

УДК 524.4

Обнаружение движущихся скоплений методом кинематических пар

М. Ф. Ходячих, Е. А. Романовский

Харьковский государственный университет
61077, Харьков, пл. Свободы 4

Предложен и реализован алгоритм выявления пар звезд с общим движением. Основным источником служил каталог HIPPARCOS. По концентрации кинематических пар обнаружено три неизвестных ранее движущихся скопления в созвездиях Phe (1), Cae (2), Hor (3) и хорошо известное скопление в UMa (4). По оригинальной методике выделено 87 звезд — членов скоплений. Для каждого скопления оценены координаты радианта α , δ (в градусах), пространственная скорость (в км/с), возраст (в 10^6 лет) по подходящим изохронам, а также числа отождествленных (и вероятных) членов скоплений: 1) 51, -29 , 19.0, 500, 5(6); 2) 104, -32 , 23.7, 300, 9(12); 3) 119, -27 , 22.3, 100, 9(22); 4) 303, -31 , 16.7, 500, 16(8). Проведен предварительный качественный анализ пространственной структуры скоплений с учетом их динамической эволюции.

ВИЯВЛЕННЯ РУХОМИХ СКУПЧЕНЬ МЕТОДОМ КІНЕМАТИЧНИХ ПАР, Ходячих М. Ф., Романовський Є. А. — Запропоновано та реалізовано алгоритм виявлення пар зірок із спільним рухом. Основним джерелом був каталог HIPPARCOS. За концентрацією кінематичних пар знайдено три невідомі раніше скупчення у сузір'ях Phe (1), Cae (2), Hor (3) та добре відоме скупчення в UMa (4). За оригінальною методикою виявлено 87 зірок — членів скупчень. Для кожного скупчення знайдено координати радіанта α , δ (в градусах), просторову швидкість (в км/с), вік за ізохронами (в 10^6 років), а також числа ототожнених (та ймовірних) членів скупчень: 1) 51, -29 , 19.0, 500, 5(6); 2) 104, -32 , 23.7, 300, 9(12); 3) 119, -27 , 22.3, 100, 9(22); 4) 303, -31 , 16.7, 500, 16(8). Проведено попередній якісний аналіз просторової структури скупчень з урахуванням їх динамічної еволюції.

DETECTION OF MOVING CLUSTERS BY A METHOD OF CINEMATIC PAIRS, by Khodjachikh M. F., Romanovsky E. A.— The algorithm of revealing of pairs stars with common movement is offered and is realized. The basic source is the catalogue HIPPARCOS. On concentration of kinematic pairs it is revealed three unknown earlier moving clusters in constellations: 1) Phe, 2) Cae, 3) Hor and, well known, in 4) UMa are revealed. On an original technique the members of clusters — all 87 stars are allocated. Coordinates of the clusters convergent point α , δ (in degrees), spatial speed (in km/s) and age (in 10^6 yr) from isochrone fitting have made: 1) 51, -29 , 19.0, 500, 5/6; 2) 104, -32 , 23.7,

300, 9/12; 3) 119, -27, 22.3, 100, 9/22; 4) 303, -31, 16.7, 500, 16/8 accordingly. Numerator of fraction — number of stars identified as the members of clusters, denominator — number of the probable members (with unknown radial speeds). The preliminary qualitative analysis of clusters spatial structure is carried in view of their dynamic evolution.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известно несколько движущихся скоплений [5], выявленных либо по повышенной концентрации звезд в некоторых участках неба, либо по общности собственных движений звезд. Выявление звезд с общим движением среди звезд фона связано с большими трудностями. В [3] предложен и реализован метод выявления движущихся скоплений по галактическим компонентам U , V , W пространственных скоростей относительно Солнца, направленным соответственно в центр Галактики, по направлению галактического вращения и в северный полюс Галактики. Использовался каталог близких звезд [6, 7]. Движущиеся скопления образуют кластеры в U , V , W -пространстве. В [3] для их выявления предложен метод главных звезд, в [4] — метод иерархического сгущивания. Надежно выявлено пять богатых движущихся скоплений с остаточными скоростями не более 6 км/с и числом членов 35—40 и менее уверенно — семь бедных скоплений.

Актуальной задачей является поиск скоплений с дисперсией скоростей, характерной для рассеянных скоплений, так как население галактического диска состоит из большого числа проникших друг в друга движущихся скоплений, а малое число известных таких скоплений объясняется трудностью их обнаружения [2].

Фактически задача выявления скоплений сводится к выявлению кластеров в пространстве скоростей, где каждая звезда изображается точкой. Неопределенность положения звезды можно характеризовать объемом фазовой ячейки, размеры которой определяются ошибками составляющих скорости. При переходе от одной системы координат к другой объем ячейки изменяется. Для эффективного выделения кластеров ее объем должен быть минимальным. Это условие позволяет выбрать наиболее подходящую систему координат для решения задачи. Из наблюдений определяются компоненты собственного движения μ_x , μ_y , лучевая скорость V_r и параллакс звезды π , которые фиксируют положение звезды в пространстве скоростей в сферической системе координат. Звезда с определенной вероятностью находится внутри ячейки — цилиндра, ось которого ориентирована по лучу зрения. Высота цилиндра определяется ошибкой лучевой скорости, а размер основания зависит от ошибок величин μ_x , μ_y и π . В декартовой системе координат ячейка — прямоугольный параллелепипед, размеры которого зависят от ошибок составляющих U , V , W . Легко убедиться, что объем ячейки неопределенности в прямоугольной системе координат будет больше, чем в сферической. В случае, когда размер основания цилиндра существенно меньше его высоты (большие ошибки V_r), диагональ параллелепипеда приблизительно будет равна высоте цилиндра, и объем ячейки в сферической системе координат будет существенно меньше, чем в декартовой. В общем случае обычно наиболее точно известны компоненты μ_x , μ_y . Они определяют ориентацию плоскости, проходящей через вектор скорости и луч зрения. Ячейка неопределенности будет иметь наибольший размер в этой плоскости и наименьший размер в перпендикулярном направлении, зависящий от ошибки определения позиционного угла вектора собственного движения. При уменьшении ошибок величин μ_x , μ_y объем ячейки будет уменьшаться соответственно. В прямоугольной системе координат объем

ячейки будет больше, и при уменьшении ошибок величин μ_x, μ_y он после достижения некоторого предела уменьшаться не будет. Следовательно, в пространстве скоростей при переходе от сферической к декартовой системе координат происходит потеря точности. Поэтому для выявления скоплений с низкой дисперсией скоростей предпочтительно использовать сферическую систему координат.

В настоящей работе предлагается метод, основанный на выявлении кинематических пар звезд (КП), позволяющий определять угловые координаты радианта пары и ее пространственную скорость V . Чтобы избежать потери достигнутой при измерениях составляющих точности, основные расчеты при этом проводятся в подвижной системе координат [1]. Анализ распределения радиантов пар на небе и их скоростей V позволяет обнаруживать неизвестные ранее движущиеся скопления.

ВЫЯВЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАР

Пусть для двух звезд S_1 и S_2 с равными векторами пространственных скоростей известны координаты α, δ , компоненты собственного движения μ_x, μ_y , параллаксы и лучевые скорости V_r . Рассчитаем координаты их радианта: A — прямое восхождение и D — склонение. Собственное движение звезды μ и его позиционный угол θ определяются формулами

$$\mu = (\mu_x^2 + \mu_y^2)^{1/2}, \quad \text{tg}\theta = \frac{\mu_x}{\mu_y}. \quad (1)$$

В сферическом треугольнике PS_1S_2 (P — полюс мира) расстояние s_{12} между звездами и углы S_1 и S_2 найдем из соотношений

$$\text{coss}_{12} = \text{sin}\delta_1\text{sin}\delta_2 + \text{cos}\delta_1\text{cos}\delta_2\text{cos}(\alpha_2 - \alpha_1), \quad (2)$$

$$\text{sin}S_i = \text{cos}\delta_j \frac{\text{sin}(\alpha_j - \alpha_i)}{\text{sin}s_{12}}, \quad (3)$$

где $j = 3 - i$. В сферическом треугольнике RS_1S_2 (R — радиант) углы при вершинах S_1 и S_2 будут равны соответственно $t_1 = S_1 - \theta_1$ и $t_2 = S_2 + \theta_2$.

Угол между направлениями на звезды из точки радианта определим формулой

$$\text{cos}f = -\text{cost}_1\text{cost}_2 + \text{sin}t_1\text{sin}t_2\text{cos}s_{12}, \quad (4)$$

а угловые расстояния звезд от радианта λ_1 и λ_2 находятся из соотношений

$$\text{tg}\lambda_1 = \frac{\text{sin}s_{12}}{\text{coss}_{12}\text{cost}_1 + \text{sin}t_1\text{ctg}t_2}, \quad (5)$$

$$\text{sin}\lambda_1 = \text{sin}t_2 \frac{\text{sin}s_{12}}{\text{sin}f}. \quad (6)$$

Формулы для определения координат радианта запишем в виде

$$\begin{aligned} \text{sin}D &= \text{sin}\delta_1 \text{cos}\lambda_1 + \text{cos}\delta_1 \text{sin}\lambda_1 \text{cos}\theta_1, \\ \text{sin}(A - \alpha_1)\text{cos}D &= \text{sin}\lambda_1 \text{sin}\theta_1, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{cos}(A - \alpha_1)\text{cos}D = \text{cos}\lambda_1 \text{cos}\delta_1 - \text{sin}\lambda_1 \text{sin}\delta_1 \text{cos}\theta_1.$$

Пространственную скорость V определим по компонентам V_r или $V_t = k\mu/\pi$ каждой звезды

$$V_i^r = \frac{V_{ri}}{\text{cos}\lambda_i}, \quad (8a)$$

$$V_i^t = \frac{V_{ti}}{\text{sin}\lambda_i}. \quad (8b)$$

Оценки V_1 и V_2 для реальных пар будут различаться вследствие неточного равенства скоростей звезд и ошибок измерений их составляющих. От величин V_1 и V_2 удобно перейти к величинам

$$V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2), \quad eV = \frac{1}{2}(V_1 - V_2). \quad (9)$$

Накладывая ограничения на eV , можно отбирать пары звезд — кандидаты в кинематические пары с оценкой координат их радиантов A , D и скоростей V . При таком отборе необходимо учитывать ошибки оценок параметров пар. Формулы для расчета ошибок приведены ниже.

Пусть известны средние квадратичные ошибки измерения составляющих собственного движения σ_{μ_x} , σ_{μ_y} , параллакса σ_π , лучевой скорости σ_{V_r} и коэффициенты корреляции ошибок $\rho_{\mu_x}^{\mu_y}$, $\rho_{\mu_x}^{\mu_x}$ и $\rho_{\mu_x}^{\mu_y}$. Ошибки σ_μ и σ_θ представим в виде

$$\sigma_\mu = (\sin^2\theta\sigma_{\mu_x}^2 + \cos^2\theta\sigma_{\mu_y}^2 + \sin 2\theta\rho_{\mu_x}^{\mu_y}\sigma_{\mu_x}\sigma_{\mu_y})^{1/2}, \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{\mu} (\cos^2\theta\sigma_{\mu_x}^2 + \sin^2\theta\sigma_{\mu_y}^2 - \sin 2\theta\rho_{\mu_x}^{\mu_y}\sigma_{\mu_x}\sigma_{\mu_y})^{1/2}. \quad (11)$$

Ошибка угла f определяется формулой

$$\sigma_f = \frac{1}{\sin f} [g_1^2\sigma_{\theta_1}^2 + g_2^2\sigma_{\theta_2}^2]^{1/2}, \quad (12)$$

где

$$g_i = \sin t_i \cos t_j + \cos t_i \sin t_j \cos s_{12}.$$

Для ошибок угла λ и тангенциальной скорости V_t получим

$$\sigma_{\lambda_i} = \frac{\sin s_{12}}{\cos \lambda_i \sin^2 f} \left[\left(\frac{g_i \sin t_j \cos f}{\sin f} + \cos t_j \sin f \right)^2 \sigma_{\theta_j}^2 + \left(\frac{g_i \sin t_j \cos f}{\sin f} \right)^2 \sigma_{\theta_i}^2 \right]^{1/2}, \quad (13)$$

$$\sigma_{V_t} = \frac{k}{\pi^2} [\pi^2\sigma_\mu^2 + \mu^2\sigma_\pi^2 - 2\pi\mu(\sin\theta\rho_{\mu_x}^{\mu_x}\sigma_{\mu_x} + \cos\theta\rho_{\mu_y}^{\mu_y}\sigma_{\mu_y})\sigma_\pi]^{1/2}. \quad (14)$$

Формулы для ошибки определения пространственной скорости пары по радиальной σ_{V_r} и тангенциальной σ_{V_t} скорости i -й или j -й звезды представим в виде

$$\sigma_{V_r} = \frac{1}{\cos^2\lambda} (\cos^2\lambda\sigma_{V_r}^2 + V_r^2\sin^2\lambda\sigma_\lambda^2)^{1/2}, \quad (15)$$

$$\sigma_{V_t} = \frac{1}{\sin^2\lambda_i} \left(\sin^2\lambda_i\sigma_{V_{ti}}^2 + V_{ti}^2\cos^2\lambda_i\sigma_{\lambda_i}^2 - \frac{2kV_{ti}g_i}{\pi_1\mu_1\sin^3f} \cos f \sin s_{12} \sin \lambda_i \sin t_j \varepsilon \right)^{1/2}, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \varepsilon = & \sin\theta_1 \cos\theta_1 (\sigma_{\mu_{x1}}^2 - \sigma_{\mu_{y1}}^2) + (\cos^2\theta_1 - \sin^2\theta_1)\rho_{\mu_{x1}}^{\mu_{y1}}\sigma_{\mu_{x1}}\sigma_{\mu_{y1}} - \\ & - \frac{\mu_1}{\pi_1} (\cos\theta_1 \rho_{\mu_{x1}}^{\mu_{x1}}\sigma_{\mu_{x1}} - \sin\theta_1 \rho_{\mu_{y1}}^{\mu_{y1}}\sigma_{\mu_{y1}})\sigma_{\pi_1}. \end{aligned}$$

Как видно, ошибка определения V при прочих равных условиях сильно зависит от угла f . При малых f расстояния звезд от радианта λ_i определяются неуверенно, что приводит к большим ошибкам координат A и D .

Накладывая ограничения на ошибки σ_{λ_i} и σ_{V_t} , такие пары можно исключить из рассмотрения.

Найденные координаты A , D определяют одну из двух точек пересечения больших кругов, проходящих через векторы μ_1 и μ_2 . Точка, к которой сходятся оба вектора μ , является радиантом. Если ни одна из двух точек не удовлетворяет этому условию, пара звезд не может быть кинематической.

ВЫЯВЛЕНИЕ ЧЛЕНОВ СКОПЛЕНИЯ

Если известны положение радианта A , D и пространственная скорость V , то звезды, принадлежащие скоплению, можно выделять, анализируя их компоненты собственных движений и лучевые скорости V_r . Для случая, когда известны собственные движения и надежные параллаксы звезд, можно предложить следующий метод выделения членов скопления. В сферическом треугольнике PSR (P — полюс мира, S — звезда, R — радиант) угол S (позиционный угол ψ стороны RS) определим из соотношений

$$\cos\lambda = \sin D \sin\delta + \cos D \cos\delta \cos(A - \alpha), \quad (17)$$

$$\sin\psi = \frac{\cos D \sin(A - \alpha)}{\sin\lambda}, \quad (18)$$

$$\cos\psi = \frac{\sin D - \cos\lambda \sin\delta}{\sin\lambda \cos\delta},$$

где α , δ — координаты звезды, λ — расстояние звезды от радианта. Ожидаемая тангенциальная скорость звезды как члена скопления равна $V_t^T = V \sin\lambda$ и имеет позиционный угол ψ ; наблюдаемая скорость V_t^H определяется соотношением (8б). Проекции ν , τ разности $V_t^H - V_t^T$ на сторону SR и на перпендикулярное направление будут равны

$$\nu = V_t^H \cos(\psi - \theta) - V_t^T, \quad (19)$$

$$\tau = V_t^H \sin(\psi - \theta). \quad (20)$$

Накладывая ограничения на максимальные величины ν и τ , можно проводить отбор звезд—кандидатов в члены скопления.

Ошибки σ_ν и σ_τ с учетом малости угла $\psi - \theta$ определим так:

$$\sigma_\nu = \sigma_{V_t}, \quad (21)$$

$$\sigma_\tau = \left\{ [(\psi - \theta)\sigma_{V_t}]^2 + [V_t \sigma_\theta]^2 - \frac{k\tau}{\pi\mu} [\sin 2\theta(\sigma_{\mu_x}^2 - \sigma_{\mu_y}^2) + 2\cos 2\theta \rho_{\mu_x \mu_y}^{\mu_x \mu_y} \sigma_{\mu_x} \sigma_{\mu_y}] + \frac{2k\tau}{\pi^2} (\cos\theta \rho_{\mu_x \mu_x}^\pi \sigma_{\mu_x} - \sin\theta \rho_{\mu_y \mu_y}^\pi \sigma_{\mu_y}) \sigma_\pi \right\}^{1/2}. \quad (22)$$

Первое слагаемое в формуле для σ_τ обычно меньше второго, поэтому $\sigma_\tau < \sigma_\nu$.

Звезды, принадлежащие скоплению с заданными A , D , V , должны образовать кластер на диаграмме $\nu - \tau$. Вследствие ошибок значений A , D , V центр кластера может быть смещен относительно начала координат. Если σ_ν и σ_τ малы по сравнению с пекулярными скоростями звезд в скоплении, форма кластера будет близка к кругу. В противном случае кластер будет вытянут по оси ν . По выявленным звездам скопления можно уточнить характеристики радианта. Составим для каждой звезды два уравнения

$$\frac{\partial \nu}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial \nu}{\partial D} \Delta D + \frac{\partial \nu}{\partial V} \Delta V = \nu, \quad (23)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial \tau}{\partial D} \Delta D + \frac{\partial \tau}{\partial V} \Delta V = \tau. \quad (24)$$

Полагая их веса обратно пропорциональными σ_ν^2 и σ_τ^2 , решим их по способу наименьших квадратов и найдем поправки ΔA , ΔD , ΔV к начальным координатам радианта и скорости скопления. Так как для определения

апекса помимо τ -составляющей используется ν -составляющая, в предлагаемом методе систематическая ошибка регрессии [5] не возникает.

ВЫЯВЛЕНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ СКОПЛЕНИЙ И ИХ ЧЛЕНОВ

Основным источником в работе служил каталог HIPPARCOS [12], в котором для звезд ярче 11—12^m приведены координаты, компоненты собственных движений, параллаксы с миллисекундной точностью, коэффициенты корреляции между ошибками этих величин, величины V и другая информация.

На начальном этапе мы использовали выборку из каталога [10] (машинная версия каталога для звезд ярче 8^m) для уточнения методики. КП выделялись по собственным движениям звезд и их лучевым скоростям в области неба радиусом около 40° вокруг центра скопления Гиады. Более надежные результаты были получены при использовании в той же выборке собственных движений из каталога [12]. Точки с координатами радиантов пар A , D были нанесены на карту. В области неба $\alpha < 150^\circ$ выявлено большое сгущение точек. В распределении этих пар по скоростям уверенно выявляется максимум близ $V_m \approx 47$ км/с. С учетом величины ошибок лучевых скоростей отбирались пары с $|V - V_m| < 4$ км/с. Это позволило определить координаты радианта скопления и выделить вероятные члены скопления. Почти все звезды нашей выборки из каталога SAO, выделенные ранее [9, 11], были выявлены. По аналогичной методике было выявлено скопление звезд в UMa и принадлежащие ему звезды, но уже при обзоре абсолютно ярких звезд всей небесной сферы, то есть без какой-либо априорной информации о скоплениях. Однако выявление скоплений и определение V_m по распределению скоростей КП эффективно для скоплений с достаточно большим числом звезд. Для бедных скоплений максимумы распределения V выявляются неуверенно на фоне естественных флуктуаций. К тому же величины V_r известны не для всех звезд. Поэтому в дальнейшем мы проводили выявление скоплений и выделение их членов по величинам V_t на базе данных каталога [12]. Предварительно компоненты собственных движений звезд были исправлены за дифференциальное вращение Галактики.

Для этого мы создали выборку звезд из каталога [12] с абсолютными величинами $M_V < 4^m$ и параллаксами $\pi > 0.020''$, для которых в каталогах [8] и [10] приведены лучевые скорости. У двойных звезд в выборку включался компонент A . Идентификация звезд в разных каталогах проводилась по номерам HD. Далее были отобраны звезды, имеющие в пространстве скоростей хотя бы одну соседку с относительной скоростью не более 6 км/с. В этой выборке проводился поиск КП. Скорости пар V определялись по тангенциальным компонентам V_t согласно формуле (86). Звезды с ненадежными V_t ($\sigma_{V_t} > 1$ км/с) исключались. На параметры пар накладывались ограничения: $eV < 1$ км/с и $\sigma_\lambda < 2^\circ$. При менее жестких ограничениях уменьшается надежность выявления КП. Отбирались пары с расстоянием между звездами не более 30 пс. Было выявлено 68 пар. Их расположение на небе показано на рис. 1, *a*.

Две близкие КП в пространстве скоростей должны состоять не менее чем из трех звезд. Мы выделили такие кинематические группы звезд с общим движением, отобрав КП, имеющие соседей на угловом расстоянии не более 2° и с разностью скоростей V не более 1 км/с (рис. 1, *b*). Таких пар оказалось 18, и они образовали 5 групп. В пятой группе (номера групп в порядке увеличения A) четыре звезды, три из которых принадлежат также 4-й группе. Поэтому при дальнейшем анализе она не учитывалась. Исполь-

звезда средние радианты и скорости групп, мы провели поиск членов каждой из выделенных 4 групп в выборке звезд с расстояниями $r < 50$ пс и $M_V < 4^m$ по описанному выше методу ν , τ -составляющих. Верхний предел ошибок σ_ν и σ_τ принимался равным 1 км/с, как для σ_{V_1} . Таким образом были выделены абсолютно яркие звезды групп в окрестностях Солнца. По их координатам и расстояниям определялись приближенные координаты A_c , D_c и расстояние до центра группы R_c .

Для звезд с $M_V < 5^m$, расположенных от центра каждой группы на расстояниях не более $s_m = 30$ пс (для 3-й группы не более 20 пс), были рассчитаны значения ν и τ (рис. 2). Во всех группах выделяются кластеры вблизи начала координат. В группе 4 размер кластера наименьший. Здесь ошибки σ_ν , σ_τ малы. В остальных группах кластеры больше и вытянуты по оси ν , что можно объяснить большими ошибками σ_ν . Звезды с $M_V < 4^m$ частично были выявлены в КП. Во всех группах есть звезды с $4^m < M_V < 5^m$ вблизи начала координат диаграмм, выделенные только по методу ν , τ -составляющих. Вероятность случайного попадания их в область начала координат мала, что подтверждает реальность выявленных групп—скоплений звезд.

Просмотр диаграмм показывает, что возможные члены скоплений занимают область $|\nu| < 1.5$ км/с и $|\tau| < 0.7$ км/с. В этих пределах мы провели их поиск для каждой группы при $s_m < 50$ пс без ограничений по абсолютной величине.

Таким образом было отобрано всего 95 звезд, число n' звезд в каждом скоплении указано в табл. 1. Для 47 звезд с известными лучевыми скоростями по данным [8, 10, 13] были вычислены разности наблюдаемой и ожидаемой лучевой скорости $V_r^T = V \cos \lambda$.

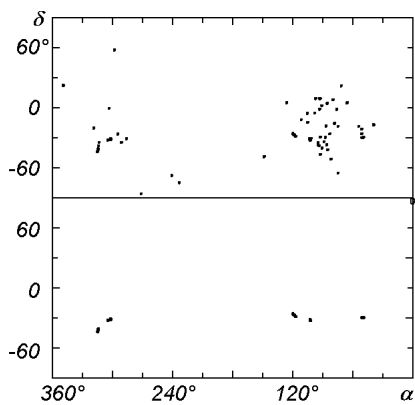


Рис. 1. Распределение по небесной сфере всех отобранных кинематических пар (вверху) и КП, у которых есть близкие КП в пространстве скоростей (внизу)

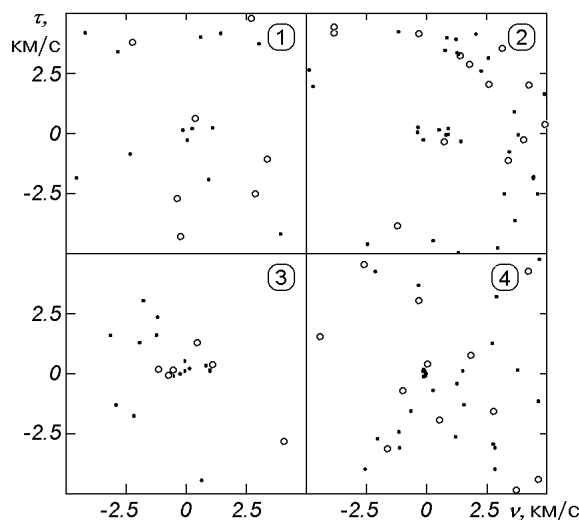


Рис. 2. Распределение звезд с $M_V < 5^m$ в четырех группах на ν , τ -диаграмме. Светлые кружки — звезды с $4^m < M_V < 5^m$

Таблица 1. Количество звезд с известными V_r и ΔV_r (в км/с) в скоплениях

j	n'	n _r '	$ V_r < 6$	$ V_r > 6$	n	n _r
1	11	5	5	0	11	5
2	25	13	11	2	21	9
3	34	12	9	3	31	9
4	25	17	16	1	24	16
всего	95	47	41	6	87	39

Таблица 2. Экваториальные координаты радиантов и скорости скоплений

j	A, град	D, град	V, км/с	σ_A , град	σ_D , град	σ_V , км/с	n
1	51.6	-29.0	19.0	1.4	1.4	0.8	8
2	103.4	-31.4	23.7	1.4	1.1	0.5	10
3	118.4	-26.8	22.3	0.8	0.6	0.2	16
4	303.1	-31.3	16.7	1.1	1.1	0.3	20

Распределение величин $|\Delta V_r|$ показано на рис. 3. Это распределение в области $|\Delta V_r| < 6$ км/с примерно соответствует нормальному закону при $\sigma = 2.9$ км/с. Обычно величина 6 км/с или близкая к ней принимается как максимальная ошибка V_r в каталоге [8]. Поэтому можно считать, что разности ΔV_r появляются вследствие ошибок наблюдаемых лучевых скоростей. Из 47 звезд с известными ΔV_r , лишь у 6 (или у 13 %) величина ΔV_r превосходит 6 км/с. Статистика звезд в отдельных группах приведена в табл. 1. Две звезды оказались общими для 2-го и 3-го скоплений. Каждая из них была оставлена только в скоплении, где величина ΔV_r меньше. Скорректированные числа n_r звезд с $|\Delta V_r| < 6$ км/с показаны в табл. 1. В окончательном списке членов скоплений были оставлены только звезды с $|\Delta V_r| < 6$ км/с.

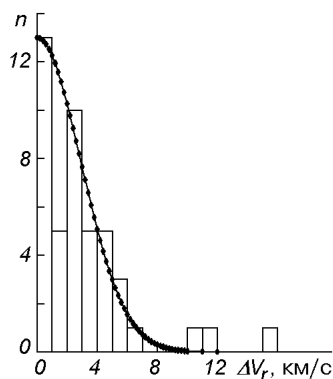


Рис. 3. Распределение разностей наблюдаемой и ожидаемой лучевых скоростей звезд, попавших в область кластеров на ν, τ -диаграмме

Для всех скоплений было проведено уточнение координат радианта A , D и V описанным выше способом по звездам с $M_V < 4^m$. Эти значения, их средние квадратичные ошибки и число условных уравнений для каждого скопления приведены в табл. 2.

Для выявленных звезд в табл. 3 приведены: номер по каталогу [12], экваториальные координаты α, δ для эпохи 1991.25, величина V , абсолютная величина M_V , показатель цвета $B-V$, расстояние s звезды от центра скопления, компоненты ν и τ , ожидаемая лучевая скорость V_r , номер скопления j и ΔV_r . Кроме того, в табл. 3 приведен список вероятных членов скоплений, в который вошли звезды с неизвестными лучевыми скоростями из начального списка 95 звезд.

Таблица 3. Выявленные звезды скоплений

N	α , град	δ , град	V	M_V	B-V	s, пс	v, км/с	τ , км/с	V_r , км/с	j	ΔV_r , км/с
Звезды, отождествленные как члены скоплений											
3330	10.618	-65.468	5.38	2.33	0.515	11.1	-0.23	-0.55	13.7	1	0.4
5300	16.949	-41.487	5.21	1.29	0.159	20.3	0.76	0.07	16.5	1	-2.5
11477	37.007	-33.811	5.13	1.78	0.089	18.3	-0.06	0.09	18.6	1	0.4
15968	51.401	-69.336	5.96	2.99	0.415	18.2	-0.31	-0.14	14.6	1	-0.5
109285	332.096	-32.988	4.50	1.49	0.054	25.3	-1.24	-0.23	7.7	1	3.9
8209	26.411	-25.052	5.29	3.10	0.395	17.5	1.03	-0.41	9.4	2	5.1
10680	34.355	28.745	6.99	4.01	0.518	39.8	-1.44	-0.04	0.3	2	5.9
12413	39.950	-42.892	4.74	1.74	0.061	21.5	-0.75	0.13	15.0	2	3.0
14913	48.107	-44.420	5.92	2.71	0.440	23.9	0.51	-0.17	16.9	2	0.1
15201	48.989	-77.389	5.51	3.17	0.438	19.1	-0.68	-0.19	14.7	2	4.7
32104	100.601	17.646	5.20	2.05	0.063	37.9	-0.35	-0.43	15.4	2	-0.4
51986	159.326	-48.226	3.84	1.72	0.300	25.2	-0.24	-0.41	16.8	2	2.4
105038	319.135	9.394	7.88	6.84	1.020	31.9	-0.67	-0.11	-18.2	2	5.0
107556	326.760	-16.126	2.85	2.49	0.180	25.1	1.08	-0.35	-10.6	2	4.4
490	1.469	-41.753	7.51	4.49	0.595	21.6	1.33	0.18	0.0	3	3.2
2578	8.182	-63.031	5.07	1.73	0.038	16.6	0.32	0.08	5.9	3	-0.9
8233	26.504	-27.349	6.38	3.20	0.366	20.3	0.11	-0.16	4.0	3	2.0
10602	34.127	-51.512	3.56	0.18	-0.120	3.6	0.54	0.12	9.2	3	1.0
12394	39.897	-68.267	4.12	0.76	-0.061	13.8	-0.14	-0.13	10.9	3	-4.9
14551	46.962	-27.831	6.18	2.38	0.166	24.4	-1.02	-0.05	10.3	3	2.1
17797	57.149	-37.620	4.30	0.83	-0.038	15.3	0.31	0.36	13.7	3	2.0
20042	64.473	-33.798	3.55	-0.14	-0.108	23.1	0.01	-0.07	15.3	3	2.1
108195	328.797	-61.886	5.92	2.58	0.393	30.6	-0.14	0.42	0.9	3	0.1
23875	76.963	-5.086	2.78	0.60	0.161	41.3	0.53	0.11	-9.1	4	-0.2
38228	117.479	27.363	6.90	5.21	0.682	22.1	-0.25	-0.41	-16.6	4	0.9
43670	133.458	26.913	8.46	5.42	0.766	30.3	-0.50	0.18	-16.5	4	-2.4
49593	151.857	35.245	4.49	2.26	0.190	14.3	-0.12	0.08	-15.2	4	-2.4
51814	158.790	57.082	5.16	3.05	0.349	7.2	-0.33	0.27	-13.6	4	3.1
53910	165.460	56.382	2.34	0.41	0.033	5.2	-0.28	0.01	-13.1	4	1.2
58001	178.457	53.695	2.41	0.36	0.044	2.7	1.26	0.21	-11.8	4	-0.8
59774	183.856	57.032	3.32	1.33	0.077	1.0	-0.32	0.20	-11.1	4	-2.3
61946	190.435	55.725	8.27	6.44	0.955	1.6	0.10	0.15	-10.2	4	3.9
62956	193.507	55.960	1.76	-0.21	-0.022	1.5	-0.42	0.20	-9.8	4	0.7
64532	198.404	56.708	6.82	4.77	0.603	2.9	-0.25	0.47	-9.2	4	0.3
65378	200.981	54.925	2.23	0.33	0.057	3.4	-0.32	0.00	-8.8	4	3.2
65477	201.306	54.988	3.99	2.01	0.169	3.4	-0.01	-0.62	-8.8	4	-0.1
71876	220.513	61.262	6.24	3.09	0.409	20.6	0.95	-0.33	-6.7	4	0.4
76267	233.672	26.715	2.22	0.42	0.032	17.9	-0.47	-0.03	0.6	4	1.1
88694	271.598	-36.020	5.94	4.74	0.615	35.9	1.21	-0.36	15.0	4	-1.9
Вероятные члены скоплений											
7167	23.102	-37.284	9.03	5.14	0.592	22.0	0.83	-0.50	17.3	1	
11448	36.926	-33.896	7.59	4.04	0.537	20.6	0.06	0.52	18.6	1	
94645	288.888	-24.179	6.25	4.09	0.548	41.1	1.13	0.21	-4.3	1	
108594	329.974	-62.104	11.97	8.83	1.420	19.8	1.01	-0.37	9.4	1	
116263	353.361	-57.029	8.14	3.65	0.515	39.7	0.43	0.05	12.6	1	
116370	353.710	-42.684	6.65	2.32	0.218	35.1	1.22	-0.18	12.9	1	
7576	24.397	-6.760	7.66	5.79	0.797	20.1	-1.02	-0.55	5.3	2	
9291	29.846	58.522	12.21	11.81	1.540	27.2	-0.91	0.32	-7.7	2	
24947	80.158	-39.755	7.39	4.09	0.510	24.0	0.51	-0.18	22.2	2	
26309	84.043	-28.708	6.26	2.50	0.151	35.7	-0.00	-0.58	22.6	2	
26395	84.287	-11.775	6.10	2.00	0.051	48.0	-0.99	-0.57	21.1	2	
26453	84.415	-28.626	7.26	3.39	0.404	38.7	0.12	-0.55	22.7	2	
26990	85.899	-39.923	8.14	4.55	0.586	31.0	0.46	-0.52	22.7	2	
28036	88.930	-38.105	7.46	3.79	0.492	33.3	0.26	0.02	23.0	2	
28474	90.172	-44.897	9.09	5.43	0.702	33.3	0.53	-0.54	22.7	2	
30030	94.784	-3.439	7.95	4.47	0.587	36.1	-1.26	0.24	20.6	2	
30034	94.804	-58.054	9.13	5.84	0.861	27.3	-0.74	0.28	21.1	2	
39804	122.008	-13.508	7.27	3.81	0.541	39.5	-1.33	0.47	21.5	2	
1113	3.470	-74.688	8.76	5.56	0.743	21.6	-1.14	-0.48	7.6	3	
1481	4.608	-63.477	7.46	4.40	0.537	17.6	-0.75	0.15	5.5	3	
3556	11.367	-51.626	11.91	8.98	1.480	15.1	-1.14	0.30	4.3	3	
6856	22.036	-52.638	9.35	6.50	0.951	12.0	-1.40	0.30	6.7	3	
7699	24.781	-56.429	7.08	3.62	0.466	9.3	1.38	0.05	7.7	3	
9141	29.454	-21.901	8.07	4.94	0.651	23.6	1.26	0.34	4.1	3	
9209	29.616	-41.170	7.23	3.05	0.330	25.9	1.36	0.50	7.0	3	

Окончание табл. 3

N	α , град	δ , град	V	M_V	B-V	s, пс	v , км/с	z , км/с	V_r , км/с	j	ΔV_r , км/с
9892	31.825	-53.199	8.64	5.14	0.701	6.4	0.32	0.22	8.8	3	
9902	31.858	-59.679	7.50	4.24	0.544	7.7	-0.15	0.01	9.4	3	
16449	52.973	-25.614	6.38	2.04	0.120	39.2	0.43	-0.41	11.8	3	
16853	54.222	-49.958	7.62	4.52	0.592	7.9	-0.23	-0.16	13.3	3	
17764	57.047	-74.694	7.13	3.43	0.400	23.0	-1.10	-0.49	12.3	3	
21632	69.683	-27.034	8.47	4.78	0.611	29.6	-0.53	-0.11	16.2	3	
21965	70.821	-23.628	7.12	3.29	0.411	34.4	-0.97	0.07	16.3	3	
22295	72.021	-80.779	8.14	4.23	0.538	31.8	-0.87	-0.12	12.2	3	
25280	81.119	-16.976	5.64	1.50	-0.001	49.3	-0.94	0.49	18.0	3	
32435	101.556	-83.992	7.46	3.67	0.460	33.8	-1.20	-0.29	12.1	3	
35946	111.155	-71.471	6.49	2.04	0.120	48.8	-0.65	0.53	15.9	3	
44745	136.776	-61.764	8.67	5.54	0.813	36.7	-0.49	-0.70	17.9	3	
107947	328.040	-62.052	7.22	3.95	0.510	30.3	-0.58	0.28	0.9	3	
112052	340.439	-39.461	8.96	5.34	0.661	36.5	0.68	0.48	-4.9	3	
116748	354.914	-69.196	8.17	4.85	0.780	22.1	1.03	0.17	5.6	3	
19655	63.176	70.201	9.73	7.67	1.216	20.4	-0.18	0.10	-10.6	4	
21556	69.425	-11.038	10.34	10.12	1.505	30.9	0.31	0.16	-6.7	4	
36071	111.488	-2.248	6.99	4.23	0.568	41.2	-1.10	0.10	-13.7	4	
45621	139.481	-3.387	7.78	5.20	0.869	34.0	0.84	0.23	-13.2	4	
54559	167.468	21.626	10.99	8.06	1.270	24.2	-0.36	0.13	-12.7	4	
55363	170.048	-19.578	7.54	4.89	0.594	37.2	0.47	-0.65	-6.3	4	
61481	188.963	51.221	8.52	6.42	0.950	2.8	0.93	0.07	-10.4	4	
84195	258.156	18.351	7.95	6.39	0.941	24.2	-0.13	0.18	6.9	4	

ДИАГРАММЫ ЦВЕТ — АБСОЛЮТНАЯ ВЕЛИЧИНА

На рис. 4 для каждого скопления приведены диаграммы цвет — абсолютная величина. Сплошные кривые — стандартные изохроны Ванденберга [14] для звезд с солнечным содержанием тяжелых элементов и подходящего возраста. Везде проведена также изохрона нулевого возраста. В [14] она рассчитана для $M_V > 0.8^m$. В верхней части ($M_V \gtrsim 0.8^m$) эта изохрона практически совпадает с начальной главной последовательностью Холопова [5]. С учетом этого при $M_V < 0.8^m$ нанесена НГП из [5]. Точки на диаграммах достаточно хорошо соответствуют изохронам. Значительные отклонения некоторых звезд вверх, возможно, объясняются их кратностью. Для надежных оценок возраста скоплений абсолютно ярких звезд в них

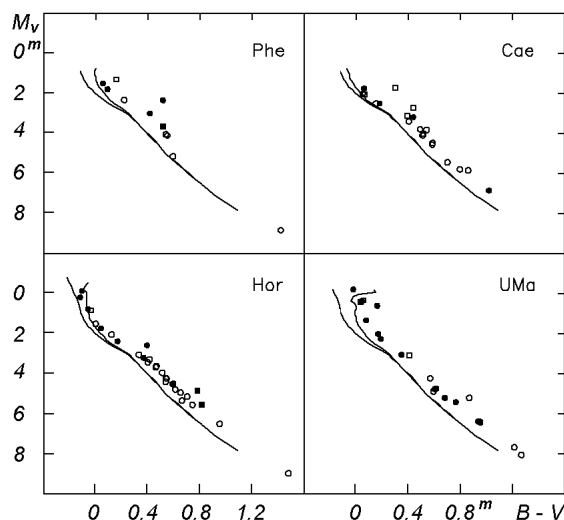


Рис. 4. Диаграммы цвет — абсолютная величина для выявленных скоплений. Квадратики — двойные звезды. Светлые кружки и квадратики — звезды с неизвестными лучевыми скоростями. Сплошные линии — изохроны нулевого и подходящего возраста

недостаточно. Предварительные оценки возраста скоплений составили: 1 (Phe) — 500, 2 (Cae) — 300, 3 (Hor) — 100, 4 (UMa) — 500 млн лет.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗВЕЗД В СКОПЛЕНИЯХ

Для анализа пространственной структуры скоплений были рассчитаны галактические прямоугольные координаты их звезд. В каждом скоплении находились координаты X , Y , Z геометрического центра наиболее массивных звезд с $M_V < 3^m$. Эти величины, а также расстояние центра от Солнца R , средние квадратичные отклонения звезд от центра по каждой координате и число использованных звезд в скоплении с номером j представлены в табл. 4.

В табл. 5 приведены галактические (l , b) и экваториальные координаты центров скоплений. Имя созвездия, в котором находится центр скопления, помещено в последней колонке.

Таблица 4. Галактические прямоугольные координаты центров скоплений и дисперсии координат звезд (в парсеках)

j	X	Y	Z	R	σ_X	σ_Y	σ_Z	n
1	8.4	-14.5	-38.5	42.0	4.7	5.0	5.1	5
2	-8.0	-14.5	-14.5	22.0	7.7	4.9	8.2	5
3	0.1	-24.2	-39.0	45.9	7.0	2.0	2.0	7
4	-7.7	9.3	21.4	24.6	1.1	0.6	0.3	6

Таблица 5. Угловые координаты центров скоплений (в градусах) и компоненты их скоростей (в км/с)

j	l	b	α	δ	U	V	W	Созвездие
1	300	-67	15	-50	-7.2	-7.6	-15.9	Phe
2	241	-41	71	-38	-10.9	-20.3	-5.6	Cae
3	270	-58	40	-51	-9.9	-20.0	0.0	Hor
4	130	60	187	56	14.3	2.7	-8.2	UMa

В скоплении UMa выявляется центральное сгущение. Три звезды вне его пределов при вычислении координат центра не учитывались.

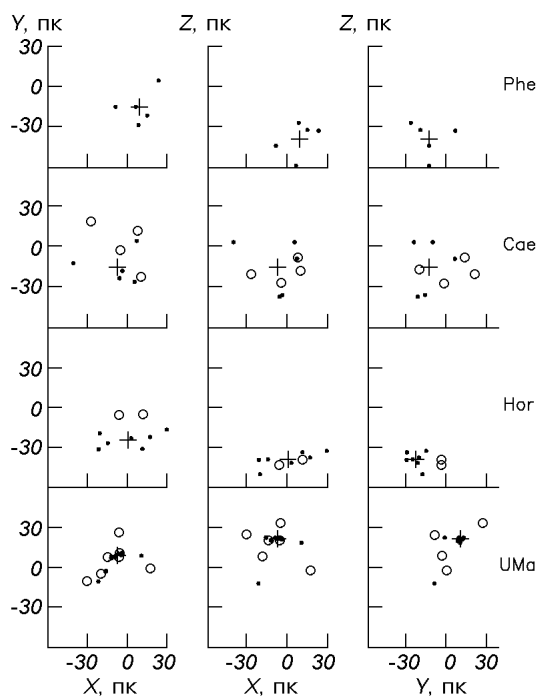
На рис. 5 показано расположение звезд относительно Солнца в трех проекциях. В скоплении UMa уверенно выявляется центральное сгущение, вытянутое в направлении центра Галактики. Скопление в Hor по структуре подобно центральной области UMa и вытянуто в том же направлении, но примерно в пять раз больше по размерам. В скоплениях в Phe и Cae глобальная анизотропия не проявляется.

В табл. 5 приведены также компоненты U , V , W пространственной скорости скоплений. Для скопления в UMa в работе [4] были получены значения $U = 13.5$, $V = +2.8$, $W = -8.5$ км/с, что согласуется с нашими данными.

Наблюдаемые структуры можно объяснить динамической эволюцией бедных скоплений. Размер центральной части UMa соответствует характерному размеру корон скоплений, остающихся после распада ядра [2], но она имеет явно несферическую форму. Асимметрия на последних стадиях распада ядра может возникнуть под влиянием регулярного поля Галактики. Приливные силы уменьшают критическую скорость в направлении центр—антицентр. Пекулярная скорость звезды скопления набирается в основном

Рис. 5. Проекция на плоскости XY, XZ, YZ пространственного распределения звезд скоплений. Светлые кружки — звезды с $M_V > 3^m$

при далеких сближениях малыми порциями. Поэтому уход звезд должен происходить преимущественно в направлениях центр—антицентр Галактики. Так можно объяснить вытянутость центрального сгущения звезд в UMa по оси X. Периферийные, в основном маломассивные звезды, были потеряны скоплением раньше. Скопление в Hor распалось, вероятно, по тому же сценарию и дальше продвинулось в эволюции. Его корона при расширении достигла гораздо больших размеров, а звезды периферии рассеялись в пространстве. По-видимому, скопления в Phe и Sae находятся на еще более поздних стадиях динамической эволюции.



Авторы благодарят В. А. Захоя за предоставление каталогов на лазерных дисках и за обсуждение результатов работы.

1. Агекян Е. А. Курс астрофизики и звездной астрономии. — М: Наука, 1962.—688 с.
2. Агекян Е. А., Белозерова М. А. Диссипация звездных скоплений, образование корон и движущихся скоплений // Астрон. журн.—1979.—56, вып. 1.—С. 9—15.
3. Агекян Е. А., Орлов В. В. Принадлежность звезд окрестности Солнца движущимся скоплениям // Астрон. журн.—1984.—61, вып. 1.—С. 60—65.
4. Орлов В. В., Панченко И. Е., Расторгуев А. С., Яцевич А. В. Движущиеся скопления звезд в окрестностях Солнца // Астрон. журн.—1995.—72, вып. 4.—С. 495—507.
5. Холопов П. Н. Звездные скопления. — М.: Наука, 1981.—479 с.
6. Gliese W. Catalogue of nearby stars // Veroff. der Rechen-Instituts, Heidelberg, 1969.—N 22.—117 p.
7. Gliese W., Jahreiss H. A preliminary version of third catalogue of nearby stars. 1991.
8. Gliese W., Jahreiss H. Catalogue of Nearby Stars. 3rd ed.. Data Center CD-ROM. Selected Astronomical Catalogs.—1993.—Vol. 1.
9. Schwan H. The distance and main sequence of Hyades cluster based on 145 stars with highly accurate proper motions obtained from work on the catalogues FK 5 and PPM // Astron. and Astrophys.—1991.—243, N 1.—P. 386—400.
10. Smithsonian Astrophysical Observatory star Catalogue.—1966.
11. Stern R. A. Rosat all-sky survey observation of the Hyades cluster // Astrophys. J.—1995.—448, N 2.—P. 683—704.
12. The Hipparcos and Tycho Catalogues. — Noordwijk: ESA Publ., 1997.—Vol. 1—17.
13. The Hipparcos Input Catalogues. CDS (Strasbourg), CD-ROM.—1994.
14. Vandenberg D. A. Evolution of 0.7—3 Solar masses stars having $-1.0 \leq [Fe/H] \leq 0.0$ // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1985.—58, N 2.—P. 711—770.

Поступила в редакцию 12.07.99