

УДК 524.42-32

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕМАТИКИ ЗВЕЗДНОЙ АССОЦИАЦИИ TW Hya ПО СОВРЕМЕННЫМ ДАННЫМ

© 2024 В. В. Бобылев^{1*}, А. Т. Байкова¹¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 22 января 2024 года; после доработки 9 марта 2024 года; принята к публикации 17 марта 2024 года

Изучена кинематика близкой к Солнцу молодой звездной ассоциации TW Hya. Двумя способами получены кинематические оценки возраста этой ассоциации. Первый способ — анализ звездных траекторий, проинтегрированных назад по времени, — дал оценку возраста $t = 4.9 \pm 1.2$ млн лет. Второй заключался в анализе мгновенных скоростей звезд и показал, что имеет место объемное расширение звездной системы с коэффициентом угловой скорости $K_{xyz} = 103 \pm 12$ км с⁻¹ кпк⁻¹. На основе этого эффекта найден промежуток времени, прошедший от начала расширения ассоциации TW Hya до настоящего момента, $t = 9.5 \pm 1.1$ млн лет. Определены следующие значения главных полуосей эллипсоида остаточных скоростей: $\sigma_{1,2,3} = (5.25, 1.84, 0.35) \pm (0.34, 0.63, 0.26)$ км с⁻¹.

Ключевые слова: *Галактика: кинематика и динамика — рассеянные скопления и ассоциации: общие сведения — рассеянные скопления и ассоциации: отдельные: TW Hya*

1. ВВЕДЕНИЕ

Вблизи Солнца расположены несколько небольших ассоциаций и компактных движущихся групп очень молодых (5–20 млн лет) звезд. Это, например, Тисапа, β Pic, η Cha, ϵ Cha, TW Hya. Возникновение всех этих объектов, по-видимому, тесно связано с эволюцией более обширного и более возрастного комплекса — с OB-ассоциацией Sco–Cep.

Ассоциация TW Hya является одной из ближайших к нам, входящие в нее звезды находятся на среднем расстоянии от Солнца 60 пк. Большинство ее членов — маломассивные звезды спектральных классов K и M, не достигшие стадии главной последовательности. Исследование ассоциации началось в 80–90-е годы прошлого века (de la Reza et al., 1989; Gregorio-Hetem et al., 1992; Zuckerman and Becklin, 1993). В настоящее время в нее включают более 60 вероятных членов (Luhman, 2023), большой процент которых составляют двойные или кратные системы. Возраст ассоциации TW Hya оценен в работе Luhman (2023) как 10 ± 2 млн лет. Это значение найдено путем усреднения двух оценок, полученных как на основе анализа кинематики, так и фотометрии. При этом в первом случае использовался коэффициент углового расширения, значение которого было найдено по скоростям звезд, наблюдаемым в настоящий момент времени.

Для оценки возраста ассоциации TW Hya интересно применить еще один кинематический метод, в основе которого лежит изучение орбит звезд, проинтегрированных назад в прошлое. Таким методом успешно оценивался кинематический возраст различных рассеянных звездных скоплений, движущихся групп и ассоциаций (например, Yuan and Waxman, 1977; Fernández et al., 2008; Couture et al., 2023). В частности, этим методом по еще небольшому количеству членов ассоциации TW Hya в работе de la Reza et al. (2006) была получена оценка возраста 8.3 ± 0.8 млн лет.

Благодаря чрезвычайной близости к Солнцу для исследования этой ассоциации доступны многие кинематические и фотометрические параметры, измеренные с очень высокой точностью. Например, практически для всех звезд-кандидатов известны тригонометрические параллаксы из каталога Gaia DR3 (Vallenari et al., 2023), полученные с относительными ошибками менее 3%. Собственные движения звезд-членов ассоциации TW Hya также измерены в каталоге Gaia DR3 с очень высокой точностью.

А вот измерения их лучевых скоростей в каталоге Gaia DR3 зачастую сделаны с большими ошибками по сравнению с наземными определениями. Это продемонстрировано в работе Bobylev and Vajkova (2024) на примере движущейся группы β Pictoris. Так как многие звезды ассоциации TW Hya входят в состав кратных систем, то для надежного определения лучевых скоростей центра

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

масс требуются многолетние наблюдения, которые пока можно осуществлять лишь наземным способом.

Одним из важных достоинств исследования Luhman (2023) является то, что проделана большая работа по сбору и анализу наземных измерений лучевых скоростей звезд-кандидатов. В итоге лучшие на сегодняшний день измерения лучевых скоростей звезд собраны в одном каталоге.

Целью настоящей работы являются изучение кинематики ассоциации TW Нуа и кинематическая оценка ее возраста. Для этого используются современные данные о вероятных членах ассоциации согласно списку Luhman (2023), где параллаксы и собственные движения звезд взяты из каталога Gaia DR3, а значения лучевых скоростей — из литературных источников. Метод заключается в построении орбит звезд в прошлом на заданном временном интервале и оценке того момента, когда звездная группировка имела минимальный пространственный размер.

2. МЕТОДЫ

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 — на северный полюс Галактики. Тогда $x = r \cos l \cos b$, $y = r \sin l \cos b$ и $z = r \sin b$, где $r = 1/\pi$ — гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк, которое мы вычисляем через тригонометрический параллакс звезды π в мсд (миллисекунды дуги).

Из наблюдений известны лучевая скорость V_r и две проекции тангенциальной скорости $V_l = 4.74 r \mu_l \cos b$ и $V_b = 4.74 r \mu_b$, направленные вдоль галактической долготы l и широты b соответственно, выраженные в км с⁻¹. 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⁻¹.

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. Эллипсоид скоростей

Для оценки дисперсий остаточных скоростей звезд используем известный метод (Ogorodnikov, 1965), где рассматриваются шесть моментов второго порядка:

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

которые являются коэффициентами уравнения поверхности

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

а также компонентами симметричного тензора моментов остаточных скоростей

$$\begin{pmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Для определения значений этого тензора используются шесть следующих уравнений:

$$V_l^2 = a \sin^2 l + b \cos^2 l \sin^2 l - 2d \sin l \cos l, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_b^2 &= a \sin^2 b \cos^2 l + b \sin^2 b \sin^2 l \\ &+ c \cos^2 b - 2f \cos b \sin b \sin l \\ &- 2e \cos b \sin b \cos l + 2d \sin l \cos l \sin^2 b, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_l V_b &= a \sin l \cos l \sin b + b \sin l \cos l \sin b \\ &+ f \cos l \cos b - e \sin l \cos b \\ &+ d(\sin^2 l \sin b - \cos^2 l \sin b), \end{aligned} \quad (6)$$

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

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

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

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

$$\begin{vmatrix} a - \lambda & d & e \\ d & b - \lambda & f \\ e & f & c - \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (10)$$

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

$$\lambda_1 = \sigma_1^2, \lambda_2 = \sigma_2^2, \lambda_3 = \sigma_3^2, \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3. \quad (11)$$

Направления главных осей тензора (10) $L_{1,2,3}$ и $B_{1,2,3}$ находятся из соотношений

$$\operatorname{tg} L_{1,2,3} = \frac{ef - (c - \lambda)d}{(b - \lambda)(c - \lambda) - f^2}, \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} B_{1,2,3} = \frac{(b - \lambda)e - df}{f^2 - (b - \lambda)(c - \lambda)} \cos L_{1,2,3}. \quad (13)$$

Для вычисления остаточных скоростей звезд используем значения скорости Солнца относительно местного стандарта покоя

$$(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (11.1, 12.2, 7.3) \text{ км с}^{-1}, \quad (14)$$

полученные в работе Schönrich et al. (2010). Пространственный размер ассоциации TW Нуа настолько мал, что учета дифференциального вращения Галактики здесь не требуется. Тем более не требуется учет влияния спиральной структуры.

2.2. Построение орбит звезд

Для построения орбит звезд в системе координат, вращающейся вокруг центра Галактики, используем эпициклическое приближение (Lindblad, 1927):

$$\begin{aligned}
 x(t) &= x_0 + \frac{U_0}{\kappa} \sin(\kappa t) + \frac{V_0}{2B} (1 - \cos(\kappa t)), \\
 y(t) &= y_0 + 2A \left(x_0 + \frac{V_0}{2B} \right) t - \frac{\Omega_0}{B\kappa} V_0 \sin(\kappa t) \\
 &\quad + \frac{2\Omega_0}{\kappa^2} U_0 (1 - \cos(\kappa t)), \\
 z(t) &= \frac{W_0}{\nu} \sin(\nu t) + z_0 \cos(\nu t),
 \end{aligned} \quad (15)$$

где t — время в млн лет (исходим из соотношения 1 пк/1 млн лет = 0.978 км с⁻¹); A и B — постоянные Оорта; $\kappa = \sqrt{-4\Omega_0 B}$ — эпициклическая частота; Ω_0 — угловая скорость галактического вращения местного стандарта покоя, $\Omega_0 = A - B$; $\nu = \sqrt{4\pi G \rho_0}$ — 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 (15) обозначают современные положения и скорости звезд соответственно. Возвышение Солнца над галактической плоскостью h_\odot принято равным 16 пк, согласно работе Bobylev and Vajkova (2016). Скорости U, V, W вычисляем относительно местного стандарта покоя с использованием значений (14). Мы приняли $\rho_0 = 0.1 M_\odot \text{ пк}^{-3}$ (Holmberg and Flynn, 2004), что дает $\nu = 74 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. Используем следующие значения постоянных Оорта: $A = 16.9 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ и $B = -13.5 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, близкие к современным оценкам. Обзор таких оценок можно найти, например, в работе Krisanova et al. (2020).

3. ДАННЫЕ

Основу нашей выборки составляют звезды ассоциации TW Нуа из списка Luhman (2023). Этот список содержит 67 вероятных членов ассоциации, которые являются членами 55 двойных или кратных систем. У ряда звезд списка нет измерений лучевых скоростей. В конечном итоге для кинематического анализа мы отобрали 53 звезды с измеренными параллаксами, собственными движениями и лучевыми скоростями.

Luhman (2023) включил в свой каталог как тригонометрические параллаксы из каталога Gaia DR3, так и расстояния до звезд из работы Bailer-Jones et al. (2021). Последние Luhman как раз использовал при своих вычислениях. Отметим, что тригонометрические параллаксы из каталога Gaia DR3 для всех анализируемых звезд измерены в указанной работе с относительными ошибками менее 3%. При таких ошибках расстояний до звезд, вычисленных непосредственно через параллакс $r = 1/\pi$, можно не учитывать какие-либо модельно-зависимые дополнительные поправки (Lutz and Kelker, 1973). Поэтому в настоящей работе используем расстояния до звезд, вычисленные непосредственно через тригонометрические параллаксы каталога Gaia DR3.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 даны современные положения (голубые кружки) и траектории в прошлом 53 звезд ассоциации TW Нуа. Интегрирование орбит звезд

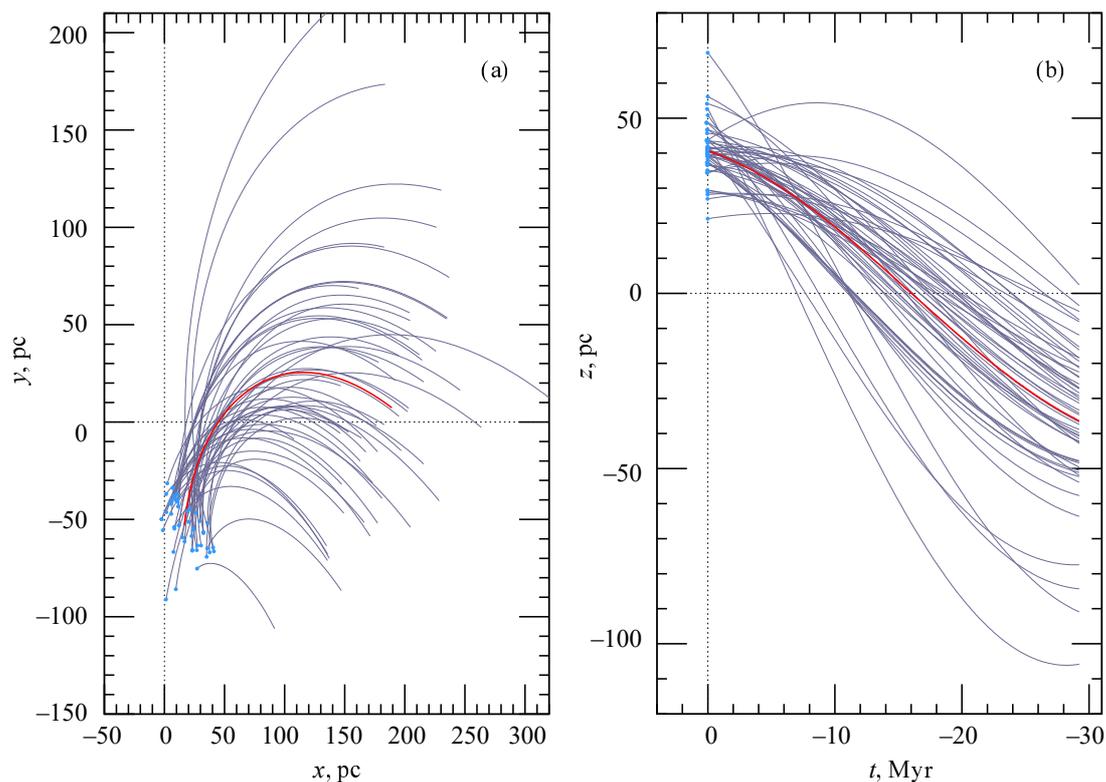


Рис. 1. Распределение 53 звезд ассоциации TW Нуа в проекции на галактическую плоскость xy и их траектории (а), вертикальное распределение и их траектории (б). Траектории прослежены назад в прошлое на интервале 30 млн лет, траектория кинематического центра этой звездной группировки показана красным цветом.

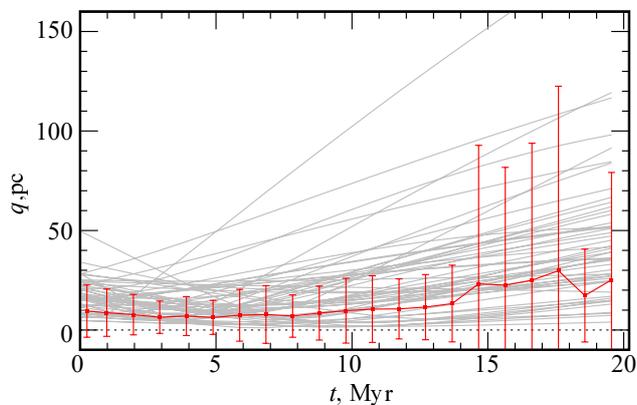


Рис. 2. Отклонения от траектории кинематического центра (параметр q) на интервале интегрирования 20 млн лет для 53 звезд ассоциации TW Нуа; красным цветом показаны усредненные значения и соответствующие дисперсии.

выполнено на интервале 30 млн лет назад в прошлое.

Получены также характеристики кинематического центра этой группировки. Траектория кинематического центра задается следующим образом. Вычисляем средние значения положений и скоростей звездной группировки: $\bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0$ и

$\bar{U}_0, \bar{V}_0, \bar{W}_0$. Так, по данным для 53 звезд ассоциации TW Нуа были найдены $\bar{U}_0 = -12.1 \text{ км с}^{-1}$, $\bar{V}_0 = -18.8 \text{ км с}^{-1}$ и $\bar{W}_0 = -6.0 \text{ км с}^{-1}$, а также $\bar{x}_0 = 16.7 \text{ пк}$, $\bar{y}_0 = -53.0 \text{ пк}$ и $\bar{z}_0 = 24.7 \text{ пк}$, которые практически совпадают с аналогичными значениями из работы Luhman (2023), вычисленными по несколько иному набору звезд.

С использованием этих значений строится траектория кинематического центра. По разностям координат (между звездой и кинематическим центром) $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ на каждый момент интегрирования для каждой звезды определяем значение параметра q следующего вида:

$$q = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}, \quad (16)$$

характеризующего отклонение звезды от траектории кинематического центра, которая также показана на рис. 1. Отметим, что траектории звезд вычислены с учетом возвышения Солнца над галактической плоскостью. Таким образом, на всех наших рисунках координата z отражает положение звезд относительно плоскости Галактики.

Для каждой звезды построена зависимость параметра q от времени на интервале интегрирования

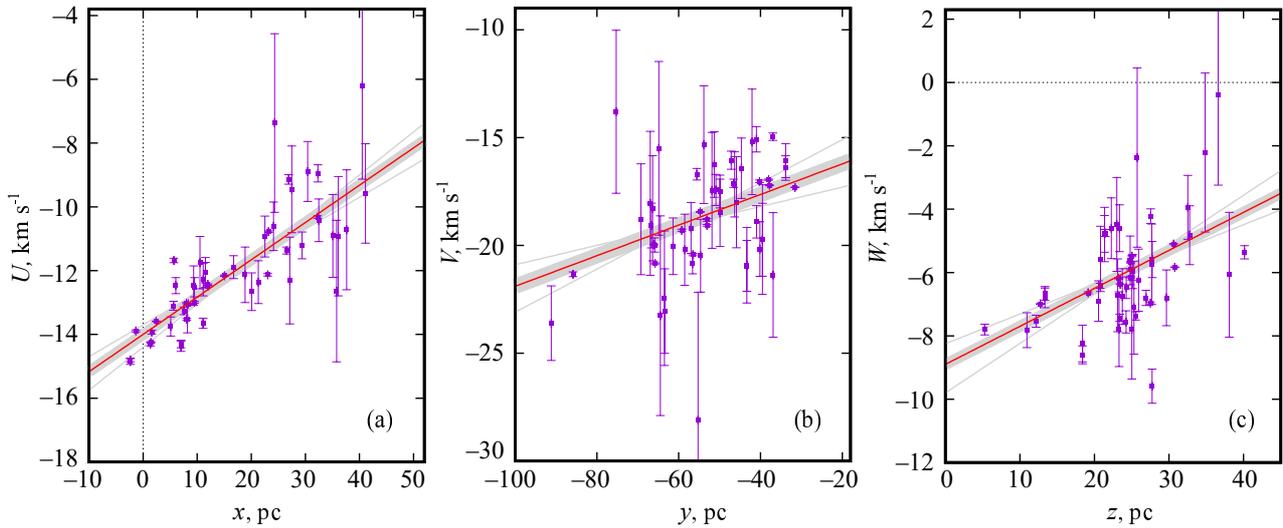


Рис. 3. Скорости U в зависимости от координаты x (а), скорости V в зависимости от координаты y (б) и скорости W в зависимости от координаты z (с) для 53 звезд ассоциации TW Нуа.

20 млн лет (рис. 2). Взят более короткий интервал интегрирования, по сравнению с предыдущим шагом, чтобы можно было детальнее отследить положение минимума средних значений. При этом хорошо видно, что

- пространственный размер звездной группировки 15–20 млн лет назад был существенно больше по сравнению с настоящим;
- красная линия на рис. 2 имеет минимум в районе 5 млн лет;
- наблюдается тенденция к расширению звездной группировки.

Из анализа усредненных данных получена следующая оценка возраста ассоциации TW Нуа:

$$t = 4.9 \pm 1.2 \text{ млн лет.} \quad (17)$$

Ошибка момента t была найдена в результате статистического моделирования методом Монте-Карло. При этом предполагалось, что орбиты звезд построены с относительными ошибками 10%, распределенными по нормальному закону.

На рис. 3 показаны зависимости скоростей U , V и W от соответствующих координат x , y и z , а также найденные по этим данным методом наименьших квадратов градиенты

$$\partial U / \partial x = 117 \pm 11 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1},$$

$$\partial V / \partial y = 71 \pm 23 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1},$$

$$\partial W / \partial z = 120 \pm 26 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$$

с указанием границ доверительных интервалов, соответствующих уровню 1σ . Отметим, что вычисление значений градиентов производилось в несколько итераций с исключением больших невязок по

критерию 3σ . В каждом из указанных выше трех случаев по этому критерию было отброшено не более одной звезды.

Фактически по данным трех представленных на рисунке панелей найдены три градиента, которые в линейной модели Огородникова–Милна (Bobylev and Vajkova, 2023; Ogorodnikov, 1965) являются диагональными членами матрицы деформации и описывают эффекты расширения звездной системы. В итоге можем оценить эффект объемного расширения ассоциации TW Нуа, $K_{xyz} = (\partial U / \partial x + \partial V / \partial y + \partial W / \partial z) / 3$:

$$K_{xyz} = 103 \pm 12 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1} \quad (18)$$

и найти промежуток времени, прошедший от начала расширения звездной системы до настоящего момента, $t = 977.5 / K_{xyz}$:

$$t = 9.5 \pm 1.1 \text{ млн лет.} \quad (19)$$

Пространственный размер ассоциации TW Нуа не превышает 60–70 пк (рис. 1а). Интересно оценить, о какой линейной скорости расширения ассоциации на ее внешней границе V_{exp} может идти речь. Возьмем радиус ассоциации $R_{\text{TWA}} = 30$ пк, тогда $V_{\text{exp}} = K_{xyz} R_{\text{TWA}} = 3 \text{ км с}^{-1}$. Такое значение находится в согласии с известными оценками скоростей расширения различных звездных ассоциаций, 3–6 км с⁻¹ (Mel'nik and Dambis, 2017; 2018; Wright, 2020).

Как правило, из анализа ОБ-ассоциаций известен либо плоский эффект (расширение в плоскости), либо эффект расширения вдоль одного какого-либо направления. Отметим работу Bobylev and Vajkova (2023), в которой найден коэффициент объемного расширения

$K_{xyz} = 43.2 \pm 3.4 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ при анализе большой выборки звезд—членов ассоциации Sco—Cep.

В работе Luhman (2023) возраст ассоциации TW Нуа оценивался двумя способами. Во-первых, по скорости расширения получена кинематическая оценка $t = 9.6_{-0.8}^{+0.9}$ млн лет. Причем она сделана на основе коэффициента объемного расширения K_{xyz} с величиной $102 \pm 9 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. Отличие от нашего результата (18) объясняется разным количеством использованных для вычисления звезд. Во-вторых, по положению на диаграмме Герцшпрунга—Рессела объединенной последовательности звезд малой массы найдено, что $t = 11.4_{-1.2}^{+1.3}$ млн лет. И на основе этих двух результатов в работе Luhman (2023) принята итоговая оценка $t = 10 \pm 2$ млн лет.

С использованием 53 звезд ассоциации TW Нуа в настоящей работе найдены следующие параметры эллипсоида остаточных скоростей:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 5.25 \pm 0.34 \text{ км с}^{-1}, \\ \sigma_2 &= 1.84 \pm 0.63 \text{ км с}^{-1}, \\ \sigma_3 &= 0.35 \pm 0.26 \text{ км с}^{-1}\end{aligned}\quad (20)$$

и параметры ориентации этого эллипсоида

$$\begin{aligned}L_1 &= 2^\circ \pm 6^\circ, & B_1 &= 12^\circ \pm 6^\circ, \\ L_2 &= 92^\circ \pm 1^\circ, & B_2 &= 0^\circ \pm 2^\circ, \\ L_3 &= 181^\circ \pm 1^\circ, & B_3 &= 78^\circ \pm 1^\circ.\end{aligned}\quad (21)$$

В рассматриваемой окрестности Солнца ошибки скоростей V_l и V_b имеют существенно меньшие значения по сравнению с ошибками V_r (эффект хорошо виден, например, на рис. 1 работы Bobylev et al. 2021). Поэтому параметры (20) были найдены с использованием только собственных движений звезд (по трем уравнениям (4)–(6)).

Для сравнения — из решения полной системы уравнений (4)–(9) получены следующие скорости:

$$\sigma_{1,2,3} = (7.86, 3.06, 0.86) \pm (0.66, 0.99, 0.82) \text{ км с}^{-1}.$$

Ориентация осей такова: $(L, B)_1 = (72^\circ, -18^\circ)$, $(L, B)_2 = (167^\circ, -14^\circ)$ и $(L, B)_3 = (114 \pm 4^\circ, 67 \pm 3^\circ)$ (если ошибки определения направления велики, мы их не приводим). Отметим, что параметры этого эллипсоида находятся в хорошем согласии с данными рис. 1, где начальные скорости были найдены по всем трем компонентам: V_l , V_b и V_r .

Ошибки каждой оси эллипсоида остаточных скоростей оцениваются независимо, согласно соотношениям (12) и (13). Видим, что ориентация первой оси эллипсоида (21) определяется плохо.

Это вызвано узким диапазоном значений галактических долгот, но можно ориентироваться на значение третьей оси (B_3), которая определена с маленькими ошибками.

Значения параметров (20) близки к соответствующим значениям скоростей звезд ассоциации Sco—Cep. Например, Bobylev and Bajkova (2020) показали, что эллипсоид остаточных скоростей звезд ассоциации Sco—Cep имеет главные полуоси $\sigma_{1,2,3} = (7.72, 1.87, 1.74) \pm (0.56, 0.37, 0.22) \text{ км с}^{-1}$ и расположен он под углом $22^\circ \pm 2^\circ$ ($B_3 = 78^\circ \pm 2^\circ$) к вертикали. Также хорошо известно, что близкий к найденному наклон имеет третья ось пояса Гулда (Bobylev, 2014; Bobylev and Bajkova, 2020). Кстати, известный эффект расширения пояса Гулда установлен в работе Bobylev (2014) на основе плоского коэффициента расширения K_{xy} (расширение в плоскости xy).

В работе Foster et al. (2015) с использованием высокоточных измерений лучевых скоростей звезд изучен эволюционный статус молодого (возраст 1–2 млн лет) рассеянного звездного скопления NGC 1333. Эти авторы получили значение дисперсии скоростей звезд $\sigma_r = 0.92 \pm 0.12 \text{ км с}^{-1}$ с учетом поправки за двойственность и пришли к выводу о том, что скопление близко к равновесному состоянию.

Отметим работу Wei et al. (2024), где для ядра молодого рассеянного звездного скопления в Туманности Ориона (возраст около 2 млн лет) получена оценка дисперсии внутренних скоростей $\sigma_{1D_{3D}} = 2.26 \pm 0.08 \text{ км с}^{-1}$, которая, по мнению этих авторов, говорит об отклонении скопления от равновесного состояния (для равновесного состояния требуется меньшее значение $\sigma_{1D_{3D}}$). Здесь дисперсия была найдена как среднее квадратическое значение по трем направлениям (α, δ, r).

Вычисленная для ассоциации TW Нуа аналогичная величина составляет $\sigma = 3.22 \pm 0.44 \text{ км с}^{-1}$, что говорит о крайней молодости этой ассоциации. Причем, благодаря значительному проценту кратных систем в выборке, значение σ может быть завышено. А вот наличие надежно установленного расширения прямо говорит о том, что ассоциация TW Нуа далека от равновесного состояния.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформирована выборка из вероятных членов ассоциации TW Нуа, согласно списку работы Luhman (2023). В нее вошли 53 звезды с тригонометрическими параллаксами, собственными движениями из каталога Gaia DR3, а также лучевыми скоростями, собранными по литературным источникам.

Для оценки кинематического возраста ассоциации TW Нуа были построены орбиты звезд в прошлом и определен момент, когда звездная группировка имела минимальный пространственный размер. В итоге возраст ассоциации оценен двумя способами. В обоих случаях оценки являются кинематическими.

Изучение траекторий звезд, построенных в прошлом, дало оценку $t = 4.9 \pm 1.2$ млн лет (результат (17)). Анализ мгновенных скоростей звезд позволяет говорить об объемном расширении этой звездной системы. На основе данного эффекта найден промежуток времени, прошедший от начала расширения ассоциации TW Нуа до настоящего момента, $t = 9.5 \pm 1.1$ млн лет (результат (19)).

Представляет интерес тот факт, что найденный коэффициент объемного расширения ассоциации TW Нуа значимо отличается от нуля, $K_{xyz} = 103 \pm 12 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. Безусловно, это оказалось возможным благодаря высокой измерительной точности положений и скоростей звезд. Обычно из анализа ОВ-ассоциаций известен либо плоский эффект (расширение в плоскости), либо эффект расширения вдоль одного какого-либо направления. Это связано с тем, что градиент $\partial W/\partial z$, как правило, определяется очень плохо.

По звездам ассоциации TW Нуа найдены следующие значения главных полуосей эллипсоида остаточных скоростей:

$$\sigma_{1,2,3} = (5.25, 1.84, 0.35) \pm (0.34, 0.63, 0.26) \text{ км с}^{-1}.$$

Такие значения дисперсий скоростей являются характерными для внутренних движений в комплексах молекулярных облаков, а также очень молодых звездных ассоциациях и скоплениях. Третья ось найденного эллипсоида скоростей отклонена на $12^\circ \pm 1^\circ$ от вертикали. Примечательно, что такое значение отклонения характерно для более крупных образований, известных в окрестности Солнца, — ассоциации Sco—Cep и пояса Гулда.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа финансировалась за счет средств бюджета учреждения. Никаких дополнительных грантов на проведение и руководство данным конкретным исследованием получено не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, et al., *Astron. J.* **161** (3), id. 147 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/abd806
2. V. V. Bobylev, *Astrophysics* **57** (4), 583 (2014). DOI:10.1007/s10511-014-9360-7
3. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Astronomy Letters* **42** (1), 1 (2016). DOI:10.1134/S1063773716010023
4. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Astrophysical Bulletin* **75** (3), 267 (2020). DOI:10.1134/S1990341320030025
5. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Astronomy Letters* **49** (7), 410 (2023). DOI:10.1134/S1063773723070010
6. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Astronomy Letters* **50** (4), 239 (2024). DOI:10.1134/S1063773724700117
7. V. V. Bobylev, A. T. Bajkova, A. S. Rastorguev, and M. V. Zabolotskikh, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **502** (3), 4377 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab074
8. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Astronomy Reports* **64** (4), 326 (2020). DOI:10.1134/S1063772920040022
9. D. Couture, J. Gagné, and R. Doyon, *Astrophys. J.* **946** (1), id. 6 (2023). DOI:10.3847/1538-4357/acb4eb
10. R. de la Reza, E. Jilinski, and V. G. Ortega, *Astron. J.* **131** (5), 2609 (2006). DOI:10.1086/501525
11. R. de la Reza, C. A. O. Torres, G. Quast, et al., *Astrophys. J.* **343**, L61 (1989). DOI:10.1086/185511
12. D. Fernández, F. Figueras, and J. Torra, *Astron. and Astrophys.* **480** (3), 735 (2008). DOI:10.1051/0004-6361:20077720
13. J. B. Foster, M. Cottaar, K. R. Covey, et al., *Astrophys. J.* **799** (2), id. 136 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/799/2/136
14. J. Gregorio-Hetem, J. R. D. Lepine, G. R. Quast, et al., *Astron. J.* **103**, 549 (1992). DOI:10.1086/116082
15. J. Holmberg and C. Flynn, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **352** (2), 440 (2004). DOI:10.1111/j.1365-2966.2004.07931.x
16. O. I. Krisanova, V. V. Bobylev, and A. T. Bajkova, *Astronomy Letters* **46** (6), 370 (2020). DOI:10.1134/S1063773720060067
17. B. Lindblad, *Arkiv for Matematik, Astronomi och Fysik* **20A**, No. 17 (1927).
18. K. L. Luhman, *Astron. J.* **165** (6), id. 269 (2023). DOI:10.3847/1538-3881/accf19
19. T. E. Lutz and D. H. Kelker, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **85** (507), 573 (1973). DOI:10.1086/129506

20. A. M. Mel'nik and A. K. Dambis, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **472** (4), 3887 (2017). DOI:10.1093/mnras/stx2225
21. A. M. Mel'nik and A. K. Dambis, *Astronomy Reports* **62** (12), 998 (2018). DOI:10.1134/S1063772918120089
22. K. F. Ogorodnikov, *Dynamics of Stellar Systems* (Pergamon Press, New York, 1965).
23. R. Schönrich, J. Binney, and W. Dehnen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **403** (4), 1829 (2010). DOI:10.1111/j.1365-2966.2010.16253.x
24. L. Wei, C. A. Theissen, Q. M. Konopacky, et al., *Astrophys. J.* **962** (2), id. 174 (2024). DOI:10.3847/1538-4357/ad1401
25. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **674**, id. A1 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243940
26. N. J. Wright, *New Astron. Rev.* **90**, article id. 101549 (2020). DOI:10.1016/j.newar.2020.101549
27. C. Yuan and A. M. Waxman, *Astron. and Astrophys.* **58** (1–2), 65 (1977).
28. B. Zuckerman and E. E. Becklin, *Astrophys. J.* **406**, L25 (1993). DOI:10.1086/186778

Studying the Kinematics of the Stellar Association TW Hya from Modern Data

V. V. Bobylev¹ and A. T. Bajkova¹

¹Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia

The kinematics of the young stellar association near the Sun TW Hya is studied. Kinematic estimates of the age of this association were obtained in two ways. The first method—analysis of stellar trajectories integrated back in time—gave an estimate of the age $t = 4.9 \pm 1.2$ Myr. The second was to analyze the instantaneous velocities of stars and showed that there is a volume expansion of the stellar system with an angular velocity coefficient $K_{xyz} = 103 \pm 12 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$. Based on this effect, the time interval that passed from the beginning of the expansion of the TW Hya association to the present moment was found, $t = 9.5 \pm 1.1$ Myr. The following principal semi-axes of the residual velocity ellipsoid are determined: $\sigma_{1,2,3} = (5.25, 1.84, 0.35) \pm (0.34, 0.63, 0.26) \text{ km s}^{-1}$.

Keywords: (*Galaxy:*) *open clusters and associations: general*—(*Galaxy:*) *open clusters and associations: individual: TW Hya* — *Galaxy: kinematics and dynamics kinematics*