

Проверка возможности определения орбит звезд, вращающихся вокруг центра Галактики, и оценка некоторых релятивистских эффектов

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

ГАО РАН Пулково

Таблица 1. Орбитальные элементы избранных звезд

Звезда	$P, year$	$a, a.e.$	e	$i, [^\circ]$	ω	$\Omega [^\circ]$	Tp, yr	$\sigma_{(O-C)} mas$	Ссылка2000+
S4711-1**	7.6	619	0.768	65.3	131.59	20.10	2003.3	14	Peifker 20
S4711-2	7.4	610	0.89	135.8*	71.75	37.3	2003.3	28	Pulk21, PVD
S02	16.0	1048	0.88	134.18*	65.5	226.9	2002.3		Gillessen17
S02	16.0	965	0.88	45.8	65.5	227	2002.3	1.0	Gravity18
S02	15.5 16.43	995 1038	0.88 0.89	41.4 44.7	68.0 40.2	238.3 230.1	2002.6 2002.1	4.1	Pulk21-1,2 PVD
S02**	17.91 ±0.66	931 ±27	0.75 ±0.04	46.15 ±4.31	216 ±2.69	15.18 ±4.06	2001.9 ±0.111	1.6	T-I, Pulk21-2 Измайлов
S27	112	3738	0.95	87.1	308.2	191.9	1947.6	3.4	Gillessen08
S27	112	3735	0.92	87.2	308.2	192.1	1945.5	3.1	Pulk21-1, PVD
S27**	103.2 ±12.9	3535 ±201	0.99 ±0.01	82.5 ±2.6	310.9 ±13.2	186.7 ±8.6	1959.1 ±5.9	3.0	PVD, Pulk21-2 Измайлов
S27**	705.85 ±476.24	15656 ±9886	0.93 ±0.21	88.9 ±0.77	274.3 ±101.7	17.33 ±1.39	1974.6 ±101.7	3.0	T-I, Pulk21-3 Измайлов
S102	11.5	819	0.68	29	185	175	2009.5	10	Meyer12
S102	13.0	893	0.74	38.3	133.5	129.9	2009.3	13	Parsa17
S102	12.3	856	0.58	43.2	170	163.2	2009.6	18	Pulk21, PVD

ВВЕДЕНИЕ. Рассмотрены результаты наблюдений звезд, вращающихся вокруг центрального тела нашей Галактики, имеющего, по последним данным, массу около $4.15 \times 10^6 M_\odot$.

Ранее (АЖ, 2007) мы, по предложению Ю.Н. Гнедина, используя применяемые в Пулковской обсерватории методы определения орбит двойных звезд, проверили возможность определения орбит звезд, вращающихся близко к центру нашей Галактики (Киселев, Гнедин, Рощина и др., 2007). Использовались высокоточные наблюдения на телескопах Keck и VLT. В качестве примера была исследована звезда S02, период обращения которой — 16 лет был наиболее коротким в то время.



Ю.Н.Гнедин



А.А.Киселев

Получена орбита методом параметров видимого движения (PVD) и геометрическим методом разработанными в Пулковской обсерватории с соавторами.

Отмечена возможность получения орбиты методом PVD с использованием короткой дуги. При этом необходимо знание лучевой скорости, суммы масс и параллакса.

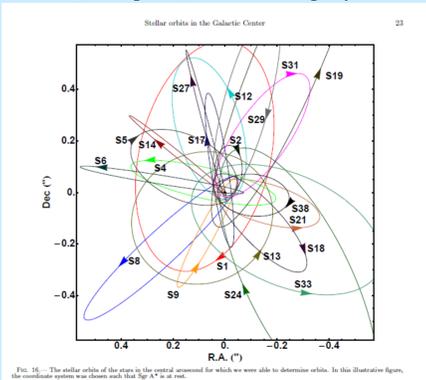
В настоящее время появились публикации с данными для ряда звезд, а именно, относительные положения $\Delta R.A.$, $\Delta Decl.$ Кроме того, приняты точные значения массы M центрального тела SgrA* $4.15 \times 10^6 M_\odot$ и расстояния его до Солнца R_0 - 8.19 кпс.

Появилась информация о движении более близких звезд, т.н. “сквизаров” (squeezars) с еще более короткими периодами. Звезды с коротким периодом обращения по орбите в плотном скоплении вокруг СМЧД в центре нашей Галактики считаются идеальными кандидатами для наблюдения гравитационных эффектов, таких как сдвиг периастра. Представляет интерес также определение орбиты независимым образом для звезд, имеющих точные относительные положения “звезда — центральное тело”, но неоднозначные результаты, полученные на разных телескопах (Keck и VLT).

ВЫБОР ЗВЕЗД. Приводим примеры исследования звезд S102, S2, S27 и недавно обнаруженной звезды S4711.

Мы выбрали звезду S102, у которой, согласно литературным данным, имеются расхождения в параметрах орбиты. Нами определена орбита по объединенному ряду Keck и VLT.

Также мы перевычислили орбиту звезды S02, используя относительно короткую дугу из наблюдений на VLT. Ошибки O-C, вычисленные по этим орбитам, сопоставимы с ошибками O-C по орбитам, полученным наблюдателями на телескопах Keck и VLT. Далее сравнили с орбитами из статьи Gillessen et al., 2008 “Monitoring stellar orbits...”. Мы выбрали звезды S2 и S27, см. приведенный ниже рисунок из этой статьи.



На рис. исследуемые звезды S02 и S27 из статьи Gillessen et al. 2008.

ПРИМЕНЯЕМЫЕ МЕТОДЫ. Были применены три метода, из них два — разработанных А.А.Киселевым с соавторами:

1) метод параметров видимого движения PVD, в основе которого лежит использование высокоточного плотного ряда относительных положений, а также тригонометрического параллакса и лучевой скорости компонент и

2) геометрический метод, где необходимым условием является построение видимого эллипса за весь период обращения. Подробное описание методов — в нашей работе Киселев и др., 2007.

3) Третий способ разработан И.С.Измайловым на основе метода Тиле-Иннеса (Т-И). Принципиальной особенностью его подхода является то, что вместе с центральной орбитой методом Монте-Карло, путем варьирования начальных данных вычисляется набор возможных орбит. Этот набор позволяет определить как ошибки орбитальных элементов, так и все производные из элементов величины.

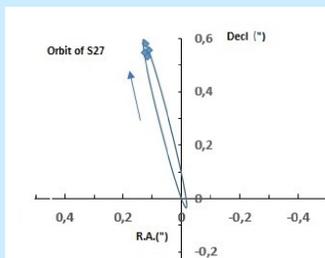
Наиболее важной величиной является масса системы. В сложных случаях, такой подход позволяет адекватно оценить ошибки производных величин, поскольку элементы вычисленной орбиты содержат сложные, нелинейные корреляции между собой.

И. С. Измайлов. Орбиты 451 широкой визуально-двойной звезды. //ПАЖ, 2019, том 45, № 1, с. 35–44. <http://izmcdd.puldb.ru/PIA35.pdf>

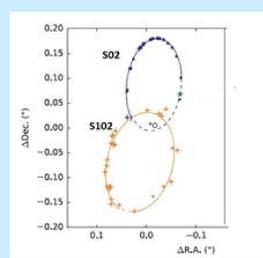
РЕЗУЛЬТАТЫ. В Таблице 1 черным шрифтом даны элементы орбиты, соответствующие ссылкам. (**- наклонность по нашему алгоритму равна 180-и) Красным даны элементы, вычисленные нами с использованием данных, опубликованных упомянутыми авторами. Коричневым — орбита по модифицированному методу Тиле-Иннеса (Т-И) (Измайлова).

Примеры орбит:

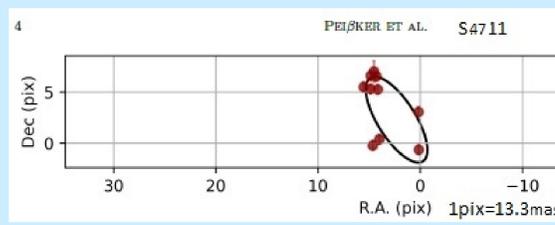
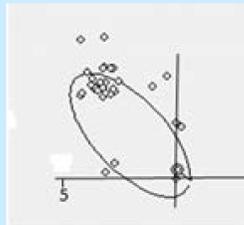
S27 (Pulk-21)



S02 и S102 (Pulk-21)



Сравнение двух орбит S4711 — последние две строчки Табл. 1: S4711 (Pulk21)



По элементам орбиты, сумме масс M и расстоянию R_0 предпринята попытка вычислить для некоторых звезд теоретические предварительные релятивистские параметры. Полученные результаты даны в Таблице 2.

Формулы для релятивистских параметров

$$\Gamma = \frac{r_s}{r_p}, \quad \Delta\varphi = \frac{6\pi G}{c^2} \frac{M}{a(1-e^2)} = \frac{3\pi}{1+e} \Gamma$$

$$z_{gr}c = \left[\left(1 - \frac{r_s}{r} \right)^{-1/2} - 1 \right] \leq \frac{c\Gamma}{2}$$

$$V^2 = k^2(M+m) \left(\frac{2}{a(1-e)} - \frac{1}{a} \right)$$

Обозначения параметров. Γ — отношение радиуса

Шварцшильда r_s к расстоянию до периастра $r_p = a(1-e)$ где a и

e орбитальные элементы. $r_s = 0.081 a.e.$ $\Delta\varphi$ — прецессия

Шварцшильда, т.е. изменение направления линии узлов из-за

гравитационного влияния сверхмассивного тела. M — масса

центрального тела, G — гравитационная постоянная, a —

большая полуось, e — эксцентриситет орбиты звезды,

вращающейся вокруг центрального тела, c — скорость света.

$z_{gr}c$ — гравитационное красное смещение. v_p — скорость в периастре.

Таблица 2. Орбитальные элементы (r_p, r_a) и предварительные релятивистские параметры

Звезда	$r_p, [a.e.]$	$r_a, [a.e.]$	$V_p, [km/c]$	$\Gamma, [10^{-4}]$	$z_{gr}c, [km/c]$	$\Delta\varphi, [arcmin]$	Ссылка, 2000+
S4711**	143.7	1094.7	6693	5.6	84.5	10.3	Peifker, 20
S02	119.3	1949.9	7582	6.8	101.7	11.7	Peifker, 20
S02**	234.6	1627.4	8060	3.4	51.0	6.3	T-I, Pulk21-2
S27**	35	7035	14239	23	345	37.4	PVD, Pulk21-2
S27**	1096	30214	2519	0.74	11.1	1.24	T-I, Pulk21-3

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-02-0563А

Примечание. Авторы цитируемых работ отмечают, что после многолетних высокоточных астрометрических наблюдений и нескольких лет

доплеровских измерений лучевых скоростей, точность имеющихся данных достигла уровня, на котором можно было бы надеяться обнаружить отклонения от

кеплеровских орбит. Такие отклонения могут быть следствием релятивистских эффектов или являются следствием протяженного компонента массы,

возможно, находящегося в районе СМЧД. Есть примеры обнаружения из наблюдений S02 величины $\Gamma = 0.00088 \pm 0.00080$, при ожидаемом 0.00065 (Parsa,

2017) и гравитационного красного смещения (Gravity, 2018), но основные параметры, такие как сдвиг периастра $\Delta\varphi$ — совокупный эффект, накапливаются

от оборота к обороту и, следовательно, с гораздо большей вероятностью будут обнаружены у звезд, которые совершают несколько витков в течение

периода наблюдательной кампании. Учитывая астрометрическую точность положений (например, 0.1 mas для S02 и 1 mas для S102), такие эффекты,

вероятно, будут обнаружены только с помощью телескопов следующего поколения, таких как 30-метровый телескоп.

Для орбит, полученных методом PVD, сумма масс предполагалась равной $4.15 \times 10^6 M_\odot$ и расстояние до центрального тела $R_0 = 8.19$ кпс, кроме орбиты S2 (строка 6 Pulk21-2 T-I), где масса была свободным параметром, орбита вычислялась методом Тиле-Иннеса (Т-И)-Измайлова. Значение массы при минимуме ошибке O-C составило $2.527 \pm 0.061 \times 10^6 M_\odot$ при параллаксе $0''.000122$.

S2 и S55 (S102) мы условно отнесли к “классическим”, для которых достаточно много опубликованных положений. Затем была рассмотрена недавно открытая звезда S4711 (с наиболее коротким периодом обращения 7.6 лет, которая подпадала под определение “squeezars”, см. Peifker, 2020).

Последнюю звезду из нашего списка — S27 мы отнесли к разряду проблемных, или “маргинальных”, как сами авторы их называют. Это звезды с необычными, неожиданными параметрами. Для звезды S27 нет опубликованных точных положений. Есть ее положения на графиках — R.A. и Decl в зависимости от времени, см. статью Gillessen et al., 2008. Там же даны элементы орбиты. В статье Gillessen et al., 2017 орбиты для этой звезды нет.

Авторы объясняют это неуверенностью в ее орбитальном движении из-за того, что: а) не удалось оценить кривизну, б) была допущена ошибка в оценке ускорения движения, в) лучевая скорость, равная -120 км/с, не менялась на всем достаточно длительном протяжении наблюдений.

Как показал наш анализ при применении метода, разработанного И.С.Измайловым, положения содержат возможные ошибки. Предположительно, даже ошибки в отождествлении из-за наличия близких и тесных изображений перекрывающихся звезд.

Для S27 мы использовали диаграмму из Gillessen et al., 2008. Измерили точные положения $\Delta X, \Delta Y$. Методом PVD получили по короткой дуге (13 лет наблюдений, а период обращения до 112 лет) новую орбиту звезды S27. В Таблице 1 даны наша орбита и орбита из статьи Gillessen et al. 2008.

Мы хотели бы применить наши методы определения орбит двойных звезд с расчетом на будущее. Если будет возможен доступ к наблюдениям на телескопах, подобным существующим VLT или проектируемым ELT, то, по возможности, пригодился бы наш опыт определения орбит и масс звезд, и пулковская школа наблюдений двойных звезд могла бы сыграть свою роль.

ДОПОЛНЕНИЯ. “Наша орбита” означает, что орбита вычислена по нашим методам и публикациям положений других авторов. Также отметим некоторые особенности в полученных результатах, которые возможно объяснить на более обширном материале при дальнейших исследованиях.

При применении метода PVD орбиты получаются весьма близкими к орбитам, опубликованным наблюдателями Keck и VLT.

При применении модифицированного метода Тиле-Иннеса к звезде S27 элементы получились с большими ошибками, период обращения P почти на порядок больше (705 лет вместо 103 лет). Также следует отметить, что среди наших звезд только S02 имеет величину расстояния до периастра $r_p < 120 a.e.$ (а именно, 119 a.e.) как одно из условий принадлежности к “squeezars” см. Alexander & Morris, 2003. r_p у S27 зависит от способа вычисления орбиты, см. последние строчки в Табл. 2.

ВЫВОДЫ. Сделан вывод о возможности применения пулковских методов — PVD и геометрического метода Киселева, а также метода, предложенного И.С.Измайловым — для получения предварительных орбит S-звезд скопления Sgr A* (в частности “squeezars,”) в согласии с точностью представленных их относительных координат.

Мы также постарались улучшить нашу орбиту для S02 и рассчитать орбиту для S27. Орбиты S2 и S27 определены по короткой дуге: S2 — по шести среднегодовым точкам при периоде обращения 16 лет и наблюдениях более 16 лет. S27 — по 13 точкам наблюдений и периоде обращения 112 лет.

Мы сделали попытку вычислить теоретические релятивистские параметры для некоторых звезд согласно их элементам орбиты. Они получились того же порядка, как величины, приведенные наблюдателями телескопов Keck и VLT.

ЛИТЕРАТУРА

- Meyer L., arXiv: 1210.1294v1 [astro-ph.GA] 4 Oct 2012
 Gillessen S. arXiv: 0810.4674v1 [astro-ph] 26 Oct 2008
 Gillessen et al. arXiv: 1611.09144v1 [astro-ph.GA] 28 Nov 2016
 Peifker F. arXiv: 2008.04764v1 [astro-ph.GA] 11 Aug 2020
 Reiner Spurzem, частное сообщение, 2008
 Киселев А.А. и др., АЖ 2006, том 83,12, с. 1–10
 Parsa et al. Astroph J, 845:22, 2017
 Alexander & Morris, Aph J., 590:L25–L28, 2003
 GRAVITY Collaboration, A&A 615? L15 (2018)