

# ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ: В КОСМИЧЕСКОЕ БУДУЩЕЕ С GAIA



**СИЗОВА Мария Дмитриевна,**  
младший научный сотрудник, аспирант

**ВЕРЕЩАГИН Сергей Викторович,**  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

**ТУТУКОВ Александр Васильевич,**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
Институт астрономии РАН

DOI: 10.7868/50044394821020018



**Название нашей статьи навеяно инструментальными и теоретическими успехами в изучении звездных скоплений, возникающими прямо сейчас, на наших глазах. Результаты последних лет резко ускорили понимание эволюции звездных скоплений. Множество ученых, как никогда ранее, принялись изучать звездные скопления и результат их эволюции – звездные потоки. Стимул этому дали результаты космического проекта Gaia, показав беспрецедентную точность измерений звездных параметров. Буквально «прямо сейчас» в научном обиходе появилась третья редакция данных Gaia. Это гарантия того, что в ближайшем будущем копилка знаний о звездных скоплениях пополнится.**

---

## ЛЕТАЮЩИЕ ГРУППЫ ЗВЕЗД

---

Объекты Вселенной, хорошо заметные на ночном небе, всегда вызывали и вызывают сейчас повышенное внимание. Обзаводясь громкими назва-

ниями, они служат вдохновением для творчества, маяками, помогающими путешественникам, и основой календаря. Среди них всегда выделялись «Семь сестер» – Плеяды (рис. 1). Оказалось, это реальный дом не для семи, а для многих десятков звезд. Это стало



Рис. 1. Рассеянное звездное скопление Плеяды – М45. Любительский снимок получен с помощью фотоаппарата Canon 30D, HEQ5Pro, с объективом Юпитер 37A 135/3,5. Выставлена диафрагма 4, чувствительность ISO 1600. Экспозиция 8x5 мин, калибровка и медианное сложение выполнены в программе Iris. Снимок производит приятное впечатление при малом фокусе! Хотя есть небольшой сдвиг от неточно выставленной Полярной Звезды. Как видим, любительские средства позволяют получить вполне приемлемый результат! Автор: М.А. Наливкин. Полную версию можно посмотреть по адресу URL = [http://www.astrclub.kiev.ua/gallery/details.php?image\\_id=1455](http://www.astrclub.kiev.ua/gallery/details.php?image_id=1455)

понятным далеко не сразу. В марте 1610 г. Галилео Галилей опубликовал свои результаты наблюдений Плеяд, отобразив 36 звезд этого скопления. Лишь в XVIII в. стало ясно, что звезды Плеяд сгруппировались не случайно, а представляют собой скопление совместно живущих звезд.

И, как часто бывает в науке, не так давно стало понятно и то, что совсем небольшие светлые пятна на небе, которые еще Демокрит и Анаксагор определили плотными группами звезд, и огромные Плеяды – относятся к одному и тому же населению нашей Галактики: звездным скоплениям.



Изобретение Галилеем телескопа и введение его в астрономическую практику позволило Мессье (1781) и Гершелю (1786) приступить к созданию первых каталогов звездных скоплений. Отметим, что первое издание каталога включало объекты, номера которых принято записывать от М1 до М45. Именно под номером М45 в каталог включены Плеяды. Растущая точность наблюдательной техники сделала доступной астрометрическую оценку расстояний до близких скоплений Гершелем и со временем позволила обновить каталог звездных скоплений Дрейером.

В наше время число известных и хорошо атрибутированных скоплений достигает нескольких тысяч. И, конечно, в этой работе ведущую роль играют данные о более чем 1.3 млрд звезд, полученные с помощью КА Gaia (рис. 2).

Рис. 2. «Гайя» на завершающем этапе сборки. Gaia Deployable Sunshield Assembly (DSA) во время тестирования развешивания в интеграционном здании S1B на европейском космодроме Куру, Французская Гвиана, 10 октября 2013 года. [http://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2013/10/Deployment\\_of\\_Gaia\\_s\\_DSA19](http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/10/Deployment_of_Gaia_s_DSA19) Права принадлежат ESA–M. Pedoussaut, 2013

Трудность на этом пути составляет лишь невозможность обозреть и выбрать «звездные кучи» на картах звездного неба, построенных по каталогам звезд Gaia. Очевидно, что пришла пора задействовать роботы вместо человеческого глаза. Естественно, что такая работа вызывает повышенный интерес у многих ученых и активно ведется.

Уже в конце XIX века Проктор (1869) показал, что распад звездных скоплений приводит к появлению звездных потоков в Галактике. Обнаружены такие потоки были уже в наше время. Исследованию их свойств в настоящее время, как мы увидим ниже, уделяется большое внимание.

---

## ЗВЕЗДНОЕ СКОПЛЕНИЕ – «ЗВЕЗДНАЯ КОЛЫБЕЛЬ» И «НАУЧНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ»

---

Изучение звездных скоплений принадлежит к числу основных направлений звездной астрономии. За последние столетия этой проблеме было посвящено более 10 тыс. статей. Около пятисот статей ежегодно представляют результаты исследований, выполненных в этом направлении. Информацию о количестве публикаций в мире, их авторах, названиях и многом другом можно получить с помощью специализированного сайта ADS (Astrophysics Data System, URL: [http://adsabs.harvard.edu/ads\\_abstracts.html](http://adsabs.harvard.edu/ads_abstracts.html)). Простой интерфейс и открытый доступ позволяет использовать этот сайт любому желающему.

Звездные скопления – гравитационно-связанные группы звезд, которые хорошо заметны на небе. Наука различает два типа таких групп: шаровые и рассеянные звездные скопления. Шаровые скопления относятся к старому населению Галактики (возраст некоторых из них сопоставим с возрастом Млечного пути) и располагаются на орбитах

вокруг балджа – центральной, наиболее яркой сферической части Галактики. Рассеянные же скопления – молодое население тонкого диска Галактики, и далее речь пойдет именно о них. Замечательный, многим хорошо известный и уже упоминавшийся выше пример – это скопление Плеяды. Его нетрудно найти на небе даже невооруженным глазом. Обычное рассеянное звездное скопление включает от сотни до одной – двух тысяч звезд. Типичный возраст скопления составляет несколько сотен миллионов лет, т. е. порядка одного оборота Солнца вокруг центра Галактики.

Несколько причин вызывают постоянный и активный интерес астрономов к исследованию статистики, физики и эволюции звездных скоплений. Исследования скоплений разных возрастов показали, что они являются своего рода «космической лабораторией», в которой можно изучать разнообразные типы звезд, планет и другие астрономические объекты, объединенные общим местом происхождения – «звездной колыбелью». Оказалось, что они являются эффективным и во многом незаменимым инструментом для исследования эволюции звезд и галактик. Изучение движений звезд внутри скоплений и движения самих скоплений в пространстве стало основой для изучения строения нашей Галактики. Изучение процессов взаимодействия в звездных системах служит, как показала история, эффективным инструментом изучения структуры и эволюции, как звезд, так и скоплений.

Звезды не статичны, они рождаются, живут, изменяясь со временем и превращаясь в конечном итоге в белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Иногда в финале звезды взрываются как сверхновые, яркость которых на неделю становится сравнимой с яркостью галактики. Теория

звездной эволюции, можно сказать, выросла в исследованиях скоплений. Говоря языком астрономов, сопоставление диаграмм Герцшпрунга–Рессела для скоплений разных возрастов явилось в свое время отправной точкой теории эволюции звезд.

Звезды в скоплениях образовались одновременно. Благодаря этому на небольшом участке неба в распоряжении астрофизиков оказываются «лаборатории», где на небольшой площади, доступной для одного кадра широкоугольного телескопа, расположены разнообразные звезды одного возраста. Среди этого населения очень удобно поискать что-нибудь новенькое, делающее какую-либо из звезд «особенной». Популярностью пользуются кратные системы, экзотические и переменные звезды. В скоплениях все чаще стали находить звезды с планетами. Хорошо, когда это – далекая планета (по современной терминологии экзопланта), похожая на нашу Землю! Здесь лежит ключ к разгадке многих явлений.

Различия пространственной формы скоплений довольно многообразны, однако их изучение ограничивается техническими возможностями наблюдателей – далеко не для всех звезд, входящих в скопления, надежно измерены расстояния от Солнца, а также существуют трудности с отождествлением слабых звезд, входящих в их состав.

Наблюдения показали, что в современную эпоху в нашей Галактике всего несколько процентов звезд входят в состав скоплений. Один из авторов данной публикации, А.В. Тутуков, выдвинул ставшую классической идею о распаде большинства скоплений практически в момент их образования. Это время составляет около 100 млн лет, что по масштабам эволюции совсем немного. Статья А.В. Тутукова опубликована в 1978 г., точная ссылка на нее приводится ниже, в списке Дополнительной

литературы. Иными словами, практически все звезды возникают в скоплениях, и более 90% из них быстро распадаются из-за потери газа. Поэтому мало кому могла прийти в голову мысль о том, что скопления на самом деле являются колыбелью всего звездного населения Галактики. Сегодня существует общепринятое мнение, что они представляют собой «родильные дома» для всех звезд. В том числе и для нашего Солнца (см. последний раздел данной публикации). Однако звезды в этих домах, как правило, не могут жить долго. Большинство ассоциаций (ассоциации, как увидим ниже, – это те места, где рождаются сами скопления) и скоплений вскоре после рождения, как уже говорилось, распадаются. Распад представляет собой необычную, фантастическую картину превращения их со временем не в хаос, а в конечном итоге – в упорядоченные кольцевые звездные структуры вокруг галактического центра, напоминающие нити!

---

## С ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ В КОСМОС – GAIA

---

Итак, шло время и несколько важных событий произошли в XX веке. К началу века число известных звездных скоплений увеличилось до нескольких сотен благодаря работе над созданием Нового общего каталога (New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars или NGC), опубликованного в 1888 г. Дж. Дрейером. В 1925 г. возникла первая классификация скоплений, предложенная Р. Трюмплером, которая используется до сих пор. Эволюцию интереса к их исследованию мы видим на рис. 3, где показан рост числа публикаций по скоплениям с годами. Резкий скачок числа публикаций начался в конце 1940-х годов, а затем снова – с 2000-х.



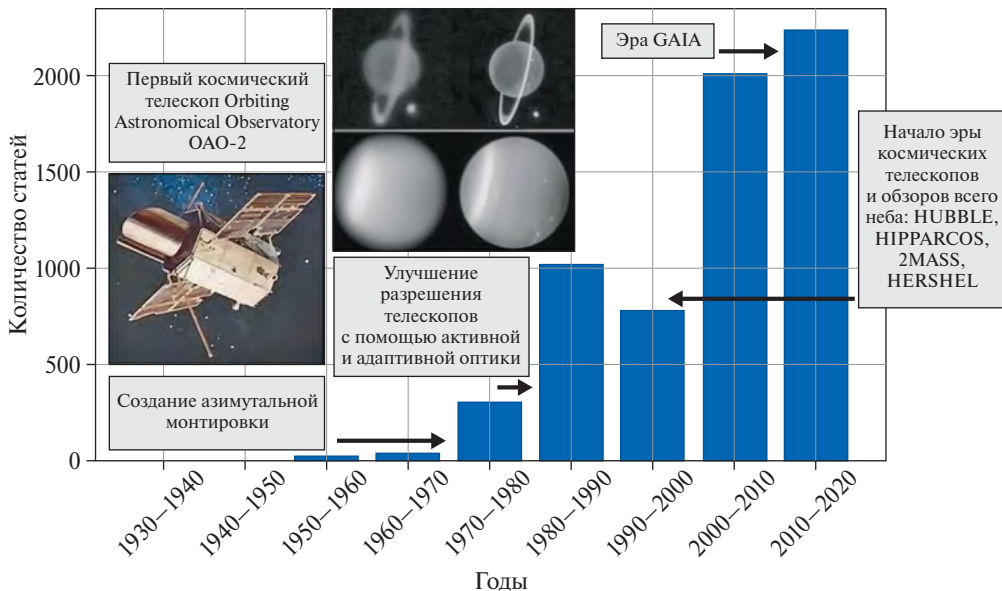


Рис. 3. Результат поиска научных статей с помощью упомянутой выше базы данных ADS, по ключевым словам *open&cluster*. Запрос выдал в сумме около 6000 публикаций с 1930 г. Подписаны основные этапы исследований звездных скоплений. Показано появление первого космического телескопа (OAO-1, Орбитальная астрономическая обсерватория). Проработал очень недолго, поэтому реально первый космический телескоп НАСА запустило в 1968 г., это был OAO-2, показанный на нашем рисунке. Им стала обсерватория, изучалась ультрафиолетовое излучение звезд и галактик. Приблизительно в то же время введены в строй крупнейшие телескопы. Так, знаменитый 6-метровый телескоп с зеркалом-монокристаллом потребовал постройку азимутальной монтировки. Многие крупнейшие телескопы используют составные зеркала с адаптивной оптикой, URL: <https://skyandtelescope.org/sky-and-telescope-magazine/adaptive-optics-before-and-after/>

Это и понятно – ведь рост объема данных в астрономии тесно связан с введением в строй новых крупных телескопов. Статистика строительства телескопов такова: рефракторы с диаметром объектива больше 70 см (это 11 телескопов) были построены в период 1880–1917 гг. и дали пищу исследователям 20-х годов XX в. (рис. 3), а телескопы-рефлекторы с диаметром зеркала 6 м и более (14 телескопов) – в период 1975–2005 гг. Известный Паломарский 5.1-м телескоп им. Хейла был введен в строй в 1948 г. Именно после этого момента начался заметный рост объема информации о звездных скоплениях (рис. 3), и с 2000-х годов возник новый максимум, связанный с появлением

данных КА HIPPARCOS (1997), который продолжается благодаря данным КА Gaia.

С запуском космического аппарата Gaia перед астрономами открылась фантастически привлекательная перспектива детального изучения строения Галактики по беспрецедентно высокоточным измерениям параметров звезд, полученным с помощью этого космического телескопа. Интересно, что Gaia – не спутник Земли – находится в точке L2 системы Солнце–Земля на расстоянии от Земли 1.5 миллиона километров, что приблизительно в четыре раза больше, чем отдаление Луны от Земли. То есть Gaia является спутником Солнца!

С появлением таких высокоточных измерений наступает время изучать внутреннюю кинематику и структуру скоплений. Уже активно изучаются процессы внутренней эволюции скоплений по мере их жизни в Галактике. К описанию этих интересных процессов мы перейдем ниже.

---

## РОЖДЕНИЕ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ ИЗ ГАЗА

---

Основной материал, из которого рождаются ассоциации, скопления и, собственно, сами звезды в них – это газовые облака. Наша Галактика, являясь прекрасной на вид плоской дисковой системой, на самом деле имеет гораздо более сложную структуру. Галактика окружена звездным гало, которое по современным представлениям играет непосредственную роль в формировании спирального узора.

Сценарий эволюции, о котором пойдет речь, представлен на рис. 4.

Как видим на рис. 4, скопления возникают из гигантских газовых облаков будучи внутри ОВ-ассоциаций. Что такое звездная ассоциация? В истории астрономии этот термин занимает важное место.

Итак, сделаем небольшое отступление и расскажем о звездных ассоциациях Амбарцумяна. Что же такое звездная ОВ-ассоциация? Это группа звезд с ядром из одного или нескольких скоплений одного возраста. Звездные ассоциации открыл голландский астроном А. Блаау (A. Blaauw). Он же проанализировал собственные движения звезд в ОВ-ассоциациях и пришел к выводу об их неустойчивости, которая в конечном итоге ведет к распаду. В.А. Амбарцумян по аналогии с расширяющейся Вселенной придал им природу расширяющихся D-тел. Правда, это предположение, как показало

время, оказалось неверным. Амбарцумян занимал вопрос о том, почему мы наблюдаем только разлет групп молодых звезд, а не коллапс – он именно увидел распад, а не предсказал его. Итак, В.А. Амбарцумян прямо указывал на места образования молодых звезд и отметил парадокс: если звезды образуются путем коллапса газа, то почему ассоциации распадаются? Виктор Амазаспович пишет (в Сборнике Трудов Амбарцумяна, 1988 г., см. разд. «Литература»): «... звездные ассоциации представляют собой очаги звездообразования в Галактике, где процесс группового образования звезд в настоящее время продолжается...» В работе 1954 года (полная ссылка в конце статьи) он показал, что в звездных ассоциациях имеют место движения нового типа – расхождение звезд из области звездообразования, которые сильно отличаются от движений, ранее известных в звездной динамике, как по характеру, так и по причинам, их вызывающим. «Распознавание звездообразования в звездных ассоциациях, содержащих группы недавно возникших звезд, имело принципиальное значение для нашего понимания происхождения и эволюции звезд. Среди первых аргументов в пользу недавнего возникновения наблюдаемых в Галактике ОВ-ассоциаций особое место занимало представление об их неустойчивости. Именно анализ ситуации в этих системах дал серьезное основание предсказать явление расширения звездных ассоциаций» (цитата взята из публикации в «Астрономическом журнале», см. разд. «Литература»).

Возникает вопрос о том, что служит причиной их сжатия и фрагментации. Одна из гипотез – спирали. Они хорошо видны в галактике M33, показанной на рис. 5. Существуют несколько гипотез о причинах появления

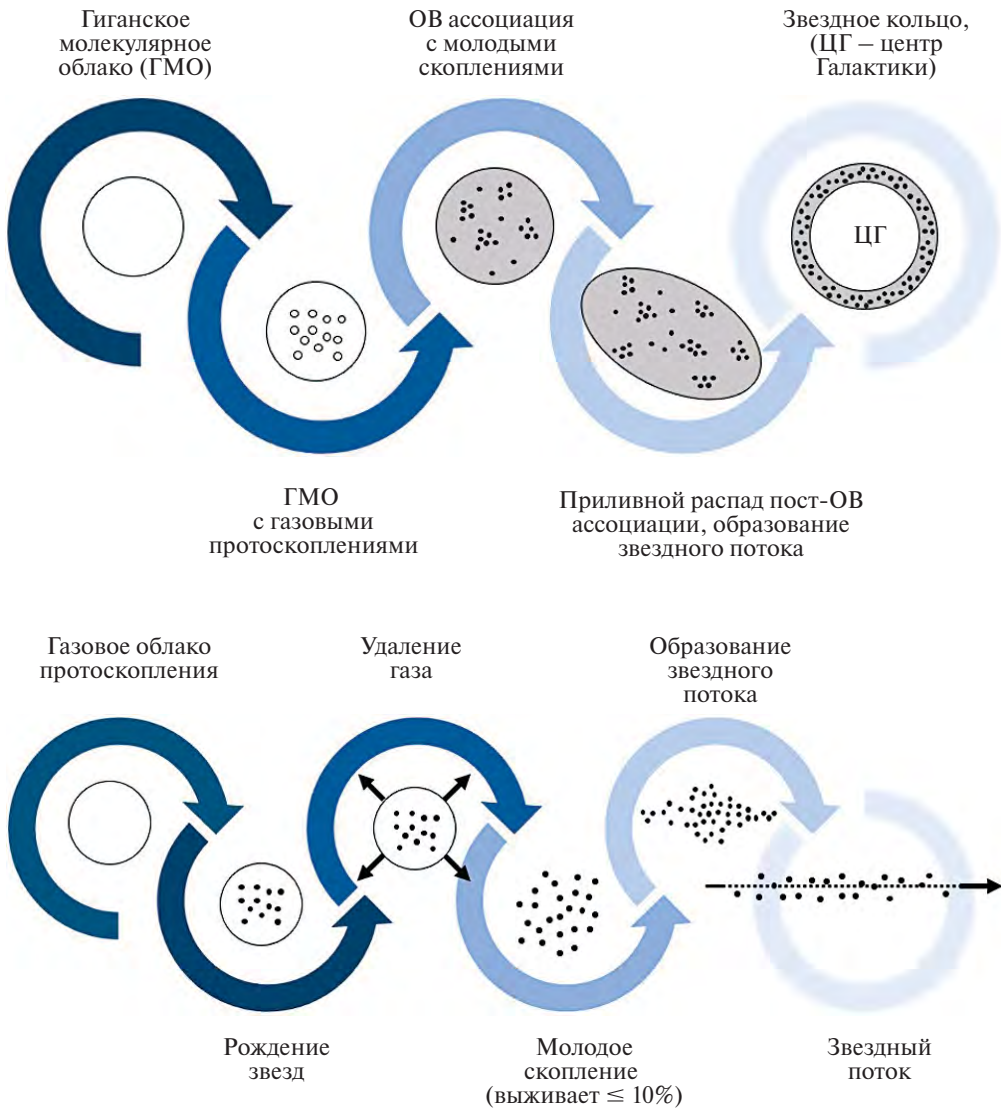


Рис. 4. Сценарий эволюции звездной ассоциации (верхняя панель) и рассеянного звездного скопления (на нижней панели). Показаны цепочки превращений гигантских газовых облаков в ОВ-ассоциации, затем звездные кольца вокруг галактического Центра. И превращений газового облака в скопление, которое превращается в поток. На верхней панели в круге слева – звезды ОВ-ассоциации. Далее расширяющаяся ОВ-ассоциация, в кольцо – звезды предельно старой ОВ-ассоциации. На нижней панели аналогичное развитие претерпевает скопление, расположенное внутри ассоциации. Замкнуться в кольцо звездный поток не успевает за время жизни Галактики



Рис. 5. Галактика М33. Спиральная галактика в созвездии Треугольника. По диаметру в 2 раза меньше Млечного Пути. Итак, технические данные: SW ньютон 254/4+паракорр тип I+QHY8L+внеосевик с QHY6, все это на EQ6pro. Фокусное расстояние с учетом паракорра 1135 мм. Поле 71'x47'; масштаб 1.4 на пиксель. 25 кадров по 1200 секунд. Две июльские ночи на даче под Луганском. Обработка в MaximDL, PI, Fitstacker, PS, Photomatix.  
Автор фото: М.А. Наливкин

в галактическом диске ее главного украшения – спиральной структуры. Одна из самых популярных гипотез предполагает, что гало нашей галактики имеет несимметричную форму (см. статью Хаттори и Валури, опубликованную в «Трудах Международного астрономического союза», см. разд. «Литература»), возмущения от которой служат триггером возникновения спиралей. Итак, несимметричность гало порождает неустойчивость газового диска и спиральные волны (т. е. увеличение плотности вследствие малых возмущений диска). Изображения галактик позволяют убедиться в том, что газ хорошо заметен лишь в спиральных – ярких местах звездообразования (рис. 5).

Именно здесь происходит и первоначальная фрагментация газовой составляющей на облака – протоассоциации. В спиральных газ сжимается и раз-

бивается на облака радиусом приблизительно 100–300 пк, из которых и рождаются ассоциации, в начале своего существования имеющие массы в пределах  $10^5$ – $10^6$  масс Солнца.

Картина физических процессов на начальном этапе образования ассоциации из газового облака неоднозначна. Возможен такой сценарий, когда газовое облако остывает вследствие излучения энергии тяжелыми элементами и пылью при их достаточно высокой концентрации. Из-за этого нарушается баланс между силой гравитации, стремящейся сжать облако, и силой газового давления, препятствующей сжатию, в пользу первой. Этот возникающий дисбаланс может спровоцировать коллапс. В процессе коллапса плотность увеличивается и происходит фрагментация газа. Во фрагменте образуется ОВ-ассоциация. Таким образом, основные механизмы обра-



зования ОВ-ассоциаций – спиральная волна и коллапс в результате охлаждения газа.

Ассоциации и рассеянные звездные скопления располагаются иерархически: ассоциации включают скопления (схема на рис. 4). Следовательно, их эволюция представляет единый процесс, и молодые ассоциации наполняются протоскоплениями (в среднем в ассоциации рождается несколько десятков скоплений массами  $10^2$ – $10^4$  масс Солнца). Таким образом, молодая ассоциация состоит из скоплений и из отдельных звезд.

Однако в молодом скоплении продолжается образование новых звезд (зоны ионизированного водорода НII), этот мощный процесс создает звездный ветер, который буквально выметает оставшийся газ из молодых маломассивных скоплений, поскольку скорость расширения зоны ионизированного водорода (10 км/с) выше дисперсии скоростей звезд внутри самого скопления (около 1 км/с). В итоге большинство молодых скоплений распадаются. Отметим, что массой, достаточной для удержания газа, обладают шаровые скопления и именно поэтому они являются долгожителями в Галактике. Этот этап отражен на рис. 4.

## ЗВЕЗДНЫЕ «РОИ» И «КОПЬЯ»

Наряду с этим процессом сама ассоциация также претерпевает изменения вследствие воздействия на нее приливных сил галактики (см. ниже по схеме на рис. 4). А звездный ветер разрушает порядка 90% ее скоплений, заполняя ассоциацию отдельными звездами. Таким образом, ранее заполненная массивными группами звезд – скоплениями, ассоциация точно заполняется отдельными звездами, сохраняя малую часть скоплений, что приводит к ослаб-

лению гравитационной связанности ОВ-ассоциации.

Интересно отметить, что между отдельными скоплениями в молодой ОВ-ассоциации нет сильной гравитационной связи. Скопление, напротив – гравитационно-связанная система звезд.

Итак, звездный ветер удаляет газ из молодой ассоциации с характерной скоростью 10 км/сек. В результате удаления газа эволюция ассоциации разветвляется на два направления. В одном выживают одно или несколько скоплений. Именно их мы и наблюдаем в современную эпоху. Другой путь (верхняя панель рис. 4) – распад всех скоплений. Это происходит со временем за счет близких прохождений звезд, а также при взаимодействии так называемых кратных звездных систем.

В итоге ассоциации растягиваются приливными силами Галактики вдоль их орбиты вокруг центра Галактики (рис. 4). Структуры, которые включают выжившие скопления, состоят как из самих скоплений со шлейфами потерянных звезд, так и звезд распавшихся скоплений-родственников.

Постепенно звездные системы, напоминающие «рои» звезд, идущие по обоим путям сценария на рис. 6, растягиваются в системы, похожие на «копья» – это хорошо известные звездные потоки (рис. 4). Вытянутые структуры на верхней панели (рис. 4) могут быть обнаружены на небе за счет выживших скоплений (они узнаваемы по увеличенной поверхностной звездной плотности). Поскольку внутри ассоциации остаются не успевшие распасться скопления и звезды распавшихся скоплений, на диаграмме Герцшпрунга–Рессела, построенной для такого скопления, будут как его собственные звезды, так и звезды распавшихся скоплений одного поколения на начальной стадии и разных поколений

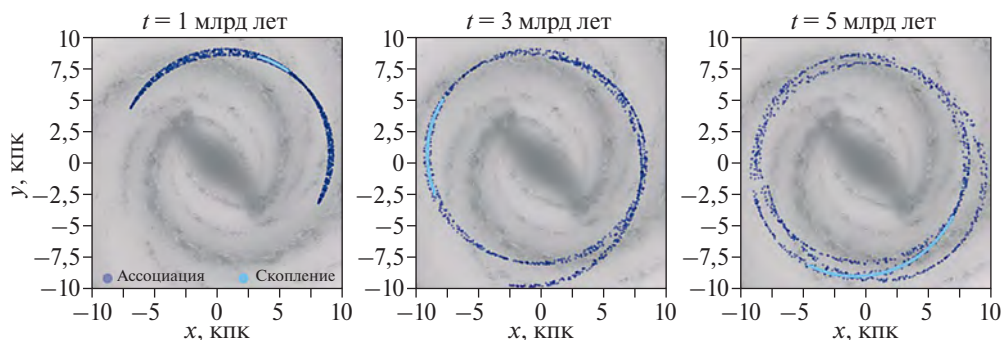


Рис. 6. Эволюция облака точек, представляющих звезды скопления (голубые точки) и OB-ассоциации (синие точки). Согласно с этапами эволюции, звезды на рис. 4 скопления растягиваются в звездный поток. Звездные ассоциации, двигаясь намного быстрее, успевают сделать полный оборот вокруг галактического Центра, а звездный поток превращается в кольцо. Рисунок показан в проекции на галактическую плоскость XY, время эволюции подписано над панелями.

на последующих этапах. Эти звезды попадают в состав наблюдаемого скопления благодаря стандартной процедуре отбора. Все они родились в одной ассоциации и обладают сходной кинематикой (близость собственных движений, расстояний и лучевых скоростей), химическим составом и даже возрастом.

Поговорим о пространственной форме скоплений, имея в виду беспрецедентно точные данные Gaia. Благодаря им получены реально наблюдаемые шлейфы звезд, потерянных скоплением Гиады. Эти работы были сделаны независимо и практически одновременно летом 2019 г. двумя группами ученых из Австрии (Мейнгаст и Алвен) и Германии (Зигфрид Розер, Елена Шильбах и др.). Детальные расчеты показали, что скопление растягивается приливными силами, превращаясь сначала в эллипсоид с большой осью, направленной под углом 30–40 градусов по направлению к галактическому центру. При этом скопление теряет звезды в основном из точек Лагранжа, расположенных на концах большой оси эллипсоида. Эти звезды отстают от скопления в дальней от центра Галактики точке истечения и обгоняют его

с ближней к центру стороны скопления. Таким образом, скопление растягивается вдоль его галактической орбиты благодаря дисперсии скоростей его звезд и законам Кеплера. Подчеркнем, что из-за разницы скоростей звезд, находящихся ближе и дальше от Центра Галактики, образуются так называемые звездные шлейфы.

Остатки скоплений дрейфуют по галактической орбите как нечто целое (рис. 6). Наблюдается множество движущихся групп. Движущиеся группы могут быть старыми, такими как движущаяся группа звезд HR1614 возрастом в 2 млрд лет (рис. 6), или молодыми, такими как движущаяся группа звезд АВ Золотой Рыбы возрастом в 50 млн лет. Хороший пример АВ Dor (статья в знаменитом Ар J Zuckerman and Song 2004). В ее составе остались кратные звезды. Если посмотреть подробнее, то она похожа на ассоциацию в финале. Движущиеся группы интенсивно изучались Олином Эггеном в 1960-х годах, (см. разд. «Литература»: Эгген, 1965, Дьяченко А.И. Летящие группы Эггена, ЗиВ, 2004, 6, с. 12–25). Олин Эгген первым ввел понятие движущихся звездных групп, самой из-

вестной из которых являются Гиады (а также и Большая Медведица!). Самой близкой является движущаяся группа звезд или звездный поток Большой Медведицы, который включает часть звезд в Ковше Большой Медведицы и простирается до Южного Треугольника.

Как видим на рис. 4, в конечной стадии эволюции оба пути дают «звездные нити» или копыя. Длина копий зависит от времени эволюции. Движущаяся звездная группа растягивается дифференциальным вращением Галактики по замкнутой орбите вокруг галактического Центра, образуя копыя или кольца. Так, для ОВ-ассоциаций процесс идет с большей скоростью и копыя замыкаются в кольца вокруг Центра Галактики. Галактика, можно сказать, похожа на клубок нитей, поскольку пронизана звездными потоками. В частности, именно из звездных колец, скорее всего, состоит население диска. Кольца пока никто не наблюдал ввиду их малой пространственной плотности, однако, гипотетически нужно ожидать именно такую ситуацию после полного распада ассоциации и скопления (рис. 7).

На рис. 4 в конечных стадиях эволюции образуются множество копий и замкнутых круговых потоков. На схеме видно, как со временем звездный поток дифференциальным вращением растягивается и образует кольцевую структуру вдоль галактической орбиты. Наступает стадия «кольца». Длина нити (круга) равна радиусу Солнечной орбиты (8 кпк), умноженному на  $2\pi$ , что составит около 50 кпк. Это означает, что ассоциация растягивается в нить с плотностью 20 звезд на пк. Как уже говорилось, Галактика состоит из множества звездных нитей, как это показано на рис. 7.

Итак, подведем итоги. В течение жизни звездное скопление и ОВ-ассоциация меняют пространственную

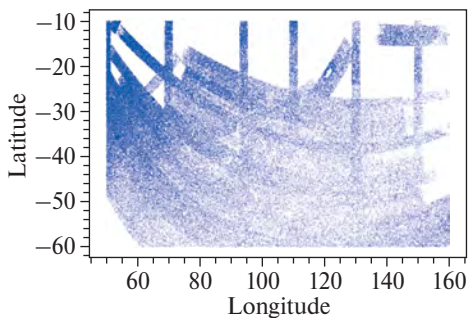


Рис. 7. Звездные структуры, напоминающие нити, аналогичный рисунок есть в публикации Perottoni и др. 2019. Этот рисунок любезно предоставлен Hélio Perottoni

форму от унаследованной от фрагментации первичного газового облака к вытянутой системе – копыю и далее кольцу. Большинство скоплений внутри ассоциации распадаются и перестают существовать, наполняя ассоциацию звездами. Приливными силами ассоциация (в конце концов превратившаяся в звездную систему, состоящую из отдельных звезд и выживших скоплений) растянулась дифференциальным вращением вдоль своей орбиты в диске. Превратившись сначала в звездный поток (копые) и далее в кольцо. В финале образуются множество замкнутых круговых потоков-колец. На этой стадии большинство потоков, образовав кольца, дали структуру звездного населения диска, распределенную в «кольцах», кинематически упорядоченную наподобие нитей. Вышло так, что из нитей судеб отдельных скоплений сплетается полотно жизни ассоциаций и Галактики.

## СОЛНЕЧНОЕ ЗВЕЗДНОЕ СКОПЛЕНИЕ

«Если бы вы жили в эпоху молодости Солнечной системы, то могли бы читать при свете ночного неба», – пишет Симон



Рис. 8. Комета Хейла–Боппа. Изображение получено на Астрографе Звенигородской обсерватории Института астрономии РАН

Портегис Цварт (S. Portegies Zwart, Leiden Observatory, Leiden University, The Netherlands). Понятно почему: на начальных этапах жизни Солнце находилось внутри звездного скопления, где было настолько тесно, что свет звезд освещал Землю постоянно. Естественно, близкие прохождения звезд могли воздействовать на содержимое облака Оорта и некоторые твердые тела, астероиды и кометы круто меняли свою орбиту. Часть из них, попадая близко к Солнцу, превращались в кометы (такие, как комета Хейла–Боппа, рис. 8).

Полезно для вышеизложенной картины эволюции звездных скоплений и ОВ-ассоциаций попытаться найти расстояние в Галактике до ближайших «родственников» нашего Солнца, возникших с ним в одном скоплении и в одной ОВ-ассоциации. Дисперсия скоростей примерно тысячи звезд в типичном звездном скоплении с массой порядка одной тысячи масс Солнца около одного км в секунду. А в ассоциации с массой  $10^6$  масс Солнца – около 10 км/сек. При возрасте Солнца приблизительно  $5 \cdot 10^9$  лет его «братья и сестры» по скоплению рассеяны по орбите Солнца вокруг центра Галактики на расстоянии, составляющем примерно

10 кпк, а «братья» и «сестры» по исходной ОВ-ассоциации – на 100 кпк. То есть последние уже замкнули кольцо около Галактического Центра.

Теперь можно оценить характерное расстояние между Солнцем и ближайшей «сестрой» или «братом». К ним относятся коричневые и вырожденные карлики и звезды спектральных классов К, М звезд главной последовательности с массами, меньшими Солнечной. Ближайшие «родственники» по скоплению окажутся друг от друга на расстоянии приблизительно 10 пк, с «родственниками» по ОВ-ассоциации – на расстоянии приблизительно 50 пк (из-за больших скоростей). Много это или мало? Это настолько далеко, что соседи не могут повлиять на объекты во внешних частях Солнечной системы.

## ЗВЕЗДНЫЕ ПОТОКИ НА «ГАЛАКТИЧЕСКИХ ОКРАИНАХ»

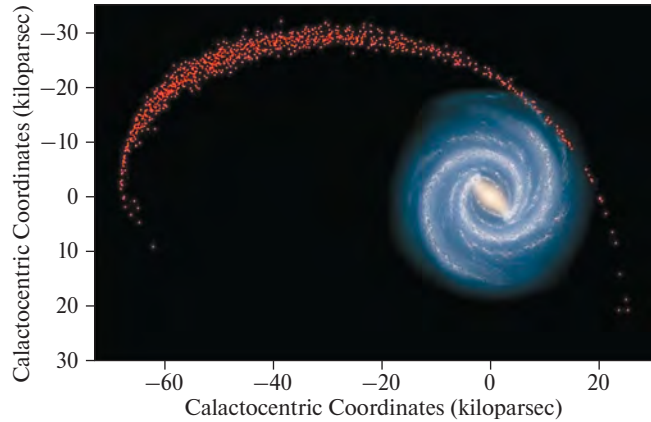
Выше мы говорили о нитеобразном упорядочении звездных потоков и строении кинематической структуры то всей Галактики, то галактического диска. Что это, путаница или ошибка? Совсем нет. По данным, полученным с помощью КА Gaia, подобные звездные потоки обнаружены в том числе и на периферии Галактики, в галактическом гало.

Так, изучение самых далеких звезд с помощью Gaia, расположенных на расстояниях 10–50 кпк, привело к открытию звездных потоков совершенно иной природы. Они возникали в результате действия приливных сил, возникающих при сближениях межгалактических шаровых скоплений и карликовых галактик с нашей Галактикой. Результаты расчетов встречи спутника с галактикой на примере простейшей численной модели показан на рис. 9.

Разумеется, направления движений в пространстве таких потоков имеют



Рис. 9. Спутник галактики превращается в поток. Картина на момент времени эволюции, равном  $t = 5$  млрд лет. Расчеты выполнены нами (красные точки – это распадающиеся звездные ассоциации ( $N = 1000$ )), рисунок галактики, подписи координатных осей сохранены в той форме, как они предоставлены библиотекой для Python и *galpy* (URL = [https://github.com/henrysky/milkyway\\_plot](https://github.com/henrysky/milkyway_plot))



произвольный характер. Обнаружение потоков с данным ретроградным движением в галактике служит одним из важных признаков его «внегалактической» природы. Они являются продуктами распада близких спутников Галактики. Далекие (100 кпк) карликовые галактики попадают в галактическое гало и, теряя звезды, образуют потоки. Их открыто уже более 15. Причина возникновения таких потоков – это поглощение Галактикой ШС и карликовых галактик.

Естественно, что процессы поглощения идут не только в спиральных галактиках. Гигантская эллиптическая галактика также поглощает другие галактики. Последние превращаются в потоки вокруг центра галактики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная картина образования и эволюции астрономических систем от компактных объектов к «копьям» свойственен не только звездным скоплениям и ассоциациям. Любопытно, что самые близкие к Солнцу звезды при пролетах около облака Оорта извлекают из него долгопериодические кометы. К этому процессу может иметь отношение, как уже говорилось выше, комета Хейла–Боппа (рис. 8). Ледяные

ядра комет, теряемые звездами за счет взаимодействия этих ядер с планетами-гигантами, наполняют межзвездное пространство копьями, состоящими из комет, тем самым образуя не только звездное, но и кометное население Галактики. Оно состоит из комет, потерявших связь со своими звездами – бывшими хозяйками.

Как мы уже отметили, большинство звездных скоплений разрушаются в момент их возникновения после потери газовой компоненты. Оставшиеся гравитационно-связанные скопления продолжают свой путь в Галактике. Высокоточная фотометрия позволила найти, что некоторые из скоплений не являются однородными группами звезд-родственников, а представляют ансамбли звезд нескольких хорошо выделенных поколений. Причиной этого могли быть либо слияния однородных скоплений разного возраста, либо несколько последовательных вспышек звездообразования в одном скоплении. Сейчас эта тема находится в центре внимания астрономов, занимающихся звездными скоплениями.

Степень изученности звездного населения Млечного Пути составляет чуть более 1% (звездные каталоги, полученные КА Gaia, включают данные об

около 1.3 из 100 млрд звезд Галактики). Каталогизировано около 5 тыс. скоплений из как минимум 100 тыс. скоплений. Gaia предоставляет возможность открыть еще 100 тыс. скоплений! В далеком будущем можно открыть около 1 млн скоплений, которые расположены в пределах Млечного Пути, состоящем из приблизительно 100 млрд звезд.

В заключение нельзя не вспомнить наших ученых, которые стояли у истоков изучения звездных скоплений. В нашей стране исследование скоп-

лений приобрело популярность благодаря П.П. Паренаго, Б.В. Кукаркину, П.П. Холопову и К.А. Бархатовой. В частности, Клавдия Александровна, будучи одновременно и ученым, и организатором, создала школу по изучению звездных скоплений в Уральском Государственном Университете (г. Свердловск, ныне Екатеринбург. Материалы о ее биографии см. в разд. «Литература»). Тему для исследований Клавдии Александровне предложил ее руководитель, известный астроном Павел Петрович Паренаго.

## Литература

- Бархатова К.А. *Астрономический Журнал*, № 27 (180), 1950.
- Дьяченко А.И. Летающие группы Эггена. *ЗиВ*, 2004, № 6. С. 12–25.
- Zeldovich Ya.B. *A&A*, 1970, N 5, pp. 84–89.
- Kohei Hattori and Monica Valluri. The shape of the dark matter halo revealed from a hypervelocity star. *Proceedings of the International Astronomical Union, Volume 14, Symposium S353: Galactic Dynamics in the Era of Large Surveys*, June 2019, pp. 96–100. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1743921319008718>
- Tutukov A.V. *Astro. Ap.*, N 70, 57, 1978.
- Perotoni H. et al. A cold stellar stream in Pegasus *MNRAS*486, pp. 843–850 (2019).
- Portegies Zwart S. (Симон Портегис Цварт) Leiden Observatory, Leiden University, P.O. Box 9513, 2300 RA, Leiden, The Netherlands <http://galspace.spb.ru/index337.html>
- Eggen O.J. (Олин Эгген) *Moving Groups of Stars. Galactic structure*, ed. Adriaan Blaauw and Maarten Schmidt. University of Chicago Press, Chicago, p. 111 (1965).
- Zuckerman B. and Inseok Song. The AB Doradus Moving Group. *The Astrophysical Journal*, 613: L65-L68, 2004, September 20.

### Некоторые труды В.А. Амбарцумяна

- Амбарцумян В.А. Эволюция звезд и астрофизика. Ереван, Изд-во АН АрмССР, 1947.
- Амбарцумян В.А. *Астрономический Журнал*, № 26, 3, 1949.
- Амбарцумян В.А. Звездные ассоциации и области активного звездообразования в них // Научные труды под ред. В.В. Соболева. Т. 3. Ереван, Изд. АН Армянской ССР, 1988. С. 290–298.
- Ambartsumian V.A. *IAU Transactions*, Vol. 8, ed. P. Tb. Oosterhoff, Cambridge University. Press, Cambridge, 1954, p. 665.

### Материалы о жизни К.А. Бархатовой

- Бархатова К.А. Past Organizing Committee Member of Commission 37 Star Clusters & Associations IAU. <https://www.iau.org/administration/membership/individual/17258>
- Давыдов И. К.А. Бархатова. С-У кн. Изд., Свердловск, 1985.
- Левитская Т.И. К 100-летию со дня рождения Клавдии Александровны Бархатовой, «Звездного профессора» – Физика Космоса / Труды 46-й Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 30 января – 3 февраля 2017 г.). Екатеринбург.
- Еремеева А.И. Звездный профессор Клавдия Александровна Бархатова (к 100-летию со дня рождения). *ЗиВ*, 2018, № 3. С. 29–41.