

КИНЕМАТИКА СЛАБЫХ ЗВЕЗД АССОЦИАЦИИ SCO-CEN ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА GAIA

© 2024 г. В. В. Бобылев*, А. Т. Байкова

Главная астрономическая обсерватория Российской академии наук, Пулковое, Россия

*E-mail: bob-v-vzz@rambler.ru

Поступила в редакцию 04.05.2024 г.

После доработки 27.06.2024 г.

Принята в печать 18.07.2024 г.

Кинематические свойства ассоциации Sco-Cen изучены с использованием пространственных скоростей молодых звезд. Получены новые кинематические оценки возраста трех составляющих ассоциации, при этом возраст UCL и LCC оказался равным 17.7 ± 2.4 млн лет, а возраст US составил 6.4 ± 1.7 млн лет. Даны оценки параметров эллипсоида остаточных скоростей US, UCL и LCC.

Ключевые слова: кинематика, звездообразование, звезды типа Т Тельца, звездные ассоциации, ассоциация Скорпиона-Центавра

DOI: 10.31857/S0004629924090024 EDN: IBMKRM

1. ВВЕДЕНИЕ

Вблизи Солнца расположена звездная OB2-ассоциация Sco-Cen [1, 2], вытянутая по долготе практически вдоль всего четвертого галактического квадранта. В ней выделяют три основные структурные единицы: US (Upper Scorpius), UCL (Upper Centaurus-Lupus) и LCC (Lower Centaurus-Crux) со средними расстояниями 145, 140 и 118 пк соответственно [3, 4]. Возраст UCL и LCC оценивают в 16–20 млн лет, а возраст более молодой US составляет менее 10 млн лет. Такие оценки возраста получены путем подгонки положения звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рассела к подходящим теоретическим изохронам [5, 6, 7].

Ассоциация Sco-Cen содержит несколько тысяч звезд. Членами ее являются как массивные звезды спектральных классов B2 и позже (поэтому ее иногда обозначают как Sco OB2 [8]), так и маломассивные звезды спектральных классов K–M (звезды типа Т Тельца). Имея сложную, клочковатую структуру, ассоциация Sco-Cen включает в себя десятки небольших ассоциаций маломассивных звезд, рассеянных звездных скоплений и небольших звездных группировок различного возраста [9, 10]. Например, ρ Oph/L1688, ν Sco, δ Sco и др. в US; V1062 Sco, Lupus и др. в UCL; ϵ Cham, η Cham и др. в LCC. Поэтому в настоящее время некоторые авторы предпочи-

тают указывать интервал от 1–20 млн лет, говоря о возрасте ассоциации Sco-Cen.

Изучение молодых маломассивных звезд в ассоциации Sco-Cen показало [11], что рождение таких звезд в US находится в хорошем согласии с моделью последовательного звездообразования. Согласно этой модели, взрывы массивных звезд в качестве сверхновых в одной части ассоциации провоцируют сжатие водородных облаков и начало звездообразования в соседних областях. Более того, считается, что относительно недавние взрывы наиболее массивных звезд в ассоциации Sco-Cen привели к образованию Северного полярного шпура [12], они также ответственны за возникновение Местного пузыря [13].

Интересным и важным кинематическим свойством ассоциации Sco-Cen является эффект ее расширения, впервые обнаруженный в работах [2, 14]. Значение коэффициента углового расширения ассоциации K неоднократно уточнялось различными авторами [15, 16, 17, 18]. С использованием этого коэффициента, $K \sim 50$ км/с/кпк, оценивается кинематический возраст ассоциации, составляющий около 20 млн лет. Впрочем, авторы работы [19] не нашли признаков расширения ассоциации Sco-Cen.

Возникновение ближайших к Солнцу небольших звездных ассоциаций, таких как β Pic (~ 20 млн лет [20, 21]) и TW Hya (~ 10 млн лет [22,

23]), по-видимому, тесно связано с эволюцией ОВ-ассоциации Sco-Cen. Здесь имеется удовлетворительное согласие между оценками возраста, полученными различными методами: а) изохронным, б) основанным на анализе содержания лития в звездах и в) кинематическими.

Пространственный размер ассоциации Sco-Cen значительный: она растянута по галактоцентрическому направлению R примерно на 300 пк. Авторы работы [24] связывают формирование этой ассоциации с воздействием галактической спиральной волны плотности на родительское газо-пылевое облако. В случае применения кинематических методов желателен учет влияния спиральной волны плотности в скоростях звезд. Такой подход был осуществлен, например, в работах [17, 25]. Проблемой является только плохое знание конкретных значений параметров спиральной волны в Галактике.

Пространственные и кинематические свойства относительно ярких звезд ассоциации Sco-Cen детально изучены с использованием данных каталога Hipparcos [26], например, в работах [3, 17, 18, 19, 24, 25]. Возможность изучения более слабых и более многочисленных звезд представляет космический проект Gaia [27, 28].

Целью настоящей работы является изучение кинематических свойств молодых слабых звезд в ассоциации Sco-Cen с использованием значений их тригонометрических параллакс и собственных движений из каталога Gaia EDR3 [27]. Для этого рассматриваем звезды ассоциации Sco-Cen из списка работы [29].

2. МЕТОДЫ

Мы используем прямоугольную систему координат с центром в Солнце, где ось x направлена в сторону галактического центра, ось y — в сторону галактического вращения и ось z — в северный полюс Галактики. Тогда

$$\begin{aligned}x &= r \cos l \cos b, \\y &= r \sin l \cos b, \\z &= r \sin b,\end{aligned}$$

где $r = 1/\pi$ — гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк, которое мы вычисляем через тригонометрический параллакс звезды π

в единицах мсд (мсд — угловая миллисекунда дуги).

Из наблюдений известны лучевая скорость звезды V_r и две проекции ее тангенциальной скорости $R_{pl} \leq r \leq 5 R_{pl}$ и $V_b = 4.74 r \mu_b$, направленные вдоль галактической долготы l и широты b соответственно, выраженные в км/с. Здесь коэффициент 4.74 является отношением числа километров в астрономической единице к числу секунд в тропическом году. Компоненты собственного движения $\mu_l \cos b$ и μ_b выражены в мсд/год.

Через компоненты V_r, V_l, V_b , вычисляются скорости U, V, W , где скорость U направлена от Солнца к центру Галактики, V в направлении вращения Галактики и W на северный галактический полюс:

$$\begin{aligned}U &= V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \\V &= V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b, \\W &= V_r \sin b + V_b \cos b.\end{aligned}\quad (1)$$

Таким образом, скорости U, V, W направлены вдоль соответствующих координатных осей x, y, z .

2.1. Построение орбит звезд

Для построения орбит звезд в системе координат, вращающейся вокруг центра Галактики, используем эпициклическое приближение [13, 30]:

$$\begin{aligned}x(t) &= x_0 + \frac{U_0}{\kappa} \sin(\kappa t) + \frac{V_0}{2B} (1 - \cos(\kappa t)), \\y(t) &= y_0 + 2A \left(x_0 + \frac{V_0}{2B} \right) t - \frac{\Omega_0}{B_k} V_0 \sin(\kappa t) + \\&\quad + \frac{2\Omega_0}{k^2} U_0 (1 - \cos(\kappa t)), \\z(t) &= \frac{W_0}{v} \sin(vt) + z_0 \cos(vt),\end{aligned}\quad (2)$$

где t — время в млн лет (исходим из соотношения: 1 пк/млн лет = 0.978 км/с), A и B — постоянные Оорта; $\kappa = \sqrt{4\Omega_0 B}$ — эпициклическая частота; Ω_0 — угловая скорость галактического вращения местного стандарта покоя, $\Omega_0 = A - B$; $v = \sqrt{4\pi G \rho_0}$ — частота вертикальных колебаний, где G — гравитационная постоянная, а ρ_0 — звездная плотность в околосолнечной окрестности.

Параметры x_0, y_0, z_0 и U_0, V_0, W_0 в системе уравнений (2) обозначают современные

положения и скорости звезд соответственно. Возвышение Солнца над галактической плоскостью $h_\odot$ принято равным 16 пк согласно работе [31]. Скорости U_0, V_0, W_0 вычисляем относительно местного стандарта покоя с использованием значений

$$(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (11.1, 12.2, 7.3) \text{ км/с}, \quad (3)$$

полученных в работе [32]. Мы приняли $\rho_0 = 0.1 M_\odot / \text{пк}^3$ [33], что дает $v = 74 \text{ км/с/кпк}$. Используем следующие значения постоянных Оорта: $A = 16.9 \text{ км/с/кпк}$ и $B = -13.5 \text{ км/с/кпк}$, близкие к современным оценкам. Обзор таких оценок можно найти, например, в работе [34].

Система уравнений (2) позволяет вычислить положение звезды в каждый заданный момент времени. Значения всех констант определены, решение находится путем подстановки момента времени.

2.2. Эллипсоид остаточных скоростей

Для определения параметров эллипсоида остаточных скоростей звезд используем следующий известный метод [35], где рассматриваются шесть моментов второго порядка a, b, c, f, e, d :

$$\begin{aligned} a &= \langle U^2 \rangle - \langle U_\odot^2 \rangle, \\ b &= \langle V^2 \rangle - \langle V_\odot^2 \rangle, \\ c &= \langle W^2 \rangle - \langle W_\odot^2 \rangle, \\ f &= \langle VW \rangle - \langle V_\odot W_\odot \rangle, \\ e &= \langle WU \rangle - \langle W_\odot U_\odot \rangle, \\ d &= \langle UV \rangle - \langle U_\odot V_\odot \rangle. \end{aligned}$$

При необходимости скорости U, V, W можно освобождать от пекулярного движения Солнца, а также от дифференциального вращения Галактики или от влияния спиральной волны плотности. Моменты a, b, c, f, e, d являются коэффициентами уравнения поверхности

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + 2fyz + 2ezx + 2dxy = 1, \quad (4)$$

а также компонентами симметричного тензора моментов остаточных скоростей

$$\begin{pmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Значения всех элементов этого тензора могут быть определены из решения следующей системы условных уравнений:

$$V_l^2 = a \sin^2 l + b \cos^2 l \sin^2 l - 2d \sin l \cos l, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} V_b^2 &= a \sin^2 b \cos^2 l + b \sin^2 b \sin^2 l + \\ &+ c \cos^2 b - 2f \cos b \sin b \sin l - \\ &- 2e \cos b \sin b \cos l + \\ &+ 2d \sin l \cos l \sin^2 b, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_l V_b &= a \sin l \cos l \sin b + \\ &+ b \sin l \cos l \sin b + \\ &+ f \cos l \cos b - e \sin l \cos b + \\ &+ d (\sin^2 l \sin b - \cos^2 l \sin b), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} V_r^2 &= a \cos^2 b \cos^2 l + b \cos^2 b \sin^2 l + \\ &+ c \sin^2 b + 2f \cos b \sin b \sin l + \\ &+ 2e \cos b \sin b \cos l + \\ &+ 2d \sin l \cos l \cos^2 b, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} V_b V_r &= -a \cos^2 l \cos b \sin b - \\ &- b \sin^2 l \sin b \cos b + c \sin b \cos b + \\ &+ f (\cos^2 b \sin l - \sin l \sin^2 b) + \\ &+ e (\cos^2 b \cos l - \cos l \sin^2 b) - \\ &- d (\cos l \sin l \sin b \cos b + \sin l \cos l \cos b \sin b), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} V_l V_r &= -a \cos b \cos l \sin l + \\ &+ b \cos b \cos l \sin l + \\ &+ f \sin b \cos l - e \sin b \sin l + \\ &+ d (\cos b \cos^2 l - \cos b \sin^2 l). \end{aligned} \quad (11)$$

Решение ищется методом наименьших квадратов относительно шести неизвестных a, b, c, f, e, d . Затем находятся собственные значения тензора (5) $\lambda_{1,2,3}$ из решения векового уравнения

$$\begin{vmatrix} a - \lambda & d & e \\ d & b - \lambda & f \\ e & f & c - \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (12)$$

Собственные значения данного уравнения равны обратным значениям квадратов полуосей эллипсоида моментов скоростей и, в то же время, квадратам полуосей эллипсоида остаточных скоростей:

$$\begin{aligned}
\lambda_1 &= \sigma_1^2, \\
\lambda_2 &= \sigma_2^2, \\
\lambda_3 &= \sigma_3^2, \\
\lambda_1 &> \lambda_2 > \lambda_3.
\end{aligned} \tag{13}$$

Направления главных осей тензора (12) $L_{1,2,3}$ и $B_{1,2,3}$ находим из соотношений

$$L_{1,2,3} = ef - (c - \lambda)d(b - \lambda)(c - \lambda) - f^2, \tag{14}$$

$$B_{1,2,3} = (b - \lambda)e - df^2 - (b - \lambda)(c - \lambda)\cos L_{1,2,3}. \tag{15}$$

Ошибки определения $L_{1,2,3}$ и $B_{1,2,3}$ оцениваются согласно следующей схеме:

$$\begin{aligned}
\varepsilon(L_2) &= \varepsilon(L_3) = \frac{\varepsilon(\overline{UV})}{a - b}, \\
\varepsilon(B_2) &= \varepsilon(\varphi) = \frac{\varepsilon(\overline{UW})}{a - c}, \\
\varepsilon(B_3) &= \varepsilon(\psi) = \frac{\varepsilon(\overline{VW})}{b - c}, \\
\varepsilon^2(L_1) &= \frac{\varphi^2 \varepsilon^2(\psi) + \psi^2 \varepsilon^2(\varphi)}{(\varphi^2 + \psi^2)^2}, \\
\varepsilon^2(B_1) &= \frac{\sin^2 L_1 \varepsilon^2(\psi) + \cos^2 L_1 \varepsilon^2(L_1)}{(\sin^2 L_1 + \psi^2)^2},
\end{aligned} \tag{16}$$

где $\varphi = \cot B_1 \cos L_1$ и $\psi = \cot B_1 \sin L_1$. При этом необходимо заранее вычислить три величины $U^2 V^2$, $U^2 W^2$ и $V^2 W^2$, тогда

$$\begin{aligned}
\varepsilon^2(\overline{UV}) &= (\overline{U^2 V^2} - d^2) / n, \\
\varepsilon^2(\overline{UW}) &= (\overline{U^2 W^2} - e^2) / n, \\
\varepsilon^2(\overline{VW}) &= (\overline{V^2 W^2} - f^2) / n,
\end{aligned} \tag{17}$$

где n — количество звезд. Ошибки каждой оси оцениваются независимым способом за исключением L_2 и L_3 , ошибки которых вычисляются по одной формуле.

3. ДАННЫЕ

Основу нашей выборки составляют звезды ассоциации Sco-Cen из списка [29]. Весь список содержит более 10 000 молодых звезд с кинематическими данными из каталога Gaia EDR3 [28]. Для части звезд имеются измерения лучевых скоростей, взятых из различных источников. Согласно работе [29], примерно 90% в этом списке

составляют звезды спектральных классов M6–7 и позднее. Помимо US, объединенной группировки UCL/LCC, специальными флагами отмечены звезды, принадлежащие более мелким скоплениям и ассоциациям — V1062 Sco, Ophiuchus и Lupus.

В настоящей работе нас интересуют три основные составляющие ассоциации Sco-Cen: US, UCL и LCC. Из списка [29] мы отобрали 1250 звезд US с тригонометрическими параллаксами и собственными движениями, среди которых для 377 звезд известны лучевые скорости. Отбор звезд, принадлежащих US, осуществлялся при использовании двух следующих флагов: “u” в 373 позиции и “ ” в 374 позиции table1.dat из работы [29]. Отбор звезд, принадлежащих UCL/LCC, осуществлялся при использовании двух следующих флагов: “c” в 373 позиции и “ ” в 374 позиции. Группировку UCL/LCC мы разделили на две части с границей $l = 325^\circ$. В UCL вошли 2831 звезд, среди них 379 звезд с известными лучевыми скоростями. LCC содержит 3451 звезду, среди которых 375 звезд имеют известные лучевые скорости. Использовались звезды с относительными ошибками определения тригонометрического параллакса не более 10%.

Пространственные скорости U, V, W с использованием соотношений (1) можно вычислить имея все три измеренные скорости V_l, V_b, V_r . Для этих целей, а также для построения эпициклических орбит, могут служить около 370 звезд в каждой из отобранных группировок US, UCL или LCC. А вот с остаточными скоростями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (13) ситуация иная. Известно, что при небольших расстояниях от Солнца, как в нашем случае, ошибки скоростей V_l и V_b (благодаря высокой точности измерений параллаксов и собственных движений звезд со спутника Gaia) имеют в среднем существенно меньший уровень по сравнению с ошибками V_r . Поэтому интерес представляют результаты как совместного решения уравнений (6)–(11), так и с использованием только трех первых уравнений (6)–(8), т. е. без использования лучевых скоростей.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 даны средние значения координат $\bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0$ и средние значения наблюдаемых относительно Солнца скоростей $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$ для центров US, UCL и LCC. Указано число звезд,

Таблица 1. Параметры центров US, UCL и LCC, полученные авторами по выбранным группам звезд N

Объект	$\bar{x}_0$, пк	$\bar{y}_0$, пк	$\bar{z}_0$, пк	$\bar{U}$, км/с	$\bar{V}$, км/с	$\bar{W}$, км/с	$N_{x,y,z}$ $N_{U,V,W}$	$\bar{U}_0$, км/с	$\bar{V}_0$, км/с	$\bar{W}_0$, км/с
US	135.6	−20.8	41.5	−4.9	−16.2	−6.9	1250/377	6.2	−4.0	0.4
UCL	121.5	−48.2	33.5	−5.7	−19.1	−4.9	2831/379	5.4	−6.9	2.4
LCC	75.7	−93.0	22.9	−7.3	−20.9	−6.1	3451/375	3.8	−8.7	1.2

Примечание. Приведены начальные значения координат объектов $\bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0$, средние значения наблюдаемых относительно Солнца скоростей $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$, и их скорости относительно местного стандарта покоя $\bar{U}_0, \bar{V}_0, \bar{W}_0$. $N_{x,y,z}$ — число звезд, использованных для вычисления средних значений координат и средних значений скоростей $N_{U,V,W}$.

использованных для вычисления средних значений координат $N_{x,y,z}$ и средних значений скоростей $N_{U,V,W}$. Отметим, что для US имеется одна особенность при вычислении координат. А именно, в таблице даны координаты, вычисленные с использованием 1250 звезд. Если же вычислять их по 377 звездам с известными лучевыми скоростями, то значение 1 оказывается на 10 пк б 1 льшим, $\bar{z}_0 = 51.4$ пк. В таблице даны также начальные скорости центров US, UCL и LCC, $\bar{U}_0, \bar{V}_0, \bar{W}_0$, служащие для построения эпиклических орбит.

В табл. 2 даны средние значения координат $\bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0$ и средние значения наблюдаемых относительно Солнца скоростей $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$ для центров US, UCL и LCC. Здесь координаты и скорости были получены другими авторами. В работах [36, 24] значения координат и скоростей вычислены на основе ярких звезд из каталога Hipparcos. Отличия наших результатов для скоростей US от выводов работы [29] ничтожны, не превышают 0.2 км/с по каждому компоненту. Важно отметить разницу $\Delta \bar{U}_0 \sim 2$ км/с для US

между нашими оценками и результатами работы [24]. Такая разница уже заметно влияет на характер орбиты US. Например, с исходными данными работы [24] в работе [25] были построены орбиты US, UCL и LCC.

На рис. 1(a) и (b) даны траектории US, UCL и LCC, прослеженные на временном интервале 30 млн лет в прошлом. Можем видеть, что имеются пересечения траекторий на плоскости xu (рис. 1(a)), а в вертикальном направлении (рис. 1(b)) все три траектории идут практически параллельно. Поэтому ясно, что имелись моменты времени, при которых взаимные расстояния между центрами группировок были минимальными. Отметим, что траектории звезд вычислены с учетом возвышения Солнца над галактической плоскостью. Таким образом, на наших рисунках координата z отражает положение звезд относительно плоскости Галактики.

Наши орбиты US, UCL и LCC имеют отличия от орбит, построенных в работе [25]. Эти отличия обусловлены, главным образом, двумя причи-

Таблица 2. Параметры центров US, UCL и LCC, полученные другими авторами

Объект	$\bar{x}_0$, пк	$\bar{y}_0$, пк	$\bar{z}_0$, пк	$\bar{U}$, км/с	$\bar{V}$, км/с	$\bar{W}$, км/с	N_a	Ссылки
US	138	−22	49	−0.9	−16.9	−5.2	120	[36]
				−6.7	−16.0	−8.0	155	[24]
				−4.6	−16.1	−7.0	469	[29]
UCL	121	−69	32	−7.9	−19.0	−5.7	218	[36]
				−6.8	−19.3	−5.7	262	[24]
LCC	61	−100	14	−11.8	−15.0	−6.7	179	[36]
				−8.2	−18.6	−6.4	192	[24]
UCL/LCC				−6.4	−19.9	−5.5	542	[29]

Примечание. Приведены начальные значения координат $\bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0$ и средние значения наблюдаемых относительно Солнца скоростей $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$.

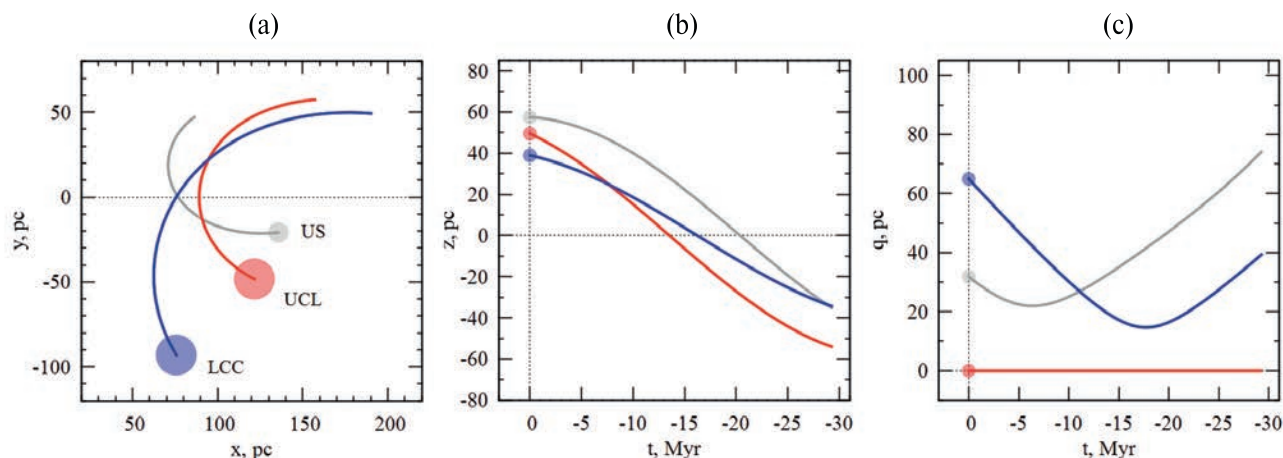


Рис. 1. Центры трех основных составляющих ассоциации Sco-Cen, отмеченные кругами условного размера, в проекции на галактическую плоскость xu и их траектории в прошлом на временном интервале 30 млн лет (а), распределение этих группировок на плоскости z , t (б), а также зависимость параметра q от времени t (с).

нами: а) разницей в значениях начальных скоростей, что сказывается лишь на орбите US и б) различными значениями скорости Солнца (U , V , W) $_{\odot}$. В настоящей работе использованы параметры (3), где имеется отличие $\Delta V_{\odot} \sim 6$ км/с от используемой в работе [25] скорости $V_{\odot}$ из работы [37]. В итоге, по сравнению с орбитами US, UCL и LCC из работы [25], центры наших объектов имеют заметное движение по оси x и медленнее двигаются вдоль оси y .

На основе построенных траекторий US, UCL и LCC мы вычислили параметр q с использованием взаимных разностей координат Δx , Δy , Δz вида “UCL минус US” и “UCL минус LCC” на каждый момент интегрирования:

$$q = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (18)$$

Таким образом, параметр q характеризует отклонение анализируемой траектории от опорной, где в качестве опорной выступает траектория UCL.

На рис. 1(с) дана зависимость параметра q от времени t , где параметр q вычислен относительно орбиты UCL. Как следует из детального анализа данных, представленных на графике, минимальное расстояние между центрами UCL и LCC составляло $q_{\min} = 14.6 \pm 0.7$ пк в момент времени $t_{\min} = -17.7 \pm 2.4$ млн лет. А минимальное расстояние между центрами UCL и US составляло $q_{\min} = 21.9 \pm 1.0$ пк в момент времени $t_{\min} = -6.4 \pm 1.7$ млн лет. Ошибки определения параметров $q_{\min}$ и $t_{\min}$ были определены в результате статистического моделирования

методом Монте-Карло в предположении о том, что индивидуальные орбиты US, UCL и LCC построены с относительными ошибками 10%, распределенными по нормальному закону. Можем говорить о том, что кинематический возраст UCL и LCC составляет 17.7 ± 2.4 млн лет, а кинематический возраст US равен 6.4 ± 1.7 млн лет.

Интересно отметить работу [38], где по данным каталога Gaia DR2 с использованием эллиптического приближения для построения звездных траекторий в ассоциации Sco-Cen была получена оценки кинематических возрастов различных ее составляющих. Эти авторы выделили восемь кинематически различных компонентов в ассоциации с использованием более 8000 звезд. UCL и LCC были разделены на две части каждая. Для двух составляющих UCL получены оценки 15 ± 3 и 13 ± 8 млн лет. Для двух составляющих LCC эти авторы нашли 7 ± 5 и 9 ± 4 млн лет. В целом имеем хорошее согласие с полученными нами оценками для этих составляющих ассоциации Sco-Cen.

В табл. 3 даны параметры эллипсоида остаточных скоростей, найденные по двум компонентам V_l и V_b с использованием трех уравнений (6)–(8). Количество использованных звезд соответствует значению $N_{x,y,z}$, указанному в табл. 1. В последнем столбце таблицы дано значение средней пространственной дисперсии σ_{3D} , которая вычислена следующим образом:

$$\sigma_{3D} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}{3}}. \quad (19)$$

Таблица 3. Параметры эллипсоида остаточных скоростей, найденные только по двум компонентам V_l и V_b с использованием трех уравнений (6)–(8)

Объект	σ_1 , км/с	σ_2 , км/с	σ_3 , км/с	L_1 , град	B_1 , град	L_2 , град	B_2 , град	L_3 , град	B_3 , град	σ_{3D} , км/с
US	7.07 ± 0.49	1.93 ± 0.41	0.40 ± 1.08	332	3	63	16	233 ± 6	74 ± 3	4.24 ± 0.92
UCL	7.08 ± 1.28	2.09 ± 0.57	0.79 ± 1.31	297	19	42	36	193 ± 9	61 ± 2	4.24 ± 1.01
LCC	6.73 ± 0.62	2.31 ± 2.71	0.50 ± 0.90	302	9	33	9	165 ± 15	77 ± 5	4.12 ± 0.56

В табл. 4 даны параметры эллипсоида остаточных скоростей, найденные по всем трем компонентам V_l , V_b и V_r с использованием шести уравнений (6)–(11).

На рис. 2 даны положения центров US, UCL и LCC на плоскости xu . На рис. 2(а) траектории US и UCL даны на временном интервале 20 млн лет в прошлом для того, чтобы отчетливее видеть область их пересечения. Даже с учетом ошибок данных видно, что область пересечения US и UCL достаточно компактная. И момент пересечения траекторий находится в согласии с оценками возраста US. При этом необходимо иметь в виду, что наиболее точные параметры пересечения траекторий US и UCL получаются из анализа трехмерной картины (рис. 1(с)).

На рис. 2(а) схематично изображен эллипсоид остаточных скоростей. Можно отметить, что ориентация указанного на рисунке эллипсоида для UCL соответствует указанным в табл. 3 и 4 значениям L_1 . Хотя надо отметить, что направление первой оси определяется с большими ошибками.

На рис. 2(б) траектории UCL и LCC даны на временном интервале 30 млн лет в прошлом. Для построения доверительных областей мы заранее вычислили средние ошибки начальных скоростей $\bar{U}_0, \bar{V}_0, \bar{W}_0$, зависящие только от ошибок измерений наблюдаемых скоростей V_l, V_b, V_r . Значения таких ошибок (уровня 1σ) оказались следующими: 0.45, 1.11 и 0.91 км/с для US, UCL и LCC соответ-

ственно. Здесь также момент пересечения траекторий UCL и LCC около 15 млн лет назад находится в хорошем согласии с известными оценками их возраста, полученными не на основе кинематики.

Известно, что значение дисперсии внутренних скоростей в скоплениях и ассоциациях является индикатором их динамического состояния и зависит от возраста скопления. Возраст US с одной стороны, и возраст UCL и LCC с другой, отличаются примерно в двое. Найденные значения σ_{3D} возрастают от US к UCL и LCC, что видно, по крайней мере, из табл. 4.

Из табл. 4 можно также видеть, что направление третьей оси эллипсоида остаточных скоростей L_3, B_3 определяется с небольшими ошибками. Наиболее интересным здесь является отклонение от вертикали на угол около 12° – 15° , что обычно связывают с ориентацией третьей оси пояса Гулда (см., напр., [39]).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена кинематика молодых звезд в ассоциации Sco-Cen. Для этого были использованы звезды с тригонометрическими параллаксами и собственными движениями из каталога Gaia EDR3. Отбор осуществлен из каталога [29], где для части звезд указаны значения лучевых скоростей, собранные из литературных источников. Упор нами сделан на изучение кинематики и статистических свойств трех

Таблица 4. Параметры эллипсоида остаточных скоростей, найденные по всем трем компонентам V_l , V_b и V_r с использованием шести уравнений (6)–(11)

Объект	σ_1 , км/с	σ_2 , км/с	σ_3 , км/с	L_1 , град	B_1 , град	L_2 , град	B_2 , град	L_3 , град	B_3 , град	σ_{3D} , км/с
US	9.07 ± 0.35	1.52 ± 0.29	0.39 ± 1.09	337	7	69	36	234 ± 3	53 ± 2	5.31 ± 1.33
UCL	11.37 ± 0.74	4.26 ± 0.23	0.50 ± 2.05	329	14	58	–6	126 ± 4	74 ± 2	7.02 ± 1.64
LCC	11.68 ± 0.34	1.87 ± 3.20	0.98 ± 0.46	305	9	35	2	141 ± 9	78 ± 2	6.80 ± 1.60

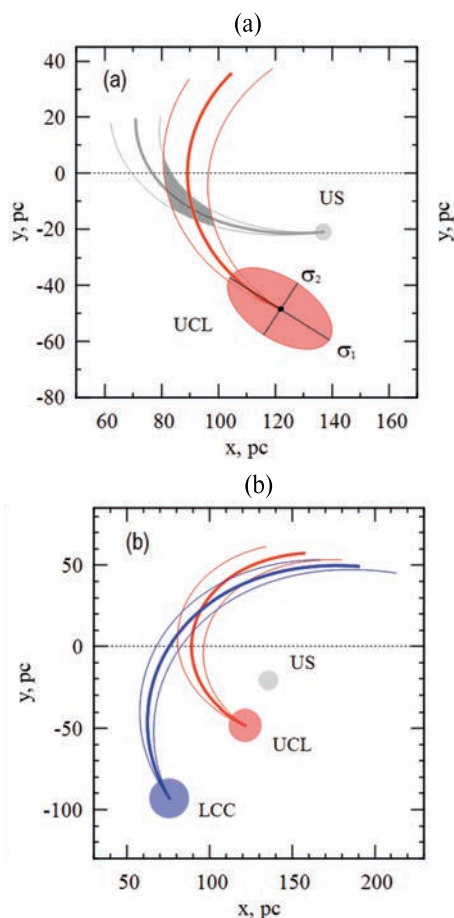


Рис. 2. Положение центров US и UCL на плоскости xu и их траектории в прошлом на временном интервале 20 млн лет, схематично даны эллипсоиды остаточных скоростей (а), положение центров UCL и LCC на плоскости xu и их траектории в прошлом на временном интервале 30 млн лет (б), для каждой траектории отмечены доверительные области, соответствующие ошибкам исходных скоростей уровня 1σ .

основных составляющих ассоциации Sco-Cen: US, UCL и LCC.

Из анализа эпициклических орбит центров US, UCL и LCC, построенных в прошлое, показано, что минимальное расстояние между центрами UCL и LCC составляло $q_{\min} = 14.6 \pm 0.7$ пк в момент времени $t_{\min} = -17.7 \pm 2.4$ млн лет, а минимальное расстояние между центрами UCL и US составляло $q_{\min} = 21.9 \pm 1.0$ пк в момент времени $t_{\min} = -6.4 \pm 1.7$ млн лет. Таким образом, получены кинематические оценки возраста трех составляющих ассоциации Sco-Cen, где возраст UCL и LCC равен 17.7 ± 2.4 млн лет, а возраст US равен 6.4 ± 1.7 млн лет.

Выполнена оценка параметров эллипсоида остаточных скоростей. Показано, что с меньшими

ошибками эти параметры находятся при использовании только двух компонент скоростей V_l и V_b . В итоге получены следующие значения главных осей эллипсоида остаточных скоростей:

$$\sigma_{1,2,3} = (7.07, 1.93, 0.40) \pm (0.49, 0.41, 1.08) \text{ км/с для US,}$$

US,

$$\sigma_{1,2,3} = (7.08, 2.09, 0.79) \pm (1.28, 0.57, 1.31) \text{ км/с для UCL,}$$

UCL,

$$\sigma_{1,2,3} = (6.73, 2.31, 0.50) \pm (0.62, 2.71, 0.90) \text{ км/с для LCC.}$$

LCC.

Авторы благодарят рецензента за полезные замечания, которые способствовали улучшению работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Blaauw. Publ. Kapteyn Astron. Lab. Groningen **52**, 1 (1946).
2. A. Blaauw. Ann. Rev. Astron. Astrophys. **2**, 213 (1964).
3. P. T. de Zeeuw, R. Hoogerwerf, J. H. J. de Bruijne, A. G. A. Brown, and A. Blaauw. Astron. J. **117**(1), 354 (1999).
4. N. J. Wright and E. E. Mamajek. Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **476**(1), 381 (2018).
5. E. E. Mamajek, M. Meyer, and J. Liebert. Astron. J. **124**(3), 1670 (2002).
6. M. J. Sartori, J. R. D. L. pine, and W. S. Dias. Astron. and Astrophys. **404**, 913 (2003).
7. T. Preibisch and E. Mamajek. The Nearest OB Association: Scorpius-Centaurus (Sco OB2). Handbook of Star Forming Regions, Vol. II: The Southern Sky ASP Monograph Publ., **5**; edited by Bo Reipurth, p.235 (2008).
8. Jos H. J. de Bruijne. Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **310**(3), 585 (1999).
9. S. Ratzenb ck, J. E. Gro schedl, T. Mller, J. Alves, I. Bomze, and S. Meingast. Astron. and Astrophys. **677**, id. A59 (2023).
10. S. Ratzenb ck, J. E. Gro schedl, J. Alves, N. Miret-Roig, et al. Astron. and Astrophys. **678**, id. A71 (2023).
11. T. Preibisch and H. Zinnecker. Astron. J. **117**(5), 2381 (1999).
12. E. J. de Geus. Astron. and Astrophys. **262**, 258 (1992).
13. B. Fuchs, D. Breitschwerdt, M. A. de Avillez, C. Dettbarn, and C. Flynn. Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **373**(3), 993 (2006).
14. A. Blaauw. Bull. Astron. Inst. Netherland **11**, 414 (1952).
15. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova. Astron. Letters **33**(9), 571 (2007).
16. B. Goldman, S. Rser, E. Schilbach, A. C. Mor, and T. Henning. **868**(1), id. 32 (2018).

17. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova. *Astron. Rep.* **64**(4), 326 (2020).
18. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova. *Astron. Letters* **49**(7), 410 (2023).
19. N. J. Wright and E. E. Mamajek. *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **476**(1), 381 (2018).
20. E. E. Mamajek and C. P. M. Bell. *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **445**(3), 2169 (2014).
21. R. A. Lee, E. Gaidos, J. van Saders, G. A. Feiden, and J. Gagn. *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **528**(3), 4760 (2024).
22. C. Ducourant, R. Teixeira, P. A. B. Galli, J. F. Le Campion, A. Krone-Martins, B. Zuckerman, G. Chauvin, and I. Song. *Astron. and Astrophys.* **563**, id. A121 (2014).
23. K. L. Luhman. *Astron. J.* **165**(6), id. 269 (2023).
24. M. J. Sartori, J. R. D. L. pine, and W. S. Dias. *Astron. and Astrophys.* **404**, 913 (2003).
25. D. Fernandez, F. Figueras, and J. Torra. *Astron. and Astrophys.* **480**(3), 735 (2008).
26. ESA, The Hipparcos and Tycho Catalogues. *Astrometric and Photometric Star Catalogues derived from the ESA Hipparcos Astrometry Mission*, Vol. 1–17, ESA SP-1200 (1997).
27. T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, A. G. A. Brown, A. Vallenari, et al. *Astron. and Astrophys.* **595**, id. A1 (2016).
28. A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al. *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A1 (2021).
29. K. L. Luhman. *Astron. J.* **163**(1), id. 24 (2022).
30. B. Lindblad. *Arkiv fr Matematik, Astronomi och Fysik*, **20A**, No. 17, 7 (1927).
31. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova. *Astron. Letters* **42**(1), 1 (2016).
32. R. Sch nrich, J. Binney, and W. Dehnen. *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **403**, 1829 (2010).
33. J. Holmberg and C. Flinn. *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **352**, 440 (2004).
34. O. I. Krisanova, V. V. Bobylev, and A. T. Bajkova. *Astron. Letters* **46**(6), 370 (2020).
35. K. F. Ogorodnikov. *Dynamics of stellar systems*, edited by A. Beer (Oxford: Pergamon, 1965).
36. S. Madsen, D. Dravins, and L. Lindegren. *Astron. and Astrophys.* **381**, 446 (2002).
37. W. Dehnen and J. Binney. *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **298**, 387 (1998).
38. M. Erjal, M. J. Ireland, T. D. Crundall, M. R. Krumholz, and A. D. Rains. *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **519**(3), 3992 (2023).
39. V. V. Bobylev. *Astrophysics* **57**(4), 583 (2014).

KINEMATICS OF FAINT STARS OF THE SCO-CEN ASSOCIATION ACCORDING TO GAIA CATALOG

V. V. Bobylev*, A. T. Bajkova

Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Pulkovo, Russia

*E-mail: bob-v-vzz@rambler.ru

The kinematic properties of the Sco-Cen association are studied using the spatial velocities of young stars. New kinematic age estimates for the three components of the association were obtained, with the age of UCL and LCC being 17.7 ± 2.4 Myr, and the age of US being 6.4 ± 1.7 Myr. The parameters of the residual velocities US, UCL and LCC were estimated.

Keywords: kinematics, star formation, T Tauri stars, stellar associations, Scorpio-Centauri association