

Search for invisible satellites of visual binary stars by
studying the stability of their long-term orbital dynamics

A. V. Melnikov¹, M. Yu. Khovrichiev² and I. S. Izmailov¹

¹ Central (Pulkovo) astronomical observatory of RAS,
² Saint Petersburg State University

August 21, 2026

Основные мотивы для исследования кратных звездных систем

Кратные звездные системы составляют более половины от общего числа звезд нашей Галактики. Свойства систем отражают особенности их формирования и тенденции, обусловленные длительной динамической эволюцией. Исследуя кратные звездные системы, мы понимаем процесс эволюции звезд, можем получить прямые и наиболее точные оценки их масс.

Двойные звездные системы

Двойные системы составляют около 75% от числа всех известных кратных звездных систем. Наблюдательная программа 26-дюймового рефрактора Пулковской обсерватории сосредоточена на сборе относительных положений (ρ , θ) широких двойных звезд. Имеющиеся данные, охватывающие несколько десятилетий, позволяют выявить изменения во временных рядах ρ и θ .

В ряде исследуемых систем наблюдаются квазипериодические смещения во временных рядах положений. Они могут указывать на гравитационные возмущения от невидимых маломассивных спутников. Поиск таких маломассивных компаньонов в широких двойных системах является важным аспектом формирования моделей эволюции звезд (поиск коричневых карликов) и как кратных звездных, так и экзопланетных систем.

Цель настоящего исследования

Прямое обнаружение маломассивных звезд методами лучевых скоростей (эффект Доплера) или спекл-интерферометрии высокого разрешения сильно затруднено. Причиной служат их низкая светимость и малое угловое разделение (в субсекундном диапазоне) относительно гораздо более яркого главного компонента.

Анализ устойчивости орбитального движения предлагает альтернативный метод верификации потенциальных компаньонов. В настоящей работе представлен краткий обзор данной методики и приведены результаты ее практического применения. Разрабатываемый подход может быть также успешно применен в задаче поиска спутников экзопланет (экзолун).

Исследование устойчивости проводилось путем построения и анализа **диаграмм устойчивости**. Такая диаграмма представляет собой плоскость параметров, на которой разграничены области устойчивого и неустойчивого движения.

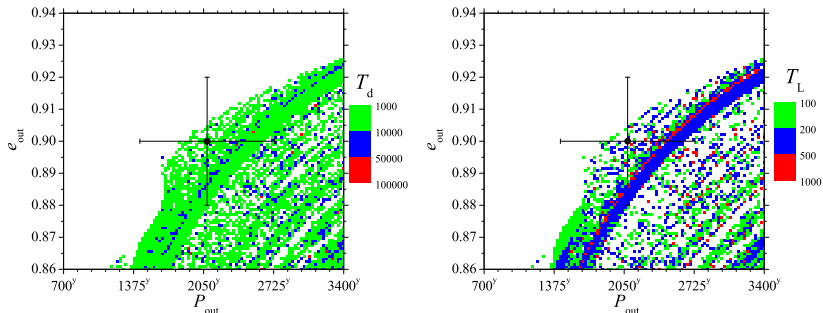
Анализ диаграмм устойчивости позволяет:

- предсказывать существование у звезды невидимого спутника с определенными физическими и орбитальными характеристиками;
- оптимизировать стратегию высокоточных наблюдений для поиска маломассивных тел в звездной системе;
- верифицировать параметры обнаруженных объектов, выведенные из наблюдательных данных.

Показатели Ляпунова и ляпуновское время

Диаграммы устойчивости строились на основе вычисления **характеристических показателей Ляпунова (ХПЛ)**. Физический смысл ХПЛ заключается в определении средней скорости экспоненциальной расходимости близких (по начальному положению) траекторий в фазовом пространстве. Положительное значение максимального ХПЛ (МХПЛ) указывает на хаотический характер динамики, тогда как близкое к нулю — на регулярное движение. Величина, обратная МХПЛ, называется **ляпуновским временем** ($T_L = 1/L$, где L — МХПЛ); она определяет **характерное время предсказуемости динамики системы**.

Melnikov, A.V. et al., Stability of the multiple star system ι UMa (ADS 7114) // Astronomy Reports, 58, 640, 2014. Система ι UMa (ADS 7114 = HD 76644) является четверной (AaBC). Aa: масса $2.7M_{\odot}$, A — F0V, a — белый карлик, $P = 12.2$ года. Компонента B: масса $0.35M_{\odot}$, M3V, $P \approx 2084$ лет. Компонента C: масса $0.3M_{\odot}$, M4V, $P \approx 40$ лет.



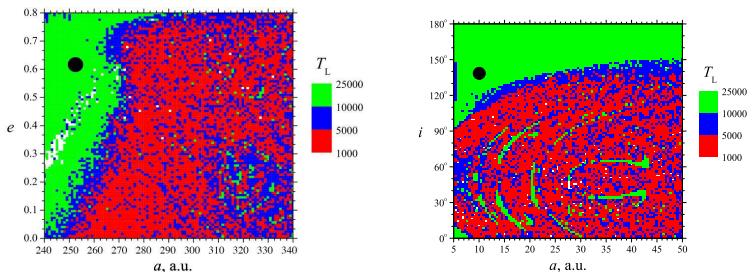
Слева: времена (в годах) распада тройных систем. В белых областях системы распадаются за время $T_d < 1000$ лет. Справа: ляпуновские времена (в годах) тройных систем. В белых областях расположены системы с $T_L < 100$ лет. Положение ι UMa указано кружком с барами. Система ι UMa — неустойчива. Характерные значения для времени распада системы составляют менее 10^4 лет, для ляпуновского времени (времени предсказуемой динамики) — менее 10^3 лет.

Проверка гипотезы о наличии компаньона в системе ADS 15571

Широкая визуально-двойная звёздная система ADS 15571 (WDS 21582+8252).
Aa: масса ($1.10 \pm 0.07 M_{\odot}$), F8V; Ab: масса ($0.59 \pm 0.07 M_{\odot}$), K5V, $P \approx 25$ лет.
Компонента B: масса $1.26 M_{\odot}$, $P \approx 20\,000$ лет.

Заподозрено существование невидимого спутника у компонента A: Grosheva, E.A., Analysis of periodic perturbations in the multiple system ADS 15571 // Astrophysics, 49, 397, 2006.

Проведены спекл-интерферометрические наблюдения спутника у ADS 15571 A: Sokov, E.N. et al., Study of the components of the double star ADS 15571 by speckle interferometry // Astronomy Letters, 50, 138, 2024.



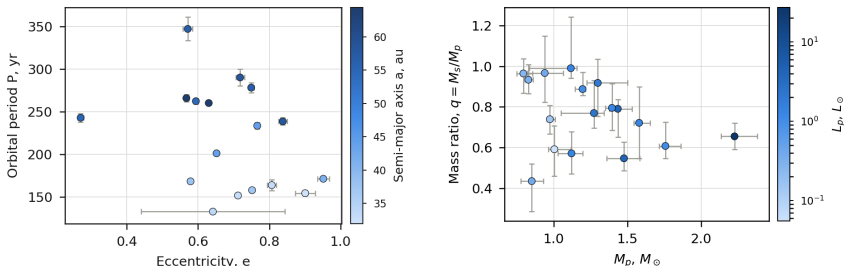
Ляпуновское время (в годах) для маломассивного компаньона в системе ADS 15571, вычисленное на плоскости «большая полуось — эксцентриситет». Положение маломассивного компонента обозначено чёрной точкой (Sokov et al., 2024).

Izmailov, I. and Khovritchev, M., New orbital parameters of 850 wide visual binary stars and their statistical properties // Res. Astron. Astrophys., 25, 015016, 2025.

Таблица: Орбитальные параметры, видимые звездные величины и массы (в $M_{\odot}$) компонентов отобранных двойных звездных систем. $P < 350$ лет, $0.4 \leq M_s/M_p \leq 1$

WDS	P , yr	e	i , °	V_1 , m	V_2 , m	a , a.u.	M_1	M_2
00210+6740	150	0.90	89	8.6	8.9	32	0.92	0.81
01259-4754	160	0.81	120	8.1	9.8	33	0.74	0.95
03121-2859	280	0.75	82	4.0	7.2	57	1.4	0.83
03350+6002	290	0.72	69	6.8	8.0	58	1.2	1.1
04227+1503	240	0.27	140	7.3	8.6	55	1.2	1.0
04301+1538	170	0.95	130	5.7	8.1	41	0.95	1.5
06262+1845	130	0.64	78	6.7	12	34	0.92	0.90
10227+1521	350	0.57	140	7.4	10	56	0.69	0.87
10361-2641	160	0.75	130	6.7	7.8	37	1.1	1.0
12301-1324	150	0.71	24	6.5	9.6	33	1.0	0.73
13375+3618	240	0.84	150	5.0	7.0	58	2.0	1.3
13461+0507	260	0.63	43	7.9	8.1	64	1.1	1.3
15183+2650	200	0.65	59	7.3	7.4	44	1.3	1.3
15245+3723	260	0.59	130	7.1	7.6	55	0.90	1.3
16289+1825	230	0.77	110	7.7	7.9	44	0.81	0.75
16518+2840	270	0.57	30	6.9	8.5	64	0.71	1.4
19282-1209	170	0.58	14	8.1	8.7	38	0.95	1.1

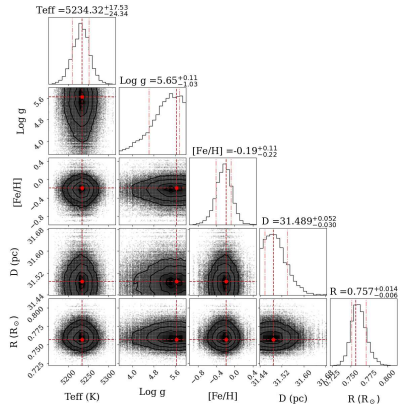
Из анализа орбитального движения двойной системы выводится только суммарная масса ($M_p + M_s$). Однако для численного динамического моделирования необходимы индивидуальные массы каждого компонента. Оценки масс главных компонентов были получены по фотометрическим распределениям энергии в спектре (SED) с использованием программного пакета **astroARIADNE** (<https://github.com/jvines/astroARIADNE>).



Слева: диаграмма «эксцентриситет — период» (соответствующие значения большой полуоси показаны цветом). Справа: диаграмма «масса главного компонента — отношение масс» (соответствующая светимость главных компонентов показана цветом).

Программный код **astroARIADNE** (Vines J.I. and Jenkins, J.S., ARIADNE: measuring accurate and precise stellar parameters through SED fitting // MNRAS, 513, 2719, 2022) использует все доступные фотометрические измерения для каждой звезды, чтобы построить спектральное распределение энергии и оценить основные параметры звезд с использованием параллакса из каталога Gaia DR3.

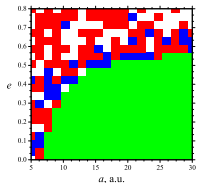
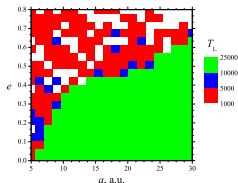
Угловая диаграмма (corner diagram) для компонента A системы WDS 00210+6740, полученная в результате выполнения программы **astroARIADNE**. Оценки соответствуют изохронной массе $0.93^{+0.04}_{-0.03} M_{\odot}$.



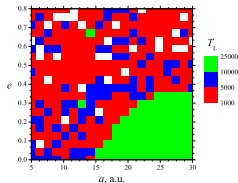
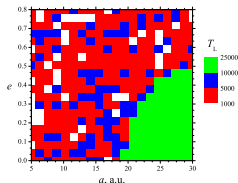
Возможные значения параметров маломассивных компаньонов

Примеры диаграмм, построенных для отобранных 17 двойных звездных систем, приведены ниже. Принятые ограничения на параметры невидимого компаньона: $m = 0.5M_{\odot}$, $i = i_b$, $5 \leq a \leq 30$ а.е.

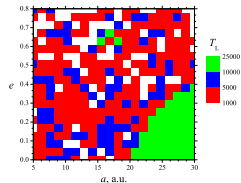
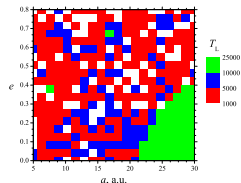
WDS 01259-4754



WDS 03121-285



WDS 03350+6002



Ляпуновское время (в годах) для маломассивного компаньона у компонента А (верхняя панель) и компонента В (нижняя панель), вычисленное на плоскости «большая полуось — эксцентриситет».

- Показано, что исследование долговременной орбитальной устойчивости широких двойных систем — эффективный инструмент для оценки возможных орбитальных параметров скрытых маломассивных спутников.
- Данный вывод подтверждают результаты анализа системы ADS 15571. Спутник, обнаруженный методом спекл-интерферометрии (Sokov et al., 2024), находится в области орбитальной устойчивости системы.
- На основе описанного подхода выполнен предварительный анализ выборки из 17 короткопериодических широких двойных звезд. В результате были получены ограничения на возможные орбитальные параметры гипотетических маломассивных компаньонов, которые могут быть использованы при планировании дальнейших наблюдательных программ.

Спасибо за внимание!