

## ОРБИТЫ И СТРУКТУРА ЧЕТВЕРНЫХ СИСТЕМ GJ 225.1 И FIN 332

© 2020 г. А. А. Токовинин\*

*Cerro Tololo Inter-American Observatory/NSF's NOIRLab, Chile*

Поступила в редакцию 29.07.2020 г.

После доработки 29.07.2020 г.; принята к публикации 22.09.2020 г.

Известно лишь несколько четверных систем с точными визуальными орбитами внутренних пар. Архитектура двух таких систем исследуется в данной работе с целью определить отношения периодов, взаимную ориентацию орбит и другие параметры; приводятся уточненные элементы орбит и их ошибки. Система Gliese 225.1 (HIP 28442) содержит 3 звезды-карлика спектрального класса K и одну класса M, периоды внутренних пар  $67.2 \pm 0.2$  и  $23.4 \pm 0.5$  года. Взаимный наклон этих орбит невелик и, вероятно, они компланарны с внешней орбитой с периодом  $\sim 2$  тысячелетия. В состав четверной системы FIN 332 (HIP 92037) входят 4 звезды раннего спектрального класса A со схожими массами и звездными величинами. Обе внутренние орбиты с периодами  $27.6 \pm 0.2$  и  $39.8 \pm 0.4$  года обладают большими эксцентриситетами (0.82 и 0.84). Их ориентация на удивление схожа. Внешняя орбита с периодом  $\sim 5000$  лет, наоборот, имеет большой наклон относительно внутренних орбит. Обсуждаются динамика и формирование этих четверных систем.

*Ключевые слова:* двойные звезды, кратные звезды.

**DOI:** 10.31857/S0320010820090077

### ВВЕДЕНИЕ

Архитектура иерархических звездных систем отражает еще не до конца понятые механизмы их образования. Рассматриваемые здесь системы с иерархией типа  $2 + 2$  (т.е. две тесные пары, обращающиеся друг относительно друга) достаточно типичны. Статистика кратных звезд в окрестности Солнца свидетельствует о том, что наличие внутренних подсистем у обеих компонентов широкой двойной не независимо, а коррелировано, что указывает на их совместное происхождение (Токовинин, 2014). К тому же известные четверные системы типа  $2 + 2$  обнаруживают некоторую корреляцию между внутренними периодами и нередко все их компоненты имеют сходные массы (Токовинин, 2008). Неясно, однако, образовались ли четверные системы типа  $2 + 2$  в основном путем каскадной фрагментации газа сначала на большом, а затем более мелком масштабе (т.е. снаружи внутрь), изнутри наружу (внутренние подсистемы образовались сначала и затем объединились) или же совместно, например, при столкновении облаков газа (Уитворт, 2001).

Недавно Захе и др. (2019) исследовали большую выборку четверных систем типа  $2 + 2$ , в которых обе внутренние пары затменные (дважды затменные). В таких системах обе тесные пары имеют

большое наклонение, что возможно при компланарных орбитах, хотя и не служит доказательством компланарности. Еще удивительнее, что обнаружилось предпочтительные отношения внутренних периодов около 1 и 1.5 и дефицит отношения 2, что указывает на возможность некоего резонанса между внутренними орбитами. С учетом того, что внутренние периоды короткие, а внешние, вероятно, долгие, наличие динамического взаимодействия между внутренними орбитами, приводящего к резонансу, кажется маловероятным. Тремэйн (2020) взялся разрешить этот парадокс и выяснил условия, при которых подобные резонансы могут иметь место. Оказалось, что для объяснения резонансов, обнаруженных Захе и др. (2019), необходимы, по видимому, существенная миграция внутренних пар в сторону уменьшения периодов и не слишком большое расстояние между ними.

Эти открытия побудили меня рассмотреть более широкие четверные типа  $2 + 2$ , где известны визуальные орбиты обеих внутренних подсистем. Наряду с отношением периодов взаимная ориентация внутренних орбит и другие параметры могут пролить свет на механизмы их образования. Прототипом таких четверных систем служит  $\epsilon$  Луг, содержащая четыре схожих звезды класса A. Однако долгие периоды ее внутренних подсистем (1800 лет и 724 года) препятствуют определению точных орбит ввиду недостаточного их покрытия. Случай,

\*Электронный адрес: atokovin@ctio.noao.edu

Таблица 1. Элементы орбит

Система	$P$ , год	$T$ , год	$e$	$a$ , ''	$\Omega$ , °	$\omega$ , °	$i$ , °	$\Sigma M$ , $M_{\odot}$	$K_1 + K_2$ , $\text{км с}^{-1}$
GJ 225.1 A,B	67.22 $\pm 0.19$	1998.08 $\pm 0.21$	0.462 $\pm 0.018$	0.953 $\pm 0.017$	126.2 $\pm 0.2$	282.9 $\pm 0.4$	101.9 $\pm 0.3$	1.14 $\pm 0.01$	6.1 ...
GJ 225.1 C,E	23.38 $\pm 0.54$	2015.44 $\pm 0.13$	0.216 $\pm 0.013$	0.433 $\pm 0.007$	146.8 $\pm 0.2$	178.6 $\pm 2.2$	98.4 $\pm 0.2$	0.90 $\pm 0.01$	10.9 ...
GJ 225.1 AB,CE	2100	1934.0	0.200	11.40	147.6	85.1	100.2	2.06	3.0
FIN 332 Aa,Ab	27.62 $\pm 0.16$	1994.00 $\pm 0.23$	0.820 $\pm 0.012$	0.0911 $\pm 0.0009$	136.0 $\pm 1.2$	4.6 $\pm 4.1$	107.9 $\pm 1.2$	4.66 $\pm 0.14$	5.2 ...
FIN 332 Ba,Bb	39.76 $\pm 0.37$	2005.09 $\pm 0.33$	0.843 $\pm 0.020$	0.120 $\pm 0.008$	119.3 $\pm 1.5$	305.9 $\pm 4.1$	106.9 $\pm 1.6$	5.1 $\pm 1.0$	3.9 ...
STF 2375 A,B	5000	557	0.5	3.64	167.5	143.4	64.5	8.9	...

когда обе внутренние орбиты хорошо обусловлены наблюдениями, редки; их известно всего около дюжины. Здесь рассматриваются две подобные четверные системы типа  $2 + 2$  с точными внутренними орбитами: GJ 225.1 и FIN 332. Их орбиты, известные ранее, уточнены с использованием последних наблюдений, а свойства звезд определены с учетом параллакса Gaia (Гайа, 2018).

### GLIESE 225.1

Классическая визуально-тройная система NJ 3823 AB и AB,C (WDS J06003–3102, HIP 28442, HD 40887, GJ 225.1) превратилась в четверную типа  $2 + 2$ , когда в 2004 г. Токовинин и др. (2005) обнаружили слабый спутник у звезды С на инфракрасных изображениях, полученных с адаптивной оптикой. Первоначально 23-летний период этой новой подсистемы С,Е был определен по астрометрическим возмущениям (волне) в движении внешней пары АВ,С. Теперь, спустя 15 лет, орбита С,Е имеет хорошее покрытие спекл-интерферометрическими наблюдениями на телескопе SOAR (см. Токовинин и др., 2020, и приведенные там ссылки), поэтому можно вычислить ее точные элементы. Орбита пары А,В, хорошо известная уже по историческим микрометрическим измерениям, тоже уточняется современной спекл-интерферометрией.

Во втором релизе Gaia (Гайа, 2018) астрометрические параметры А и С определены так, как будто это одиночные звезды. В эпоху 2015.5 (после точки здесь и далее — доля года) угловое расстояние между А и В составляло  $0.58''$ , поэтому Gaia дает астрометрические параметры этой неразделенной пары с большими ошибками, например, параллакс

$53.97 \pm 0.42$  мсд (миллисекунд дуги). Звезда С, также неразделенная Gaia, обладает спутником с большой разностью блеска, а движение этой пары в 2015.5 было медленным (она была близка к элонгации), поэтому ее астрометрия в Gaia более надежна. Параллакс С,  $54.82 \pm 0.08$  мсд, принят в качестве меры расстояния до системы ( $18.24$  пк, модуль  $1.30$  зв. вел.)

### Орбиты GJ 225.1

Уточненные элементы орбит двух внутренних подсистем GJ 225.1, А,В и С,Е, а также предварительная внешняя орбита АВ,СЕ приведены в табл. 1. Орбитальные элементы и их ошибки определены методом наименьших квадратов с весами, обратно пропорциональными квадратам принятых здесь ошибок измерений (Токовинин, 2016). Оценки ошибок элементов подтверждены путем обработки искусственно возмущенных данных. Эта процедура также дает относительную ошибку величины  $a^3/P^2$ , определяющей сумму масс, с учетом корреляции между  $a$  и  $P$ .

Графики внутренних орбит приведены на рис. 1. Обе они имеют обратное движение (по часовой стрелке) и ориентированы подобным образом. В двух последних столбцах табл. 1 содержатся сумма масс, вычисленная для параллакса  $54.82$  мсд, и полная амплитуда вариации лучевой скорости  $K_1 + K_2$ , соответствующая орбитам и оцененным ниже массам. Фактор  $a^3/P^2$  измерен для А,В и С,Е с относительными ошибками  $0.056$  и  $0.007$ ; полное покрытие орбиты А,В визуальными наблюдениями дает меньше информации о массе, чем все еще неполные, но более точные наблюдения С,Е. Ошибка параллакса Gaia дает вклад  $0.0044$

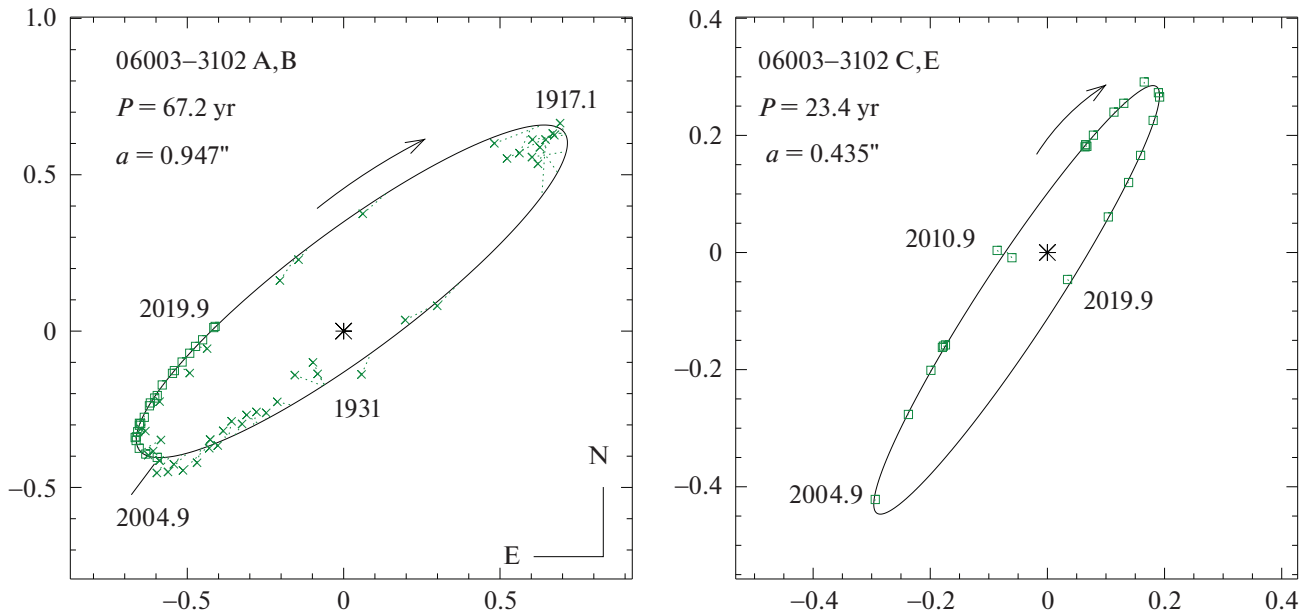


Рис. 1. Орбиты внутренних подсистем GJ 225.1. На этом и последующих рисунках главный компонент помещается в начале координат. Эллипс показывает орбиту, масштаб в секундах дуги. Точные спекл-интерферометрические измерения обозначены квадратами и соединены с соответствующими положениями на орбите пунктирными линиями. Менее точные (в основном старые микрометрические) измерения обозначены крестами.

в относительную ошибку суммы масс. Сами суммы масс равны  $1.16 \pm 0.06 M_{\odot}$  для А,В и  $0.900 \pm 0.008 M_{\odot}$  для С,Е. Соответственно сумма масс всей системы  $2.06 M_{\odot}$ .

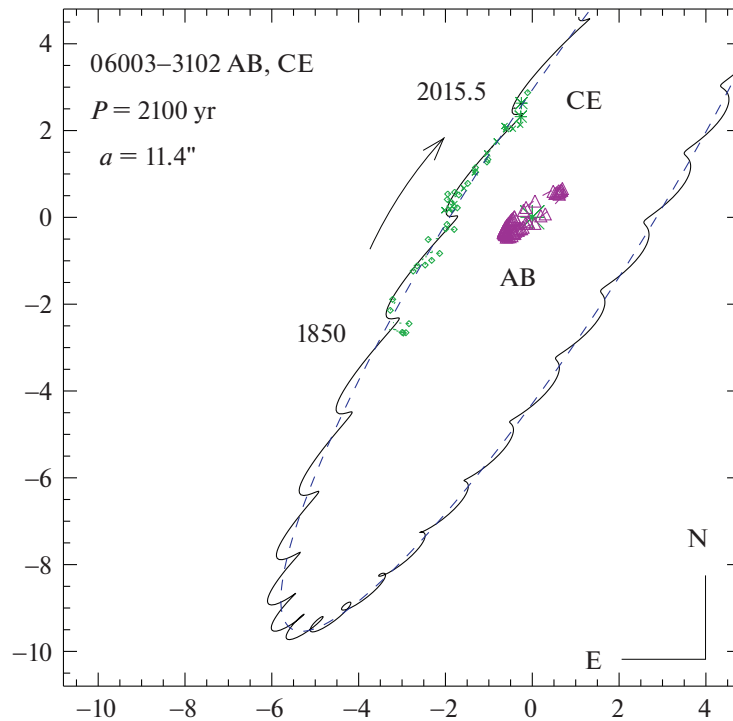
За время с 1850 по 2015.5 г. внешняя пара АВ,СЕ повернулась на  $129.2^{\circ}$  (рис. 2); последнее измерение сделано Gaia. Точные измерения относительных положений имеются только начиная с 2004 г., а остальные менее точные микрометрические измерения извлечены из Вашингтонской базы данных визуально-двойных звезд, WDS (Мэйсон и др., 2001). Внешняя пара движется почти прямолинейно, и ее орбита плохо определена. Орбита с периодом 391 год, вычисленная Бэзом (1980), недействительна. Я зафиксировал эксцентриситет, а при последующем уточнении также период и большую полуось так, чтобы получилась правильная сумма масс:  $2.06 M_{\odot}$ . Элементы внешней орбиты, приведенные в табл. 1, выбраны субъективно из множества возможных орбит, соответствующих короткой наблюдаемой дуге, и по этой причине их ошибки не даны. Внешняя орбита нужна лишь в качестве опорной для измерения отношений масс во внутренних парах.

Некоторые измерения положений внешней пары относятся к А,С, а остальные соответствуют АВ,С, т.е. фотоцентру неразделенной пары А,В. Все положения подвержены влиянию орбитальных движений в обеих подсистемах, и соответствующие возмущения содержат информацию об отношениях масс. Амплитуда отклонений пропорциональна

полуоси внутренней орбиты с коэффициентом  $f = q/(1+q)$  для измерений, относящихся к А,С. Амплитуда отклонений фотоцентра меньше, ее коэффициент  $f_{\alpha} = f - r/(1+r)$ , где  $r$  — отношение светимостей во внутренней паре.

Для того чтобы измерить отношения масс, я вычел из положений внешней пары малые отклонения, обусловленные подсистемой С,Е, и определил амплитуду отклонений, вызванных только подсистемой А,В (волнистая линия на рис. 2). Получилось  $f_{A,B} = 0.47 \pm 0.02$ , что соответствует отношению масс  $q_{A,B} = 0.89$ . Оно слегка расходится с фотометрической оценкой  $q_{A,B} = 0.84$ , принятой далее. Соответствующая амплитуда отклонений  $f_{A,B} = q_{A,B}/(1+q_{A,B}) = 0.45$  не противоречит измеренной.

Описанная процедура была повторена с вычитанием отклонений А,В, чтобы определить отношение масс подсистемы С,Е. Поскольку компонент Е слабый,  $f \approx f_{\alpha}$ . В результате получено  $f_{C,E} = 0.24 \pm 0.04$ , следовательно,  $q_{C,E} = 0.32$ . Отношения масс и их измеренные суммы определяются массы всех четырех звезд (табл. 2). Измеренное Gaia движение СЕ относительно АВ я сравнил с движением, ожидаемым при учете всех трех орбит. Согласие не такое хорошее, как можно было бы надеяться, вероятно, по той причине, что неразделенная подсистема серьезно искажает астрометрические параметры компонента А. К сожалению, данные Gaia не помогают в определении внешней орбиты.



**Рис. 2.** Предварительная орбита GJ 225.1 AB,CE. Колебания, обусловленные подсистемой С,Е, вычтены. Волнистая линия отображает движение С относительно А, подверженное колебаниям из-за внутренней орбиты А,В, которая показана в центре в том же масштабе. Штриховая линия — движение центра масс без учета колебаний.

В 2008.86 г. Токовинин и др. (2015а) измерили лучевые скорости неразделенных компонент АВ и СЕ, оказавшиеся равными 106.5 км/с. Однако амплитуды лучевых скоростей в обеих внутренних орбитах существенно превышают ошибки измерений, составляющие  $\sim 0.5$  км/с, так что измеренные скорости не соответствуют движению центров масс. Линии в спектре АВ имели немного асимметричные профили, указывающие на то, что лучевая скорость более яркого компонента А была больше скорости В (предсказанная разность скоростей составляла 5.7 км/с). Из этого следует, что элемент орбиты  $\omega_{A,B}$ , приведенный в табл. 1, относится к восходящему узлу звезды А. К сожалению, истинный восходящий узел орбиты С,Е остается неопределенным. Его легко установить, если проследить за лучевой скоростью компонента С в течение нескольких лет, поскольку ее ампли-

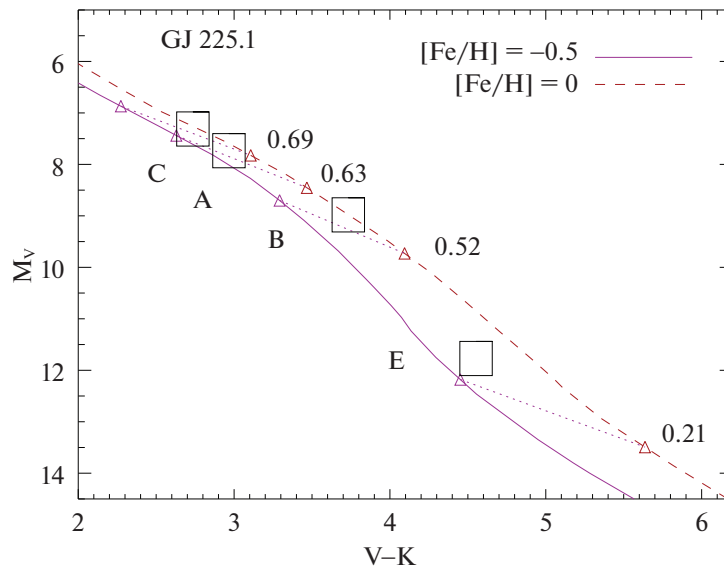
туда 2.5 км/с. Спектральная орбита С,Е также позволила бы точно измерить массу звезды Е.

Поскольку истинный восходящий узел орбиты С,Е не установлен, взаимное наклонение  $\Phi$  между орбитами А,В и С,Е (т.е. угол между векторами орбитальных угловых моментов) может принимать два значения:  $20.6^\circ$  или  $149.8^\circ$ . Меньшее из них, отвечающее вращению в одну сторону, представляется более вероятным. Что касается наклонений внутренних орбит к неуверенной внешней орбите, то они равны  $20.4^\circ$  и  $2.0^\circ$  для А,В и С,Е соответственно; альтернативные значения наклонений  $151.2^\circ$  и  $149.8^\circ$ . Возможно, все три орбиты ориентированы примерно в одной плоскости. При наклонении более  $39^\circ$  имеют место циклы Козая—Лидова, модулирующие как наклонения, так и эксцентриситеты внутренних орбит (Наоз, 2016). Умеренные значения внутренних эксцентриситетов свидетельствуют в пользу примерной компланарности внешних и внутренних орбит в этой системе.

Несмотря на то что в настоящее время расстояние между АВ и СЕ сравнимо с размерами внутренних орбит, что указывает на возможность динамического взаимодействия и даже неустойчивости, наблюдаемое относительное движение широкой пары соответствует минимальному расстоянию в периастре  $a(1-e) = 9''$ , существенно больше порога нестабильности в  $\sim 3''$ , согласно критерию

**Таблица 2.** Параметры компонентов GJ 225.1

Параметр	А	В	С	Е
$V$ , mag	9.04	10.29	8.62	13.08
$V - K$ , mag	2.97	3.73	2.73	4.55
$M (M_\odot)$	0.63	0.52	0.69	0.21



**Рис. 3.** Положение компонентов GJ 225.1 на диаграмме цвет—звездная величина. Линии — изохроны PARSEC (Брессан и др., 2012) для возраста 1 Суг и двух значений металличности. Малые треугольники, соединенные пунктирными линиями, показывают измеренные массы компонентов (числа курсивом) на обеих изохронах. Компоненты С, А, В, Е (сверху вниз) обозначены квадратами.

устойчивости Мардлинг, Аарсет (2001). Эта иерархическая система, очевидно, немолода и динамически стабильна. Отношение внутренних периодов равно  $2.87 \pm 0.07$ .

#### Фотометрия и массы GJ 225.1

Токовинин и др. (2005) измерили звездные величины компонент в инфракрасных полосах от  $J$  до  $L$  по изображениям, где они разрешены. Спутник Gaia измерил суммарные величины АВ и СЕ в полосе  $V$ , равные 8.74 и 8.60 (СЕ немного ярче). Относительная фотометрия на SOAR в полосе  $u$  дает разности звездных величин в парах А,В и С,Е, равные 1.25 и 4.46 зв. вел. соответственно со среднеквадратичным разбросом 0.16 и 0.07 зв. вел. Допуская, что  $\Delta u = \Delta V$ , вычисляем величины всех четырех звезд, приведенные в табл. 2 наряду с их показателями цвета  $V - K$ . Звезда С — самая яркая и массивная.

Положение компонент на диаграмме цвет—звездная величина сравнивается на рис. 3 с изохронами из работы Брессана и др. (2012). Эти звездочки еще не проэволюционировали. Параметры компонент С, А и В соответствуют нормальным карликам с массами, равными измеренным, и небольшим дефицитом металлов по сравнению с Солнцем:  $[Fe/H] \approx -0.25$  dex. Самая маломассивная звезда Е выглядит голубее и ярче, чем должна быть. Вероятно, это различие объясняется несовершенством изохрон для столь маломассивных звезд. Токовинин и др. (2005) отметили аномально голубой показатель цвета  $J - K$  звезды Е.

Быстрое собственное движение и большая лучевая скорость означают, что эта система относится к населению толстого галактического диска. С учетом всех орбит собственное движение центра массы должно составить  $(-461.8, +415.9)$  мсд в год. Привлекая параллакс и лучевую скорость, получаем гелиоцентрическую скорость  $(U, V, W) = (-86.5, -47.2, -67.3)$  км/с.

#### FINSEN 332

Вторая из рассматриваемых здесь разделенных четверных систем известна как WDS J18455+0530, ADS 11640 или FIN 332. Другие ее идентификаторы HIP 92027, HD 173495, HR 7048. Внешняя пара А,В (STF 2375AB) с расстоянием  $2.5''$ , открытая В. Струве в 1825 г., представляет собой две похожие звезды спектрального класса А1V, каждая из которых сама является тесной двойной. В. Финзен открыл подсистемы в 1953 г. с помощью окулярного интерферометра и назвал их “Твиддум и Твидди” по причине схожести. Богатая и местами противоречивая история наблюдений “Твидлов” изложена в статье Мэйсона и др. (2010). Примечательно, что эта основополагающая работа не числится в SIMBAD среди литературы по данному объекту.

Параллаксы, измеренные Gaia, равны  $4.69 \pm 0.47$  мсд для А и  $5.48 \pm 0.30$  мсд для В. Оба измерения неточные ввиду двойственности звезд. Я принимаю здесь динамический параллакс, равный 6 мсд. Индивидуальные звездные величины компонент в табл. 3 определены исходя из  $V$ -величин

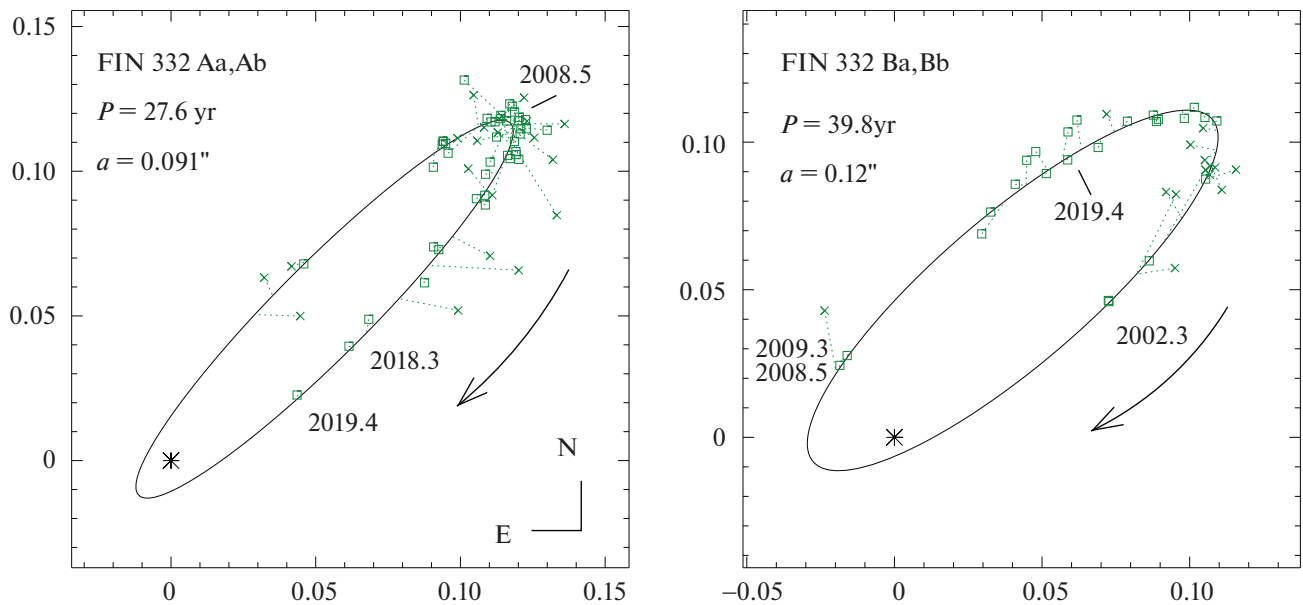


Рис. 4. Орбиты внутренних подсистем Aa, Ab и Ba, Bb в FIN 332.

A и B, измеренных Gaia (6.41 и 6.72), и разностей величин тесных пар  $\Delta y$ , измеренных на SOAR (0.4 и 0.0 для Aa, Ab и Ba, Bb соответственно). Эффективные температуры A и B, измеренные Gaia, равны 9613 и 9169 K и соответствуют спектральным классам A0V и A1V. Массы, оцененные по абсолютным величинам (предполагая отсутствие экстинкции), лежат в интервале от  $2.14 M_{\odot}$  для Ba и Bb до  $2.46 M_{\odot}$  для Aa и соответствуют массам звезд этих спектральных классов. Суммарный показатель цвета всех четырех звезд  $V - K = 0.17$  отвечает спектральному классу A2, а истинные спектральные классы предполагают  $V - K \sim 0.1$ . Следовательно, межзвездное поглощение действительно пренебрежимо мало.

#### Орбиты FIN 332

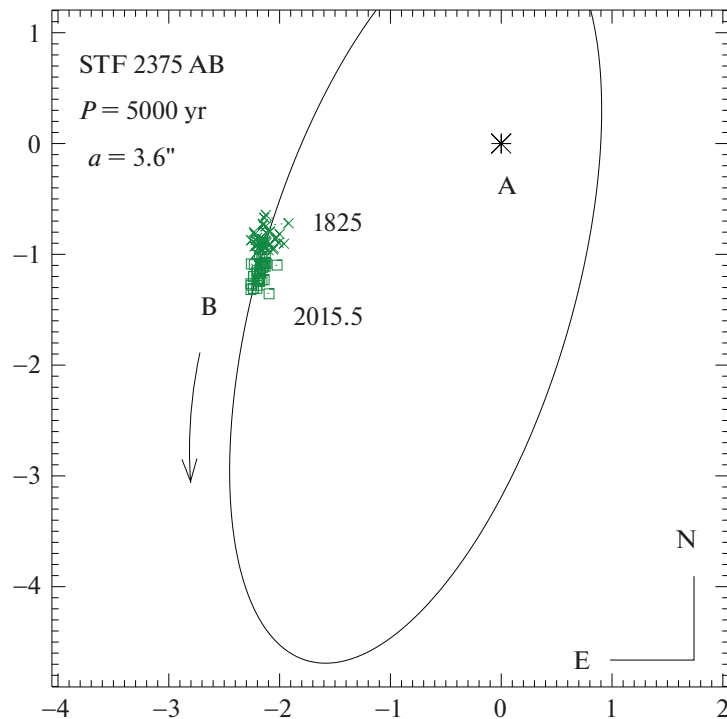
Первые надежные орбиты подсистем Aa, Ab и Ba, Bb с периодами 27.02 и 38.6 года, соответственно, были вычислены Мэйсоном и др. (2010) после критического пересмотра и коррекции имеющихся наблюдений. Они использовали только спекл-интерферометрические измерения и не приняли во внимание старые визуальные данные и интерферометрические наблюдения автора на 1-м телескопе

Таблица 3. Параметры компонентов FIN 332

Параметр	Aa	Ab	Ba	Bb
$V$ , mag	6.98	7.38	7.47	7.47
$M (M_{\odot})$	2.46	2.20	2.14	2.14

(см., например, Токовинин, 1982). Новые измерения были с тех пор сделаны на 6-м телескопе (Балега и др., 2013), и эта система также наблюдалась на SOAR. Позже Мэйсон (2018) уточнил орбиты (новые периоды 27.74 и 39.92 года). Приведенные в табл. 1 элементы (рис. 4) мало от них отличаются. Однако Мэйсон не привел ошибок, поэтому пришлось перевычислить орбиты заново.

При уточнении орбит наименьшие ошибки в 2 мсд (и наибольшие веса) приписаны спекл-интерферометрическим измерениям на SOAR и на 6-м телескопе. Ошибки спекл-интерферометрии на других 4-м телескопах приняты равными 5 мсд и еще больше для меньших телескопов. Интерферометрия Финзена использована с малым весом (ошибки 30 мсд) для уточнения периодов орбит, а микрометрические данные не учитываются вообще. Промежуток времени с 1953.7 по 2019.4 г., охваченный наблюдениями, покрывает 2.4 периода подсистемы Aa, Ab и 1.7 периода Ba, Bb. Добавлено измерение Ba, Bb на SOAR в 2009.26 г. (в оригинальной публикации значит как неразделенная), а измерение 2008.55 г. переобработано. Взвешенные среднеквадратичные отклонения от орбит равны 3 мсд для Aa, Ab и 2 мсд для Ba, Bb. Отметим, что, несмотря на аналогичные исходные данные, ошибка большой полуоси у Ba, Bb в 10 раз больше, чем у Aa, Ab. Причина в сильно коррелированных элементах  $T$ ,  $e$ ,  $a$ ,  $\omega$ ,  $i$  орбиты Ba, Bb. Трудно что-либо улучшить, потому что в настоящее время Ba, Bb находится далеко от периастра. Ее прохождение через периастр в 2005 г. не было охвачено наблюдениями, а следующее произойдет только в 2045 г. Напротив, пара Aa, Ab в настоящее время



**Рис. 5.** Условная внешняя орбита STF 2375 AB. Лишь небольшая дуга охвачена наблюдениями с момента открытия этой пары в 1825 г. Элементы орбиты приведены в табл. 1.

сближается (периастр в 2021.6 г.), и ее регулярные наблюдения вскоре позволят дальнейшее уточнение орбиты.

Орбита Aa,Ab и оценки масс дают динамический параллакс 6.0 мсд, а менее уверенная орбита Ba,Bb соответствует динамическому параллаксу 6.4 мсд. Если зафиксировать элемент  $\omega$  орбиты Ba,Bb на значении  $310^\circ$  (отличие от наилучшего решения всего на одно стандартное отклонение), то большая полуось Ba,Bb возрастет до  $0.113''$  и динамический параллакс станет равен 6.0 мсд. Навязанное значение  $\omega$  не влияет на период. Отношение внутренних периодов у этой четверной системы равно  $1.44 \pm 0.02$ .

Внешний период, оцененный по расстоянию между A и B ( $2.6''$  или 433 а.е.), составляет примерно 3000 лет. Позиционный угол A,B увеличился со  $108^\circ$  в момент ее открытия в 1825 г. до  $120^\circ$  сейчас. Примечательно, что внешняя пара имеет прямое обращение, а обе внутренние орбиты — обратное. Условная внешняя орбита с периодом 5000 лет изображена на рис. 5.

### Архитектура FIN 332

FIN 332 представляет собой типичную четверную систему типа 2 + 2, подобную  $\epsilon$  Луг (Токовинин, 2008). Массы и светимости всех четырех звезд

сравнимы между собой, а значит, они не были случайно выбраны из некоторого распределения масс. Как и во многих других четверных системах типа 2 + 2, внутренние периоды сопоставимы. Наибольшее внимания заслуживает то обстоятельство, что внутренние орбиты сходно ориентированы на небе (рис. 4), имеют одинаково большие эксцентриситеты и схожую ориентацию линий апсид. Взаимное наклонение между орбитами Aa,Ab и Ba,Bb равно  $16.1^\circ$  или  $141.5^\circ$  (узлы их орбит неоднозначны).

Относительный наклон внутренних подсистем к грубой внешней орбите составляет либо  $56\text{--}60^\circ$ , либо  $135\text{--}150^\circ$ . Эти значения ориентировочны, так как орбита A,B неопределенна. Однако приближительная компланарность внешней и внутренних орбит исключена ввиду противоположного направления их видимого обращения. Большой взаимный наклон порождает циклы Козая—Лидова, которые способны увеличить внутренние эксцентриситеты. Они и в самом деле велики у обеих внутренних орбит.

Компоненты в этой системе обладают быстрым осевым вращением  $\sim 150$  км/с, характерным для звезд ранних A-классов, так что вряд ли удастся определить спектральные орбиты. Согласно Гончарову (2006), средняя лучевая скорость равна  $-19.2 \pm 0.9$  км/с. Измеренные Gaia собственные движения могут быть искажены движениями в подсистемах. В меньшей степени это

относится к звезде В с одинаковыми компонентами. С одной стороны, ее собственное движение, измеренное Gaia и скорректированное за орбиту А,В (В движется относительно А со скоростью  $(+0.8, -3.2)$  мсд в год), дает собственное движение центра масс, равное  $(16.4, 0.6)$  мсд в год. С другой стороны, среднее собственное движение компонента А, вычисленное по его положениям в каталогах Gaia и Hipparcos, равно  $(+16.2, +1.6)$  мсд в год и соответствует скорости центра масс всей системы  $(15.8, 0.0)$  мсд в год. Обе оценки собственного движения центра масс согласуются. Их среднее значение, лучевая скорость и динамический параллакс 6 мсд дают Галактическую скорость  $(U, V, W) = (-18.3, -6.3, -12.4)$  км/с. Она соответствует молодому населению диска, но не связана с известными кинематическими группами.

## ИТОГИ И ДИСКУССИЯ

Эта работа стимулирована открытыми Захе и др. (2019) возможными резонансами между внутренними парами в дважды затменных системах. Точность определения внутренних периодов в двух исследованных здесь иерархических системах достаточна для доказательства того, что их отношения измеримо отличаются от рациональных чисел:  $2.87 \pm 0.07$  и  $1.44 \pm 0.02$ . Однако отношения периодов в резонансных многопланетных системах и дважды затменных двойных тоже отличаются от точных рациональных чисел на 1–2%, причем подобные отличия ожидаются в теории (Тремэйн, 2020). Отметим, что проведенный Тремэйном анализ тесных двойных на круговых орбитах неприменим напрямую к нашим четверным системам с эксцентричными орбитами.

Условные внешние орбиты позволяют оценить отношение внутренних и внешних полуосей, от которого зависит степень динамического взаимодействия между внутренними и внешними орбитами:  $\epsilon = \max(a_1, a_2)/a_3$ . В системах GJ 225.1 и FIN 332 этот параметр равен 0.08 и 0.03 соответственно. Следовательно, нельзя пренебрегать взаимодействием между внутренними и внешними орбитами. Динамический анализ этих систем выходит за рамки данной работы, посвященной систематизации наблюдательных данных об орбитах и массах.

Приведем соображения относительно возможных механизмов образования этих иерархических систем. Их строение далеко не случайно: ориентация орбит как-то согласована, а массы компонент в каждой системе сравнимы (кроме GJ 225.1 E). Маловероятно, что эти системы испытывали сильные внутренние или внешние (в скоплении) динамические взаимодействия. Кратные системы, пережившие динамический хаос, имеют другие характеристики: случайно ориентированные и эксцентричные

орбиты и не столь коррелированные массы (Штерцик, Токовинин, 2002)..

Схожесть масс подсказывает, что компоненты этих иерархических систем аккрецировали газ из общего источника. Скорее всего, они образовались в относительной изоляции при коллапсе плотной структуры (ядра или волокна). Этот сценарий был предложен для объяснения широких иерархических систем, состоящих из звезд солнечного типа (Токовинин, 2020); их широкие внешние орбиты подразумевают отсутствие близкого соседства с другими звездами. Современные гидродинамические модели коллапса изолированных облаков показывают последовательное образование прото звезд, миграцию двойных в сторону уменьшения периодов под действием аккреции и образование внешних компонент, которые, в свою очередь, аккрецируют газ и мигрируют внутрь (Ли и др., 2019; Куффмайер и др., 2019).

Миграция, обусловленная аккрецией, объясняет образование тесных (спектральных) двойных (Токовинин, Мо, 2020). В этой связи важно отметить, что некоторые иерархические системы типа  $2 + 2$  содержат тесные внутренние подсистемы. К примеру, широкая система ADS 9716 (HIP 76563/76566, внешнее расстояние в проекции 1600 а.е.) с иерархией типа  $2 + 2$  содержит внутренние спектральные подсистемы с периодами 3.3 и 14.3 сут и насчитывает в общей сложности 6 звезд (Токовинин, 1998). Наличие тесных подсистем — это серьезный, хоть и косвенный, аргумент в пользу эволюции иерархических систем под действием аккреции.

Последовательное образование компонентов в процессе коллапса изолированного облака и их миграция внутрь соответствуют архитектуре компактных планетоподобных иерархических систем, где все орбиты примерно компланарны, их эксцентриситеты невелики, а отношения периодов умеренные, как, например, в четверной системе типа  $3 + 1$  HD 91962 (Токовинин и др., 2015b). Такая архитектура типична для маломассивных иерархических систем (Токовинин, 2018). Она соответствует строению GJ 225.1, за исключением того обстоятельства, что это иерархия типа  $2 + 2$ . Ее маломассивный компонент E мог образоваться за счет фрагментации диска; массивный и неустойчивый диск вокруг звезды С мог быть результатом позднего всплеска аккреции, когда основная масса газа уже была поглощена тремя первыми звездами А,В и С. Этот сценарий объясняет малое отношение масс у пары С,Е. Он мог работать и для других иерархий, содержащих внутренние подсистемы с малыми отношениями масс, например, для  $\alpha$  Gem (HIP 36850) — визуальной пары, где каждая звезда представляет собой спектрально-двойную с одиночными линиями.



Более массивная четверная система FIN 332 (“Твидлы”) имеет иное строение: ее внутренние и внешние орбиты заведомо ориентированы по-разному, хотя согласованная ориентация внутренних орбит не исключена. Статистика показывает отсутствие согласованной ориентации внутренних орбит в разделенных четверных системах с иерархией типа  $2 + 2$ , как можно заключить из сравнимого числа систем с одинаковым и противоположным видимым обращением внутренних пар. В этом смысле FIN 332 нетипична. Сходство ориентации и эксцентриситетов ее внутренних орбит удивительно. Гипотетически такие четверные системы, напоминающие  $\epsilon$  Луг, могли бы образоваться при иерархическом коллапсе снаружи внутрь, быть может стимулированным столкновением облаков газа (Уитворт, 2001). Однако сходство масс компонентов таких четверных систем все-таки указывает на аккрецию газа из общего источника. Аккреция способствует уменьшению изначально широких (порядка радиуса Джинса?) звездных систем до их современных размеров. В общем случае более широкие и массивные иерархические системы ориентированы менее согласованно по сравнению с более тесными и менее массивными (Токовинин, 2017).

Детальное исследование двух рассмотренных здесь иерархических систем оказалось возможно благодаря удачному соответствию их параметров (разделений, отношений масс, расстояний) современным и прошлым наблюдательным возможностям и наличию достаточного покрытия по времени. Продолжающийся мониторинг других иерархических систем и данные больших обзоров обеспечат материал для исследования их динамики и происхождения.

Работа автора поддержана NOIRLab, управляемой Ассоциацией университетов для астрономических исследований (AURA) по соглашению с Национальным научным фондом США.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балегга и др. (I.I. Balega, Yu.Yu. Balega, L.T. Gasanova, V.V. Dyachenko, A.F. Maksimov, E.V. Malogolovets, D.A. Rastegaev, and Z.U. Shkhagosheva), *Astrophys. Bull.* **68**, 53 (2013).
2. Брессан и др. (A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, B. Salasnich, C. Dal Cero, S. Rubele, and A. Nanni), *MNRAS* **427**, 127 (2012).
3. Бэз (P. Baize), *Inform. Circ. IAU Comm.* **26**, **80**, 1 (1980).
4. Гайа (Gaia Collaboration, A.G.D. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, 2 (2018).
5. Гончаров (G.A. Gontcharov), *Astron. Lett.* **32**, 759 (2006).
6. Захе и др. (P. Zasche, D. Vokrouhlický, M. Wolf, H. Kucakova, J. Kara, R. Uhlar, M. Masek, Z. Henzl, and P. Cagas), *Astron. Astrophys.* **630**, 128 (2019).
7. Куффмайер и др. (M. Kuffmeier, H. Calcutt, and L.E. Kirstensen), *Astron. Astrophys.* **628**, 112 (2019).
8. Ли и др. (A.T. Lee, S. Offner, K. Kratter, R.A. Smullen, and P. Sh. Li), *Astron. J.* **887**, 232 (2019).
9. Мардлинг, Аарсет (R.A. Mardling and S.J. Aarseth), *MNRAS* **321**, 398 (2001).
10. Мэйсон (B.D. Mason), *Inform. Circ.* **196**, 3 (2018).
11. Мэйсон и др. (B.D. Mason, G.L. Wycoff, W.I. Hartkopf, G.G. Douglass, and Ch.E. Worley), *Astron. J.* **122**, 3466 (2001).
12. Мэйсон и др. (B.D. Mason, W.I. Hartkopf, and H.A. McAlister), *Astron. J.* **140**, 242 (2010).
13. Наоз (S. Naoz), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 441 (2016).
14. Токовинин А.А., Письма в Астрон. журн. **8** (1982) [A.A. Tokovinin, *Astron. Lett.* **8**, 99 (1982)].
15. Токовинин А.А., Письма в Астрон. журн. **24** (1998) [A.A. Tokovinin, *Astron. Lett.* **24**, 795 (1998)].
16. Токовинин и др. (A. Tokovinin, O. Kiyeva, M. Sterzik, V. Orlov, A. Rubinov, and R. Zhuchkov), *Astron. Astrophys.* **441**, 695 (2005).
17. Токовинин (A. Tokovinin), *MNRAS* **389**, 925 (2008).
18. Токовинин (A. Tokovinin), *Astron. J.* **147**, 87 (2014).
19. Токовинин и др. (A. Tokovinin, T. Pribulla, and D. Fischer), *Astron. J.* **149**, 8 (2015a).
20. Токовинин и др. (A. Tokovinin, D.W. Latham, and B.D. Mason), *Astron. J.* **149**, 195 (2015b).
21. Токовинин (A. Tokovinin), ORBIT: IDL Software for Visual, Spectroscopic, and Combined Orbits, Zenodo, doi:10.2581/zenodo.61119 (2016).
22. Токовинин (A. Tokovinin), *Astrophys. J.* **844**, 103 (2017).
23. Токовинин (A. Tokovinin), *Astron. J.* **155**, 160 (2018).
24. Токовинин и др. (A. Tokovinin, B.D. Mason, R.A. Mendez, E. Costa, and E.P. Horch), *Astron. J.* **160**, 7 (2020).
25. Токовинин (A. Tokovinin), *Astron. J.* **159**, 265 (2020).
26. Токовинин, Мо (A. Tokovinin and M. Moe), *MNRAS* **491**, 5158 (2020).
27. Тремэйн (S. Tremaine), *MNRAS* **493**, 5583 (2020).
28. Уитворт (A.P. Whitworth), *Proc. IAU Symp.* **200** (Ed. H. Zinnecker, R.D. Mathieu, ASP: San Francisco, 2001).
29. Штерцик, Токовинин (M. Sterzik and A. Tokovinin), *Astron. Astrophys.* **384**, 1030 (2002).