

Динамическое исследование кратных звезд

Кияева О.В., Жучков Р.Я.

Пулковская обсерватория,
Казанский университет

Екатеринбург, июнь 2017

Памяти Виктора Владимировича Орлова

3.10.1956-23.05.2016



Работа — на первом месте
Организатор — собрал нас в команду
Комфортная рабочая атмосфера

Его идея — повторить исследование T Tauri на новом материале

Тройная система T Tauri со слабой иерархией.

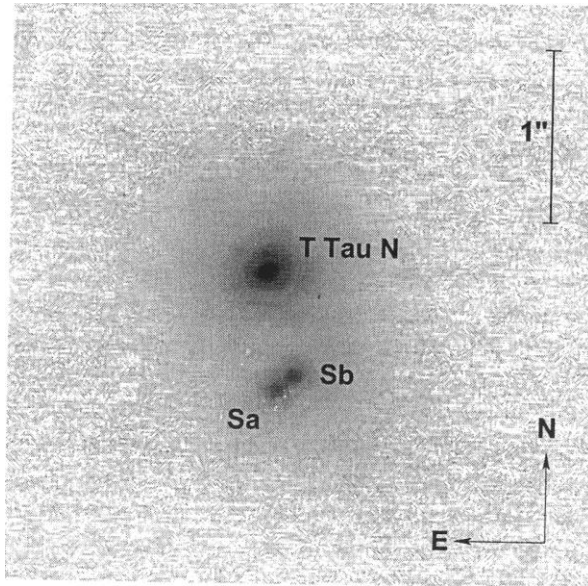
- Одиочная T Tau открыта в 1852г (Хинд)
- Пара NS обнаружена в 1982, $\rho=0.6''$ (Дик и др., 1982).
- Пара Sa-Sb открыта в 1983г., $\rho=0.05''$,
надежные наблюдения с 1997г. (Кореско и др., 2000)
- Звезда Sa – переменная
- Пара Na-Nb (Нисенсон и др., 1985) $\rho=0.27''$, не подтверждена
- Эволюционный статус системы – молодой объект до главной последовательности.

Цель данного исследования

- 1) Определение орбит внутренней пары Sa-Sb и внешней пары N-S на основе новых высокоточных наблюдений.
- 2) Определить вероятность распада данной системы

1. H.M.Dyck et al., *Astrophys. J.*, **255**, 103 (1982)
2. C.D.Koresko, *Astrophys. J.*, **531**, 147 (2000)
3. R.Koehler et al., *Astron. Astrophys.*, **482**, 929 (2008)
4. R.Koehler, in “*Universe under the Microscope ...*” *Conf. ser.*, **131** (2008)
5. Р.Я.Жучков, О.В.Кияева, В.В.Орлов., *Астрон. Ж.*, **87**, 43 (2010)
4. **G.H.Schaefer et al., *Astron. J.*, 147, 157 (2014)**
5. **R.Koehler et al., *Astron. Astrophys.*, 587, 35 (2016)**

Тройная система Т Таври (Koehler et al.)



NAOS/CONICA (Nasmyth Adaptive Optics System /Coude Near Infrared Camera) 11.10.2006

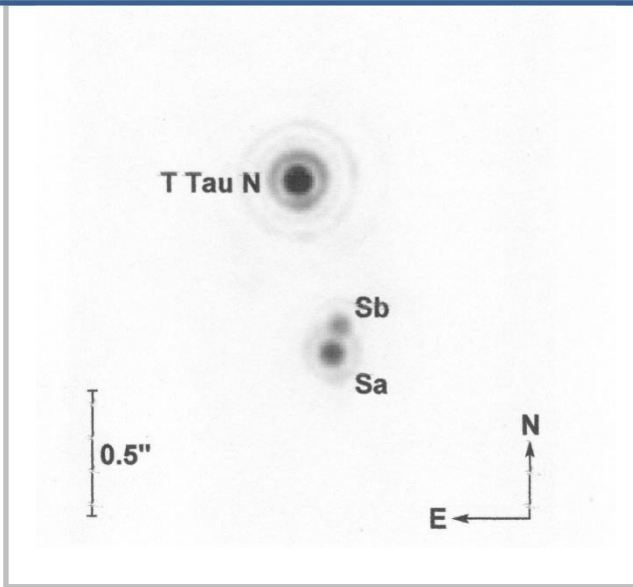


VLT ESO, Cerro Paranal, Chile

2001-2009 – наблюдения NACO, 9 набл.

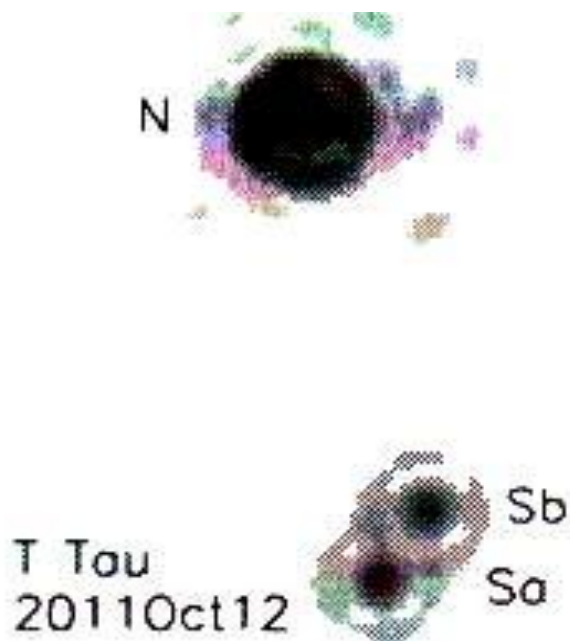
2014, 2015 – наблюдения SPHERE

SPHERE - Spectro-Polarimetric High-contrast
Exoplanet REsearch 9.12.2014



Определены орбиты Sa-Sb и NS

Тройная система Т Таври (Schaefer et al.)



Keck II Telescope, 10m, NIRC2
11 наблюдений 2002-2014

Определена орбита Sa-Sb.

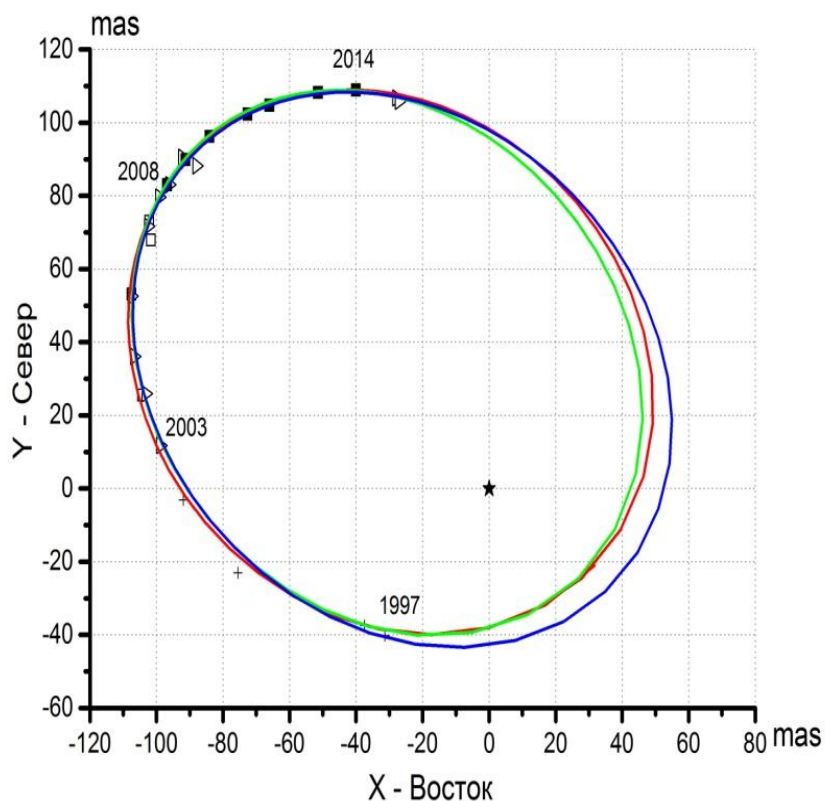
Определение ПВД-орбиты внутренней пары Т Tau Sa-Sb

ПВД на эпоху **2010.5** по ряду 2008-2014

ρ , mas	θ , ⁰	μ , mas/yr	ψ , ⁰	ρ_c , mas
126.69 ±0.12	321.93 ±0.13	10.63 ±0.12	60.0 ±0.3	64 ±2

$S(\Sigma M, \Delta V_r)$ - min

$\Sigma M / \Delta V_r$	1.2 km/s	1.4	1.5	1.6	1.8
2.7, Sun	4.28mas	3.73	3.48	3.24	2.81
2.8	2.74	2.13	1.86	1.61	1.23
2.9	1.40	0.94	0.86	0.93	1.31
3.0	0.91	1.37	1.69	2.02	2.67
3.1	1.82	2.57	2.95	3.32	4.03



$$\Sigma M = 2.9 \pm 0.1 \text{ Sun}$$

$$|\Delta V_r| = 1.5 \pm 0.3 \text{ km/s}$$

Параллакс

HIP: $5.48 \pm 1.58 \text{ mas}$

VLBA: $6.8 \pm 0.1 \text{ mas}$

Элементы орбит пары Sa-Sb

Орбиты	ПВД 2017	Schaefer 2014	Koehler 2015
a, mas	88.0±1.5	89±7	85±4
a, AE	12.9±0.2	13.1±1.0	12.5±0.6
P, yr	27.4±0.7	29±4	27±2
e	0.55±.02	0.49±.12	0.56±.09
i, ⁰	25.8±2.8	29±12	20±10
ω, ⁰	237.5±5.1	218±14	228±34
Ω, ⁰	264.7±6.0	287±19	272±36
T, yr	1996.3±0.4	1995.8±0.9	1996.1±0.8
Параллакс, mas	6.8±0.1	6.8	6.8
ΣM, M _{Sun}	2.9±0.1	2.7±0.2	2.65±0.1

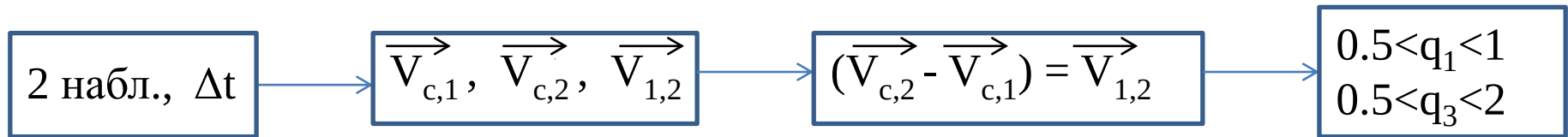
Астрометрическая оценка масс компонентов.

Исходные данные – однородные наблюдения:

$t_j, (\rho, \theta)_{Sa-Sb}, (\rho, \theta)_{N-Sa}, (\rho, \theta)_{N-Sb} \quad j=1, 21 \text{ (наблюдений)}$

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

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



Скомпановано 27 пар из однородных наблюдений, $1 < \Delta t < 2$ года :

$$q_1 = 0.84 \pm 0.03, \quad q_3 = 1.1 \pm 0.1,$$

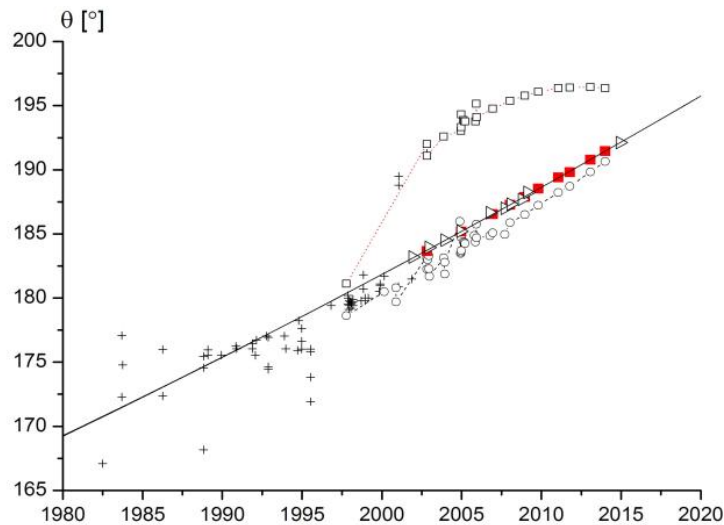
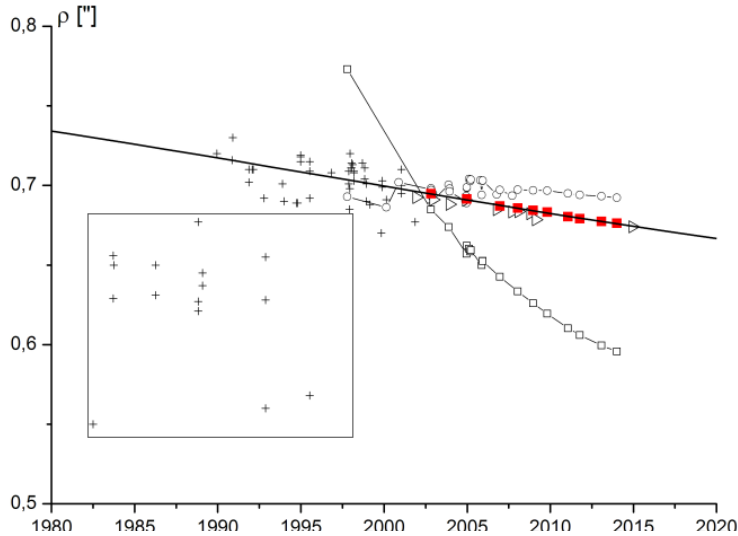
	M_{Sa} [Sun]	M_{Sb} [Sun]	M_N [Sun]	ΣM [Sun]	M_{Sb}/M_{Sa}
Мы	2.44 ± 0.07	0.46 ± 0.07	3.2 ± 0.3	6.1 ± 0.3	0.19 ± 0.04
Koehler	2.12 ± 0.10	0.53 ± 0.06	1.95	4.6	0.25 ± 0.03

Loinard et al., ApJ, 671, 546, 2007: $1.7 < M_N < 2.2$

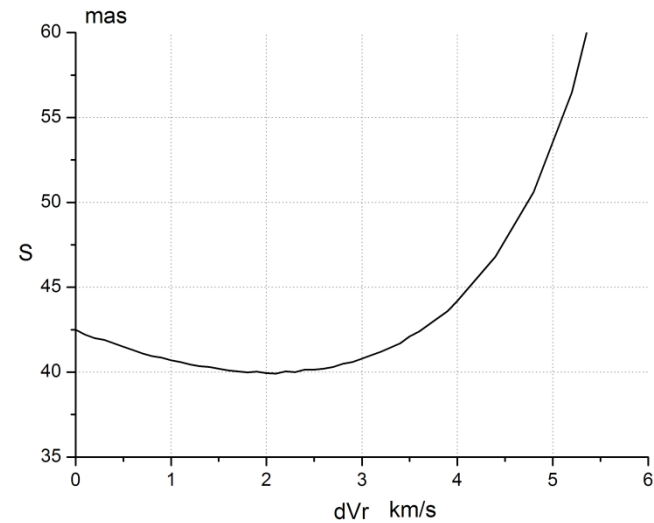
Определение орбиты внешней пары NS

ПВД на эпоху **2009.0** по ряду 2002-2015

ρ , mas	θ , $^{\circ}$	μ , mas/yr	ψ , $^{\circ}$	ρ_c , mas
684.11 ± 0.17	187.939 ± 0.015	8.45 ± 0.06	289.4 ± 0.4	840 ± 10



$S(\Delta V_r)$ $\Sigma M = 6.1 M_{\text{Sun}}$



$|\Delta V_r| = 2.0 \pm 1.0 \text{ km/s}$

Элементы орбиты пары NS

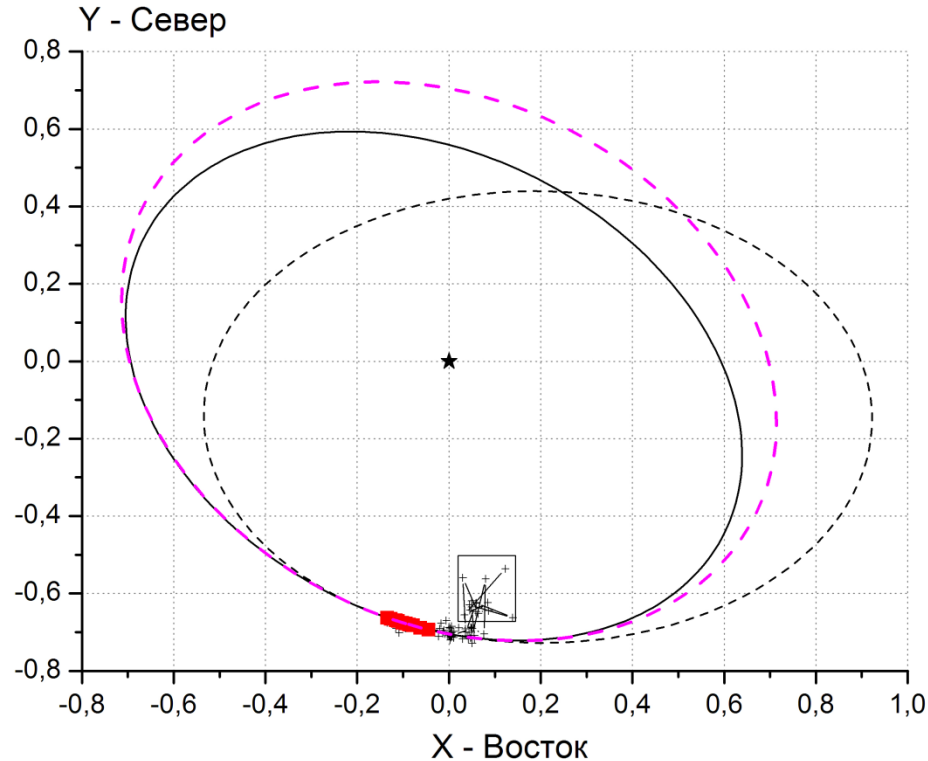
Орбиты	ПВД 1	ПВД 2	Круговая	Koehler
a, mas	800±125		793±5	2900 ⁺⁵⁴⁰⁰ ₋₁₇₀₀
a, AE	117.6±18.4		116.6±0.8	430 ⁺⁷⁹⁰ ₋₂₅₀
P, yr	516.9±126.1		558.3±5.4	4200 ⁺⁵⁰⁰⁰ ₋₃₄₀₀
e	0.10±.09	0.39±.06	0.0	0.7 ^{+0.2} _{-0.4}
i, ⁰	43.0±3.6	38.0±3.0	36.8±0.8	52 ⁺⁴ ₋₅
ω, ⁰	293±50	48.2±6.2	-	12 ⁺¹⁰ ₋₆
Ω, ⁰	137.6±9.2	255.1±3.0	136.5±1.0	156±11
T, yr	1842±74	1601±140	-	1967.1 ⁺²⁵ ₋₄₇
Параллакс, mas	6.8±0.1		6.4 (M=6.1) 6.8 (M=5.1)	6.7
ΣM, M _{Sun}	6.1±0.3		-	4.6±0.1

Элементы орбиты пары NS с разными массами

Орбиты	ПВД 1	ПВД 2	ПВД 1	ПВД 2
a, mas	800±125		763±91	
a, АЕ	117.6±18.4		112.2±13.4	
P, yr	516.9±126.1		526.2±96.3	
e	0.10±.09	0.39±.06	0.05±.10	0.30±.07
i, ⁰	43.0±3.6	38.0±3.0	35.3±4.2	31.3±3.1
ω, ⁰	293±50	48.2±6.2	203±37	37.5±5.3
Ω, ⁰	137.6±9.2	255.1±3.0	131.9±13.2	263.0±16.2
T, yr	1842±74	1601±140	1685±277	1601±113
ε, ⁰	61	13	56	6
Параллакс, mas	6.8±0.1		6.8±0.1	
ΔV _r , km/s	2.0±1.0		1.6±1.0	
ΣM, M _{Sun}	6.1		5.1	

- ε – угол между полюсами внутренней и внешней орбиты.
- Влияние массы незначительно, в пределах ошибок все элементы согласуются между собой.

Орбиты пары NS в картинной плоскости



Для определения орбит по коротким дугам надо использовать только динамические методы, к каким относится метод ПВД.

Устойчивость системы T Tauri

ПОДХОД:

Для анализа использовались численное моделирование эволюции путем решения задачи трех тел (на 1 млн лет вперед и назад) методом Монте-Карло для 1001 реализации орбитального решения [Жучков, Орлов 2005]

Для этих же реализаций применялись критерии

Арсета (2003)
$$Z_2 = \frac{a_{ex}(1 - e_{ex})}{a_{in}} > Z_c = 2.8 \left[\left(1 + \frac{m_3}{m_B} \right) \frac{1 + e_{ex}}{(1 - e_{ex})^{1/2}} \right]^{2/5}$$

и Валтонена (2008)
$$Q_3 = \frac{a_{ex}(1 - e_{ex})}{a_{in}} > Q_c = 3 \left(1 + \frac{m_3}{m_B} \right)^{1/3} \left(\frac{7}{4} + \frac{1}{2} \cos i - \cos^2 i \right)^{1/3} (1 - e_{ex})^{-1/6}$$

Устойчивость системы T Tauri

результат:

Рассмотрены два решения: ($e=0.1$) и ($e=0.39$)

Для первого вероятность распада $P_{\text{decay}}=0.008$ согласно моделирования, согласно критериев $P_{z2}=0.009$ и $P_{q3}=0.017$
для второго вероятность распада $P_{\text{decay}}=0.15$ согласно моделирования, согласно критериев $P_{z2}=0.26$ и $P_{q3}=0.29$, т.е.

СИСТЕМА УСТОЙЧИВА

ВЕРОЯТНОСТЬ РАСПАДА НЕ БОЛЕЕ 30%.

Это подтверждает результат нашей работы 2010 года, где вывод предварителен из-за неопределенности внешнего периода P_{out} .
Но сделанное там предположение, что для P_{out} от 300 до 5500 лет система будет устойчива, подтвердилось при анализе новых наблюдательных данных ($P_{\text{out}}=517$ лет).

ADS 9173 – четверная система.

- Пара АВ ($\rho=13''$) открыта Струве в 1822, $P \approx 6000$ лет.
- Компонент А ($m=4.5$, $SP=A8IV$, $\text{par}=19.9 \pm 0.6$) – переменная типа δ Щита.
- Компонент В ($m=6.7$, $SP=F8V$, $\text{par}=21.5 \pm 1.0$) – SPB-1, орбита определена (G.A.Bakos, AJ, 91, 1416, 1986)
- В Пулковско на 26'' рефракторе визуальная пара АВ наблюдается с 1982г. Фотографически – 1982-2004, 48 пластинок, ПЗС – 2003-2012, 54 серии.

Для данного исследования используются только пулковские наблюдения.

Результат данного исследования:

- 1) Открытие невидимого спутника у компонента А.
- 2) Определение внутренних астрометрических орбит фотоцентров компонентов А и В по невязкам относительно орбитального движения пары АВ.

Метод

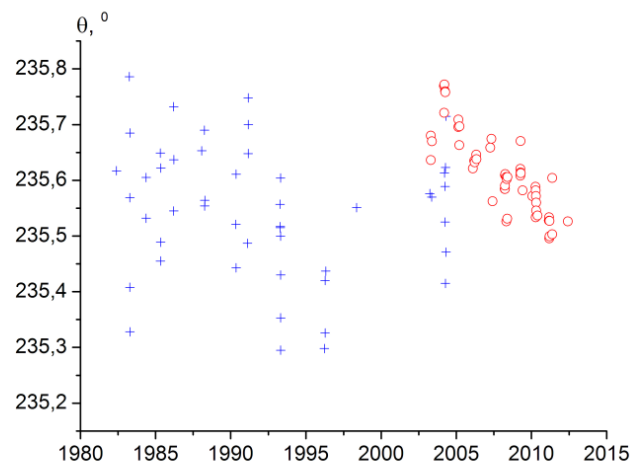
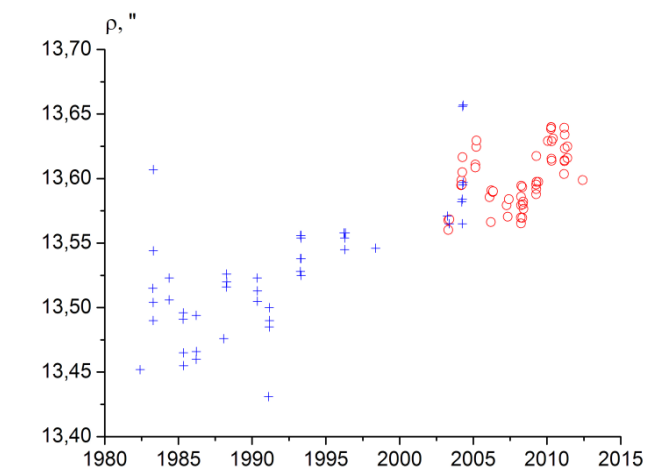
X_i, Y_i – невязки относительно орбитального движения по прямому восхождению и склонению на момент t_i .

$X_i = \cos E_i - e$ $Y_i = \sqrt{1-e^2} \sin E_i$ – орбитальные координаты, соответствующие заданным элементам P, T, e , на момент t_i .

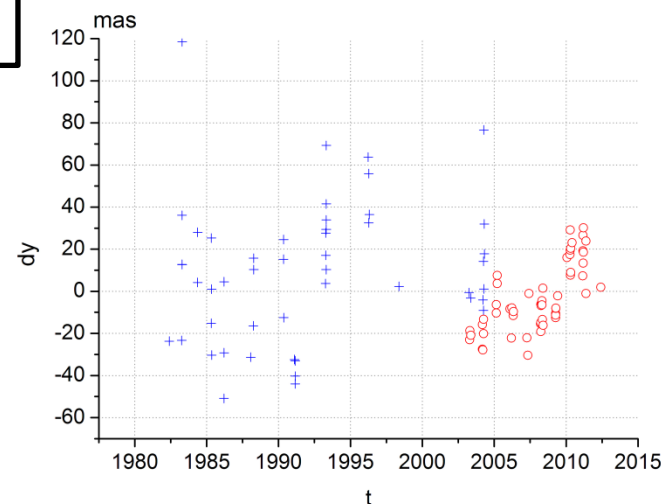
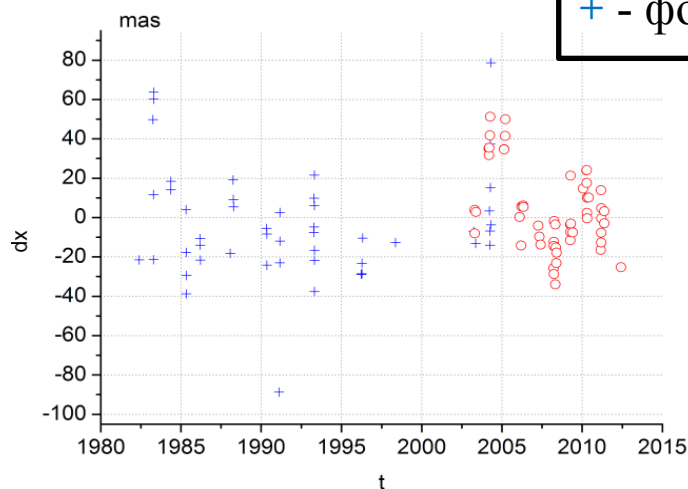
$$x_i = x_0 + BX_i + GY_i \quad \Longrightarrow \quad A, B, F, G \quad \Longrightarrow \quad a, i, \Omega, \omega$$

$$y_i = y_0 + AX_i + FY_i$$

ADS 9173 – исходные данные

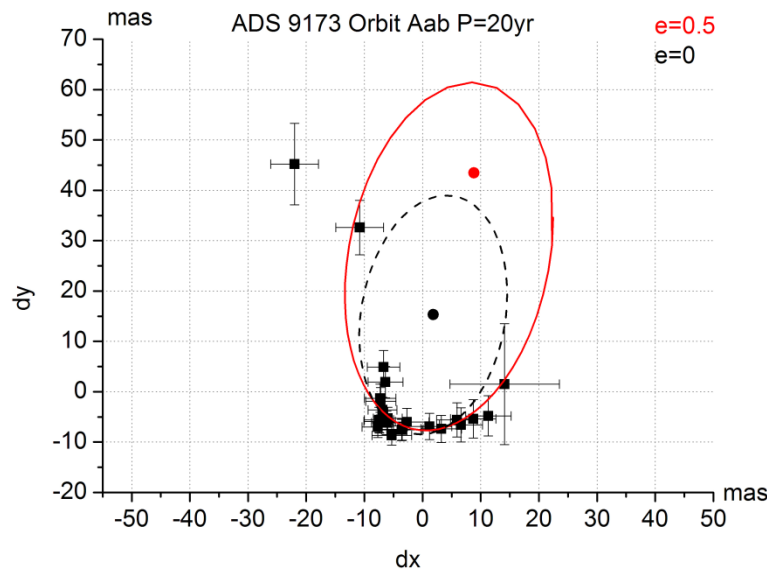
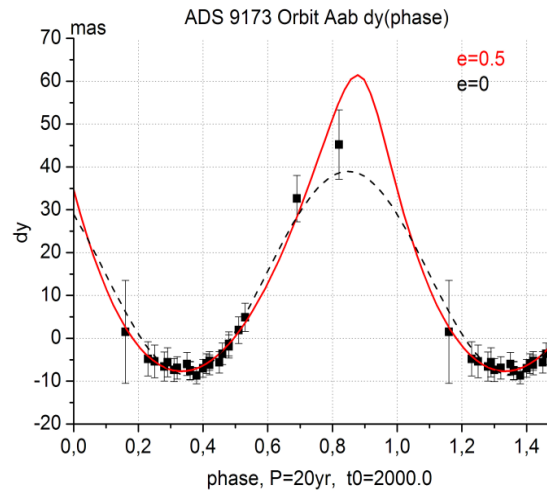
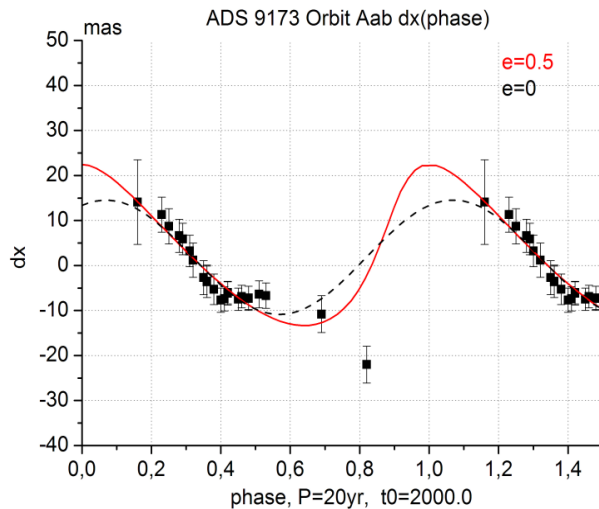


+ - фото, O - ПЗС



С добавлением ПЗС наблюдений явно подтверждается период 4.9 года (комп. В) и проявился период 20 ± 2 года (комп. А).

ADS 9173. Орбита фотоцентра компонента А.

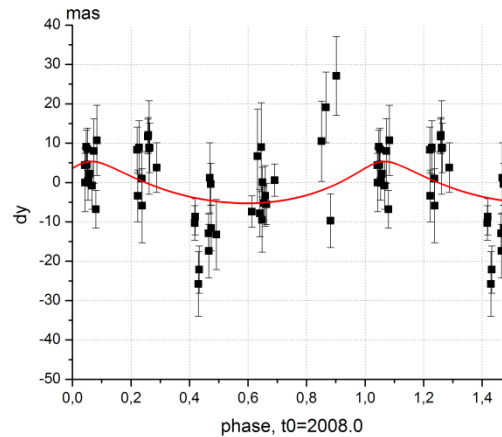
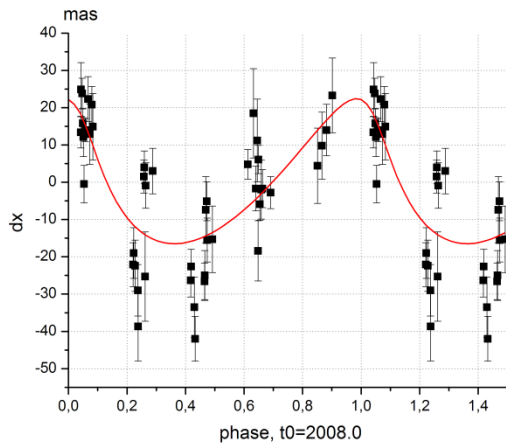


Невязки
сглажены по фазе
в скользящем
окне 0.25P.

Орбиты фотоцентра		
a, mas	35.1±1.8	23.9
P, yr	20±2	20
e	0.5±0.2	0
i, ⁰	56±4	59
ω, ⁰	15±32	-
Ω, ⁰	186±16	187
T, yr	1994.9 ±1.5	-
x _c	8.8±5.3	1.83
y _c	43.5±2.6	23,9
par, mas	20.0	20.0
Ma, Sun	1.9	1.9
Mb, Sun	≥0.42	0.27
a, ae	9.8	9.5

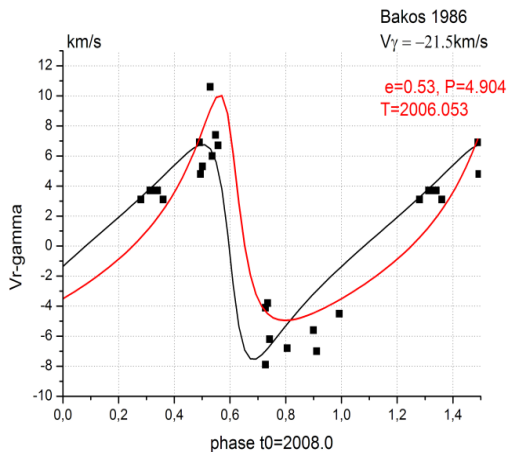
ADS 9173. Орбита фотоцентра компонента В.

Используются только ПЗС наблюдения .



Орбита фотоцентра	
a, mas	21.5±4.3
P, yr	4.90412
e	0.53
i, °	77±6
ω, °	49±15
Ω, °	7±12
T, yr	2006.053
x _c	10.0±2.1
y _c	2.8±1.6
par, mas	21.5
Ma, Sun	1.2
Mb, Sun	≥0.49
a, ae	3.4

Контроль – сравнение с наблюдениями лучевой скорости.



Спектроскопическая орбита фотоцентра. Бэкос1986	
a*sin i, ae	1.0
P, yr	4.904±0.009
e	0.53±0.09
ω, °	96±3
T, yr	1927.58±0.02

Выводы

- 1) Для исследования кратных звезд очень важны однородные наблюдения, выполненные на одном телескопе в одинаковых условиях.
- 2) В результате автоматизации, обеспечивающей наблюдения без пропусков, точность ПЗС наблюдений на пулковском 26-дюймовом рефракторе соответствует мировому уровню.
- 3) Нельзя уничтожать научные наблюдения в Пулковской обсерватории.

**Благодарим всех наблюдателей, без которых
данная работа была бы невозможна**

Спасибо за внимание