

ЗВЕЗДНЫЕ ПОТОКИ ОКОЛОСОЛНЕЧНЫХ ЗВЕЗД И МЕТЕОРЫ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

© 2022 г. А. В. Тутуков¹, Н. В. Чупина¹, С. В. Верещагин^{1,*}

¹ Институт астрономии РАН, Москва, Россия

*E-mail: svvs@ya.ru

Поступила в редакцию 04.06.2022 г.

После доработки 25.08.2022 г.

Принята к публикации 30.08.2022 г.

По данным Gaia проанализирована картина образования периферийных структур планетных систем, элементами которых являются пыль, астероиды, кометы и свободные планеты (АКП). Такие структуры – “АКП-копия” звезд – имеют размеры $30 \text{ пк} \times 10^4 \text{ пк}$ и, пересекаясь друг с другом в пространстве, пронизывают пространство галактического диска. Оценка числа таких копий показывает, что они многократно ($\sim 10^4$ раз) перекрывают объем диска. Представлена карта неба с указанием положений “АКП-копий” близких к Солнцу звезд, пылевые потоки которых могут оказаться достаточно плотны для отождествления их с потоками метеоров в земной атмосфере. Другими источниками межзвездных метеоров являются Млечный Путь и два звездных потока Каптейна. Предполагается, что часть метеоритов земных коллекций представляют собой продукты эволюции планетных систем звезд Галактики.

Ключевые слова: звезды, рассеянные звездные скопления, кометы, метеорные потоки

DOI: 10.31857/S0004629922110202

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о природе комет и метеоритов и их связи с Землей всегда был предметом интереса исследователей. Аристотель связывал кометы с Землей. Гершель (Herschel, 1812a [1], 1812b [2]), обнаружив большую разницу в яркостях двух изученных им комет, находящихся на одинаковых расстояниях от Солнца, предположил, что одна из них является внесолнечной. Лаплас (Laplace, 1814 [3], Heidarzadeh, 2008 [4]) считал кометы межзвездными и по мнению Селигмана и др. (Seligman et al., 2022 [5]) выполнил первые удачные оценки их числа. Однако Скиапарелли (Schiaparelli, 1857 [6]) надолго “привязал” кометы к Солнечной системе, обнаружив распад одной из комет в метеорный поток. Со временем стало ясно, что в процессе формирования планет часть твердотельного протопланетного вещества покидает родительскую систему, формируя поле свободных астероидов, комет и планет (АКП) Галактики. Это явление поясняет появление таких объектов, как 2I/Борисов и 1I/Оумуамуа (Tutukov et al., 2020 [7]). В качестве возможного индикатора внесолнечного происхождения таких объектов предложено отношение обилий углерода и кислорода в их составе (Seligman et al. 2022 [5]).

Не менее трети звезд обладают планетными системами (Масевич, Тутуков, 1988 [8]). образо-

вание планет сопровождается потерей части твердотельного вещества: пыли, песка, комет, астероидов и планет в межзвездное пространство (Tutukov et al., 2020 [7]). Оценка полуширины “АКП-копий”, расположенных на расстоянии Солнца от Центра Галактик, в предположении, что скорость выброса АКП элементов $\sim 1 \text{ км/с}$ [7] и орбитальная скорость Солнца в Галактике $\sim 240 \text{ км/с}$ составит $\sim 30 \text{ пк}$, а длина $\sim t/(10^6 \text{ лет}) \text{ пк}$, где t – возраст потока. В состав “АКП-копий” звезд входит пылевой компонент. Моделирование сборки больших массивных планет в протопланетном диске показало, что они являются эффективными ускорителями твердотельных объектов планетных систем (Tutukov et al., 2020 [7]). Таким путем в межзвездное пространство может поступать твердотельное вещество протопланетных дисков: песок, астероиды, кометы и свободные планеты.

Использование эффекта микролинзирования позволило зарегистрировать свободные планеты в молодой звездной ассоциации в Скорпионе (Miret-Roig et al., 2021 [9]). Межзвездные астероиды с гиперболическими орбитами 2I/Борисов (Borisov et al., 2013 [10]) и 1I/Оумуамуа (Hallatt et al., 2020 [11]) и полуметровой астероид с гиперболической орбитой (Sirai, Loeb, 2019a [12]) являются зарегистрированными представителями астероидно-кометного компонента межзвездно-

го твердотельного вещества. Оценки полного числа свободных астероидов такого типа в Галактике достигают величины $\sim 10^{26}$ (Hoover et al., 2021 [13]) или $\sim 10^{15}$ на кубический парсек ее диска. Кажется перспективным поискать количественно наиболее обильный метеорный компонент этого семейства среди метеоров, рождаемых сгоранием в земной атмосфере околосолнечных пыли и песка.

2. КИНЕМАТИКА “АКП-КОПИЙ”

В поисках потенциальных источников “свободных” метеороидов в окружающем Солнце пространстве обратимся к звездным потокам — продуктам распада рассеянных звездных скоплений (РЗС) и близких спутников Галактики. Околосолнечные звездные потоки были использованы, в частности, для оценки пространственной скорости Солнца в невращающейся системе координат (Malhan et al., 2020 [14]). Получены оценки этой скорости: $V_R = -9$ км/с, $V_\phi = 242$ км/с, $V_z = 3$ км/с (цилиндрическая система координат). Важно отметить, что некоторые из изученных потоков близки к Солнцу и, помимо звезд, могут содержать твердотельный, прежде всего, пылевой компонент. Последний способен генерировать метеорные явления в земной атмосфере. Детальное изучение кинематики около 170 тысяч звезд, расположенных в нескольких сотнях парсек от Солнца, позволило установить наличие шестнадцати звездных потоков, компоненты пространственной скорости которых заключены в пределах $-80 \leq V$ (км/с) ≤ 10 , $-67 \leq W$ (км/с) < 29 (прямоугольная галактическая гелиоцентрическая система координат, в которой ось U направлена к Центру Галактики ($l = 0^\circ$, $b = 0^\circ$), ось V — в направлении вращения Галактики ($l = 90^\circ$, $b = 0^\circ$), ось Z — на Северный полюс Галактики ($b = 90^\circ$)) (Liang et al., 2017 [15]). Часть околосолнечных звездных потоков может принадлежать гало нашей Галактики (Kerley et al., 2007 [16]). Очевидна необходимость учета звездных потоков, пронизывающих околосолнечное пространство, при поиске мест генерации внесолнечных метеороидов.

Рассмотрим устойчивость орбит членов “АКП-копья”, или условия сохранения вектора их пространственной скорости в пределах исследуемой нами околосолнечной зоны с радиусом ~ 30 пк. Сохранение вектора исходной скорости этих членов оставляет потенциальную возможность отождествления метеоров с соседними звездами. Основными элементами межзвездной среды, возмущающими орбиты свободных АКП объектов, являются звезды с характерной массой $\sim 1 M_\odot$. Для изменения скорости АКП объекта звездой на величину δv они должны сблизиться на расстояние r (см) $\approx GM_\odot / v \delta v$, где $v \approx 30$ км/с представляет собой относительную характерную

скорость АКП объекта относительно звезды. Полагая $\delta v \approx 0.01v$, что обеспечивает сохранение апекса АКП объекта в пределах $\sim 0.5^\circ$, сближение, как следует из последнего соотношения, должно превышать ~ 0.001 пк. Оценки показывают, что при концентрации звезд в окрестностях Солнца ~ 0.1 пк $^{-3}$ характерное расстояние сближения Солнца со звездами поля за Хаббловское время не превосходит ~ 0.01 пк. То есть наблюдаемые вектора скорости околосолнечных АКП объектов сохраняются, как правило, близкими к начальным.

Другим источником искажения орбит пылинок в пределах исследуемой нами зоны в 30 пк является межзвездный газ, тормозящий мелкую пыль. Легко оценить, что пылинки с размерами, большими $\sim 10^{-3}$ см, не испытают изменение величины скорости на величину, превышающую 0.01 ее исходной величины на пути 30 пк. Согласно Landgraf, 2001 [17], плотность околосолнечного газа не превосходит $\sim 10^{-25}$ г/см 3 . Еще одним фактором, возмущающим движение пыли в околосолнечном пространстве, является Солнечный ветер, интенсивность которого $\dot{M} \approx 10^{12}$ г/с. Чтобы скорость пылинки изменилась не более чем на один процент, ее размер (при плотности пылинки ~ 1 г/см 3) должен превышать:

$$a > \dot{M}w / 4\pi Rv\delta v \approx 10\dot{M}w / Rv^2. \quad (1)$$

При $\dot{M}w = 10^{12}$ г/сек, $w = 10^8 \frac{\text{см}}{\text{с}}$, $R = 10^{13}$ см и $v = 3 \times 10^6 \frac{\text{см}}{\text{с}}$ размер пылинки для сохранения вектора скорости с указанной выше точностью должен превышать

$$a \sim 10^{-5} \text{ см}. \quad (2)$$

Объединяя условия (1) и (2), заключаем, что для определения положения апекса пылинки на небе с точностью $\sim 0.5^\circ$ ее размер должен превышать 10^{-3} см. Более мелкие пылинки могут быть существенно отклонены от исходной траектории межзвездным околосолнечным газом (ветром). Это препятствует использованию данных об орбитах метеоров для идентификации их источника даже в пределах 30 пк. Последнее обстоятельство согласно наблюдаемому спектру размеров межзвездных пылинок ($\sim a^{-4}$) (Musci et al., 2012 [18]) понижает число пылинок, подходящих для идентификации звезд, являющихся их источниками.

3. ПРОИСХОЖДЕНИЕ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ, КОМЕТ И АСТЕРОИДОВ

Часть пылинок приобретают гиперболические орбиты за счет ускорения планетами гигантами

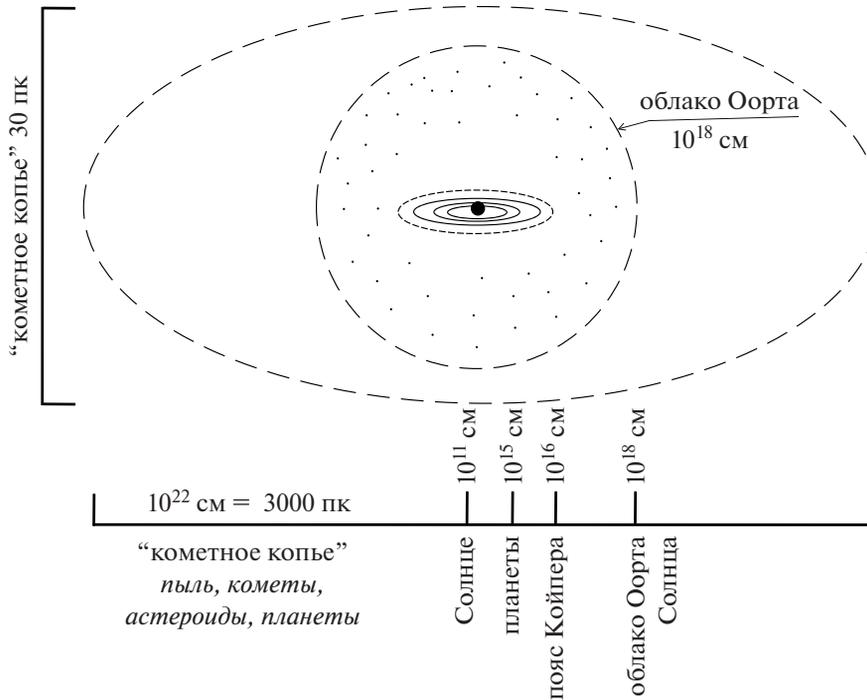


Рис. 1. Структура Солнечной системы.

Солнечной системы (Lovell, 1954 [19], Airo et al., 2014 [20]). Моделирование системы Солнце—малые тела—Юпитер показало, что малые тела могут быть ускорены до скорости 1–2 км/с на бесконечности (Tutukov et al., 2020 [7]). На рис. 1 наглядно демонстрируется появление околозвездных пылевых копий звезд, обладающих планетами гигантами. При этом важно, что пространственная относительная скорость тел, выброшенных планетными системами, оказывается ~ 1 км/с. Это оставляет надежду на потенциальную возможность “привязки” метеоров с гиперболическими скоростями, наблюдаемых на Земле, к звездам и РЗС из близкой окрестности Солнца.

Сводка текущих оценок свойств межзвездных метеороидов демонстрирует, что масса зарегистрированных объектов заключена в пределах 10^{-14} г– 10^{-1} г (Musci et al., 2012 [18]). Оценка доли межзвездных метеороидов среди околосолнечных составляет $\sim 10^{-3}$ (Hajdukova, Paulech, 2007, [21], Hajdukova, 2012 [22]), а их поток $\sim 10^{-6}$ /км²/час (Francisz et al., 2020 [23]). Наклон спектра масс для метеороидов с массами, превосходящими $\sim 10^{-12}$ г, может быть меньше классического (представленного классической формулой $\frac{dN}{dM} \sim M^{-2}$ [25]) $\frac{dN}{dM} \sim M^{-1.75}$ (Siraj, Loeb, 2019b [24]). Уменьшение наклона спектра масс метеороидов может быть следствием их эрозии на пути в межзвезд-

ном пространстве от источника до приемника. Легко оценить, что если время жизни метеороида принять пропорциональным его размерам, то актуальный спектр изменит свою форму до $\frac{dN}{dM} \sim M^{-5/3}$.

Для оценки числа межзвездных астероидов в Галактике примем, что каждая звезда с помощью планет гигантов теряет астероидный материал с общей массой порядка массы Земли $\sim 6 \times 10^{27}$ г (Tutukov et al., 2020 [7]). При концентрации звезд в окрестностях Солнца $\sim 10^{-1}$ пк⁻³ итоговая плотность твердотельного вещества составит 2×10^{-29} г/см⁻³, а темп его аккреции Землей при ее скорости относительно твердотельного компонента Галактики ~ 30 км/с составит $\sim 10^{-4}$ г/с. Опираясь на классический спектр масс M^{-2} (Tutukov, Shustov, 2020 [25]), мы оценили частоту падения межзвездных песчинок и астероидов на Землю в зависимости от их массы m . Полагая m в пределах 10^{-3} г– 10^{17} г, темп аккреции равен:

$$\frac{dN}{dt} \approx 2 \frac{10^{-6}}{m^2} \text{ с}^{-1}. \quad (3)$$

Таким образом, согласно (3), межзвездные астероиды с размером, превышающим ~ 1 м, могут достигать Земли раз в десять тысяч лет. При всех неопределенностях, включенных в последнюю оценку, она остается полезной для оценки

Таблица 1. Ближайшие к Солнцу звезды, обладающие планетными системами и перспективные для поиска метеоров

Source ID	α , °	δ , °	Plx, мсд	r , пк	μ_α , мсд/год	μ_δ , мсд/год	V_r	aA, °	aD, °	G, mag
5412250540681250560	146.12	-45.78	106.17	9.4	-462.62	-582.69	46.96	270.45	64.22	9.16
5381537023379295232	176.62	-40.50	107.30	9.3	-1530.97	403.29	16.90	286.47	-2.05	4.70
6847167606385195648	303.82	-27.03	113.49	8.8	1242.76	-181.18	-54.21	258.73	-13.7	5.48
4293318823182081408	289.23	05.16	169.06	5.9	-579.081	-1332.87	35.55	86.50	38.99	8.10

частоты столкновений межзвездных астероидов с Землей. Частота может быть легко уточнена при получении новых данных о входящих в ее оценку параметрах. Межзвездные астероиды уже обнаружены и сейчас нет сомнений в том, что среди тысяч метеоритов, хранящихся в многочисленных коллекциях, есть и посланцы других планетных систем. Поиск химических признаков межзвездных астероидов и комет уже начат Seligman (2022) [5]. Со временем, можно надеяться, метеориты из других планетных систем будут идентифицированы.

Изучение мира звезд и галактик позволяет установить потенциально активные источники пыли в солнечных окрестностях (Krugel, 1990 [26]). Основными, вероятно, являются красные сверхгиганты, теряющие вещество со скоростью в несколько десятков км/с (Gordon et al., 2018 [27]). Другим источником пыли являются планетные системы, теряющие ускоренные планетами гигантами частицы пыли, кометы и астероиды со скоростями ~ 1 км/с [7]. Учет дисперсии скоростей околосолнечных звезд ~ 30 км/с (Knude et al., 1987 [28]) приводит к выводу, что характерная дисперсия пространственных скоростей приведенных выше двух источников пыли составляет несколько десятков км/с. Современные наблюдения остатков сверхновых в ИК диапазоне позволили установить присутствие $\sim 0.2 M_\odot$ пыли в каждом из них (Millard et al., 2021 [29]). Скорость пылинки, рожденной при вспышках сверхновых звезд, составляет несколько тысяч километров в секунду. Эти быстрые пылинки, конечно, будут активно испаряться при взаимодействии с межзвездной средой, но пылинки от близких сверхновых звезд могут достигать солнечных окрестностей. Еще одним эффективным источником быстрых пылинок ($\sim 10^3$ км/с) являются звезды Вольфа-Райе (Eatson et al., 2022 [30]) с производительностью до $10^{-6} M_\odot/\text{год}$ пыли одной такой звездой.

Положение направлений прихода к Солнцу метеороидов с гиперболическими скоростями на небесной сфере является потенциальным средством идентификации метеоров в земной атмосфере с ближайшими звездами. Оценка относи-

тельной пространственной скорости метеороидов — дополнительная возможность такой идентификации. Как уже говорилось выше, моделирование (Tutukov et al., 2020 [7]) обнаружило, что скорость ухода протопланетного материала, ускоренного массивными планетами из планетных систем, составляет ~ 1 км/с. Поэтому естественно ожидать, что скорость членов потоков пыли и песка кометных “копий” звезд (рис. 1) окажется близкой к скорости родительской звезды. Это обстоятельство учтено в табл. 1, где наряду с координатами антиапека ближайших звезд указаны их скорости относительно Солнца.

Карликовые галактики-спутники нашей Галактики также являются источниками звездных потоков. Погружаясь в недра Галактики, они разрушаются, превращаясь со временем в звездные потоки. Положение ряда таких потоков на небе представлено Necib et al., 2022 [31]. Звезды таких потоков отличаются малым обилием металлов $[Fe/H] \approx -1.0$ и эксцентриситетом галактической орбиты в пределах $0.4 \leq e \leq 0.9$. Некоторые из этих потоков (Nyx, Nyx-2) обнаружены в пределах 100 пк от Солнца (Necib et al. 2019 [32]). Еще один звездный околосолнечный поток — Meingasn, включающий звезды с массами $0.2 M_\odot - 4 M_\odot$ кинематически совпадает с Плеядами (Ratzenböck et al., 2020 [33]).

И, наконец, в поисках потенциальных источников околосолнечной пыли и земных метеоров можно обратиться от объектов нашей Галактики к другим галактикам. Zwicky (1951) [34], изучая фотометрию скопления галактик Coma, нашел неоднородное поглощение, которое он приписал межгалактической пыли. Недавний детальный обзор свойств межгалактической пыли (Shchekinov et al., 2022 [35]) предполагает активный обмен пылинками между галактиками и межгалактической средой скопления галактик. Следовательно, вполне вероятно, что часть пыли межзвездной среды нашей Галактики могла возникнуть в соседних галактиках. Скорости движения галактик внутри населенных скоплений достигают тысячи километров в секунду. Поэтому часть высокоскоростной пыли в окрестностях Солнца может быть продуктом других галактик.



Рис. 2. Структура рассеянного звездного скопления с массой $\sim 10^3 M_{\odot}$.

4. МЕЖЗВЕЗДНЫЕ МЕТЕОРЫ

Метеоры, как посланцы иных миров, с давних пор привлекали внимание астрономов. Первые попытки оценить скорость их входа в атмосферу Земли были сделаны в 1900 г. фотографическим методом (Elkin, 1900 [36]). Ввиду сложности этой задачи первый успех был достигнут только в 1954 г. (Lovell, 1954 [19]). Первые визуальные оценки скоростей метеоров часто приводили к величине порядка ста и более километров в секунду (Opik, 1940 [37]), что впервые поставило вопрос об их возможной межзвездной природе. Однако в том же году метеорный поток Taurid был надежно связан с околосолнечной кометой Энке (Whipple, 1940 [38]). Лишь измерения скоростей пылинок с размером $\leq 10^{-5}$ см на космических обсерваториях (Grun et al., 1993 [39], Frisch et al., 1999 [40], Kriiger et al., 2007 [41]) позволили надежно установить присутствие в околосолнечном пространстве пылинок с гиперболическими скоростями. Надежные радарные методы оценки скоростей позволили оценить, что доля внесолнечных пылинок с размерами в десятки микрон составляет порядка одного процента их общего числа (Baggaley et al., 2007 [42]).

Скорости околоземных метеоров заключены в пределах 12–72 км/с (Colas et al., 2020 [43], Drolshagen et al., 2020 [44]). Пределы определяются круговой скоростью Земли и параболической скоростью на ее расстоянии от Солнца: 30 км/с и 42 км/с соответственно. Иными словами, скорость встречных метеоров на параболических орбитах составляет ~ 72 км/с, а попутных ~ 12 км/с. Поскольку относительные пространственные скорости звезд диска Галактики ~ 30 км/с, то ха-

рактерные скорости межзвездных метеоров, как правило, укладываются в интервал наблюдаемых скоростей метеоров Солнечной системы. По этой причине оценки скорости метеоров не могут быть надежным индикатором их принадлежности к другим планетным системам. Возможным исключением служат релятивистские пылевые частицы, обнаруженные орбитальным детектором следов космических лучей в земной атмосфере (Khrenov et al., 2021 [45]). Однако допущение существования таких метеоров нуждается в подтверждении.

5. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ “АКП-КОПИЙ” БЛИЗКИХ ЗВЕЗД И ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ С СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМОЙ

Современная картина структуры периферийных частей планетных и звездных систем (рис. 1, рис. 2) позволяет по-новому поставить вопрос о взаимодействии Солнечной системы с близкими к нему звездами и звездными скоплениями.

Схема структуры Солнечной системы и рассеянного звездного скопления приведена на рис. 1 и рис. 2. Структура Солнечной системы (рис. 1) может быть примером структуры всех планетных систем. Она состоит из Солнца, планетной части системы с размером $\sim 10^{15}$ см, пояса Койпера, периферии исходного протопланетного диска с радиусом $\sim 10^{16}$ см, облака Оорта с размером $\sim 10^{18}$ см и “резервуара кометных ядер (кометного копьё)” с размерами 3000×30 пк, длина кометного “копья” определяется скоростью выброса комет и возрастом родительской звезды.

Рассеянное звездное скопление с возрастом $\sim 10^8$ лет и массой $\sim 10^3 M_{\odot}$ (рис. 2) состоит из ядра с размером ~ 1 пк, короны в пределах полости Роша скопления ~ 10 пк, “звездного копья” с потерянными скоплением звездами 100×30 пк и “звездного суперкопья” с размерами 1000×30 пк. Последнее включает звездные скопления, звезды распавшихся скоплений, принадлежащие исходной ОВ ассоциации с начальными размерами ~ 200 пк. Учет “суперкопья” необходим, ибо практически все скопления образуются в ОВ ассоциациях, распадающихся со временем (Tutukov et al., 2021 [51]). Рисунки 1 и 2 наглядно демонстрируют, что каждая звезда, включая Солнце, находится в “кометных копьях” многих близких звезд и близких ОВ ассоциаций.

Короны РЗС образуют звезды, заполняющие полость Роша каждого из скоплений. Наблюдаемая длина звездных копий достигает ~ 200 пк. Сходную величину можно получить исходя из возраста этих скоплений и скорости вылета звезд из ядер скоплений ~ 1 км/с (Tutukov et al., 2020 [50]). В пределах приливного радиуса типичного скопления (~ 8 пк) заключено от 10 до 80 процентов массы скоплений (Meingast et al., 2021 [49]). Таким образом, можно считать установленным, что наблюдаемая морфология хорошо изученных звездных скоплений полностью подтверждает теоретическую модельную картину. Протяженные пылевые структуры звезд и РЗС (рис. 1, 2) позволяют по-новому подойти к оценке картины взаимодействия Солнца и Земли с окружающим звездным миром.

Cantat-Gaudin et al., 2020 [46] представили крупнейший однородный анализ параметров скоплений, выполненный на сегодняшний день с данными Gaia, с почти двумя тысячами объектов. Оценим возможность попадания Солнца в “АКП копья” соседних звезд и РЗС. Для количественной оценки частоты таких событий примем, что “копье” звезды или РЗС радиусом r движется со скоростью ~ 20 км/с в галактическом диске, объем которого $\sim 10^{11}$ пк³, число звезд в Галактике $\sim 10^{11}$. Время между столкновениями Солнечной системы с этими объектами: $t = V/(Nr^2v) \approx 3 \times 10^{52}/(Nr^2)$ лет. Это значит, что в облако Оорта с радиусом $\sim 10^{18}$ см соседней звезды за Хаббловское время попадет одна звезда каждые 5×10^5 лет. Как оценено выше, ширина “АКП копий” звезд достигает 30 пк (рис. 1), что означает, все звезды, имеющие планеты в пределах такой зоны, могут быть источником метеоров, регистрируемых на Земле.

Для оценки условий взаимодействия Солнца с “АКП-копьями” соседних звездных скоплений (рис. 2) примем, что при скорости убегания звезд из скопления ~ 1 км/с, и времени жизни скопле-

ний $\sim 3 \times 10^8$ лет (Cantat-Gaudin et al., 2020 [46]) объем типичного копья будет $\sim 10^6$ пк³. Последнее, при общем числе РЗС в диске Галактики $\sim 10^5$ (Piskunov et al., 2006 [47]) означает, что почти все звезды Галактики находятся в “АКП-копьях” соседних скоплений указанного возраста. Таким образом, Солнце может оказаться в копье одного из соседних РЗС. Учитывая, что наиболее старые звездные скопления давно распались, окрестности Солнца погружены в остаточные разреженные “звездные копья” десятков тысяч былых звездных скоплений, пронизывающие весь галактический звездный диск. Однако возможность отождествления их метеоров маловероятна из-за малой плотности звезд этих потоков и редкости внесолнечных метеоров на Земле. Но отождествление копий близких звездных скоплений ввиду большой плотности потока их метеоров остается, вероятно, возможным.

Список молодых звезд и звездных групп с возрастом менее $\sim 10^8$ лет в пределах 100 пк дает пример потенциальных генераторов потоков метеороидов около Солнца (Kastner, Principe, 2022 [48]). Морфологию десяти близких к Солнцу молодых РЗС ($R \leq 400$ пк, $t = 3 \times 10^8$ лет) детально исследовали (Meingast et al., 2021 [49]). В поисках членов этих скоплений детальному анализу подвергнуты звезды периферии этих скоплений до расстояний ~ 100 пк от их видимых центров.

6. НАБЛЮДАЕМЫЕ ЗВЕЗДНЫЕ ПОТОКИ

Причиной появления звездных потоков в Галактике является разрушение со временем ОВ ассоциаций и звездных скоплений, звезды которых, сохраняя исходный угловой момент скопления, рассеиваются вдоль орбиты скопления (Kapteyn, 1905 [52], Eggen, 1965 [53]). Позднее такие структуры около разрушающихся астрономических объектов были названы “копьями” (Tutukov, Smirnov, 2004 [54]).

По данным КА Gaia получены убедительные доказательства существования масштабных (~ 100 пк) потоков звезд, потерянных скоплением Гиady (Meingast and Alves, 2019 [55], Röser et al., 2019 [56]). Возможно, более обширную область образует поток Гиад (Seabroke and Gilmore, 2007 [57]; Zhao et al., 2009 [58]). Сопоставление наблюдаемых данных о пространственных скоростях ближайших к Солнцу пяти потоков Coma Berenices, Sirius, Hyades, Pleiades и Hercules, выполненное в работе (Eubanks, 2019 [59]), показало совпадение кинематических параметров межзвездного астероида II/Оумуамуа (Meech, 2017 [60], Micheli et al., 2018 [61]) и субпотока S2 Плеяд (Gaidos et al., 2019 [62]). Feng and Jones, 2018 [63] добавили ассоциа-

цию Columba как еще одного кандидата в источники последнего объекта.

Эффективным генератором внесолнечных метеоров могут оказаться близкие рассеянные звездные скопления. Рассмотрим некоторые особенности строения и движений звезд внутри звездных потоков в окколосолнечных окрестностях. Звезды из ближайших РЗС из-за схожести их пространственных скоростей представляются на небе как звездные потоки. Размеры звездных скоплений с учетом их звездных шлейфов могут за время их жизни $\sim 10^8$ лет достигать нескольких сот парсек (рис. 1 и рис. 2). Список восьмидесяти пяти рассеянных звездных скоплений из близких окрестностей Солнца приведен в работе Pang et al. (2022) [64]. Не исключено, что ближайшие из них к Солнцу образуют потоки: Сoma Berenices (85.6 пк) и Group X (100 пк). Они могут “доставать” своими звездными, астероидными, пылевыми “копиями” до Солнечной системы. В этом случае можно ожидать концентрацию внесолнечных метеоров в антиапексах движения этих скоплений.

7. КИНЕМАТИКА ОКОЛОСОЛНЕЧНЫХ ЗВЕЗД

Размеры планетной системы, как демонстрирует рис. 1, заметно превосходят те, что принимаются за обычные, ограниченные полостью Роша центральной звезды $\sim 10^{18}$ см. Это позволяет поновому рассмотреть картину взаимодействия планетных систем звезд. Легко понять, что Солнце и Земля находятся в пределах “кометных копий” близких к нам тысяч звезд Галактики. Нас в настоящей работе интересуют прежде всего ближайшие к Солнцу звезды в пределах 30 пк, что допускает попадание Солнца и Земли в пределы потоков пыли их кометных копий. Последнее может помочь со временем при восстановлении орбит земных метеоров с гиперболическими орбитами относительно Солнца отождествить их со звездами – соседями Солнца. С этой целью в настоящей работе мы ищем антиапексы движения звезд с хорошо определенными пространственными скоростями $\overline{dv}/\overline{v} \leq 0.01$. Последнее условие (средняя относительная ошибка измерения пространственной скорости звезды) необходимо для оценки положения антиапекса на небесной сфере с точностью $\sim 0.5^\circ$. Важно отметить, что нас интересуют векторы пространственных скоростей звезд. Они необходимы для того, чтобы иметь потенциальную возможность сравнить с ними восстановленные векторы скоростей внесолнечных метеоров (вне Солнечной системы). Влияние гравитации Солнца и Земли учитывается в рамках этой процедуры при восстановлении векторов пространственных скоростей метеоров.

Они располагаются на диаграмме апексов (AD диаграмме) в компактных областях, хотя положения их апексов заметно отличаются. Описание метода, техника построения диаграмм и формулы для определения эллипсов ошибок можно найти в (Churina et al., 2001 [65]).

Индивидуальным апексом звезды мы называем точку на небесной сфере с координатами (A, D) в экваториальной системе координат (A – координата по прямому восхождению, D – склонению), на которую направлен вектор, параллельный вектору пространственной скорости звезды, отложенный от точки наблюдения. Мы рассматриваем ниже не апексы, а антиапексы. На небесной сфере антиапексы и апексы находятся в диаметрально противоположных точках, координаты которых по долготе имеют разницу в 180° , а по широте отличаются знаком. Поскольку направления векторов скорости элементов пылевого копья звезды и самой звезды практически совпадают, направление прихода метеора в Солнечную систему близко к антиапексу его звезды.

8. ДАННЫЕ

Для составления необходимой выборки звезд, расположенных в пределах 30 пк от Солнца, мы использовали каталог Gaia EDR3, Gaia Collaboration (2020) [66]. Нами были взяты звезды, для которых в Gaia определены лучевые скорости. Наша выборка ограничена числом измерений лучевой скорости в Gaia EDR3, мы планируем расширить ее в продолжении этой работы.

В результате отобрано 2390 звезд. Для расчета положений антиапексов использовались параметры звезд: экваториальные барицентрические координаты (ICRS) на эпоху $J_0 = 2016.0$, параллаксы, собственные движения, лучевые скорости и ошибки перечисленных величин.

На рис. 3 представлено распределение звезд нашей выборки на небесной сфере. Указано положение плоскости Млечного Пути. Ясно, что близкие звезды, отобранные нами, довольно равномерно заполняют небесную сферу, заметные области концентрации звезд отсутствуют.

9. ДИАГРАММА АНТИАПЕКСОВ

На рис. 4 отмечены положения антиапексов звезд с рис. 3. Картина положения антиапексов этих звезд разительно отличается от равномерного распределения звезд рис. 3. Рисунок 4 наглядно демонстрирует, что около половины окколосолнечных звезд являются членами двух хорошо организованных звездных потоков: большого (справа) и малого (слева). Возможно, что эти две больших концентрации согласованного движения окколосолнечных звезд имеют более тонкую структуру. Слева на рис. 4 виден местный поток

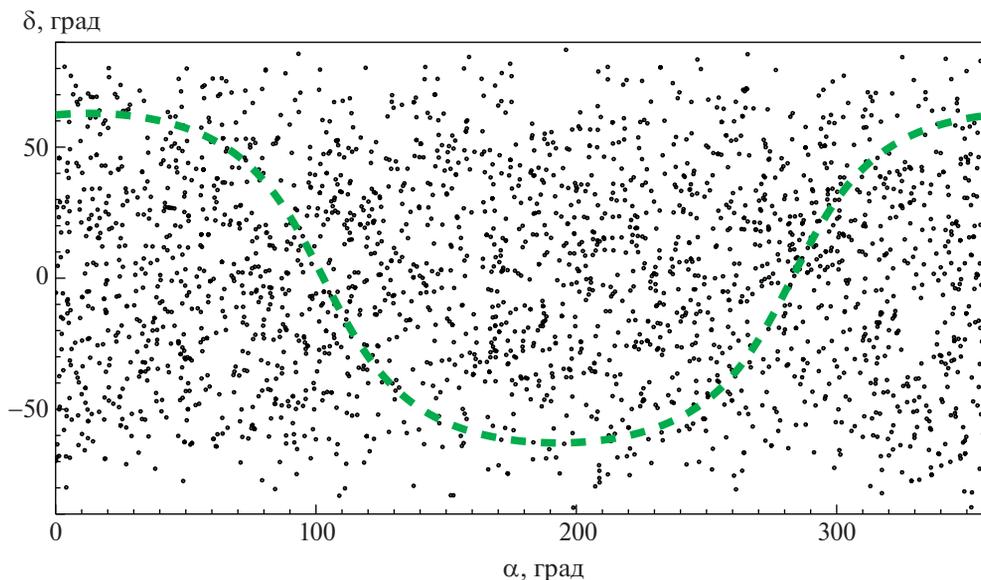


Рис. 3. Распределение выборки ($n = 2390$, $r < 30$ пк) на небесной сфере в экваториальной системе координат. Зеленым штрихпунктиром показана проекция Млечного Пути.

Большой Медведицы (Сириуса). Правая концентрация на рис. 4 содержит звезды потока Coma Berenices, Плеяд, Гиад и Геркулеса. Каждая из указанных концентраций обнаруживает хорошо различимую структуру. Если основные отмеченные группы, вероятно, являются продуктами распада сравнительно близких к Солнцу ОВ ассоциаций, то малые, с размером в несколько градусов, группы звезд отмечают, возможно, звездные копы отдельных звездных скоплений и потоков — продуктов распада звездных скоплений. Антиапексы звезд указывают направления их потенциально возможных потоков пыли, метеоров в земной атмосфере, рожденных в указанных потоках звезд. Дополнительное исследование показало, что указанные на рис. 4 звездные потоки хорошо прослеживаются до 90 пк.

Рисунок 4 демонстрирует наличие двух хорошо выделенных звездных потоков (малый — слева и большой — справа), в которых участвуют около половины звезд из Солнечных окрестностей. Они были впервые отмечены Каптейном сто лет назад (Каптеун, 1922 [67]) в результате детального изучения видимого движения околосолнечных звезд. Координаты антиапексов этих потоков, найденные Каптейном, совпадают с координатами центров двух потоков рис. 4. Концентрация антиапексов близких к Солнцу звезд в два потока делает эти области неба потенциально активными источниками внесолнечных метеоров. Сами указанные звездные потоки могут быть названы потоками Каптейна. Они, согласно рис. 2, являются звездными суперкопьями ОВ ассоциаций.

С целью анализа двух больших концентраций антиапексов звезд на рис. 4 мы построили распределение их звезд по скоростям (рис. 5). На рис. 5, наряду с общим распределением звезд по скоростям, показаны две части этого распределения, относящиеся к разным группам. Сравнение двух распределений демонстрирует, что при $V \geq 50$ км/с они практически совпадают. А при меньших скоростях они заметно различаются. Если левое распределение рис. 5 имеет характерные скорости $15 < V$ (км/с) ≤ 50 , то правое — $20 < V$ (км/с) ≤ 35 .

На рис. 6 дана диаграмма антиапексов звезд, выбранных с помощью рис. 5 и занимающих приблизительно область максимума распределений, показанных на рис. 5. Диаграмма положения антиапексов звезд из ближайших окрестностей Солнца (рис. 4, рис. 6) при очевидном отсутствии заметных концентраций звезд на небесной сфере (рис. 3) обнаруживает в согласованности антиапексов два звездных потока (Vereshchagin, Chupina, 2015 [68]). Около половины всех звезд в пределах тридцати парсек от Солнца принадлежат этим потокам. Не исключено, что каждый из этих потоков имеет тонкую структуру, обнаруживая видимые концентрации антиапексов звезд с размером порядка 10° (рис. 4). Естественно, что движение звезд солнечной окрестности хорошо изучено. Результатом явилось подтверждение существования двух звездных потоков: Ursa Majoris с возрастом около 400 млн. лет и Pisces-Eridani с возрастом около 120 млн. лет (Savanov, 2021 [69], Meingast et al., 2019 [70]). Когерентное движение звезд в каждом из потоков предполагает их общее

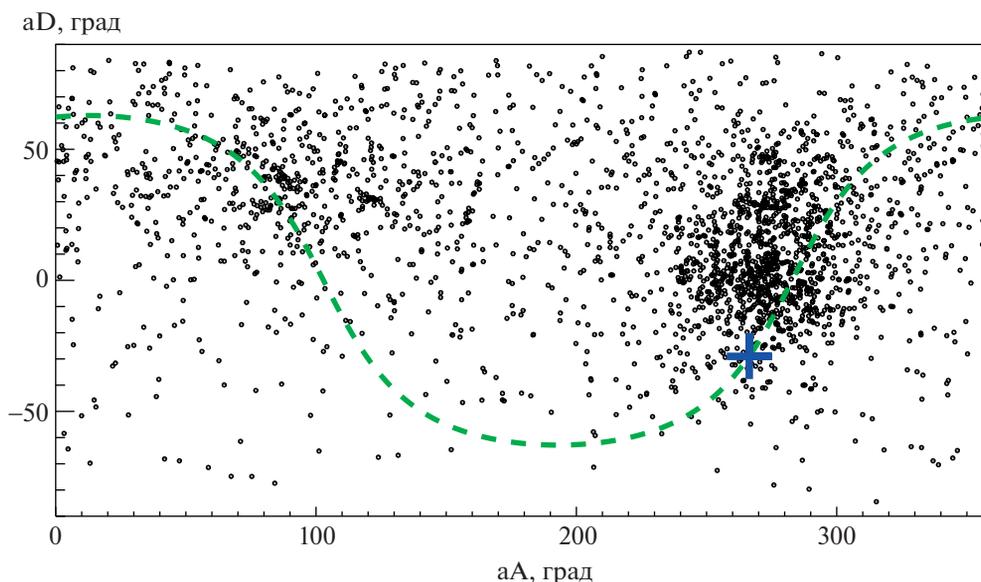


Рис. 4. Диаграмма антиапексов 2390 звезд с $R < 30$ пк, полученная в данной работе. Хорошо заметны две области повышенной звездной плотности. Штриховой линией указано положение Млечного Пути. Синий крестик показывает направление на Центр Галактики.

происхождение в ОБ ассоциациях, распад которых производит звездные потоки в Галактике (Tutukov et al., 2020 [7]). Металличность звезд этих потоков близка к солнечной (Hawkins et al., 2020 [71]), что допускает образование около этих звезд планетных систем с кометными копьями (рис. 2). Солнечная металличность исключает принадлежность звезд этих потоков разрушенным маломассивным спутникам нашей Галактики.

Отметим, что в каждой точке диска Галактики плотность объектов, принадлежащих “АКП-копьям” зависит, вероятно, от возраста последних. Возраст существования звездных ассоциаций составляет несколько млн. лет, поэтому ясно, что их вклад невелик Melnic et al. (2020) [72], Chemel et al. (2022) [73]. С течением времени звездные ассоциации, прекращая свое существование, превращаются в вытянутые звездные структуры (“АКП-копья”), включающие звезды и выжившие РЗС, гравитационно не связанные между собой.

Межзвездные астероиды с гиперболическими орбитами: 21/Борисов (Borisov et al., 2013 [10]) и 11/Оумуамуа (Hallatt et al., 2020 [11]) являются одними из представителей астероидно-кометного компонента межзвездного твердотельного вещества. Координаты антиапекса последнего из обнаруженных внесолнечных астероидов, сгоревших в земной атмосфере: прямое восхождение $49^\circ \pm 4^\circ$, склонение $11^\circ \pm 2^\circ$ (Siraj, Loeb, 2019a [74]). Скорость его относительно Солнца на бесконечности ~ 66.5 км/с (Siraj, Loeb, 2022 [75]).

10. ЭКЗОПЛАНЕТЫ

При поиске метеоров из копий звезд, соседних с Солнцем, нас в первую очередь интересуют звезды, обладающие планетными системами. Поэтому мы провели поиск звезд с $r < 30$ пк, обладающими зарегистрированными планетами, используя NASA Exoplanet Archive [76]. Это онлайн-астрономический каталог экзопланет и звезд и служба данных, которая собирает и сопоставляет астрономические данные и информацию об экзопланетах и их родительских звездах, а также предоставляет инструменты для работы с этими данными. Эти данные включают параметры звезд (такие как положения, звездные величины и температуры), параметры экзопланет (такие как массы и элементы орбиты) и данные обнаружения/характеристики (такие как опубликованные кривые лучевой скорости, кривые блеска, изображения и спектры).

В данном архиве мы обнаружили 217 звезд, имеющих экзопланеты и расположенных на расстоянии от Солнца до 30 пк, из них 42 звезды расположены на расстоянии от Солнца до 10 пк. Только для 18 звезд из 42 есть измерения лучевых скоростей в Gaia EDR3 (после выхода Gaia DR3 работа будет продолжена по большим данным о лучевых скоростях), используя которые мы можем получить индивидуальные апексы этих звезд. На рис. 7 показано распределение выбранных звезд с экзопланетами по расстоянию от Солнца. На рис. 7 видна роль эффектов наблюдательной селекции за пределами сферы с радиусом 4 парсека. Поскольку, согласно теоретическим и наблю-

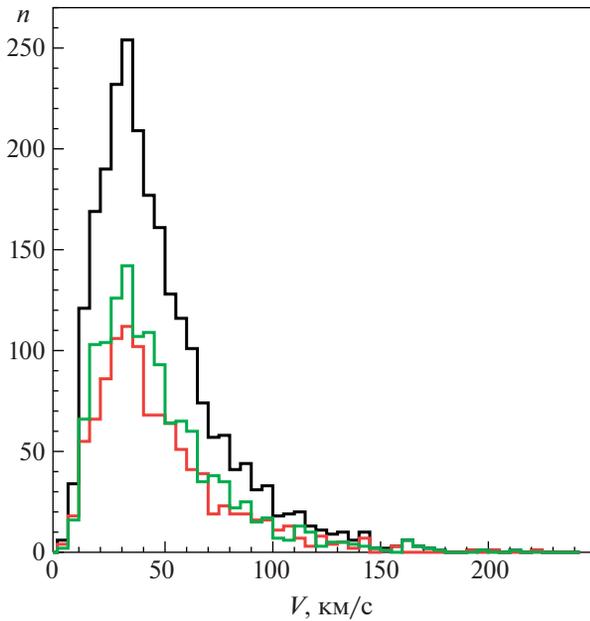


Рис. 5. Распределение звезд по модулю пространственной скорости. Цветом обозначены гистограммы: черным — для всех ($n = 2309$) звезд, зеленым и красным — для звезд, расположенных в областях повышенной концентрации на рис. 4 и разделенным по положениям антиапексов: зеленым — для звезд с $aA < 200^\circ$ ($n = 1324$), красным — для звезд с $aA \geq 200^\circ$ ($n = 1066$). Распределения сходны по форме и положению максимумов.

дательным оценкам, не менее трети звезд имеют планетные системы [8, 77] звезды с рис. 7 представляют не более четверти всех звезд с планетными системами в пределах 30 пк.

Выбранные нами из архива 18 звезд в зоне с $r < 10$ пк от Солнца, имеющие планетные системы и обнаруженные в GEDR3, нанесены на диаграмму антиапексов, рис. 8. Они представляют наибольший интерес при поиске источников внесолнечных метеоров, будучи предельно близкими к Солнечной системе.

Из нашего списка в 2390 звезд мы также отобрали близкие, расположенные на расстоянии до 10 пк от Солнца, а из них те, которые имеют наиболее точно измеренные лучевые скорости, — с относительной ошибкой лучевой скорости менее 1%. Таких звезд оказалось 36, их мы также отметили на рис. 8. Число звезд, имеющих относительную ошибку лучевой скорости менее 1%, расположенных до 10 пк от Солнца, и у которых обнаружены экзопланеты, оказалось равным четырем. Данные о них приведены в табл. 1. В колонках табл. 1 даны: номер по GEDR3 (Source ID), экваториальные координаты (ICRS), параллакс (Plx), расстояние от Солнца, собственные движения, лучевая

скорость, координаты антиапекса (aA , aD) и звездная величина G .

На рис. 8 наряду со звездами нанесены направления прихода трех межзвездных астероидов: 2I/Борисов, 1I/Оумуамуа и сгоревшего метеорита. Интересно, что направления их прихода близки к отмеченным выше направлениям антиапексов движения близких к Солнцу звезд. Пока, конечно, нет оснований утверждать, что это совпадение является надежным аргументом принадлежности этих межзвездных скитальцев к указанному звездным потокам. Сделан только первый шаг в поисках связи межзвездных астероидов со звездами, окружающими Солнце. Необходима дальнейшая целенаправленная работа по изучению окружающей Солнце твердотельного компонента Галактики.

11. РАССЕЯННЫЕ ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ НА AD ДИАГРАММЕ

Для того чтобы оценить, совпадают ли сгущения точек (антиапексов звезд) на AD-диаграмме с положениями антиапексов ближайших к Солнцу рассеянных звездных скоплений, из каталога Milky Way global survey of star clusters (MWSC) (Kharchenko et al., 2013 [79]), MWSC были выбраны РЗС, расположенные на расстоянии до 300 пк от Солнца. Найдено 23 скопления, для которых мы посчитали антиапексы. К этому списку мы добавили антиапекс потока Большая Медведица, который взят из работы Vereshchagin et al., 2009 [80].

Данные о скоплениях из каталога MWSC даны в табл. 2. Колонки табл. 2 содержат: номер по MWSC, другое имя (Name), тип скопления (Type, флаг “m” обозначает движущуюся группу), экваториальные координаты, собственные движения с ошибкой, лучевые скорости с ошибкой, расстояние от Солнца, возраст и координаты антиапекса, посчитанного нами по исходным данным MWSC.

Полученные антиапексы скоплений мы нанесли на диаграмму антиапексов звезд (рис. 9). Среди скоплений выделены те, которые движутся к Солнцу (отобраны по критерию: $V_r/V_t < 0.2$), а значит, их АКП “копья” ориентированы также по направлению к Солнцу. Рисунок 9 демонстрирует, что большинство близких рассеянных скоплений (табл. 2) принадлежат правому большому потоку, отражающему движение Солнца относительно выборки близких объектов (в данном случае РЗС). Большинство этих скоплений имеет возраст $\sim 10^8$ лет, что отвечает ожидаемой длине их звездных “копий” в несколько сот парсек. Это гарантирует потенциальную возможность взаимодействия Солнечной системы с пылинками, астероидами и кометами, потерянными их звездами в ходе эволюции.

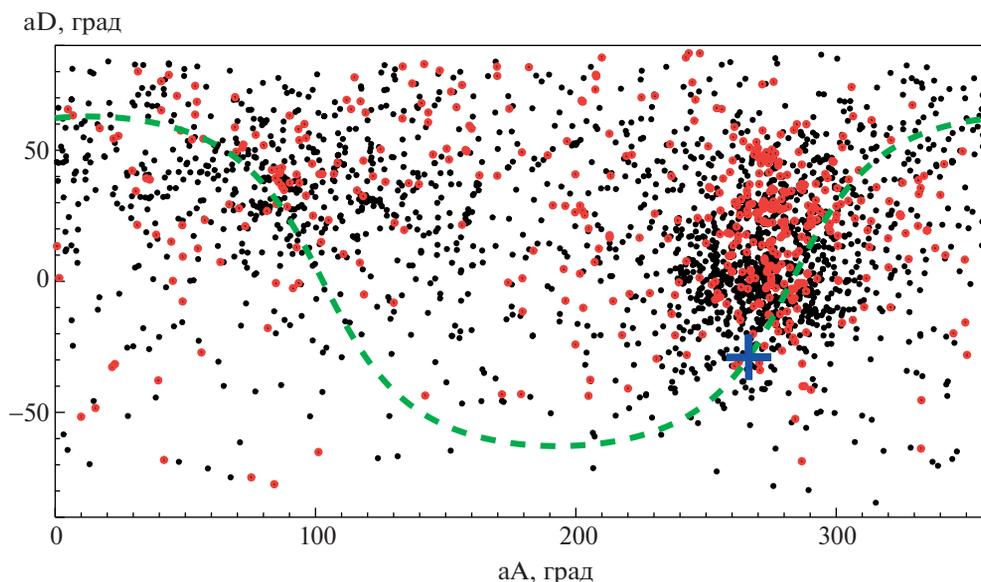


Рис. 6. Положения антиапексов звезд, близких ($R \leq 30$ пк) к Солнцу. Синий крестик показывает направление на Центр Галактики. Красными точками представлены звезды с пространственными скоростями в пределах $25 \leq V \leq 35$ км/с ($n = 486$). Черные точки – все звезды ($n = 2309$). Зеленым штрихпунктиром обозначено положение Млечного Пути (галактический экватор). Синим крестиком обозначено направление на Галактический Центр.

12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы провели анализ положений антиапексов близких к Солнцу ($R < 30$ пк) звезд с хорошо известными векторами пространственных скоро-

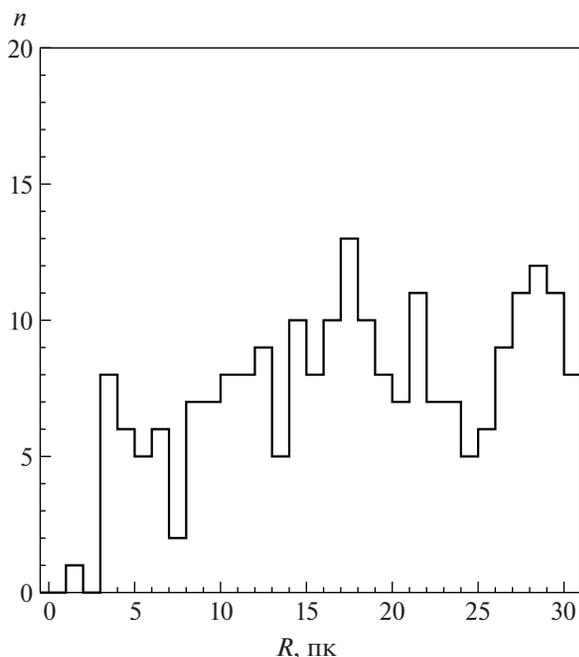


Рис. 7. Распределение звезд с известными экзопланетами по расстояниям от Солнца. По данным Архива экзопланет НАСА.

стей с целью поиска направлений прихода межзвездных АКП. Анализ показал, что около половины антиапексов выбранных звезд равномерно рассеяны по небесной сфере. Антиапексы второй половины указывают на существование двух звездных потоков, в “копья” которых погружено наше Солнце. Найденные положения антиапексов позволят установить возможные близкие источники межзвездных метеоров в земной атмосфере. Отметим, что направление одного из них совпадает с направлением на зону звездообразования, включающую Плеяды (Vereshchagin, Churina, 2015 [68]). А направление другого попадает на зону звездообразования, включающую поток Большой Медведицы.

Необходимо отметить, что неравномерная концентрация апексов звезд на рис. 4, рис. 6, рис. 8, рис. 9 связана с движением Солнца. Богатая концентрация звезд, хорошо заметная в правой части на этих рисунках, отражает движение Солнца со скоростью около 15–16 км/с центроидом в направлении $(l, b) \sim (45^\circ, 20^\circ)$ (или $(\alpha, \delta) \sim (265^\circ, 21^\circ)$); рассеяние относительно центроида связано с разбросом скоростей звезд, хотя, разумеется, тонкая структура распределения может отражать и наличие “шлейфов” ряда более далеких скоплений. Что касается левой концентрации, то ее центроид с хорошей точностью совпадает с направлением на антицентр Галактики; не исключая, что его наличие отражает радиальный компонент движения Солнца относительно близ-

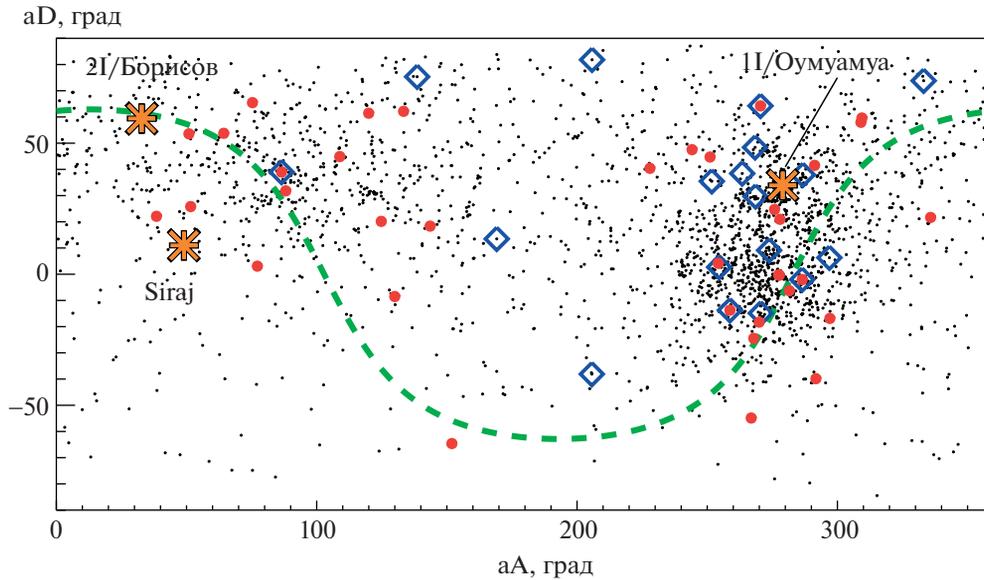


Рис. 8. Диаграмма антиапексов звезд нашей выборки. Красными точками отмечены звезды, расположенные на расстояниях до 10 пк от Солнца и имеющие экзопланеты ($n = 36$). Синими квадратиками выделены звезды, отмечены звезды, расположенные на расстояниях до 10 пк от Солнца и крайне малой относительной ошибкой лучевой скорости — менее 1% ($n = 18$). Скорость Солнца относительно местного центроида составляет 15 км/с. Показано положение точек входа 2I/Борисов $\alpha = 32.8^\circ$, $\delta = 59.4^\circ$ (Bailer-Jones et al. [78]) и 1I/Оумуамуа ($\alpha = 279.5^\circ$, $\delta = 33.9^\circ$) [60] ($\alpha = 49^\circ \pm 4^\circ$, $\delta = 11^\circ \pm 2^\circ$, Siraj, Loeb, 2019 [72]). Зеленым штрихпунктиром показана проекция галактического экватора.

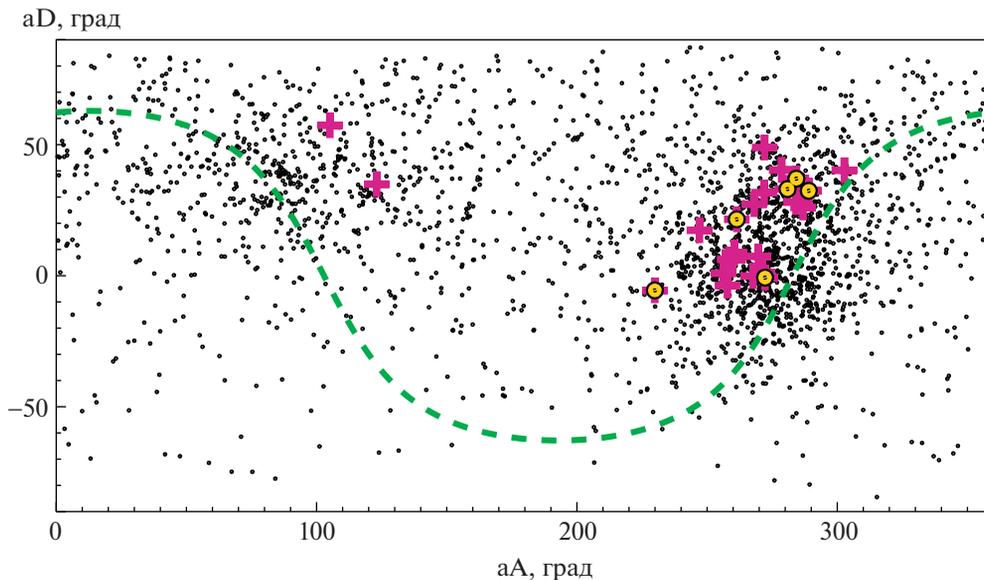


Рис. 9. Антиапексы звезд окосолнечной окрестности с радиусом 30 пк вместе с положением антиапексов близких (до 300 пк) звездных скоплений (лиловые крестики). Желтые точки — антиапексы скоплений с $V_t/V_r < 0.2$, где V_t — тангенциальная скорость и V_r — лучевая скорость.

ких звезд по направлению к центру Млечного Пути со скоростью около 10 км/с.

Рисунки 4 и 6 наглядно демонстрируют структуру звездных потоков в пределах 30 пк от Солнца. Часть звезд этих больших потоков обнаружи-

вают тонкую структуру в виде потоков с угловой шириной в несколько градусов. Вероятной причиной появления такой структуры является распад звездных скоплений — членов исходных ОБ ассоциаций [7]. Некоторые из оставшихся гравити-

Таблица 2. Список выбранных РЗС и потоков

MWSC	Name	Type	RAJ2000 deg	DEJ2000 deg	pmRA mas/yr	pmDE mas/yr	e_pm mas/yr	RV km/s	e_ km/s	d pc	lg t [yr]	aA deg	aD deg
0007	Blanco_1		000.885	-30.000	19.71	2.28	0.18	5.5	2.04	250	7.750	256.21681	0.97266596
0109	Platais_2	m	018.225	+32.050	13.85	-11.29	0.34	6.5	3.53	190	8.313	247.06449	17.327886
0274	Melotte_20		051.675	+48.800	21.49	-26.11	0.18	-1.4	0.65	175	7.700	280.89902	33.055459
0278	Alessi_13	m	052.020	-35.870	35.80	-3.27	0.75	19.5	3.00	112	8.720	284.14318	28.054018
0305	Melotte_22		056.505	+24.370	19.40	-46.00	0.15	5.5	0.33	130	8.150	272.09217	48.903105
0395	Platais_3	m	069.450	+71.470	3.35	-21.15	0.37	7.0	3.70	170	8.800	257.80359	-3.7574408
0467	Platais_4		076.717	+22.573	0.80	-6.44	0.32	13.8	5.08	275	8.550	260.45440	8.7233668
0544	Mamajek_3	m	081.502	+06.330	10.00	-32.24	0.81	13.1		95	7.500	278.62154	40.326012
0763	Platais_5	m	093.675	-22.500	-6.10	7.00	0.20	30.9		272	7.780	259.86663	6.0386490
1308	NGC_2451A		115.335	-38.520	-21.80	15.13	0.61	22.6	4.49	188	7.760	258.65034	6.1866910
1527	NGC_2632		130.095	+19.690	-36.54	-13.36	0.11	33.4	0.52	187	8.920	267.66617	-0.12263750
1529	IC_2391		130.065	-53.028	-24.20	23.42	0.62	14.6	1.39	165	8.050	271.11419	1.2311957
1535	Mamajek_1	m	130.470	-79.045	-29.41	27.40	2.16	15.0	1.05	112	6.990	268.12452	27.2950006
1629	Platais_8		136.875	-59.160	-15.00	14.80	0.28	17.3	3.09	141	7.750	286.87022	26.008896
1639	Platais_9	m	137.955	-43.530	-24.50	12.00	0.23	17.8	1.48	200	8.090	269.71737	7.3392288
1841	IC_2602		160.440	-64.400	-16.95	9.65	0.18	21.9	2.54	151	8.345	302.72921	40.205119
1990	Feigelson_1	m	180.300	-78.335	-40.45	-3.91	1.56	13.7	0.87	117	6.600	271.94974	31.688253
2020	Melotte_111		185.985	+26.300	-11.72	-8.76	0.29	-1.0	0.48	87	8.840	284.27458	37.008141
2150	Platais_10		205.290	-59.225	-29.90	-10.70	0.60	-8.0	7.40	246	8.340	272.27119	-0.73942280
2650	Mamajek_2	m	264.472	-08.085	-11.50	-20.90	1.02	-18.5	2.00	174	8.100	289.04882	32.386174
2670	Alessi_9		266.295	-47.185	10.75	-9.50	0.40	-11.6	1.20	218	8.550	229.92610	-5.5998449
3078	Ruprecht_147		289.092	-16.250	-1.59	-28.04	0.32	41.0		270	9.330	105.12140	57.384643
3654	ASCC_123	m	340.597	+54.250	12.55	-1.00	0.49	-6.5	6.49	250	8.191	261.39175	21.511055

тационно связанными звездных скоплений: Плеяды, Гиады, распадаясь со временем, сами обладают звездными потоками-копьями, демонстрируя их на рис. 9. Для настоящей работы важно, что указанные звездные потоки сопровождаются твердотельным материалом, включающим пыль, песок, астероиды, кометы и планеты. Самые многочисленные объекты этих потоков: пылинки, песок и камни могут создавать метеорные явления в земной атмосфере или попадать на Землю в виде метеоритов. Последние явления ставят две задачи. Первая — использовать направления прихода в Солнечную систему метеоров с гиперболическими орбитами для сравнения с антиапексами близких звезд и скоплений, вторая включает поиск в земных коллекциях метеоритов посланцев других планетных систем. Поиск химических методов идентификации межзвездных комет демонстрирует обнадеживающие результаты.

Анализ положений околосолнечных молодых ($\leq 10^6$ лет) звезд, лежащих в пределах 500 пк от Солнца, выполненный Porras et al. (2003) [81], обнаружил области их концентрации в направлениях на Центр и Антицентр Галактики. Каждая из областей содержит по несколько ОВ ассоциаций и молодых звездных потоков. Положения этих молодых звезд совпадают с направлениями двух звездных потоков, зарегистрированных в настоящей работе (рис. 4, рис. 6). То есть потоки в пределах 30 пк от Солнца являются частями больших потоков звезд с размерами в несколько сот парсек, расположенных в околосолнечных окрестностях Галактики.

Численное восстановление орбиты астероида 21/Борисов (Borisov et al., 2013 [10]) 11/Оумуамау (Hallatt et al., 2020 [11]) вместе с орбитами семи млн. звезд, близких к Солнцу, позволило установить, что около млн. лет назад 21 был в пределах 10^4 а. е. от MOV карлика Ross 573 (Bailer-Jones et al., 2020 [78]). Небесные координаты направления прихода этого астероида в Солнечную систему: $\alpha = 32^\circ.798 \pm 0^\circ.005$, $\delta = 59^\circ.44 \pm 0^\circ.002$. Анализ орбиты другого межзвездного скитальца 11/Оумуамау (Hallatt et al., 2020 [11]) привел к выводу о возможной связи его с движущимися группами молодых звезд Carina и Columba (Hallatt, Wiegert, 2020 [82]). Конечно, первые попытки отождествления межзвездных метеороидов и астероидов имеют малые шансы на однозначную идентификацию их источников среди ближайших звезд. Число потенциальных звезд-источников в пределах пока слабо определенных угловых $\sim 1^\circ$ и скоростных ~ 1 км/с координат остается слишком большим $\sim 10^5$. Звезды, близкие к Солнцу, выделены большей плотностью потока пыли их кометных копий, что оставляет надежду на иденти-

фикацию, со временем, их метеоров, более многочисленных.

На рис. 10 приведена зависимость лучевой скорости звезд из солнечной окрестности с радиусом 30 пк от их прямого восхождения. Малый поток при $aA < 180^\circ$ имеет характерную дисперсию скоростей ~ 20 км/с, а большой при $aA \geq 180^\circ$ — ~ 30 км/с. Разница в величинах дисперсии скоростей является вероятным следствием примерно двукратной разницы в массах исходных АВ ассоциаций. Об этом же свидетельствует и относительное обилие звезд этих двух потоков.

Итогом выполненного нами исследования является установление структуры кинематики звезд с $R < 30$ пк, окружающих Солнце. Рисунки 4 и 6 демонстрируют, что около половины звезд движутся случайным образом с дисперсией скоростей ~ 20 км/с (рис. 5, рис. 10). Другая половина близких звезд организована в два потока с дисперсией скоростей звезд каждого 20–30 км/с. Эти потоки являются звездными копиями двух близких к Солнцу ОВ ассоциаций, включающими в свой состав наряду со звездами несколько близких к Солнцу звездных скоплений диска нашей Галактики. В поисках источников внесолнечных метеоров и, вероятно, метеоритов следует иметь в виду, что солнечная система погружена в кометные копыта тысяч звезд диска Галактики — Млечного Пути. Найденные потоки сохраняют шансы на то, что их сравнительная молодость ($\sim 10^8$ лет) и близость к Солнцу их источников (~ 400 пк) позволяют им выделиться на метеорном небе Земли внесолнечных метеоров. Для поиска антиапексов земных метеоров необходимо восстановление их орбит за пределы Солнечной системы с учетом гравитации Солнца и планет-гигантов Солнечной системы.

Для отождествления возможных узких, в несколько угловых градусов, звездных потоков, видимых на рис. 4, с продуктами распада звездных скоплений ОВ ассоциаций необходимо дополнительное исследование. Это исследование должно включать наряду со статистическим анализом реальности самих сгущений антиапексов изучение распределения в пространстве этих звезд, распределения их скоростей и диаграммы Герцшпрунга–Рассела их звезд.

Еще одним, не исключено, что главным, потенциально активным источником внесолнечных метеоров может являться Млечный Путь. В нем расположены многие миллионы старых звезд с длинными кометными копиями низкой плотности, в объем которых попадает Солнечная система. Оценка мощности этого потока дана в параграфе 3.

И, наконец, можно ожидать, что самые близкие ($R \leq 10$ пк), сравнительно молодые звезды, обладающие планетными системами, окажутся ак-

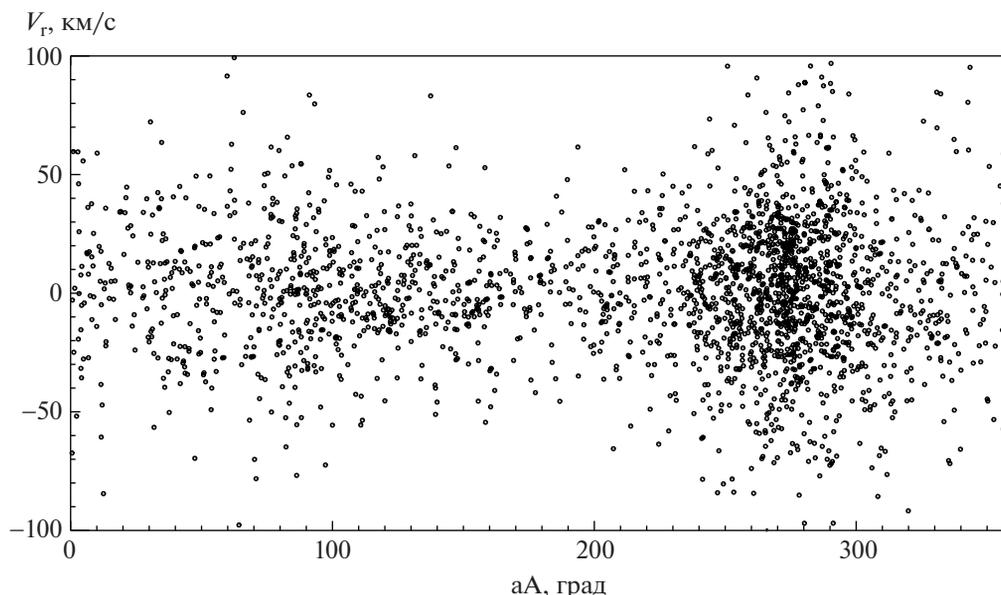


Рис. 10. Лучевая скорость околосолнечных звезд в зависимости от прямого восхождения их антиапексов.

тивными источниками метеорной пыли. Количественная, сравнительная оценка мощности трех основных, выделенных на небе источников метеоров: звезд Млечного Пути, двух звездных потоков Каптейна и близких планетных систем пока не представляется возможной ввиду недостаточной определенности многих входящих в такую оценку параметров.

Ближние к Солнцу звезды, обладающие планетами, интересны для нас еще в одном отношении. Ранее численным моделированием было показано, что звезды с удаленными от них планетами-гигантами являются эффективными ускорителями околозвездного твердотельного материала: пыли, комет, астероидов и планет [7]. Это ведет к потере этих объектов планетными системами со скоростями в несколько километров в секунду. Естественно предположить, что столкновение Солнечной системы с межзвездными астероидами и кометами может вести к гравитационному

захвату последних Солнечной системой. То есть некоторая часть объектов Солнечной системы (астероидов, комет, планет) может быть продуктами такого захвата. Поэтому близкие к Солнцу планетные системы с предельно малыми относительно Солнца скоростями (< 3 км/с) могут обмениваться таким образом своими твердотельными объектами с Солнечной системой. Среди отобранных нами звезд из окрестностей Солнца в этом отношении сейчас интересны звезды GEDR3 825 160940954 112 128, 5931 674608438 449 792 (табл. 3). Наиболее перспективные кандидаты для указанного обмена твердотельными объектами — широкие двойные системы, каждый из компонентов которых обладает планетной системой, и звезды рассеянных звездных скоплений.

Еще одним следствием обмена астероидами и кометами между планетными системами является то, что часть метеоритов земных коллекций принадлежала когда-то другим планетным системам.

Таблица 3. Звезды с одинаковым движением с Солнцем, пространственная скорость которых относительно Солнца не превышает 5 км/с

Source ID	Имя	Номер HIP	Комментарий
825 160940954 112 128	PG 0943+489		
5931 674608438 449 792	HD 146464	HIP 79958	Rotationally variable Star
2786203082290674048	ρ Psc	HIP 6706	Variable Star
2635679803009267840	PM J23073-0415		High proper-motion Star
1237090738916392704	ξ Boo A		High proper-motion Star
4532560355640612608	HD 174160	HIP 92270	

БЛАГОДАРНОСТИ

В ходе работы нами использовался Архив экзопланет НАСА, который находится в ведении Калифорнийского технологического института по контракту с Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства в рамках Программы исследования экзопланет.

В этой работе использовались данные миссии Gaia Европейского космического агентства (ESA) (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), обработанные Консорциумом обработки и анализа данных Gaia (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>).

Финансирование DPAC было предоставлено национальными учреждениями, в частности учреждениями, участвующими в Многостороннем соглашении Gaia. Веб-сайт миссии Gaia: <https://www.cosmos.esa.int/gaia>. Веб-сайт архива Gaia: <https://archives.esac.esa.int/gaia>.

В ходе настоящей работы использовалась база данных SIMBAD (<http://cds.u-strasbg.fr>), работающая в CDS, Страсбург, Франция.

Авторы благодарят профессора Э. Крюгеля за обсуждение проблемы межзвездных метеоров и полезные советы. Авторы благодарят рецензента за полезные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации за поддержку в рамках гранта 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *W. Herschel*, PTRS of London, Series I **102**, 115 (1812 a).
2. *W. Herschel*, PTRS of London, Series I **102**, 229 (1812 b).
3. *P. Laplace*, *Essain philosophique surles probabilities* (Courcier, 1814).
4. *T. Heidarzadeh*, *Comets in the Laplace Cosmos* (187, 2008).
5. *D. Seligman, L. Rogers, S. Cabot, et al.*, *astro-ph/2204.13211*.
6. *G. Schiaparelli*, *Note e riflessioni intorno alla teoria astronomica delle stele* (Firenze, 1867).
7. *A. Tutukov, G. Dryonova, and V. Dryonov*, *Astron. Rep.* **64**, 936, (2020).
8. *А. Г. Масевич, А. В. Тутуков*, *Эволюция звезд: теория и наблюдения* (М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 280 с., 1988).
9. *N. Miret-Roig, H. Bony, S. Raymond, et al.*, preprint *astro-ph/2112.11999*.
10. *G. Borisov, I. Ionov, O. Bryzgalov, et al.*, *MPEC*, 51 (2013).
11. *T. Hallatt and P. Wiegert*, preprint *astro-ph/1911.02473*; *Astron. J.* **159**, 147 (2020).
12. *A. Siraj and A. Loeb*, preprint *astro-ph/1904.07224*, 2019a The 2019 Discovery of a Meteor of Interstellar Origin.
13. *D. Hoover, D. Seligman, and M. Payne*, preprint *astro-ph/2109.10460* (2021).
14. *K. Malhan, R. Ibata, and N. Martin*, preprint *astro-ph/2012.05271* (2020).
15. *X. Liang, J. Zhao, T. Oswalt, et al.*, *Astrophys. J.* **844**, 152 (2017).
16. *A. Kepley, H. Morrison, F. Helmi, et al.*, *Astron. J.* **134**, 1579 (2007).
17. *M. Landgraf*, *ESASP* **495**, 627 (2001).
18. *R. Musci, R. P. Weryk, P. Brown, et al.*, *Astrophys. J.* **745**, 161 (2012).
19. *A. C. B. Lovell*, *Meteor astronomy*, Clarendon, Oxford, (1954). *Meteor astronomy*. By A. C. B. Lovell. Oxford (Clarendon Press), 1954. Pp. xiv, 463; 3 Plates; 187 Figs.; 175 Tables. Appendix I, II. 60s, (1954).
20. *A. Airo, S. Weigert, and C. Beck*, *Bioflumology: Microbial mat growth in flumes European Planetary Science Congress 2014*, EPSC Abstracts **9**, id. EPSC2014-624 (2014).
21. *M. Hajdukova and T. Paulech*, *Contrib. Astronom. Obs. Skalnaté Pleso* **37**, 18 (2007).
22. *M. Hajdukova*, EPSC **12**, v7 (2012).
23. *M. Froncisz, P. Brown, and R. Weryk*, preprint *astro-ph/2005.10896* (2020).
24. *A. Siraj and A. Loeb*, preprint *astro-ph/1906.03270* (2019b).
25. *A. Tutukov and B. Shustov*, *Astrophysica* **72** (2020).
26. *E. Krugel*, *Physics of Interstellar dust*, 2003 (1990).
27. *M. Gordon, R. Humphreys, R. Jones, et al.*, *Astron. J.* **155**, 212 (2018).
28. *J. Knude, M. Winther, and H. Schnedrer*, *Astron. and Astrophys.* **179**, 115 (1987).
29. *M. Millard and A. Ravi*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **257**, 36 (2021).
30. *J. Eatson, J. Pittard, and S. Van Loo*, preprint *astro-ph/2204.07397* (2022).
31. *L. Necib, B. Ostidick, M. Lisanti, et al.*, *Nature Astronomy*, Advanced Online Publication (2022).
32. *L. Necib, M. Lisanti, and V. Belokurov*, *Astrophys. J.* **874**, 1, id. 3, 22 (2019).
33. *S. Ratzenböck, S. Meingast, G. Almes, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **639**, 64 (2020).
34. *F. Zwicky*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **63**, 61 (1951).
35. *Yu. Shchekinov, B. Nath, and E. Vasiliev*, preprint *astro-ph/2203.14073*.
36. *V. Elkin*, *Astrophys. J.* **12**, 4 (1900).
37. *E. Öpik*, *Ernst Observations of Meteor Velocities 1931-1940 Publications of the Tartu Astrofizica Observatory* **30**, F3 (1940).
38. *F. L. Whipple*. *Photographic meteor studies, III. The Taurid shower*. *Proc. Am. Phil. Soc.* **83**, 711–745, (1940).
39. *E. Grun, H. Zook, M. Baguhl, et al.*, *Nature* **362**, 428 (1993).
40. *P. C. Frisch, J. Dorschner, J. Geiss, et al.*, *Astrophys. J.* **525**, 492, (1999).

41. *H. Kriiger, M. Landgraf, N. Altobelli, et al.*, *Space Sci. Rev.* **130**, 401, (2007).
42. *U. Baggaley, H. Marsch, and S. Close*, *Dust in Planetary Systems* **643**, 27 (2007).
43. *F. Colas, B. Zanda, J. Bonley, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **644**, A53 (2020).
44. *E. Drolshagen, T. Ott, D. Koschny, et al.*, *Plan. and Space Sci.* **184**, 104869, (2020).
45. *B. Khrenov, N. Kalmukov, P. Klimov, et al.*, preprint astro-ph/2108.07021.
46. *T. Cantat-Gaudin, F. Anders, A. Castro-Ginard, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **640**, 1 (2020).
47. *A. Piskunov, N. Kharchenko, S. Röser, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **445**, 545 (2006).
48. *J. Kastner and D. Principe*, preprint astro-ph/2204.00863.
49. *S. Meingast, J. Alves, and A. Rottensteiner*, *Astron and Astrophys.* **645**, A84, 23 (2021).
50. *A. Tutukov, S. Vereshchagin, and M. Sizova*, *Astron. Rep.* **64**, 827 (2020).
51. *A. Tutukov, S. Vereshchagin, and M. Sizova*, *Astron. Rep.* **65**, 1085 (2021).
52. *J. Kapteyn*, *KNAB* **8**, 691 (1905).
53. *O. Eggen, Galactic Structure* (ed. A. Blaauw, M. Schmidt, Chicago Up, 111, 1965).
54. *A. Tutukov and M. Smirnov*, *So Sy R* **38**, 279, (2004).
55. *S. Meingast and J. Alves*, *Astron. and Astrophys.* **621**, L3 (2019).
56. *S. Röser, E. Schilbach, and B. Goldman*, *Astron. and Astrophys.* **621**, L2 (2019).
57. *G. M. Seabroke and G. Gilmore*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **380**, 1348 (2007).
58. *J. Zhao, G. Zhao, and Y. Chen*, *Astrophys. J. Lett.* **692**, 2, L113 (2009).
59. *T. M. Eubanks*, *Astrophys. J. Lett.* **874**, L11 (2019).
60. *C. A. L. Bailer-Jones, D. Farnocchia, K. J. Meech, et al.*, *Astron. J.*, **156**, 205 (2018).
61. *M. Micheli, D. Farnocchia, K. J. Meech, et al.*, *Nature* **559**, 223 (2018).
62. *E. Gaidos, J. Williams, and A. Kraus*, *RNAAS* **1**, 13 (2017).
63. *F. Feng and H. R. A. Jones*, *Astrophys. J. Lett.* **852**, 2, id. L27 (2018).
64. *X. Pang, S-Y. Tang, Y. Li, et al.*, preprint astro-ph/2204.06000.
65. *N. V. Chupina, V. G. Reva, and S. V. Vereshchagin*, *Astron. and Astrophys.* **371**, 115 (2001).
66. *Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, C. Babusiaux, and M. Biermann*, *Gaia Early Data Release 3: Summary of the contents and survey properties.* (2020).
67. *J. Kapteyn*, *Astrophys. J.* **55**, 302, (1922).
68. *S. Vereshchagin and N. Chupina*, *Baltic Astron.* **24**, 421, (2015).
69. *I. Savanov*, *Astrophysica* **64**, 178 (2021).
70. *S. Meingast, J. Alves, and V. Fürnkranz*, *Astron. and Astrophys.* **622**, 13 (2019).
71. *K. Hawkins, M. Lucey, and J. Curtis*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **496**, 2422 (2020).
72. *A. M. Melnik and A. K Dambis*, *Internal motions in OB associations with Gaia DR2* *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **493**, 2339 (2020).
73. *Alexander A. Chemel, Richard de Grijs, Elena V. Glushkova, and Andrey K. Dambis*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **515**, 4359 (2022).
74. *A. Siraj and A. Loeb*, preprint astro-ph/2209.09905, (2019).
75. *A. Siraj and A. Loeb*, preprint astro-ph/2204.08482.
76. *NASA Exoplanet Archive, A service of NASA Exoplanet Science Institute*, <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>.
77. *A. Tutukov*, *Astron. and Astrophys.* **70**, 57 (1978).
78. *C. Bailer-Jones, D. Farnocchia, Q. Ye, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **634**, 14 (2020).
79. *N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, S. Roeser, E. Schilbach, and R.-D. Scholz*, *VizieR On-line Data Catalog: J/A+A/558/A53* (2013).
80. *S. Vereshchagin, V. Reva, and N. Chupina*, *Astron. Rep.* **53**, 3, 243 (2009).
81. *A. Porras, M. Christopher, L. Allen, et al.*, *Astron. J.* **126**, 1916 (2003).
82. *T. Hallatt and P. Wiegert*, *Astron. J.* **159**, 4, 147, 15 pp. (2020).