

УДК 523.4/523.6

ГЕНЕРАЦИЯ СВОБОДНЫХ КОМЕТ И ПЛАНЕТ ПЛАНЕТНЫМИ СИСТЕМАМИ

© 2020 г. А. В. Тутуков^{1,*}, Г. Н. Дремова^{2,**}, В. В. Дремов²

¹ Институт астрономии РАН, Москва, Россия

² Российский федеральный ядерный центр, Снежинск, Россия

*E-mail: atutukov@inasan.ru

**E-mail: G.N.Dryomova@mail.ru

Поступила в редакцию 01.05.2020 г.

После доработки 03.06.2020 г.

Принята к публикации 30.06.2020 г.

Представлена 3D-численная модель эволюции астероидно-кометно-планетного (АКП) компонента Солнечной системы под гравитационным влиянием Юпитера. Продемонстрировано возникновение пояса Койпера Солнца, облака Оорта Солнца и Юпитера, а также возникновение внесолнечных АКП структур, таких как АКП “копье”, которое, удлиняясь со временем, превращается в АКП “кольцо” вдоль орбиты Солнца, обращающегося вокруг центра Галактики. При обобщении на случай Галактики сделан вывод, что заметная часть АКП объектов оказывается не связанной с родительскими звездами и образует поле свободных астероидов, комет и планет Галактики. Галактики малых масс ($M < 10^8 M_{\odot}$) теряют часть свободного АКП материала в межгалактическое пространство своих скоплений, обретая галактические АКП “копья”.

DOI: 10.31857/S0004629920110092

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение образования и эволюции планетных систем — одно из наиболее популярных направлений современной астрофизики — имеет глубокие исторические корни [1–4]. Анализ наблюдений показал, что в силу большого углового момента исходных газопылевых облаков практически все образующиеся звезды оказываются двойными или системами большей кратности [5]. Если же начальный угловой момент облака оказывается слишком большим для одиночной звезды, но недостаточным для образования даже самой тесной молодой двойной системы, то около звезды образуется в итоге планетная система [6]. Полученная в результате такого рассмотрения оценка, что около трети звезд могут обладать планетными системами, была позднее поддержана данными наблюдений затмений методом транзитной фотометрии космическим аппаратом Кеплер [7, 8]. Действительно, угловые моменты найденных планет лежат в указанном интервале [8]. Интересно, что из почти 4100 известных планет около 100 были найдены в кратных звездных системах [9]. Следовательно, наличие спутника у звезды, по-видимому, не всегда исчерпывает угловой момент двойной системы, хотя образование планет около тесных систем вероятно подавлено [10]. В целом

можно заключить, что заметная часть звезд имеют планетные системы.

Многие из обнаруженных на сегодня планетных систем имеют по несколько (до семи) планет. Распределение планет около звезд по большой полуоси орбиты a регулируется условиями стабильности орбит и условиями образования планет и может быть представлено соотношением: $dN = (3 - 4)d \log a$ [6, 11–14]. Неопределенность численного коэффициента остается в пределах единицы. Интересно, что закон Тициуса–Боде: $a/a.e. = 0.4 + 2^n$, опирается, фактически, на ту же логарифмическую зависимость. Несмотря на аналогичность законов распределений компонентов двойных звезд ($dN = 0.2d \log a$ [5]) и планет по большим полуосям a природа этих законов, вероятно, различна. Распределение компонентов двойных отражает начальное распределение газопылевых облаков по угловым моментам, а логарифмический закон распределения планет — вероятное следствие условия устойчивости их почти круговых орбит. Распределение планет по массам пока, ввиду очевидного эффекта селекции, слабо определено и может быть представлено в виде: $dN \sim M^{-3/2}$ [15, 16].

Ближайшие к своим звездам наблюдаемые планеты близки к заполнению своих полостей

Роша [17]. Не исключено, что они близки к их поглощению родительскими звездами, будучи “сброшенными” с высоких, генетически определенных орбит приливными взаимодействиями с другими планетами своих систем. Внешняя граница планетной части систем (большая полуось около 40 а.е.) задается, вероятно, условием их столкновительной аккумуляции [6]. Наблюдательное обнаружение периферийных планет, очевидно, осложнено эффектами наблюдательной селекции, хотя не исключено, что гравитационное микролинзирование, сделавшее доступными несколько планет на расстоянии около 10 а.е. [18], позволит со временем уточнить положение внешней границы планетной части планетных систем.

Давно стало ясно, что процесс образования планет в околозвездных дисках сопровождается гравитационным рассеянием части вещества этого диска, к которому относятся астероиды, кометы и планеты (АКП). Последние годы стали особенно продуктивными в поиске и обнаружении межзвездных АКП объектов. Открытие астероида Оумуамуа [19], кометы Borisov [20], нескольких околозвездных свободных планет [21] и коричневых карликов [22] методом микролинзирования поставило задачу об изучении механизма удаления, испарения околозвездного АКП материала в ходе образования и эволюции планетных систем. Здесь важно отметить, что образование больших твердых тел как в плотных гигантских молекулярных облаках, так и в плотных оболочках истекающих красных сверхгигантов представляется невозможным. Размер пылинок, растущих за счет тепловой аккумуляции подходящих атомов и молекул газа: $r = \sqrt{Nt} = 10^{-10} N_4 T^{1/2} t$ (в сантиметрах), где T – температура, N_4 – плотность газа в единицах 10^4 атомов водорода в кубическом сантиметре и t – время аккумуляции в годах. Этот предел, вероятно, не превосходит величину порядка сантиметра в двух указанных выше случаях.

Для анализа механизма гравитационного ускорения части АКП компонента формирующихся планетных систем и построения сценария эволюции свободного АКП материала в Галактике рассмотрим формирование компонентов планетных систем на примере Солнечной системы. Далее оценим условие ускорения АКП массивными планетами и формирование внесолнечных кометно-планетных “копий” и галактических АКП “колец” Солнца и других звезд.

2. СТРУКТУРА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Солнечная система остается пока наиболее хорошо исследованной планетной системой [1–4, 23], поэтому анализ ее свойств, включая изучение

характеристик развитых систем спутников больших планет, представляет собой наиболее продуктивный инструмент для понимания условий образования и эволюции планетных систем звезд нашей Галактики. Рассмотрим структуру Солнечной системы (рис. 1). В результате избытка углового момента протосолнечного молекулярного облака молодое Солнце оказалось окруженным большим газопылевым диском с размером порядка 100 а.е. Большое количество таких дисков молодых звезд было на сегодня обнаружено около близких звезд. Найдено, что около 20% звезд имеют их [24]. Столкновительная аккумуляция планет начинается вблизи границы испарения пыли около центральной звезды, и со временем ее фронт продвигается наружу. Положение фронта аккумуляции в рамках этой модели определяется простым условием [5, 6]:

$$R \text{ [a.e.]} = 30(M/M_J)^{4/21} (M/M_\odot)^{1/7} t_{10}^{2/7}, \quad (1)$$

где M_J – масса Юпитера, M – масса звезды главной последовательности, M_\odot – масса Солнца, t_{10} – возраст звезды в единицах 10^{10} лет. Сейчас эта граница в Солнечной системе находится на уровне орбиты Нептуна. Звезды с массами, большими $10 M_\odot$, вероятно, не успевают сформировать планеты земного типа за счет аккумуляции ввиду короткого времени их жизни. Действительно, наблюдения планетной системы около PDS 70 подтверждают отсутствие в ней планет при $a > 30$ а.е., но при этом обнаруживают пылевые кольца при $a = 60$ и 74 а.е. [25].

Исследование пояса Койпера Солнца показало, что он является широким (40–60 а.е.) и толстым (до 20 а.е.) астероидно-кометным диском [26]. Характерные яркости, найденные для 15601 известных астероидов пояса Койпера, соответствуют 19^m [24]. Наблюдения обнаружили аналогичные пояса около 20% молодых звезд [24]. Их размеры ~ 100 а.е., характерные скорости аккреции газа (10^{-7} – 10^{-8}) $M_\odot/\text{год}$ [27, 28]. Изображения пылевых дисков с “пустотами” у близких звезд получены с хорошим разрешением [29], наглядно демонстрируя богатую структуру протопланетных дисков на стадии аккумуляции планет в их внутренних областях. Следует отметить, что при характерных угловых моментах протопланетных молекулярных облаков 6×10^{17} см²/с [5, 6] и размерах протопланетных дисков 100 а.е. [24] типичные массы последних должны быть около 0.01 массы Солнца. Поэтому ясно, что процесс образования планет в околозвездном диске сопровождается заметной диссипацией его газового компонента.

Естественно ожидать, что все астероиды Солнечной системы вращаются в том же направле-

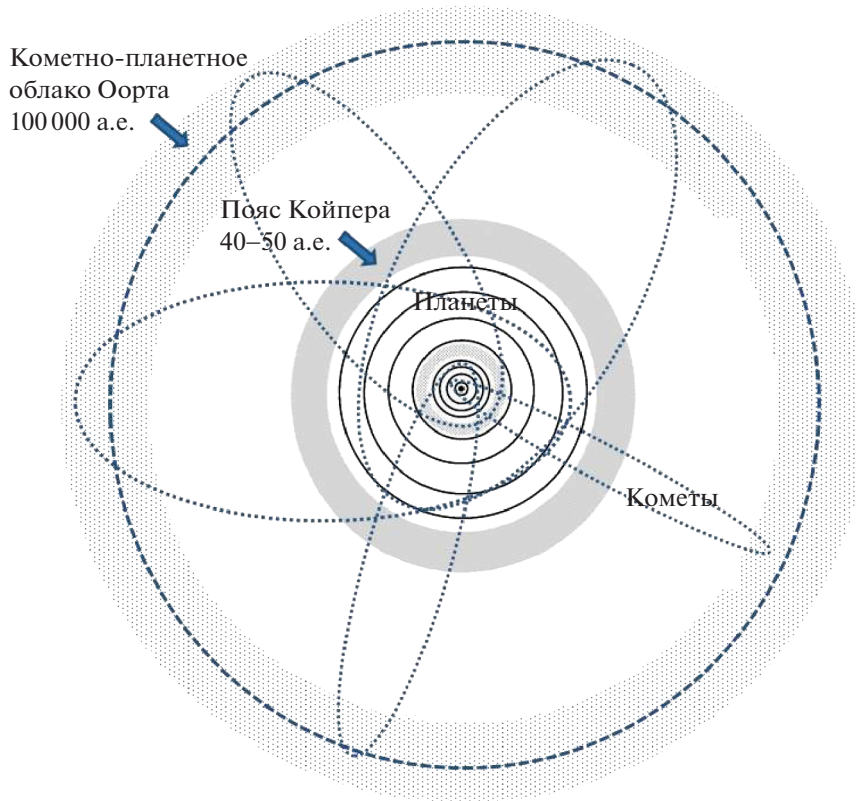


Рис. 1. Схема Солнечной системы.

нии, что и большие планеты. Однако обнаружение астероида VZ 509 показало, что это не так [30]. Ретроградное орбитальное вращение этого астероида наглядно демонстрирует роль гравитационного рассеяния, сопровождавшего “сборку” больших планет. Кроме того, ненулевые эксцентриситеты (до 0.05) и углы наклона орбит (до 2 градусов) планет-гигантов Солнечной системы также являются свидетельствами того, что в процессе образования они испытывали столкновения (близкие прохождения) с планетами-предшественницами, масса которых была сравнима с конечной массой этих планет. Важно, что ненулевые эксцентриситеты даже самых близких (<1 а.е.) к своим звездам экзопланет являются свидетельством активной динамической эволюции допланетных массивных объектов в процессе их формирования и взаимодействия [31]. Таким образом, близкие прохождения наравне с вековой эволюцией оказывали значительное влияние на орбиты планет.

Облако Оорта [32, 33] (рис. 1) рассматривается в первую очередь как место пребывания долгопериодических комет, ускоренных в процессе образования больших планет их гравитацией до скорости порядка параболической. Основная часть этих комет ($\sim 10^{12}$) находится в сферическом слое

с радиусами 10^4 – 10^5 а.е. [34, 35]. Эксцентриситеты их орбит 0.9–0.999, а перигелийные расстояния 0.5–10 а.е. [35]. Функция масс комет пока недостаточно изучена. В интервале размеров 1–10 км она может быть представлена функцией R^{-4} [36] или при одинаковой их плотности универсальным спектром M^{-2} [37]. Оценка общей массы комет с размером больше одного километра остается пока неуверенной, составляя несколько десятков масс Земли. Положения апогелиев комет на небесной сфере практически равномерно распределены около Солнца, при этом почти половина комет движется вокруг последнего в направлении, обратном вращению планет и самого Солнца.

Численное моделирование показало определяющую роль планет-гигантов в образовании кометного облака Оорта [38, 39]. Возможно, что в процессе формирования облака Оорта массивными планетами с массой порядка массы Юпитера его членами могут оказаться и планеты с массой порядка массы Земли. На настоящий момент по данным миссии WISE [40] в Солнечной системе отсутствуют планетные тела с массой больше массы Сатурна на расстоянии ближе 10000 а.е. и с массой Юпитера на расстоянии ближе 26000 а.е.

Что касается планет земной группы, то вопрос открыт. Оценим их видимую яркость M_v , полагая альbedo равным 0.04 [41]: $M_v = -3^m - 5 \log R_4 + 10 \log(a/a.e.)$, где R_4 – радиус планеты в единицах 10^4 км, a – расстояние планеты от Солнца. Ясно, что уже при $a > 200$ а.е. планета земного типа окажется необнаружимой в оптике. Возможно, детальный анализ достаточно большой коллекции кометных орбит облака Оорта поможет обнаружить следы присутствия массивных планет в нем [42]. Потенциальную роль радио- и инфракрасной астрономии в поиске массивных планет облака Оорта пока сложно оценить.

3. ПОТЕРЯ АКП КОМПОНЕНТА ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ПЛАНЕТНОЙ СИСТЕМЫ

Изучение стабильности планетных систем – предмет постоянного внимания [3, 4, 23]. Из размеров сферы Хилла $R = 0.4a(m/M)^{1/3}$ следует, что при $m = 0.001M$ орбиты соседних планет в пределах $da/a = 0.08$ будут неустойчивы, где a – большая полуось орбиты, da – разница больших полуосей соседних планет. Количественно близкое условие устойчивости орбит для планет с равными массами m было найдено в работе [43]: $da/a = 1.5(m/M)^{2/7}$. Из наблюдаемого распределения планет по большой полуоси орбит $dN = 3d \log a$ [6, 11–14] следует, что характерное расстояние между соседними планетами с устойчивыми орбитами $d \log a = 0.25$. Полагая, что протопланетный материал равномерно распределен по большой полуоси (в логарифмических единицах), можно оценить, что около 10–20% АКП объектов оказываются в области неустойчивых орбит, а значит могут быть удалены из формирующейся планетной системы. При этом часть АКП объектов окажется в облаке Оорта, а часть будет потеряна звездой и поступит в межзвездное поле Галактики. Конечно, такой подход, следует признать, количественно довольно ненадежный, но следует иметь в виду, что и любой более строгий подход будет обременен многими неопределенными параметрами, и результат окажется целиком зависящим от них. Существующие численные модели исследования стабильности многопланетных систем показывают возможность потери молодой звездой до 20% молодых планет в процессе установления устойчивости планетных орбит [44].

В итоге стоит признать, что процесс аккумуляции планет связан с потерей части АКП объектов и появлением общегалактического поля свободных комет и планет. Поиск таких объектов сейчас превращается в одно из наиболее популярных и

активно развивающихся направлений современной астрофизики. Кроме того, в ходе взаимодействия планет на неустойчивых орбитах некоторые планеты получают необычные орбиты. Например, планета WASP-17b, “горячий юпитер”, находится на ретроградной орбите с периодом 3.7 дня [45]. Или другой пример, планета MASCARA-4b/bRing-1b с массой около трех масс Юпитера совершает ретроградное орбитальное движение с периодом всего 2.8 дня вокруг центральной звезды A3V HD 85628 [46].

Орбитальное единообразие в нашей Солнечной системе доказывает ее образование из одного газопылевого облака, при этом можно найти немало свидетельств роли столкновений и гравитационных сближений планет-предшественников при сборке Солнечной системы. Например, Венера вращается вокруг своей оси в направлении, противоположном направлению всех планет. Уран, третья по массе планета, лежит в плоскости своей орбиты, его ось собственного вращения параллельна орбитальной плоскости. Тритон, крупнейший из спутников Нептуна, сравнимый по размерам с Луной, вращается по орбите в обратном направлении в отличие от других крупных спутников планет.

Анализ эволюции протопланетных дисков около звезд предлагает несколько возможностей для появления массивных членов облака Оорта и свободных межзвездных АКП объектов. Основная их часть возникает в процессе формирования планет-гигантов. Кроме того, объекты облака Оорта могут покидать его в результате рассеяния последнего пролетающими звездами фона [47, 48], пополняя общегалактическую АКП популяцию. Оценка числа таких пролетов за время жизни Солнца $\sim 10^4$ [34].

Рассмотрим судьбу АКП объектов, оказавшихся вне своих планетных систем. Их “свободное” движение в Галактике, сохраняя параметры орбиты родительской звезды, будет возмущаться только столкновениями с соседними звездами в пределах приливного радиуса R ,

$$R [\text{см}] = \frac{GM}{v^2} = 10^{14} \frac{M}{M_\odot} \frac{v}{10^6}, \quad (2)$$

и гравитационным торможением о плотный газ гигантских молекулярных облаков Галактики и звездный компонент ее ядра в пределах того же приливного радиуса. Здесь M – масса звезды, v – относительная скорость движения АКП объекта и звезды. В итоге такого взаимодействия звезда через 10^8 лет окажется “вооруженной” сначала кометным “копьем” [36], которое со временем превратится в АКП “кольцо” вокруг центра Галактики (рис. 2). Поскольку процесс гравитационной аккумуляции планет во внешней части по-

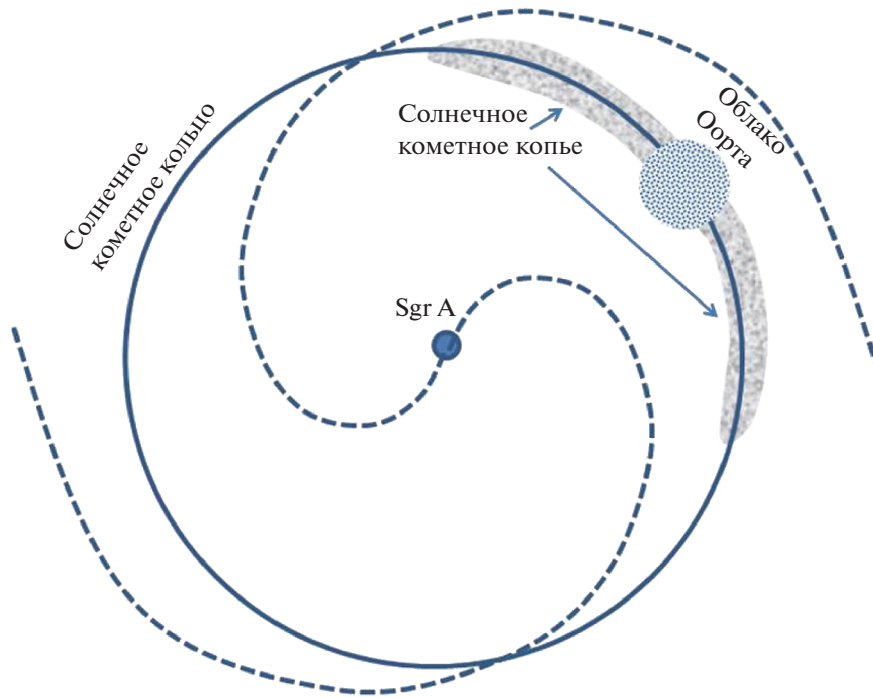


Рис. 2. Солнечное АКП “копьё” и АКП “кольцо” в Галактике.

яса Койпера продолжается и после превращения родительской звезды в вырожденный карлик [5], генерация свободных АКП объектов не прекращается с образованием последнего. Возникновение сравнительно тонкого “копья”, а затем и “кольца”, предопределяется сравнительно малой пространственной скоростью АКП объектов по сравнению с орбитальной скоростью Солнца в Галактике.

Оценим условие потери АКП объекта при гравитационном взаимодействии его с планетой массы m и радиусом r , находящейся на орбите с большой полуосью a около звезды с массой M . Ускорение, действующее на АКП объект, равно Gm/r^2 , а изменение скорости – $kGm/(rv)$, где k – константа порядка единицы, G – гравитационная постоянная, $v = \sqrt{Gm/r}$. Полагая далее параболическую скорость АКП объекта на уровне орбиты планеты-ускорителя равной $\sqrt{GM/a}$, найдем, что для превышения приращения скорости этого объекта скорости освобождения необходимо выполнение простого условия:

$$\frac{m}{r} > \frac{M}{a k^2}. \quad (3)$$

Конечно, величина константы k зависит от геометрии условий столкновения АКП объекта и планеты, и она может быть оценена только численным моделированием этого процесса. Полагая ее порядка единицы, можно считать, что все

планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) оказываются среди потенциальных ускорителей АКП объектов Солнечной системы. АКП объекты, не достигшие в процессе ускорения параболической скорости, становятся членами облака Оорта Солнца. Аналогичным образом возникают “облака Оорта” около других долгоживущих звезд Галактики. Сейчас интересно, что членами облака Оорта нашего Солнца могут оказаться и планеты с массой, сравнимой с массой Земли. Отметим, что массы больших спутников планет-гигантов (Ганимеда, Титана, Тритона) сравнимы с массой Марса, и их аналоги могут сейчас либо находиться в облаке Оорта, либо быть выброшены из Солнечной системы в поле свободных планет.

Фронт аккумуляционной “сборки” планет со временем сдвигается от Солнца наружу, к внешней границе протопланетного диска, а его положение в рамках этой модели определяется уравнением (1). Из него следует, что уже через 2×10^7 лет он достигает орбиты Юпитера, обозначая начало “испарения” части протопланетного материала, ухода части АКП объектов из Солнечной системы. Со временем к этому процессу последовательно подключаются и другие, более далекие Солнечные планеты-гиганты. В результате около Солнца появилось сначала кометное “копье”, а затем и кометное “кольцо” вокруг центра Галактики (рис. 2). Условие появления последнего у звезд с массой, меньшей солнечной за Хабб-

ловское время: относительная скорость потерянного АКП материала должна быть больше 3 км/с. Отметим, что многие экзопланетные системы имеют массивные планеты много ближе, чем Юпитер в Солнечной системе [7–9], поэтому процесс диссипации околозвездного АКП материала может фактически идти одновременно с процессом образования массивных планет и, вероятно, самих звезд. В результате наша Галактика оказывается наполненной АКП материалом, “организованным” в звездные АКП “копья” и “кольца”. Существующая оценка общей относительной массы астероидов в Галактике (0.003) опирается пока, по сути, на оценку обилия пылеобразующих элементов в газовом компоненте и относительной массы последнего в Галактике [49].

Обнаружение межзвездного астероида, кометы и околоквазарных свободных планет [19–22] подтверждает наличие АКП компонента, вероятно, у всех галактик. Кроме того, условие (3) позволяет при известной оценке связи массы галактики с ее радиусом $M = 0.2R^2$ [50] допустить, что АКП объекты планетных систем из галактик с массой, меньшей $10^8 - 10^9 M_{\odot}$, могут покидать не только свои планетные системы, но и свои галактики. То есть такие галактики, как и звезды, получают АКП “копья” и “кольца”. В итоге в скоплениях галактик должен существовать довольно обильный АКП компонент, учитывая вклад галактик указанной массы в общую массу скопления галактик.

Естественно, что обсуждаемый процесс диссипации АКП материала звезд с планетами приводит к появлению в облаке Оорта и в межзвездной среде всех “участников” процесса планетообразования, от пыли до планет. Тщательное исследование орбит земных метеоров позволило установить, что до 30% последних имеют ретроградные относительно Солнечной системы орбиты [51] и гиперболические для уровня орбиты Земли скорости [52]. Если ретроградные орбиты метеоров могут быть объяснены их принадлежностью к облаку Оорта, то гиперболические орбиты указывают на их принадлежность к общему АКП полю нашей Галактики. Спектр масс межзвездных пылинок и астероидов с размерами $10^{-5} - 10^3$ см в предположении, что их массы пропорциональны кубу размера, может быть представлен функцией $M^{-1.8}$ [53, 54]. Следует иметь в виду, что за Хаббловское время для объектов указанного выше размера спектр масс может быть заметно искажен по сравнению с исходным из-за торможения о межзвездный газ Галактики.

Пример хаотического гравитационного рассеяния астероидов и комет демонстрирует система известных спутников Юпитера [55]. Если боль-

шие спутники Юпитера вращаются по орбите в том же направлении, что и сам Юпитер, и Солнце, то несколько малых и далеких спутников вращаются по заметно эксцентричным орбитам в обратном направлении. Фактически они имитируют облако Оорта Солнца в этом случае уже у Юпитера. Обратное вращение имеет и один из спутников Нептуна. Причиной появления “облаков Оорта” указанных планет послужило взаимодействие их астероидно-кометного материала с большими спутниками этих планет при их формировании. Таким образом, возникновение системы спутников больших планет повторяет до некоторой степени формирование Солнечной системы.

4. ПОИСК МЕЖЗВЕЗДНЫХ ПЛАНЕТ

Обнаружение двух межзвездных объектов, астероида Oumuatua [19] и кометы Борисова [20], поддерживает уверенность в существовании межзвездных планет, число которых в Галактике может доходить до $10^{11} - 10^{12}$ [56, 57]. Кроме свободных планет, целями поиска объектов планетных масс в межзвездном пространстве являются коричневые карлики [58, 59] и, возможно, черные дыры планетных масс. Последние могут быть потенциальными носителями гравитирующего “темного вещества” Галактики. Массы коричневых карликов 10–70 масс Юпитера при радиусах около $0.1 R_{\odot}$ [58]. Их число может быть сравнимо с числом массивных планет около звезд [60]. Особенно велико число потенциальных черных дыр планетных масс (10^{14}) при их суммарной массе, сравнимой с массой звезд.

Поиск и обнаружение планет и других темных тел планетных масс в межзвездном пространстве Галактики на первый взгляд кажется делом безнадежным для стандартных астрономических методов их поиска, таких как оптический метод Доплера и транзитная фотометрия источников света [6]. Два новых метода могут оказаться перспективными для оценки числа темных объектов планетных масс в нашей и других галактиках.

Первый связан с долговременной фотометрией далеких ярких объектов — звезд и сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик — с целью поиска событий микролинзирования [61, 62]. При этом микролинзирование способно обнаружить одиночные тела с массами до массы планет Нептуна [63] и даже Меркурия [64]. Предварительная оценка числа свободных АКП объектов планетных масс методом микролинзирования — одна планета на звезду [56]. Успешное накопление 8000 событий микролинзирования позволило дать верхнюю оценку на число потенциальных носителей скрытой массы в Галактике [65]. Оди-

ночная планета с массой около пяти масс Юпитера [66] и две свободные планеты с юпитерианскими массами [67] показывают эффективность метода микролинзирования, с одной стороны, а с другой стороны, подтверждают факт присутствия популяции свободных планет в нашей и других галактиках. Таким образом, сам факт существования межзвездных свободных планет кажется сейчас установленным, поскольку анализ показывает, что микролинза соседней звезды была бы зарегистрирована [63]. Интересно, что квазары оказались весьма эффективным инструментом для обнаружения свободных планет в их галактиках, что позволило ограничить суммарную относительную массу планет с массой от $10^{-8} M_{\odot}$ до $10^{-3} M_{\odot}$ величиной 10^{-4} [21].

Другая, пока потенциальная возможность поиска темных тел планетных масс открывается при долговременном анализе эволюции периодов одиночных миллисекундных пульсаров [68]. При гравитационном взаимодействии с пролетающим ближе одной астрономической единицы от них телом с массой, большей $10^{-10} M_{\odot}$, изменение регистрируемого периода вращения в силу изменения радиальной скорости пульсара и эффекта Доплера может быть зарегистрировано. Хотя очевидно, что столь близкие прохождения свободных планет и даже столь массивных астероидов очень редки. На практике этот метод пока не использовался.

Как уже отмечалось, в процессе формирования облака Оорта его членами могут оказаться не только кометы и астероиды, но и планеты. Поиск возможных массивных планет с массой, сравнимой с массой Земли в солнечном облаке Оорта, как показывает его детальное обсуждение [69], представляется пока сложной задачей. Оптическая регистрация планет земных размеров, расположенных далее 200 а.е., как отмечалось выше, невозможна в силу их оптической слабости. Одним из возможных направлений поиска может служить изучение возможного приливного искажения формы облака Оорта массивной планетой [42]. При малой скорости движения далеких объектов облака Оорта радиус их гравитационного влияния может оказаться достаточным для искажения предполагаемой сфероидальной исходной формы облака [70]. Однако в пределах существующей на сегодня статистики орбит комет распределение апогелиев орбит комет довольно однородно [35]. Не исключено, что привлечение орбит земных метеоров может оказаться полезным для изучения степени симметрии облака Оорта. Но следует иметь в виду, что существуют и другие пути искажения сфероидальной формы облака Оорта, например, прохождения соседних звезд

или приливное влияние потенциала Галактики [71].

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Образование планетной системы — очень сложный и долгий эволюционный процесс, начальные условия которому задают состояние и исходные параметры газопылевого облака, из которого формируется протопланетный диск. Важно отметить, что сборка планетной системы продолжается на всей ее эволюционной шкале. Другое дело, что фронт аккумуляции строительных пылинок сдвигается все дальше от родительской звезды, попадая в зону медленных движений, не столь эффективных для дальнейшей сборки планетных тел.

Прямых наблюдательных данных, как именно образуются планеты, у нас нет, но есть хороший пример готовой планетной системы — Солнечной системы. Для нее достаточно надежно установлены орбитальные параметры 8 планет, главного астероидного пояса и пояса Койпера, образованных той частью неизрасходованного на строительство планет космического материала, который мы называем астероидами, кометами и малыми планетными телами (АКП объекты). Другая часть неизрасходованного материала в ходе гравитационного планетного рассеяния и перераспределения углового момента от внутренних частей диска к его внешним частям может сформировать облако Оорта или вовсе оказаться не связанной с Солнечной системой и со временем покинуть ее пределы.

Первые попытки прямого численного моделирования образования облака Оорта были приняты в работах Дункана и др. [72] и Донеса и др. [73] с количеством АКП объектов порядка 1000 с начальным распределением по большим полуосям в диапазоне 4–40 а.е., и эволюция такой АКП системы прослеживалась до 4 млрд. лет. В настоящей же работе основное внимание уделяется начальной стадии “разогрева” системы АКП за счет взаимодействия с планетами-гигантами, что должно сопровождаться, в частности, освобождением части АКП объектов. Наша задача — смоделировать начальную стадию хаотизации орбит АКП объектов и процесса их освобождения.

5.1. Постановка задачи

Мы рассматриваем упрощенную модель Солнечной системы, задавая Солнце и самую массивную планету из планет-гигантов — Юпитер в соответствии с их реальным расположением, а также 10^4 частиц, имитирующих АКП объекты,

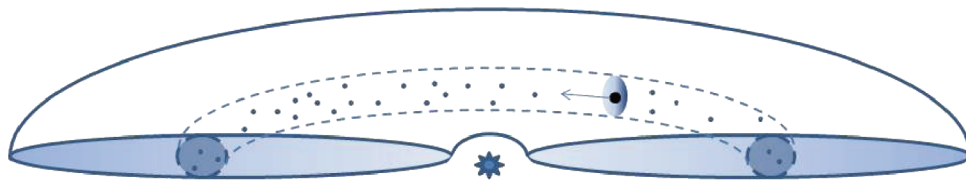


Рис. 3. Схема протопланетного диска с выделенной областью моделирования. Штриховой линией показан тор с радиусом сечения h , заполненный малыми планетными телами, или АКП объектами, которые изображены точками; черный диск со стрелкой обозначает Юпитер, звездочка в центре – Солнце.

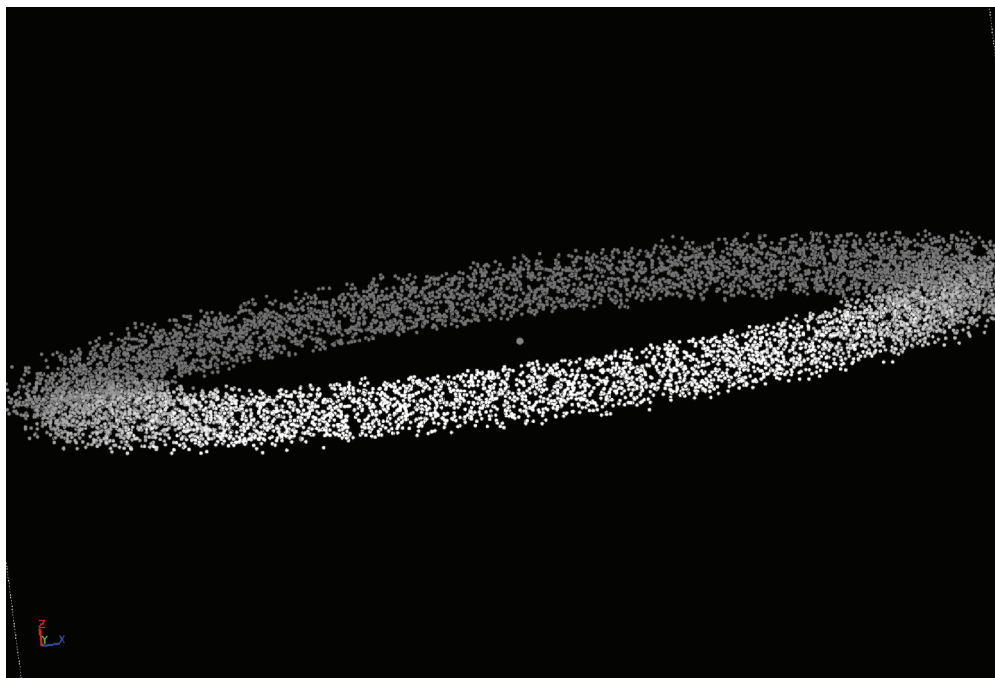


Рис. 4. Начальная орбитальная конфигурация тора малых планетных тел в гравитационном поле системы Солнце–Юпитер.

однородно распределенные в торе с диаметром сечения $\sim 2h$ (рис. 3).

Величина h определяется из равенства гравитационных энергий взаимодействия пробного тела (АКП объекта) с Юпитером и с Солнцем, т.е. $h = r_J M_J / (M_\odot + M_J) \approx 0.01$ а.е., где r_J – радиус орбиты Юпитера, M_\odot и M_J – массы Солнца и Юпитера соответственно. АКП объекты задаются точечными пробными телами одинаковой массы, много меньшей массы Юпитера (например, $m_p = 1.9 \times 10^{15}$ кг) на круговых орбитах в плоскости (x, y) с радиусами, заключенными в интервале $[r_J - h; r_J + h]$.

Чтобы уйти от плоского начального пространственного распределения АКП объектов, на их движение, имеющее кеплеровский характер, накладываются дополнительные возмущения. Это

эквивалентно заданию начального распределения скоростей с учетом дисперсии скоростей в 3D, которая не превышает 10% от кеплеровского значения орбитальной скорости планеты. Таким образом, мы получаем тор, показанный на рис. 4.

Орбитальная эволюция заданной системы рассчитывается в предположении, что АКП объекты испытывают гравитационное взаимодействие только с Солнцем и с Юпитером, но не друг с другом. Если в ходе эволюции АКП объект подходит к Юпитеру или Солнцу на расстояние, меньшее их радиуса, то такой АКП объект исключается из дальнейшего рассмотрения, полагая, что он упал на Юпитер или Солнце соответственно. Таким образом, проводится прямое численное интегрирование движения АКП объектов в гравитационном потенциале двух тел Солнце–Юпитер с помощью скоростной формулировки алгоритма Верлета и Вейса [74], обеспечивающе-

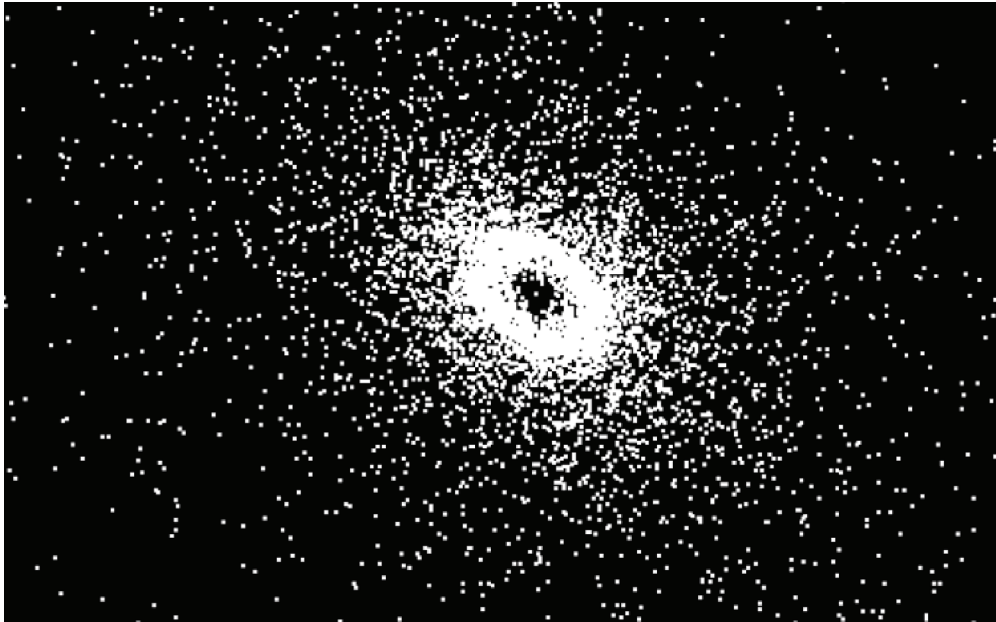


Рис. 5. Пространственная конфигурация АКП объектов в гравитационном поле двух тел Солнце–Юпитер на момент времени $t = 20\,000$ лет. Хорошо заметен разлет пробных тел (размер поля на графике 20×15 а.е.) по сравнению с начальной конфигурацией, показанной на рис. 4.

го консервативность численной схеме – сохранение полной энергии. Подробное описание численной схемы приводится в [75].

5.2. Распределение акп тел по энергиям

Динамика образования свободных АКП тел изучается методом прямого численного интегрирования движения 10^4 малых планетных тел в гравитационном поле двух тел Солнце–Юпитер. На рис. 5 показана пространственная конфигурация системы АКП объектов на момент времени 20000 лет с образованием характерной структуры – АКП облака, являющегося прототипом облака Оорта.

На рис. 6, соответствующем моменту времени 35000 лет, хорошо заметны два разрыва в планетном торе. Первый находится в нижней части кольца и соответствует положению Юпитера, погруженного в “миниоблако” из АКП объектов, которых собрал “расчищающий” себе орбиту гигант и организовал их движение в подобие миниатюрной Солнечной системы.

Второй разрыв находится вверху кольца, в точке орбиты Юпитера, противоположной его текущему положению. Происхождение этого разрыва связано с эффектами вековой эволюции планетного тора. Это проявляется в том, что хотя начальное распределение АКП объектов в торе и задавалось аксиально-симметричным, гравитационное поле системы Солнце–Юпитер не обла-

дает азимутальной симметрией, что приводит к нарастанию возмущений, которые становятся заметными уже через тысячу оборотов Юпитера. В результате, по аналогии с солнечно-лунными приливами, наибольшая величина приливной силы реализуется с противоположной стороны от Солнца по отношению к Юпитеру, так называемые сизигийные приливы, они-то и приводят к уходу АКП объектов со своих орбит.

Изменение со временем характерных размеров планетного тора (его средние радиус и толщина), внутренний радиус формирующегося облака Оорта ($r_{\text{Оорт}}$), данные по статистике разрушенных (N_d), связанных (N_b) и несвязанных (N_{ub}) АКП объектов, а также АКП объектов с положительной полной энергией ($N_{E>0}$) приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, в начале эволюции планетной системы число АКП объектов с положительной полной энергией нестабильно – они то появляются, то пропадают. Это связано с тем, что такие объекты приобретают положительную энергию, оказываясь в непосредственной близости к Юпитеру, но вскоре падают на него. Эти рассуждения также справедливы для АКП объектов, захваченных в окрестности Солнца. Так что условие освобождения АКП объекта – его положительная полная энергия

$$E_{\text{АКП}} = m_p v_p^2 / 2 - Gm_p (M_J / r_{J,p} + M_{\odot} / r_{\odot,p}) > 0 \quad (4)$$

– является необходимым, но недостаточным при близких прохождениях. Здесь v_p – скорость АКП

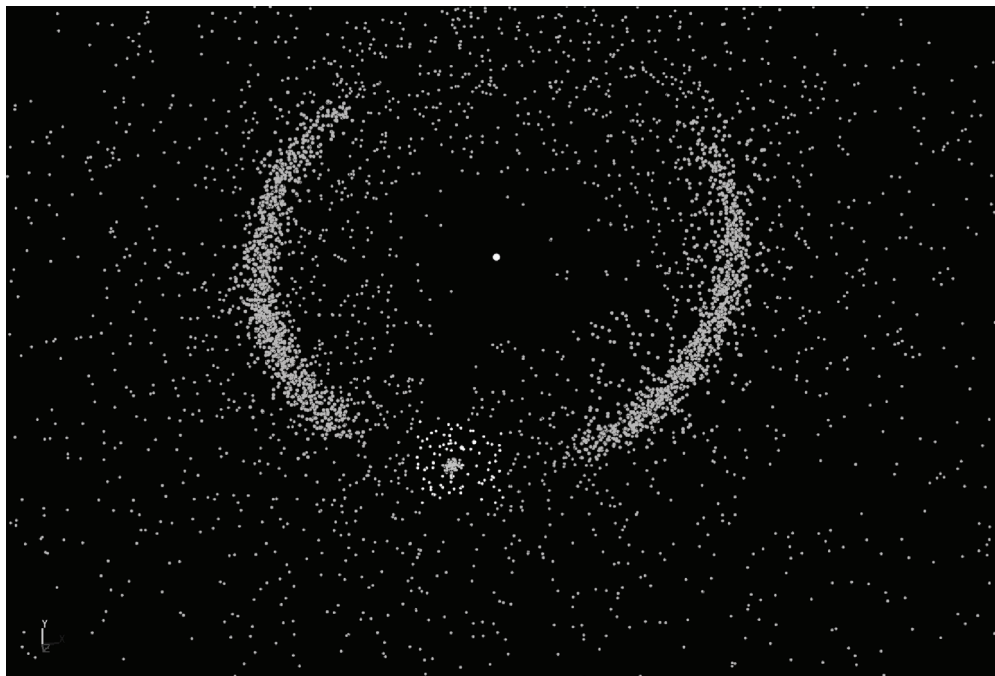


Рис. 6. Разрывы в планетном торе отражают динамическую эволюцию Юпитера ($t = 55\,000$ лет), “расчищающего” себе орбиту от АКП объектов, переорганизовывая их движение в облако спутников. Размер поля на графике 7×5 а.е.

объекта, $r_{J,p}$ — расстояние между Юпитером и АКП объектом, и $r_{\odot,p}$ — расстояние между Солнцем и АКП объектом. В данной работе мы не моделировали собственно процесс захвата и падения АКП объектов. Детальное описание этого процесса можно найти в работе Францевой и др. [76], которые в подходе N -тел смоделировали темпы обогащения планет-гигантов пылью, а также летучим и тугоплавким веществом разрушенных малых планетных тел (АКП материала).

На рис. 7 показаны распределения АКП объектов по величине их полной энергии на разные моменты времени. Последовательность этих распределений хорошо иллюстрирует процесс постепенного “разогрева” планетного тора в гравитационном поле системы Солнце–Юпитер, который сопровождается медленным разлетом системы. В результате часть АКП объектов освобождается, но большая их часть в процессе гравитационного рассеяния переходит на орбиты с большими гелиоцентрическими расстояниями и собирается в конфигурацию, подобную облаку Оорта.

На первом графике рис. 7 выделяется максимум, который соответствует начальному состоянию планетного тора, заданного вдоль орбиты Юпитера. Со временем главный пик распределения расплывается, и на сравнительно ранних этапах динамической эволюции планетной системы начинает вырисовываться вторичный пик, кото-

рый движется в сторону положительных значений энергий.

Вторичный пик $E_{\max_{II}}$ есть проявление механизма гравитационного рассеяния, в процессе которого формируется выборка АКП объектов, потенциальных кандидатов в население облака Оорта. И хотя рассматриваются ранние моменты времени ($< 20\,000$ лет), тем не менее уже можно оценить долю АКП объектов, из которых идет формирование облака Оорта. Планеты с полной энергией, близкой к нулевому значению, имеют большие афелийные расстояния и большую часть орбитального периода они проводят вдали от системы Солнце–Юпитер. Именно эти планеты и формируют АКП-банк облака Оорта.

По положению вторичного пика можно рассчитать радиус внутренней границы облака Оорта

$$r_{\text{Oort}} = \frac{GM_{\odot}m_p}{E_{\max_{II}}}. \quad (5)$$

Значения внутреннего радиуса облака Оорта r_{Oort} на разные моменты времени приведены в табл. 1. Таким образом, во вторичном максимуме “скрыта” информация о формирующемся облаке Оорта. Со временем вторичный пик смещается в сторону положительных значений энергии за счет подпитки новыми АКП объектами из главного максимума. Освободившиеся АКП объекты также происходят из главного максимума, уходя в область положительных значений полной энер-

Таблица 1. Модельные оценки статистики связанных (членов облака Оорта) и свободных АКП объектов

τ	N_p	N_b	$N_{E>0}$	N_{ub}	N_d	\bar{r}	\bar{z}	r_{Oort}
0	10000	10000	0	0	0	5.3	0.1	—
2411	9761	9760	1	0	239	7.3	0.27	15.3
4822	9705	9703	2	0	295	8.5	0.34	16.8
7233	9676	9674	2	0	324	9.64	0.39	17.7
9644	9636	9636	0	0	364	10.78	0.45	24.0
12055	9607	9603	4	0	393	11.93	0.5	24.0
14466	9578	9578	0	0	422	13.56	0.55	25.9
16877	9569	9569	0	0	431	15	0.59	31.8
20000	9524	9521	3	1	476	16.82	0.66	31.8
25000	9482	9475	7	5	518	20.686	0.787	67.4
30000	9453	9439	14	11	547	25.238	0.923	67.4
35000	9425	9406	19	19	575	31.21	1.11	67.4
40000	9394	9363	31	29	606	37.32	1.31	84.3
45000	9370	9329	41	41	630	44.57	1.51	112.3
50000	9345	9288	57	54	655	51.77	1.76	112.4
55000	9323	9244	79	77	677	59.89	2.05	168.6
60000	9299	9200	99	98	701	69.45	2.38	337.1
65000	9278	9157	121	120	722	78.65	2.74	337.1
70000	9262	9111	151	150	738	87.4	3.07	337.1

Примечание. В столбцах приведены параметры планетной системы: средние значения радиуса и толщины планетного тора, r и z -компоненты (в а.е.). Используемые обозначения: τ – время эволюции (в годах); N_p – число АКП объектов; N_b – число связанных АКП объектов (члены облака Оорта); $N_{E>0}$ – число АКП объектов с положительной полной энергией $E > 0$; N_{ub} – число свободных АКП объектов, не связанных более ни с Солнцем, ни с Юпитером; N_d – число АКП объектов, упавших на Солнце или Юпитер; r_{Oort} – радиус внутренней границы облака Оорта в начальной стадии его формирования (в а.е.).

гии, приобретая характерные скорости выброса $\sim 1\text{--}5$ км/с, как иллюстрирует рис. 8.

Мы смоделировали лишь небольшой промежуток времени ~ 70000 лет. Даже за этот сравнительно небольшой интервал времени проявилась устойчивая тенденция эволюции планетного тора в АКП облако и образования свободных АКП объектов (с положительной полной энергией).

Что же касается оценки внешней границы облака Оорта, то она определяется галактическим потенциалом и звездным населением в окрестности Солнца, что не исследовалось в данной работе. В работах других авторов специально уделялось внимание вопросу определения внешней границы облака Оорта и ее формы. Например, Корреа-Отто и Каландра [77] обнаружили динамически подвижную область малых планетных тел в облаке Оорта на удалении от Солнечной системы на 65000 а.е. и не связанных с ней более. Этот результат авторы [77] получили в ходе численного моделирования трех “синтетических” моделей облака Оорта, включающих до миллиона

малых планетных тел, испытывающих эффекты звездных прохождений и галактического прилива. Влияние собственно планет Солнечной системы авторы [77] не учитывали, а также не рассматривали дальнейшую эволюцию малых планетных тел по мере приближения их к Солнцу на расстояние ближе 35 а.е.

Результаты, полученные в нашей работе и в [77], отражают два подхода в моделировании планетных систем, которые условно можно обозначить как “снизу вверх” (эволюция планетного диска в облако Оорта) и “сверху вниз” (эволюция готового уже облака Оорта и выделение его внешних и внутренних динамических структур). Важно подчеркнуть, что основной механизм выбросов малых планетных тел в моделировании [77] связан с эффектом галактического прилива и прохождения звезд поля, тогда как в нашей модели – процесс динамического трения, приводящий к гравитационному рассеянию АКП объектов в гравитационном поле двух тел Солнце–Юпитер.

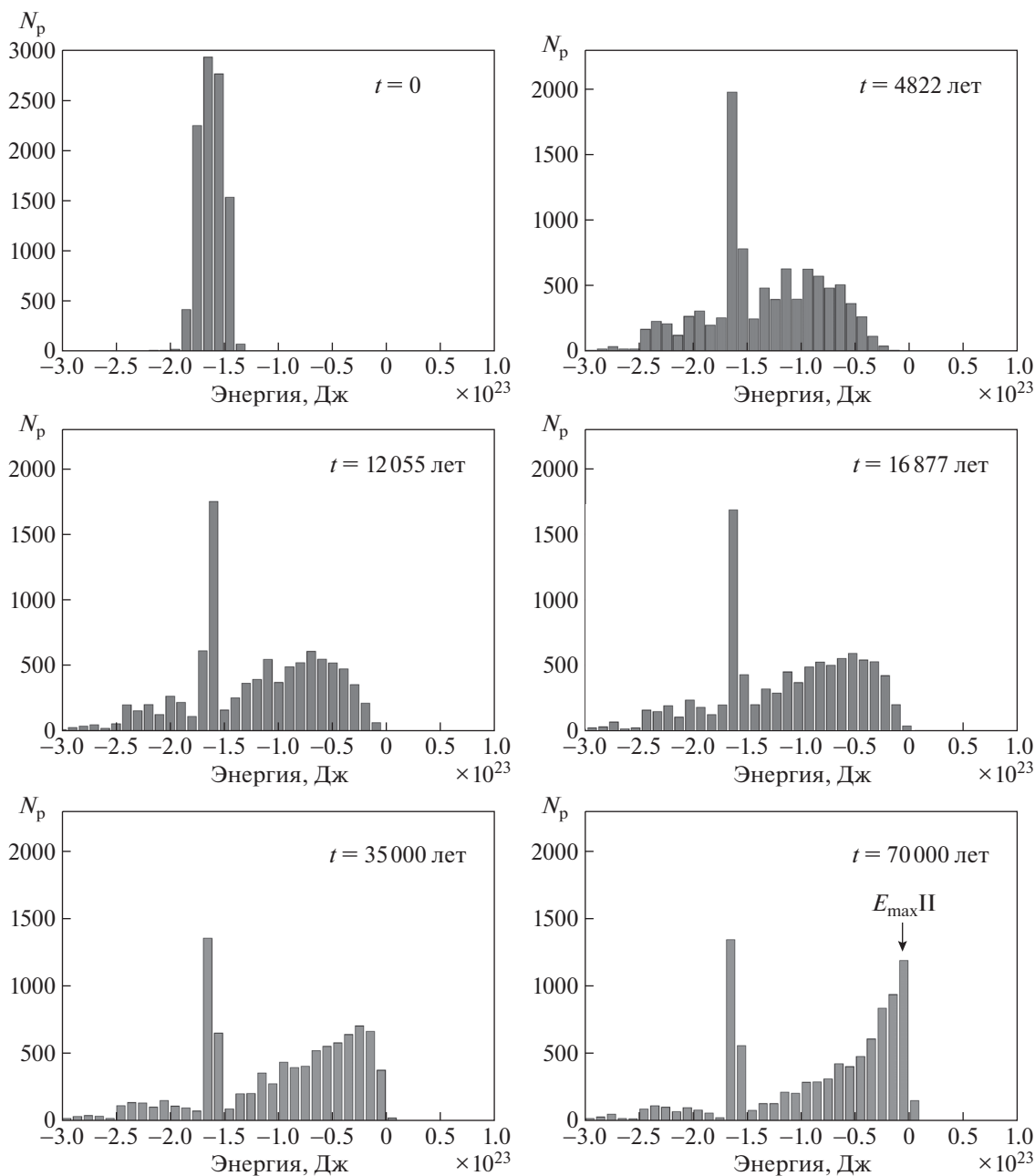


Рис. 7. Гистограммы распределений АКП объектов по величине полной энергии в моменты времени $t = 0$; 4800; 12055; 16877; 35000 и 70000 лет.

Из анализа пространственного распределения выброшенных планет Корреа-Отто и Каландра [77] выявили протяженные на 4 кпк структуры вдоль галактической орбиты Солнца. Это подтверждает предсказанное в нашей работе АКП “копье”, хотя следует подчеркнуть: как отмечают сами авторы [77] в своем моделировании, они не учитывали эффекты галактического окружения (спиральные рукава, гигантские молекулярные облака), влияние которых могло бы “размыть” или иначе исказить пространственные структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в результате обсуждения и численного моделирования гравитационного ускорения АКП объектов протопланетного диска звезд возможно ускорение части этих тел до скоростей, достаточных для формирования облаков Оорта около таких звезд. При этом часть АКП объектов оказываются вне своих родительских планетных систем, покидают их, формируя поле свободных планет своей галактики (рис. 1, 2, 4). В процессе

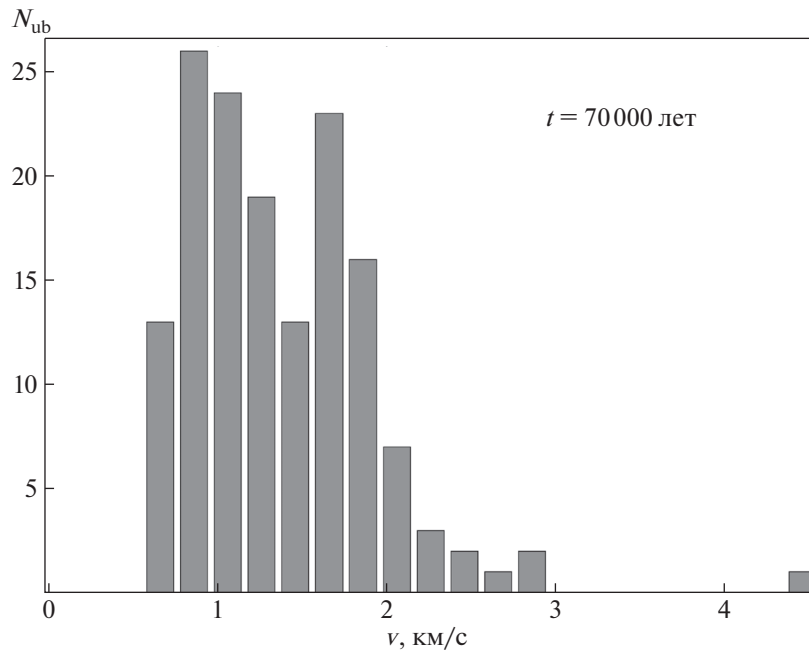


Рис. 8. Распределение свободных АКП объектов (не связанных более ни с Солнцем, ни с Юпитером) по пространственным скоростям на момент времени $t = 70000$ лет.

образования последнего молодые звезды оказываются вооруженными сначала АКП “копьями”, а со временем и галактическими АКП “кольцами”. Галактики малых масс могут терять часть АКП материала, в свою очередь, вооружаясь АКП “копьями” и АКП орбитальными “кольцами”. Относительная ширина кометного “копья” и кометного “кольца” определяется отношением скорости потерянной звездой АКП объектов к орбитальной скорости звезды в Галактике.

Современный метод поиска свободных галактических планет путем регистрации актов микролинзирования позволил обнаружить несколько одиночных планет с массой порядка массы Юпитера, и его широкое применение со временем позволяет надеяться не только на определение числа и масс свободных планет в Галактике, но и на реалистическую оценку общей массы потенциальных носителей темного вещества планетных масс в ней.

Эволюция родительских звезд с массами менее $8 M_{\odot}$ в сверхгиганты с учетом потери существенной части своей начальной массы и превращение их в конечные остатки (в вырожденные карлики) позволяют обсудить судьбу планетных систем около них. Пример Солнечной системы позволяет оценить, что расширение Солнца приведет со временем к поглощению его оболочкой Меркурия, Венеры, Земли и Марса, вероятно, без существенного влияния на его эволюцию. Но поглощение Юпитера на стадии красного гиганта

Солнца, вероятно, окажется для Солнца роковым, поскольку энергия связи протяженной оболочки Солнца к тому времени окажется меньше энергии взаимодействия Юпитера и компактного вырожденного ядра Солнца. В итоге Юпитер может оказаться в силу формализма общих оболочек [5] спутником вырожденного карлика с большой полуосью около солнечного радиуса и орбитальным периодом около двух часов. Более далекие планеты Солнечной системы сохранятся, увеличив свои расстояния от вырожденного карлика почти в два раза в силу потери массы Солнцем.

Вероятно, другая судьба у далеких планет вокруг звезд с массами более $1.4 M_{\odot}$. Потеря массы для них на стадии образования планетарной туманности столь велика и, возможно, столь быстра, что их далекие планеты окажутся свободными. Это открывает возможность для второго канала образования поля свободного АКП материала Галактики. Конечно, не исключена возможность потери части АКП объектов и в результате редких близких прохождений соседних звезд на расстояниях, сравнимых с размерами планетных систем 100 а.е.

Таким образом, в итоге эволюции звезд, обладающих планетными системами, вырожденные карлики могут иметь наряду с далекими планетами близкие спутники с массой порядка массы Юпитера или более. В целом в результате этой работы становится очевидно наличие нескольких каналов формирования поля свободных АКП

объектов нашей и других галактик. Их обнаружение и исследование становятся актуальной задачей современной наблюдательной астрофизики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *P. Laplace, Exposition du systeme du Monde* (Paris: Chez courcier, 1808).
2. *В. Фесенков, Космогония Солнечной Системы* (Алма-Ата: изд-во АН Казахской ССР, 1946).
3. *В. Сафронов, Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет* (М.: Наука, 1969).
4. *М. Маров, Планеты солнечной системы* (М.: Наука, 1986).
5. *А. Масевич, А. Тутуков, Эволюция звезд: теория и наблюдения* (М.: Наука, 1988).
6. *A. Tutukov, Soviet Astron.* **31**, 663 (1987).
7. *A. W. Howard, G. W. Marcy, S. T. Bryson, J. M. Jenkins, et al., Astrophys. J. Suppl.* **201**, id. 15 (2012).
8. *D. Hsu, E. Ford, D. Ragozzine, and K. Ashby, Astron. J.* **158**, id. 109 (2019).
9. *G. Fragione, Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **483**, 3465 (2019).
10. *D. Fleming, R. Barnes, D. Graham, R. Luger, and T. R. Quinn, Astrophys. J.* **858**, id. 86 (2018).
11. *M. Tuomi, H. Jones, R. P. Butler, P. Arriagada, et al., arXiv:1906.04644 [astro-ph.EP]* (2019).
12. *M. I. Shabram, N. Batalha, S. E. Thompson, D. C. Hsu, et al., arXiv:1908.00203 [astro-ph.EP]* (2019).
13. *A. Vanderburg, C. X. Huang, J. E. Rodriguez, J. C. Becker, et al., Astrophys. J.* **881**, id. L19 (2019).
14. *R. Dvorak, B. Loibnegger, L. Y. Zhou, L. Zhou, Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **488**, 5604 (2019).
15. *R. Malhotra, Astrophys. J.* **808**, id. 71 (2015).
16. *M. Mayor, M. Marmier, C. Lovis, S. Udry, et al., arXiv:1109.2497 [astro-ph.EP]* (2019).
17. *J. McCormac, E. Gillen, J. A. Jackman, D. J. A. Brown, et al., arXiv:1909.12424 [astro-ph.EP]* (2019).
18. *A. Fukui, D. Suzuki, N. Koshimoto, E. Bachelet, et al., Astron. J.* **158**, id. 206 (2019).
19. *M. Rice and G. Laughlin, Astrophys. J.* **884**, id. L22 (2019).
20. *P. Guzik, M. Drahus, K. Rusek, W. Waniak, G. Cannizzaro, and I. Pastor-Marazuela, Nature Astron.* **4**, 53 (2020).
21. *S. Bhatiani, X. Dai, and E. Guerras, Astrophys. J.* **885**, id. 77 (2019).
22. *C. Han, C-U Lee, A. Udalski, A. Gould, et al., Astron. J.* **159**, id. 48 (2020).
23. *К. Мюррей, С. Дермотт, Динамика Солнечной системы* (М.: Физматгиз, 2009).
24. *M. Wyatt, The Trans-Neptunian Solar System*, edited by D. Prialnik, M. A. Barucci, and L. Young (Elsevier, 2020), p. 351.
25. *D. Mesa, M. Keppley, F. Cantalloube, L. Rodet, et al., Astron. and Astrophys.* **632**, id. A25 (2019).
26. *A. Morbidelli, D. Nesvorny, The Trans-Neptunian Solar System*, edited by D. Prialnik, M. A. Barucci, and L. Young (Elsevier, 2020), p. 25.
27. *M. Cortes-Contreras, F. Jimenez-Esteban, M. Mahlke, E. Solano, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **490**, 3046 (2019).
28. *T. Beck and J. Bary, Astrophys. J.* **884**, id. 159 (2019).
29. *N. van der Marel, R. Dong, R. Pudritz, J. Wadsley, et al., arXiv:1910.00167 [astro-ph.EP]* (2019).
30. *F. Namouni and M. Morais, Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **477**, 117 (2018).
31. *M. Veyette and P. Muirhead, Astrophys. J.* **864**, id. 166 (2018).
32. *J. Oort, Bull. Astron. Inst. Netherland* **11**, 91 (1950).
33. *J. Oort, Observatory* **71**, 129 (1951).
34. *A. Tutukov and M. Smirnov, Solar System Res.* **38**, 279 (2004).
35. *B. Boe, R. Jedicke, K. Meech, P. Wiegert, et al., Icarus* **333**, 252 (2019).
36. *C. Snodgrass, A. Fitzsimmons, S. Lowry, and P. Weissman, Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **414**, 458 (2011).
37. *B. Shustov and A. Tutukov, Astron. Rep.* **62**, 724 (2018).
38. *J. Fernandez and A. Brunini, in Solar System Formation and Evolution*, edited by D. Lazzaro, R. Vieira Martins, S. Ferraz-Mello, J. Fernandez, and Beauge, ASP Conf. Ser. **149**, 107 (1998).
39. *D. Vokrouhlicky, D. Nesvorny, and L. Dones, Astron. J.* **157**, id. 181 (2019).
40. *K. L. Luhman, Astrophys. J.* **781**, id. 4 (2014).
41. *J. Likandro, V. Ali-Lagoa, G. Tancredi, and Y. Fernandez, Astron. and Astrophys.* **585**, id. A9 (2016).
42. *J. Matese and D. Witmire, Icarus* **214**, 925 (2011).
43. *K. Deck, M. Payne, and M. Holman, Astrophys. J.* **774**, id. 129 (2013).
44. *A. Sutherland and K. Kratter, Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **487**, 3288 (2019).
45. *M. R. Green, R. Challener, M. Himes, J. Bleicic, and P. Cubillos, Bull. Amer. Astron. Soc.* **52**(1), id. 122.05 (2020).
46. *P. Dorval, G. Talens, G. Otten, R. Brahm, et al., arXiv:1904.02733 [astro-ph.EP]* (2019).
47. *N. Bailey and D. Fabrycky, Astron. J.* **158**, id. 94 (2019).
48. *S. Torres, M. Cai, and A. Brown, Astron. and Astrophys.* **629**, id. 139 (2019).
49. *N. Smyth, S. Profumo, S. English, T. Jeltama, K. McKinnon, and P. Guhathakurta, arXiv:1910.01285 [astro-ph.CO]* (2019).
50. *A. Tutukov, Astron. Rep.* **63**, 79 (2019).
51. *M. Narziev, R. Chebotarev, T. Jopek, L. Neslusan, et al., arXiv:1811.05159 [astro-ph.EP]* (2018).
52. *A. Siraj and A. Loeb, arXiv:1904.07224 [astro-ph.EP]* (2019).
53. *A. Siraj and A. Loeb, arXiv:1906.03270 [astro-ph.EP]* (2019).
54. *E. Ryan, D. Mizuno, S. Shenoy, C. E. Woodward, S. J. Carey, A. Noriega-Crespo, K. E. Kraemer, and S. D. Price, Astron. and Astrophys.* **578**, id. A42 (2015).
55. *S. Sheppard, G. Williams, D. Tholen, C. A. Trujillo, et al., Res. Notes Amer. Astron. Soc.* **2**, id. 155 (2018).
56. *C. Clanton and B. Gaudi, Astrophys. J.* **834**, id. 46 (2017).

57. *A. Burgasser, I. Reid, N. Siegler, L. Close, P. Allen, P. Lowrance, and J. Gizis*, in *Protostars and Planets V*, edited by *B. Reipurth, D. Jewitt, and K. Keil*, (Tucson: University of Arizona Press, 2007), p. 895.
58. *A. Dieball, L. Bedin, C. Knigge, M. Geffert, R. M. Rich, A. Dotter, H. Richer, and D. Zurek*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **486**, 2254 (2019).
59. *Y. Jung, A. Udalski, T. Sumi, C. Han, et al.*, *Astrophys. J.* **798**, id. 123 (2015).
60. *M. Reggiani, M. Meyer, G. Chauvin, A. Vigan, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **586**, id. 147 (2016).
61. *B. Paczynski*, *The Future of Small Telescopes In The New Millennium. Vol. III. Science in the Shadows of Giants*, edited by *T. D. Oswalt* (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003), *Astrophys. Space Sci. Library* **289**, 303 (2003).
62. *A. Gould*, *J. Korean Astron. Soc.* **49**, 123 (2016).
63. *M. Mróz, Y.-H. Ryu, J. Scowron, A. Udalski, et al.*, *Astron. J.* **155**, id. 121 (2018).
64. *T. Barclay, E. Quintana, S. Raymond, and M. T. Penny*, *Astrophys. J.* **841**, id. 86 (2017).
65. *P. Mróz, A. Udalski, J. Skowron, M. K. Szymanski, et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **244**, id. 29 (2019).
66. *C. Han, J. Yee, A. Udalski, I. A. Bond, et al.*, *Astron. J.* **158**, id. 102 (2019).
67. *P. Mróz, A. Udalski, D. Bennett, Y.-H. Ryu, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **622**, id. 201 (2019).
68. *R. Jennings, J. Cordes, and S. Chatterjee*, *Astrophys. J.* **889**, id. 145 (2020).
69. *M. Holman, M. Payne, and A. Pál*, *Res. Notes Amer. Astron. Soc.* **3**, id. 160 (2019).
70. *E. Michaely and A. Loeb*, arXiv: 1609.08614 [astro-ph.EP] (2017).
71. *R. Wysoczanska, P. Dybczynski, and M. Krolikowska*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **491**, 2119 (2020).
72. *M. Duncan, T. Quinn, and S. Tremaine*, *Astron. J.* **94**, 1330 (1987).
73. *L. Dones, P. Weissman, H. Levison, and M. Duncan*, *ASP Conf. Ser.* **323**, 371 (2004).
74. *L. Verlet and J. J. Weis*, *Phys. Rev. A* **5**, 939 (1972).
75. *A. V. Tutukov, V. V. Dryomov, and G. N. Dryomova*, *Astron. Rep.* **51**, 435 (2007).
76. *K. Frantseva, M. Mueller, P. Pokorny, F. F. S. van der Tak, and I. L. ten Kate*, arXiv: 2005.13562 [astro-ph.EP] (2020).
77. *J. A. Correa-Otto and M.F. Calandra*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **490**, 2495 (2019).