

Определение орбиты двойной звезды ADS 7251 по наблюдениям на пулковском 26-дюймовом рефракторе с использованием нового параллакса Gaia

Н.А.Шахт, И.С.Измайлов, Д.Л.Горшанов
ГАО РАН

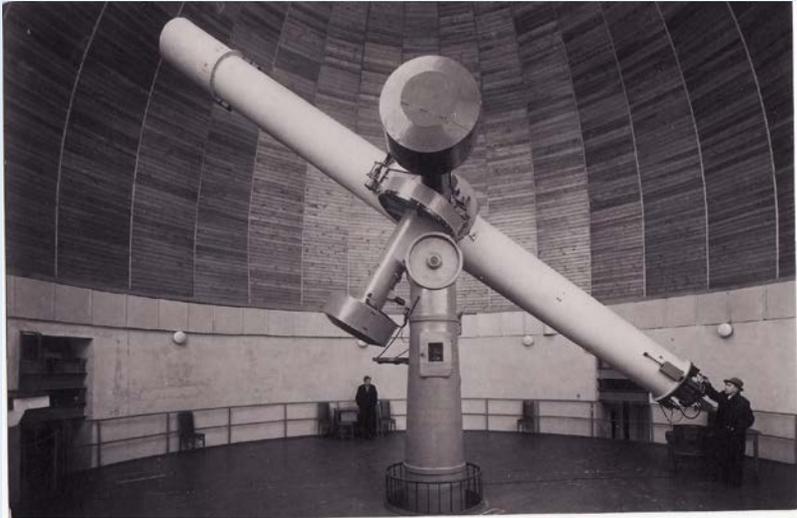
Вступление.

Исследована близкая широкая пара - двойная звезда ADS 7251 по фотографическим и ПЗС – наблюдениям в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе с 1962 по 2018 гг. По имеющимся пулковским данным и точным значениям параллакса DR2 Gaia вычислена новая орбита двойной звезды.

Отмечается актуальность наблюдений этой пары в связи с ее спектральным классом и другими физическими характеристиками, достаточными для включения ее в список возможных родительских звезд экзопланет.

Известно также , что в целях изучения гипотезы влияния гравитационного поля Галактики на ориентацию долгоэволюционирующих двойных систем необходим статистический анализ параметров ориентации орбит двойных звезд, как полюсов орбит , так и направлений на периастр, в галактической системе координат. Поэтому актуальны также исследования параметров ориентации орбиты в связи с дискуссией об анизотропии распределения полюсов орбит двойных звезд.

Точность наблюдений сравнивается с подобными вычислениями орбит близких к Солнцу звезд и нескольких звезд в окрестностях центра Галактики.



65 см рефрактор
D= 65 cm; F= 1041 cm;
M=19.80 "/mm

*CCD-camera: FLI Pro Line
9000 12' x 12', 3056 x 3056
px; 1px = 12 x 12 μ m (0".24)*



На пулковском 26" рефракторе наблюдения ведутся с 1956 года. На нем проводятся наблюдения звезд, больших планет и их спутников и др. тел Солнечной системы. Большую часть пулковской программы составляют двойные и кратные звезды. Северное положение Пулковской обсерватории позволяет вести наблюдения близких к Солнцу и перспективных для определения орбит, околополярных звезд, Среди этих звезд имеются расположенные в околополярной области неба ($\delta > 60^\circ$) имеются не наблюдавшиеся на других обсерваториях двойные и тройные звезды.

Наблюдения в Пулкове ведутся с целью определения динамических параметров, орбит и масс визуально-двойных звезд. Список этих звезд содержит около **600** объектов, получено более **20 000** астронегативов. С начала **2000-х** наблюдения продолжаются с помощью CCD- камеры.

Получены два каталога относительных положений и параметров движений двойных звезд. Вычислено около **100 орбит** широких пар. Для ряда звезд сделаны оценки масс различными способами, в том числе, классическим методом определения **масс** по законам небесной механики.

Динамическое исследование относительного движения компонентов в широких парах производится на основе метода параметров видимого движения (ПВД), разработанного в Пулкове *см. Киселев и др. 1997*

Существенной особенностью этого метода является возможность определения орбитальных параметров по короткой дуге видимой орбиты даже при большом ее периоде, порядка 1000 лет.

Также для получения орбит широких пар мы можем воспользоваться уникальной возможностью - привлечь наблюдения наших предшественников, часто отстоящие от наших далеко по времени. Это позволяет выбрать правильную однозначную орбиту, улучшить ее и уменьшить О-С.

При этом нам необходимы точные параллаксы, которые можно получить только с помощью наблюдений из космоса, а также как можно более точные лучевые скорости компонентов.

Данный метод был неоднократно применен для определения орбит ИСЗ и астероидов из наблюдений на относительно короткой дуге орбиты. Мы применили его к оценке массы черной дыры в центре нашей галактики в системе: черная дыра + звезда S01, вращающаяся вокруг динамического центра, также используя при этом относительно короткую дугу.

Для определения орбит был применен

I. Метод параметров видимого движения (ПВД), разработанный в Пулкове А.А. Киселевым.

В методе ПВД используются следующие начальные параметры:

- 1) ρ , θ - видимые расстояние и позиционный угол компоненты В относительно А.
- 2) $\Delta\mu$ - видимое собственное движение В относительно А по оси Т и ψ – позиционный угол,
- 3) ρ_c – радиус кривизны видимой дуги.

Эти параметры определяют видимое движение В относительно А на момент наблюдений.

- 4) π - тригонометрический параллакс.

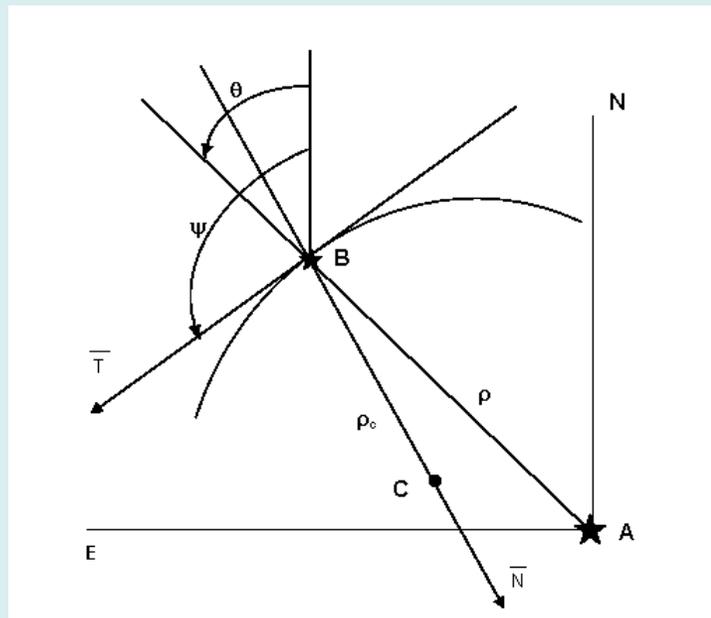
5) $\Delta Vr = Vr(B) - Vr(A)$ - относительная лучевая скорость компоненты В по отношению к А.

6) $M(A+B)$ – сумма масс.

Сумма масс системы и относительная лучевая скорость являются дополнительными параметрами

* Описание метода см. *Киселев, Романенко АЖ, 1997*

**Метод ПВД дает две орбиты –эквивалентные в динамическом смысле, но различающиеся геометрически, так как угол β между вектором положения и картинной плоскостью не определяется однозначно. Для правильного выбора орбиты есть возможность привлечь отдаленные по времени наблюдения, в нашем случае –наблюдения В.Я.и О.В. Струве 1821-1878 гг.



Начальные параметры видимого движения в системе двойной звезды

$$\bar{V} = \begin{cases} \sin \psi & \cos \gamma \\ \cos \psi & \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{cases} \quad \bar{R} = \begin{cases} \sin \theta & \cos \beta \\ \cos \theta & \cos \beta \\ \pm & \sin \beta \end{cases}$$

\bar{V} , \bar{R} – единичные векторы пространственной скорости и положения

Углы θ , ψ , γ , β даны в астроцентрической системе координат и определяют направление векторов.

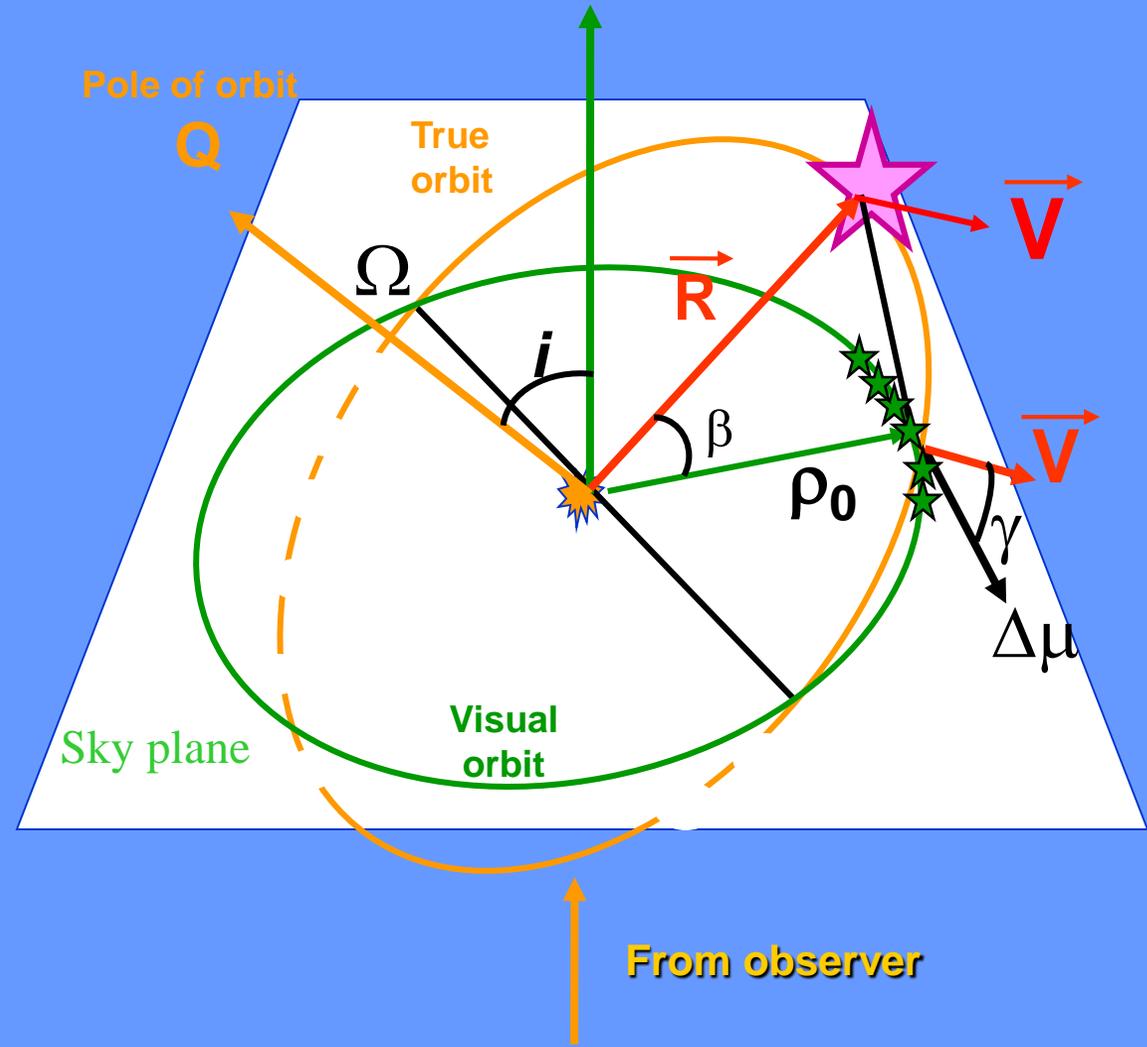
AMP method

Vector of space position **R**

$$r\bar{R} = r \begin{cases} \sin \theta \cos \beta \\ \cos \theta \cos \beta \\ \pm \sin \beta \end{cases}$$

Vector of space velocity **V**

$$v\bar{V} = v \begin{cases} \sin \psi \cos \gamma \\ \cos \psi \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{cases}$$



We obtain two orbits, corresponding to $+\beta$ and $-\beta$:
 $a_1 = a_2$, $P_1 = P_2$, other elements are different.

Данные о звезде ADS 7251 по DR2.

ADS 7251 A

[GJ 338A, HIP 45343, HD 79210,
09^h 14^m 22^s.7754519714 +52° 41' 11".792840757
GAIA DR2 (2018), G=6.97
V=7^m.63, K7V, 09^h 14^m.4, +52° 41' ,
pi = 157.8796 [0.0366]mas Gaia DR2,
Vr = 11.14 km/s[0.1] Radial velocities for 889
late-type stars. NIDEVER D.L., MARCY G.W.,et al. (2002)
DR2 1022456139210632064

ADS 7251 B

[GJ 338B, HIP 120005, HD 79211,
09^h 14^m 24^s.6830609365 +52° 41' 10".906120364
GAIA DR2 (2018), G=7.05
V=7^m.72, M05, 09^h 14^m.4, +52° 41' ,
pi = 157.8851 [0.0414]mas, Gaia DR2,
Vr = 12.50 km/s [0.1]] Radial velocities for 889
late-type stars. NIDEVER D.L., MARCY G.W.,et al. 2002
DR2 1022456139210632064

История и актуальность наблюдений

Оба компонента в системе ADS 7251 (Глизе 338) являются красными карликами — маломассивными тусклыми звёздами главной последовательности, по размеру и светимости значительно уступающие Солнцу. Звезда состоит из двух компонентов, близких по спектру, температуре и др. физическим свойствам. Она представляет уникальный материал для обобщений теории эволюции звезд карликов поздних спектральных классов.

Звезда ADS 7251 является широкой парой, $\rho_{2000} = 17''$; $\theta_{2000} = 92^\circ$, и достаточно хорошо изучена. Имеется много позиционных наблюдений, начиная с 1821 г также спектральных и наблюдений на интерферометре с длинной базой и высоким разрешением. Звезда находится в списке калибровочных звезд для определения радиусов и массы звезды с учетом ее эффективной температуры. По этим звездам выведены закономерности, связывающие эти величины.

ADS 7251 также находится в списке звезд с известными орбитами, элементы которых подвергаются анализу в связи с изучением вопроса анизотропии направлений полюсов орбит двойных звезд. См. [Are the orbital poles of binary stars in the solar neighbourhood anisotropically distributed? J.-L. Agati, D. Bonneau, ... J. Dommange A&A 574, A6 \(2015\)](#). При этом в списке, состоящем из 51 звезды, находятся несколько наших близких двойных с орбитами, в том числе ADS 7251, 61 Cyg и др. Для дальнейших исследований авторы используют принятые нами относительные лучевые скорости и полученные нами наклоны орбиты и восходящие узлы, причем эти данные подтверждаются последующими спектроскопическими наблюдениями.

ADS 7251 входит в список звезд с возможными экзопланетами и является кандидатом для поисков экзопланет методом транзита. Считается, что вероятность обнаружения транзитных планет в обитаемой зоне у такой звезды в 2 раза больше, чем у звезд солнечного типа, в 3 раза больше вероятность обнаружить планету с помощью эффекта Доплера и в 4 раза больше глубина транзита (уменьшение яркости). Т.о. актуально уточнение орбит и масс таких звезд.

SPECTRO-THERMOMETRY OF M DWARFS AND THEIR CANDIDATE PLANETS:
TOO HOT, TOO COOL, OR JUST RIGHT?

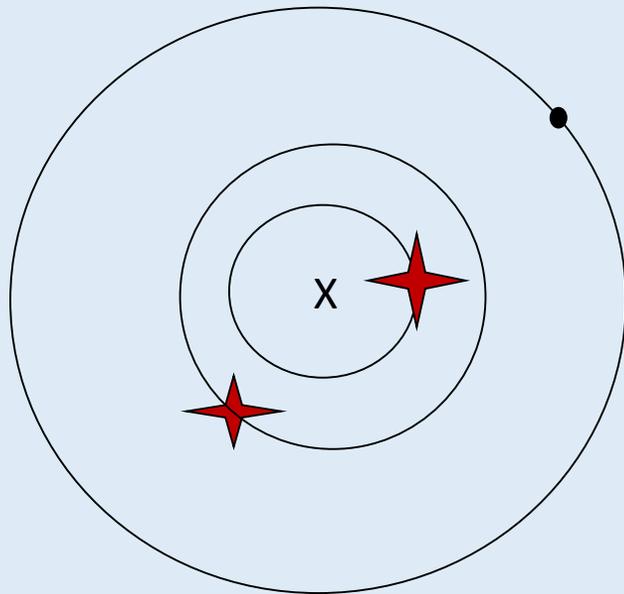
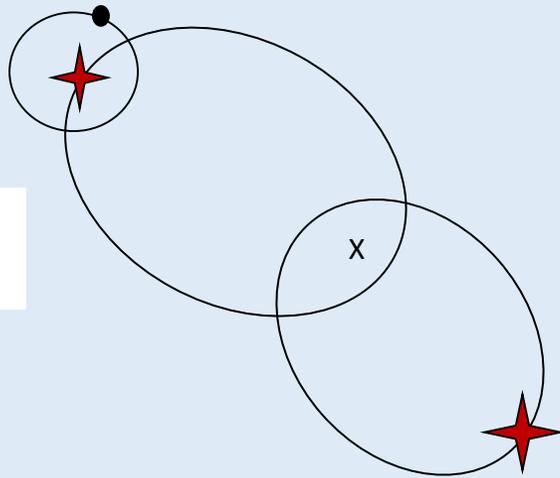
ANDREW W. MANN^{1,2}, ERIC GAIDOS³, MEGAN ANSDELL¹
ApJ in review, revised July 16, 2018

Table 1
Calibration Sample

Name	$F_{\text{BOL}} (10^{-8})$ erg cm ⁻² s ⁻¹	$\sigma_{F_{\text{BOL}}}$	T_{eff} K	$\sigma_{T_{\text{eff}}}$	R_* R_{\odot}	σ_{R_*}	M_* M_{\odot}	σ_{M_*}	L_* L_{\odot}	σ_{L_*}	[Fe/H] ^a	χ_{red}^2 ^b	Phot Ref ^c
GJ 15A	5.664	0.067	3602	13	0.3863	0.0021	0.405	0.041	0.02256	0.00027	-0.30	2.2	1,2,4,5
GJ 205	6.510	0.133	3850	22	0.5735	0.0044	0.637	0.064	0.06449	0.00139	+0.49	2.8	1,2,6,3,4,7
GJ 380	15.200	0.224	4176	19	0.6398	0.0046	0.711	0.071	0.11174	0.00167	+0.24	0.9	1,2,4,5
GJ 526	4.105	0.052	3646	34	0.4840	0.0084	0.490	0.049	0.03694	0.00051	-0.31	1.6	1,2,6,3,4,5
GJ 687	3.511	0.067	3457	35	0.4183	0.0070	0.403	0.040	0.02228	0.00044	-0.05	1.8	2,8,9
GJ 880	3.572	0.032	3731	16	0.5477	0.0048	0.572	0.057	0.05181	0.00058	+0.21	2.3	1,2,6,3,10,11
GJ 887	11.118	0.225	3695	35	0.4712	0.0086	0.494	0.049	0.03694	0.00075	-0.06	0.9	1,2,3,12,7
GJ 699	3.319	0.032	3238	11	0.1869	0.0012	0.159	0.016	0.00342	0.00003	-0.40	1.8	1,2,6,4,7
GJ 411	10.627	0.146	3532	17	0.3924	0.0033	0.392	0.039	0.02134	0.00030	-0.38	2.0	1,2,3,13,5
GJ 105A	17.302	0.216	4704	21	0.7949	0.0062	0.767	0.124	0.27615	0.00356	-0.28	1.2	1,2,3,14,5
GJ 338A	6.171	0.119	3953	41	0.5773	0.0131	0.630	0.063	0.07316	0.00276	-0.01	2.7	2,15,16
GJ 338B	5.799	0.044	3926	37	0.5673	0.0137	0.617	0.062	0.06875	0.00229	-0.04	2.2	1,15,15,16

...Thus a planet in the HZ of an early M dwarf will have ~3 times the Doppler signal, ~4 times the transit depth, and ~2 times the probability of transiting compared to a HZ planet around a solar-type star.

Circumstellar orbit of a planet, system-S



Circumbinary orbit of a planet, system-P

Calculating the Habitable Zone of Binary Star Systems II: P-Type Binaries

Nader Haghighipour^{1,2} and Lisa Kaltenegger^{3,4}

arXiv:1306.2890v2 [astro-ph.EP] 19 Sep 2013

Рассматривается методика исследования границ обитаемых зон для экзопланет с внешними орбитами типа P в системе двойных звезд. Приводятся примеры известных объектов по наблюдениям **телескопа Кеплер**. Обитаемые зоны HZ в системах типа P являются динамическими и зависят от светимости двойных звезд, их спектральных классов, орбитального эксцентриситета. Их границы меняются в зависимости от орбитального движения компонентов.

MNRAS 443, 260-274 (2014) , Habitable zones with stable orbits for planets, around binary systems, Luisa G.Jaime, Luis Aguilar and Barbara Pichardo

HIP 45 343, $a=97.2 \text{ ae}$, $e=0.28$, $M_a = 0.52M_{\odot}$, $M_b = 0.51M_{\odot}$, $R_{out}(S)=17.405 \text{ ae}$
 $R_{in}(S)=17.251 \text{ ae}$; $R_{in} = 295.520 = \text{ae}$

	P	a ae	i	e	ω	Ω	T_p	M_{A+B}	ρ_i	
1823- 1954	1555	149	± 32	0.2	58	74	2091	0.91	0.160	Хопман
1832- 1954	687	108	± 40	0.5	40	164	2194	2.6	0.160	Гюнтцель- Лингнер
1823- 1969	975	105	± 21	0.28	44	173.8	2260	1.14	0.163	<i>Chang</i>
1962- 1976	1048	109	162	0.24	57	149	2250	1.0	0.166	Пулково, 1997
1962- 2006	1761	150	141	0.15	221	219	1931	1.1	0.166	Пулково, 2010
1962- 2006	1528	136	141	0.08	210	216	1882	1.1	0.166	Пулково, 2014
1962- 2018	1987	163	141.8	0.245	31.42	50.2	1939.6	1.1	0.158	Фото +CCD (gaia)

.....

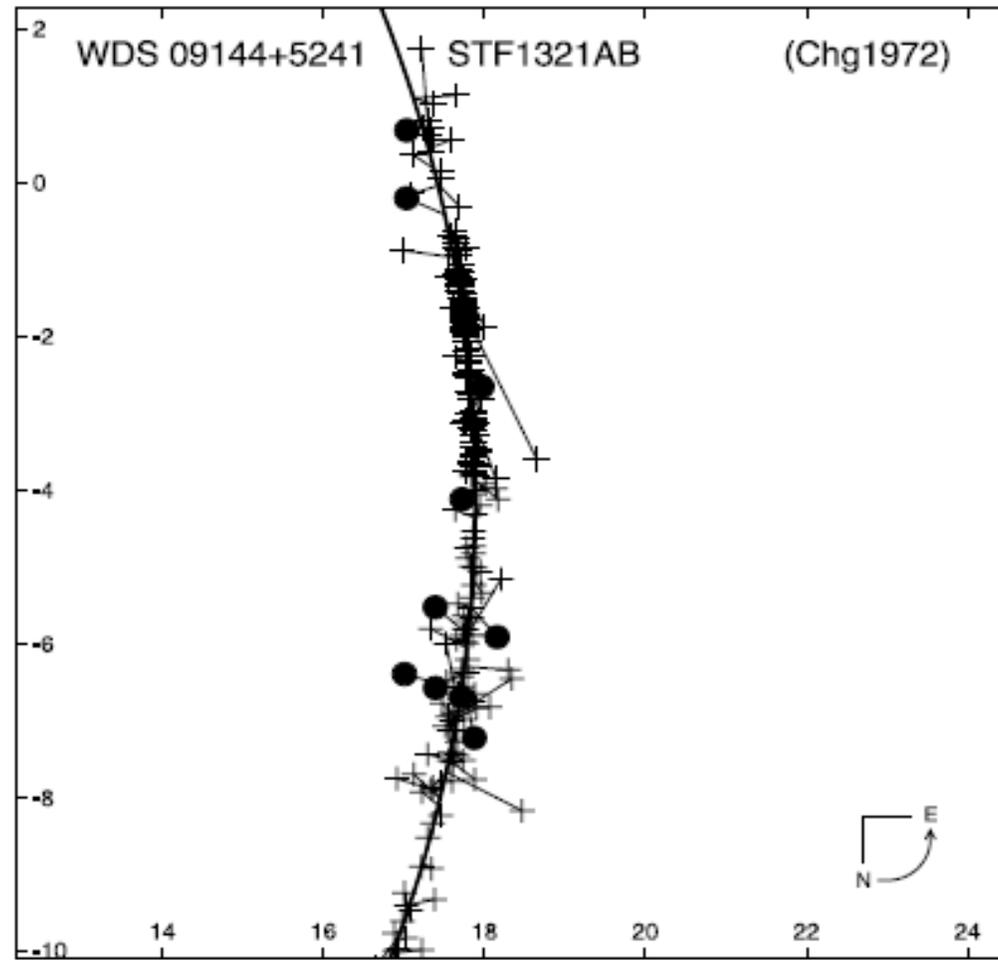


FIG. 5.—All double star measures of STF 1321 AB (WDS 09144+5241) plotted against the provisional (but still calibration-quality) orbit of Chang (1972). In this case only the portion of the orbit (48° or 13% of a period) with data is plotted.

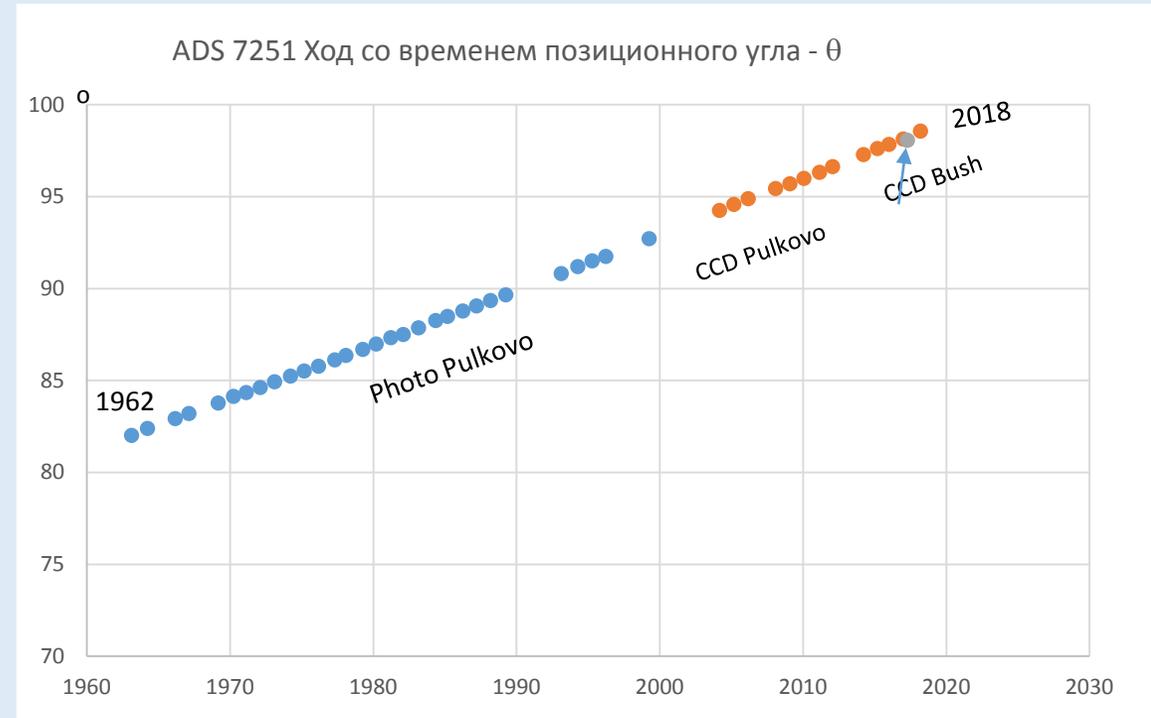
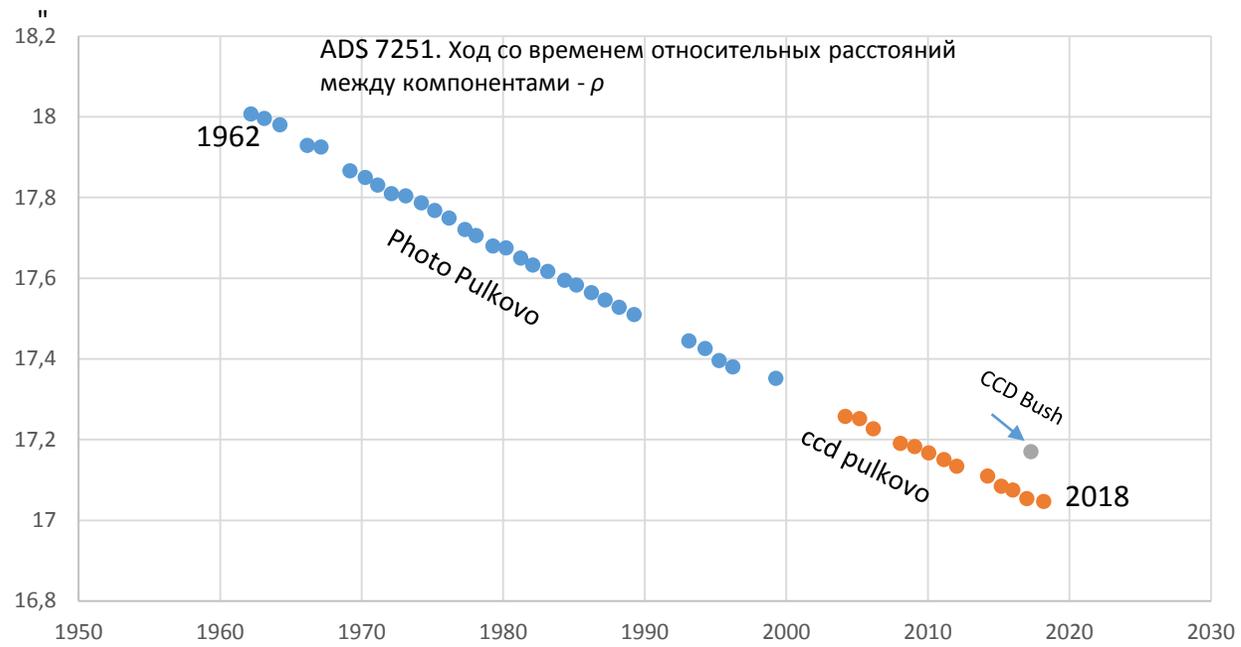
1915-1998 rr

Astrometry Observations of STF 1321AB

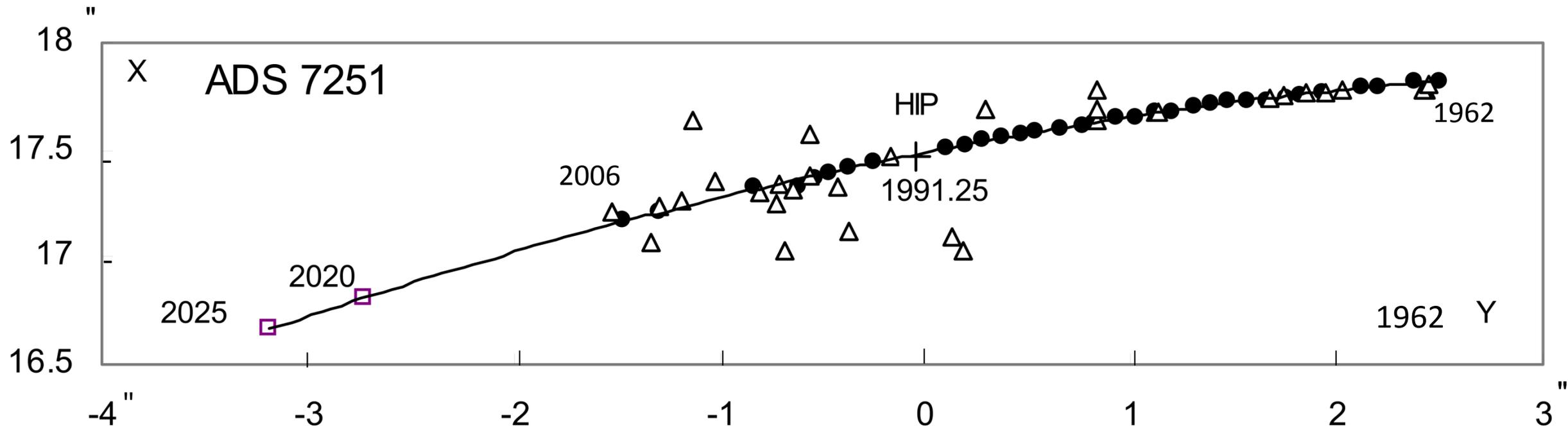
Mitchell Bush¹, Eric Del Medico¹, Hunter Boulais¹, Christina Lang^{1,2}, Jesus Escalante Segura¹, Sara D'ambrosia², David Rowe³, Rachel Freed⁴, and Russell Genet^{1,5,6}

1. Cuesta College, San Luis Obispo, CA
2. Petaluma High School, Petaluma, CA
3. PlaneWave Instruments, Rancho Dominguez, CA
4. Freed Education Consultants, Sonoma, CA
5. California Polytechnic University, San Luis Obispo, CA
6. Leeward Community College, Pearl City, O'ahu, HI

Abstract: The double star STF 1321AB (WDS 09144+5241) was observed April 12th, 2017 using a CDK-17 robotic telescope at Sierra Remote Observatories (SRO). Through the use of Astro Image J astrometry software, we determined an average arclength of 17.17" (arc seconds) with a position angle of 98.17° (degrees). Our measurements from this observation showed a statistically significant deviation from the projected orbital motion of this binary.

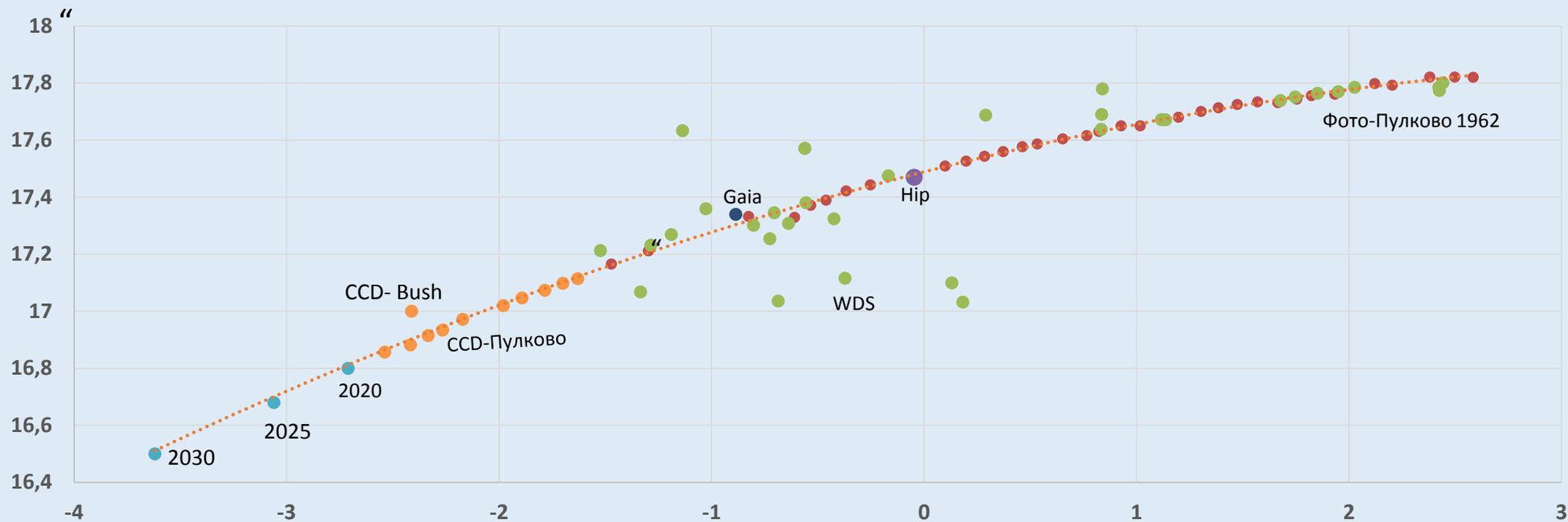


Ошибки одного среднегодового положения $0''.004$ и $0''.02$ по фотографическим наблюдениям и $0''.003$ и 0.01 по CCD

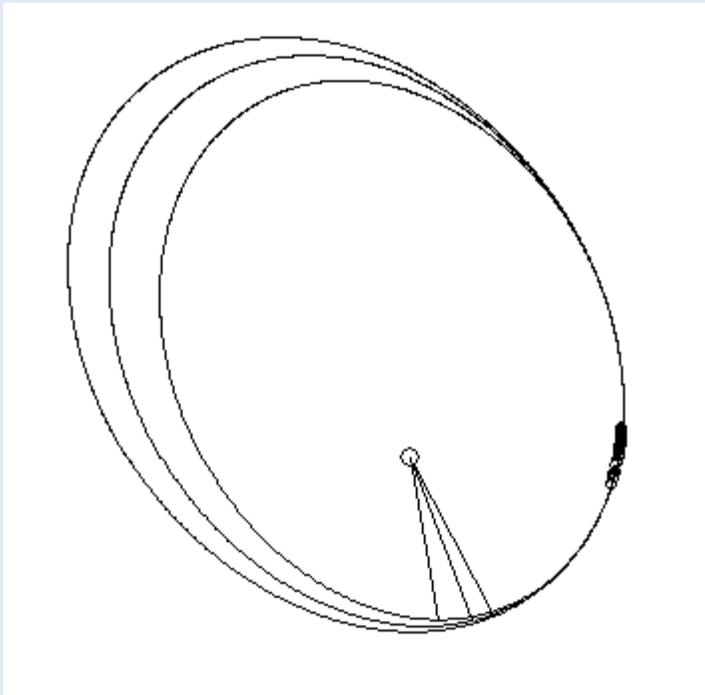
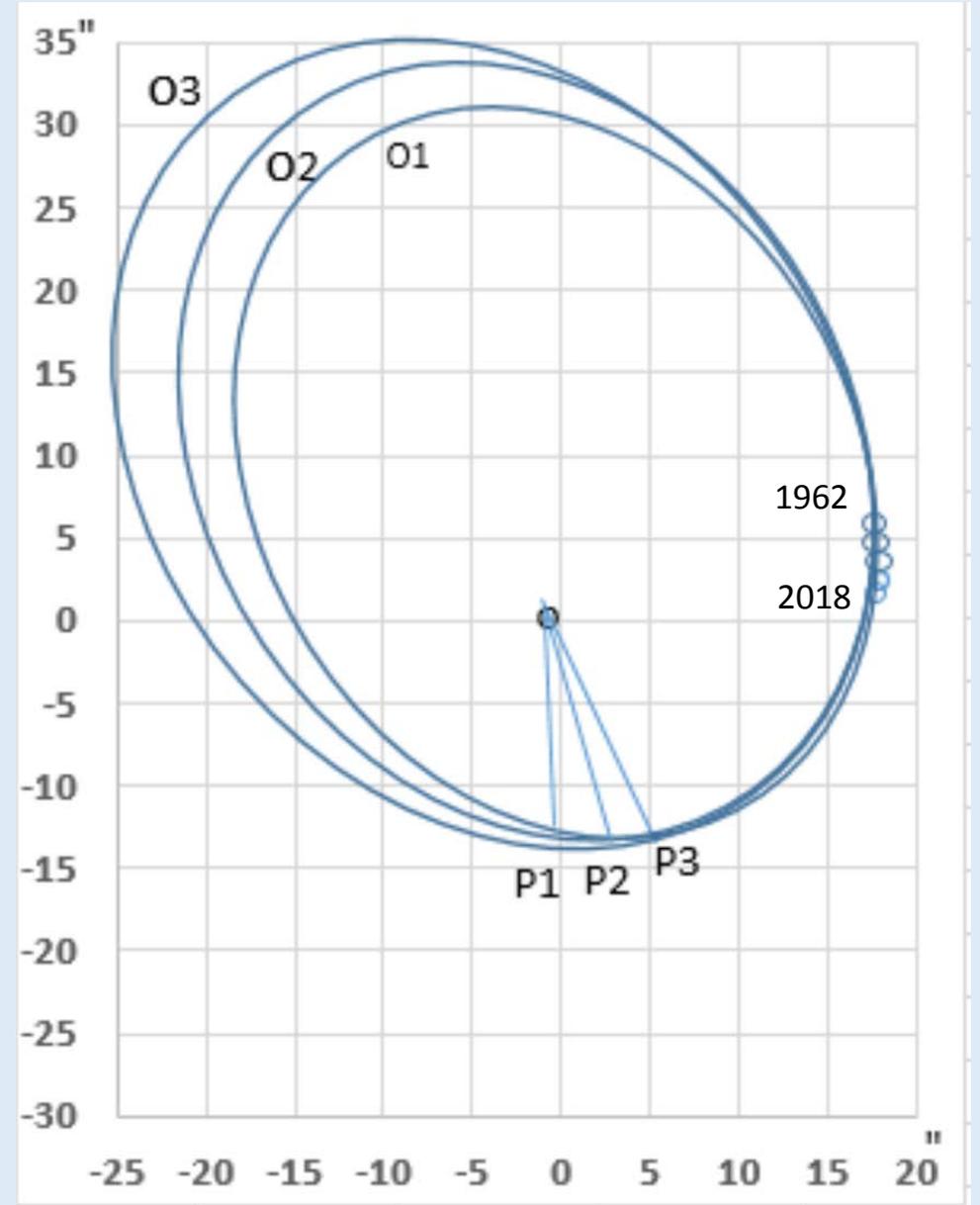


Фотографические наблюдения в Пулковке 1962-2006 гг – черные кружки,
 Наблюдения, опубликованные в WDS – треугольники, эфемерида на 2020 и 2025 гг- квадраты

Наблюденная дуга орбиты ADS 7251 и эфемериды

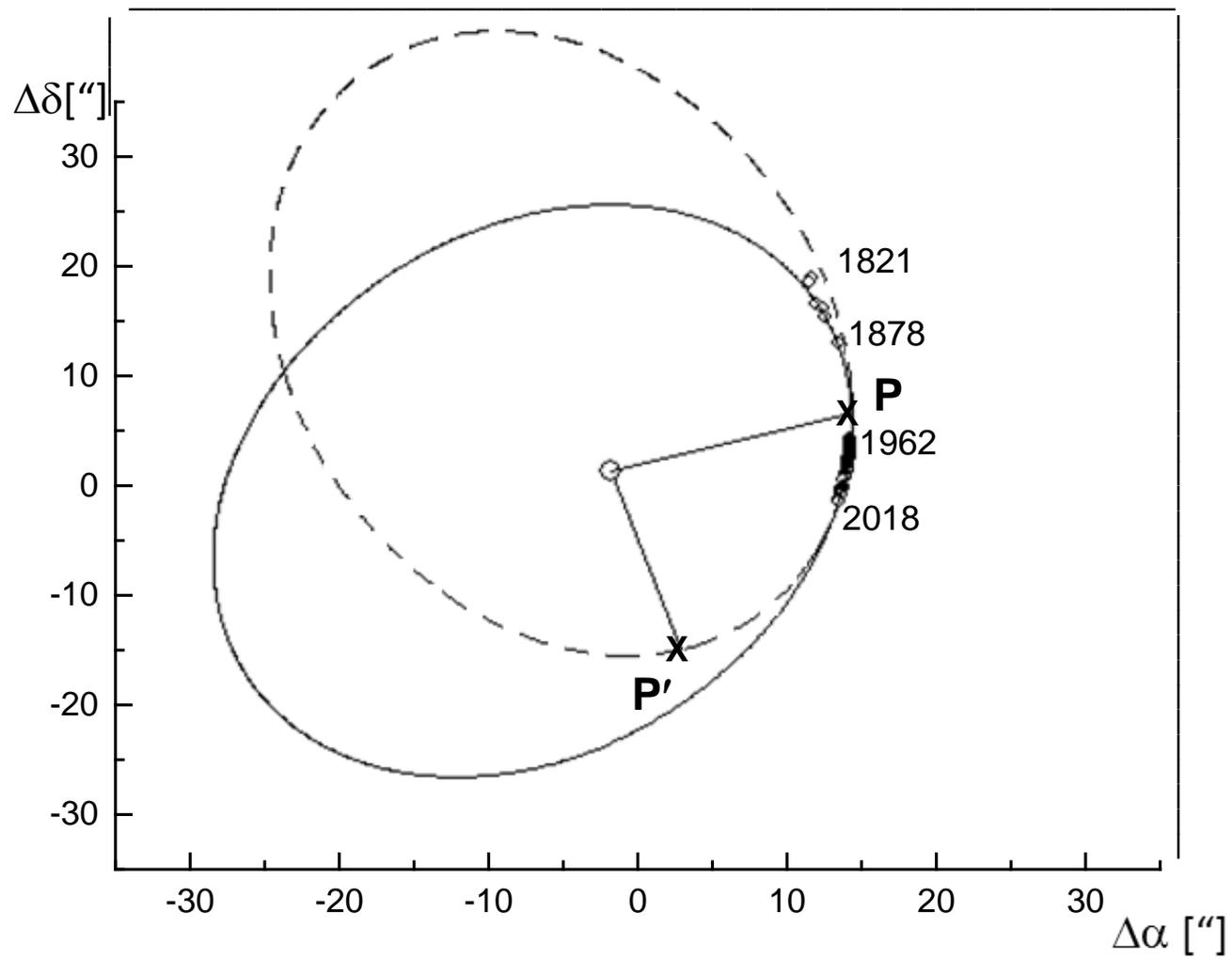


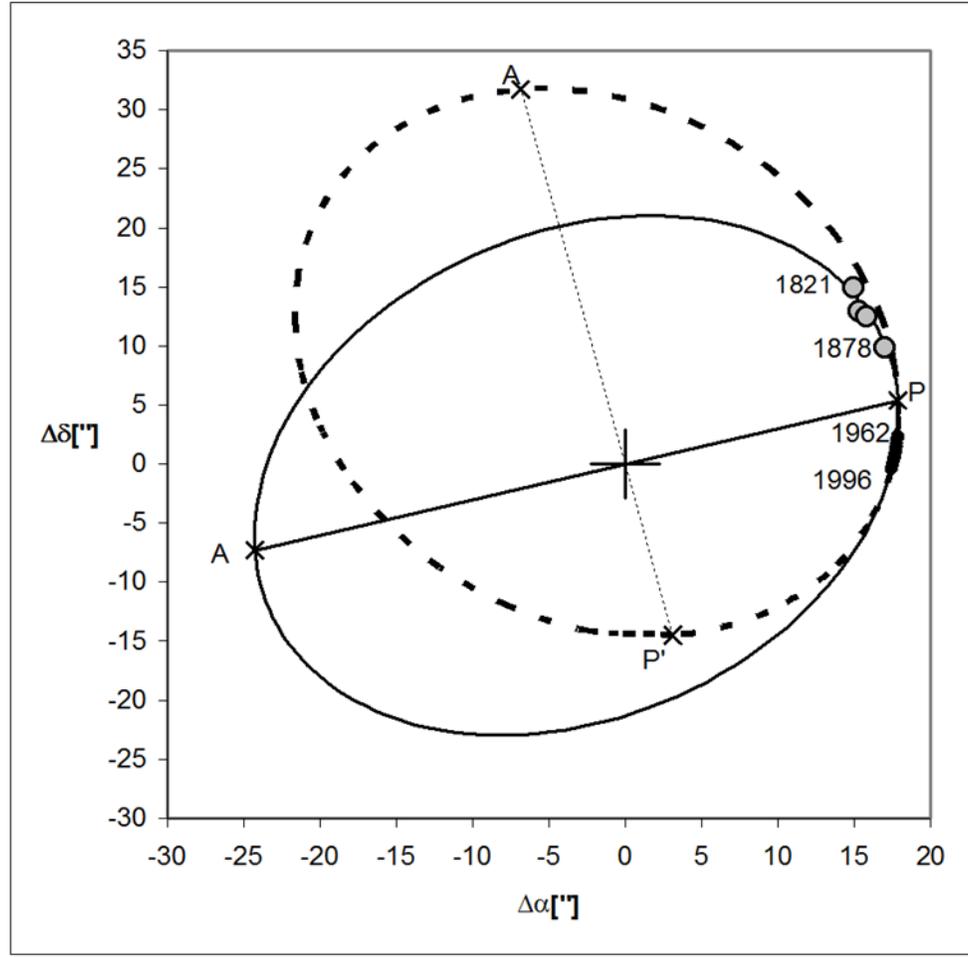
$M_a + M_b$, M_\odot	$M_b/(M_a+M_b)$	M_a , M_\odot	M_b , M_\odot	Method	References
0.91	0.505	0.45	0.46	astrometry	Hopmann, 1954
2.26	0.50	1.13	1.13	"	Güntzel-Lingner, 1955
1.14	0.64	0.41	0.73	"	Chang, 1972
1.10	0.49	0.56	0.54	"	Горшанов, Шахт, 2010
1,22	0.49	0.62	0.60	Interferometry R, Teff	Boyajian et al, 2012
1.03	0.50	0.52	0.51	"	Jaime et al., 2014



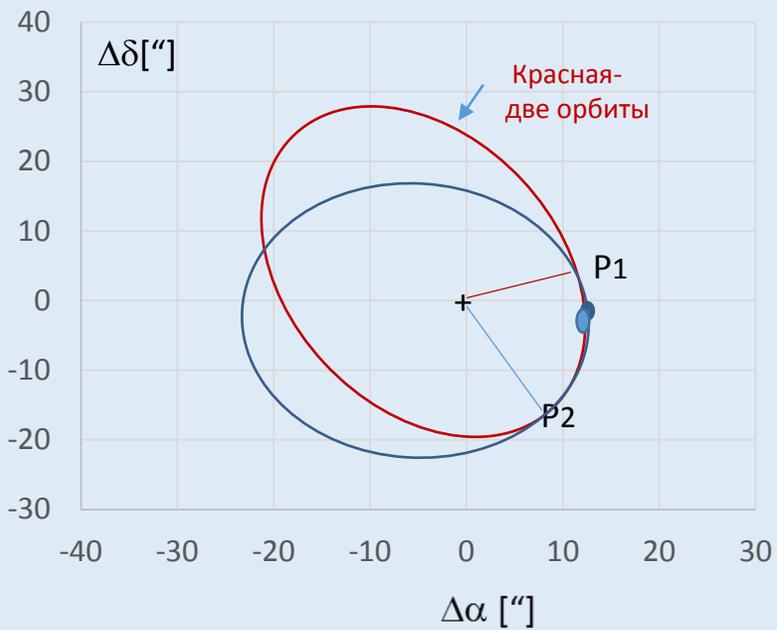
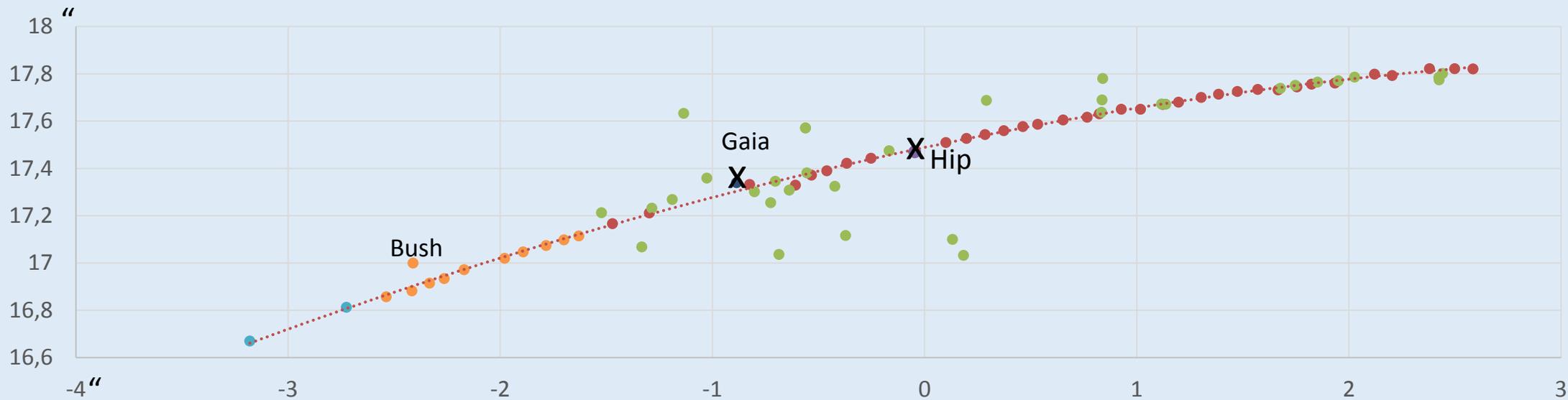
1. $M_a + M_b = 1.22 M_\odot$
2. $M_a + M_b = 1.10 M_\odot$
3. $M_a + M_b = 1.03 M_\odot$

**Метод ПВД дает две орбиты – эквивалентные в динамическом смысле, но различающиеся геометрически, так как угол β между вектором положения и картинной плоскостью не определяется однозначно. Для правильного выбора орбиты есть возможность привлечь отдаленные по времени наблюдения, в нашем случае – наблюдения В.Я.и О.В. Струве 1821-1878 гг.





Относительные положения ADS 7251 1962-2018 гг



	β, o	A, ae	P yr	e	ω, o	i, o	Ω, o	Tp	$\sigma_{(o-c)}$
Pulkovo I	+26.7	163.2	1987.5	0.245	31.2	141.8	50.1	1939.6	0.011"
Pulkovo-2	-26.7	163.2	1987.5	0.416	22.4	146.9	140.2	196.8	0.010"
Pulkovo2+Gaia	-26.5	162.6	1977.0	0.415	22.7	147.0	140.0	207.3	0.010"

По вычисленным для момента времени t координатам (ρ, θ) и координатам (ρ_0, θ_0) , определённым из наблюдений в тот же момент, вычисляется разность (O-C), характеризующую внутреннюю точность построенной орбиты:

$$(O - C)_t = \sqrt{\rho_0^2 \sin^2(\theta_0 - \theta) + (\rho_0 - \rho)^2}$$

Photo 1962-1999 Среднее O-C по rho 0".00047

Стандартное уклонение O-C по rho 0".00751

Среднее O-C по theta -0".00012

Стандартное уклонение O-C по theta 0".00041

Среднее общее O-C 0".00916

CCD 2004-2018 Среднее O-C по rho -0".00074

Стандартное уклонение O-C по rho 0".00443

Среднее O-C по theta 0".00024

Стандартное уклонение O-C по theta 0".00039

Среднее общее O-C 0".00806

Photo+ CCD 1962-2018 Среднее O-C по rho 0".00094

Стандартное уклонение O-C по rho 0".00556

Среднее O-C по theta -0".00027

Стандартное уклонение O-C по theta 0".00053

Среднее общее O-C 0".01045

Сравнение с наблюдениями Струве и CCD

Параметры видимого движения 1962-2018 1989.57_{\pm}

Угловое расстояние 17".5038 rho
 Ошибка углового расстояния 0".0013
 Позиционный угол 89°.7935 theta
 Ошибка позиционного угла 0°.0066
 Относительное движение 0."093086 mu
 Ошибка относительного движения 0".000078
 Направление относительного движения 190°.5341 psi
 Ошибка направления движения 0°.0343
 Радиус кривизны 22".1189 rho_c
 Ошибка радиуса кривизны 0".4193

Параметры видимого движения 1821-2018 $t_0=1919,239$

Угловое расстояние 18.5514 rho
 Ошибка углового расстояния 0.1723
 Позиционный угол 71.6651 theta
 Ошибка позиционного угла 0.5613
 Относительное движение 0.088786 mu
 Ошибка относительного движения 0.000960
 Направление относительного движения 173.9036 psi
 Ошибка направления движения 0.6718
 Радиус кривизны 22".1131 rho_c
 Ошибка радиуса кривизны 2".8587

Параллакс 0.158 pi_tr **Beta+**

Параметры орбиты

Большая полуось 164.54 a
 Период 2012.43 P
 Эксцентриситет 0.210 e
 Долгота периастра 33.18 omega
 Наклонение 141.29 i
 Долгота восходящего узла 34.89 Omega
 Момент прохождения периастра 1881.47 Tr
 Sigma 0.63

Параллакс 0.158 pi_tr **Beta-**

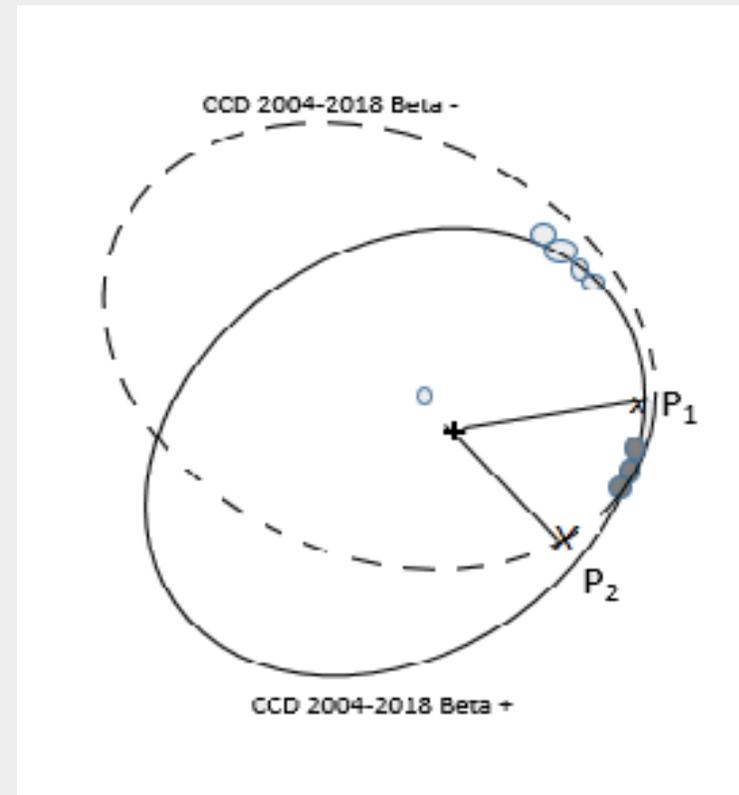
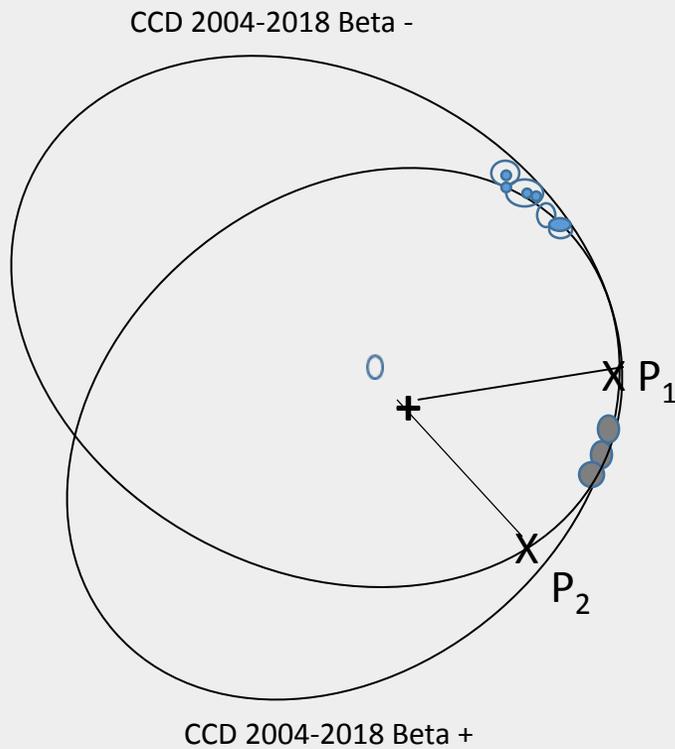
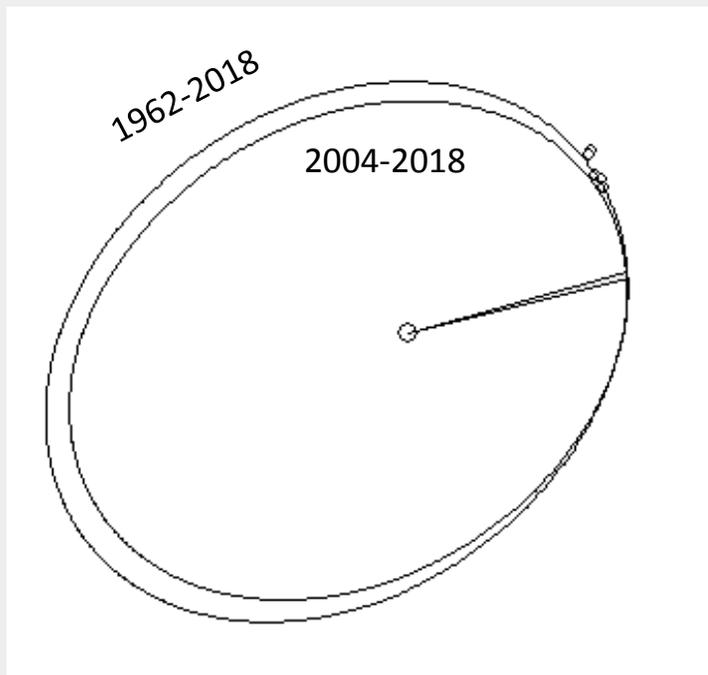
Параметры орбиты

Большая полуось 164.54 a
 Период 2012.43 P
 Эксцентриситет 0.418 e
 Долгота периастра 31.339 omega
 Наклонение 147.10 i
 Долгота восходящего узла 119.54 _Omega
 Момент прохождения периастра 126.58Tr
 Sigma 0.70, но график лучше.

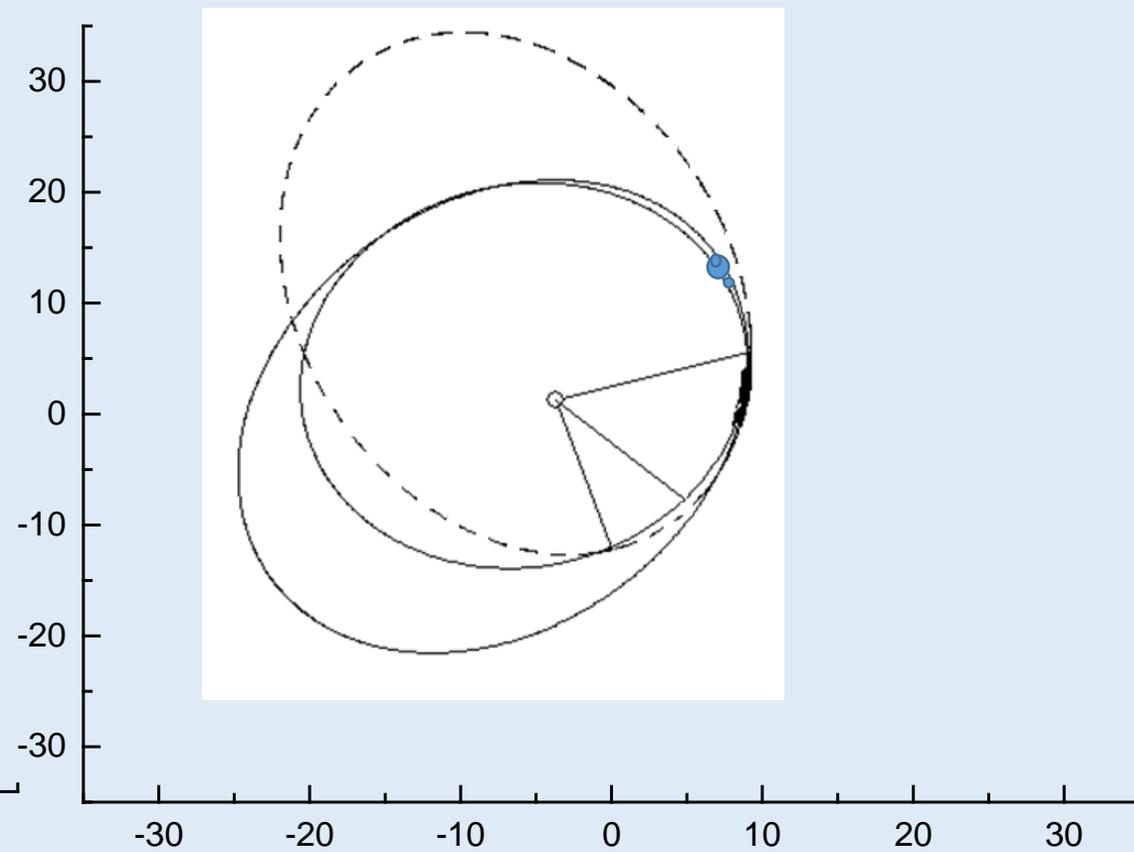
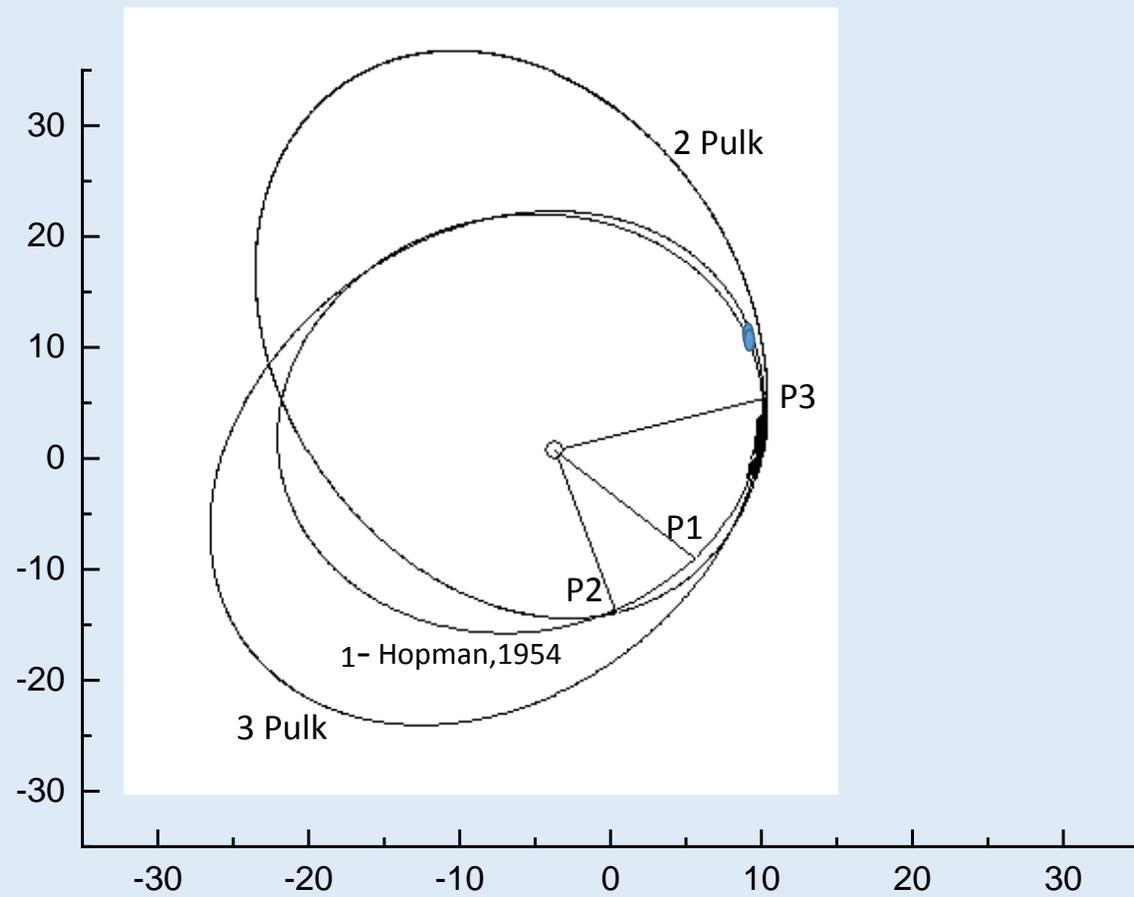
	P	a ae	i	e	omega	Omega	Tr	M _{A+B}	pi	
1962-2018	1987	163	141.7	0.416	31	50	1939.6	1.1	0.158	Фото +CCD
2004-2018	2012	164.5	141.3	0.210	33	35	1881.5	1.1	0.158	CCD+Струве

Орбита рассчитана по наиболее короткой дуге наблюдений 2004-2018 гг

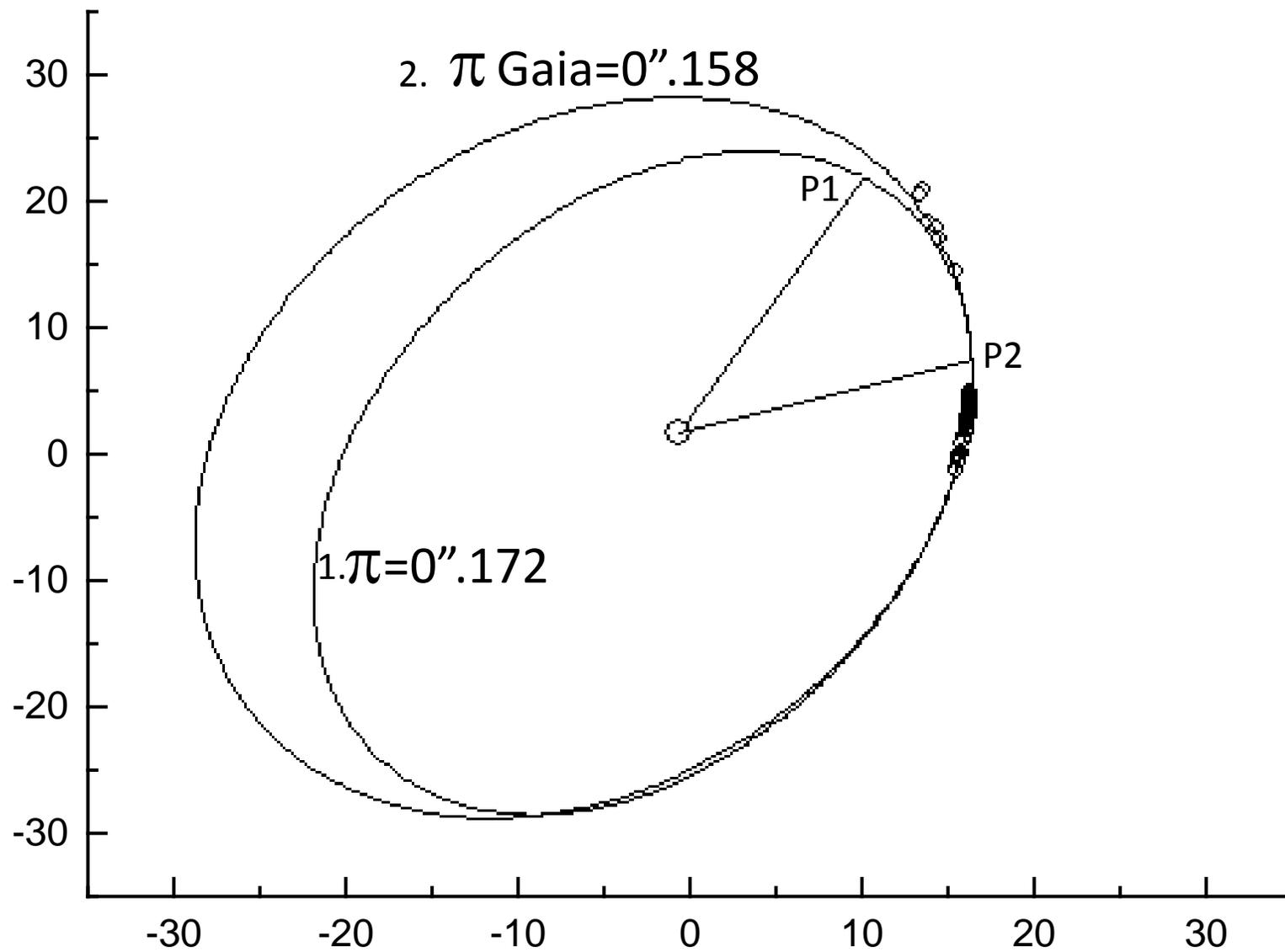
Сравнение ряда 1962-2018 с ПЗС- наблюдениями 2004-2018 гг



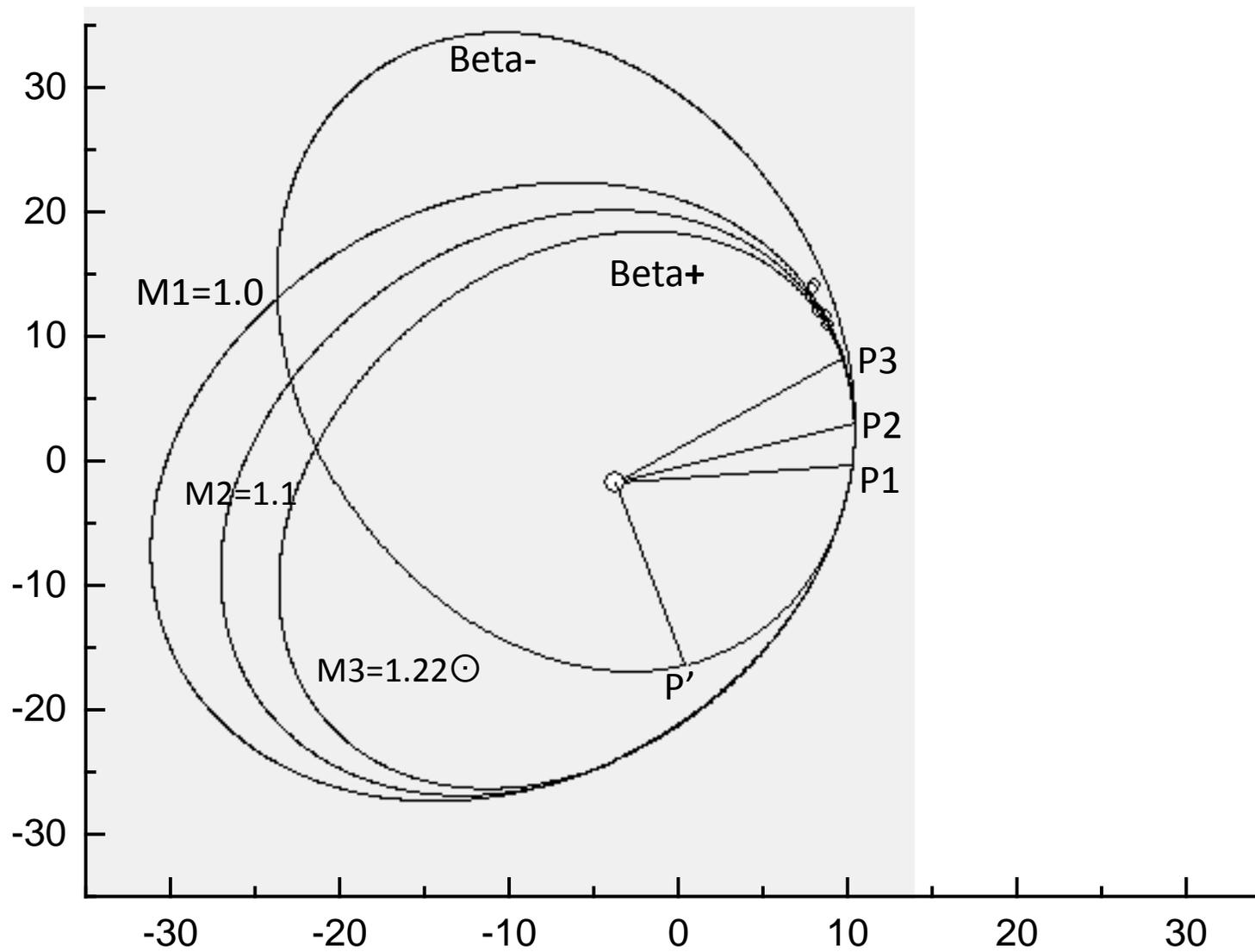
Сравнение со старыми орбитами



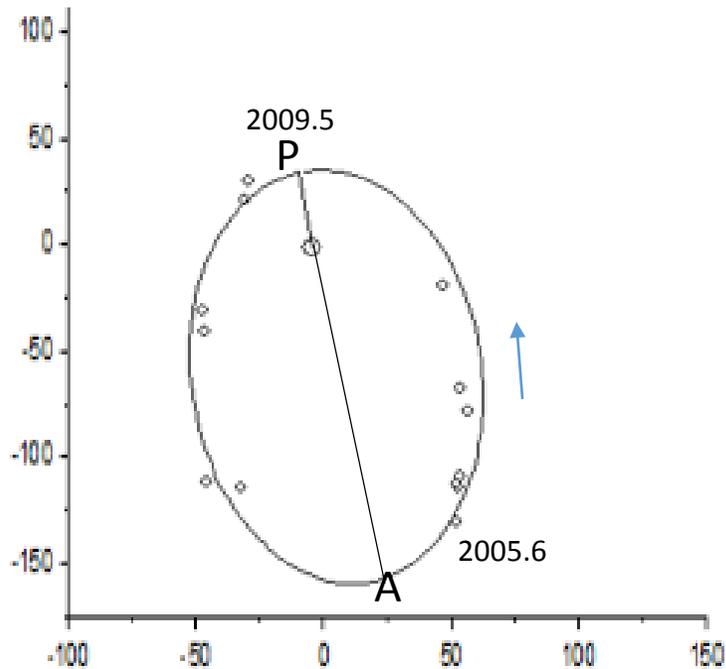
Сравнение параллаксов



Сравнение масс



Наблюдения	Период, гг.	N	$(O-C)_t$
61 Cyg, Пулково, фото	1958-2006	48	0".019
61 Cyg Пулково, фото	1969-1994	26	0.016
61 Cyg, Josties, фото	1957-1980	26	0.013
ADS 7251, фото, CCD	1962-2006	44	0.009 \div 0.008



Звезда S0 -102,
Предварительная орбита,
полученная по данным $\Delta X, \Delta Y$ с точностью $\pm 0''.004$:
The Shortest Known Period Star Orbiting our Galaxy's
Supermassive Black Hole
L. Meyer, A. M. Ghez, R. Schödel, et al. 2012
arXiv:1210.1294v1 [astro-ph.GA] 4 Oct 2012

Published 5 October 2012, *Science* **338**, 84 (2012)
DOI: 10.1126/science.1225506

P	A, ae	e	ω	i	Ω	T_p	M_{A+B}	D	$\sigma(O-C)$
11.48	874.8	0.69	181	28	171	2009.5	4.4×10^6	7.7 кпс	0".006
11.50	815	0.68	185	29	175	2009.5	4.1×10^6	7.7	0.015

Исследована близкая широкая пара - двойная звезда ADS 7251 по фотографическим и ПЗС – наблюдениям в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе с 1962 по 2018 гг.

По имеющимся пулковским данным и точным значениям параллакса согласно DR2 Gaia вычислена новая орбита двойной звезды. Данные Gaia и новые CCD наблюдения на 26" рефракторе в сочетании с многолетними фотографическими наблюдениями и привлечением точными отдаленными наблюдениями Струве позволили уточнить орбиту. Отмечается актуальность наблюдений этой пары в связи с ее достаточно близким расстоянием от Солнца и физическими особенностями, характерными для возможных родительских звезд экзопланет.

Приведены значения масс компонентов, полученных по пулковским данным и по современным высокоточным астрофизическим наблюдениям.

Полученные результаты дают возможность рассмотреть параметры ориентации орбиты в связи с вопросом анизотропии распределения полюсов орбит двойных звезд.

Точность наблюдений сравнивается с подобными вычислениями орбит близких к Солнцу звезд и нескольких звезд в окрестностях центра Галактики, полученных на телескопе Кеск

По полученным О-С определены значения оценок точности вычисления орбиты с использованием короткой дуги и дано сравнение соответствующих ошибок при вычислении орбит, а также показано, что долговременные однородные ряды наблюдений на 26" по своей точности могут быть сравнимы с CCD-наблюдениями на больших телескопах с адаптивной оптикой. Так ошибка О-С оказалась равной $0.''009 \div 0.''008$ для фотографических и CCD наблюдений ADS 7251 на рефракторе и равной $0.''006$ для звезды S102, находящейся близко к центру Галактики.



Основатели отдела фотографической
астрометрии в Пулкове:
С.К.Костинский и А.Н.Дейч



Наблюдатели 26-дюймового рефрактора и нормального
астрографа

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !