

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛОДЫХ СПЕКТРАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД ПО ОТНОШЕНИЮ МАСС КОМПОНЕНТОВ И ЭКСЦЕНТРИСИТЕТАМ

© 2023 г. О. В. Еретнова^{1,*}

¹Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

*E-mail: eretnova@csu.ru

Поступила в редакцию 11.04.2023 г.

После доработки 03.07.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

Собраны данные о 83 молодых спектрально-двойных звездах с двумя линиями в спектре, среди них — Ae/Be звезды Хербига, звезды типа Т Тельца и красные карлики. Построены распределения молодых спектрально-двойных звезд по отношению масс компонентов и эксцентриситетам, диаграмма эксцентриситет–период и проведен их анализ. Подавляющее большинство короткопериодических систем с $P < 10^d$ имеют эксцентриситеты, близкие к нулю. В этой группе практически нет молодых звезд с возрастом $t \leq 1$ млн. лет. Распределение по отношению масс систем с $P < 10^d$ имеет ярко выраженный максимум в интервале $q = 0.9–1.0$. У молодых спектрально-двойных звезд с $P > 10^d$ распределение по отношению масс более пологое, около 12% имеют $q < 0.5$. Статья основана на докладе, сделанном на астрофизическом мемориальном семинаре “Новое в понимании эволюции двойных звезд”, приуроченном к 90-летию профессора М.А. Свечникова.

Ключевые слова: молодые звезды, спектрально-двойные звезды, распределение по отношению масс, распределение по эксцентриситетам

DOI: 10.31857/S0004629923090049, EDN: ZKIFBI

1. ВВЕДЕНИЕ

Двойные звезды являются основным источником наших знаний о массах, радиусах, светимостях и др. характеристиках звезд. Статистические распределения по различным физическим характеристикам у спектрально-двойных звезд, компоненты которых лежат на главной последовательности, исследованы достаточно хорошо (см., например, работы [1–3]). Однако наблюдаемые распределения спектрально-двойных звезд главной последовательности отягощены эволюционными эффектами, связанными с перетеканием вещества в тесных двойных парах. Если спектрально-двойная не наблюдается одновременно как затменная переменная, весьма затруднительно отделить системы с компонентами, принадлежащими главной последовательности, от двойных, уже прошедших “перемену ролей” компонентов.

В последние десятилетия благодаря повышению углового разрешения и чувствительности современных астрономических инструментов стало возможным наблюдать молодые спектрально-двойные звезды, находящиеся на стадии сжатия к начальной главной последовательности (НГП) (см. литературу в табл. 1 и 2). Число молодых

двойных звезд, у которых из наблюдений получены абсолютные и фотометрические элементы, растет с каждым годом. Приходит время исследования статистических распределений молодых звезд по физическим и орбитальным параметрам. Для спектрально-двойных с двумя линиями в спектре (SB2) надежно определяются из кривых

лучевых скоростей отношение масс $q = \frac{M_2}{M_1}$, экс-

центриситет e , период P . Изучение закономерностей в распределении молодых звезд по этим параметрам несет информацию о преимущественном механизме образования двойных систем.

В работе Исмаилова и др. [4] исследовано распределение 73 молодых спектрально-двойных по эксцентриситетам. В выборке присутствуют пары как с двумя линиями в спектре, так и с одной линией. Показано, что около 35% звезд до НГП имеют эксцентриситеты не более 0.1.

Периоды у спектрально-двойных звезд изменяются в достаточно широких пределах, от $P \sim 1^d$ до $P \sim 1000^d$ [4, 5]. Мэтью [6] показал, что практически все молодые двойные с $P < 10^d$ имеют эксцентриситеты, близкие к нулю. Он использо-

вал выборку из 25 известных на то время спектрально-двойных звезд до НГП. Аналогичный результат получен в работах Мело и др. [7], Дудорова и Еретновой [5] на выборках из 30 и 55 молодых спектрально-двойных соответственно.

В классической работе Циннекера [8] рассматриваются основные механизмы образования двойных систем. Для широких пар это захват и распад (дезинтеграция) малых скоплений. При захвате компоненты образуются из независимых фрагментов, а затем, в результате нецентральных столкновений протозвездных ядер, образуют двойную систему. В этом случае число образующихся широких пар должно увеличиваться с уменьшением отношения масс q . Распад малых скоплений происходит из-за парных сближений, в результате остается два наиболее массивных члена скопления. В этом случае q будет близко к единице. Распад малых скоплений ответственен и за образование кратных систем.

Для тесных пар основными механизмами образования являются фрагментация и деление. Фрагментация — это разделение вращающегося протозвездного облака на две или более частей на стадии динамического коллапса. Деление может произойти у быстро вращающейся протозвезды и во время ее Кельвин-Гельмгольцовского сжатия к НГП. В [8] отмечено, что для обоих механизмов отношение масс не должно существенно отличаться от единицы. Численное моделирование образования двойных звезд в работах Бейта и др. [9, 10] подтверждает возрастание числа тесных двойных пар при $q \rightarrow 1$.

Исследование наблюдаемого распределения молодых двойных звезд по отношению масс находится пока на начальной стадии. В [11] было рассмотрено распределение по q для 44 молодых двойных звезд с разделением 10–1000 а.е., находящихся в области звездообразования Taurus-Auriga. Массы звезд были определены по эволюционным трекам на диаграмме Герцшпрунга–Рессела, затем найдено отношение масс. Они отмечают, что у двойных пар с разделением менее 100 а.е. доля систем с $q \in [0.8, 1.0]$ существенно выше, чем у более широких пар. Дудоров и Еретнова [5] показали, что у половины SB2 звезд типа Т Тельца с периодом $P < 10^d$ отношение масс лежит в интервале от 0.9 до 1.0 и практически отсутствуют системы с $q < 0.5$. У молодых SB2 звезд с $P > 10^d$ уже более 20% имеют отношение масс $q < 0.5$ и только для 30% отношение масс приходится на интервал $q = (0.9–1.0)$. Смит и др. [12] указывают на заметное увеличение при $q \rightarrow 1$ числа молодых звезд с массой $M < 1.5 M_\odot$, на-

блюдаемых как затменные переменные с двумя линиями в спектре. Среднее значение отношения масс $q = 0.92$.

В настоящей работе мы используем наблюдаемые данные о молодых SB2 звездах Ae/Be Хербига, Т Тельца и красных карликах. Массы Ae/Be звезд Хербига лежат в интервале от $2.5 M_\odot$ до $8 M_\odot$, спектральные классы — В и А. Звезды типа Т Тельца принадлежат к спектральным классам от F до M и имеют массы $0.5 M_\odot < M < 2.5 M_\odot$ [13]. Красные карлики — это продолжение звезд типа Т Тельца в область малых масс (спектральный класс M, массы $0.1 M_\odot < M < 0.5 M_\odot$).

Статья организована следующим образом. Основные параметры исследуемых молодых SB2 звезд приведены в разделе 2. Гистограммы распределения звезд по эксцентриситетам и отношению масс, диаграмма эксцентриситет–период с учетом возраста звезд и их анализ представлены в разделе 3. В заключении содержатся основные выводы работы.

2. ВЫБОРКА МОЛОДЫХ ЗВЕЗД

Выборка содержит 83 системы, которые наблюдаются как спектрально-двойные с двумя линиями в спектре. Из них 31 являются затменными переменными (далее SB2 + EB), 5 — визуально-двойными (далее SB2 + VB). Основные параметры 23 SB2 + EB и 3 SB2 + VB молодых звезд приведены в работе Дудорова и Еретновой [14]. Данные об остальных SB2 молодых звездах, наблюдаемых или как затменные переменные, или как визуально-двойные, приведены в табл. 1. Звезды в табл. 1 расположены в порядке убывания массы главного компонента. В табл. 2 приведены параметры 47 молодых звезд, наблюдаемых только как SB2. Здесь звезды расположены в алфавитном порядке. Название звезды и ее период (в днях) указаны в первом столбце таблиц. Значок ** рядом с названием звезды говорит о наличии у нее общего диска вокруг двойной (circumbinary disk). Во втором столбце приведены спектры S_{p12} компонентов, в третьем — массы M_{12} (табл. 1) или амплитуды лучевых скоростей K_{12} (табл. 2). В первой строке для каждой звезды указаны параметры главного компонента, во второй строке — параметры спутника. В четвертом столбце таблиц приведено отношение массы менее массивного компонента к массе более массивного q и эксцентриситет орбиты e . В пятом столбце указана область звездообразования, к которой принадлежит звезда, и расстояние до нее в парсеках. Расстояния вычислены по тригонометрическим параллаксам из каталогов Gaia eDR3/DR3 [15, 16]. Расстояния до звезд, у которых в каталогах Gaia

Таблица 1. Параметры молодых двойных звезд

Звезда, период	Sp_{12}	$M_{12} (M_{\odot})$	q, e	Местонахож- дение	t , млн. лет, ссылки
SB2 + EB					
V410 Pup	B5	3.15 ± 0.10	0.581 ± 0.002	Vela2 OB	7–25
0 ^d .876154	A0	1.83 ± 0.08	0	346 ± 35 пк	[18]
θ ¹ Ori E	G2	2.807 ± 0.048	0.9965 ± 0.0065	Orion	0.3–2
9 ^d .89529	G2	2.797 ± 0.048	0	383 ± 5 пк	[19]
GG Ori	B9.5	2.342 ± 0.016	0.9982 ± 0.0044	Orion OB1	~7.7
6 ^d .6314936	B9.5	2.338 ± 0.017	0.2218 ± 0.0022	442 ± 4 пк	[20]
MMML 53	K2	0.99 ± 0.02	0.863 ± 0.012	Cen-Lup	15–22
2 ^d .097891	—	0.86 ± 0.02	0	123.8 ± 0.9 пк	[21]
THOR-42	M3.5	0.497 ± 0.005	0.413 ± 0.005	32 Ori Group	20–28
0 ^d .85896804	—	0.205 ± 0.002	0.003 ± 0.002	103.9 ± 0.2 пк	[22]
NGTS J000248–2953	M	0.3978 ± 0.0033	0.564 ± 0.003	Blanco 1	100–120
1 ^d .09800524	M	0.2245 ± 0.0018	0.00052 ± 0.00081	263 ± 18 пк	[12]
Mon-735	M3.1 ± 0.7	0.2918 ± 0.0099	0.912 ± 0.021	NGC 2264	7–9
1 ^d .9751388	M3.1 ± 0.7	0.2661 ± 0.0095	0.0068 ± 0.0075	720 ± 55 пк	[23]
TOI 450	M4.5	0.1768 ± 0.0004	1.000 ± 0.001	Columbia ass.	~40
10 ^d .714762	M4.5	0.1767 ± 0.0003	0.2969 ± 0.0004	53.62 ± 0.05 пк	[24]
SB2 + VB					
GW Ori	G3	2.80 ± 0.36	0.61 ± 0.02	λ Ori	~1
241 ^d .49	K0	1.68 ± 0.21	0.13 ± 0.01	408 ± 11	[25, 26]
HARO 1-14c	K5	0.905 ± 0.043	0.344 ± 0.008	Oph	3–4
592 ^d .19	M1.5	0.308 ± 0.011	0.617 ± 0.006	130.8 ± 0.4 пк	[27]

Таблица 2. Параметры молодых звезд, наблюдаемых как спектрально-двойные с двумя линиями в спектре

Звезда, период	Sp_{12}	K_{12} (км/с)	q, e	Местонахож- дение	t , млн. лет, ссылки
Cru 3	K5	32.380 ± 0.063	0.954 ± 0.004	Sco-Cen	5–10
58 ^d .2748	K5	33.955 ± 0.063	0.0675 ± 0.0016	110 пк*	[28]
CVSO 104A**	M0	45.93 ± 0.27	0.921 ± 0.008	OB1 Ori	~5
5 ^d .0253	M2	48.85 ± 0.27	0.395 ± 0.048	366 ± 4 пк	[29]
DQ Tau**	K5–M1	20.28 ± 0.71	0.936 ± 0.051	Taurus	~3
15 ^d .80158	K5–M1	21.66 ± 0.60	0.568 ± 0.013	195.4 ± 0.7 пк	[30, 31]
EPIC 203868608 A	M5	26.46 ± 0.16	0.8309 ± 0.0062	Upper Sco	8–10
17 ^d .9420	M5	31.84 ± 0.18	0.2998 ± 0.0041	159 ± 4 пк	[32]
GJ 1284	M2–M2.5	31.6 ± 0.3	0.845 ± 0.012	Local Assoc.	30–70
11 ^d .838033	M3–M3.5	37.4 ± 0.3	0.505 ± 0.005	15.906 ± 0.019 пк	[33]
GSC 06213–00306	K1	15.10 ± 0.1	0.97 ± 0.01	Sco-Cen	—
166 ^d .9	K1	15.65 ± 0.09	0.226 ± 0.006	138.1 ± 0.9 пк	[34]

Таблица 2. Продолжение

Звезда, период	$S_{p_{12}}$	K_{12} (км/с)	q, e	Местонахождение	t , млн. лет, ссылки
HD 34700	G0	38.83 ± 0.42	0.987 ± 0.014	Orion	≤ 5
23 ^v 4877	G0	39.33 ± 0.34	0.2501 ± 0.0068	350.5 $\pm$ 2.5 пк	[35]
MO Lup	K4	37.09 ± 0.12	0.755 ± 0.007	Lupus	—
11 ^d 95656	M4	49.1 ± 0.3	0.401 ± 0.002	113 $\pm$ 1 пк	[36]
NGC 6611 601	B2	21.5 ± 0.2	0.514 ± 0.03	NGC 6611	0.3–0.6
109 ^d 9	B2	41.8 ± 0.4	0.234 ± 0.008	1814 $\pm$ 56 пк	[37]
Par 1540	K1–K3	26.4 ± 0.5	0.76 ± 0.03	Orion	0.5–1
33 ^d 73	K2–K5	34.9 ± 1.0	0.12 ± 0.01	389 $\pm$ 2 пк	[38]
ROXR1 14	M1	42.66 ± 0.33	0.97 ± 0.01	ρ Oph	—
5 ^d 72	—	43.94 ± 0.33	0.020 ± 0.007	137.5 $\pm$ 0.6 пк	[39]
RV 1659	—	41.56 ± 1.07	0.80 ± 0.03	NGC 2264	1.5–3
15 ^d 3182	—	52.20 ± 1.05	0.0 ± 0.02	738 $\pm$ 23 пк	[40]
RV 1768	—	59.34 ± 6.34	0.98 ± 0.15	NGC 2264	1.5–3
4 ^d 7878	—	60.83 ± 6.32	0.55 ± 0.05	738 $\pm$ 23 пк	[40]
RX J1559.2–3814	M1.5	13.4 ± 0.2	0.945 ± 0.027	Lupus	—
474 ^d 0	—	14.2 ± 0.2	0.336 ± 0.005	137.5 $\pm$ 1.2 пк	[34]
RX J1603.9–3938	K2	40.643 ± 0.060	0.936 ± 0.003	Lupus	7
7 ^d 56679	K3	43.411 ± 0.080	0	130 $\pm$ 2 пк	[7]
RX J1622.7–2325Nw	M1	78.71 ± 3.52	0.98 ± 0.06	ρ Oph	—
3 ^d 23	—	80.31 ± 3.58	0.300 ± 0.037	140 $\pm$ 6 пк	[39]
S29	K9.5	25.4 ± 1.3	0.61 ± 0.10	σ Ori	—
8 ^d 72	—	41.7 ± 1.3	0	421 $\pm$ 22 пк	[41]
S53	M4.5	29.1 ± 2.8	0.91 ± 0.13	σ Ori	—
8 ^d 52	—	32.1 ± 2.3	0	390 $\pm$ 7 пк	[41]
S84	M2.5	43.8 ± 1.3	1.00 ± 0.04	σ Ori	—
6 ^d 07	—	43.8 ± 1.3	0	398 $\pm$ 6 пк	[41]
S85	M1.0	35.3 ± 2.3	0.82 ± 0.10	σ Ori	—
12 ^d 78	—	43.0 ± 2.3	0	536 $\pm$ 20 пк	[41]
S89	K2.0	69.8 ± 4.4	0.81 ± 0.10	σ Ori	—
13 ^d 82	—	86.5 ± 4.4	0	352 $\pm$ 100 пк*	[41]
TWA 3A**	M4.0	23.28 ± 0.26	0.841 ± 0.014	TW Hya	10 $\pm$ 5
34 ^d 87846	M4.5	27.68 ± 0.36	0.6280 ± 0.0060	37.05 $\pm$ 0.05 пк	[42]
UZ Tau E**	M1	15.5 ± 2.0	0.267 ± 0.001	Taurus	~ 1
18 ^d 979	M4	58.2 ± 5.7	0.14 ± 0.05	130 $\pm$ 2 пк*	[43]
V834 Ara (HD 155555)	G5	86.0 ± 0.4	0.91 ± 0.01	—	~ 18
1 ^d 681651	K0	94.6 ± 0.7	0	30.35 $\pm$ 0.02 пк	[44]
V380 Cep (HD 200775)	B2–B3	17.0 ± 2.5	0.81 ± 0.22	—	~ 0.1
1412 ^d	B2–B3	20.9 ± 2.5	0.32 ± 0.06	355 $\pm$ 5 пк	[45]
V810 Mon (VSB 111)	G9–K1	12.00 ± 0.32	0.52 ± 0.05	NGC 2264	~ 3
902 ^d 1	K9–M1	23.1 ± 2.2	0.788 ± 0.008	697 $\pm$ 17 пк	[46]
V2131 Oph (NTTS 162814–2427)	K7	44.0 ± 0.8	0.92 ± 0.03	Sco-Oph	~ 1

Таблица 2. Окончание

Звезда, период	Sp_{12}	K_{12} (км/с)	q, e	Местонахождение	t , млн. лет, ссылки
35 ^d 95	K7–K9	48.0 ± 1.0	0.48 ± 0.01	169 ± 9 пк	[47]
V1229 Ori (Par 1925)	K3	—	0.31 ± 0.04	Orion	~1
32 ^d 94	—	—	—	389 ± 5 пк	[48]
V1326 Ori (Par 1771)	K4	—	0.34 ± 0.04	Orion	0.5–1
149 ^d 5	—	—	—	393 ± 6 пк	[48]
V1481 Ori**	M3	40.3 ± 0.5	0.54 ± 0.01	Orion	~1
4 ^d 439	M4	74.6 ± 0.4	0	394 ± 4 пк	[49]
V1814 Ori (Par 2494)	K0	34.85 ± 0.28	0.70 ± 0.01	Orion	—
19 ^d 4836	—	49.75 ± 0.38	0.257 ± 0.005	389 ± 3 пк	[50]
V1852 Ori (RX J0513.1+0851)	K2	39.0 ± 0.7	0.46 ± 0.02	—	10
4 ^d 01829	M2	84.6 ± 2.7	0.06 ± 0.02	545 ± 4 пк	[51]
V1872 Ori (RX J0528.9+1046)	K3	42.72 ± 0.32	0.949 ± 0.015	λ Ori	2.3
7 ^d 67246	—	45.00 ± 0.57	0.0290 ± 0.0071	399 ± 2 пк	[52]
V1874 Ori (RX J0529.3+1210)	K7	22.76 ± 1.59	0.73 ± 0.23	32 Ori group	15 ± 5
461 ^d 89	M2.5	31.25 ± 9.44	0.88 ± 0.02	123.5 ± 0.6 пк	[53]
V1878 Ori (RX J0530.7–0434)	K2–K3	47.51 ± 0.21	0.9984 ± 0.0049	Orion	0.5
40 ^d 5738	K2–K3	47.59 ± 0.15	0.3186 ± 0.020	404 ± 3 пк	[54]
V1882 Ori (RX J0532.1–0732)	K2–K3	43.25 ± 0.18	0.9483 ± 0.0056	Orion	3–5
46 ^d 850	K3	45.61 ± 0.15	0.4726 ± 0.024	366 ± 2 пк	[54]
V2751 Ori (RX J0539.9+0956)	K5	9.2 ± 0.7	0.66 ± 0.11	—	30
1117 ^d 39	M3	13.8 ± 2.1	0.20 ± 0.05	112 ± 3 пк	[51]
V2758 Ori (RX J0541.4–0324)	G8	65.16 ± 0.10	0.6743 ± 0.0042	Orion	5–10
4 ^d 989169	K3	96.63 ± 0.56	0	371 ± 3 пк	[54]
V1001 Sco (NTTS 160905–1859)	K1	15.9 ± 0.4	0.18 ± 0.01	Sco-Cen	1–10
10 ^d 4	—	88.3 ± 5.4	0.17 ± 0.02	137.0 ± 0.3 пк	[47, 48]
V1151 Sco (NTTS 155808–2219)	M2–M3	33.12 ± 0.33	0.78 ± 0.01	Sco-Cen	3.3 ± 1.8
16 ^d 9243	M3–M4	42.43 ± 0.67	0.113 ± 0.008	122 ± 8 пк	[55]
V1154 Sco (NTTS 155913–2233)	K5	63.3 ± 0.8	0.63 ± 0.02	Sco-Cen	5–10
2 ^d 42378	K5	100.5 ± 3.4	0.024 ± 0.014	130 ± 10 пк*	[47, 48]
V4046 Sgr**	K5	54.16	0.957	—	~13
2 ^d 42537	K7	56.61	0	71.5 ± 0.1 пк	[56]
V826 Tau	K7	18.28 ± 0.3	0.981 ± 0.011	Taurus	4
3 ^d 887758	K7	18.62 ± 0.5	0	143.7 ± 0.4 пк	[57]
V1098 Tau A (LkCa 3A)	M	27.16 ± 0.31	0.5148 ± 0.0085	Tau-Aur	1.4
12 ^d 941865	M	52.75 ± 0.77	0.1735 ± 0.0090	133 пк*	[58]
V1098 Tau B (LkCa 3B)	M	35.37 ± 0.45	0.522 ± 0.012	Tau-Aur	1.4
4 ^d 0676115	M	67.7 ± 1.2	0	133 пк*	[58]
VSБ 126	G9–K1	14.74 ± 0.24	0.29 ± 0.2	NGC 2264	~3
12 ^d 9244	M3–M5	51.3 ± 2.8	0.18 ± 0.02	722.5 ± 7.5 пк	[46]
Walker 134	G5	83 ± 5	0.96 ± 0.02	NGC 2264	~2
6 ^d 3532	G5	86 ± 5	0	717 ± 7 пк	[59]

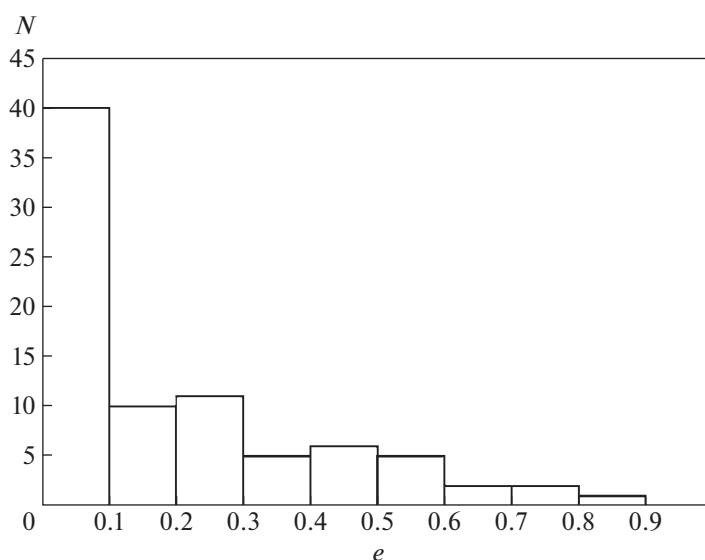


Рис. 1. Распределение молодых SB2 звезд по эксцентриситетам.

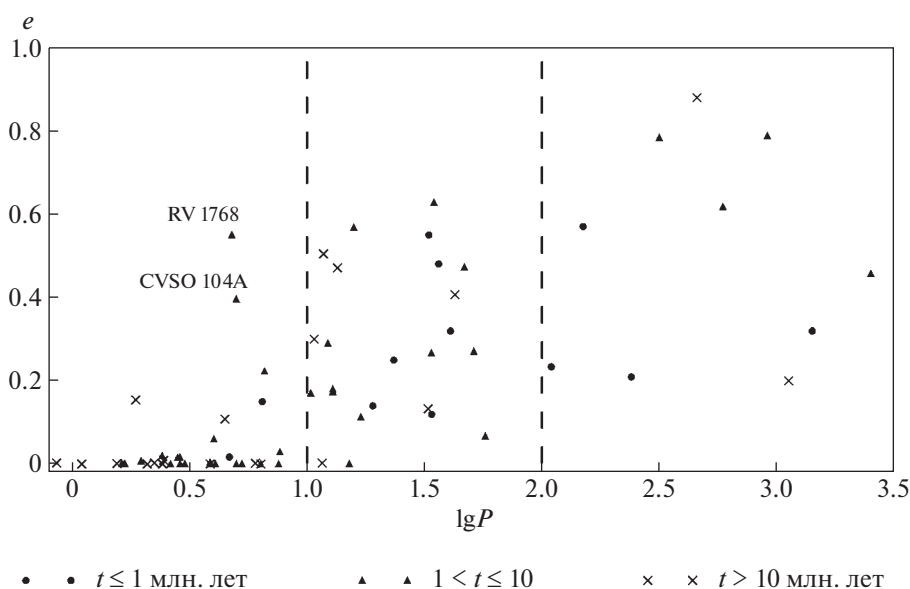


Рис. 2. Диаграмма эксцентриситет–период для молодых SB2 звезд.

eDR3/DR3 нет тригонометрических параллаксов, приведены из соответствующей литературной ссылки и отмечены значком *. Расстояния до звезд RV 1659 и RV 1768 указаны как расстояние до области звездообразования NGC 2264. В последнем столбце даны возраст звезд и ссылки на литературу. Параметры звезд в таблицах приведены с погрешностями, если они указаны в оригинальных статьях. Параметры, информация о

которых отсутствует в оригинальных статьях, отмечены прочерками. В названиях звезд мы придерживаемся номенклатуры Общего каталога переменных звезд [17]. Если в оригинальной статье приведено другое название звезды, оно указано в круглых скобках. Если звезды нет в Общем каталоге переменных звезд, в таблицах указано название, которое приведено в соответствующей ссылке.

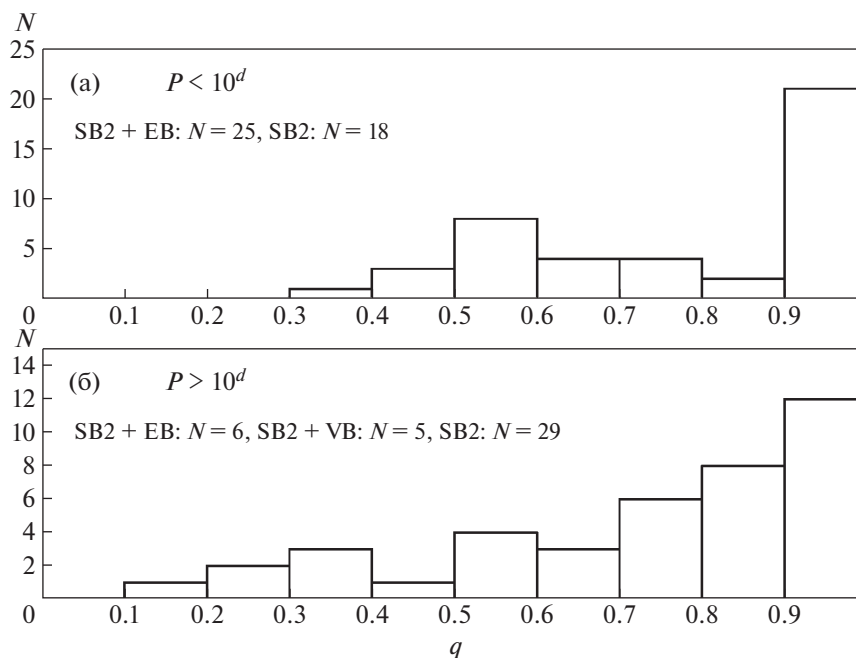


Рис. 3. Распределение молодых SB2 звезд с периодами $P < 10^d$ (панель а) и $P > 10^d$ (панель б) по отношению масс компонентов $q = \frac{M_2}{M_1}$.

Согласно табл. 1 и 2, 14 компонентов молодых двойных звезд являются Ae/Be звездами Хербига, 91 — звездами типа Т Тельца, к красным карликам относится 61 компонент.

Молодые звезды окружены газопылевыми аккреционными дисками в течение первых нескольких миллионов лет своей эволюции. Газопылевые диски одиночных классических звезд типа Т Тельца (CTTS) имеют размеры ~ 100 а.е., массы дисков $\sim 1\%$ массы звезды и меньше. Время жизни дисков у них составляет от 1 млн. до 10 млн. лет, среднее время жизни дисков — около 2–3 млн. лет [60]. За это время аккреция вещества на звезду прекращается, внешние части газопылевого диска рассеиваются. Выводы о наличии дисков делаются на основании того, что в спектрах молодых звезд наблюдаются сильные эмиссионные линии и значительные избытки инфракрасного и ультрафиолетового излучения. Если плоскость газопылевого диска расположена по лучу зрения наблюдателя, могут возникать квазипериодические ослабления блеска звезды, обусловленные затмениями значительной части поверхности звезды краем внутреннего диска. Все эти явления затрудняют определение светимостей, радиусов, возрастов и других физических параметров звезд и требуют проведения длительной многоцветной фотометрии для реалистичных оценок этих параметров (см., например, [61]).

CTTS в двойных системах имеют диски, меньшие по массе и размерам по сравнению с одиночными звездами тех же масс из-за приливного взаимодействия компонентов. Размеры околозвездных дисков у них не могут быть больше, чем половина расстояния между компонентами. Время жизни околозвездных дисков в двойных системах с большой полуосью $A \sim 5\text{--}10$ а.е. (для двойной с компонентами массой $1 M_\odot$ это соответствует периоду $P \sim 2900^d\text{--}8000^d$) составляет около 10% от времени жизни дисков одиночных звезд [60, 62]. Если $A < 10 R_\odot$ ($P < 3^d$ для двойной с $M_1 = M_2 = 1 M_\odot$), то из-за взаимодействия магнитосфер компонентов образование околозвездных дисков становится невозможным. Все двойные звезды нашей выборки имеют периоды $P < 3000^d$, у подавляющего большинства из них $P < 100^d$. Около 20% систем имеют $P < 3^d$. Возраст практически всех звезд $t \geq 1$ млн. лет. Таким образом, околозвездные газопылевые диски не окажут существенного влияния на определение параметров исследуемых SB2 звезд.

Вокруг двойных звезд типа Т Тельца с $A < 10\text{--}20$ а.е. может формироваться общий диск (circumbinary disk), внутренняя граница которого лежит на расстоянии $(2\text{--}3)A$ от центра масс системы. В обзорной статье Оффнер и др. [62] под-

черкивается, что такие диски малочисленны и чаще встречаются среди SB1 по сравнению с SB2. В нашей выборке 6 систем с общими дисками вокруг двойной, в табл. 2 они отмечены значком **. Определение параметров этих двойных звезд производилось с учетом наличия дисков и связанных с ним явлений (см. соответствующие литературные ссылки).

3. ОТНОШЕНИЕ МАСС КОМПОНЕНТОВ И ЭКСЦЕНТРИСИТЕТ МОЛОДЫХ СПЕКТРАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

На рис. 1 представлена гистограмма распределения молодых SB2 звезд по эксцентриситетам. Согласно рисунку, орбиты ~50% систем являются круговыми или близкими к круговым, эксцентриситеты лежат в интервале от 0.0 до 0.1. Это несколько больше, чем в работе Исмаилова и др. [4].

Поскольку среди звезд нашей выборки есть как тесные, так и широкие пары, на рис. 2 представлена диаграмма эксцентриситет-период. Системы с возрастом $t \leq 1$ млн. лет изображены на рисунке кружками, с возрастом от 1 до 10 млн. лет — треугольниками, и крестиками изображены системы, возраст которых более 10 млн. лет. Рисунок показывает, что можно выделить три группы звезд:

1) короткопериодические двойные ($P < 10^d$), подавляющее большинство которых имеют эксцентриситеты, близкие к нулю. Подобный результат был получен на меньшем наблюдательном материале в работах [5–7]. Это говорит о том, что у короткопериодических двойных систем уже на стадии сжатия к НГП произошла циркуляризация их орбит. Ряд теоретических работ подтверждает такую возможность в рамках приливного взаимодействия компонентов [63, 64]. Системы CVSO 104A и RV 1786 имеют самые большие эксцентриситеты, $e > 0.4$. Возраст маломассивных компонентов ($M < 0.6 M_\odot$) этих систем равен $t = (1.5–5.0)$ млн. лет, что меньше времени циркуляризации их орбит [29]. У CVSO 104A наблюдают общий диск вокруг двойной. В работе [65] показано, что аккреция вещества из такого диска у двойной с отношением масс $q \sim 1$ может привести к эксцентриситету $e \approx 0.45$, если только эволюция не началась с почти круговой орбиты ($e \leq 0.08$).

В Каталоге орбит спектрально-двойных звезд (9-е издание) [66] около 90% SB2 звезд с $P < 10^d$ имеют эксцентриситеты, не превышающие значение 0.1.

2) системы с периодом $10^d < P < 100^d$, эксцентриситеты лежат в интервале от 0.1 до 0.7. Период двойных звезд может уменьшаться в процессе

эволюции в результате потери орбитального углового момента, а орбита приближаться к круговой. Возможно, часть систем в ходе эволюции переходят из этой группы в группу с $P < 10^d$. Об этом говорит и возраст звезд, в первой группе практически отсутствуют звезды с возрастом не более 1 млн. лет, в то время как во второй группе они составляют ~25%.

3) широкие двойные с $P > 100^d$ и эксцентриситетом $e > 0.2$. Широкие системы могут быть образованы в результате захвата, в этом случае возможен большой эксцентриситет. Эффекты приливного взаимодействия в таких двойных звездах слабые и орбита не будет существенно изменяться в процессе эволюции.

Распределение молодых SB2 звезд по отношению масс компонентов $q = \frac{M_2}{M_1}$ иллюстрирует рис. 3. Рисунок показывает, что максимум распределения приходится на интервал $q = (0.9–1.0)$.

У короткопериодических систем ($P < 10^d$) только 4 системы из 43 имеют $q < 0.5$, для ~50% из них отношение масс лежит в интервале от 0.9 до 1.0 (рис. 3а). Это не противоречит теоретическим предположениям о том, что основными механизмами образования тесных двойных звезд являются фрагментация и деление [8, 9]. Интересно отметить наличие второго максимума в интервале $q = 0.5–0.6$. Подобная особенность в распределении короткопериодических молодых двойных по отношению масс была отмечена нами ранее [5] и сохранилась при увеличении числа SB2 звезд. Возможно, часть короткопериодических систем являются членами молодых скоплений с большой плотностью звезд и образуются путем захвата.

Число SB2 систем с $P > 100^d$ невелико, поэтому мы объединили их с системами, имеющими период от 10^d до 100^d (рис. 3б). Из рисунка следует, что у молодых SB2 звезд с $P > 10^d$ распределение по отношению масс более пологое по сравнению с короткопериодическими двойными. В интервал $q = 0.9–1.0$ попала только треть систем, и 7 из 40 пар (около 12%) имеют отношение масс $q < 0.5$. Механизм образования широких двойных путем захвата предполагает преимущественно малое отношение масс в системах [8]. Полученные результаты не противоречат работам [11, 12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Собраны данные о 83 молодых спектрально-двойных звездах с двумя линиями в спектре, из них 31 система наблюдается как затменная переменная, 5 — как визуально-двойные. К Ae/Be

звездам Хербига относятся 14 компонентов, к звездам типа Т Тельца — 91, к красным карликам — 61. Для них построены распределения по эксцентриситетам и отношению масс компонентов, диаграмма эксцентриситет—период. Анализ полученных распределений позволяет сделать следующие выводы:

1. У половины молодых SB2 звезд эксцентриситеты лежат в интервале $e = 0.0-0.1$. Подавляющее большинство короткопериодических систем ($P < 10^d$) имеют круговые орбиты, что говорит о циркуляризации их орбит на стадии до НГП. У систем с периодом $10^d < P < 100^d$ эксцентриситеты принимают значения от 0.1 до 0.7, у широких двойных с $P > 100^d - e > 0.2$.

2. В группе короткопериодических SB2 звезд практически отсутствуют очень молодые системы с возрастом $t \leq 1$ млн. лет, в то время как в группе двойных с $10^d < P < 100^d$ и эксцентриситетом $0.1 < e < 0.7$ они составляют около 25%. Потеря орбитального углового момента компонента в ходе эволюции и приливное взаимодействие компонентов могут привести к уменьшению периода двойной системы, циркуляризации орбиты и пополнению группы короткопериодических систем.

3. В распределении двойных с $P < 10^d$ по отношению масс компонентов ярко выражен максимум в интервале $q = 0.9-1.0$ и очень мало пар с $q < 0.5$. Есть второй максимум в интервале $q = 0.5-0.6$. Можно предположить, что часть короткопериодических систем образуются путем захвата в молодых скоплениях с большой плотностью звезд. У пар с $P > 10^d$ уже около 12% имеют $q < 0.5$, максимум в интервале $q = 0.9-1.0$ менее значимый. Распределение молодых двойных по отношению масс не противоречит теоретическим механизмам образования тесных двойных звезд (фрагментации и делению) и возможности образования широких пар путем захвата.

Наблюдаемое распределение SB2 звезд по отношению масс компонентов искажено наблюдательной селекцией. Вероятность обнаружения двойной с двумя линиями в спектре выше при сравнимых светимостях (массах) компонентов. Обнаружению двойственности препятствуют малые значения амплитуд лучевых скоростей, неблагоприятная для наблюдений ориентация плоскостей орбит и другие факторы. Учет эффектов наблюдательной селекции должен привести к возрастанию доли SB2 систем с малыми отношениями масс компонентов ($q < 0.5$).

В будущем планируется исследование распределения молодых звезд по массам и отношению масс компонентов с учетом эффектов наблюдательной селекции, дальнейшее накопление данных о SB2 звездах, находящихся на стадии сжатия к НГП.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность С.А. Хайбрахманову за полезное обсуждение работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. З. Т. Крайчева, Е. И. Попова, А. В. Тутуков, Л. Р. Юнгельсон, Научные информации Астрон. совета АН СССР **67**, 3 (1989).
2. З. Т. Крайчева, Е. И. Попова, А. В. Тутуков, Л. Р. Юнгельсон, Астрофизика **30**, 524 (1989).
3. V. Trimble, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **242**, 79 (1990).
4. Н. З. Исмаилов, Г. А. Абди, Г. Б. Мамедханова, Астрон. циркуляр № 1610 (2014).
5. A. E. Dudorov and O. V. Eretnova, Astron. Astrophys. Trans. **29**, 437 (2016).
6. R. D. Mathieu, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **32**, 465 (1994).
7. C. H. F. Melo, E. Covino, J. M. Alcalá, and G. Torres, Astron. and Astrophys. **378**, 898 (2001).
8. H. Zinnecker, Astrophys. Space Sci. **99**, 41 (1984).
9. M. R. Bate, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **314**, 33 (2000).
10. M. R. Bate, I. A. Bonnell, and V. Bromm, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **336**, 705 (2002).
11. R. J. White and A. M. Ghez, Astrophys. J. **556**, 265 (2001).
12. G. D. Smith, E. Gillen, D. Queloz, L. A. Hillenbrand, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **507**, 5991 (2021).
13. G. H. Herbig, Advances in Astron. and Astrophys. **1**, 47 (1962).
14. А. Е. Дудоров, О. В. Еретнова, Челябинский физико-математический журнал **6**, 347 (2021).
15. Gaia Collaboration 2020, VizieR Online Data Catalog: I/350.
16. Gaia Collaboration 2022, VizieR On-line Data Catalog: I/355.
17. N. N. Samus, E. V. Kazarovets, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, Astronomy Reports **61**, 80 (2017).
18. A. Erdem, D. Sürgit, B. Özkardes, P. Hadrava, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **515**, 6151 (2022).
19. M. Morales-Calderón, J. R. Stauffer, K. G. Stassun, F. J. Vrba, et al., Astrophys. J. **753**, 149 (2012).

20. *G. Torres, C. H. S. Lacy, A. Claret, and J. A. Sabby*, *Astron. J.* **120**, 3226 (2000).
21. *L. Hebb, H. M. Cegla, K. G. Stassun, H. C. Stempels, P. A. Cargile, and L. E. Palladino*, *Astron. and Astrophys.* **531**, id. A61 (2011).
22. *S. J. Murphy, W. A. Lawson, C. A. Onken, D. Yong, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **491**, 4902 (2020).
23. *E. Gillen, L. A. Hillenbrand, J. Stauffer, S. Aigrain, L. Rebull, and A. M. Cody*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **495**, 1531 (2020).
24. *B. M. Tofflemire, A. L. Kraus, A. W. Mann, E. R. Newton, et al.*, *Astron. J.* **165**, 46 (2023).
25. *I. Czekala, S. M. Andrews, G. Torres, J. E. Rodríguez, et al.*, *Astrophys. J.* **851**, 132 (2017).
26. *L. Prato, D. Ruíz-Rodríguez, and L. H. Wasserman*, *Astrophys. J.* **852**, 38 (2018).
27. *J.-B. Le Bouquin, J.-L. Monin, J.-P. Berger, L. Prato, M. Benisty, and G. Schaefer*, *Astron. and Astrophys.* **561**, id. A101 (2014).
28. *J. M. Alcalá, E. Covino, C. Melo, and M. F. Sterzik*, *Astron. and Astrophys.* **384**, 521 (2002).
29. *A. Frasca, H. M. J. Boffin, C. F. Manara, J. M. Alcalá, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **656**, id. A138 (2021).
30. *J. S. Carr, R. D. Mathieu, and J. R. Najita*, *Astrophys. J.* **551**, 454 (2001).
31. *I. Czekala, S. M. Andrews, G. Torres, E. L. N. Jensen, K. G. Stassun, D. J. Wilner, and D. W. Latham*, *Astrophys. J.* **818**, 156 (2016).
32. *J. Wang, T. J. David, L. A. Hillenbrand, D. Mawet, S. Albrecht, and Z. Liu*, *Astrophys. J.* **865**, 141 (2018).
33. *C. C. Guillén, N. Lodieu, V. J. S. Béjar, D. Baroch, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **654**, id. A134 (2021).
34. *E. W. Guenther, M. Esposito, R. Mundt, E. Covino, J. M. Alcalá, F. Cusano, and B. Stecklum*, *Astron. and Astrophys.* **467**, 1147 (2007).
35. *G. Torres*, *Astron. J.* **127**, 1187 (2004).
36. *M. Esposito, E. Covino, J. M. Alcalá, E. W. Guenther, and E. Schisano*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **376**, 1805 (2007).
37. *M. E. Shultz, E. Alecian, V. Petit, S. Bagnulo, T. Böhm, C. P. Folsom, G. A. Wade, and the MiMeS Collaboration*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **504**, 3203 (2021).
38. *L. A. Marschall, and R. D. Mathieu*, *Astron. J.* **96**, 1956 (1988).
39. *V. Rosero, L. Prato, L. H. Wasserman, and B. Rodgers*, *Astron. J.* **141**, 13 (2011).
40. *M. Kounkel, L. Hartmann, J. J. Tobin, M. Mateo, J. I. Bailey, and M. Spencer*, *Astrophys. J.* **821**, 8 (2016).
41. *G. G. Sacco, E. Franciosini, S. Randich, and R. Pallavicini*, *Astron. and Astrophys.* **488**, 167 (2008).
42. *K. Kellogg, L. Prato, G. Torres, G. H. Schaefer, et al.*, *Astrophys. J.* **844**, 168 (2017).
43. *E. L. Martín, A. Magazzù, X. Delfosse, and R. D. Mathieu*, *Astron. and Astrophys.* **429**, 939 (2005).
44. *K. G. Strassmeier and J. B. Rice*, *Astron. and Astrophys.* **360**, 1019 (2000).
45. *E. Alecian, C. Catala, G. A. Wade, J.-F. Donati, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **385**, 391 (2008).
46. *N. Karnath, L. Prato, L. H. Wasserman, G. Torres, B. A. Skiff, and R. D. Mathieu*, *Astron. J.* **146**, 149 (2013).
47. *R. D. Mathieu, F. M. Walter, and P. C. Myers*, *Astron. J.* **98**, 987 (1989).
48. *L. Prato, M. Simon, T. Mazeh, I. S. McLean, D. Norman, and S. Zucker*, *Astrophys. J.* **569**, 863 (2002).
49. *S. Messina, P. Parihar, K. Biazzo, A. F. Lanza, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **457**, 3372 (2016).
50. *B. Reipurth, H. Lindgren, M. Mayor, J.-C. Mermilliod, and N. Cramer*, *Astron. J.* **124**, 2813 (2002).
51. *D. Ruíz-Rodríguez, L. Prato, G. Torres, L. H. Wasserman, and R. Neuhauser*, *Astron. J.* **145**, 162 (2013).
52. *G. Torres, R. Neuhauser, and E. W. Guenther*, *Astron. J.* **123**, 1701 (2002).
53. *G. N. Mace, L. Prato, L. H. Wasserman, G. H. Schaefer, O. G. Franz, and M. Simon*, *Astron. J.* **137**, 3487 (2009).
54. *E. Covino, C. Melo, J. M. Alcalá, G. Torres, M. Fernández, A. Frasca, and R. Paladino*, *Astron. and Astrophys.* **375**, 130 (2001).
55. *G. N. Mace, L. Prato, G. Torres, L. H. Wasserman, R. D. Mathieu, and I. S. McLean*, *Astron. J.* **144**, 55 (2012).
56. *H. C. Stempels, and G. F. Gahm*, *Astron. and Astrophys.* **421**, 1159 (2004).
57. *B. Reipurth, H. Lindgren, B. Nordström, and M. Mayor*, *Astron. and Astrophys.* **235**, 197 (1990).
58. *G. Torres, D. Ruíz-Rodríguez, M. Badenas, L. Prato, et al.*, *Astrophys. J.* **773**, 40 (2013).
59. *D. L. Padgett, and K. R. Stapelfeldt*, *Astron. J.* **107**, 720 (1994).
60. *J. P. Williams, and L. A. Cieza*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **49**, 67 (2011).
61. *K. H. Гранкин*, *Письма в Астрон. журн.* **42**, 353 (2016).
62. *S. S. R. Offner, M. Moe, K. M. Kratter, S. I. Sadavoy, E. L. N. Jensen, and J. J. Tobin*, *arXiv:2203.10066 [astro-ph.SR]*. (2022).
63. *J. P. Zahn, and L. Bouche*, *Astron. and Astrophys.* **223**, 112 (1989).
64. *Kh. F. Khaliullin, and A. L. Khaliullina*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **411**, 2804 (2011).
65. *J. Zrake, C. Tiede, A. MacFadyen, and Z. Haiman*, *Astrophys. J. Letters* **909**, id. L13 (2021).
66. *D. Pourbaix, A. A. Tokovinin, A. H. Batten, F. C. Fekel, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **424**, 727 (2004).

MASS RATIO AND ECCENTRICITY DISTRIBUTIONS OF YOUNG SPECTROSCOPIC BINARY STARS

O. V. Eretnova^a

^a*Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia*

We collected the information about 83 pre-main sequence double-lined spectroscopic binaries. Among them there are Ae/Be Herbig stars, T Tauri stars and red dwarfs. The eccentricity – period relation, the mass ratio and eccentricity distributions of young spectroscopic binaries are constructed and analyzed. The overwhelming majority of close binaries with $P < 10^d$ have eccentricity near to zero, the stars less than 1 million years old are rare among them. The mass ratio distribution of systems with $P < 10^d$ has a prominent maximum in a range of $q = 0.9\text{--}1.0$. The number of young spectroscopic binaries with $P > 10^d$ does not decrease with decreasing mass ratio as sharply as in the case of close binary stars, about 12% of these stars have $q < 0.5$. The paper is based on a talk presented at the astrophysical memorial seminar “Novelties in Understanding the Evolution of Binary Stars”, dedicated to the 90th anniversary of Professor M.A. Svechnikov.

Keywords: pre-main sequence stars, spectroscopic binaries, mass ratio distribution, eccentricity distribution