(\bar{r})$ должна остаться неизменной.

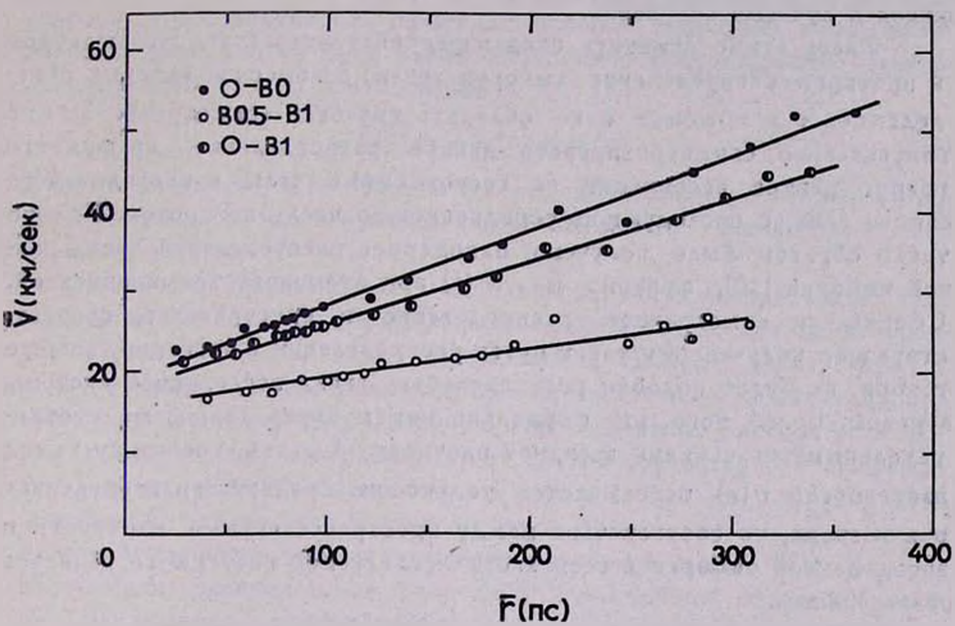

Рис. 4. Зависимости $\bar{v}(\bar{r})$ в синтетической ассоциации. Прямые проведены методом наименьших квадратов. Ввиду линейности функции $\bar{v}(\bar{r})$ для всех трех случаев $v(r) \equiv \bar{v}(\bar{r})$.

В этом случае оказывается также, что из линейности функции $\bar{v}(\bar{r})$ в области $\bar{r} > \bar{r}_{min}$ следует ее линейность и в области $\bar{r} < \bar{r}_{min}$ (см. Приложение II). Следовательно, приведенные выше результаты (рис. 4) свидетельствуют о том, что в синтетической ассоциации зависимость между $\bar{v}$ и $\bar{r}$, а следовательно, и между v и r — линейно возрастающая для всех значений $r > 0$.

В наших расчетах не учтены 10 звезд (плюс к 290), для которых ρ_i больше условно принятого для синтетической ассоциации радиуса $R = 500$ *пс*. Введение этих звезд в расчеты приводит к изменению на несколько *км/сек* лучевых скоростей центров соответствующих ассоциаций (эти лучевые скорости приняты равными средней лучевой скорости составляющих звезд), а следовательно, и остаточных лучевых скоростей звезд. Однако зависимости $\bar{v}(\bar{r})$, полученные с учетом указанных звезд, оказались в неожиданно хорошем согласии с приведенными на рис. 4. Это говорит о том, что применяемый метод мало чувствителен относительно случайных ошибок, содержащихся в лучевых скоростях.

Здесь важно отметить следующее обстоятельство. Наблюдаемое в проекции распределение выборки звезд, с помощью которых определяются $\bar{v}$ и $\bar{r}$, может и не обладать круговой симметрией. Можно искусственно симметризировать данное распределение, вращая его вокруг центра ассоциации на всевозможные углы и накладывая на самого себя, с последующим усреднением по числу поворотов. Именно таким образом было получено одномерное распределение звезд данной выборки [10], функция же $W(\rho)$ при этом остается неизменной. Сферически-симметричное распределение в пространстве, соответствующее полученному таким путем распределению в проекции, вообще говоря, не будет подобно распределению звезд исследуемой системы в целом. Более того, мы формально можем иметь дело даже с отрицательными значениями звездной плотности. Однако, поскольку вывод зависимости $\bar{v}(\bar{r})$ основывается только на средних характеристиках $\bar{v}$ и $\bar{r}$ звезд, то соответствие между пространственными плотностями звезд данной выборки и всех звезд исследуемой системы не является обязательным.

О направлениях пространственных скоростей. При выводе расчетных формул для определения зависимости $v(r)$ мы предполагали, что пространственные скорости всех звезд ассоциации имеют радиальное по отношению к центру системы направление. Может показаться, что это является ограничением и предопределило полученный нами вывод о возрастающем характере функции $v(r)$. Однако можно показать, что этот вывод остается в силе и при более общих предположениях относительно направлений пространственных скоростей звезд в системе.

Рассмотрим звезды, находящиеся на разных расстояниях от центра ассоциации (сферические оболочки). Полученный выше вывод о возрастании средней величины v с ростом r, свидетельствует о том, что средняя абсолютная величина v_r наблюдаемой лучевой скорости тем больше, чем дальше в пространстве находится звезда от центра ассоциации. В противном случае, в предположении радиальной направленности скоростей функция $v(r)$ не была бы возрастающей. Более того, в силу изотропности радиальных скоростей звезд каждой концентрической сферы имеем:

$$v_r(r) = \frac{1}{2} v(r). \tag{23}$$

Допустим, что направления пространственных скоростей звезд в системе имеют произвольное распределение в каждой ее точке. При условии, что совокупность пространственных скоростей звезд, находящихся на любой из сфер имеет изотропное в пространстве распределение, справедливо соотношение

$$u(r) = 2\, v_r(r) = v(r). \tag{24}$$

В этом равенстве $u(r)$ представляет собой среднюю величину пространственных скоростей звезд, расположенных в тонкой сферической оболочке радиуса r.

Например, равенство (24) выполняется, когда распределение скоростей звезд, лежащих в окрестности каждой точки системы изотропное. Оно справедливо также тогда, когда скорости звезд в каждой точке системы лежат в плоскости, перпендикулярной радиусу, проходящему через эту точку, причем в каждой такой плоскости скорости распределены изотропно. Этот случай соответствует движению звезд по случайно ориентированным круговым орбитам вокруг центра системы. Очевидно, что в этих случаях средняя величина пространственной скорости растет с увеличением r по закону (24). Условие изотропного распределения скоростей звезд данной сферы означает, что наблюдаемое распределение лучевых скоростей не зависит от направления наблюдения системы.

Зависимость $u(r)$ является возрастающей и при более общем предположении: распределение лучевых скоростей звезд каждой сферы зависит от направления наблюдения, но одинаковым образом для всех концентрических сфер, например, когда движения звезд происходят по орбитам, плоскости которых параллельны друг другу и т. д.

Таким образом, вывод о линейно-возрастающем характере функции $u(r)$ для рассмотренной нами совокупности звездных ассоциаций справедлив и при достаточно общих предположениях относительно направлений пространственных скоростей звезд в системе.

О динамической устойчивости ассоциаций. Рассмотрим вопрос о динамической устойчивости ассоциаций в собственном гравитационном поле, основываясь на полученной возрастающей зависимости $u(r)$ — средней величины пространственной скорости звезд от их расстояния до центра синтетической ассоциации.

При этом следует иметь в виду не всю синтетическую ассоциацию, а отдельные ассоциации, так как во взаимодействии друг с другом участвуют только звезды, принадлежащие данной ассоциации. Зависимость $v(r)$, полученная для синтетической ассоциации, применима к известным ассоциациям в среднем и поэтому может быть приписана только гипотетической „средней“ ассоциации, обладающей характеристиками, близкими к средним характеристикам всех рассмотренных ассоциаций.

Для решения поставленной задачи мы рассмотрим случай круговых орбит.

Звезда, находящаяся на расстоянии r от центра системы может двигаться по круговой орбите при условии

$$u(r) = \left[\frac{\gamma M(r)}{r}\right]^{1/2}, \tag{25}$$

где $M(r)$ — суммарная масса звезд ассоциации внутри сферы радиуса r и γ — гравитационная постоянная.

Для простоты примем массы всех звезд одинаковыми и равными m. Тогда $M(r)$ выразится через пространственную звездную плотность $\Phi(r)$ посредством формулы

$$M(r) = 4\pi m \int_0^r \Phi(r)\, r^2 dr. \tag{26}$$

Из выражений (25) и (26) следует, что возрастающая зависимость $u(r)$ совместима с допущением об устойчивости круговых орбит звезд*, только в том случае, когда пространственная плотность $\Phi(r)$ убывает с расстоянием медленнее, чем r^{-2}.

В частности, при $\Phi(r) = \text{const}$ внутри всей ассоциации имеем

$$u(r) \sim r. \tag{27}$$

Хотя это допущение резко противоречит наблюдательным данным о распределении звездной плотности в ассоциациях [11, 12], этот пример иллюстрирует принципиальную возможность линейного возрастания u с r в динамически устойчивых системах.

* Случай устойчивых некруговых орбит отличается от случая круговых орбит более слабым возрастанием u с r, при данном распределении $\Phi(r)$.

Пользуясь выражением (25), можно оценить массу ассоциации, в которой возможны устойчивые движения звезд со скоростями, близкими к полученным выше для синтетической ассоциации. Например, при величине скорости $u = 20$ *км/сек* на расстоянии $r = 100$ *пс* от центра системы получим

$$M(r) = u^2(r)\, r/\gamma \approx 10^7 M_{\odot},$$

независимо от вида функции $\Phi(r)$.

Отсутствие столь больших масс в ассоциациях при наличии линейно-возрастающей зависимости $u(r)$ непосредственно приводит к выводу о динамической неустойчивости рассматриваемой „средней" ассоциации, то есть совокупности существующих звездных ассоциаций, в среднем.

Следует отметить, что вычисленные на основе остаточных лучевых скоростей средние значения пространственных скоростей звезд могут быть несколько занижены вследствие того, что лучевая скорость центра системы в действительности может отличаться от среднего значения лучевых скоростей звезд, используемых в вычислениях.

Ради полноты следует указать, что возрастающий ход u с r допускает еще одну, также крайне неправдоподобную интерпретацию, не связанную с представлением о расширении звездных ассоциаций [4]. Допустим, что существует галактический фон О—В звезд, проектирующихся на данную ассоциацию, причем звезды этого фона обладают по отношению к центру тяжести ассоциации скоростями, значительно превышающими скорости членов ассоциации. Тогда наблюдаемую зависимость $u(r)$ можно истолковать как следствие различного процентного содержания О—В звезд указанных двух типов на разных расстояниях от центра ассоциации. Иначе говоря, следует считать, что большие значения u при удалении от центра системы обусловлены тем, что с удалением от центра убывает число О—В звезд, входящих в систему, и, наоборот, растет число проектирующихся О—В звезд общего галактического поля.

Необходимо заметить, однако, что при наличии такого фона, его нетрудно учесть в вычислениях и исключить из рассмотрения.

Заключение. Анализ остаточных лучевых скоростей и пространственного распределения 290 О—В1 звезд в синтетической ассоциации указывает на возрастание *средней пространственной скорости* с расстоянием от центра ассоциации.

Аналогичный результат был получен для более узких интервалов спектральных классов, когда все звезды, фигурирующие в вычислениях, были разделены на две группы: О—В0 (222 звезды) и

B0.5—B1 (68 звезд). Сказанное иллюстрируется рис. 4, где представлена зависимость средней скорости расширения от среднего расстояния до центра ассоциации: для всех звезд и для звезд указанных двух групп. Данные, относящиеся к разным выборкам, находятся в качественно хорошем согласии между собой. Из этих данных следует также, что скорости O—B0 звезд в среднем несколько превосходят соответствующие скорости B0.5—B1 звезд.

Таким образом, анализ остаточных лучевых скоростей O—B1 звезд в звездных ассоциациях, основанный на применении формул (19)—(21), *полностью* подтверждает полученный ранее вывод [4] о возрастании средней пространственной скорости этих звезд с расстоянием от центра синтетической ассоциации. Этот факт, как следует из приведенного выше обсуждения, является веским *свидетельством в пользу представления о расширении звездных ассоциаций и динамической их неустойчивости.*

Авторы выражают глубокую благодарность В. А. Амбарцумяну за ценное обсуждение, а Э. С. Казарян и А. В. Теребиж за помощь в вычислениях.

Приложение I

О линейности зависимости $v(r)$. Пусть для различных, по положению в пространстве и числу звезд, групп зависимость $\bar{v}(\bar{r})$ является линейной

$$\bar{v} = a\bar{r} + b. \tag{I.1}$$

Каждая из величин $\bar{v}$ и $\bar{r}$ зависит от области Ω пространства, занимаемой соответствующей группой звезд.

Предполагается, что объем и положение области Ω изменяются непрерывно. Если $n(\Omega)$ есть число звезд в Ω, то, по определению средних,

$$\bar{v} = \frac{1}{n}\int_n v\,dn, \qquad \bar{r} = \frac{1}{n}\int_n r\,dn.$$

Варьируя область Ω, имеем

$$\frac{\delta\bar{v}}{\delta n} = \frac{v - \bar{v}}{n}, \qquad \frac{\delta\bar{r}}{\delta n} = \frac{r - \bar{r}}{n} \tag{I.2}$$

или

$$\frac{\delta\bar{v}}{\delta\bar{r}} = \frac{v - \bar{v}}{r - \bar{r}}. \tag{I.3}$$

С учетом (I.1) выражение (I.3) примет вид

$$\frac{\delta \bar{v}}{\delta \bar{r}} = \frac{v - a\bar{r} - b}{r - \bar{r}}.$$

Сравнивая это с соотношением $\delta\bar{v}/\delta\bar{r} = a$, следующим из (I.1), получаем

$$v = ar + b.$$

Та же линейность (I.1) между $\bar{v}$ и $\bar{r}$ сохраняется и для всех тех значений $\bar{r}$, которые соответствуют произвольной, непрерывно изменяющейся части области Ω. В частности, если размеры такой подобласти бесконечно малы, то для всех значений r, включаемых в процесс усреднения (I.1), справедливо соотношение (I.3). Эквивалентное утверждение доказывается в Приложении II для рассмотренного в настоящей работе частного случая, когда областью Ω служит плоскопараллельный разрез ассоциации.

Приложение II

Линейность $\bar{v}(\bar{r})$ при малых значениях $\bar{r}$. Пусть зависимость $\bar{v}(\bar{r})$ является линейной в области $\bar{r} > \bar{r}_{min}$ для звезд, расположенных внутри рассмотренных нами плоскопараллельных слоев конечной толщины. При этом, как это уже было отмечено нами, линейная зависимость $\bar{v}(\bar{r})$ сохраняется при произвольном способе выбора звездных групп с областью изменения $\bar{r}$ от $\bar{r}_{min}$ до R. В частности, это справедливо для групп звезд, находящихся внутри произвольных дисков одинаковой толщины, расположенных на разных расстояниях от центра ассоциации. Мы ниже рассматриваем диски одинаковой бесконечно малой толщины.

Рассмотрим звезды, находящиеся внутри диска произвольного радиуса, проходящего через центр ассоциации. Определив для них среднюю скорость и среднее расстояние при различных значениях радиуса диска, меньшего R, можно вывести зависимость $\bar{v}(\bar{r})$ для области $\bar{r} < \bar{r}_{min}$.

Действительно, число звезд внутри диска радиуса x есть разность чисел звезд внутри диска радиуса R и плоского кольца (x, R), составляющего продолжение первого диска до последнего.

С другой стороны, нетрудно показать, что число звезд в плоских кольцах одинаковой толщины, расположенных между двумя заданными концентрическими сферами, на любом расстоянии от центра системы, одинаково. В частности, число звезд в центральном плоском кольце (x, R) равно числу звезд внутри диска, являющегося сечением ассоциации на расстоянии x от ее центра. Такое равенство имеет место не только для числа звезд, но и для суммы любых скалярных величин, обладающих пространственным распределением, сферически-симметричным относительно центра системы, в частности, для суммы пространственных скоростей и суммы расстояний звезд до центра ассоциации.

Обозначим число звезд внутри диска единичной толщины, находящегося на расстоянии x от центра ассоциации, через $f(x)$, а суммы их скоростей и расстояний, соответственно, $V(x)$ и $P(x)$. Согласно условию $\bar{v} = a\bar{r} + b$, имеем

$$\frac{V(x)}{f(x)} = a\frac{P(x)}{f(x)} + b. \tag{II.1}$$

Перепишем соотношение (II.1) для двух значений аргумента: x и 0 в виде

$$V(x) = aP(x) + bf(x), \qquad V(0) = aP(0) + bf(0). \tag{II.2}$$

Как было указано выше, средняя пространственная скорость и среднее расстояние звезд, находящихся внутри центрального диска радиуса x, соответственно равны:

$$\frac{V(0) - V(x)}{f(0) - f(x)} \quad \text{и} \quad \frac{P(0) - P(x)}{f(0) - f(x)}. \tag{II.3}$$

Непосредственная подстановка выражений (II.2) в (II.3) показывает, что эти две величины связаны между собой уравнением прямой с параметрами a и b.

Таким образом, искомая зависимость $\bar{v}(\bar{r})$ для $\bar{r} < \bar{r}_{\min}$ действительно линейна и является продолжением линейной зависимости $\bar{v}(\bar{r})$, выведенной для значений $\bar{r} > \bar{r}_{\min}$.

Бюраканская астрофизическая обсерватория

A STUDY OF VELOCITY DISTRIBUTION OF O—B STARS IN ASSOCIATIONS

L. V. MIRZOYAN, M. A. MNATSAKANIAN

The distribution of the values of space velocities of O—B stars in the synthetic association has been studied. A method for the determination of the mean value of space velocities of stars in spherically-symmetric systems at different distances from the centre of the system has been proposed. By the application of this method to the synthetic association it has been shown that the dependence $v(r)$ of the value of mean space velocities of stars upon the distance from the centre is a linear-increasing function.

The possible interpretations of this dependence have been discussed. The only interpretation which is not at variance with the observational data (stellar density distribution in associations, masses of associations etc.) is based on the assumption of an expansion of the synthetic association. This leads to the conclusion that the obtained linear-increasing dependence is an evidence of the expansion of the synthetic association and confirms the dynamical instability of stellar associations.

ЛИТЕРАТУРА

1. *В. А. Амбарцумян*, Астрон. ж., 26, 3, 1949.
2. *A. Blaauw*, Bull. Astr. Inst. Netherl., 12, 405, 1953.
3. *Б. Е. Маркарян*, Сообщ. Бюр. обс., 11, 3, 1953.
4. *Л. В. Мирзоян*, Сообщ. Бюр. обс., 29, 81, 1961.
5. *П. Р. Паренаго*, Курс звездной астрономии, М., 1954, стр, 76.
6. *H. C. Plummer*, M. N., 71, 460, 1911.
7. *R. E. Wilson*, General Catalogue of Radial Velocities, Washington, 1953.
8. *J. Ruprecht*, Transactions of the IAU, vol. XIII B, 1966, p. 350.
9. *W. A. Hiltner*, Ap. J., Suppl. ser., 2, 389, 1955.
10. *М. А. Мнацаканян*, ДАН Арм. ССР, 49, 33, 1969.
11. *Л. В. Мирзоян*, Сообщ. Бюр. обс., 33, 41, 1963.
12. *Л. В. Мирзоян*, Диссертация, ГАО АН СССР. 1967.