

АРГУМЕНТЫ GAIA ЗА И ПРОТИВ ГИПОТЕТИЧЕСКОГО КОМПАЬОНА СОЛНЦА

© 2023 г. О. Ю. Малков^{1,*}

¹ Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: malkov@inasan.ru

Поступила в редакцию 31.12.2022 г.

После доработки 14.01.2023 г.

Принята к публикации 24.01.2023 г.

Гипотезе о том, что Солнце — компонент двойной звездной системы, уже около ста лет. Предположения о природе компаньона продолжают публиковаться по мере появления новых наблюдательных данных. В статье показано, что результаты работы космической обсерватории Gaia накладывают определенные ограничения на природу и расположение компаньона. То обстоятельство, что компаньон не зарегистрирован обсерваторией, оставляет следующие предельные возможности: холодный коричневый карлик (Y3 и позднее) на орбите внутри облака Оорта или L/T коричневый карлик на более высокой орбите (от $a \approx 10^5$ а.е.). При этом компаньон, вполне вероятно, каталогизирован в обзорах 2MASS и WISE. В статье также оценены абсолютные G-величины коричневых карликов поздних спектральных типов.

Ключевые слова: двойные звезды, Солнечная система, коричневые карлики

DOI: 10.31857/S0004629923030040, **EDN:** PNMGIR

1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые вопрос о наличии у Солнца компаньона был поднят около ста лет назад [1]. В качестве кандидатов на роль компаньона Солнца рассматривались как известные объекты (46 Tau [1]), так и гипотетические, чье наличие могло подтверждаться косвенными признаками: релятивистский объект [2], черный карлик [3], коричневый карлик [4]. К этим работам примыкают также исследования вопроса о наличии у Солнца неизвестного компаньона с *планетарной* массой [5–7].

Среди возможных индикаторов наличия компаньона у Солнца рассматривались:

- (i) ускорение барицентра Солнечной системы, приводящее к аномальным изменениям периода пульсаров, расположенных в определенном направлении на небе [8, 9];
- (ii) обилие комет с гиперболическими орбитами, вызванное гравитационным влиянием компактного массивного объекта (нейтронной звезды или черной дыры) [10] или даже *высокоскоростного* объекта солнечной массы [11]; отметим, что в настоящее время на 100% зафиксирована лишь одна комета с гиперболической орбитой, а именно, комета 2I/Borisov [12, 13] (известны также межзвездный астероид 1I/'Oumuamua [14] и двигавшийся, с достоверностью 99.999%, по ги-

перболической орбите метеор CNEOS 2014–01–08 [15]);

- (iii) наличие цикла длительностью 26×10^6 лет в биологических массовых вымираниях, вызванных, как предполагается, интенсивными кометными дождями [3] (ожидаемая граница облака Оорта — резервуара комет, которые могут возмущаться гипотетическим компаньоном Солнца — составляет около 10^5 а.е., см. дискуссию в разделе 3);

- (iv) особенности орбит Седны и других транснептуновых объектов, вызванные присутствием компаньона Солнца [5, 6, 16].

В ряде работ предпринимались попытки указать границы для возможных значений параметров компаньона и орбиты или даже оценить их [3, 6, 16–18]. Высказывались предположения о наличии искомого объекта в современных больших инфракрасных фотометрических обзорах (IRAS, 2MASS, WISE) [6, 16, 19].

С появлением предварительных результатов астрометрической космической обсерватории Gaia стало возможным уточнить характеристики этого гипотетического объекта. Тот факт, что обсерватория Gaia (пока) не обнаружила компаньон Солнца, накладывает определенные ограничения на его природу и расположение.

В этой работе исследуется возможность существования и обнаружения коричневого карлика —

Таблица 1. Орбитальные и физические параметры широких двойных систем

Параметры	WDS 01522–5220	WDS 00524–6930
P , 10^8 уг	5.607369	5.8
a , "	76.6	170 ± 11
e	0.999	0.74 ± 0.02
Spect. type	K3V + M9.5	F7 IV–V
ϖ , mas	11.5431 ± 0.0122	16.5718 ± 0.0163
a , а.е.	6637.78	10259.5
a , пк	0.0322	0.0497
$d_{\max}$, пк	0.0644	0.0865

возможного компаньона Солнца. Оцениваются его предельные параметры, возможное расстояние от Солнца и величина собственного движения. Проводится сравнение как с реальными широкими двойными системами, так и с оценками других авторов, исследующих данный вопрос.

2. НАБЛЮДАЕМЫЕ ШИРОКИЕ ДВОЙНЫЕ

Прежде всего определим, какие значения орбитальных параметров и параметров компонентов имеют самые широкие из наблюдаемых двойных систем с известными орбитальными элементами. Наиболее авторитетным источником сведений о таких системах является каталог орбитальных двойных ORB6 [20]. Около десятка из 3310 звезд, содержащихся в ORB6, можно назвать очень широкими парами (имеющими период $P > 10^5$ лет и/или большую полуось $a > 100''$).

Не все из этих объектов будут рассматриваться в данном исследовании. Как показано в работах по определению масс компонентов орбитальных двойных [21, 22], систему WDS 23100+3651 можно заподозрить в оптической двойственности, другие (WDS 14396–6050, WDS 07204–5219) показывают рассогласование значений динамических масс, определенных по третьему закону Кеплера, и фотометрических масс, определенных по блеску компонентов, расстоянию до системы и соотношению масса–светимость. Для систем WDS 19464+3344 и WDS 00057+4549 в ORB6 приводятся по три достаточно различающихся орбитальных решения.

Для наших целей можно рассмотреть двойные WDS 00524–6930 и WDS 01522–5220. Их параметры приведены в табл. 1. Орбитальные элементы (P , A , e) взяты из ORB6, спектральная классификация из WDS [23] и SIMBAD, параллаксы из Gaia DR3. Большие полуоси в линейных единицах и максимальное расстояние между компонентами $d_{\max} \approx a(e + 1)$ оценены здесь.

Таблица 2. Абсолютные звездные величины холодных карликов

Полоса	G , Gaia	H , 2MASS	K_s , 2MASS	$W1$, WISE
M9.5	16.40	11.00	10.50	10.15
L5	18.50	12.44	11.87	11.19
T4.5	21.04	14.49	14.55	12.97
Y2	32.2	22.6	23.5	18.1

3. АБСОЛЮТНЫЕ ЗВЕЗДНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ КОРИЧНЕВЫХ КАРЛИКОВ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ОБНАРУЖЕНИЯ

В этом разделе приведены (как опубликованные, так и полученные в данной работе) абсолютные звездные величины коричневых карликов.

Для оценки блеска компаньона на различном расстоянии от главного компонента (Солнца) необходимо знать абсолютную звездную величину объекта M . Таблица 2 содержит абсолютные звездные величины в нескольких фотометрических полосах обзоров Gaia [24], [25], 2MASS [26], WISE [27] для случая, если компаньон – холодный красный карлик (M9.5), горячий коричневый карлик (L5), теплый коричневый карлик (T4.5) и холодный коричневый карлик (Y2).

Источником значений M для звезд M9.5 и L5 служили таблицы Мамажека¹, опубликованные в [28]. Из тех же таблиц взяты сведения о M_H и M_{K_s} для коричневых карликов T4.5 и Y2.

Для оценки значений M_G и M_{W1} для последних двух спектральных типов мы воспользовались каталогом ближайших (до 20 пк) к Солнцу 525 L, T и Y коричневых карликов [29]. Он содержит данные для фотометрической системы WISE, а для оценки M_G -величин мы отождествили каталогизированные источники с архивом Gaia DR3. Отождествление осуществлялось с радиусом отождествления $1''$. Удалось отождествить 132 объекта из 496. Два объекта, 2MASS 0915+0422 и 2MASS 1520–4422, получили по два аналога в Gaia DR3, в обоих случаях подходящим признан тот, который расположен ближе к объекту–источнику. Дальнейший анализ включал в себя сравнение собственных движений и параллаксов, заключенных в [29], с данными Gaia, а также построение различных фотометрических зависимостей между G -величиной и фотометрией, представленной в [29]. В результате пять объектов (2MASS 0355+1133, WISE 0715–1145, WISE 0720–0846B, DENIS 1253–5709, Gaia 1831–0732) были признаны неправильно отождествленными и отброшены.

¹ http://www.pas.rochester.edu/emamajek/EEM_dwarf_UBVI-JHK_colors_Teff.txt

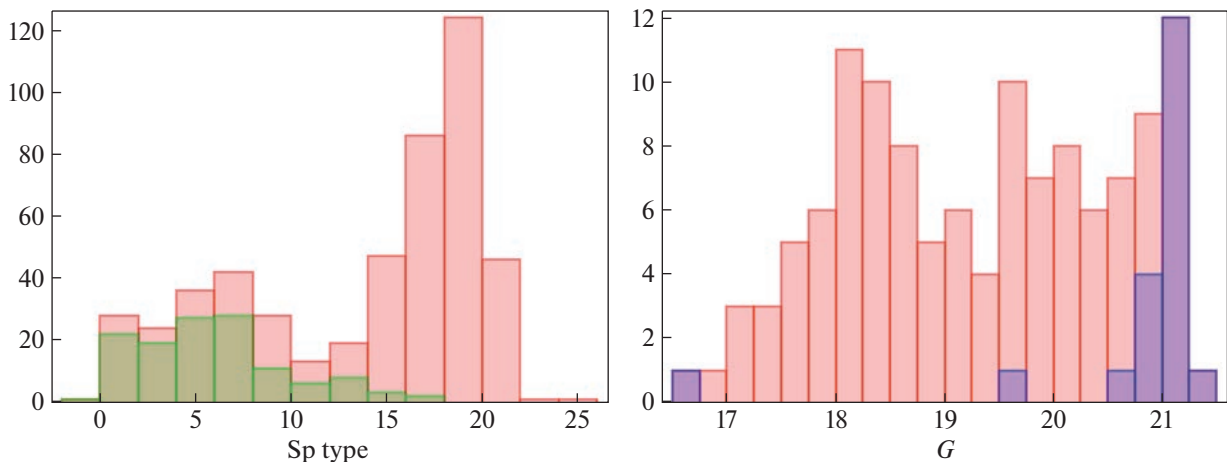


Рис. 1. Отождествление коричневых карликов из каталога [29] с архивом Gaia DR3. Левая панель: распределение коричневых карликов по спектральному типу (красные — все звезды, зеленые — отождествленные с Gaia). Спектральный тип определяется следующим образом: 0 — L0, ..., 5 — L5, ..., 10 — T0, ..., 20 — Y0, Правая панель: распределение отождествленных объектов по блеску G (красные — все, синие — не имеющие значения параллакса в Gaia).

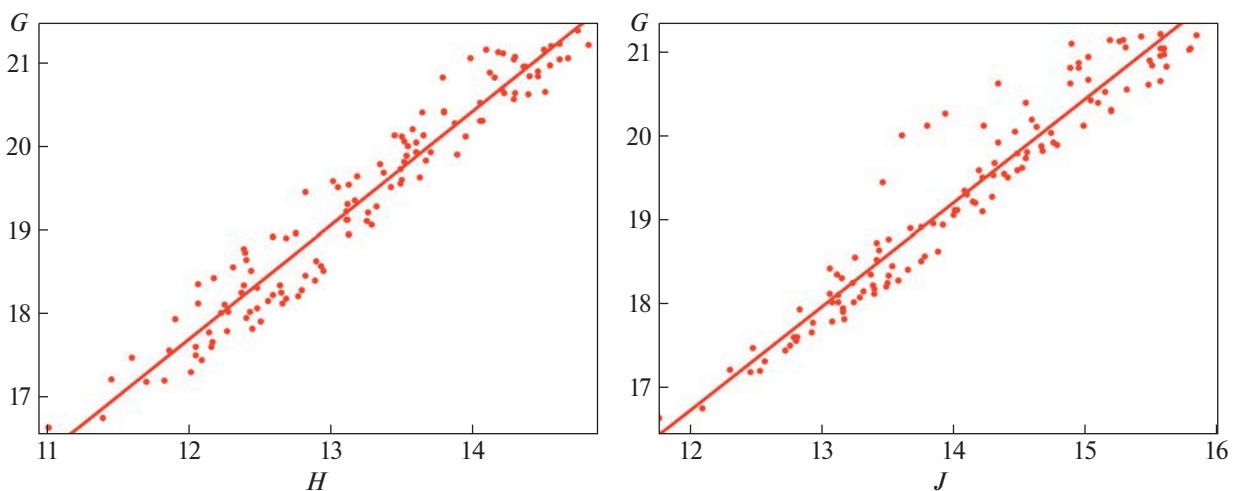


Рис. 2. Отождествленные коричневые карлики на диаграммах $H - G$ (слева) и $J - G$ (справа). Прямые линии — результаты линейной аппроксимации согласно ф-лам (1) и (2).

Результаты отождествления представлены на рис. 1. Можно видеть, что в архиве Gaia обнаружались объекты спектральных типов не холоднее T6, и что хотя предельная величина объектов Gaia достигает $G \approx 21.25^m$, однако предельный блеск, необходимый для определения параллакса, находится на уровне $G \approx 20.75^m$.

Полученные результаты могут быть использованы для получения по крайней мере грубого соотношения между G -величиной объекта и его блеском в инфракрасных полосах H (2MASS) и J (2MASS). На рис. 2 представлены все отождествленные объекты, имеющие G , H и J фото-

метрию, а также результат линейной аппроксимации,

$$G = 1.363H + 1.358, \quad (1)$$

$$G = 1.235J + 1.918, \quad (2)$$

коэффициенты корреляции в формулах (1) и (2) — 0.97 и 0.96 соответственно. Объект 2MASS 0746+2000 (самый яркий на диаграммах) имеет в архиве Gaia DR3 признак VARIABLE и в аппроксимации не участвовал.

Экстраполируя эти соотношения в область низких температур, можно оценить абсолютные G -величины коричневых карликов T и Y типов (в таблице Мамажека эти значения даны только

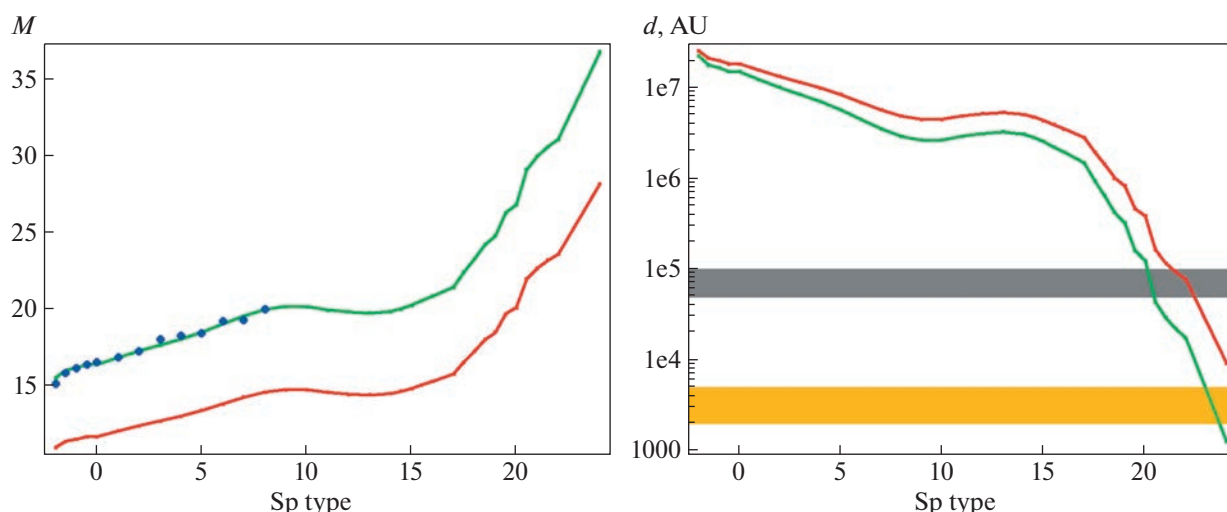


Рис. 3. Левая панель — абсолютные звездные величины коричневых карликов. Красная кривая — аппроксимация значений M_J (2MASS) из таблицы Мамажека, зеленая кривая — M_G (Gaia), вычисленные по формуле (2), синие точки — значения M_G (Gaia) из таблицы Мамажека. Правая панель — предельное расстояние для полосы J 2MASS (красная кривая) и полосы G Gaia DR3 (зеленая кривая), на котором могут наблюдаться коричневые карлики. Объекты, расположенные ниже этих кривых, должны попасть в соответствующие обзоры. Горизонтальные полосы — примерное положение внутренней (желтая) и внешней (серая) границ облака Оорта. Принцип кодировки спектральных типов коричневых карликов аналогичен приведенному в подписи к рис. 1.

для L8 и горячее). Эта оценка приведена на рис. 3, левая панель. Примечательно, что в области горячих коричневых карликов наши данные хорошо совпадают с данными Мамажека.

Полученные данные позволяют оценить предельное расстояние, на котором коричневый карлик того или иного типа будет зарегистрирован обсерваторией Gaia (рис. 3, правая панель). В качестве предельной звездной величины для Gaia использовалось значение $G.75^m$, межзвездное поглощение считалось ничтожным. Можно видеть, что коричневый карлик позднее Y3 не будет зарегистрирован обсерваторией Gaia, даже находясь внутри облака Оорта. Здесь считается, что внутренняя граница облака Оорта находится на расстоянии 2–5 тыс. а.е. от Солнца, а внешняя — 50–100 тыс. а.е. (см., напр., [30]; см. также сайт² на портале NASA). В то же время этот гипотетический коричневый карлик определенно будет включен в каталог 2MASS (красная кривая; здесь учитывается, что 2MASS полон до $J = 16.5^m$) и тем более в WISE. Более горячим объектам (L и T карликам) необходимо располагаться за пределами облака Оорта для того, чтобы не попасть в архив наблюдений Gaia.

² <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/oort-cloud/overview/>

4. СОБСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

Представляется целесообразным оценить величину собственного движения холодного коричневого карлика — спутника Солнца, находящегося в районе внутренней границы облака Оорта. Орбитальная скорость в каждый момент времени может быть записана как

$$v = \sqrt{G(m_1 + m_2) \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}. \quad (3)$$

Здесь гравитационная постоянная $G = 6.6743 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ с}^{-2} \text{ кг}^{-1}$, m_1, m_2 — массы компонентов: $m_1 = m_\odot = 1.989 \times 10^{30} \text{ кг}$, а массой компонента m_2 можно пренебречь. Текущее расстояние до компаньона r примем равным 2000 а.е. ($= 3 \times 10^{14} \text{ м}$), а для большой полуоси a рассмотрим варианты $r = a$ (круговая орбита) и $r = 1.9a$ (компаньон находится в окрестностях афелия очень эксцентричной орбиты). Тогда значения орбитальной скорости, оцененные из (3) для этих двух случаев, будут равны 665.2 и 210.4 м/с. Собственное движение,

$$\mu = \frac{v}{4.74r}, \quad (4)$$

в этих случаях будет равно 14.5 и 4.6"/год соответственно (ср. с собственным движением звезды Барнарда, 10.4"/год). В уравнении (4) величины μ, v, r выражены в единицах "/год, км/с, пк соответственно.

Такое заметное собственное движение немедленно выделяло бы объект в астрометрическом обзоре, но одновременно чрезвычайно затрудняло бы его кросс-отождествление между фотометрическими обзорами, даже при небольшой разнице эпох наблюдения.

5. ЧЕРНЫЕ КАРЛИКИ

Термин “черный карлик” не имеет четкого *количественного* определения. Более того, в литературе этим понятием называют два совершенно разных типа объектов.

1. Звезды очень низкой массы ($m < 0.08m_{\odot}$), не проходящие стадию термоядерной реакции сжигания водорода, за время, гораздо меньшее, чем возраст Галактики, становятся полностью вырожденными объектами или черными карликами [31].

2. Старые белые карлики, охладившие свои внешние слои до нескольких тысяч градусов, и имеющие светимость порядка $10^{-5} L_{\odot}$ и ниже, также называют черными карликами [32]. Это процесс гораздо более длительный, формулы для оценок параметров этих объектов можно найти в [33].

Очевидно, что если компаньоном Солнца является черный карлик, то вероятность его обнаружения сильно уменьшается. Заметим, впрочем, что черный карлик “второго типа” (бывший белый карлик), в отличие от черного карлика “первого типа” (бывший коричневый карлик), имеет массу, которой не следует пренебрегать при оценке собственного движения такого объекта. В предположении, что компаньон имеет массу, равную солнечной, величины, приведенные в разделе 4, должны быть увеличены на 40%.

6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Сравним проделанные здесь оценки с наблюдаемыми и предсказанными другими авторами.

Отметим, что двойная система “Солнце–коричневый карлик Y3”, обсуждаемая в конце раздела 3, весьма походила бы на системы WDS 01522–5220 и WDS 00524–6930, описанные в разделе 2, и была бы даже еще компактнее.

Авторы работы [3] предполагают наличие у Солнца компаньона — черного карлика с массой от 2×10^{-4} до $7 \times 10^{-2} m_{\odot}$ на весьма эксцентричной ($e \geq 0.9$) орбите с большой полуосью $a \approx 8.8 \times 10^4$ а.е. Как следует из рис. 3 (правая панель), маловероятно, что такой объект может попасть в архив Gaia и в существующие инфракрасные обзоры.

В работе [17], с целью определить границы Солнечной системы, рассматривались гипотети-

ческие спутники Солнца в широком диапазоне масс, от 0.005 до $0.3 m_{\odot}$ на орбитах с большой полуосью $a \approx 9 \times 10^4$ а.е. В этом случае, очевидно, вероятность обнаружения зависит от массы объекта.

Наконец, в работе [16] предложена зависимость между массой гипотетического объекта и большой полуосью его орбиты: $m/m_J \approx 5\sqrt{9000 \text{ AU}/a}$.

Можно видеть, что в этих исследованиях акцент, преимущественно, делался на высокие (выше облака Оорта) орбиты для гипотетического компаньона Солнца. В работе [19], впрочем, рассматривались и более низкие орбиты, но там речь шла об объектах планетных масс, $(1-5) m_J$. Однако, как показывает анализ, выполненный в данной работе, при определенных условиях компаньон — коричневый карлик — может существовать и на низкой орбите (ниже облака Оорта) и оставаться незамеченным для обсерватории Gaia и нераспознанным (хотя и наличествующим, возможно) в современных инфракрасных фотометрических обзорах.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены ограничения на природу и характеристики гипотетического компонента Солнца, налагаемые текущими результатами работы космической обсерватории Gaia. Показано в частности, что даже находясь на внутренней по отношению к облаку Оорта орбите, коричневый карлик спектрального типа Y3 и холоднее останется незамеченным обсерваторией Gaia, хотя вполне может оказаться уже включенным в каталоги инфракрасных обзоров 2MASS и WISE. Показано, что такой объект должен демонстрировать заметное собственное движение — единицы или десятки угловых секунд в год. Уменьшение температуры гипотетического компаньона и/или расположение его на более высокой орбите делает его обнаружение современными астрометрическими и фотометрическими методами практически невозможным. В работе также получена эмпирическая зависимость $M_G(\text{SpT})$ для коричневых карликов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (№ 13.2251.21.0177).

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит анонимного рецензента, замечания которого позволили значительно улучшить содержание статьи. В работе использовались данные из ар-

хива Gaia DR3 и из баз данных ADS, SIMBAD, VizieR. В данном исследовании использовался TOPCAT, инструмент для интерактивного графического просмотра и редактирования табличных данных [34].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *W. J. Luyten*, Harvard College Observ. Bull. **814**, 2 (1925).
2. *S. Pineault*, Nature **275**, 727 (1978).
3. *D. P. Whitmire and A. A. Jackson*, Nature **308**, 713 (1984).
4. *J. J. Matese*, in *Planetary Systems in the Universe*, IAU Symposium № 202, held 7–11 August 2000 at Manchester, United Kingdom, edited by A. Penny, Proc. IAU Symp. **202**, 214 (2004).
5. *R. S. Gomes, J. J. Matese, and J. J. Lissauer*, Icarus **184**(2), 589 (2006).
6. *J. J. Matese and D. P. Whitmire*, Icarus **211**(2), 926 (2011), arXiv:1004.4584 [astro-ph.EP].
7. *R. S. Gomes, J. S. Soares, and R. Brasser*, Icarus **258**(1), 37 (2015).
8. *E. R. Harrison*, Nature **270**, 324 (1977).
9. *E. L. Wright*, Nature **272**, 649 (1978).
10. *D. Wilkins*, Nature **282**, 696 (1979).
11. *J. G. Kirk*, Nature **286**, 306 (1980).
12. *J. de León, J. Licandro, M. Serra-Ricart, A. Cabrera-Lavers, J. Font Serra, R. Scarpa, C. de la Fuente Marcos, and R. de la Fuente Marcos*, Res. Notes Amer. Astron. Soc. **3**, 131 (2019).
13. *G. V. Borisov and B. M. Shustov*, Solar System Res. **55**, 124 (2021).
14. *D. Jewitt, J. Luu, J. Rajagopal, R. Kotulla, S. Ridgway, W. Liu, and T. Augusteijn*, Astrophys. J. Letters **850**, id. L36 (2017), arXiv:1711.05687 [astro-ph.EP].
15. *A. Siraj and A. Loeb*, arXiv:1904.07224 [astro-ph.EP] (2022).
16. *J. J. Matese, D. P. Whitmire, and J. J. Lissauer*, Earth, Moon and Planets **97**, 459 (2005).
17. *J. J. Rawal*, Earth, Moon and Planets **36**, 211 (1986).
18. *P. O. Vandervoort and E. A. Sather*, Icarus **105**, 26 (1993).
19. *J. A. Fernández*, Astrophys. J. **726**(1), id. 33 (2011).
20. *W. I. Hartkopf, B. D. Mason, and C. E. Worley*, Astron. J. **122**, 3472 (2001).
21. *O. Y. Malkov, V. S. Tamazian, J. A. Docobo, and D. A. Chulkov*, Astron. and Astrophys. **546**, id. A69 (2012).
22. *D. Chulkov and O. Malkov*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **517**, 2925 (2022), arXiv:2206.00604 [astro-ph.SR].
23. *B. D. Mason, G. L. Wycoff, W. I. Hartkopf, G. G. Douglass, and C. E. Worley*, Astron. J. **122**, 3466 (2001).
24. *T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, A. G. A. Brown, A. Vallenari, et al.*, Astron. and Astrophys. **595**, id. A1 (2016), arXiv:1609.04153 [astro-ph.IM].
25. *A. Vallenari, A. G. A. Brown, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al.*, arXiv:2208.00211 [astro-ph.GA] (2022).
26. *R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. van Dyk, C. A. Beichman, et al.*, VizieR Online Data Catalog: II 246 (2003).
27. *R. M. Cutri*, VizieR Online Data Catalog: II 328 (2014).
28. *M. J. Pecaut, E. E. Mamajek, and E. J. Bubar*, Astrophys. J. **746**, id. 154 (2012), arXiv:1112.1695 [astro-ph.SR].
29. *J. D. Kirkpatrick, C. R. Gelino, J. K. Faherty, A. M. Meisner, et al.*, Astrophys. J. Suppl. **253**, id. 7 (2021), arXiv:2011.11616 [astro-ph.SR].
30. *D. Vokrouhlický, D. Nesvorný, and L. Dones*, Astron. J. **157**, 181 (2019), arXiv:1904.00728 [astro-ph.EP].
31. *S. S. Kumar*, Astrophys. Space. Sci. **212**, 57 (1994).
32. *D. G. Vieira*, Astronomy **12**, 1 (2004).
33. *G. Nelemans, L. R. Yungelson, S. F. Portegies Zwart, and F. Verbunt*, Astron. and Astrophys. **365**, 491 (2001), arXiv:astro-ph/0010457.
34. *M. B. Taylor*, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV*, Proc. of the Conference held 24–27 October, 2004 in Pasadena, California, USA; edited by P. Shopbell, M. Britton, and R. Ebert, ASP Conf. Ser. **347**, 29 (2005).