



Орбита внешней пары тройной звезды Т Tauri

О.В. Кияева^{1*}, Л.Г. Романенко¹

¹ ГАО РАН

Апрель 2023

Аннотация

Тройная система молодых звезд Т Tauri=WDS 04220+1932=Hip 20390 была открыта в 1983г. С тех пор множество статей посвящено исследованию физических свойств звезд данной системы. Наша работа посвящена астрометрическому исследованию тройной системы с использованием метода параметров видимого движения (ПВД). В настоящее время хорошо известна орбита внутренней пары *SaSb* с периодом 27 лет (Schaefer, Beck и др., 2020). С параллаксом Gaia DR3 суммарная масса $M_{Sa+Sb} = 2.49M_{\odot}$. Методом ПВД по опубликованным высокоточным однородным наблюдениям на телескопах Keck 1 и VLT получены две орбиты внешней пары N-S, одна из которых почти круговая. Для круговой орбиты можно вычислить орбитальные элементы и динамический параллакс для заданной массы, используя только параметры видимого движения. Именно это дало возможность сравнить динамический параллакс с высокоточным из каталога Gaia DR3 и вычислить массы компонентов в зависимости от массы внутренней подсистемы: $M_N = 2.4 \pm 0.2 M_{\odot}$, $M_{Sa} = 2.09 \pm 0.05 M_{\odot}$, $M_{Sb} = 0.40 \pm 0.05 M_{\odot}$. Также оценены границы для орбитального периода: $500 \leq P \leq 700$ лет.

Введение

Данная работа является продолжением исследования, выполненного нами в 2017 году. Тогда наши результаты были доложены на ежегодной конференции "Современная звездная астрономия" и опубликованы кратко в материалах конференции (Кияева и Zhuchkov, 2017). Для определения орбит по наблюдениям короткой дуги мы используем метод параметров видимого движения (ПВД) (Kiselev и Кияева, 1980). Этим методом мы определили орбиты внутренней и внешней пары ТТав по опубликованным наблюдениям, выполненным на 10 м телескопе Keck 1 с адаптивной оптикой (Schaefer, Prato и др., 2014) и на VLT с аппаратурой NACO и SPHERE (Köhler и др., 2016). Кроме позиционных наблюдений, мы использовали параллакс, полученный на VLBA (Loinard и др., 2007), равный 6.8 ± 0.1 mas.

Метод ПВД предназначен для орбит с периодом обращения порядка 1000 лет, но наша орбита внутренней пары с периодом всего 27 лет хорошо согласовывалась с опубликованными в работах Келера и Шефера, и тогда было невозможно определить, какая орбита лучше соответствует всему ряду. Для внешней пары NS нами были получены орбиты с суммарной массой системы 6.1 и 5.1 масс Солнца.

В настоящее время появились новые наблюдения и более точный параллакс из каталога Gaia DR3 (Gaia Collaboration, 2022), равный 6.89 ± 0.04 mas. В данной работе на примере внутренней пары мы получили возможность оценить, насколько надежна орбита, полученная методом ПВД. Для внешней пары астрометрически получена сумма масс компонентов и более точная круговая орбита. На методе оценки массы системы мы остановимся подробно в разделе 2.

* e-mail:kiyeva@list.ru

1 Сравнение ПВД-орбиты южной пары SaSb с новыми наблюдениями

Для определения орбиты методом ПВД требуется с максимально высокой точностью знать параллакс p_t , сумму масс компонентов, параметры видимого движения — $\rho, \theta, \mu, \psi, \rho_c$ — и относительную лучевую скорость ΔV_r для одного момента времени t_0 в середине короткой дуги. Здесь:

- ρ — видимое расстояние между компонентами,
- θ — позиционный угол относительного положения,
- μ — видимая скорость относительного движения,
- ψ — позиционный угол направления видимого относительного движения,
- ρ_c — радиус кривизны видимой короткой дуги.

Тогда получаем две орбиты, соответствующие положению спутника на момент t_0 симметрично относительно картинной плоскости (ближе или дальше нее). Каждой орбите соответствует угол β между направлением на спутник относительно главной звезды в момент t_0 и его проекцией на картинную плоскость.

Главное достоинство метода ПВД — это то, что можно контролировать качество полученного решения, так как для определения параметров видимого движения нет необходимости использовать все имеющиеся наблюдения, и можно проверить согласованность исходных данных между собой. Все наблюдения используются для контроля качества орбиты, выбора единственного решения и уточнения отдельных неизвестных параметров (например, массы системы). Это принципиально отличает его от методов, где главный критерий — согласие с позиционными наблюдениями, которые позволяют всегда получить орбиту, но плохо работают на короткой дуге.

Для внутренней пары SaSb в работе (Kiyeva and Zhuchkov, 2017) параметры видимого движения на момент 2010.5 были вычислены по однородным наблюдениям 2008–2014гг (7 положений) из статьи (Schaefer, Prato и др., 2014). Из статьи (Loinard и др., 2007) мы взяли параллакс, равный 6.8 ± 0.1 мсд, который был определен на VLBA. Сумма масс компонентов M_{Sa+Sb} и относительная лучевая скорость ΔV_r оценивались из сравнения с высокоточными удаленными наблюдениями. Это более ранние наблюдения, начиная с 1997г., из каталога WDS (Mason и др., 2016), из статей (Schaefer, Prato и др., 2014) и (Köhler и др., 2016) до 2008г. Из сравнения с этими наблюдениями легко выбрать одно решение из двух.

С 1997 года по настоящее время южная пара сделала почти полный оборот. В работе (Schaefer, Beck и др., 2020) опубликованы наблюдения, выполненные на телескопе Keck 1 до 2020 года, и новая орбита. В табл. 1 для сравнения мы представляем все эти орбиты внутренней пары SaSb.

Элементы орбиты из работы (там же) практически совпадают с элементами, ранее полученными в работе (Köhler и др., 2016), но ошибки значительно меньше, поэтому мы считаем ее лучшей в настоящее время. Параллаксы, полученные на VLBA (6.8 ± 0.1 mas, Loinard и др., 2007), Gaia DR2 (6.93 ± 0.06 mas, Gaia Collaboration и др., 2018) и Gaia DR3 (6.89 ± 0.04 mas, Gaia Collaboration, 2022) хорошо согласуются. В данной работе мы используем наиболее точный параллакс из каталога Gaia DR3.

Теперь мы можем оценить, насколько надежна наша ПВД-орбита, которая начала систематически отклоняться от наблюдений с 2016 года (рис. 1). С момента $t_0 = 2010.5$ прошло 5.5 лет. Можно сделать вывод, что если наблюдения высокого качества, то орбиту можно использовать в течение времени, охватывающего приблизительно 20% относительно ее периода. При периоде 1000 лет величина 100-200 лет — хороший срок для эфемерид.

Таблица 1: Элементы орбит пары SaSb

а	Р	e	i	ω	Ω	T_p	M_{Sa+Sb}	Ссылка
мсд	год		°	°	°	год	M_\odot	
89	29	0.49	29.8	218	287	1995.8	2.56	S, 2014
± 7	± 4	± 0.12	± 12	± 14	± 19	± 0.9		
85	27	0.56	20	228	272	1991.1	2.58	K, 2016
± 4	± 2	± 0.09	± 10	± 34	± 19	± 0.8		
88	27.4	0.55	25.8	237.5	264.7	1996.3	2.77	KZh, 2017
± 2	± 0.7	± 0.02	± 2.8	± 5.1	± 5.1	± 0.4		
85.12	27.18	0.551	21.1	225.8	274.4	1996.10	2.495	S, 2020
± 0.62	± 0.72	± 0.032	± 2.1	± 16.9	± 16.9	± 0.38		

Примечание. Массы каждой орбиты соответствуют параллаксу из каталога Gaia DR3 (Gaia Collaboration, 2022). Ссылки: S – статьи (Schaefer, Beck и др., 2020; Schaefer, Prato и др., 2014), K – из статьи (Köhler и др., 2016), KZh – из статьи (Kiyaveva и Zhuchkov, 2017).

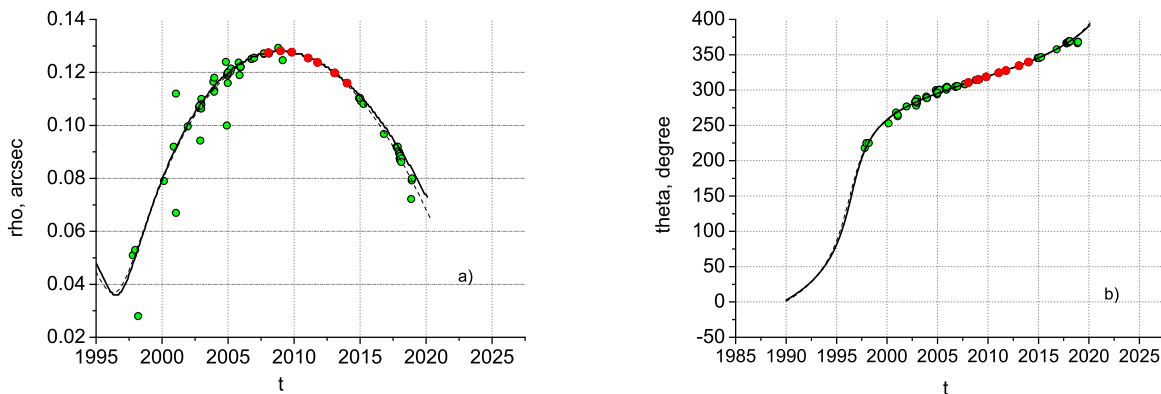


Рис. 1: Сравнение ПВД-орбиты пары Sa–Sb (Kiyaveva и Zhuchkov, 2017, сплошная линия) с лучшей орбитой (Schaefer, Beck и др., 2020, штриховая линия) и с наблюдениями: а) - $\rho(t)$, б) - $\theta(t)$. Обозначения: наблюдения из WDS (Mason и др., 2016) – зеленые кружки, главная дуга, по которой вычислены ПВД – красные кружки.

2 Предварительная оценка масс компонентов

Метод астрометрического определения масс в тройной системе без подробного описания мы применили в работе (Kiyaveva и Zhuchkov, 2017). В данной работе мы подробно опишем этот процесс.

Предположения, которые мы допускаем:

1) Фотоцентр каждого компонента совпадает с его центром масс.

2) Визуально-тройная система замкнута, и возможные маломассивные спутники не влияют на результат.

3) Динамическая масса внутренней подсистемы $M_{Sa+Sb} = 2.495 M_\odot$, что соответствует параллаксу из каталога Gaia DR3 и элементам орбиты внутренней пары из статьи (Schaefer, Beck и др., 2020).

Важно то, что имеются два ряда однородных высокоточных измерений всех трех компонентов, отнесенных к одним и тем же моментам времени, и каждый ряд наблюдался на одном телескопе. Использовались наблюдения, опубликованные в работах (Schaefer, Prato и др., 2014) и (Köhler и др., 2016).

Определим отношения масс каждого компонента к массе внутренней пары.

$$q_1 = M_{Sa}/M_{Sa+Sb}, \quad q_2 = M_{Sb}/M_{Sa+Sb} = 1 - q_1, \quad q_3 = M_N/M_{Sa+Sb}$$

Тогда для каждого опубликованного наблюдения, соответствующего моменту t_i , можно вычислить координаты центра масс тройной звезды x_c, y_c в системе координат относительно северного компонента N:

$$x_c = \frac{(x_1 - x_2)q_1 + x_2}{1 + q_3} \quad y_c = \frac{(y_1 - y_2)q_1 + y_2}{1 + q_3} \quad (1)$$

Здесь $x_1 = \rho_i \sin \theta_i$, $y_1 = \rho_i \cos \theta_i$ вычислены по наблюдениям пары N-Sa. Аналогично x_2, y_2 вычислены по наблюдениям пары N-Sb.

Считая центр масс неподвижным, можно по двум наблюдениям в моменты t_i и t_j получить средние скорости движения компонентов Sa и Sb (соответственно V_{Sa} и V_{Sb}) относительно центра масс и сравнить их со скоростью относительного движения ΔV , которая аналогично вычисляется по паре Sa-Sb. Подбираем такую комбинацию значений q_1 и q_3 , при которой функция сравнения

$$F_{i,j}^2 = [V_{x,Sb} - V_{x,Sa} - \Delta V_x]^2 + [V_{y,Sb} - V_{y,Sa} - \Delta V_y]^2 \quad (2)$$

принимает минимальное значение.

Диапазоны, внутри которых осуществлялся перебор значений q_1 и q_3 , следующие: $0.5 \leq q_1 \leq 0.95$ с шагом 0.01, $0.5 \leq q_3 \leq 2.0$ с шагом 0.01. То, что масса звезды Sa больше, чем масса Sb, очевидно, если сравнить положения фотоцентра пары Sa-Sb относительно компонента N (N-Sab) с положениями N-Sa и N-Sb (см. Kiyeva и Zhuchkov, 2017; Schaefer, Beck и др., 2020). Верхняя граница поиска q_3 выбрана нами произвольно, она соответствует массе компонента N $5.0M_\odot$, что существенно превосходит значение, полученное из анализа распределения спектральной энергии $1.7 \leq M_N \leq 2.2M_\odot$ (см. Loinard и др., 2007).

Так как предполагается, что на интервале $t_i - t_j$ орбитальное движение равномерное и прямолинейное, выбранные интервалы должны быть достаточно близкими и, в то же время, такие, чтобы скорость вблизи апоастра внутренней орбиты Sa-Sb определялась достаточно уверенно. Мы выполнили два варианта расчетов:

- 1) t_i и t_j — соседние моменты, представленные авторами статей, $|t_i - t_j| \approx 1$ год;
- 2) мы искусственно комбинировали пары так, чтобы $|t_i - t_j| \approx 2$ года.

Результаты представлены в табл. 2. В последнем столбце таблицы представлены веса конкретных значений q_1 и q_3 , с которыми они вошли в средние значения. Этот вес равен сумме весов i -того и j -того наблюдений. Вес каждого наблюдения определяется ошибкой σ_ρ и равен сумме $1/\sigma_\rho^2$, вычисленных для всех трех пар N-Sa, N-Sb и Sa-Sb.

Из 11 наблюдений, опубликованных в (Schaefer, Prato и др., 2014), мы заранее исключили наблюдение, соответствующее моменту 2005.9, так как его ошибки у всех трех пар гораздо больше, чем у остальных 10-ти наблюдений, и оно очевидно ошибочно даже при визуальном просмотре. В той же статье (там же) приведены независимые измерения всех трех пар, а в статье (Köhler и др., 2016) приведены измерения пар N-Sa и Sa-Sb. Положения N-Sb были пересчитаны нами и, соответственно, ошибки этих положений больше, а суммарный вес, представленный в табл. 2, меньше. Мы объединяли в пары только однородные наблюдения, полученные или на обсерватории Кекк, или на VLT/NACO.

В 2017 году для определения параметров q_1 и q_3 мы использовали 29 независимых пар наблюдений. Добавление нескольких пар, опубликованных в работе 2020 года, не может существенно изменить результат, поэтому мы оставили только 29. Это несущественно еще и потому, что вычисленные в первом приближении массы являются предварительными и будут уточняться в процессе данного исследования (см. раздел 3).

Значение $q_1 = 0.84 \pm 0.02$ определяется уверенно. Соответственно, $M_{Sa} = 2.09 \pm 0.05 M_\odot$, $M_{Sb} = 0.40 \pm 0.05 M_\odot$, $M_{Sb}/M_{Sa} = 0.19 \pm 0.04$. Динамические массы, вычисленные в работе (Schaefer, Beck и др., 2020) с параллаксом из Gaia DR2 для компонентов внутренней пары ($M_{Sa} = 2.05 \pm 0.14 M_\odot$, $M_{Sb} = 0.43 \pm 0.06 M_\odot$, $M_{Sb}/M_{Sa} = 0.21 \pm 0.03$), хорошо согласуются с нашими результатами.

Таблица 2: Оценка масс компонентов. Определение коэффициентов q_1 и q_3

t_1	t_2	q_1	q_3	Вес	Ссылка
2002.829	2004.981	.75	.54	4.24	S
2004.981	2006.963	.73	.52	29.92	S
2006.963	2008.045	.80	.53	68.15	S
2008.045	2008.962	.95	1.34	47.97	S
2008.962	2009.817	.52	.50	65.03	S
2009.817	2011.064	.92	.51	79.15	S
2011.064	2011.780	.89	2.00	66.64	S
2011.780	2013.074	.94	1.70	64.51	S
2013.074	2014.008	.93	.52	33.68	S
2001.935	2002.953	.56	.50	5.78	K
2002.953	2003.944	.90	.73	2.95	K
2003.944	2004.938	.68	.62	3.27	K
2004.938	2006.776	.94	1.13	3.79	K
2006.776	2007.707	.77	1.99	7.26	K
2007.707	2008.084	.92	1.00	57.55	K
2008.084	2008.793	.80	1.21	53.95	K
2008.793	2009.132	.81	1.59	2.21	K
Средневзвешенное		0.835 ± 0.033	1.013 ± 0.138		
2002.8290	2004.9810	.750	.540	4.24	S
2004.9810	2006.9630	.730	.520	29.92	S
2006.9630	2008.9620	.940	1.530	35.42	S
2008.9620	2011.0640	.530	.500	29.35	S
2011.0640	2013.0740	.940	1.290	41.33	S
2011.7800	2014.0080	.920	1.900	58.99	S
2001.9350	2003.9440	.860	.900	6.74	K
2003.9440	2006.7760	.950	1.680	4.44	K
2006.7760	2008.7930	.710	1.170	3.66	K
2002.9530	2004.9380	.670	1.590	2.31	K
2004.9380	2007.7070	.930	1.470	6.09	K
2007.7070	2009.1320	.880	1.920	5.81	K
Средневзвешенное		0.841 ± 0.043	1.286 ± 0.163		

Примечание. Приводится ссылка на источник наблюдений: S — Schaefer, Prato и др., 2014, K — Köhler и др., 2016.

Разброс значений q_3 охватывает весь диапазон 0.5–2.0 и определяется менее уверенно. Это указывает на то, что центр масс не является неподвижным. Область звездообразования в созвездии Тельца неустойчива. Авторы работы (Esplin и Luhman, 2019) обнаружили в данной области 79 новых членов планетной и звездной массы. Множество статей посвящены исследованию газопылевого диска вокруг звезд данной системы (см, например, GRAVITY Collaboration и др., 2021). Среди такого "хаоса" возможно колебание центра масс вокруг некоторого среднего положения, что отражено в табл. 2.

В работе (Schaefer, Beck и др., 2020) показано, что звездная величина северного компонента N постоянна, но у компонентов Sa и Sb она изменяется в диапазоне от 7 до 11^m . То, что мы получили массы звезд внутренней подсистемы уверенно, говорит о том, что колебание центра масс связано с особенностями компонента N. Есть работы, в которых дискутируется вопрос о возможном спутнике у звезды N (см. Nisenson и др., 1985; Maihara и Kataza, 1991; Csépany и др., 2015).

В данной работе мы не рассматриваем физические свойства звезд данной системы, а исследуем ее только с точки зрения астрометрии и динамики. В первом приближении мы принимаем среднее значение $q_3 = 1.1 \pm 0.2$, что соответствует $M_N = 2.7 M_\odot$, $2.2 \leq M_N \leq 3.2 M_\odot$. Это превосходит оценку $1.7 \leq M_N \leq 2.2 M_\odot$ (Loinard и др., 2007). Определяя орбиту внешней пары, мы рассмотрим диапазон $1.7 \leq M_N \leq 2.7 M_\odot$.

Таблица 3: Параметры видимого движения внешней пары NS.

$T_1 - T_2$	ρ	θ	μ	ψ	ρ_c	σ_ρ , мсд
t_0	мсд	°	мсд/год	°	мсд	σ_τ , мсд
2002.8–2014.9	684.11	187.939	8.45	289.4	840	0.68
2009.0	± 0.17	± 0.015	± 0.06	± 0.4	± 10	1.00

Примечание: σ_ρ , σ_τ — ошибки единицы веса, полученные при выравнивании; $\sigma_\tau = \rho \cdot \sigma_\theta \cdot (\pi/180^\circ)$.

3 Орбита внешней пары N-S

Прежде всего, для всех наблюдений были вычислены положения относительно центра масс пары Sa-Sb при условии $M_{Sb}/M_{Sa} = 0.19$. Параметры видимого движения вычислены по однородным наблюдениям на телескопе Keck и представлены в табл. 3. В последнем столбце — СКО в радиальном (σ_ρ) и тангенциальном ($\sigma_\tau = \rho \cdot \sigma_\theta \cdot (\pi/180^\circ)$) направлении.

Вначале мы принимаем $M_{N+S} = 2.7 + 2.495 \approx 5.2 M_\odot$. Для определения орбиты методом ПВД не хватает только относительной лучевой скорости. Мы оценили этот параметр, используя позиционные наблюдения 1989–2000 гг. согласно алгоритму, который был предложен в работе (Кияева, 1983), где сравниваются не непосредственно наблюдения, а элементы Тиле-Иннеса A, B, F, G, вычисленные двумя путями: по геометрическим элементам ПВД-орбиты (a, i, ω и Ω) и в качестве решения методом наименьших квадратов системы линейных уравнений, где наряду с наблюдаемыми координатами используются динамические элементы ПВД-орбиты (P, T и e). В идеале эти значения должны совпадать. Мы ищем минимум функции сравнения S.

$$S = (\Delta A^2 + \Delta B^2 + \Delta F^2 + \Delta G^2)^{1/2} \quad (3)$$

Для данной звезды минимум S определяется неуверенно, $1.0 < |\Delta V_r| < 2.5$ км/с (см. рис. 2). Мы принимаем среднее значение $|\Delta V_r| = 1.7 \pm 0.8$ км/с. Следует отметить, что для такой далекой звезды даже незначительное изменение параллакса сказывается на выборе $|\Delta V_r|$. Здесь мы использовали параллакс из Gaia DR3 6.89 ± 0.04 мсд. В работе (Кияева и Zhuchkov, 2017) с параллаксом 6.8 ± 0.1 мсд $|\Delta V_r| = 2.1 \pm 1.0$ км/с.

Методом ПВД мы получили две равновероятные орбиты, для которых положения спутника в момент t_0 симметричны относительно картинной плоскости. Они имеют одинаковый период $P = 507$ лет и большую полуось $a = 759$ мсд (117 а.е.), и различающиеся остальные параметры. Эти орбиты представлены в табл. 5. Обращаем внимание на то, что одно из решений соответствует почти круговой орбите, а относительная лучевая скорость определена с большой ошибкой. Поэтому целесообразно предположить, что орбита круговая. Тогда знание лучевой скорости не требуется, а для вычисления расстояния между компонентами в астрономических единицах $r = a$ и динамического параллакса p_d с заданной массой требуются только параметры видимого движения (Kiselev и Кияева, 1980; Кияева, 1982).

Расстояние между компонентами вычисляется по формуле:

$$r^3 = 4\pi^2 M_{N+S} \frac{\rho \rho_c}{\mu^2} |\sin(\theta - \psi)| \quad (4)$$

Расстояние до звезды в парсеках Δ получаем в результате решения биквадратного уравнения:

$$q\Delta^4 + b\Delta^2 + 1 = 0$$

где $q = \mu^2 \rho \sin^2(\theta - \psi) / k^2 r$, $b = -(\rho^2 / r^2) + \mu^2 r / k^2$, $k^2 = 4\pi^2 M_{N+S}$.

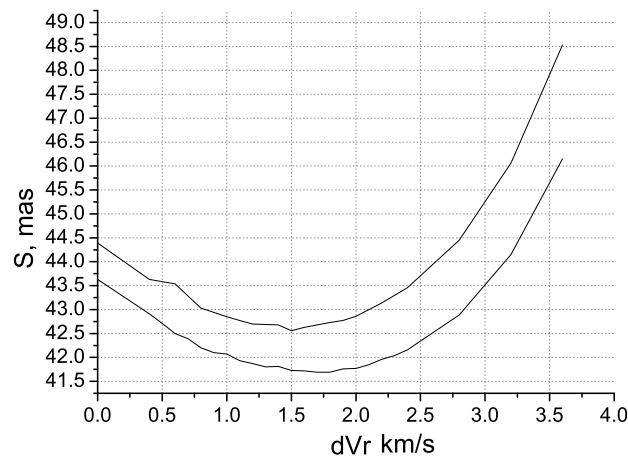


Рис. 2: Поиск $|\Delta V_r|$ для пары N–S по минимуму функции S при фиксированных массах системы $5.2M_\odot$ (нижняя кривая) и $4.9M_\odot$ (верхняя кривая).

Таблица 4: Определение массы компонента N

M_N, M_\odot	M_{S+N}, M_\odot	$r, \text{a.e.}$	$p_d, \text{мсд}$
1.7	4.2	109.4	7.24
1.8	4.3	110.2	7.19
1.9	4.4	111.1	7.13
2.0	4.5	111.9	7.09
2.1	4.6	112.7	7.06
2.2	4.7	113.5	6.98
2.3	4.8	114.3	6.93
2.4	4.9	115.1	6.89
2.5	5.0	115.9	6.84
2.6	5.1	116.7	6.80
2.7	5.2	117.4	6.75

Примечание: используется сравнение динамического параллакса p_d с тригонометрическим $p_t = 6.89 \pm 0.04$ мсд (Gaia DR3).

В работе (Кияева, 1982) показано, что из четырех корней данного уравнения только один удовлетворяет условию проекции $\rho\Delta \leq r$.

$$p_d = \frac{1}{\Delta} = \left(-\frac{b + \sqrt{b^2 - 4q}}{2q} \right)^{-0.5} \quad (5)$$

В табл. 4 представлены значения r и p_d для разных значений масс. Как видно из таблицы, динамический параллакс равен тригонометрическому из Gaia DR3 в пределах 3σ , если масса северного компонента $M_N = 2.4 \pm 0.2 M_\odot$, что немного превышает фотометрическую оценку $M_N \leq 2.2 M_\odot$ (Loiarnard и др., 2007).

С массой $M_{N+S} = 4.9M_\odot$ и подобранной лучевой скоростью $\Delta V_r = 1.5 \pm 0.8$ км/с (см. рис. 2) методом ПВД были получены новые элементы двух эллиптических орбит. Они представлены в табл. 5 и на рис. 3. Там же представлена круговая орбита.

Ошибки элементов ПВД-орбит определяются ошибками исходных данных, но ошибка суммарной массы не учитывается, так как она функционально связана с параллаксом. Ошибки несимметричны, поэтому мы приводим отклонения в отрицательную (Err-) и положительную (Err+) стороны относительно вычисленного решения. Ошибки эллиптических орбит определяются, в основном, большой ошибкой относительной лучевой скорости.

Таблица 5: Элементы ПВД-орбит внешней пары NS.

M_{N+S}, M_{\odot}	5.2	4.9	4.9		
$\Delta V_r, \text{ км/с}$	1.7 ± 0.8	-	1.5 ± 0.8		
$a, \text{ а.е.}$	110.1	115.1	110.1		
Err	$-5.3 + 9.7$	$-0.5 + 0.5$	$-4.8 + 9.3$		
$a, \text{ мсд}$	759	793	759		
Err	$-37 + 67$	$-4 + 4$	$-33 + 64$		
P, год	507	558	522		
Err	$-37 + 68$	$-4 + 5$	$-35 + 68$		
β°	+32	-32	+30.4	+30	-30
e	0.07	0.32	0.00	0.06	0.30
Err	$-.02 + .07$	$-.04 + .05$	-	$-.02 + .08$	$-.05 + .05$
$i,^{\circ}$	37.3	33.2	36.8	35.0	31.1
Err	$-2.7 + 3.1$	$-1.1 + 2.1$	$-0.8 + 0.7$	$-2.7 + 3.2$	$-1.1 + 2.1$
$\Omega,^{\circ}$	132.0	262.8	136.5	131.0	264.1
Err	$-9.7 + 7.9$	$-11.1 + 12.4$	$-0.6 + 0.7$	$-10.7 + 8.6$	$-12.1 + 13.5$
$\omega,^{\circ}$	232	42.3	-	203	37.3
Err	$-16 + 109$	$-2.0 + 2.7$	-	$-13 + 173$	$-3.3 + 2.2$
T, год	2248	2128	-	2207	2128
Err	$-150 + 160$	$-13 + 15$	-	$-257 + 15$	$-14 + 15$

Примечание: Для определения эллиптических орбит использовался параллакс из каталога Gaia DR3 (Gaia Collaboration, 2022), равный 6.89 ± 0.04 мсд.

Параметры Ω и ω определяются с точностью до 180° . Две эллиптические орбиты, полученные методом ПВД равновероятны, но, учитывая то, что звезды молодые, мы отдаем предпочтение орбите, близкой к круговой.

4 Устойчивость системы

Условие устойчивости тройной системы накладывает ограничение на отношение больших полуосей внешней пары N-S и внутренней Sa-Sb.

В работе (Kiyayeva и Zhuchkov, 2017) была вычислена вероятность распада тройной системы тремя методами, опубликованными в работах (Orlov и Zhuchkov, 2005; Aarset, 2003; Valtonen и др., 2008), а также с помощью численного моделирования. В результате мы получили, что система устойчива с вероятностью не менее 70%.

В данной работе мы упростили задачу и использовали критерий устойчивости из книги (Aarset, 2003) как один из наиболее надежных (см. Zhuchkov, Kiyayeva и Orlov, 2010). Тогда

$$\lambda_1 = a_{out}(1 - e_{out})^{1.2}(1 + e_{out})^{-0.4} > 2.8a_{in}(M_{N+S}/M_{Sa+Sb})^{0.4} = \lambda_2. \quad (6)$$

С учетом ошибок мы задаем значения $a_{out} = 0.7''$ и $e_{out} = 0.4$ в соответствии с их ошибками, которые обеспечивают минимальное значение $\lambda_1 = 0.331''$.

Если $M_{N+S} = 4.9 M_{\odot}$, то $\lambda_2 = 0.312''$; $\lambda_2 = \lambda_1$, если $M_{N+S} = 5.67 M_{\odot}$, что в данном случае маловероятно.

Таким образом, наше исследование показало, что в случае тройной системы эллиптическая орбита также устойчива.

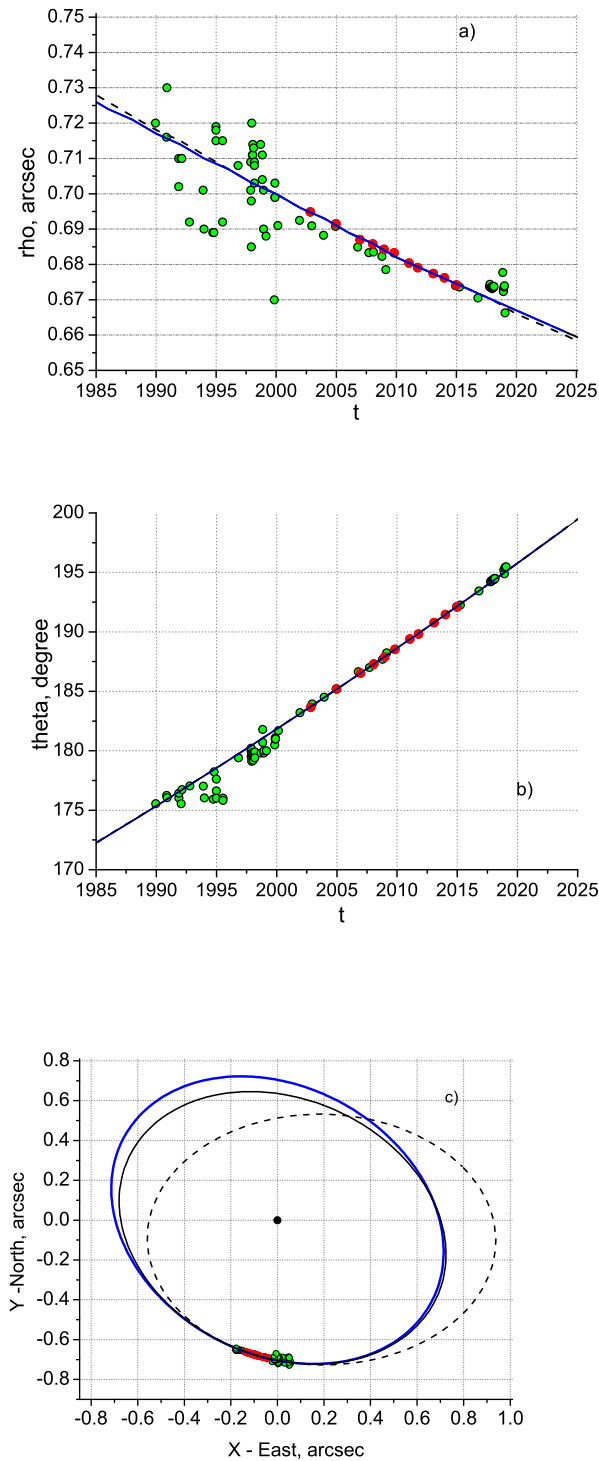


Рис. 3: Сравнение с наблюдениями круговой орбиты пары N–S (синяя линия) и двух орбит (черные линии — сплошная для $\beta = +30^\circ$, штриховая для $\beta = -30^\circ$) с массой $4.9 M_\odot$: а) - $\rho(t)$, б) - $\theta(t)$, в) - орбита в картинной плоскости. Обозначения: наблюдения пары N–Sab (центр масс) из WDS (Mason и др., 2016) — зеленые кружки, главная дуга, по которой вычислены ПВД — красные кружки. Главный компонент — черный кружок.

5 Заключение

Звезде Т Таугі посвящено огромное количество работ, анализирующих физические свойства компонентов, но очень мало работ, рассматривающих данную звезду с динамической точки зрения. Метод ПВД для определения орбит по коротким дугам позволяет это сделать.

В нашей работе мы подтвердили надежность метода ПВД на примере тесной пары Sa-Sb. Этим методом получена новая орбита внешней пары N-S с периодом 560 лет, которая определена уверенно и существенно отличается от орбит, полученных в работах (Köhler и др., 2016) и (Schaefer, Beck и др., 2020) с периодами 500-5000 лет. Сами авторы подтверждают, что их орбиты являются оценочными и указывают огромный диапазон значений для каждого элемента, куда, естественно, попадает и наше решение.

Полученная нами масса северного компонента $M_N = 2.4 M_\odot$ несколько завышена по сравнению с оценками распределения энергии $1.7 \leq M_N \leq 2.2$ (Loiuard и др., 2007). Возможно, у него есть еще не открытый маломассивный спутник. Возможно также, что это связано с особенностями, касающимися физических свойств молодых звезд, которые нами в данной работе не исследовались.

Мы также вычислили внешнюю орбиту с минимальной допустимой массой $M_N = 1.7 M_\odot$ ($M_{N+S} = 4.2 M_\odot$). Получили орбиту с периодом $P = 582$ года с максимальной ошибкой 100 лет. Это дает возможность ограничить орбитальный период $500 \leq P \leq 700$ лет. Данный результат является безусловно новым.

Массы компонентов данной тройной системы получены астрометрически двумя методами, причем результаты отличаются всего на $0.3 M_\odot$. В первом случае это удалось благодаря тому, что все три компонента наблюдались одновременно на одном телескопе. Мы предполагали, что система замкнута и центр масс неподвижен, но в результате получили, что центр масс колеблется относительно среднего положения. Во втором случае получить динамическую массу удалось благодаря тому, что при любой заданной массе одна из эллиптических орбит оказалась близка к круговой. Этот новый результат мы считаем главным в данном исследовании, а орбиту, близкую к круговой, наиболее вероятной.

В работе используются данные из CDS и каталога WDS. Авторы выражают благодарность создателям этих каталогов, а также наблюдателям на телескопах Keck и VLT.

Список литературы

- Schaefer, G. H., T. L. Beck, L. Prato и M. Simon (2020). *Orbital Motion, Variability, and Masses in the T Tauri Triple System*. AJ 160.1, 35.
- Kiyaeva, O. V. и R. Y. Zhuchkov (2017). *Dynamical investigations of the multiple stars*. Open Astronomy 26.1, 64-71.
- Kiselev, A. A. и O. V. Kiyaeva (1980). *The method of apparent motion parameters, used to determine the orbit elements of a visual double star on the basis of short arc observations*. AZh 57, 1227-1241.
- Schaefer, G. H., L. Prato, M. Simon и J. Patience (2014). *Orbital Motion in Pre-main Sequence Binaries*. AJ 147.6, 157.
- Köhler, R., M. Kasper, T. M. Herbst, T. Ratzka и G. H.-M. Bertrang (2016). *Orbits in the T Tauri triple system observed with SPHERE*. A&A 587, A35.
- Loinard, L., R. M. Torres, A. J. Mioduszewski, L. F. Rodriguez, R. A. González-Lópezlira, R. Lachaume, V. Vázquez и E. González (2007). *VLBA Determination of the Distance to Nearby Star-forming Regions. I. The Distance to T Tauri with 0.4% Accuracy*. ApJ 671.1, 546-554.
- Gaia Collaboration (2022). *VizieR Online Data Catalog: Gaia DR3 Part 1. Main source (Gaia Collaboration, 2022)*. VizieR Online Data Catalog, I/355.
- Mason, B., G. Wycoff, W. Hartkopf, G. Douglass и C. Worley (2016). *The Washington Visual Double Star Catalog*. Washington: US Naval Observatory, VizieR Online Data Catalog.
- Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti и et al (2018). *Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties*. A&A 616, A1.
- Esplin, T. L. и K. L. Luhman (2019). *A Survey for New Members of Taurus from Stellar to Planetary Masses*. AJ 158.2, 54.
- GRAVITY Collaboration, K. Perraut, L. Labadie, J. Bouvier и et al (2021). *The GRAVITY young stellar object survey. VII. The inner dusty disks of T Tauri stars*. A&A 655, A73.
- Nisenson, P., R. V. Stachnik, M. Karovska и R. Noyes (1985). *A new optical source associated with T Tauri*. ApJ 297, L17-L20.
- Maihara, T. и H. Kataza (1991). *A study of the spatially-resolved T Tauri system*. A&A 249, 392.
- Csépany, G., M. van den Ancker, P. Ábrahám, W. Brandner и F. Hormuth (2015). *Examining the T Tauri system with SPHERE*. A&A 578, L9.
- Kiyaeva, O. V. (1983). *Using old observations for correction of the visual double star orbit obtained from a short arc by the method of apparent motion parameters*. AZh 60, 1208-1216.
- Кияева, О. В. (1982). *Определение динамического параллакса и оценка угла наклона орбиты двойной звезды на основе наблюдений короткой дуги*. Известия ГАО в Пулкове 199, с. 13–18.
- Orlov, V. V. и R. Y. Zhuchkov (2005). *Analysis of the Dynamic Stability of Selected Multiple Stars with Weak Hierarchy*. Astronomy Reports 49.3, 201-216.
- Aarset, S. J. (2003). *Gravitational N-Body Simulations*. Под ред. U. C. U. P. Cambridge, с. 430.
- Valtonen, M., A. Myllari, V. Orlov и A. Rubinov (2008). *The problem of three stars: stability limit. In Dynamical Evolution of Dense Stellar Systems*. Под ред. I. S. 246, с. 209–217.
- Zhuchkov, R. Y., O. V. Kiyaeva и V. V. Orlov (2010). *Criteria for the stability of triple systems and their application to observations of multiple stars*. Astronomy Reports 54.1, 38-47.

The outer orbit of the triple star T Tauri

O.V. Kiyaveva¹, L.G. Romanenko¹

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Abstract

The T Tauri's triple system of young stars (WDS 04220+1932=Hip 20390) was discovered in 1983. Since that time, a lot of articles are devoted to the study of the physical properties of the stars of this system. Our work is dedicated to astrometric study of this triple system using the apparent motion parameters (AMP) method. The orbit of the inner pair $S_a S_b$ with a period of 27 years is now well known (Schaefer, Beck, et al., 2020). The total mass $M_{S_a+S_b} = 2.49 M_\odot$ if to use parallax from Gaia DR3 (Gaia Collaboration, 2022). Two orbits of the outer pair N-S are obtained on the basis of published high-precision homogeneous observations on the Keck 1 and VLT telescopes, and one of them is almost circular orbit. For a circular orbit, orbital elements and dynamic parallax can be calculated for a given mass using only apparent motion parameters. This is what made it possible to compare dynamic parallax with high-precision one from the Gaia DR3 catalog and to calculate the components masses depending on the mass of the internal subsystem: $M_N = 2.4 \pm 0.2 M_\odot$, $M_{S_a} = 2.09 \pm 0.05 M_\odot$, $M_{S_b} = 0.40 \pm 0.05 M_\odot$. Limits for the orbital period are also estimated: $500 \leq P \leq 700$ years.