

На правах рукописи

УДК 524.47:520.8

Чумак Ярослав Олегович

**ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ
ДВИЖУЩИХСЯ СКОПЛЕНИЙ**

Специальность 01.03.02 - астрофизика, радиоастрономия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2006

Работа выполнена на кафедре экспериментальной астрономии Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и в отделе исследования Галактики и переменных звезд ГАИШ МГУ

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук,
профессор Расторгуев Алексей Сергеевич,
(физический факультет МГУ)

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук
Орлов Виктор Владимирович (НИАИ им.
В.В.Соболева СПбГУ)

Кандидат физико-математических наук
Семенцов Валериан Никитич (ГАИШ
МГУ)

Ведущая организация:

Астрокосмический центр ФИ РАН

Защита диссертации состоится 15 июня 2006 г. в 14:00 часов на заседании Диссертационного совета Д 501.001.86 при МГУ им. М.В.Ломоносова по адресу: 119992, Москва, Университетский проспект, 13, ГАИШ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга.

Автореферат разослан 10 мая 2006 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета

к.ф.-м.н.

С.О. Алексеев

Общая характеристика работы

Актуальность. Общепринято, что звезды возникают не по одиночке, а группами в больших газовой-пылевых облаках или скоплениях небольших облаков, входящих в состав спиральных ветвей Галактики. Звезды, возникшие из одного протозвездного облака, имеют сходные кинематические характеристики: близкие значения начальных координат и относительно небольшую внутреннюю дисперсию скоростей и, таким образом, представляют собой одно гигантское движущееся скопление. Вулли (1965) высказал мысль о том, что группы Эггена или местные потоки представляют собой наблюдаемые в районе Солнца отдельные участки таких гигантских кинематических образований. Поскольку само протозвездное облако неоднородно, а процесс звездообразования связан с нелинейными процессами в газопылевой среде, протозвездное облако может частично или полностью распасться на звездные кластеры разной населенности. Вопрос о распределении таких кластеров по числу входящих в их состав звезд мало изучен. Можно, однако, предположить, что мало населенных кластеров существенно больше, чем групп с большим числом членов. Такие звездные кластеры после периода бурной динамической релаксации превращаются в молодые рассеянные звездные скопления, соответственно, разной населенности. Рассеянные скопления, далее, эволюционируют, и под действием диссипативных и приливных сил теряют значительное число своих членов, вплоть до полного распада. Время жизни

рассеянного скопления напрямую зависит от первоначального числа входящих в него звезд. Возраст самых старых рассеянных скоплений обычно составляет миллиарды лет, что существенно меньше возраста Галактики, и не превышает 10^{10} лет. Полный распад небольших рассеянных скоплений происходит за время порядка 10^8 лет. Это означает, что за время жизни Галактики значительное количество рассеянных скоплений уже распалось. Какова дальнейшая судьба популяций звезд, покинувших скопления во время их эволюции? Обычно, внимание исследователей привлекало изучение структуры самих рассеянных скоплений, их физической и динамической эволюции. Вопросы о кинематических характеристиках, устойчивости, динамической эволюции и структуре популяций звезд покинувших скопления изучены слабо. Понятно, что такие звездные популяции в силу близости векторов пространственных скоростей и относительно небольшой внутренней дисперсии скоростей в течение длительного времени также представляют собой движущееся потоки или кинематические ансамбли. В доступной измерением околосолнечной окрестности они могут наблюдаться как движущиеся скопления. Такие кинематические ансамбли являются важной составляющей частью звездного населения плоской составляющей Галактики. Существует точка зрения, что звездное население диска Галактики состоит из большого числа взаимопроникающих движущихся потоков, образовавшихся из рассеянных скоплений в результате их диссипации. Таким образом, исследования такого рода объектов играют фундаментальную роль в

понимании кинематической структуры и динамической эволюции плоской составляющей Галактики.

Бурное развитие средств астрометрических и спектральных наблюдений, в том числе с бортов космических аппаратов, существенно расширило объем данных по высокоточным собственным движениям и лучевым скоростям звезд. Это дало в руки исследователей огромный объем нового наблюдательного материала, который позволяет на качественно новом уровне изучать кинематику звезд в околосолнечной окрестности. Получаемые при этом результаты требуют всестороннего теоретического осмысления. В этом плане численное моделирование кинематических ансамблей – остатков рассеянных скоплений – становится особенно актуальным. Такой подход принципиально позволяет разобраться в сложной картине кинематики околосолнечной окрестности и получить из современных данных наблюдений важные выводы о процессе звездообразования и эволюции первоначальных звездных кластеров, а также структуре и динамике звездного населения диска Галактики. Настоящая работа является шагом в этом направлении.

Цель работы:

1. Численно-экспериментальное исследование динамической эволюции реалистических моделей рассеянных скоплений разной населенности и возраста с учетом диссипации и приливных сил.

2. Расчеты характеристик «шлейфов» близких рассеянных скоплений, состоящих из звезд, покинувших скопления в ходе динамической эволюции.
3. Проверка гипотезы о движущихся скоплениях как группах звезд, являющихся частью протяженных кинематических ансамблей звезд, входивших ранее в рассеянные скопления.
4. Сравнение результатов моделирования с данными наблюдений известных движущихся скоплений.

Научная новизна.

1. Впервые к исследованию происхождения и эволюции движущихся скоплений применен метод вычислительного эксперимента.
2. Модифицирован алгоритм для моделирования динамической эволюции популяций звезд покинувших рассеянное скопление. Разработаны дополнительные программные модули к программе NBODY6, реализующие этот алгоритм (Совместно с автором программы NBODY6 С. Аарсетом).
3. Методом численного эксперимента впервые проведено детальное исследование структуры и динамики популяций звезд, покинувших скопления в результате динамической эволюции, в приливном поле Галактики.
4. Для семи ближайших рассеянных скоплений – Гиады, Ясли, Волосы Вероники, Плеяды, IC 2391, IC 2602, Альфа Персея - построены динамические модели их шлейфов - популяций звезд, покинувших эти

скопления. Проанализирована возможность поиска таких звезд среди близких звезд с известными пространственными скоростями.

Практическая и научная ценность.

1. В диссертации на основе программы NBODY-6 разработан метод анализа динамической эволюции рассеянных скоплений с учетом звезд, покинувших скопления в результате их диссипации. Метод, включающий алгоритм и соответствующие дополнительные программные модули к программе NBODY-6, позволяет исследовать широкий спектр задач, связанных с решением проблем кинематики звезд в околосолнечной окрестности.
2. В диссертации (см. Приложение) содержится подробное руководство по применению программы NBODY-6 с упомянутыми дополнительными модулями.
3. Создана программа Nbody6Pro, которая может быть использована не только для проведения широкого спектра вычислительных экспериментов по проблеме N тел, но также и в методических целях. С помощью NBody6Pro можно проводить процесс обучения основам численного моделирования звездных систем. Программа также может быть использована для демонстраций динамических и эволюционных эффектов в звездных системах.
4. В диссертации на основе вычислительных экспериментов по динамической эволюции рассеянных скоплений показано существование не выявленных и не исследовавшихся ранее кинематических объектов

Галактики - протяженных популяций звезд, возникающих в результате распада рассеянных скоплений – звездных шлейфов.

5. Построены модели этих объектов, включающие такие их характеристики, как динамический возраст, геометрические размеры, дисперсию скоростей в орбитальной системе координат, их положение в пространстве в зависимости от величины компонентов начальной орбитальной скорости родительского скопления и др.
6. Построены модели шлейфов ближайших к Солнцу семи рассеянных скоплений.
7. Проанализирована гипотеза о происхождении некоторых известных в околосолнечной окрестности движущихся скоплений как кинематических ансамблей, являющихся доступной для наблюдения частью звездных шлейфов ближайших рассеянных скоплений. Показано, что движущееся скопление Гиады может иметь такую природу.

Апробация.

Результаты, представленные в диссертации, и методы их получения докладывались на следующих конференциях и совещаниях:

- Чумак Я.О. Расторгуев А.С. //ВАК 2004, Тезисы докладов, ГАИШ, МГУ, Москва, 2004, с.242
- Чумак Я.О. // Международный симпозиум "АСТРОНОМИЯ 2005 - современное состояние и перспективы" 30 мая - 6 июня 2005 года, Россия, Москва. Тезисы докладов. Труды ГАИШ, т.78, М. 2005, 115с.

- Чумак Я.О. // Сборник тезисов докладов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов 2004». Секция физика. Из-во физ.-фак. МГУ, 2005, с.69
- Чумак Я.О. Расторгуев А.С. //Семинар-совещание «От спутников до галактик». Тезисы докладов. С-Пб Гос. Университет, Санкт-Петербург, 2005, с.19
- Chumak Y.O., Rastorguev F.S., Chumak O.V. // Numerical experimental research of irregular forces - JENAM 2000. Abstracts, M. 2000.

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 124 страницы, в том числе 40 рисунков и 7 таблиц.

Положения, выносимые на защиту:

1. Путем численных экспериментов в динамике N гравитирующих тел показано существование протяженных динамических образований - звездных шлейфов, вытянутых вдоль галактических орбит рассеянных скоплений и состоящих из звезд, в разное время покинувших скопления.
2. Показано, что звезды шлейфа имеют близкие по величине и направлению вектора пространственной скорости, вследствие чего звездные шлейфы могут наблюдаться как движущиеся звездные скопления.
3. Рассчитанные свойства шлейфов:

- шлейф состоит из двух ветвей - опережающей и отстающей, начинающихся в области точек Лагранжа L1 и L2 скопления и вытягивающихся затем вдоль галактической орбиты скопления;
- геометрические параметры шлейфа (стандартная модель) связаны с возрастом скоплений: шлейф растет вдоль орбиты рассеянного скопления с постоянной скоростью ~ 1.2 пк/млн. лет; ширина шлейфа (направление центр – антицентр Галактики) со скоростью ~ 0.03 пк/млн. лет; толщина шлейфа в направлении перпендикулярном галактической плоскости растет со скоростью ~ 0.005 пк/млн. лет.
- постоянство величины среднеквадратичной скорости звезд шлейфа в пределах возрастов скоплений от 100 до 1300 млн. лет.

4. Протяженность d и число звезд n частей шлейфов, попавших в околосолнечную сферу радиусом 100 пк, для семи ближайших рассеянных скоплений: Гиады $d \approx 160$ пк, $n \approx 150$; Плеяды, $n \approx 6$; Волосы Вероники $d \approx 80$ пк, $n \approx 80$. Для скоплений Ясли, Альфа Персея, IC 2391, IC 2602 размеры и положение шлейфов таково, что их звезды не попадают в указанную сферу.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во **Введении** обосновывается актуальность проблем, решаемых в диссертации, и формулируются цели работы.

В **Главе 1** обсуждаются общие проблемы происхождения и эволюции движущихся скоплений.

В **п. 1.1** дан краткий исторический обзор наиболее значительных работ в этой области. Особо отмечена фундаментальная работа Эггена (1965), с которой, собственно, начинается систематическое изучение движущихся скоплений. Приведены результаты современных работ по исследованию движущихся скоплений.

В **п. 1.2** в связи с гипотезой Агеяна и Белозеровой (1979) о происхождении движущихся скоплений, осуждаются некоторые вопросы возникновения и эволюции корон звездных скоплений и исследование корон реальных скоплений в работах Холопова и Артюхиной (см. книгу Холопова (1981)). Рассмотрены возможные варианты гипотезы о происхождении движущихся скоплений из рассеянных звездных скоплений в результате динамической эволюции последних.

В **п. 1.3** обсуждаются основные положения численного моделирования гравитирующих систем. Рассмотрены основные концепции решения проблемы N тел. Обсуждаются характерные пространственные и временные шкалы в задаче динамической эволюции звездных скоплений.

В **п. 1.4** рассмотрены основные особенности программ NBODY6 и NBODY6PRO. Особое внимание уделено алгоритму Аарсета и его программе NBODY6 (Аарсет, 2003), которая на настоящий момент является наиболее

продвинутым инструментом для решения задач прямого численного моделирования динамической эволюции шаровых и рассеянных скоплений. Дан краткий обзор программы NBODY6PRO.

В задачах численного моделирования важную роль играет выбор начальных условий. Фактически проблема начальных условий тесно связана с фундаментальной проблемой возникновения звездных популяций из галактической диффузной материи. Программа NBODY6 позволяет реализовать широкий выбор значений начальных параметров и функций, таких как число звезд N , функции распределения начальной плотности и скоростей, функции масс, процент первично двойных звезд, параметры приливного поля Галактики в месте рождения скопления и другие. Вопросы выбора конкретных функций и начальных значений, необходимых для целей настоящего исследования обсуждаются в последнем параграфе (**п. 1.5**) первой главы.

В **Главе 2** рассмотрена структура и динамика звездных шлейфов рассеянных скоплений. Представлены результаты исследования образования и динамической эволюции звездных шлейфов путем численного моделирования, а также определение их общих характеристик - пространственной плотности, дисперсии скоростей звезд, размеров и пространственной ориентации относительно скопления и плоскости галактического диска.

В **п.2.1** обсуждаются основные особенности моделирования шлейфов рассеянных скоплений. Методом вычислительного эксперимента с помощью модифицированной программы С. Аарсета NBODY6 исследованы возникновение, структура и динамическая эволюция популяции звезд,

покинувших рассеянные скопления. Показано, что в поле приливных сил Галактики популяция звезд, покинувших скопление, вытягивается вдоль орбиты скопления симметрично относительно его ядра в виде звездных шлейфов увеличивающихся размеров, подобно метеорным роям, после распада комет.

В **п.2.2** обсуждаются допустимые пределы варьирования начальных условий. Такие данные необходимы для построения сетки реалистичных значений начальных условий для моделирования различных рассеянных скоплений.

В **п.2.3** представлена «стандартная» модель шлейфа рассеянного скопления. Для рассеянного скопления с характерными средними значениями начальных условий, представлены такие параметры шлейфа, как его длина, как функция времени, характерные толщина и ширина шлейфа, изменения со временем среднеквадратичных скоростей в шлейфе и др. Такая модель необходима для сравнения параметров шлейфов для различных скоплений.

В **п.2.4** исследованы зависимости параметров шлейфа от начального числа звезд и вириального радиуса. Получены такие характеристики звездных шлейфов, являющиеся функцией времени, как длина, поперечное сечение, количество звезд, распределение звезд по скоростям и др., в зависимости от начального вириального радиуса и начального числа звезд.

В **п.2.5.** рассчитаны параметры шлейфов для реалистических галактических орбит скоплений. Исследованы параметры звездных шлейфов в зависимости начальных условий моделирования, не только таких как число

звезд, плотность скопления, но и эксцентриситет галактической орбиты скопления в плоскости галактического диска, а также скорость по z-координате.

В **п.2.6.** обсуждаются вопросы эволюции малых скоплений. Таких скоплений возникает существенно больше, чем богатых скоплений. Показано, что такие скопления распадаются достаточно быстро (время полного распада ~ 400 млн. лет) и все звезды переходят в шлейф. На основе полученных результатов сделан вывод о том, что наблюдаемые в районе Солнца кинематические группы (Холопов, 1981) могут иметь подобную природу, а значительная часть звездного населения галактического диска может состоять из взаимопроникающих звездных потоков, представляющих собой распавшиеся ранее рассеянные скопления.

В **п.2.7.** обсуждаются вопросы о времени жизни звездных шлейфов. Рассматриваются различные динамические механизмы, воздействующие на диссипацию шлейфов. Показано, что наибольшее влияние в этом плане могут оказывать гигантские молекулярные облака. Получен вывод, что, время жизни шлейфов может быть порядка 1-1.5 миллиарда лет.

В **п.2.8.** «Обсуждение и выводы» приведены основные результаты, которые обсуждались во второй главе.

В **Главе 3** представлены результаты, полученные в результате моделирования звездных шлейфы ближайших рассеянных скоплений. Исследованы звездные шлейфы у скоплений: Гиады, Плеяды, Ясли, Альфа Персея, Волосы Вероники, IC 2391, IC 2602. Был проведен ряд численных экспериментов по моделированию динамической эволюции этих скоплений в приливном поле

Галактики. Расчеты динамической эволюции опирались на известные оценки возраста скоплений и реальные галактические орбиты.

В п.3.1. на основе обзора литературных данных обсуждаются основные динамические и физические параметры ближайших рассеянных скоплений. Представлены их наиболее вероятные значения, которые далее используются в качестве базовых данных наблюдений при расчетах.

В п.3.2. Представлена методика задания начальных условий для реальных скоплений с учетом их возраста и общей массы. Проведена реконструкция движения рассматриваемых скоплений в Галактике. Получены галактические координаты областей, в которых возникли скопления. Обсуждаются вопросы выбора начальной массы и радиуса скоплений.

В п.3.3., на основе результатов предыдущего раздела, решается вопрос об оптимальных начальных условиях для моделирования скопления Гиады.

В п.3.4. «Шлейф скопления Гиады и ближайшая околосолнечная окрестность» приведены результаты численных экспериментов, в ходе которых установлено, что в окрестности Солнца могут наблюдаться звезды, ранее принадлежащие скоплению Гиады и, в процессе динамической эволюции, покинувшие скопление. Эти результаты и их сравнение с данными наблюдений дают основание говорить о том, что движущееся скопление Гиады действительно может состоять из звёзд, ранее покинувших скопление Гиады.

В п.3.5., в единой картине сопоставлены результаты вычислительных экспериментов, полученные по скоплению Гиады и по другим шести ближайшим рассеянным скоплениям - Плеяды, Ясли, Альфа Персея, Волосы

Вероники, IC 2391, IC 2602. Получены основные параметры их шлейфов: протяженность вдоль орбит (Y – координата), средняя толщина (размеры по Z - координате), средняя ширина (размеры по X - координате), стандартные отклонения скоростей в системе орбиты скоплений, а также и пространственное расположение относительно Солнца. Эти результаты могут иметь важное значение для исследований кинематики околосолнечной окрестности по данным наблюдений пространственных скоростей звезд.

В **Заключении** суммированы основные результаты и выводы диссертации.

В **Приложении** представлено краткое Руководство по проведению вычислительных экспериментов с использованием программы Аарсета NBODY6.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе три работы в рецензируемых журналах:

1. Чумак Я.О., Аарсет С. // Письма в астрон. журн., 2005, т.31, № 5, с. 342.
2. Чумак Я.О., Расторгуев А.С. // Письма в астрон. журн., 2006, т.32, № 3, с. 177.
3. Чумак Я.О. Расторгуев А.С. // Письма в астрон. журн., 2006, № 7, т.32, (принята к печати).

Список литературы.

1. Агекян Т.А., Белозерова М.А., Астрон. журн., **56**, 9 (1979).

2. Аарсет (S. J. Aarseth), Gravitational N-Body Simulations (Cambridge university press 2003).
3. Вулли (Woolley R.), Stars and Stellar Systems. (London: Univ. of Chicago Press, v.5, с. 85-110, 1965).
4. Холопов П.Н., Звездные скопления. (М.: Наука, 1981).
5. Эгген (Eggen O.J.) Stars and Stellar Systems. (Chicago; London: The University of Chicago Press, 1965).