



УДК 523.6

DOI 10.18413/2075-4639-2019-51-1-145-156

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ С МАССИВНЫМИ ЗВЕЗДАМИ

NUMERICAL SIMULATION OF THE ENCOUNTERS OF THE SOLAR SYSTEM WITH MASSIVE STARS

А.М. Заболоцкий
A.M. Zabolotskiy

Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина
Россия, 308503, г. Белгород, п. Майский, ул. Вавилова, 1

Belgorod State Agricultural University named after V. Gorin,
1 Vavilov St., Mayskiy, Belgorod, 308503, Russia

E-mail: zabolotskiy.bel@rambler.ru

Аннотация

Рассматривается задача моделирования сближения Солнечной системы с массивной звездой на основе численного интегрирования уравнений движения объектов облака Оорта. На основе полученных результатов установлено, что столкновение со звездой увеличивает дисперсию эксцентриситетов орбит, что влечет за собой, с одной стороны, потерю значительной части объектов облака Оорта из-за их перехода на гиперболические орбиты, а с другой – к появлению орбит с малым эксцентриситетом и большими полуосями порядка 30 000 а. е. Столкновение с массивной звездой приводит к возникновению анизотропии направлений больших полуосей орбит с преимущественной ориентацией перигелиев орбит к точке максимального сближения звезды с Солнечной системой.

Abstract

The problem of modeling the approach of the Solar system to a massive star on the basis of numerical integration of the equations of motion of objects of the Oort cloud is considered. On the basis of the obtained results, it is found that the collision with a star increases the dispersion of orbit eccentricities, which entails, on the one hand, the loss of a significant part of the objects of the Oort cloud due to their transition to hyperbolic orbits, and on the other-to the appearance of orbits with small eccentricity and large semi – axes of the order of 30,000 a. e. A collision with a massive star results in anisotropy of the directions of the large semi-axes of the orbits with the predominant orientation of the perihelion orbits to the point of maximum convergence of the star with the Solar system.

Ключевые слова: облако Оорта, метод Рунге-Кутты, долгопериодические кометы.

Keywords: Oort cloud, Runge-Kutta method, long-period comets.

Введение

Исследованию близких прохождений соседних звезд около Солнечной системы посвящено множество работ. Это важно для понимания динамики объектов облака Оорта,



так как внешнее гравитационное воздействие на него может оказать влияние на поток квазипараболических комет с малыми перигелиями. Возможность столкновения Земли с такой кометой – один из факторов, влиянием которого можно объяснить катастрофические изменения климата, имевшие место в прошлом [Mullari, 1996, p. 19]. В работе Рикмана [Rickman, 2008] показано, что наряду с возмущениями облака Оорта, вызванными галактическими приливами, фундаментальную роль для инъекции комет из облака Оорта на наблюдаемые орбиты играют возмущения от близко проходящих звезд.

Одно из первых таких исследований – работа оксфордского астронома Matthews R.A.J [1994]. Он нашел 4 звездных системы, которые в ближайшие несколько десятков тысяч лет приблизятся к нам ближе 1 парсека: Проксима и α Cen, Ross 248 и AC+79 3888 (Gl 445). В статье российских астрономов Муллари А.А. [Mullari, 1996] и Орлова В.В. опубликованы результаты исследования 1946 звезд ближе 20 парсек из каталога Глизе [ARI Data Base...], в результате которого установлено, что одна из звезд, имеющая близкий подход к Солнцу – звезда Gl 473, сблизится с Солнцем на минимальное расстояние около 60 000 а. е. через 7 500 лет. Здесь же была отмечена также и звезда Gl 710, сближение с которой, согласно работе Муллари А.А. и Орлова В.В., произойдет примерно через 10^6 лет на расстояние $2,8 \times 10^5$ а. е. Однако эти результаты были основаны на данных каталога Глизе о параллаксах и лучевых скоростях, полученных в результате наземных наблюдений. Как было показано, случайные ошибки астрометрических данных заметно влияют на минимальное расстояние и момент наибольшего сближения звезды с Солнечной системой [Bobylev, 2010, 2017]. Существенный прогресс в этой области был достигнут с появлением более точного каталога, основанного на данных, собранных с помощью астрометрического спутника Hipparcos. Из анализа данных каталога Hipparcos сделан вывод о том, что на интервале около 10 млн лет наиболее тесное сближение произойдет со звездой Gl 710 на минимальное расстояние 0,4 пс через 1,4 млн лет [Garsia-Sanchez, 1999]. В этой же работе отмечено еще одно, не менее значимое сближение по силе воздействия на облако Оорта, которое имело место в прошлом. Это звезда Алголь) – тройная звездная система с полной массой $5,8 M_{\odot}$, которая приблизилась к Солнцу на расстояние 2,4 пс 6,9 млн лет назад. Наиболее тесное сближение, известное в настоящее время, произошло 70 000 лет назад со звездой Шольца (WISE J072003.20-084651.2), которая пересекла облако Оорта на расстоянии около 52 000 а. е. от Солнца [Marcos, 2018, p. 5]. Это маломассивная двойная система, состоящая из красного карлика спектрального класса M9 и коричневого карлика класса T5, расположенная в ближайшей окрестности Солнца на расстоянии ~ 6 пс [Mamajek, 2015].

Оценки показывают, что такие сближения Солнечной системы со звездами происходят достаточно часто в сравнении со временем её существования, примерно 1 раз в 200 тыс. лет [Заболоцкий, 2017, с. 43]. Однако в большинстве случаев – это сближения с маломассивными звездами с массой менее $1 M_{\odot}$. Существенный интерес представляют собой столкновения со звездами массой порядка нескольких солнечных масс. Согласно каталогу ближайших звезд Glise [ARI Data Base...], в окрестности Солнца на расстоянии ≤ 27 пс есть три звездные системы, массы которых превосходят 5 солнечных масс M_{\odot} : α Aur, η Oph и δ Vel.

α Aur (Капелла) – спектрально-двойная звезда с массами компонент $(2,69 \pm 0,06) M_{\odot}$ и $(2,56 \pm 0,04) M_{\odot}$ [Hummel, 1994, p. 1859]. Расстояние между компонентами – 10^8 км.

η Oph – визуально-двойная система с общей массой компонент $(6,09 \pm 0,45) M_{\odot}$ [Docobo, 2007, p. 1211].

δ Vel состоит из двух звезд, каждая из которых является визуально-двойной звездой. Самая яркая из них δ Vel A – звезда главной последовательности, спектральный тип A0 V [ARI Data Base...]. Второй компонент δ Vel B – желтый карлик. Вторая звезда



также состоит из двух слабых звезд δ Vel C и δ Vel D. В 2000 г. было установлено, что δ Vel A – затменно-переменная звезда с компонентами δ Vel Aa и δ Vel Ab [Otero, 2000]. Согласно [Kervella, 2009, p. 112], массы компонент δ Vel Aa, δ Vel Ab и δ Vel B составляют $(2,5 \pm 0,1) M_{\odot}$, $(2,0 \pm 0,1) M_{\odot}$ и $(1,3 \pm 0,1) M_{\odot}$ соответственно. Таким образом, масса системы δ Vel превосходит $5,8 M_{\odot}$, если еще учесть наличие двух маломассивных компонент δ Vel C и δ Vel D.

Эти звездные системы составляют всего лишь 0,26 % от числа всех звезд и звездных систем каталога Glise. Однако можно показать [Заболоцкий, 2017], что в среднем через каждые 76 млн лет облако Оорта пересекает звезда с массой более $5 M_{\odot}$, т.е. в истории существования Солнечной системы эти события происходили многократно, и их вклад в динамику объектов облака Оорта может быть сопоставим с воздействием более частых сближений с маломассивными звездами. В данной работе рассмотрены результаты численного моделирования столкновения звезды массой $6 M_{\odot}$ с облаком Оорта, выполнено сравнение статистических распределений параметров орбит малых тел (комет) до и после столкновения со звездой.

Постановка задачи и методы ее решения

Для моделирования динамики объектов облака Оорта была разработана компьютерная программа Gravitation Systems [Заболоцкий, 2018], в которой численное интегрирование уравнений движения выполнялось на основе явного метода Рунге-Кутты 4-го порядка с адаптацией шага интегрирования [Ильина, 2004; Хайпер, 1990]. Алгоритм выбора шага интегрирования h_k для момента времени t_k (где $k = 0, 1, 2, \dots$) основан на использовании параметра адаптации δ , текущее значение δ_k которого определено выражением

$$\delta_k = \max_{\substack{i,j \\ j \neq i}} \frac{v_{ik} h_k}{r_{ijk}},$$

где v_{ik} – модуль вектора скорости i -го объекта в момент t_k , r_{ijk} – расстояние между объектами i и j в момент времени t_k . Для каждого k шаг интегрирования h_k определяется из условия $\delta_k \leq \delta$. Заметим, что если $\delta_k \ll 1$, то при круговом движении частицы с массой $m_1 \ll m_2$ вокруг барицентра системы двух тел величина δ_k – угол, описываемый ее радиус-вектором на интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$ с вершиной в центре тяжести. Таким образом, посредством задания параметра δ осуществляется управление точностью и временем вычислений. Программа моделирует также возможные столкновения объектов как абсолютно неупругий удар, в результате которого сталкивающиеся объекты объединяются в один. Еще один параметр – радиус системы, определяет первоначально область локализации объектов. В дальнейшем при выполнении процедуры интегрирования он становится параметром процесса, определяемым наиболее удаленным от барицентра системы объектом с отрицательной полной энергией. Если какое-либо тело с положительной полной энергией пересекает границу системы, удаляясь от барицентра, то оно исключается из системы. Естественно, что интегрирование уравнений движения большого числа объектов в задаче N тел требует существенных затрат машинного времени. Поэтому в программе реализован многопоточный алгоритм обработки данных.

Для исследования было взято 5000 объектов в шаре радиуса 60 000 а. е. с центром в начале прямоугольной системы координат, совмещенным с барицентром Солнечной системы. С целью учета планетных возмущений в состав модельной Солнечной системы, кроме Солнца, включены планеты-гиганты, исключая планеты земной группы и карликовые планеты, т.к. их влиянием на динамику объектов облака Оорта можно пренебречь [Бирюков, 2007]. Начальные координаты малых тел выбирались случайным



образом при условии их равномерного распределения по расстоянию от барицентра. Компоненты начальных скоростей объектов нормально распределены с нулевым средним и стандартным отклонением v_σ , при этом значение v_σ задано так, чтобы эксцентриситеты e орбит находились в интервале $0,7 \leq e \leq 1$.

Выбор этих параметров приводит к распределению орбит по большой полуоси a , качественно согласующимся с распределением по параметру $1/a$ для долгопериодических комет [Dones, 2004]. Отличие нашего распределения от распределения наблюдаемых комет состоит, прежде всего, в том, что в начальных данных нашей модели отсутствуют гиперболические орбиты, для которых параметр $1/a < 0$. Поэтому предварительно было выполнено моделирование движения долгопериодических комет на интервале времени 10^6 лет. Это привело в результате взаимодействия с планетами-гигантами к появлению 110 гиперболических орбит, что составляет 2,2 % от общего количества объектов. В результате распределение орбит по эксцентриситету e и большой полуоси a приняло вид, показанный на рис. 1. Наклонения орбит i равномерно распределены по $\cos i$ в пределах $(-1, 1)$. Такое же распределение в пределах $(0^\circ, 360^\circ)$ имеет долгота восходящего узла Ω .

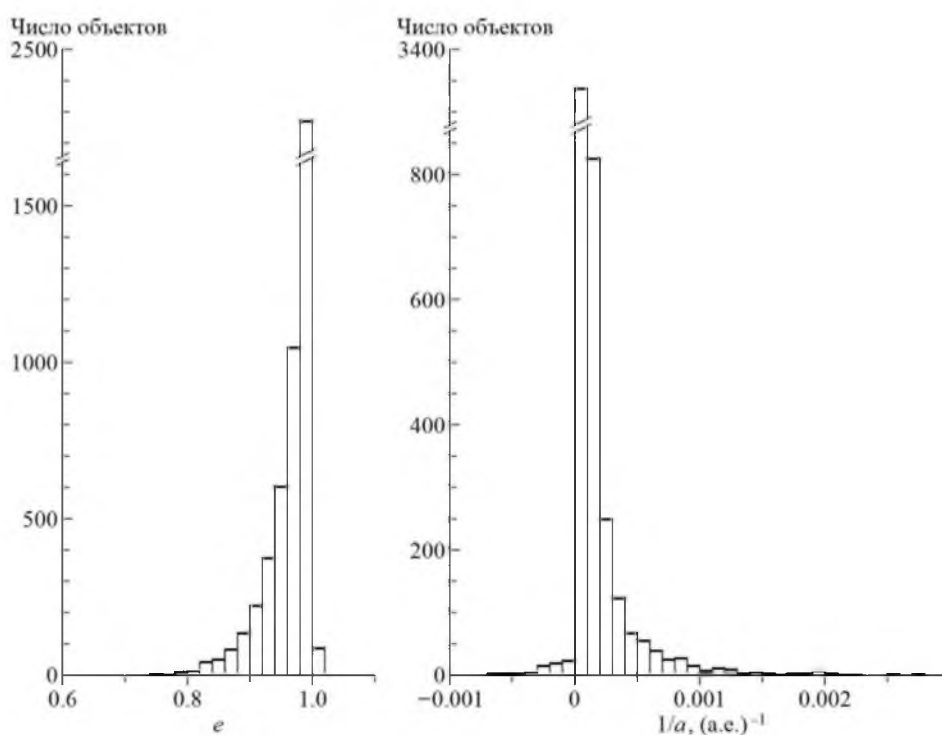


Рис. 1. Распределение орбит по эксцентриситету e и большой полуоси a в начальных условиях
 Fig. 1. The distribution of orbits along the eccentricity e and the semi major axis a in the initial conditions

Для моделирования столкновения с облаком Оорта была выбрана звезда массой $6M_\odot$. Её начальная скорость варьировалась в интервале от 5 км/с до 30 км/с, а прицельное расстояние – в диапазоне от 10 000 а. е. до 25 000 а. е. Выбор этих значений прицельных расстояний обусловлен тем, насколько вероятно такое сближение с Солнечной системой. Вероятность того, что за всю историю существования Солнечной системы произойдет, по крайней мере, одно сближение со звездой массы $\geq 5M_\odot$, на расстояние $\leq 10\,000$ а. е., равна 0,45 [Заболоцкий, 2017, с. 43]. Для расстояния $\leq 25\,000$ а. е. сближения происходят в среднем один раз в 1,2 млрд лет, а вероятность хотя бы однократного такого события равна 0,98. Естественно это справедливо, если состав и плотность звездного населения в окрестности Солнца были постоянными на протяжении рассматриваемого интервала



времени. Начальное положение звезды выбиралось в случайной точке на расстоянии 500 000 а. е. от Солнца. Моделирование столкновения выполнялось до момента удаления звезды от Солнца на это же расстояние.

Результаты и их обсуждение

Численное моделирование столкновений показало наиболее существенные изменения в распределении орбит по параметрам a , e , i и Ω при начальной скорости звезды 5 км/с и наименьшем расстоянии от Солнца, равном 10 000 а. е. Здесь будут рассмотрены результаты численного эксперимента, выполненные с этими начальными условиями.

На рис. 2 показано распределение орбит по большой полуоси a после столкновения. Как можно видеть из его сравнения с начальным распределением орбит на рис. 1, столкновение привело к значительному увеличению числа гиперболических орбит. Если до столкновения в системе было 110 объектов на гиперболических орбитах, то теперь их число возросло до 1 646. Как следствие, медиана распределения возросла от 15 290 а. е. до 29 070 а. е. Кроме этого, заметно уменьшилась величина пика распределения у нулевого значения параметра $1/a$, что объясняется увеличением дисперсии значений этой величины.

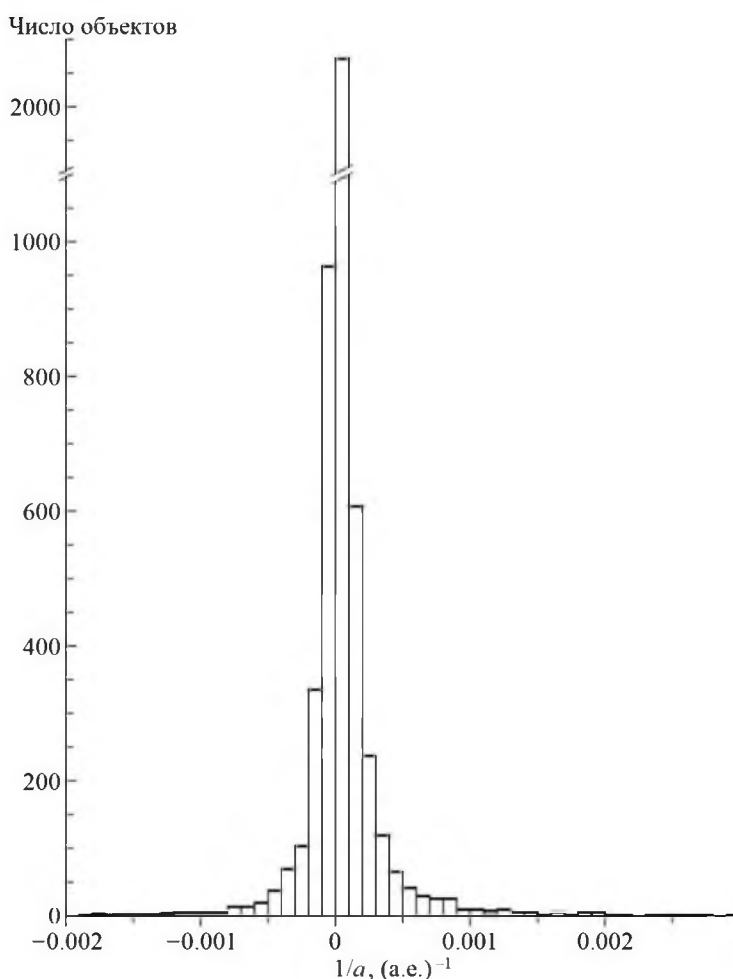


Рис. 2. Распределение орбит по большой полуоси a после столкновения
 Fig. 2. The distribution of the orbits the semi major axis a after the collision



Еще более значительное увеличение разброса значений произошло у эксцентриситетов орбит. На рис. 3 показано распределение орбит по эксцентриситету e после столкновения для диапазона значений $0 \leq e \leq 1,4$. Однако это только $\sim 80\%$ от первоначального количества объектов. У остальных 1035 объектов параметр $e > 1,4$ и его наибольшее значение составило 394. Таким образом, эксцентриситеты орбит после столкновения распределены в весьма широком диапазоне от нуля до нескольких сотен единиц.

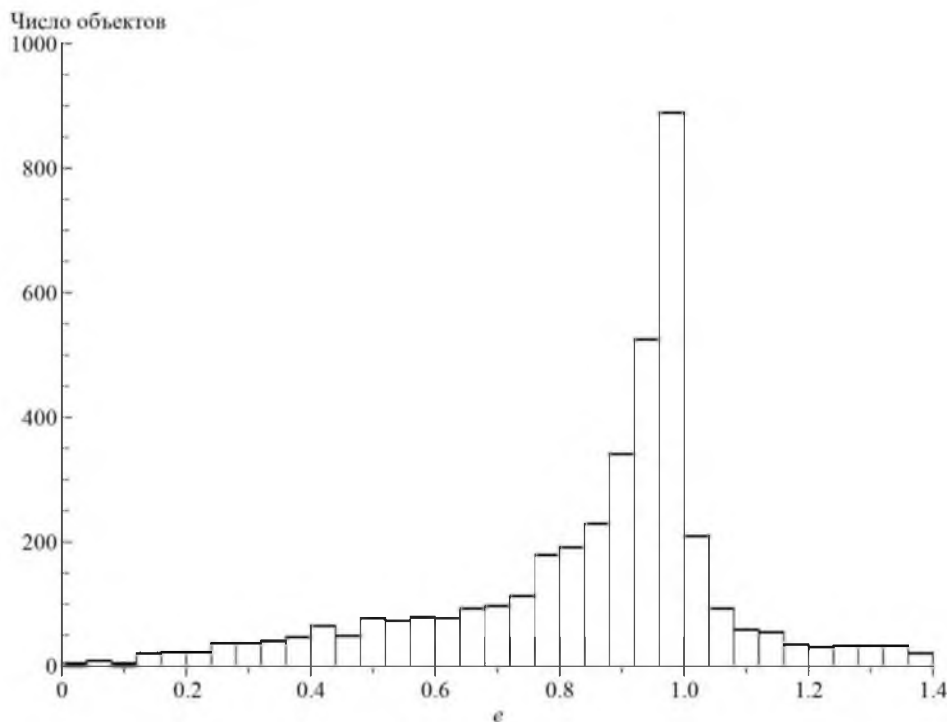


Рис. 3. Распределение орбит по эксцентриситету e после столкновения
 Fig. 3. The distribution of the orbits the eccentricity e after the collision

Пространственная ориентация орбит характеризуется наклонением i и долготой восходящего узла Ω . В случае изотропного распределения орбит параметры $\cos i$ и Ω равномерно распределены. После столкновения со звездой в зависимости от её массы, начальной скорости и прицельного расстояния распределения орбит по $\cos i$ и Ω существенно отличаются от равномерного распределения. На рис. 4 показано распределение объектов по наклонению i . Прерывистая линия – равномерное распределение. Как видим, имеет место избыток орбит с наклонением в интервале $(80^\circ, 120^\circ)$ и недостаток при $0^\circ < i < 50^\circ$ и $130^\circ < i < 180^\circ$. Аналогичные по величине отклонения от равномерного распределения имеют место и в распределении орбит по долготе восходящего угла.

Для понимания того, как связаны эти максимумы и минимумы распределений орбит по $\cos i$ и Ω с траекторией звезды и ориентацией осей орбит выполнено построение распределения объектов на небесной сфере через интервалы времени ~ 500000 лет. На рис. 5 показана композиция 4-х распределений объектов на небесной сфере, полученных после завершения моделирования столкновения. Отчетливо виден максимум плотности выше и правее центра изображения. Точки 1, 2 и 3 – радиант, положение звезды в момент максимального сближения и апекс звезды соответственно.

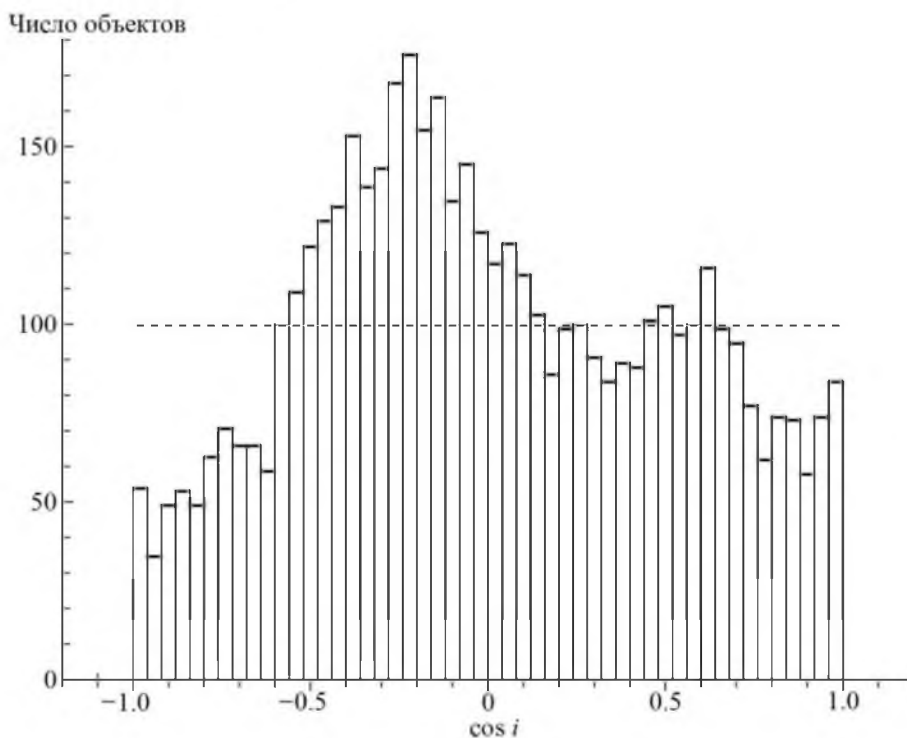


Рис. 4. Распределение орбит по наклонению i
 Fig. 4. The distribution of orbit inclination i

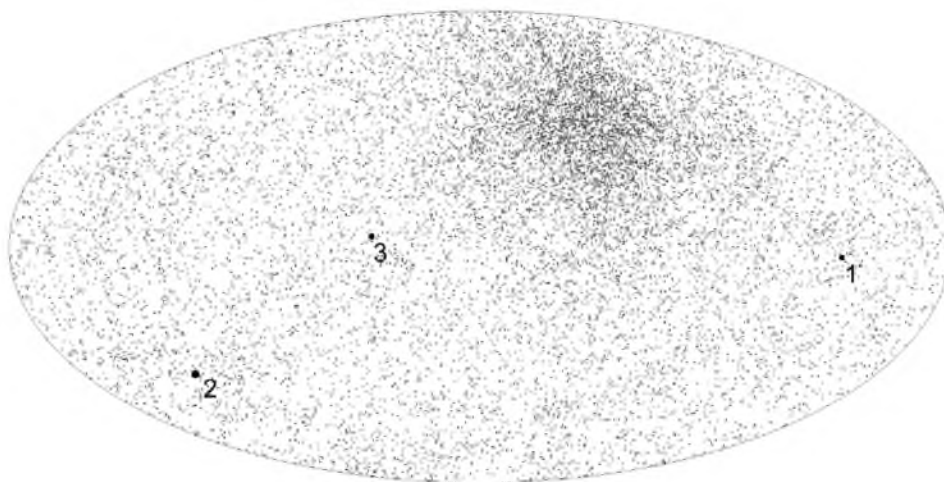


Рис. 5. Распределение объектов на небесной сфере: 1, 3 – радиант и апекс звезды, 2 – её положение в момент наибольшего сближения
 Fig. 5. Distribution of objects on the celestial sphere: 1, 3 – the radiant and apex of the star, 2-its position at the moment of greatest convergence

Полученное распределение может служить подтверждением того, что после столкновения афелии орбит концентрируются к определенной точке на небесной сфере. Действительно, около половины объектов (~ 48 %), находящихся на эллиптических орбитах, имеют эксцентриситеты в интервале $0,9 < e < 1$. Следовательно, большую часть времени они находятся вблизи афелиев своих орбит. Как можно видеть из рис. 5, точка, противоположная максимуму плотности объектов,



расположена вблизи точки 2 наибольшего сближения со звездой. Соответственно, к этой точке обращены перигелии их орбит.

Оценим влияние гравитационного поля проходящей звезды на эксцентриситет орбит объектов облака Оорта. Как известно [Задача Кеплера..., 2006, с. 15], вектор эксцентриситета

$$\mathbf{e} = \frac{\mathbf{l}}{mk}(\mathbf{p} \times \mathbf{L}) - \hat{\mathbf{r}} = \frac{m}{k}(\mathbf{v} \times \mathbf{r} \times \mathbf{v}) - \hat{\mathbf{r}}, \quad (1)$$

где

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{r} / r$$

– единичный вектор, \mathbf{v} – вектор скорости, $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$ – момент импульса \mathbf{p} , k – параметр, описывающий величину центральной силы, m – масса частицы. Рассмотрим орбиты с эксцентриситетом $e \approx 1$. Тогда $\mathbf{v} \times \mathbf{r} \approx \mathbf{o}$ и, следовательно,

$$\mathbf{e} \approx -\hat{\mathbf{r}}.$$

Предположим, что звезда с массой M движется по прямой со скоростью $v_0 \gg v$, проходя на минимальном расстоянии b от частицы. Под действием гравитационного поля звезды частица в момент времени t испытывает ускорение

$$\mathbf{a}(t) = \frac{GM}{r^3} \mathbf{r}' = \frac{GM}{b^2 + v_0^2 t^2} \hat{\mathbf{r}}'(t),$$

где

$$\hat{\mathbf{r}}'(t) = \mathbf{r}'(t) / r'(t),$$

$\mathbf{r}'(t)$ – вектор, направленный от объекта к звезде. Интегрируя это выражение, получим приращение скорости

$$\Delta \mathbf{v} = GM \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\hat{\mathbf{r}}'(t) dt}{b^2 + v_0^2 t^2}. \quad (2)$$

Пусть θ – угол между направлением на звезду и на точку максимального сближения частицы со звездой. Тогда $\text{tg} \theta = v_0 t / b$, а единичный вектор

$$\hat{\mathbf{r}}' = \mathbf{i} \sin \theta + \mathbf{j} \cos \theta,$$

где $\sin \theta$ – его проекция на траекторию звезды. Тогда из формулы (2) находим

$$\Delta \mathbf{v} = \frac{GM}{bv_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\hat{\mathbf{r}}'(t) d(v_0 t / b)}{1 + (v_0 t / b)^2} = \frac{GM}{bv_0} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (\mathbf{i} \sin \theta + \mathbf{j} \cos \theta) d\theta = \frac{2GM}{bv_0} \mathbf{j}.$$

Далее с помощью формулы (1) определяем приращение вектора эксцентриситета:

$$\Delta \mathbf{e} = \frac{m}{k} \cdot \frac{4G^2 M^2}{b^2 v_0^2} (\mathbf{j} \times \mathbf{r} \times \mathbf{j}), \quad (3)$$

где единичный вектор \mathbf{j} направлен от объекта в точку максимального сближения со звездой.

Поскольку для разных объектов облака Оорта векторы \mathbf{j} и \mathbf{r} ориентированы различным образом, то, согласно формуле (3), это приводит к увеличению дисперсии эксцентриситетов их орбит после прохождения звезды, что мы и видим из сравнения гистограмм на рис. 1 и 3. В других численных экспериментах, выполненных при больших значениях прицельного расстояния и скорости v_0 звезды, этот эффект менее выражен из-за сильной зависимости приращения эксцентриситета от параметров b и v_0 .

Прохождение массивной звезды через облако Оорта ведет к разрушению первоначального радиально симметричного распределения объектов, при этом наибольшее возмущение

орбит испытывают объекты, находящиеся в непосредственной близости от проходящей звезды. Это отчетливо можно видеть на рис. 5, а также на рис. 6, где показан вид облака Оорта «со стороны» до и после столкновения со звездой.

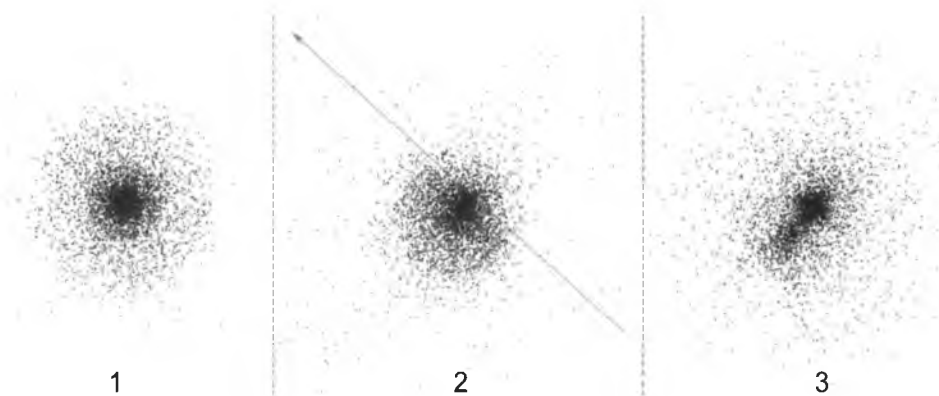


Рис. 6. Эволюция облака Оорта после столкновения: 1 – начальное распределение объектов; 2 – через 3.8×10^5 лет, 3 – через 1.6×10^6 лет после момента наибольшего сближения со звездой.

Стрелкой показана траектория звезды

Fig. 6. Evolution of the Oort cloud after the collision: 1 – the initial distribution of objects; 2 – after 3.8×10^5 years, 3 – after 1.6×10^6 years after the moment of closest approach with the star. The arrow shows the trajectory of the star

Кроме гиперболических орбит, в результате столкновения облака Оорта с массивной звездой образуются также и орбиты с малым эксцентриситетом. Были проанализированы параметры орбит 408 объектов с эксцентриситетом $e < 0,5$, среди которых объект с наименьшим эксцентриситетом орбиты $e = 0,0074$ имеет большую полуось $a = 25\ 660$ а. е. (Табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Параметры орбит с малым эксцентриситетом
The parameters of the orbits with small eccentricity

Статистические оценки	Параметры орбит				
	Эксцентриситет e	Большая полуось a , а. е.	Расстояние в перигелии q , а. е.	Расстояние в афелии a_f , а. е.	Период T , тыс. лет
Максимум	0,4990	92 539	55 636	137 390	28 151
Минимум	0,0074	4 636	2 538	6 573	316
Среднее	0,3369	29 953	20 064	39 842	5 671
Медиана	0,3589	26 592	17 964	34 581	4 336

Отметим, что медиана распределения орбит объектов по большой полуоси, равная 26 592 а. е., мало отличается от таковой (29 070 а. е. после столкновения со звездой) для всех объектов облака Оорта в нашей модели. Имеет место слабая отрицательная корреляция между e и a орбит этих объектов. Оценка коэффициента корреляции: $-0,11$, т.е. орбиты с большей полуосью a имеют в среднем меньший эксцентриситет.

Эффектом уменьшения эксцентриситета орбит в результате столкновения со звездой можно объяснить и снижение численности объектов с малым перигелийным расстоянием q . Если до столкновения в модельном образце насчитывалось 789 объектов, у которых перигелий находился в околопланетной области ($q < 35$ а. е.), то после



столкновения их число снизилось до 283. Данные об элементах орбит этих объектов содержит табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Параметры орбит с $q < 35$ а. е.
The parameters of orbits with $q < 35$ AU

Статистические оценки	Параметры орбит					
	до столкновения			после столкновения		
	e	$1/a, (\text{а. е.})^{-1}$	$q, \text{а. е.}$	e	$1/a, (\text{а. е.})^{-1}$	$q, \text{а. е.}$
Максимум	1,0081	0,205 122	34,90	1,0142	0,205 803	34,47
Минимум	0,7918	-0,001 984	0,007	0,7816	-0,002 720	0,008
Среднее	0,9933	0,000 977	14,21	0,9837	0,002 174	15,76
Медиана	0,9983	0,000 115	12,99	0,9913	0,000 466	15,72

Мы видим, что медиана их распределения по обратной большой полуоси $1/a$ значительно больше после столкновения, чем до него. Вероятно, это вызвано тем, что перигелийные расстояния q большей части из 789 объектов после столкновения со звездой существенно возросли, и они по этой причине не попали в интервал $q < 35$. Данный вывод согласуется с утверждением о том, что прохождения звезд вблизи облака Оорта приводят к увеличению перигелийных расстояний [Morbidelli, 2004].

Заключение

Таким образом, столкновение Солнечной системы с достаточной массивной звездой, влечет потерю значительной части его объектов по причине их перехода на гиперболические орбиты. В данном численном эксперименте доля таких объектов составила 33 %. Очевидно, что на раннем этапе существования Солнечной системы облако Оорта было намного более массивным, особенно, если Солнечная система возникла в составе рассеянного звездного скопления. В этом случае процесс диссипации облака из-за звездных сближений происходит более интенсивно. Действительно, эффект воздействия столкновений сильно зависит от скорости звезд и их плотности распределения в пространстве. В настоящее время средняя скорость Солнца относительно ближайших звезд равна 19,7 км/с [Аллен, 1977]. Однако в звездных скоплениях она значительно ниже. Так, например, оценка дисперсии скоростей звезд для скопления Плеяды составляет $(0,41 \pm 0,30)$ км/с [Данилов, 2015, с. 452]. Малая скорость звезд и более высокая звездная плотность в скоплении значительно усиливают эффекты воздействия близко проходящих звезд на облако Оорта.

Сближения звезд с Солнечной системой увеличивают дисперсию эксцентриситетов орбит. Как следствие, кроме гиперболических орбит, порождаются орбиты с малым эксцентриситетом ($e < 0,5$). Однако медиана распределения таких орбит по большой полуоси a всего лишь на ~ 9 % меньше медианы распределения всех объектов облака. Поэтому облако Оорта может содержать множество объектов, скрытых от наблюдений. Так, например, наблюдение кометы Галлея в афелии (35 а. е.) сейчас уже доступно с помощью крупнейших телескопов [Hainaut, 2004]. Однако на расстоянии в 30 000 а. е. от Солнца даже Юпитер виден был бы как объект 36-звездной величины, что за пределом возможностей современной наблюдательной техники.

Воздействие гравитационного поля близко проходящей звезды влечёт за собой нарушение однородности ориентации орбит и радиальной симметрии пространственного распределения объектов. После столкновения со звездой перигелии орбит концентрируются к точке максимального сближения. Поэтому, вследствие

неоднократности явления сближения Солнечной системы с достаточно массивными звездами, возможно существование многочисленных радиантов долгопериодических комет, которые в настоящий момент ещё не определены из-за сравнительного малого количества комет, открытых до настоящего времени.

Список литературы

References

1. Аллен К.У. 1977. Астрофизические величины. Пер. с англ. М.: Мир, 279. (Allen C.W. 1973, 1976. *Astrophysical quantities*. Third edition. The Athlone Press University of London, 310.)

Allen K.U. 1977. *Astrofizicheskie velichiny* [Astrophysical quantities]. Per. s angl. M.: Mir, 279. (Allen C.W. 1973, 1976. *Astrophysical quantities*. Third edition. The Athlone Press University of London, 310.)

2. Бирюков Е.Е. 2007. Захват комет из облака Оорта на орбиты галлеевского типа и орбиты семейства Юпитера. *Астрономический вестник*, т. 41, № 3: 232–240.

Biryukov E.E. 2007. *Zahvat komet iz oblaka Oorta na orbity galleevskogo tipa i orbity semejstva YUпитера* [Capturing comets from the Oort cloud into galley-type and Jupiter-family orbits]. *Astronomicheskij vestnik*, t. 41, № 3: 232–240. (in Russian)

3. Бобылев В.В., Байкова А.Т. 2017. Поиск звезд, тесно сближающихся с Солнечной системой, по данным каталогов Gaia DR1 и RAVE5. *Письма в астрономический журнал*, т. 43, № 8: 616–623.

Bobylev V.V., Bajkova A.T. 2017. *Poisk zvezd, tesno sblizhayushchihsya s Solnechnoj sistemoj, po dannym katalogov Gaia DR1 i RAVE5* [Search for stars that are close to the Solar system, according to the catalogues Gaia DR1 and RAVE5]. *Pis'ma v astronomicheskij zhurnal*, t. 43, № 8: 616–623. (in Russian)

4. Данилов В.М., Локтин А.В. 2015. Оценки приливных радиусов трех рассеянных звездных скоплений. *Астрофизический бюллетень*, т. 70, № 4: 439–455.

Danilov V.M., Loktin A.V. 2015. *Ocenki prilivnyh radiusov trekh rasseyannyh zvezdnyh skoplenij* [Estimates of tidal radii of three scattered star clusters]. *Astrofizicheskij byulleten'*, t. 70, № 4: 439–455. (in Russian)

5. Заболоцкий А.М. 2017. Вероятность сближения звезд с Солнечной системой. Материалы Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы развития науки и современного образования". Белгород: 41–43.

Zabolockij A.M. 2017. *Veroyatnost' sblizheniya zvezd s Solnechnoj sistemoj* [The probability of stars approaching the Solar system]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Aktual'nye problemy razvitiya nauki i sovremennogo obrazovaniya"*. Belgorod: 41–43. (in Russian)

6. Заболоцкий А.М. 2018. Программа для ЭВМ "Gravitational Systems". Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент) "Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем". №10. № регистрации: 2018662252.

Zabolockij A.M. 2018. *Programma dlya EHVМ "Gravitational Systems"* [Computer program "Gravitational Systems"]. *Oficial'nyj byulleten' federal'noj sluzhby po intellektual'noj sobstvennosti (Rospatent) "Programmy dlya EHVМ. Bazy dannyh. Topologii integral'nyh mikroskhem"*. №10. № registracii: 2018662252. (in Russian)

7. Задача Кеплера. Столкновения. Регуляризация. [Электронный ресурс] : [сб. работ]. 2006. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 452. URL: <http://www.iprbookshop.ru/16517.html>.

Zadacha Keplera. Stolknoveniya. Regularizaciya [Kepler problem. Clashes. Regularization]. [Ehlektronnyj resurs] : [sb. rabot]. 2006. M.-Izhevsk: Institut komp'yuternyh issledovanij. 452. URL: <http://www.iprbookshop.ru/16517.html>. (in Russian)

8. Ильина В.А., Силаев П.К. 2004. Численные методы для физиков-теоретиков. II. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 118.

Il'ina V.A., Silaev P.K. 2004. *Chislennyye metody dlya fizikov-teoretikov* [Numerical methods for theoretical physicists]. II. Moskva-Izhevsk: Institut komp'yuternyh issledovanij. 118. (in Russian)



9. Хайрер Э. и др. 1990. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. Пер. с англ. М.: Мир. 512. (Hairer E. et al. 1987. Solving Ordinary Differential Equations I: Nonstiff Problems. Berlin, Springer-Verlag. 480.)

Hajrer E.H. i dr. 1990. Reshenie obyknovennyh differencial'nyh uravnenij. Nezhestkie zadachi [Solving ordinary differential equations. Nonstiff Problems]. Per. s angl. M.: Mir. 512. (Hairer E. et al. 1987. Solving Ordinary Differential Equations I: Nonstiff Problems. Berlin, Springer-Verlag. 480.)

10. ARI Data Base for Nearby Stars. Astronomisches Rechen-Institut, Heidelberg. Available at: <http://www.wadd.zah.uni-heidelberg.de/datenbanken/aricns/gliese.htm>.

11. Bobylev V.V. 2010. Searching for Stars Closely Encountering with the Solar System. *Astronomy Letters*, Vol. 36, No. 3: 220–226.

12. Docobo J.A., Ling J.F. 2007. Orbits and system masses of 14 visual double Stars with early-type components. *The Astronomical Journal*, Vol. 133, No 4: 1209–1216.

13. Dones L. et al. 2004. Oort Cloud Formation and Dynamics. *Comets II*. University of Arizona Press: 153–173.

14. Hainaut O.R. et al. 2004. Post-perihelion observations of comet 1P/Halley. *Astronomy & Astrophysics*, 417: 1159–1164.

15. Garsia-Sanchez J. et al. 1999. Stellar Encounters with the Oort Cloud based on Hipparcos Data. *The Astronomical Journal*, Vol. 117, No 2: 1042–1055.

16. Hummel C.A. et al. 1994. Very High Precession Orbit of Capella by Long Baseline Interferometry. *The Astronomical Journal*, Vol. 107, No 5: 1859–1867.

17. Kervella P. et al. 2009. The nearby eclipsing stellar system δ Velorum I. Origin of the infrared excess from VISIR and NACO imaging. *Astronomy & Astrophysics*, 493: 107–114.

18. Mamajek E.E. et al. 2015. The Closest known flyby of a Star to the Solar System. *Astrophysical Journal Letters*, 800, L17, arXiv:1502.04655. DOI:10.1088/2041-8205/800/1/L17.

19. Marcos C.F. et al. 2018. Where the Solar system meets the solar neighbourhood: patterns in the distribution of radiants of observed hyperbolic minor bodies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, Volume 476, Issue 1: 1–5.

20. Matthews R.A.J. 1994. The Close Approach of Stars in the Solar Neighbourhood. *Q. J. R. astr. Soc.*, 35: 1–9.

21. Morbidelli A., Levison H.F. 2004. Scenarios for the origin of the orbit of the trans-neptunian objects 2000 CR₁₀₅ and 2003 VB₁₂ (Sedna). *The Astronomical Journal*, 128: 2564–2576.

22. Mullari A.A., Orlov V.V. 1996. Encounters of the Sun with nearby stars in the past and future. *Earth, Moon, and Planets*, No 72: 19–23.

23. Otero S.A. et al. 2000. Delta Velorum is an Eclipsing Binary. *Information Bulletin on Variable Stars*, No 4999.

24. Rickman H. et al. 2008. Injection of Oort Cloud comets: the fundamental role of stellar perturbations. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, Vol. 102: 111–132.