

УДК 524.382

ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКИХ ПАР ЗВЕЗД ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА WDS

© 2008 г. О. В. Кияева*, А. А. Киселев, И. С. Измайлов

Главная астрономическая обсерватория РАН, Пулково

Поступила в редакцию 17.04.2007 г.

Методом параметров видимого движения выполнены исследования относительного движения компонентов 561 пар широких ($\rho > 2''$) и относительно близких (параллакс из каталога HIPPARCOS $> 0.01''$) визуально-двойных звезд по данным из каталога WDS. При заданном параллаксе вычислены значения минимальных масс двойных систем. Выявлено 358 оптических пар. Для 11 звездных пар получено превышение минимальной массы по сравнению с оценкой, соответствующей спектральному классу и светимости. Для двух звезд — ADS 7446 и 9701 — это превышение составляет 5–7 M_{\odot} .

Ключевые слова: звезды — свойства, классификация, двойные звезды.

DYNAMICAL STUDY OF WIDE PAIRS OF STARS BASED ON DATA FROM THE WDS CATALOG), by O. V. Kiyeva, A. A. Kiselev, and I. S. Izmailov. Using the method of apparent motion parameters, we have studied the relative motion of the components of 561 pairs of wide ($\rho > 2''$) and relatively nearby (HIPPARCOS parallaxes $> 0.01''$) visual double stars based on data from the WDS catalog. The minimum masses of the double stars have been calculated at given parallaxes. We have identified 358 optical pairs. For 11 stellar pairs, we have found the minimum mass to exceed the estimate corresponding to their spectral types and luminosities. This excess is 5–7 M_{\odot} for two stars, ADS 7446 and 9701.

PACS numbers : 97.10; 97.10.Nf; 97.10.Mm

Key words: stars — properties, classification, double stars.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время самым полным каталогом двойных звезд является каталог WDS, включающий в себя все когда-либо измеренные комбинации пар двойных и кратных звезд, среди которых есть достаточное количество оптических пар. Отделению оптических пар от физических посвящена работа авторов WDS (Харткопф и др., 2006), где выделены звезды с прямолинейным движением, но при этом авторы не исключают, что среди них могут оказаться очень медленно движущиеся физические пары. К похожей теме можно отнести работу Макарова, Каплана (2005), где анализируются двойные звезды каталога HIPPARCOS и сравниваются собственные движения этих звезд из каталогов Tycho и HIPPARCOS. Этот подход применим только к достаточно быстро движущимся звездам, так как из наблюдений оценивается ускорение собственного движения. Наш подход,

основанный на использовании метода параметров видимого движения (ПВД), принципиально отличается от перечисленных выше тем, что он применим к медленно движущимся широким парам с периодами обращения порядка 500–10 000 лет, которые по объективным причинам являются наименее изученными объектами. Это в основном устойчивые пары звезд, образовавшиеся в итоге длительной динамической эволюции.

В Пулковской обсерватории уже полвека проводятся наблюдения на 26-дюймовом рефракторе широких пар медленно обращающихся визуально-двойных звезд. Для определения орбит и оценки масс таких звезд был разработан метод параметров видимого движения (ПВД) (Киселев, Кияева, 1980).

Из позиционных наблюдений короткой дуги видимой орбиты получаем следующие ПВД компонентов, соответствующие среднему моменту наблюдений T_0 :

* Электронный адрес: kiyeva@gao.spb.ru

ρ — видимое расстояние между компонентами ["];

θ — позиционный угол относительного положения [°];

μ — видимая относительная скорость ["/год];

ψ — позиционный угол направления относительного движения [°/год];

ρ_c — радиус кривизны наблюдаемой короткой дуги ["].

Для определения орбиты необходимо также знать параллакс p_t и относительную лучевую скорость компонентов. В настоящее время методом ПВД получены орбиты 39 звезд Пулковской программы. Определены ориентировки этих орбит в галактической системе координат, при этом замечена тенденция в распределении угла наклона к галактической плоскости, что не замечено у тесных пар (Киселев, Романенко, 2004). Это говорит о том, что, несмотря на длительность и трудоемкость исследований, изучение широких пар является важной и актуальной задачей.

Если известны только параметры видимого движения и параллакс, то можно, не определяя орбиту, получить минимальное значение суммы масс компонентов, соответствующее физической двойной звезде, обращающейся по эллиптической орбите. Если это минимальное значение оказывается больше ожидаемого из соотношения масса—светимость M_{SP-L} , то мы считаем, что эта звезда заслуживает особого внимания, так как может иметь или невидимый спутник, или неверно определенный параллакс, или эксцесс масс (Киселев, Кияева, 2003).

Формула для оценки массы вытекает из основной формулы метода ПВД:

$$r^3 = k^2(\rho\mu/\mu^2)|\sin(\psi - \theta)| \quad (1)$$

Здесь r — пространственное расстояние между компонентами А и В, выраженное в а.е., $k^2 = 4\pi^2(M_A + M_B)$ — динамическая постоянная астрocентрического движения, выраженная в (а.е.)³(год)⁻², массы компонентов — M_A и M_B — выражены в массах Солнца. Ясно, что $r \geq \rho/p_t$, где p_t — параллакс. Тогда

$$M_A + M_B \geq (\rho\mu)^2/(4\pi^2\rho_cp_t^3|\sin(\psi - \theta)|) = M_1, \quad (2)$$

здесь M_1 — минимальная масса системы, которая может равняться действительной массе, если звезда-спутник расположена на орбите вблизи линии узла или плоскость орбиты близка к картинной плоскости.

Нижний предел суммы масс компонентов можно определить непосредственно из интеграла энергии. Для эллиптической орбиты $r < 2k^2/V^2$, где

V — скорость орбитального движения, $V > \mu/p_t$. Тогда

$$M_A + M_B > \rho\mu^2/(8\pi^2p_t^3) = M_2. \quad (3)$$

Для одной и той же физически связанной двойной звезды обычно выполняется условие

$$M_2 < M_1 \leq M_A + M_B.$$

В противном случае $\rho_c > 2\rho$, но тогда кривизна слишком мала, чтобы ее можно было определить из наблюдений.

Интеграл энергии давно служит основой для методов определения динамических параллаксов (Герцшпрунг, 1911; Рассел, 1928). В настоящее время в каталоге HIPPARCOS представлены с высокой точностью параллаксы большого количества двойных звезд, поэтому появилась возможность для исследования широких пар по наблюдениям, собранным в каталоге WDS, — оценить нижний предел для суммы масс компонентов, выявить звезды с избыточной массой и выявить оптические пары, для которых динамическая масса M_2 получается нереально завышенной. В данной статье представлены результаты такого исследования.

ВЫБОРКА ЗВЕЗД ИЗ КАТАЛОГА WDS

В основном списке каталога WDS (Мейсон и др., 2006) для каждой звезды приводятся результаты первого и последнего наблюдений, которые мы использовали, чтобы выбрать звезды для нашего исследования. Затем из базы данных WDS мы получили все наблюдения выбранных рядов, за что благодарны авторам каталога WDS Б. Мейсону и его коллегам.

По первому и последнему наблюдению вычислялись средние значения ρ и μ на среднюю эпоху с учетом прецессии и соответствующее им предварительное значение M'_2 по формуле (3), а также коэффициент κ , характеризующий приближенную оценку наблюдаемой дуги, по формуле

$$\kappa = (\mu\Delta T)/(2\pi\rho).$$

Критерии для выбора звезд следующие.

1. Расстояние между компонентами $\rho > 2''$.
2. Параллакс из каталога HIPPARCOS больше 0.01", и его относительная ошибка не более 10%, что обеспечит ошибку массы не хуже 30%.
3. Если $M'_2 < 20$, то с большой степенью вероятности звезда должна быть физической, поэтому мы выбираем ряды, для которых есть надежда определить радиус кривизны и оценить массу по формуле (1), а именно:

а) длина дуги соответствует $0.03 < \kappa < 0.1$ (Кияева, 1985);

б) число наблюдений $n > 20$.

Таблица 1. Распределение звезд в зависимости от динамической массы M_2

Динамическая масса M_2	Список 1	Список 2
$M_2 < 1$	89	3
$1 < M_2 < 2$	25	—
$2 < M_2 < 5$	7	1
$5 < M_2 < 10$	3	—
$10 < M_2 < 20$	—	1
$20 < M_2 < 100$	—	23
$M_2 > 100$	1	334
Всего звездных пар	125	362
Есть кривизна	103	5
$M_2 < M_{\text{SP-L}} < M_1$	11	—
$M_{\text{SP-L}} < M_2 < M_1$	—	5

В этот список (назовем его список 1) вошло 125 пар.

4. Если $M_2' > 20$, то это вероятная оптическая пара, однако возможны ошибки. В этот список (назовем его список 2) вошло 616 звезд, но для исследования мы оставили ряды, имеющие не менее четырех наблюдений, и пары, у которых одна из звезд является компонентом, для которого определен параллакс, — всего 436 звезд. Итого в данной работе представлены результаты динамического исследования 561 пары звезд.

РЕЗУЛЬТАТЫ. ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАР

Анализ данных WDS выполнялся следующим образом. Первоначально все наблюдения считались равновесными и вычислялись параметры прямолинейного движения с отсевом грубых ошибок по правилу 3σ . Далее ряды рассматривались индивидуально. Строились графики и некоторые наблюдения, выполненные на телескопах с малой апертурой и отскакивающие от ряда, отбраковывались или получали малый вес. Если наблюдений много (больше 200), то предварительно вычислялись среднегодовые положения, которые получали вес в зависимости от ошибки нормального места.

Метод ПВД применим только к физическим двойным звездам.

В список 1 вошли только визуально-двойные и иерархические тройные системы, для которых период подсистемы не больше 5–10 лет, т.е. гораздо меньше времени, охваченного наблюдениями

(100–200 лет). В этом случае движение подсистемы входит в движение широкой пары как дополнительный шум и не сказывается существенно на величинах параметров видимого движения.

В список 2 с неизбежностью вошли как двойные, так и кратные звезды, входящие в WDS под одним номером. Оптические системы выявлялись по необоснованно завышенному значению динамической массы ($M_2 > 20M_{\odot}$) в разных комбинациях пар компонентов, что определяется большим относительным движением компонентов пары или большими расстояниями между компонентами согласно формуле (3). При этом оптические системы, состоящие только из двух звезд, выявлялись уверенно, если при заданном параллаксе (хотя бы одного компонента) относительная ошибка относительного движения μ не превышает 20%. Тогда относительная ошибка M_2 не превосходит 50%. В противном случае звездная пара не рассматривалась. Так было отброшено 40 звезд.

В случае кратных систем выявление оптических компонентов производилось также после разбиения системы на как бы независимые пары, но при этом сравнивались относительные движения в подсистемах и широких парах. Здесь возможны следующие случаи.

1. Относительное движение физической тесной подсистемы значительно меньше относительного движения рассматриваемой широкой пары. В этом случае удаленный компонент рассматриваем как оптический.

2. Относительные движения подсистем одного порядка и по величине большие. В этом случае все системы оптические, и мы фактически определяем движение более близкого и яркого главного компонента, для которого определен параллакс, на фоне далеких звезд.

3. Относительное движение рассматриваемой пары мало и того же порядка, что и физической подсистемы. В этом случае разделить движения невозможно и пара исключается из рассмотрения.

Кроме того, десять пар (девять звезд, так как одна звезда вошла в две пары) из списка 2 показали заметное отклонение от прямолинейного движения и большую динамическую массу. Это может быть, если один из компонентов является также компонентом более тесной подсистемы. Сравнение относительных движений позволяет сделать заключение об оптическом характере пяти пар, а остальные пять пар, с относительным движением меньше $0.09''/\text{год}$, были исключены из рассмотрения как сомнительные, несмотря на то что три из них в каталоге WDS считаются не кратными, а двойными звездами.

В результате анализа относительных движений из списка 2 было исключено еще 34 сомнительные

Таблица 3. Параметры видимого относительного движения компонентов физических пар с избытками масс

WDS	ADS	n	$T_1 - T_n$ T_0	ρ	θ	μ "/год	Ψ	ρ_c
04246+3358 STT 81 AB	3188	82	1847–1999 1924.0	4".43 ± 0.03	36°03 ± 0.31	0".0189 ± 0.0007	303°6 ± 2.1	3".5–4.2 ± 1.0
08010+2335 STF 1171	6513	32	1828–1991 1910.2	2".48 ± 0.05	329°04 ± 0.74	0".0063 ± 0.0008	181°9 ± 6.2	0".7–1.4 ± 0.3
09379+7305 STF 1362	7446	78	1833–2003 1918.4	5".054 ± 0.018	131°61 ± 0.13	0".0063 ± 0.0002	34°4 ± 2.8	0".6–0.8 ± 0.2
11047–0413 STF1506A-BC	8048	32	1829–1991 1910.7	11".140 ± 0.039	216°67 ± 0.19	0".0126 ± 0.0005	271°3 ± 2.2	2".2–2.4 ± 0.8
11387+4507 STF 1561 AB	8250	104	1830–2004 1893.7	9".970 ± 0.019	258°14 ± 0.10	0".0206 ± 0.0003	114°9 ± 0.9	5".6–6.8 ± 0.8
14165+2007 STF 1825	9192	128	1830–2003 1917.0	4".288 ± 0.017	169°41 ± 0.12	0".0139 ± 0.0003	99°6 ± 1.6	1".2–1.3 ± 0.14
14226–0746 STF 1833 AB	9237	94	1822–1991 1907.3	5".574 ± 0.021	169°55 ± 0.14	0".0074 ± 0.0004	214°7 ± 2.7	0".9–1.2 ± 0.2
14410+5757 STF 1872 AB	9346	80	1830–2004 1917.0	7".592 ± 0.022	42°69 ± 0.11	0".0088 ± 0.0002	134°5 ± 3.2	2".0–3.9 ± 1.4
15348+1032 STF 1954 AB	9701	405	1831–2004 1913.0	3".741 ± 0.022	184°00 ± 0.04	0".0120 ± 0.0002	136°5 ± 1.0	1".4–1.8 ± 0.2
15559–0210 STF 1985	9842	153	1831–2004 1913.9	5".871 ± 0.008	338°01 ± 0.11	0".0172 ± 0.0002	61°7 ± 0.9	4".0–4.6 ± 0.5
19111+3847 STF2481 A-BC	12 145	229	1830–2003 1917.1	4".256 ± 0.007	36°72 ± 0.06	0".0157 ± 0.0001	325°1 ± 0.8	3".5–5.1 ± 0.8

пары. Таким образом, в списке 2 для рассмотрения осталось 362 пары.

Распределение результатов представлено в табл. 1. К безусловно оптическим парам мы отнесли все звезды, для которых $M_2 > 20$ (357 пар из списка 2 и одна пара из списка 1, для которой при обработке полного ряда наблюдений оказалась большая динамическая масса M_2). Итого 358 пар при условии, что параллакс в каталоге HIPPARCOS определен достаточно точно. В их число входят 198 звезд, которые вошли в каталог двойных звезд с прямолинейным движением (Харткопф и др., 2006), что независимо подтверждает

то, что это оптические пары. Для подавляющего большинства звезд определен параллакс только яркого компонента, разные параллаксы обоих компонентов обнаружены только у восьми звезд из этого списка. Список 358 оптических пар представлен в табл. 2¹, которая публикуется в электронном виде. В таблице представлены вычисленные для среднего момента параметры видимого движения и параллакс, по которым

¹Табл. 2 публикуется только в электронном виде и доступна через [ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/J\(130.79.128.5\)](ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/J(130.79.128.5)) или <http://cdsweb.u-strasbg.fr/pub/cats/J>.

Таблица 4. Звезды с возможными избытками масс

WDS	ADS	SP ₁	m_1	p_t	M_2	M_1	M_{SP-L}
		SP ₂	m_2		M_{\odot}	M_{\odot}	M_{\odot}
04246+3358	3188	F4 IV-V	5.8	0.0240	1.4	3.1	<3.0
STT 81 AB		WD A3*	9.6	± 0.0009			± 1.2
08010+2335	6513	K1 III-IV	6.51	0.0118	0.7	4.9	3.9
STF 1171		G6 V**	9.95	± 0.0010			
09379+7305	7446	F1 IV	6.39	0.0144	0.8	10.4	3.0
STF 1362		F2 V	6.58	± 0.0011			
11047-0413***	8048	G5 V	7.64	0.0406	0.3	3.8	1.4
STF 1506 A-BC		M0 V	10.25	± 0.0014			± 1.4
11387+4507***	8250	G0 V	6.50	0.0429	0.7	2.1	1.8
STF 1561 AB		K2 V	8.37	± 0.0010			± 0.3
14165+2007	9192	F6 V	6.25	0.0310	0.3	2.4	2.1
STF 1825		K0 V**	8.39	± 0.0008			± 0.3
14226-0746	9237	G0 V	6.82	0.0228	0.3	4.2	2.5
STF 1833 AB		G0 V	6.84	± 0.0019			± 1.7
14410+5757	9346	K0 IV	7.03	0.0189	1.1	4.2	2.5
STF 1872 AB		G5 IV**	7.90	± 0.0009			± 1.6
15348+1032	9701	F0 IV	3.8var	0.0155	1.8	10.3	5.5
STF 1954 AB		F0 V	4.84	± 0.0008			± 2.2
15559-0210	9842	G0 V	6.77	0.0265	1.1	3.0	2.0
STF 1985		K0 V**	8.46	± 0.0011			± 1.5
19111+3847***	12 145	G6 V	8.15	0.0205	1.3	2.7	2.0
STF2481 Aa-Bb		G7 V	8.07	± 0.0012			± 0.7

* Спектр определен в работе Холберга и др. (2003).

** Спектральные классы оценены нами по показателю цвета.

*** Звезды входят в каталог физических кратных звезд MSC (Токовинин, 1997), в скобках указана сумма масс всех компонентов.

вычисляется значение M_2 . Для некоторых звезд с длинными рядами или с большими пропусками в наблюдениях ряд делился на 2 части. Результаты не противоречат друг другу, что дополнительно повышает их надежность.

Среди отброшенных сомнительных звезд и среди звезд, для которых $M_2 < 20$, также могут быть оптические пары, но это вопрос дискуссионный, который в данной работе не рассматривается.

Таблица 5. Оценка спектрального класса и массы по показателям цвета

ADS	m_V	$m_J^{1)}$	$m_K^{1)}$	$B-V$	$V-J$	$J-K^{1)}$	SP	M_{SP-L}
6513 A	6.48 ²⁾	4.83	4.23	1.17 ²⁾		0.5	K1 III	2.9
B	9.95 ²⁾			0.71 ²⁾			G6 V	1.0
9192 A	6.25	5.37	5.13			0.24	F6 V	1.2
B	8.33 ³⁾	5.87	5.64	0.79 ³⁾		0.24	K0 V	0.9
9346 A	7.53 ²⁾	5.90	5.38	1.03 ²⁾	1.54 ⁴⁾	0.52	K0 IV	1.3
B	8.32 ²⁾	7.12	6.74	0.84 ²⁾	1.12 ⁴⁾	0.38	G5 IV	1.2
9842 A	7.03 ²⁾	5.99	5.66	0.60 ²⁾		0.33	G0 V	1.1
B	8.65 ²⁾	7.04	6.60	0.93 ²⁾		0.44	K0 V	0.9

¹⁾ Каталог 2MASS (Кутри и др., 2003).

²⁾ Каталог TDSC (Фабрициус, Макаров, 2002).

³⁾ Каталог ASCC (Харченко, 2001).

⁴⁾ Каталог LSPM (Лепине, Шара, 2005).

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗВЕЗДНЫЕ ПАРЫ С ВОЗМОЖНЫМ ИЗБЫТКОМ МАСС

Остановимся на звездах списка 1, у которых минимальная масса M_1 больше ожидаемой из соотношения масса—светимость и при этом обнаружена кривизна наблюдаемого движения.

Для оценки минимальной массы M_1 требуется знание трудно определяемого параметра — радиуса кривизны ρ_c . Звезды списка 1 выбирались согласно критериям, необходимым для определения этого параметра, но и то это удалось сделать не для всех звезд, главным образом, из-за большого разброса разнородных наблюдений. Тем не менее из 125 пар для 103 удалось оценить кривизну. Как и следовало ожидать, большинство звезд оказалось без всяких особенностей, и только 11 звезд показали возможный избыток массы. Результаты были представлены на Генеральной Ассамблее МАС в Праге (Киселев и др., 2006). В данной работе мы критически пересмотрели наши первые оценки и сократили список с 13 до 11 звезд. Результаты для этих звезд представлены в табл. 3 и 4. В табл. 3 приводятся вычисленные ПВД. В табл. 4 — данные о спектрах, светимостях, параллаксах, оценки масс.

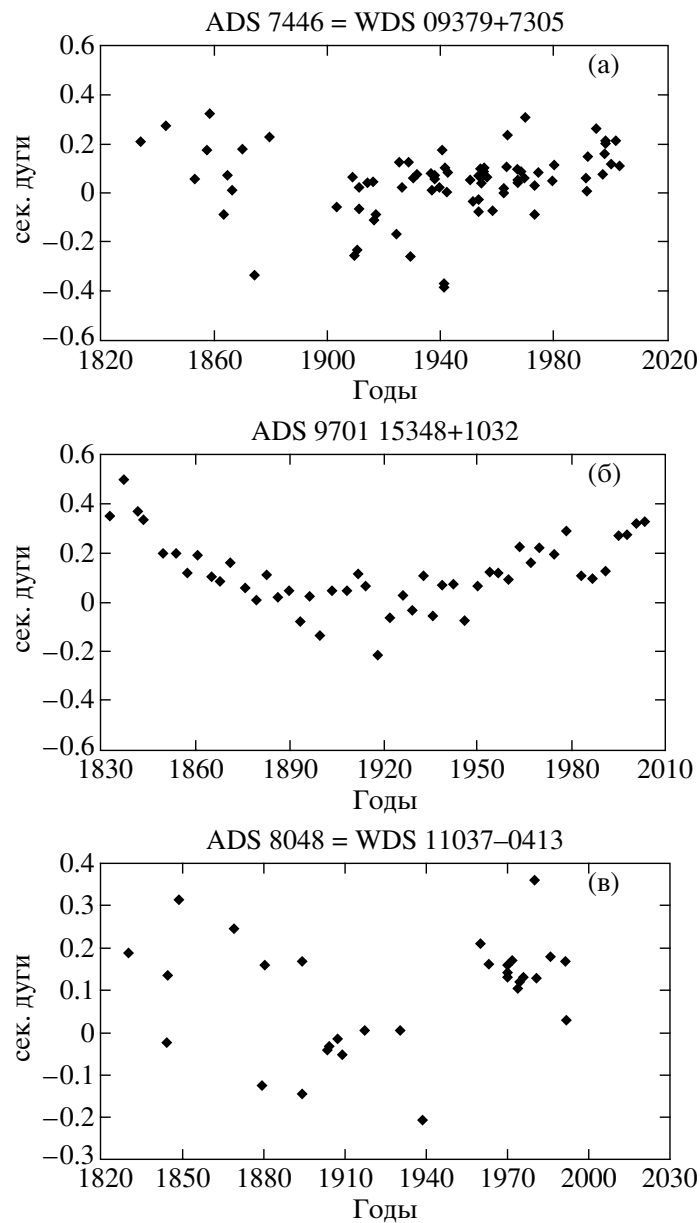
Вычислять радиус кривизны можно разными методами (Кияева, 1985; Киселев, Кияева, 2003). Если этот параметр определяется уверенно, то все они приводят к близким результатам. В табл. 3 мы приводим диапазон разброса значений радиуса

кривизны и максимальное значение вычислительной ошибки. При вычислениях по формуле (2) мы используем максимальное значение радиуса кривизны. Таким образом, мы умышленно уменьшаем и без того минимально возможное значение массы. Оценивая ошибку минимальной массы, мы учитываем ошибку параллакса и радиуса кривизны.

Если причина избытка массы вызвана присутствием неоткрытого невидимого спутника, движение в подсистеме может оказать влияние на величину радиуса кривизны так же, как и ошибки разнородных наблюдений в каталоге WDS.

Оценку массы M_{SP-L} для звезд с известным спектром мы выполняли по таблице из работы Страйжиса, Курилене (1981), где представлена зависимость массы от спектрального класса и класса светимости. В частности, у звезды ADS 6513 главный компонент — гигант, спектральный класс K1 III-IV. Согласно таблице спектру K1 III соответствует масса 2.88 массы Солнца, а K1 IV — масса 1.35 массы Солнца. Поэтому мы оценили суммарную массу по верхнему пределу. Аналогично для остальных звезд.

В табл. 4 данные о спектрах и звездных величинах взяты в основном из каталога WDS. Если в каталоге спектр отсутствует, то мы оценивали его по показателям цвета согласно таблицам из монографии Страйжиса (1977). Результаты оценки спектральных классов и масс для четырех звезд представлены в табл. 5.



Систематическое отклонение относительного движения от прямолинейного у физических двойных звезд ADS 7446 (а), ADS 9701 (б), ADS 8048 (в).

Для звезд главной последовательности мы оценивали массу также на основании видимой величины и тригонометрического параллакса из каталога HIPPARCOS, с учетом болометрической поправки, по известным формулам (Ленг, 1978):

$$10.0 \lg M_{\text{SP-L}} = 4.6 - M_{\text{bol}}, \quad \text{если } M_{\text{bol}} < 7.5;$$

$$6.9 \lg M_{\text{SP-L}} = 5.2 - M_{\text{bol}}, \quad \text{если } M_{\text{bol}} > 7.5.$$

Для белого карлика — компонента системы WDS 04246+3358 — мы приняли массу $1.4 M_{\odot}$ (верхний предел массы белых карликов).

Во всех спорных случаях мы принимали макси-

мальное значение $M_{\text{SP-L}}$ и таким образом умышленно уменьшали разность $M_1 - M_{\text{SP-L}}$.

Масса индивидуальных звезд может существенно отличаться от оценки согласно соотношению масса—светимость, однако мы включили в список все звезды, для которых $M_1 > M_{\text{SP-L}}$ и наличие кривизны в движении не вызывает сомнения, даже если массы согласуются. Не обязательно все эти звезды имеют невидимые спутники, но тот факт, что минимальная динамическая масса соответствует ожидаемой, говорит о том, что орбиты этих звезд ориентированы вблизи картинной плоскости или

что в рассматриваемый момент времени взаимное расположение компонентов соответствует положению вблизи узла орбиты. Тем не менее для четырех звезд наши результаты получили независимое подтверждение кратности системы. Три звезды (ADS 8048, 8250 и 12145) вошли в каталог кратных звезд MSC (Токовинин, 1997). Независимое подтверждение кратности получено также для звезды ADS 3188 (Барстов и др., 2001). Для этих звезд в табл. 4 в графе M_{SP-L} приводятся оценки масс как для двойной системы, а в скобках — с учетом всех обнаруженных компонентов согласно MSC каталогу. С учетом кратности избыток массы для трех систем исчезает, а для ADS 8048 остается. Возможно, причина в ошибках разнородных и неравномерных наблюдений из WDS (рис. в), влияющих на определение радиуса кривизны.

Существенный избыток массы обнаружен для двух звезд — ADS 7446 и ADS 9701. На рис. а, б представлены ряды наблюдений этих звезд в касательно-нормальной системе координат (ось абсцисс соответствует направлению движения в момент T_0 по оси ординат — отклонение от прямолинейного движения в соответствующие моменты времени). Видно, что для этих звезд кривизна явно выражена и определяется уверенно.

Для звезды ADS 9701 получена орбита (Мейсон и др., 2004). Согласно этой орбите $a = 3''.83$, $P = 1038$ лет, тогда параллакс из каталога HIPPARCOS $0''.0155 \pm 0''.0008$ приводит к сумме масс $14.0 M_{\odot}$, что больше M_1 . Независимо определенные динамические массы сильно превосходят значение, соответствующее спектру и светимости. Чтобы получить согласие, необходимо параллакс увеличить до величины $0''.0212$ (тогда расхождение с данными каталога HIPPARCOS существенно превосходит ошибку) или допустить наличие невидимых спутников в системе. Нельзя также исключить тот факт, что компонент А пульсирует, и оценка массы по спектру и светимости может быть ошибочной. Таким образом, несмотря на большое количество наблюдений, есть несогласование данных.

Звезда ADS 7446 входит в Пулковскую программу наблюдений. Отметим, что уже выполненные нами измерения в 1980–2000 гг. показывают систематические отклонения от прямолинейного движения на этом участке. Поэтому мы не исключаем, что движение в неоткрытой подсистеме, а также ошибки старых наблюдений повлияли на определение радиуса кривизны. Если точность наблюдений 26-дюймового рефрактора позволит нам выделить из шума движение подсистемы, то этому будет посвящена отдельная работа. Сейчас мы можем только обратить внимание на эту звезду и

рекомендовать наблюдать ее в течение нескольких лет на современном высокоточном телескопе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы исследовали относительное движение 561 пары широких и сравнительно близких визуально-двойных звезд из каталога WDS, для которых известен параллакс из каталога HIPPARCOS.

Основные выводы следующие.

1. По относительному движению и параллаксу выявлены 358 оптических пар, из которых 198 звезды имеют независимое подтверждение, так как входят в каталог звезд с прямолинейным движением (Харткопф и др., 2006), а 160 звезд обнаружены нами.

2. Выявлено 11 физических визуально-двойных звезд, у которых оценка динамической массы превосходит ожидаемую из соотношения масса—светимость массу.

3. Обращаем внимание на две звезды (ADS 7446 и ADS 9701), для которых избыток масс существенный. Это может быть в случае неверно определенного параллакса или присутствия невидимых спутников. Необходимо более детальное исследование этих звезд.

Большое количество оптических пар в каталоге WDS говорит о том, что несмотря на огромное достоинство такой базы данных каталог представляет из себя архив разнородного и мало исследованного наблюдательного материала.

Авторы выражают глубокую благодарность авторам каталога WDS Б. Мейсону, В. Харткопфу и др. за помощь в получении рядов наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барстов и др. (M.A. Barstow, H.E. Bond, M.R. Burleigh, et al.), MNRAS **322**, 891 (2001).
2. Герцшпрунг (E. Hertzsprung), Astron. Nachr. **190**, 113 (1911).
3. Киселев А.А., Кияева О.В., Астрон. журн. **57**, 1227 (1980).
4. Киселев А.А., Кияева О.В., Письма в Астрон. журн. **29**, 46 (2003).
5. Киселев, Романенко (A.A. Kiselev and L.G. Romanenko), ASP Conf. Ser. **316**, 250 (2004).
6. Киселев и др. (A.A. Kiselev, O.B. Kiyayeva, and I.S. Izmailov), IAU Symp. № 240, 129, August 2006, Prague (2007).
7. Кияева О.В., Изв. ГАО РАН № 201, 44 (1985).
8. Кутри и др. (R.M. Cutri, M.F. Skrutskie, S. Van Dyk, et al.), The 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources (2003).
9. Ленг К., *Астрофизические формулы*, Ч. 2 (М.: Мир, 1978), с. 270.

10. Лепине, Шара (S. Lepine and M.M. Shara), *Astron. J.* **129**, 1483 (2005).
11. Макаров, Каплан (V.V. Makarov and G.H. Kaplan), *Astron. J.* **129**, 2420 (2005).
12. Мейсон и др. (B.D. Mason, G.L. Wycoff, and W.I. Hartkopf), Washington Double Star Catalog 2006.5. USNO Double Star CD 2006.5.
13. Мейсон и др. (B.D. Mason, W.I. Hartkopf, G.L. Wycoff, et al.), *Astron. J.* **127**, 539 (2004).
14. Рассел (H.N. Russel), *Astron. J.* **38**, 89 (1928).
15. Страйжис В., *Многоцветная фотометрия звезд* (Вильнюс: Моклас, 1977), с. 143.
16. Страйжис, Курилене (V. Straizis and G. Kurilene), *Astrophys. Sp. Sci.* **80**, 361 (1981).
17. Токовинин (A.A. Tokovinin), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **124**, 75 (1997); <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/>.
18. Фабрициус и др. (C. Fabricius, E. Hog, V. Makarov, et al.), *Astron. Astrophys.* **384**, 180 (2002).
19. Харткопф и др. (W.I. Hartkopf, B.D. Mason, G.L. Wycoff, and D. Kang), Catalog of Rectilinear Elements of Visual Double Stars. USNO Double Star CD 2006.5.
20. Харченко (N.V. Kharchenko), All-sky Compiled Catalogue of 2.5 million stars (ASCC-2.5). *Kinematics and Physics of Celestial Bodies* **17**, 409 (2001).
21. Холберг и др. (J.B. Holberg, M.A. Barstow, and M.R. Burleigh), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **147**, 145 (2003).