

УДК 524.45.45

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СКОПЛЕНИЯ ГИАДЫ И ПРИРОДА ДВИЖУЩЕГОСЯ СКОПЛЕНИЯ ГИАДЫ

© 2005 г. Я. О. Чумак^{1*}, А. С. Расторгуев^{1,2}, С. Аарсет³

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва

³Институт астрономии, Кембриджский университет, Великобритания

Поступила в редакцию 14.12.2004 г.

Представлены результаты моделирования динамической эволюции рассеянного скопления Гиады. Расчеты выполнялись с использованием модифицированного алгоритма NBODY6, учитывающего приливные силы и реалистическую орбиту скопления в гравитационном поле, описываемом потенциалом Миямото–Нагаи. Целью исследования было изучение природы некоторых “движущихся” скоплений. Показано, что звезды, ранее являвшиеся членами скопления, позднее могли быть выделены в пределах сферы диаметром 50 пк вокруг Солнца. Число таких звезд для выбранных значений начальной массы и вириального радиуса скопления не превышает десятка. Максимальная пространственная скорость этих звезд относительно ядра современного скопления не превышает 3 км/с. Результаты расчетов подтверждают предположение о том, что некоторые “движущиеся” скопления вблизи Солнца могут состоять из звезд, покинувших рассеянные скопления в ходе их динамической эволюции.

Ключевые слова: моделирование N -тел, движущиеся скопления, динамическая эволюция, рассеянное скопление Гиады.

NUMERICAL SIMULATIONS OF THE DYNAMICS OF THE HYADES CLUSTER AND THE NATURE OF THE MOVING HYADES CLUSTER, *by Ya. O. Chumak, A. S. Rastorguev, and S. J. Aarseth.* We present our numerical simulations of the dynamical evolution of the Hyades open cluster. The simulations were performed using a modified NBODY6 algorithm that included the tidal forces and the realistic orbit of the cluster in a gravitational field described by the Miyamoto–Nagai potential. Our goal was to study the nature of “moving” clusters. We show that the stars that have earlier been cluster members could be later identified within a sphere of 50 pc in diameter around the Sun. The number of such stars for the chosen initial mass and virial radius of the cluster does not exceed ten. The maximum space velocity of these stars relative to the core of the present-day cluster does not exceed 3 km s⁻¹. Our numerical simulations confirm the assumption that some of the moving clusters near the Sun could consist of stars that have left open clusters in the course of their dynamical evolution.

Key words: N -body simulations, moving clusters, dynamical evolution, Hyades open cluster.

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является проверка гипотезы об образовании некоторых движущихся скоплений из звезд, ушедших в результате распада рассеянных звездных скоплений, на примере скопления Гиады. Моделирование проводилось с помощью модифицированной программы NBODY6 (Аарсет, 2003).

*Электронный адрес: chyo@mail.ru

Исследование движущихся скоплений

Впервые термин “движущиеся скопления” появился в XIX веке. В это время Бессель (1841) впервые определил собственные движения большого количества звезд. Это стало возможным благодаря сравнению координат звезд, определенных Бесселем, с наблюдениями Бадделя, полученными еще в XVIII веке. Бессель впервые заметил сходство движения звезд Плеяд. Позднее Проктор (1872), анализируя собственные движения звезд, обнаружил, что пять ярких звезд ковша Большой Медведицы движутся практически одинаково.

Тем самым Проктор доказал, что эти звезды образуют единую систему — движущееся скопление.

Герцшпрунг (1909) обнаружил удивительную близость собственного движения Сириуса, находящегося 2.5 пк от Солнца, с движением звезд скопления Большой Медведицы. Герцшпрунг впервые показал, что размеры движущихся скоплений могут достигать десятков парсек. Именно с этого времени многие исследователи занимались и продолжают заниматься поисками в солнечной окрестности групп звезд с близкими пространственными скоростями, вне зависимости от расстояний между звездами.

Однако, как отмечал Эддингтон (1914), такое совпадение скоростей звезд может оказаться случайным, и требуется хороший статистический анализ структуры поля пространственных скоростей звезд, чтобы сделать заключение о реальности этих звездных группировок.

В процессе уточнения астрометрических данных и пространственных скоростей звезд некоторые движущиеся скопления оказались нереальными. Так Расмусон (1921), определив координаты точек пространственных скоростей звезд, пришел к выводу о нереальности нескольких движущихся скоплений, доказав, что общность их скоростей просто отражает движение Солнца в пространстве.

В 50-х годах XX века Эгген (1958, 1965) начал систематическое изучение движущихся скоплений. Он провел исследование ранее обнаруженных групп, начиная с классических групп Гиад, Сириуса и Большой Медведицы. Изучая звезды, принадлежащие движущейся группе Гиад, Эгген включил в эту группу также и скопление Ясли, движущееся с пространственной скоростью, близкой к скорости Гиад. Эгген исследовал как хорошо известные, так и новые звездные группы. Он выделил около двух десятков звездных групп, считая критерием общности не только близость пространственных скоростей звезд, но и дополнительный критерий — отношение $[Fe/H]$.

Эгген показал, что различиями движений членов групп в направлении, перпендикулярном к галактической плоскости (компонент скорости W), можно пренебречь при выделении членов движущихся групп по U и V компонентам скоростей. Дисперсия W -компонентов скорости группы зависит не только от начальной дисперсии скоростей, но и от размеров начального облака и от его положения относительно галактической плоскости, поскольку, как легко показать, частота колебаний звезд по z -координате значительно выше угловой частоты вращения диска и эпициклической частоты. Поэтому при выделении членов движущихся скоплений Эгген предложил игнорировать компоненты скорости W , а принимать во внимание только близость

компонентов U и V . Используя такие критерии отбора, Эггену удалось выделить около двух десятков движущихся скоплений, известных в литературе как группы Эггена.

В работе Агеяна и Белозеровой (1979) было показано, что в процессе эволюции рассеянного скопления ушедшие из скопления звезды образуют вокруг скопления обширную “корону”. Звезды короны имеют достаточно близкие значения пространственных скоростей и фактически образуют движущееся скопление. Несмотря на то, что под действием внешних факторов (дифференциальное вращение и приливные силы) корона, как и ядро скопления, достаточно быстро рассеиваются в пространстве, звезды короны могут сохранять свои близкие друг к другу пространственные скорости в течение длительного времени после распада скопления. Таким образом, весь галактический диск можно представить себе в виде взаимопроникающего множества движущихся скоплений. Однако, как отмечает Холопов (1981), эта гипотеза применима лишь к движущимся скоплениям члены которых обладают схожими пространственными скоростями, и не объясняет существование звездных групп Эггена.

В одной из работ по выделению движущихся скоплений в окрестности Солнца (Орлов и др., 1995) в качестве источника данных авторы использовали каталог близких звезд Глизе и Ярейсса (1991). Каталог Глизе и Ярейсса в то время насчитывал 1947 одиночных и кратных звезд с известными пространственными скоростями. В работе использованы данные о звездах, попадающих в окрестность Солнца радиусом $R = 25$ пк. Применяя центроидный вариант метода иерархического сгущивания в пространстве скоростей, авторам удалось надежно выявить пять движущихся скоплений (кластеров) с разностью пространственных скоростей не более 6 км/с от центрального значения с числом членов порядка 30–40. В частности, было подтверждено выделение группы скопления Гиады, насчитывающего 31 звезду.

Рассеянное скопление Гиады

Скопление Гиады сыграло большую роль в истории развития методов звездной астрономии. Вплоть до завершения космического проекта HIPPARCOS (ESA, 1997) шкала расстояний рассеянных скоплений и, следовательно, цефеид, фактически опиралась на единственное скопление — Гиады. Причиной такой уникальной роли Гиад в течение многих лет служило достаточно малое расстояние до скопления и его большая пространственная скорость относительно Солнца, что позволяло применить к этому скоплению

надежный прямой метод измерения расстояний — метод групповых параллаксов (Куликовский, 1985).

Можно с уверенностью сказать, что скопление Гиады — одно из наиболее хорошо изученных рассеянных скоплений. Определению тех или иных параметров скопления посвящено большое количество работ. Последнее и достаточно полное исследование его характеристик провели Перриман и др. (1998). В этой же работе приводится полная библиография работ, посвященных этой теме. Для определения расстояний индивидуальных звезд авторы использовали тригонометрические параллаксы каталога HIPPARCOS, построив, таким образом, трехмерную картину скопления. Для выделения членов скопления были использованы данные о параллаксах и собственных движениях, взятые из каталога HIPPARCOS, а также лучевые скорости. Были выявлены 13 новых кандидатов в члены скопления в сфере радиусом 20 пк от центра скопления, в то время как простейшие оценки приливного радиуса рассеянных скоплений такой массы в окрестности Солнца дают 8–10 пк (Расторгуев, 2003). Было показано, что векторы пространственной скорости звезд скопления характеризуются дисперсией порядка 0.3 км/с. Возраст скопления был оценен в 625 ± 50 млн. лет. Расстояние до центра масс скопления (принимая во внимание только данные из каталога HIPPARCOS) оценено в 46.3 ± 0.3 пк, что соответствует истинному модулю расстояния $(m - M) = 3^m 23$. Авторы определили форму скопления с соотношением осей ядра скопления 1.6 : 1.2 : 1, причем в расчет принимались звезды, находящиеся в пределах сферы радиусом 20 пк. Большая ось наклонена к оси X , направленной к центру Галактики, под углом около 16° ; таким образом, эллипсоид скопления ориентирован почти точно вдоль основных галактических направлений. Радиус полумассы оценен в $r_h = 5.7$ пк, а полная масса — в $400 M_\odot$. Эти структурно-массовые характеристики скопления Гиады, по нашему мнению, являются на настоящий момент наиболее полными и надежными. В дальнейшем именно они использовались для сравнения с результатами моделирования.

Для моделирования динамической эволюции звездного скопления Гиады была использована хорошо известная программа численного моделирования NBODY6 (Аарсет, 2003), получившая признание во всем мире и очень часто используемая для моделирования динамической эволюции звездных скоплений. Алгоритм Аарсета наиболее приближен к реальным физическим процессам, происходящим в звездной системе. При моделировании учитываются не только тесные сближения звезд и связанная с ними потеря массы

скоплением, но и внешнее приливное поле, взаимодействие скопления с молекулярными облаками, физическая эволюция звезд-членов скопления. Динамика двойных, тройных и кратных систем рассчитывается в программе отдельно и более точно. Описание алгоритма и различных версий его реализации в программах NBODY1–6 можно найти в работах Аарсета (1973, 1977, 1999). Наиболее полное описание программы и ее возможностей можно найти в новой книге Аарсета (2003).

Программа NBODY6 и более ранние реализации алгоритма Аарсета неоднократно использовались для проведения численного моделирования эволюции скопления Гиады. Так Оорт (1979) пытался обнаружить сплюснутость ядра в направлении, перпендикулярном галактическому диску, сравнивая наблюдательные данные с данными результатов моделирования Аарсета (1973). Аарсет (1992) путем численного моделирования исследовал влияние двойных звезд на темп эволюции скопления. Кроуп (1995) нашел хорошее согласие между функцией светимости Гиад и функцией светимости смоделированного скопления. Именно так он подобрал начальные условия моделирования, оценив начальную массу Гиад в $1300 M_\odot$. Фон Хиппел (1998) путем численного моделирования исследовал влияние популяции белых карликов на эволюцию скопления. Портегис Зварт и др. (2001) нашли начальные условия для моделирования нескольких рассеянных скоплений, в том числе Гиад. Мэдсен (2003) исследовал кинематику ядра Гиад, сравнивая наблюдательные данные каталога HIPPARCOS с результатами моделирования с помощью программы NBODY6.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОПЛЕНИЯ ГИАДЫ

Начальные условия и параметры моделирования

С помощью программы NBODY6 в данной работе был проведен ряд численных экспериментов по моделированию динамической эволюции рассеянного скопления Гиады в приливном поле Галактики. Опишем выбранные начальные условия расчетов.

Положения и массы звезд были заданы с помощью генератора случайных чисел в соответствии с заданным распределением плотности и принятой функцией масс. В качестве начального распределения плотности использовано распределение Пламмера (Пламмер, 1915; Спитцер, 1987). Начальная функция масс была взята из работы Кроупы (1993). Для вириального коэффициента принято начальное равновесное значение $Q = 0.5$. Начальный вириальный радиус R_v — один из свободных параметров моделирования.

Орбита скопления и внешнее приливное возмущение рассчитывались с помощью трехмерной аналитической модели галактического потенциала Миamoto и Нагаи (1975). Следует отметить, что в данной работе моделирование звездной эволюции Гиад с помощью программы NBODY6 проведено для более реалистического случая движения по вытянутой орбите, в отличие от прежних работ, где принималась круговая орбита скопления вокруг центра Галактики с постоянной угловой скоростью движения $\Omega = 26.4$ км/с/кпк (Мэдсен, 2003). В соответствии с этим структура поля приливных сил также более сложна и меняется со временем.

Интервал времени моделирования был принят равным возрасту Гиад, который по данным Перримана (1998) составляет 625 ± 50 млн. лет. Для того чтобы найти начальное положение Гиад в Галактике вблизи момента его образования, а также начальный вектор скорости скопления, необходимо было восстановить орбиту скопления. Для этой цели мы рассчитали орбиту скопления и орбиту Солнца в прошлом. Начальными условиями служили современные относительные координаты и полные пространственные скорости Гиад и Солнца (с учетом направления галактического вращения). Динамическая эволюция скопления моделировалась на протяжении интервала времени, близкого к его возрасту, составляющему 675 млн. лет, с учетом неточности его определения. Таким образом, для моментов времени 575, 625 и 675 млн. лет назад были найдены галактические координаты и компоненты скорости скопления, впоследствии использованные в качестве начальных условий моделирования орбиты Гиад.

На рис. 1 показана проекция восстановленной орбиты Гиад на галактическую плоскость XU . За время жизни скопление совершило около трех оборотов вокруг центра Галактики. Штриховой линией выделена часть орбиты от -675 до -575 млн. лет. Этот участок орбиты соответствует неопределенности времени образования скопления.

Программа NBODY6 может работать в двух различных режимах: с удалением и без удаления звезд, в процессе расчета ушедших за удвоенный вириальный радиус скопления. Мы отслеживали динамику звезд, покинувших скопление, поскольку одной из целей работы было изучение движущихся групп, происхождение которых связано с распадом рассеянных скоплений. Поэтому мы фактически использовали режим слежения за индивидуальными орбитами ушедших из скопления звезд. Однако оригинальный вариант программы не предусматривал такой возможности при достаточно большом времени интегрирования. Поэтому в алгоритм расчета были введены некоторые изменения. В режиме

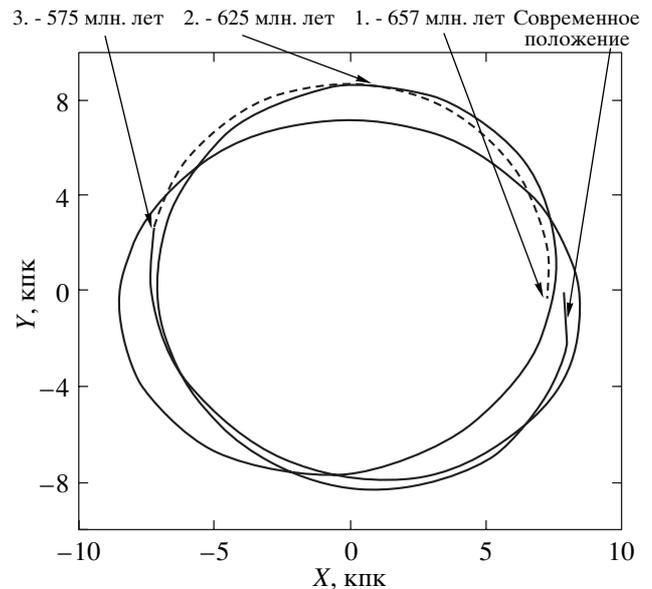


Рис. 1. Орбита скопления Гиад. Отмечено положение скопления в разные времена, используемое в качестве начальных условий интегрирования.

слежения продолжается интегрирование уравнений движения ушедших звезд, но с учетом только лишь внешнего поля Галактики. Силы, действующие на эти звезды со стороны звезд — членов скопления, не учитываются. Эти изменения привели к появлению нескольких новых модулей программы NBODY6 и частичному изменению существующих модулей.

Известно, что наблюдаемое количество двойных звезд в рассеянных скоплениях трудно объяснить одним лишь образованием двойных при тройных или кратных сближениях звезд в процессе динамической эволюции. Их число можно объяснить только наличием изначальных двойных, т.е. двойных звезд, образовавшихся в ходе фрагментации скопления из протозвездного облака. Кроме того, как показал Аарсет (1992), наличие первичных двойных в скоплении может существенно повлиять на ход динамической эволюции скопления. Поэтому в некоторых работах по численному моделированию динамической эволюции скоплений наличие первичной популяции двойных звезд уделяется весьма большое внимание. Принимаемая доля первичных двойных от общего числа звезд у разных авторов различна. Так, например, Портегейз Зварт и др. (2001) принимают $F_{bin} = 50\%$, Кроуп (1995) — 100% , Мэдсен (2003) — 86% . Есть работы, где изначальные двойные вообще не учитываются (см., например, Терлевич, 1987). В нашем исследовании мы не ставили целью изучить влияние изначальных двойных на ход эволюции скопления, так как этот вопрос и так достаточно широко обсуждался в

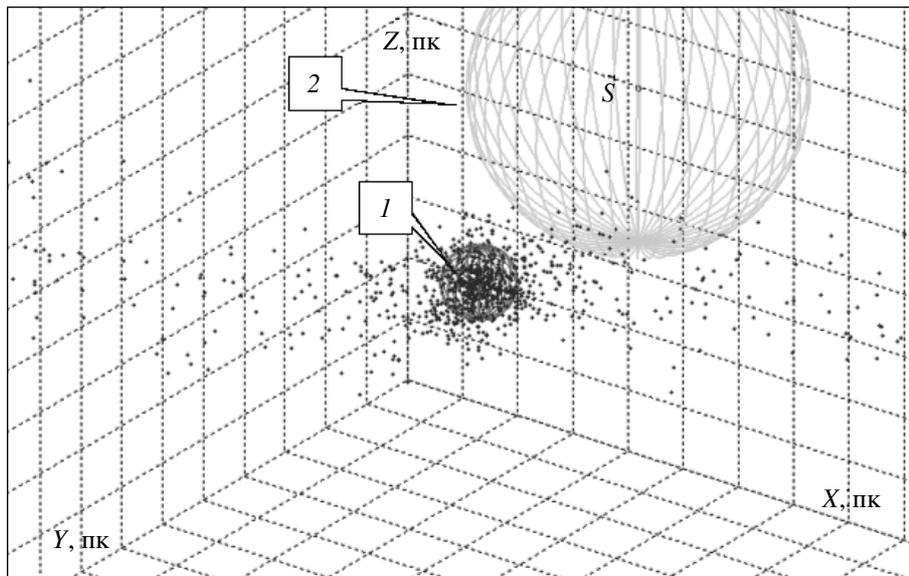


Рис. 2. Финальная картина моделирования в системе координат XYZ . Сфера 1 — ядро скопления, сфера 2 — окрестность Солнца в пределах радиуса 25 пк.

перечисленных работах. В связи с этим мы приняли для доли двойных F_{bin} значение 20%, опираясь на результаты работы Аарсета (1992), чтобы сделать моделирование наиболее реалистичным.

Программа NBODY6 позволяет учитывать процесс физической эволюции звезд, основной дина-

мический эффект которого — уход звезд вследствие асимметричного импульса при взрывах сверхновых. Подробно алгоритм учета звездной эволюции описан в книге Аарсета (2003). Так как время моделирования достаточно велико (около 600 млн. лет), то этот эффект может оказать определенное влияние на динамическую эволюцию скопления, и по этой причине он был учтен во время моделирования.

Техника моделирования

На рис. 2 представлен пример пространственного распределения звезд на финальной стадии численного моделирования в прямоугольной системе координат XYZ , в которой ось X направлена от центра Галактики, ось Y лежит в плоскости диска Галактики и направлена в сторону вращения Галактики, ось Z направлена к северному полюсу Галактики. Начало системы координат совпадает с центром масс ядра скопления. Точками изображены звезды, как все еще принадлежащие Гидам, так и ушедшие за приливный радиус скопления. Сфера 1 вокруг центра скопления имеет радиус 10.3 пк, что соответствует приливному радиусу современных Гида, согласно Перриману и др. (1998).

Зная современное расстояние и координаты центра масс скопления Гида, несложно найти положение Солнца в этой системе координат. Согласно Перриману и др. (1998), координаты Солнца равны: $X = -43.1$ пк; $Y = -0.3$ пк; $Z = 17.1$ пк. Положение Солнца на рис. 2 обозначено буквой "S". Сфера 2 вокруг Солнца имеет радиус 25 пк. В сфере такого радиуса в работе Орлова и др.

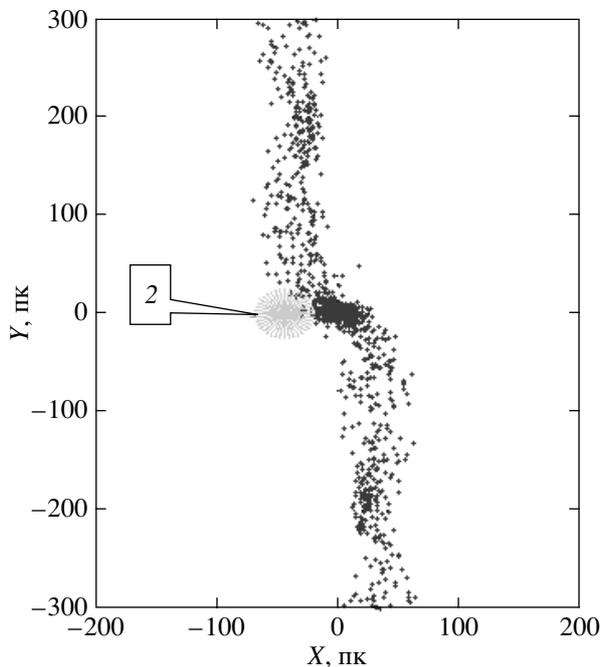


Рис. 3. Проекция финальной картины моделирования на плоскость XY . В центре координат — ядро скопления. Сфера 2 — окрестность Солнца в пределах радиуса 25 пк.

(1995) была обнаружена 31 звезда, предположительно относящаяся к движущемуся скоплению Гиады. Из рисунка видно, что часть звезд, покинувших скопление Гиады, попадает в эту сферу.

На рис. 3 показана проекция на плоскость XU пространственного положения звезд Гиад в прямоугольной системе координат XYZ , связанной со скоплением. Рисунок 3 представляет собой проекцию рис. 2 в более мелком масштабе.

Как видно из рисунка, выделяется центральная область с повышенной концентрацией звезд, а также два звездных “хвоста”, вытянутых в направлении оси Y , т.е. в направлении орбитального вращения, и слегка искривленных. Плотная центральная область представляет собой современное ядро скопления, а звездные “хвосты” состоят из звезд, ушедших из скопления на различных стадиях его эволюции и все еще сопровождающих его при движении по орбите.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Начальные условия, описанные в пункте “Начальные условия и параметры моделирования”, были жестко заданы для всей серии численных экспериментов. В качестве свободных параметров были взяты начальная масса M_0 и начальный вириальный радиус R_v . Радиус R_v изменялся в пределах от 1 до 7.5 пк, в то время как начальная масса — в пределах от 600 до 1700 M_\odot .

Для оценки истинных значений параметров M_0 и R_v была проведена серия численных экспериментов с различными комбинациями этих параметров. Мы предположили, что из соображений соответствия реальным данным наблюдений Гиад значения параметров M_0 и R_v должны быть выбраны такими, чтобы в центральную область ядра попали звезды, суммарная масса которых близка к современной массе ядра Гиад. Масса Гиад, согласно Перриману и др. (1998), составляет приблизительно 400 M_\odot в пределах радиуса 10.3 пк. Необходимо отметить, что оценки других авторов достаточно близки к оценке Перримана. Так, Мэдсен (2003) оценивает массу Гиад в 460 M_\odot , Рейд (1993) дает оценку 410–480 M_\odot .

На рис. 4 показана зависимость получившейся в результате моделирования конечной массы ядра скопления M_C , от начальной массы всего скопления M_0 для различных начальных значений вириальных радиусов R_v . Хорошо видно, что для выбранного начального значения вириального радиуса зависимость конечной массы ядра скопления от начальной массы близка к линейной. Также хорошо видно, что для каждого заранее заданного начального вириального радиуса можно подобрать начальную массу M_0 так, чтобы результирующая

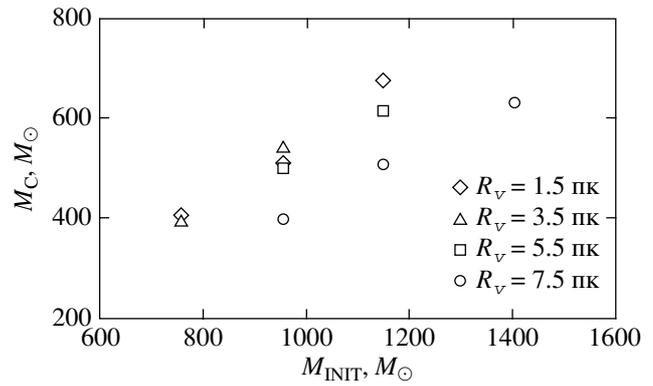


Рис. 4. Зависимость современной массы ядра скопления Гиады M_C от начальной массы M_{INIT} для различных начальных значений вириального радиуса R_v . Для значений вириального радиуса в интервале 1.5–5.5 пк результаты практически не различаются.

масса ядра скопления M_C согласовывалась с современным значением. Результаты расчетов для вариантов 1–3 близки между собой.

Для исследования образовавшегося смоделированного “движущегося скопления” рассматривалась солнечная окрестность — сфера 2. Если дисперсия скоростей звезд, покинувших скопление и попавших в эту сферу, не превышает величину критерия близости пространственных скоростей, использованного в работах по выделению членов движущихся скоплений (см., например, работу Орлова и др., 1995), то это могло бы служить важным аргументом в пользу рассматриваемой гипотезы о происхождении движущихся скоплений.

В результате более 30 проведенных численных экспериментов стало ясно, что во всех экспериментах, удовлетворяющих описанному выше критерию массы финального ядра, в сферу 2 действительно попадает определенное количество звезд. Их число меняется от 1 до 11. Этот результат может служить аргументом в пользу того, что среди членов движущегося скопления Гиады действительно есть звезды, ранее принадлежащие Гиадам. Их количество сравнительно невелико и составляет в среднем по всем экспериментам 5–7 звезд. Их массы заключены в пределах от 0.3 до 2 M_\odot . Среднее “расстояние” в пространстве скоростей от вектора скорости ядра скопления составляет 1.4 км/с., а максимальное расстояние — 3 км/сек. Отметим также, что в некоторых случаях в сферу 2 попадают двойные звезды.

Были проведены серии экспериментов с временами моделирования $T = 575$ млн. лет и $T = 675$ млн. лет. Сравнение полученных результатов представлено на рис. 5.

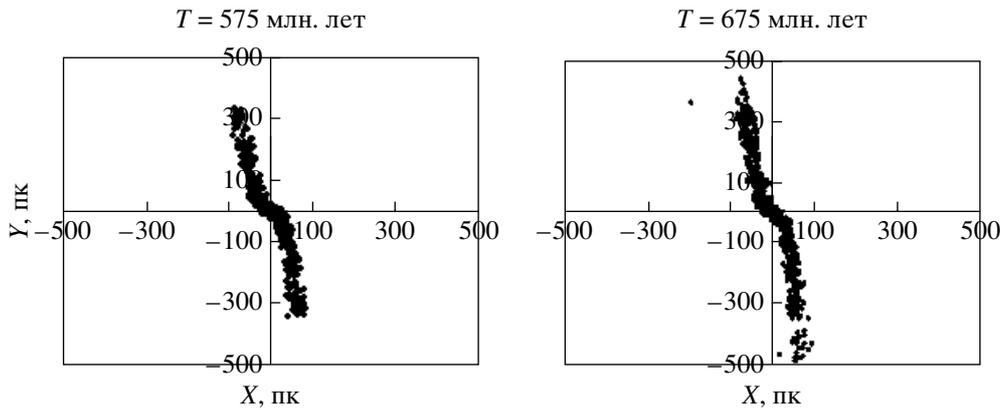


Рис. 5. Проекция финальных конфигураций для времен моделирования $T = 575$ и 675 млн. лет на плоскость XY . Ядро скопления — в центре координат.

Из рисунка видно, что за 100 млн. лет изменяются длины звездных “хвостов”, но общая картина остается неизменной. В течение этого времени звезды продолжают покидать ядро скопления, переходя в “хвосты”, а сами “хвосты” продолжают вытягиваться вдоль направления движения скопления. Масса ядра за период порядка 100 млн. лет для скопления с начальной массой $1000 M_{\odot}$ и начальным вириальным радиусом $R_v = 3.5$ пк уменьшается приблизительно на $50 M_{\odot}$. Однако толщина “хвостов” практически не меняется. Соответственно количество звезд в сфере 2 также не изменяется.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных численных экспериментов установлено, что в окрестности Солнца могут наблюдаться звезды, ранее принадлежавшие скоплению Гиады и в процессе динамической эволюции покинувшие скопление. Максимальная пространственная скорость этих звезд относительно ядра скопления составляет $C = 3$ км/с. Такая величина параметра C дает основание говорить о том, что движущиеся скопления действительно могут формироваться из звезд, покинувших некоторые рассеянные скопления. Так как метод выделения движущегося скопления, использованный в работе Орлова и др. (1995), фактически основан на сравнении пространственных скоростей звезд в солнечной окрестности со скоростью самого скопления, то при выборе величины максимальной разности пространственных скоростей, используемой для выделения членов движущихся скоплений, следует учитывать найденное значение расстояния C . Выбор меньшего, чем в работе Орлова и др. (1995), значения критерия близости скоростей C приведет, по нашему мнению, к уменьшению числа потенциальных членов движущегося скопления Гиады и к улучшению согласия с результатами численных

экспериментов. Кроме того, при выборе значения C должны учитываться и другие факторы, такие как, например, погрешность определения лучевых скоростей и собственных движений звезд.

Авторы благодарят за частичную поддержку Российский фонд фундаментальных исследований (грант № 02-02-16667) и грант Президента поддержки ведущих научных школ (НШ-389-2003-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аарсет (S.J. Aarseth), *Vistas Astron.* **15**, 13 (1973).
2. Аарсет (S.J. Aarseth), *Rev. Mex. Astron. Astrofísica* **3**, 199 (1977).
3. Аарсет (S.J. Aarseth), *MNRAS* **257**, 513 (1992).
4. Аарсет (S.J. Aarseth), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **111**, 1333 (1999).
5. Аарсет (S.J. Aarseth), *Gravitational N-Body Simulations* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2003).
6. Агемян Т.А., Белозерова М.А., *Астрон. журн.* **56**, 9 (1979).
7. Бессель (F.W. Bessel), *Konigsberg: Im Verlage der Gebruder Bortrager* **1**, 209 (1841).
8. Герцшпрунг (E. Hertzsprung), *Astrophys. J.* **30**, 135 (1909).
9. Глизе, Ярейсс, (W. Gliese and H. Jahreiss), *Preliminary Version of the Third Catalogue of Nearby Stars. The Astronomical Data Center CD-ROM: Selected Astronomical Catalogs, Vol. I*; L.E. Brozmann, S.E. Gesser (eds.), *NASA/Astronomical Data Center, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD* (1991).
10. Кроуп (P. Kroupa), *MNRAS* **277**, 1522 (1995).
11. Кроуп и др., (P. Kroupa, C. Tout, and G. Gilmore), *MNRAS* **262**, 545 (1993).
12. Куликовский П.Г., *Звездная астрономия* (М.: Наука, 1985), с. 272.
13. Мэдсен (S. Madsen), *Astron. Astrophys.* **401**, 565 (2003).
14. Миamoto, Нагаи (M. Miyamoto and R. Nagai), *Publ. Astron. Soc. Japan* **27**, 533 (1975).

15. Оорт (J.H. Oort), *Astron. Astrophys.* **78**, 312 (1979).
16. Орлов В.В. и др., *Астрон. журн.* **72**, 495 (1995).
17. Перриман и др. (M.A.C. Perryman, A.G.A. Brown, Y. Lebreton, *et al.*), *Astron. Astrophys.* **331**, 81 (1998).
18. Пламмер (H.C. Plummer), *MNRAS* **76**, 107 (1915).
19. Портегейз Зварт и др. (S.F. Portigies Zwart, S.L.W. McMillan, P. Hut, and J. Makino), *MNRAS* **321**, 199 (2001).
20. Проктор (R.A. Proctor), *MNRAS* **33**, 105 (1872).
21. Расмусон (N.H. Rasmuson), *Medd. Lunds Astron. Observ.* **26**, 62 (1921).
22. Расторгуев А.С., *Конспект лекций “Элементы динамики звездных систем”* (М.: ГАИШ МГУ, 2003).
23. Рейд (I.N. Reid), *MNRAS* **265**, 785 (1993).
24. Спитцер (L. Spitzer), *Dynamical Evolution of Globular Clusters* (Princeton: Princeton Univ. Press, 1987).
25. Терлевич (E. Terlevich), *MNRAS* **224**, 193 (1987).
26. фон Хиппел (T. von Hippel), *Astron. J.* **115**, 1536 (1998).
27. Холопов П.Н., *Звездные скопления* (М.: Наука, 1981).
28. Эгген (O.J. Eggen), *MNRAS* **118**, 65 (1958).
29. Эгген (O.J. Eggen), *Stars and Stellar Systems* (Chicago, London: Chicago Univ. Press, 1965).
30. Эддингтон (A.S. Eddington), *Stellar Movements and the Structure of the Universe* (London: Mac Millan and Co., XII + 266 p., 1914).
31. ESA, *The HIPPARCOS and TYCHO catalogues* (ESA SP-1200). Noordwijk: ESA, 1997.