Исследование кратных звезд Пулковской программы наблюдений на 26-дюймовом рефракторе

О.В. Кияева¹, В.В. Орлов^{1,2}, Р.Я. Жучков³

¹Пулковская обсерватория, ²Санкт-Петербургский государственный университет, ³Казанский (Приволжский) федеральный университет

Исследован динамический статус 13 далеких визуально-тройных систем с общим собственным движением компонентов, которые наблюдаются на 26-дюймовом рефракторе в Пулково. Оценены вероятности гравитационной связанности компонентов в системах.

Рассматриваются движения в картинной плоскости для одного и того же параллакса для всех компонентов и относительных лучевых скоростей $V_r = 0$. Мы получаем максимальное значение отношения модуля потенциальной энергии к кинетической в системе $\kappa = |U/T|$. При $\kappa \ll 1$ в системе имеются оптические компоненты, при $\kappa \geq 1$ для уверенных выводов необходимы относительные лучевые скорости звезд.

Алгоритм

Входные данные: n – число компонентов в системе;

π – параллакс;

M_i – массы звезд, $i=1, \dots, n$;

$t_{j,k}$ ($k=1,2$) – моменты времени;

$x_{i,k}, y_{i,k}$ [AE] – координаты компонентов, вычисленные на основе параметров видимого движения и параллакса на 2 момента времени.

Координаты центра масс системы:

$$x_{c,k} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{i,k} M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}, \quad y_{c,k} = \frac{\sum_{i=1}^n y_{i,k} M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}$$

$r_{i,j}$ – расстояние между компонентами i и j ;

Для $t=(t_1+t_2)/2$

V_i – скорость i -го компонента относительно центра масс;

$E=T+U$ – полная энергия системы.

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i v_i^2,$$

$$U = -G \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{M_i M_j}{r_{ij}},$$

$$\kappa = \frac{|U_S|}{T_S} \geq \frac{|U|}{T}.$$

Вероятность P того, что $\kappa \geq 1$ вычислена методом Монте-Карло (κ' erg). Параллакс π_{crit} соответствует $\kappa = 1$.

Вероятности физической связи кратных систем

WDS/ADS	$\pi \pm \sigma, \text{mas}$	Comp.	Mass $\pm\sigma, M_\odot$	κ	$\kappa' \pm \sigma$	$P, \%$	π_{crit}, mas
1	2	3	4	5	6	7	8
00057+4549 48	88.7 1.6	ABF	0.6+0.5+0.4 .1 .1 .1	5.0	5.0 0.7	100	51.7
01393+5257 1289	1.8 0.6	ABC	1.8+1.6+1.4 .1 .1 .1	0.0015	0.0015 .0005	0	15.7
02122+4440 1693	6.2 0.8	ABC	1.2+0.85+0.75 .1 .1 .1	0.14	0.15 .08	0	11.8
02322+5415 1918	2.4 .3	ABC	1.8+1.4+1.65 .1 .1 .1	0.13	0.13 .03	0	10.3
04009+2312 2926	3.0 1.4 6.2 0.8	ABC ABC	3.7+2.7+2.0 .5 .5 .3 3.7+2.7+2.0 .5 .5 .3	0.2 1.6	0.2 1.8 1.4	0.5 75.2	5.3 5.3
06034+2738 4629	5.8 0.7 11.3 5.2	ABC ABC	1.5+1.6+0.9 .1 .1 .1 0.9+1.6+0.9 .1 .1 .1	0.020 0.11	0.020 0.11 .01	0	21.3 23.5
09343+6648 7425	4.4 1.9	ABC	1.4+1.3+1.1 .2 .1 .1	0.005	0.005 .001	0	25.2
09354+3958 7438	11.7 0.9	ABC	4.0+1.65+1.3 .2 .15 .2	0.0198	0.020 .0030	0	43.6
11551+4629 8347	4.0 .4 4.0 .4 4.0 .4 4.0	(AB)- C-D (AB)- C-D (AB)- C-D (AB)- C-D	8.2+2.0+3.0 1.8 .2 .2 8.2+2.0+4.5 1.8 .5 .5 5.2+2.0+3.0 1.0 .3 .2 5.2+2.0+4.5 1.0 .5 .5	0.07 0.06 0.05 0.04	0.07 .02 0.06 .02 0.05 .01 .01	0	9.5 10.3 10.6 11.4
14375+4743 9327	12.0 2.0 12.0 2.0 12.0 2.0	ABC ABC	0.9+1.2+1.6 .1 .3 .3 0.9+0.6+1.6 .1 .1 .1 0.9+0.6+0.8 .1 .1 .1	0.27 0.18 0.24	0.29 .12 0.19 .08 0.26 .11	0.1 0	18.5 21.1 19.2
15245+3723 9626	28.0 0.7	(Aa)BC	(1.6+1.5)+1.2+1.0 .1 .1 .1	9.8	10.6 3.6	100	13.0
15589+2147 9865	3.0 1.0	ABC	1.0+2.1+1.9 .1 .3 .3	0.005	0.005 .001	0	17.1
16579+4722 10288	56.0 0.5	ABC	0.7+0.4+0.7 .1 .1 .1	8.6	8.5 1.8	100	30.2

Контрольные звезды с известными лучевыми скоростями

WDS/ADS	$\pi \pm \sigma, \text{mas}$	Comp.	Mass $\pm\sigma, M_\odot$	$V_r \pm \sigma, \text{km/s}$	κ	$\kappa' \pm \sigma$	$P, \%$	π_{crit}, mas
00057+4549 48 [12]	88.7 1.6	ABF	0.6+0.5+0.4 .1 .1 .1	(+0.8) + (-2.2) + (-1.0) 0.2 0.2 0.3	2.0	2.0 0.3	100	70.5
15245+3723 9626 [13]	28.0 0.7	AaBC	3.1+2.2 .3 .2	(-11.6) + (-7.4) + (-9.3) 1.5 0.4 0.1	0.2	0.7 1.6	12.9	45.5
16579+4722 10288 [11]	56.0 0.5	ABC	0.7+0.4+0.7 .1 .1 .1	(-7.1) + (-8.0) + (-7.6) 0.2 0.3 0.2	6.2	5.9 1.4	100	30.2

Связанные системы и подсистемы
Все компоненты в системе оптические
ADS 9626 – благодаря спектроскопическим наблюдениям на РТТ 150 получены лучевые скорости и физические параметры компонентов. Получено, что с вероятностью 87% наблюдается сближение двух независимых пар Aa и BC

Физические параметры компонентов системы ADS 9626

Parameter	A + a	B	C
$V_{micro}, \text{km/s}$	3 + 3	1.4	1.4
$V_{macro}, \text{km/s}$	4 + 4	2.5	2.5
$V \sin i, \text{km/s}$	(89 + 40) $\pm$ 10	5 $\pm$ 2	9 $\pm$ 3
[M/H]	-0.5 $\pm$ 0.2	0.05 $\pm$ 0.10	-0.05 $\pm$ 0.10
$\log g$	(3.4 + 3.6) $\pm$ 0.5	4.3 $\pm$ 0.1	4.4 $\pm$ 0.1
T_{eff}, K	(7000 + 7000) $\pm$ 400	6000 $\pm$ 100	5900 $\pm$ 100
Spectral type	F0–F4	F9–G0	G0–G1
$M, M_\odot$	(1.6 + 1.5) $\pm$ 0.1	1.24 $\pm$ 0.10	1.05 $\pm$ 0.10

Заключение

- Цель данной работы – выявить оптические компоненты в кратных звездных системах.
- Предложен алгоритм оценки вероятности физической связи компонентов.
- Используются данные о физических свойствах звезд из литературы. Иногда они противоречивы, поэтому рассматриваются разные варианты.
- Для выводов о физической связи компонентов мы учитываем также величину расхождения принятого значения параллакса π с критическим π_{crit} , а также сравнение относительных движений внутренних и внешних подсистем.
- Исследованы 3 контрольные звезды – ADS 48, 9626 и 10288 – с известными орбитами для проверки эффективности метода. Если не принимать во внимание лучевые скорости, то система ADS 9626 AaBC физически связана, но если добавить наблюдения лучевых скоростей компонентов, то, вероятно, наблюдается пролет двух независимых пар звезд по относительной гиперболической орбите.

Оценки масс и фотометрических параллаксов

WDS ADS	Комп.	$B - V$	m_V	$J - K$	m_K	Sp	$\mu_x, \text{mas/yr}$	$\mu_y, \text{mas/yr}$	π, mas	Mass, $M_\odot$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
00057+4549 48	A B F	1.34 1.34 1.48	8.83 9.00 9.97	0.84 0.86 0.85	5.26 5.28 5.58	K6-M0 V M0 V M2e	+870 +837 +870	-164 -163 -151	88.4 $\pm$ 1.6 88.7 $\pm$ 1.0 88.9 $\pm$ 0.4	0.6 0.5 0.4
01393+5257 1289	A B C	0.23 0.3 1.30	9.86 11.0 10.65	— — 0.73	— — 7.84	A5-9 V A5-9 V K3 III	+2 -3 +5	-7 -5 -1	3.2 1.6 0.8	1.8 1.6 1.4
02122+4440 1693	Aa B C	0.85 — —	10.83 11.13 11.91	— — 0.67	— — 9.27	G5V+(M3-5 V) G5 V G5 V	-15 -12 -5	-1 0 -3	6.2 $\pm$ 0.8 6.2 4.3	0.9+0.3 0.85 0.75
02322+5415 1918	A B C	0.22 0.4 0.3	10.09 11.2 10.5	— — —	— — —	B9 IV-A7 V A-F3-4 V A-F0 V	+2 +6 —	-5 +2 —	1.8 2.6 2.7	1.8 1.4 1.6
04009+2312 2926	A B C	— — 0.45	6.92 7.76 9.61	— 0.09 0.08	— 7.23 8.48	B9 V B8-A3 V A5-F2 IV-V	+15 +15 +13	-35 -35 -35	3.0 $\pm$ 1.4 5.6 3.0	3.7 2.7 2.0
06034+2738 4629	A B C	0.78 0.31 0.69	8.81 9.68 11.10	0.44 — —	6.87 — —	F2(G7) A7-F2 G5 ?	+2 +7 -2	-33 -20 -36	6.6(21.8) 4.2 6.0	1.5(0.9) 1.6 0.9
09343+6648 7425	A B C	0.43 0.46 0.46	8.26 8.20 9.11	0.22 0.23 0.22	7.21 7.15 8.11	F4-6 III-V F5-6 III-V F6-G III	-23 -23 -40	-28 -28 -28	4.4 $\pm$ 1.9 3.0 $\pm$ 1.7 —	1.4 1.3 1.1
09354+3958 7438	A B C	0.33 0.38 0.40	6.77 8.03 8.40	0.17 0.04 0.05	5.82 6.87 7.21	A3m (F2 V+F3 V+G3 V) G (F5V+?) (F4 V) G0 (F0)	-1 -3 -33	+14 +12 -20	11.7 $\pm$ 0.93 11.8 $\pm$ 5.64 12.8 $\pm$ 1.02	4.0 1.65 1.3
11551+4629 8347	AB C D(ab)	0.10 — 0.04	6.54 8.32 6.99	— — -0.05	— — 6.86	A3 Vn — A1(+F)	+10 +10 +12	+3 +3 —	4.7 $\pm$ 0.6 — 3.4 $\pm$ 0.6	8.2 (5.2) 2.0 3.0(+1.5)
14375+4743 9327	A B C(ab)	0.74 — 1.06	10.15 11.90 10.10	— -0.45 0.64	— 9.83 7.56	G5 — K0	-5 — -13	-7 — -7	10.2 — 14.4	0.9 0.6(1.2) 0.8(+0.8)
15245+3723 9626	Aa B C	0.29 — —	4.31 7.09 7.63	0.16 — —	3.62 — —	F0-F4 F9-G0 G0-1	-147 -151 -151	+86 +87 +87	28.83 $\pm$ 0.74 27.73 $\pm$ 0.65 —	3.1 1.2 1.0
15589+2147 9865	A B C	1.40 0.29 —	8.45 9.25 9.7	0.89 — —	5.17 — —	K4 (G8 V) (K5 III) A2-7 V K (A5-7 III-V)	-16 -17 +3	+29 -13 +30	3.0 $\pm$ 1.0 2.3 0.0	1.0 2.1 1.9
16579+4722 10288	A B C	0.98 1.47 1.04	7.82 11.19 7.88	— 0.78 0.56	— 6.09 5.54	K0 V — K0-3 V	-147 -147 -143	+272 +272 +245	54.6 $\pm$ 0.6 54.6 $\pm$ 0.6 56.2 $\pm$ 0.5	0.7 0.4 0.7

Мы использовали тригонометрические параллаксы из каталога Гиппаркос, если они известны (приводятся с ошибкой). Фотометрические параллаксы и массы соответствуют данным литературы. Иногда рассматривали несколько вариантов.

Вероятности гравитационной связи двойных подсистем в кратных системах

WDS/ADS	$\pi \pm \sigma, \text{mas}$	Comp.	Mass $\pm\sigma, M_\odot$	κ	$\kappa' \pm \sigma$	$P, \%$	π_{crit}, mas
01393+5257 1289	1.8 0.6 1.8 0.6 1.8	AB BC AC	1.8+1.6 .1 .1 1.8+1.4 .1 .1 1.6+1.4 .1 .1	0.002	0.002 0.0013 0.0013	0	14.2 35.7 35.9
02122+4440 1693	6.2 0.8 6.2 .8 6.2	AB AC BC	1.2+0.85 .1 .1 1.2+0.75 .1 .1 0.85+0.75 .1 .1	0.17	0.12 0.012 0.007	0	7.1 27.2 33.1
02322+5415 1918	2.4 .1 2.4 .1 2.4	AB AC BC	1.8+1.4 .1 .1 1.8+1.6 .1 .1 1.4+1.65 .1 .1	0.02	0.03 0.007 0.015	0	8.4 12.6 10.7
04009+2312 2926	3.0 1.4 6.2 0.8	AB AB AB	3.7+2.7 .5 .5 3.7+2.7 .5 .5	0.8 0.9 6.8	0.3 1.0 8.8	27.0 3.3 3.3	
06034+2738 4629	5.8 0.7 5.8 0.7 11.3 5.2 11.3 5.2	AB AC C BC AB AC BC	1.5+1.6 0.1 .1 1.5+0.9 0.1 .1 1.6+0.9 .1 .1 0.9+0.9 0.1 .1 1.6+0.9 .1 .1	0.018	0.018 .002 0.3 0.007 0.11 0.01 1.8 0.06 0.03	0	22.0 8.5 30.7 22.4 9.3 29.0
09343+6648 7425	4.4 1.9 4.4 1.9 4.4	AB AC BC	1.4+1.3 .2 .1 1.4+1.1 .2 .1 1.3+1.1 .2 .1	0.24	0.25 .08 0.004 0.004 0.004	0	7.1 59.3 59.6
09354+3958 7438	11.8 0.9	AB	4.0+1.65 .2 .1	1.4	1.5 0.5	88.6	10.4
11551+4629 8347	4.0 .4 4.0 .4	(AB) C (AB) C	8.2+2.0 .1 .1 5.2+2.0 1.0 .5 10.2+4.5 1.0 .5	2.4	2.4 1.2 3.4 8.7	99.7 45.4	3.0 4.0
ПВД 1990.0 ПВД 1990.0	4.0 4.0	(ABC) D (ABC) D	10.2+4.5 2.0 .5 7.2+3.0 1.4 .2	0.7	3.4 8.7 2.4 6.0	39.0 4.5	5.1 5.5
14375+4743 9327	12.0 2.0	AB	0.9+0.6 .1 .1	5.4	10.0 27.3	99.2	6.8
15589+2147 9865	3.0 1.0	BC	2.1+1.9 .3 .3	0.34	0.42 0.67	4.7	4.3

Литература

- H. A. Abt, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 45, 437 (1981).
- Zh. P. Anosova, E. V. Berdnik and L. G. Romanenko, *Astron.Circular*, N 1517, 1 (1987).
- Yu. Yu. Balega, V. V. D'yachenko, A. F. Maximov et al., *Astrophys. bull.*, 67, 44 (2012).
- F. van Leeuwen, *Astron. Astrophys.*, 474, 653 (2007).
- J. H. J. de Bruijne and A.-C. Eilers, *Astron. Astrophys.*, 546, 61 (2012).
- L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astron. Astrophys. Suppl.*, 141, 371 (2000).
- P. Zsche, R. Uhlar, M. Slichta et al., *Astron. Astrophys.*, 542, A78 (2012).
- I. S. Izmailov, M. L. Chovrichева, M. Yu. Chovrichев et al., *Pis'ma Astron Zh.*, 36, 365 (2010).
- A. A. Kiselev and O. V. Kiyayeva, *Astron. Zh.*, 57, 1227-1241 (1980)
- A. A. Kiselev, O. V. Kiyayeva, I. S. Izmailov et al., *Astron. Zh.*, 91, 130 (2014).
- A. A. Kiselev, L. G. Romanenko and N. A. Goryunya, *Astron. Zh.*, 86, 1216 (2009).
- O. V. Kiyayeva, A. A. Kiselev, E. V. Polyakov, V. B. Rafal'sky, *Pis'ma Astron Zh.*, 27, 456 (2001).
- O. V. Kiyayeva, R. Ya. Zhuchkov, V. V. Orlov et al., *Astron. Zh.*, 91, 943 (2014).
- A. N. Cox, *Allen's Astrophysical Quantities*. (Berlin: Springer, 2000).
- B. D. Mason, G. L. Wycoff, W. I. Hartkopf et al., *WDS Catalog*, *Astron. J.*, 122, 3466 (2001).
- A. A. Tokovinin and M. G. Smekhov, *Astron. Astrophys.*, 382, 118 (2002).
- A. A. Tokovinin, *MSC Catalog* *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 124, 75 (1997).