

УДК 524.6-34

## ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЕЧНОГО КОМЕТНОГО КОПЬЯ СО ВРЕМЕНЕМ

© 2021 г. А. В. Тутуков<sup>1</sup>, М. Д. Сизова<sup>1</sup>, С. В. Верещагин<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup> Институт астрономии РАН, Москва, Россия

\*E-mail: svvs@ya.ru

Поступила в редакцию 28.10.2020 г.

После доработки 10.12.2020 г.

Принята к публикации 16.12.2020 г.

Часть астероидов, комет и планет (АКП) ускоряется планетами-гигантами и выбрасывается из родительских планетных систем со скоростями в несколько километров в секунду. АКП, покидая не только родительскую звезду, но и распадающееся звездное скопление, формируют в пространстве облако АКП, напоминающее копье. Тем самым формируются АКП копия Солнца, звезд и звездных скоплений. Таким образом, границы планетных систем со временем расширяются за счет АКП копий на десятки кпк. Настоящая работа посвящена численному исследованию эволюции орбит “свободных” АКП в Галактике, ведущей к их превращению в “кометные копья” Солнца, звезд, звездных скоплений. Показано, что со временем АКП копия звезд превращаются в кольца вокруг центра Галактики.

DOI: 10.31857/S0004629921040083

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Образование звезд часто сопровождается возникновением околозвездных газово-пылевых дисков, эволюция которых ведет со временем к образованию планетных систем [1]. В плотных компактных дисках образование планет и коричневых карликов является вероятным результатом гравитационной неустойчивости [2]. В протяженных дисках малой плотности возможно разделение пыли и газа с последующей аккумуляцией пыли и появлением твердотельных планет, погруженных в газовую оболочку.

Наблюдения [3, 4] и теоретические оценки [5] показали, что около трети молодых звезд с массами  $0.2 M_{\odot}$ – $1.5 M_{\odot}$  окружены газово-пылевыми дисками с массами  $0.001 M_{\odot}$ – $0.1 M_{\odot}$  и радиусами до 100 а.е. [6, 7]. Образование планет начинается во внутренних частях таких дисков. Со временем граница сформировавшейся части планетной системы передвигается на периферию диска, достигая границы около 40 а.е. за хаббловское время [5]. За пределами 40 а.е. большие планеты, вероятно, не успевают сформироваться, и эта часть протопланетного диска, потеряв часть газового компонента, превращается со временем в астероидно-кометный пояс Койпера [1]. Его образование сочетается с возникновением планет-гигантов, формированием облаков Оорта Солнца и кометных копий звезд [8].

Подчеркнем, что планеты в аккумуляционном режиме за хаббловское время могут сформиро-

ваться только в пределах примерно 40 а.е. от родительской звезды. Например, в Солнечной системе на этой границе расположен Плутон, как известно, хотя и выбывший из категории планет, но являющийся крупнейшей карликовой планетой в Солнечной системе. Появление планет вне зоны, ограниченной 40 а.е., нас не должно удивлять. Во-первых, они могут быть выброшены из окрестностей Солнца в облако Оорта в процессе формирования планет-гигантов [9]. Во-вторых, не исключено, что планеты на холодном, далеко от звезды краю протопланетного диска могут формироваться за счет гравитационной неустойчивости прямым коллапсом. В этом случае и 40 а.е. – не предел. Например, экзопланта PTFO 8-8695c имеет большую полуось орбиты 662 а.е.)<sup>1</sup>.

Численное исследование [9] процесса ускорения АКП (астероиды, кометы, планеты) тел в рамках динамики трех гравитирующих тел, включающих Солнце, Юпитер и N не взаимодействующих между собой ускоряемых малых тел, позволило детально изучить процесс формирования сопутствующих подсистем планетной системы. В частности, были изучены процессы формирования облаков Оорта Солнца и Юпитера, концентрация АКП тел в точках  $L_4$  и  $L_5$  системы Солнце–Юпитер, а также найден спектр скоростей АКП тел, покидающих Солнечную систему. Этот спектр скоростей покидающих Солнечную систему АКП тел был принят нами в качестве на-

<sup>1</sup> [http://www.exoplanetkyoto.org/exohtml/PTFO\\_8-8695\\_c.html](http://www.exoplanetkyoto.org/exohtml/PTFO_8-8695_c.html)

чальных условий для изучения картины формирования АКП копия. Поток этих тел был принят постоянным на протяжении жизни Солнца. Последние со временем формируют “кометное копьё”, неизбежность появления которого была указана ранее Тутуковым и Смирновым в [8]. АКП копия должны быть практически у всех звезд с достаточно массивными и далекими от своих звезд планетами [9]. Естественно, что практически все звезды, обладающие планетными системами, пополняют поле свободных АКП объектов Галактики. Вопрос о межзвездных кометах впервые возник при рассмотрении взаимодействия планетного облака Оорта со звездами фона [10, 11]. Межзвездные объекты 2I/Борисова и 1/I Оумуамуа, обнаруженные недавно, представляют этот компонент Галактики [12, 13]. Найдены межзвездные метеоры с массой  $\sim 10^{-4}$  г [15], которые также представляют существенную часть АКП компонента Галактики. Отметим, что микролинзирование облегчает и делает реальным процесс регистрации свободных планет Галактики, потерянных родительскими звездами [14].

Целью настоящей работы является изучение эволюции облаков АКП с помощью численной модели. Наша модель формирования АКП копия Солнца основана на изучении орбит малых тел, рассчитанных в гравитационном потенциале Галактики, представленном ее кривой вращения (см. работу Байковой и Бобылева [16]). Задача включает изучение динамической эволюции АКП копий со временем. Последние из облаков АКП превращаются со временем в потоки малых тел, напоминающих копия и кольца вдоль орбиты Солнца в Галактике. В настоящей статье предлагается сценарий образования межзвездного АКП компонента Галактики, формирующего особое население галактического диска и балджа. Мы привели результаты численных расчетов, иллюстрирующих эволюцию рассмотренных облаков АКП в рамках нашей модели. Также рассмотрена роль звездных скоплений в процессе формирования АКП компонентов, со временем приобретающих форму копий и пронизывающих практически все пространство Галактики. Эта работа является продолжением серии работ, посвященных распаду астрономических систем в ходе их эволюции.

## 2. ДВА КОМПОНЕНТА АКП

В силу условий возникновения планетная система находится в глубокой потенциальной яме центральной звезды, и ее члены “привязаны” к последней. Однако, при образовании массивных и далеких от своих звезд планет ситуация принципиально меняется. Планеты-гиганты имеют достаточно большой гравитационный потенциал и становятся эффективными ускорителями твер-

дотельного материала, – процесс, который рассматривается в рамках задачи трех тел. Ускоренные в родительской планетной системе АКП постепенно уходят в межзвездное пространство (Оорт [17, 18]). Такой процесс становится возможным при выполнении условия  $m/r > M/a$ , где  $m$  и  $r$  – масса и радиус планеты,  $M$  – масса центральной звезды и  $a$  – большая полуось орбиты планеты. Таким образом, оценки и численное моделирование показали, что часть АКП ускоряется планетами-гигантами и выбрасывается из родительских планетных систем со скоростями в несколько километров в секунду [8, 9]. В работе [8] сделаны оценки, которые демонстрируют два возможных варианта эволюции АКП: планеты-гиганты Солнечной системы (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) ускоряют АКП, создавая из его элементов либо облако Оорта, если энергия связи последних остается отрицательной, либо так называемое межзвездное кометное копьё, если эта энергия положительна. Численное моделирование процесса ускорения АКП тел, выполненное для системы Солнце–Юпитер [9], позволило определить некоторые параметры процесса ускорения АКП тел этой системой. Расчеты показали, что часть АКП тел захватывается Солнцем и Юпитером, входя в их состав. Кроме того, Солнце и Юпитер оказались со временем окружены сфероидами облаками Оорта, располагающимися внутри их полостей Роша. При этом часть объектов этих облаков получили орбитальное движение, обратное направлению вращения Солнца и Юпитера. В работе [19] найдено подтверждение такого эффекта данными наблюдений.

Кроме выметания малых тел из планетной системы планетами-гигантами, возможен еще один процесс образования свободных АКП тел [17, 18]. Оценим эффективность диссипации облака Оорта за счет сближений с окружающими звездами. Мы рассматриваем при этом не только Солнце, но и другие звезды, также окруженные своими облаками Оорта. Столкновения облаков Оорта, размеры которых составляют  $\sim 10^{18}$  см, со звездами поля Галактики ведут к потере части членов этого облака. Радиус зоны “выметания”  $r$  можно оценить, исходя из формулы  $r/R_0 = w/v$ , где  $R_0$  – радиус облака Оорта (приблизительно  $10^5$  а.е.),  $w = 3 \times 10^6$  см/с – скорость звезд фона,  $v$  – скорость АКП объектов облака Оорта. Простая оценка показывает, что за время жизни Солнца около  $10^4$  звезд могут пролететь через его облако Оорта. В результате приблизительно 10% малых тел покинут облако Оорта с характерной скоростью относительно своих звезд  $\sim 10^4$  см/с, близкой к скорости АКП объектов облака Оорта в периастралах своих орбит.

Таким образом, приходим к выводу, что существуют, по крайней мере, два источника АКП ма-

териала для питания кометного копыя Солнца. Первый компонент малых тел образован за счет ускорения АКП объектов гигантскими планетами. Эти тела покидают родительскую звезду со скоростями  $\sim 1$  км/с [9]. Таким образом, будучи выброшенными из Солнечной системы, они подтверждают давнее предсказание Оорта (1950, 1951) [17, 18] и пополняют АКП компонент Галактики. За их счет образуется поток малых тел в виде кометного копыя, изученный в работе [8]. Ширина такого потока определяется отношением характерных скоростей АКП тел относительно Солнца ( $\sim 1$  км/с) и орбитальной скорости Солнца вокруг центра Галактики (ЦГ), приблизительно равной  $\sim 200$  км/с. Из этого следует, что ширина АКП копыя составит  $\sim 50$  пк. Второй компонент — это АКП тела с малыми скоростями, потерянные из облака Оорта. Они покидают околозвездную планетную систему в результате сближений планетной системы со звездами поля. Этот процесс дает объекты со скоростями  $\sim 100$  м/с. Последняя оценка исходит из того, что она близка к величине скорости этих объектов в облаке Оорта.

Отметим, что оценки числа комет, как остающихся в облаке Оорта, так и покидающих его, остаются неуверенными, что осложняет оценку их плотности в облаке АКП (например, в работе [20] дана оценка числа долгопериодических комет с перигелием  $< 10$  а.е. около  $10^{12}$ ).

### 3. РОЛЬ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ

Звезды скоплений не являются исключением, они также имеют планетные системы и рассмотрены в нашем исследовании. Частота межзвездных сближений внутри скопления превосходит частоту сближений среди звезд поля. Плотность звезд в скоплениях повышена по сравнению со звездами поля. Результаты подсчетов показывают, что в окрестностях Солнца звездная плотность составляет около  $0.1$  пк $^{-3}$ , а в Гиадах, например, она составляет уже приблизительно  $100$  пк $^{-3}$  [21], т.е. заметно превосходит плотность звезд поля. Это вносит свои коррективы в сценарий создания АКП копий, как для звезд внутри скоплений, так и для скопления в целом.

Вспомним, что величина скорости вылета АКП объектов из Солнечной системы, придаваемая малым телам Юпитером, составляет  $\sim 1$  км/с. Несложно показать, что такая величина скорости достаточна не только для их потери Солнцем, но и звездным скоплением со средней массой  $\sim 10^3 M_{\odot}$ . В таком случае АКП наравне со звездами покидают скопление и образуют для звезд скопления АКП копыя. Подчеркнем, что существенна разница между родительскими звездами АКП тел, которые находятся внутри копыя (а затем могут по-

кинуть его), и звездами, теряющими связь со своим скоплением, покинув его. Последние представляют собой звезды, практически потерявшие гравитационную связь с ядром скопления и вошедшие в состав шлейфов, расположенных приблизительно вдоль орбиты скопления в диске [22–24]. Что касается АКП, то они, покинув родительскую звезду за счет процесса их выметания планетами-гигантами, как правило, покидают и родительское звездное скопление, тем самым формируя облако АКП тел, общее для звездного скопления в целом. Постепенно это облако за счет действия приливных сил Галактики приобретает сначала форму копыя, а затем по прошествии достаточного интервала по времени, может замкнуться в кольцо вокруг центра Галактики.

Оценка общего числа рассеянных звездных скоплений в Галактике составляет  $10^5$  [25, 26], однако, она касается лишь выживших скоплений. Большинство же скоплений распались, превратившись в звездные потоки и кольца в момент своего рождения [27]. Таким образом, значительная часть межзвездных АКП остались без родительских скоплений за счет быстрого распада последних. Межзвездные АКП могут иметь прямое отношение к наблюдаемым кинематическим звездным потокам, будучи связаны общим происхождением. Так, астероид 11/Оумуамуа может быть связан с одним из распавшихся скоплений, входившим в одну ассоциацию с Плеядами [28, 29]. Стоит добавить, что Фенг и Джонс 2018 [30] считают кандидатом на роль источника ассоциацию Columba.

Из-за пространственных осцилляций при движении вокруг центра Галактики (ЦГ) орбиты скоплений и звездных потоков могут отклоняться от плоскости диска. То же можно сказать и о сопровождающих их АКП копыях. Например, такую картину показывают расчеты орбиты NGC 2158 [31]. Это подтверждают и данные наблюдений [24] для ряда звездных скоплений по данным Gaia.

## 4. ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ

### 4.1. Исходные данные

Численное моделирование системы Солнце–Юпитер позволило получить распределение по скоростям АКП тел, покидающих Солнечную систему в результате ускорения их Юпитером [9]. Несколько упростив задачу, мы взяли в качестве всей совокупности АКП, выметенных из Солнечной системы, облако тел, приписав им единую по модулю пространственную скорость относительно Солнца, равную  $2$  км/с. Как уже говорилось, существует и второй компонент АКП — тела, выметенные из Солнечной системы за счет сближений последней со звездами поля и (или) звездами

**Таблица 1.** Начальное положение Солнца и облаков АКП в гелиоцентрической системе координат

Пространственные координаты и скорости	$t = 0$
	Солнце и АКП
$X$ , пк	0
$Y$ , пк	0
$Z$ , пк	20.8
$U$ , км/с	0
$V$ , км/с	0
$W$ , км/с	0

родительского скопления. Этот процесс приводит к появлению второй популяции свободных АКП объектов с характерными скоростями относительно Солнца  $\sim 100$  м/с.

Обе популяции мы представили в виде двух облаков из  $n = 1000$  точек каждое. Облака в начальный момент времени расположены в одной точке пространства, совпадающей с положением Солнца. Предполагаем, что эти облака были созданы на ранних стадиях формирования Солнца. Точки, составляющие каждое облако, представляют малые тела Солнечной системы. Допускаем, что они гравитационно не взаимодействуют ни между собой, ни с Солнцем и движутся по индивидуальным орбитам, задаваемым их начальными скоростями. Солнечная система, как и оба облака, совершает орбитальное движение в диске Галактики. Число точек взято равным 1000, поскольку нас интересует только развитие формы копия со временем, и такого числа, как показал опыт, оказывается достаточно.

#### 4.2. Эволюция облака АКП в галактическом диске

Для расчетов параметров орбиты и интегрирования движения в пространстве использовался пакет *galpy*, разработанный Дж. Бови [32], написанный на языке программирования Python. Использован приближенный к реальности классический потенциал Млечного Пути (MWPotential2014 [32]), наилучшим образом воспроизводящий наблюдаемую кривую вращения Галактики. Это осесимметричный потенциал, где Галактика представлена трехкомпонентной моделью, включающей гало, диск и балдж. Солнце расположено на расстоянии  $R_0 = 8.178$  кпк [33] от центра Галактики, скорость вращения диска здесь составляет  $V_0 = 232.8$  км/с [34]. В суммарный потенциал включены потенциалы основных составляющих Галактики: балджа и диска, описанного выражениями Миямото-Нагаи [35], и сферически-симметричного пространственного распределения плотности темной материи в гало, представленное Наварро-Френком-Уайтом [36].

Направления скоростей в пространстве рассчитаны так, чтобы компоненты скорости  $UVW$  в декартовой гелиоцентрической системе координат, сохраняя величину модуля вектора, по направлениям равномерно покрывали сферическую поверхность вокруг текущего положения Солнца. То есть, радианты скоростей точек распределены равномерно относительно Солнца, при этом величины модуля вектора скорости  $i$ -й точки равны  $V_{\text{spatial},i} = \sqrt{U_i^2 + V_i^2 + W_i^2}$  и остаются равными 2 км/с и 100 м/с для каждого облака соответственно.

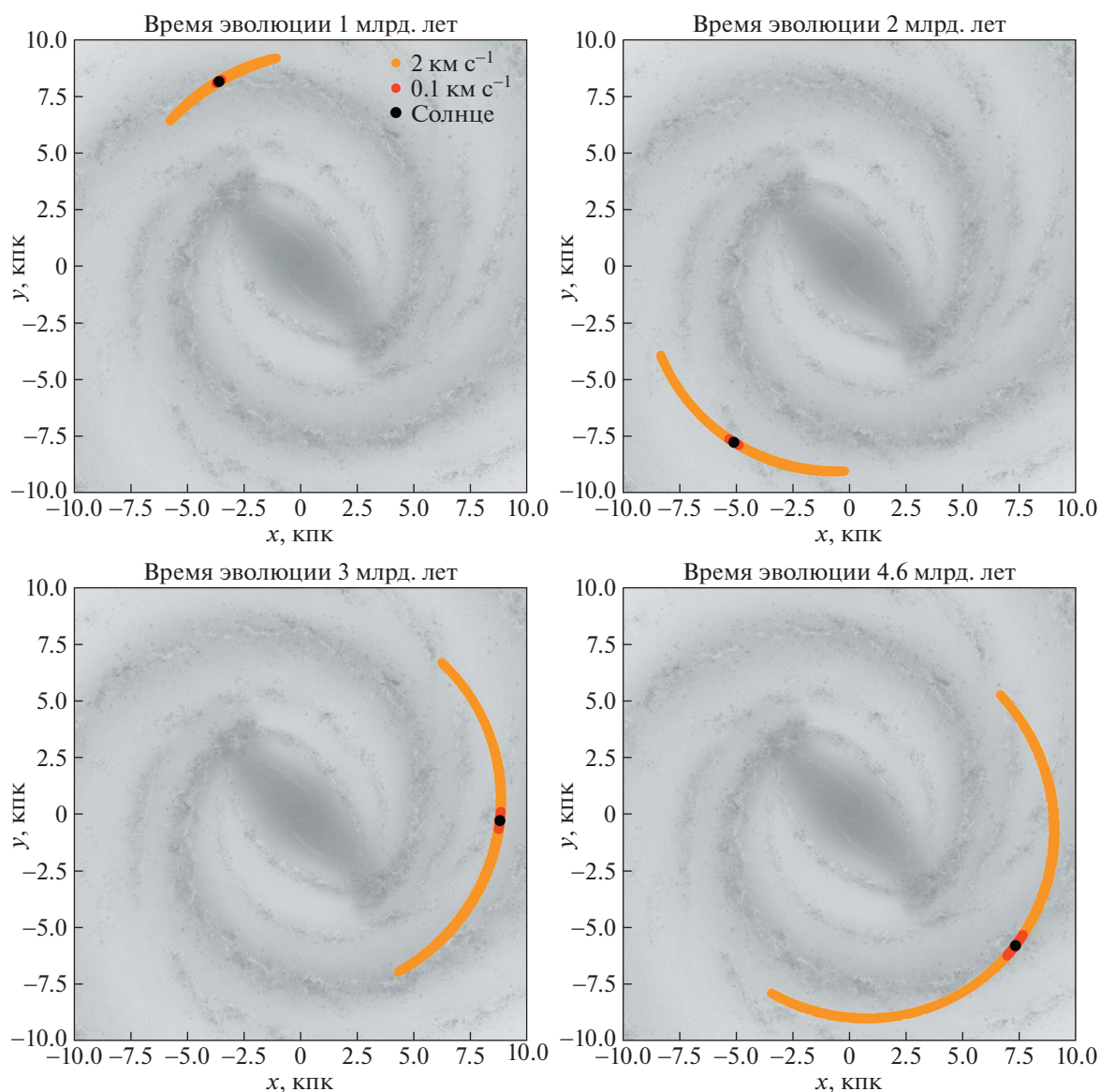
В данном случае используется прямоугольная галактическая гелиоцентрическая система координат, в которой ось  $X$  направлена к центру Галактики ( $l = 0^\circ, b = 0^\circ$ ), ось  $Y$  – в направлении вращения Галактики ( $l = 90^\circ, b = 0^\circ$ ), ось  $Z$  – на Северный полюс Галактики ( $b = 90^\circ$ ). Компоненты пространственной скорости  $U, V$  и  $W$  имеют эти же направления.

Задав начальные координаты и компоненты пространственной скорости каждой точки (табл. 1), мы рассмотрели эволюцию облака АКП,двигающегося в галактическом диске вокруг галактического центра (ГЦ). Необходимо указать, что точки распадающихся облаков в момент  $t = 0$  получают приращения скорости, описанные выше. В начальный момент времени ( $t = 0$ ) Солнце расположено на расстоянии  $R_0$  от ГЦ и на  $Z_0 = 20.8$  пк над галактической плоскостью. Последнее обусловлено тем, что положение Солнечной системы смещено к Северному полюсу Галактики на величину 20.8 пк.

#### 4.3. Результаты

Результаты расчетов эволюции облаков АКП представлены на рис. 1. Уточним, что, поскольку начальные условия подразумевают равномерное распределение по сфере направлений векторов пространственных скоростей АКП (представленных точками), то  $UVW$  каждого облака АКП задается уникальным набором векторов. Таким образом, каждое тело АКП, входящее в состав копия, имеет свою орбиту.

Расчеты, представленные на рис. 1, выполнены на интервале от 0 до 4.6 млрд лет. На четырех панелях рис. 1 показана последовательность развития формы облаков АКП со временем. Как видно на рис. 1, в процессе движения облака АКП постепенно растягиваются и превращаются в копия. Скорость растяжения копий вдоль орбиты составляет приблизительно 4 пк/млн лет для первого компонента (2 км/с) и, соответственно, 0.2 пк/млн лет для второго компонента (100 м/с). Как видно из рис. 1, незначительно расширяясь по радиусу, АКП облака превращаются в копия. Естественно, эффект растяжения значительно



**Рис. 1.** Эволюция рассмотренных облаков АКП со скоростями, равными 2 км/с и 100 м/с, желтый и красный цвет соответственно. Солнце обозначено черным кружком. Изображение галактики на фоне (статично) предоставлено библиотекой для python (<https://pypi.org/project/mw-plot/>).

для компонента с большей начальной скоростью. Солнце продолжает движение в центре копыя.

Система в целом совершает движение вокруг ГЦ, как указано выше, со скоростью  $\sim 230$  км/с. Период обращения Солнца (Солнечной системы) вокруг ГЦ (галактический год) составляет приблизительно 250 млн лет. За период интегрирования, равный 4.6 млрд лет, произошло приблизительно 20 оборотов Солнечной системы вокруг ГЦ, и ввиду недостаточно больших начальных скоростей АКП объектов копыя не смогли сомкнуться в кольцо. Однако для более старых звезд образование АКП колец неизбежно.

Отметим, что комета 2I/Борисова (скорость относительно Солнца в афелии составляет приблизительно 25 км/с) и астероид 1I/Оумуамуа (32 км/с) не могут быть членами копий звезд солнечного скопления ввиду больших скоростей относительно Солнца [37].

#### 4.4. Оценка размеров тел, входящих в состав копыя АКП

Размеры членов АКП копыя в рамках нашей модели ограничены снизу, поскольку они не тормозятся газовым компонентом Галактики. Следует отметить, что небольшие по размерам АКП

объекты могут существенно изменить скорость из-за торможения о газовый компонент Галактики. Оценим их размеры  $a$ . Размер малого тела можно представить как  $a = \rho w t$ . Используются следующие обозначения: при времени  $t$ , равном Хаббловскому  $T_H$ , плотность межзвездного газа  $\rho \cong 10^{-24}$  г/см<sup>3</sup>, скорость малого тела равна  $w = 3 \times 10^6$  см/с. Из последней формулы найдем, что  $a \approx 1$  см. Это означает, что АКП с размерами меньше  $\sim 1$  см за хаббловское время будут заторможены и выпадут из состава своих АКП облаков. АКП тела больших размеров сохранятся в копьях и кольцах в течение Хаббловского времени.

Изучение зон активного звездообразования в различных диапазонах спектра показало, что некоторые из молодых звезд действительно имеют пылевые хвосты, лишенные газового компонента [38]. Отсутствие газа в этих структурах свидетельствует об отсутствии участия газа в ускорении этой пыли. Естественно ожидать, что наблюдения демонстрируют нам только наиболее обильную часть твердотельного компонента, эффективно поглощающую свет родительской звезды. При “стандартном” спектре масс астрономических объектов в виде  $dN/dM \sim M^{-2}$  (Тутуков и Шустов [39]) наблюдаемые в ИК-диапазоне “пылевые хвосты” могут содержать и более крупные твердотельные АКП тела.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге численного моделирования эволюции АКП копий и колец звезд с массивными планетами приходим к следующему выводу. Практически все звезды, имеющие планеты, должны обладать АКП структурами в виде копий или даже колец (зависит от возраста звезды). Эти объекты достаточно распространены в Галактике, поскольку около трети звезд обладают планетами (Масевич и Тутуков [40]). В целом протяженные АКП спутники звезд и звездных скоплений образуют хорошо населенный АКП компонент Галактики, составленный из “нитей” АКП копий и колец. В частности, для Солнечной системы это означает, что ее граница расширяется до нескольких кпк за счет АКП копья (рис. 1). Превращение звезд с массами от  $1 M_\odot$  до  $8 M_\odot$  в вырожденный карлик не прерывает их связи со своими АКП копьями, поскольку образование планетарных туманностей не изменяет пространственную скорость звезд.

При анализе эволюции облака АКП необходимо оценить условия его сохранения со временем в звездной среде диска Галактики. На его сохранность оказывает решающее значение влияние условия сохранения связи АКП потока и звезды, его порождающей. Положим, что идентичность элементов АКП копья сохраняется, если возму-

щающие скорости при взаимодействии с пролетающей звездой с массой  $M$  на расстоянии  $R$  со скоростью  $V$  не превосходят величину исходной дисперсии скоростей АКП тел  $V \approx 1$  км/с [2]. Величина ускорения АКП тела от пролетающей звезды  $\sim GM/R^2$ , а время их эффективного взаимодействия  $\sim R/V$ . Итоговое приращение скорости  $\Delta V \approx GM/RV$ . Для звезд диска Галактики  $V \approx 30$  км/с [11]. Возьмем звезду типичной массы  $M \approx 0.3 M_\odot$ , плотность таких звезд в диске Галактики составляет  $\sim 0.1$  пк<sup>-3</sup> [21]. Простая оценка показывает, что  $R = 2 \times 10^{21} (\text{год}/t)^{1/2}$  см, а  $\Delta V = 10^3 (t/10^{10} \text{ лет})^{1/2}$  см/с. Эта оценка показывает, что возмущение АКП объектов пролетающей звездой, как правило, не превосходит их исходной дисперсии скоростей  $\sim 10^5$  см/с. Следовательно, тела, составляющие АКП копья, сохраняют свою “скоростную принадлежность” к копыю в пределах Хаббловского времени. Для придания  $\Delta V \approx 10^5$  см/с пролетающая звезда должна приблизиться к АКП объекту на расстояние  $\sim 10^{14}$  см, что очень редко, поэтому только малая часть АКП объектов будут удалены из копья или кольца.

Солнечная система испытала за последние несколько миллионов лет до 150 близких (сближение могло составить до 1–2 пк) прохождений звезд [41, 42]. Таким образом, вокруг него вполне могли образоваться копия АКП, сформированные как Юпитером, так и близкими прохождением звезд. При этом даже первое копые, как видим на рис. 1, еще не замкнулось и не превратилось в кольцо за время существования Солнца. Второе, как видим из рис. 1, расширяется намного медленней. Это исключает встречу Земли с любым малым телом, потерянным Солнечной системой ранее.

Поскольку заметная часть звезд обладает планетными системами, рассмотренная эволюция АКП компонента (копья и кольца) Солнечной системы характерна практически для всех одиночных звезд Галактики. Поэтому АКП компонент Галактики представляется сейчас некоей суммой АКП потоков, АКП копий и колец ее звезд. Поскольку нет оснований сомневаться в наличии планетных систем и у звезд балджа, последний также имеет свой сфероидальный компонент свободных АКП тел. То есть, Галактика наряду со звездными компонентами имеет соответствующие им АКП компоненты.

Интересен вопрос о роли двойных звезд в создании АКП компонента. Известно, что существуют планеты как около отдельных звезд двойной системы, так и около двойных звезд в целом [43]. В ускорении АКП компонентов в этом случае могут участвовать не только планеты-гиганты этих систем, но и сами звезды — члены двойных.

При этом последние будут ускорять АКП объекты до своих орбитальных скоростей  $\sim 100$  км/с [44]. То есть, тесные двойные звезды при ускорении своих АКП объектов будут создавать не только свои АКП копы, но и сфероидальный АКП компонент Галактики, поскольку орбитальные скорости их компонентов сравнимы с орбитальными скоростями звезд Галактики. Интересно, что галактики малых масс имеют малые скорости ухода, всего  $\sim$ несколько 10 км/с. Поэтому АКП тела, генерируемые тесными двойными звездами, могут покинуть родительские галактики, которые в итоге “вооружаются” своими АКП копиями.

### БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы программы расчетов орбит в Галактике, созданные за многие годы Бови [32]. Мы благодарны за полезные советы Дж. Бови из Департамента астрономии и астрофизики Университета Торонто, в частности, об использовании пакета *galpy*. Авторы благодарят рецензента за сделанные 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. В. Г. Сафронов, *Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет* (М., Наука, 1969).
2. А. В. Тутуков, *Астрон. журн.* **79**, 763 (2002).
3. В. S. Gaudi, M. D. Albrow, J. An, J.-P. Beaulieu, et al., *Astrophys. J.* **566**, 463 (2002).
4. A. Hales, S. Perez, C. Gonzalez-Ruilova, L. A. Cieza, et al., *Astrophys. J.* **900**, 7 (2020).
5. А. Тутуков, *Астрон. журн.* **64**, 1264 (1987).
6. А. Natta, *ASP Conf. Ser.* **324**, 20 (2004).
7. S. Muller, R. Heiled, and L. Mayer, *Astrophys. J.* **854**, 112 (2018).
8. А. Tutukov and M. Smirnov, *Sol. Sys. Res.* **38**, 279 (2004).
9. А. В. Тутуков, Г. Н. Дремова, В. В. Дремов, *Астрон. журн.* **97**, 939 (2020).
10. M. Faintich, *Interstellar gravitational perturbation a cometary orbit*, PhDТ, 2, 1971.
11. J. Correa-Otto, M. Calandra, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **490**, 2495 (2019).
12. G. Borisov, I. Ionov, O. Bryzgalov et al., *MPEC*, 51 (2013).
13. T. Hallatt and P. Weigert, *Bulletin American Astron. Soc.* **52**, No. 4, id. 2020n4i201p03 (2020).
14. P. Mróz, R. Poleski, A. Gould, A. Udalski, et al., *Astrophys. J. Lett.* **903**, L11 (2020).
15. M. Froncisz, P. Brown, R. J. Weryk, *Planet. Space Sci.* **190**, 104980 (2020).
16. A. Bajkova and V. Bobylev, preprint *astro-ph/2008.13624* (2020).
17. J. Oort, *BAIN* **11**, 91 (1950).
18. J. Oort, *Observatory* **71**, 129 (1951).
19. E. Ashton, M. Beaudoin, and B. Gladman, preprint *astro-ph/2009.03382* (2020).
20. B. Boe, R. Jedicke, K. J. Meech, P. Wiegert, et al., *Icarus* **333**, 252 (2019).
21. A. N. Cox, *Allen's astrophysical quantities* (New York: AIP Press, Springer, 2000).
22. S. Röser, E. Schilbach, and B. Goldman, *Astron. and Astrophys.* **621**, L2 (2019).
23. S. Meingast and J. Alves, *Astron. and Astrophys.* **621**, L3 (2019).
24. N. Lodieu, R. L. Smart, A. Pérez-Garrido, and R. A. Silvotti, *Astron. and Astrophys.* **623**, A35 (2019).
25. A. E. Piskunov, N. V. Kharchenko, and S. Röser, *Astron. and Astrophys.* **445**, 545 (2006).
26. S. V. Vereshchagin and E. S. Postnikova, *Selected Papers of the XIX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains (DAMDID/RCDL 2017) Moscow, Russia, October 9-13, 2017*. Eds. L. Kalinichenko, Y. Manolopoulos, N. Skvortsov, V. Sukhomlin *CEUR Workshop Proc.* **2022**, 30 (2017).
27. А. В. Тутуков, *Astron. and Astrophys.* **70**, 57 (1978).
28. T. M. Eubanks, *Astrophys. J. Lett.* **874**, L11 (2019).
29. E. Gaidos, J. Williams, and A. Kraus, *Research Not. American Astron. Soc.* **1**, 13, (2017).
30. F. Feng and H. R. A. Jones, *Astrophys. J. Lett.* **852**, L27 (2018).
31. D. P. Sariya, I.-G. Jiang, M. D. Sizova, E. S. Postnikova, et al., *Astron. J.*, in press (2021).
32. J. Bovy, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **216**, 2 (2015).
33. P. J. McMillan, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **465**, 1 (2017).
34. Gravity Collaboration: R. Abuter, A. Amorim, M. Bauböck, J. P. Berger, et al., *Astron. and Astrophys.* **625**, L10 (2019).
35. M. Miyamoto and R. Nagai, *Publ. Astron. Soc. Jap.* **27**, 533 (1975).
36. J. Navarro, C. Frenk, and S. White, *Astrophys. J.* **462**, 563 (1996).
37. А. В. Тутуков, М. Д. Сизова, С. В. Верещагин, *Астрон. журн.* **97**, 820 (2020).
38. G. Stringfellow, J. Bally, L. Allen, *AAS*, 21115404S (2007).
39. А. В. Тутуков, Б. М. Шустов, *Астрофизика*, в печати (2020).
40. А. Г. Масевич, А. В. Тутуков, *Эволюция звезд: теория и наблюдения* (М. Наука, 1988).
41. S. Torres, M. X. Cai, A. G. A. Brown, and S. P. Zwart, *Astron. and Astrophys.* **629**, A139, (2019).
42. R. Darma, W. Hidayat and M. I. Arifyanto, *J. Phys. Conf. Ser.* **1245**, 012028 (2019).
43. D. Bennett, S. Rhie, A. Udalski, A. Gould, et al. *Astron. J.* **152**, 125 (2016).
44. G. Dryomova, V. Dryomov, and A. Tutukov, *Astron. Rep.* **62**, 97 (2018).