

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

## Крупномасштабное звездообразование в галактиках

Ю.Н. Ефремов, А.Д. Чернин

*Кратко описана история возникновения современных представлений о продолжающемся и в нашу эпоху формировании звезд в газовых дисках галактик. Работы последних лет показывают, что в процессе звездообразования решающая роль принадлежит взаимодействию собственной гравитации газа и его турбулентных движений. Крупномасштабные сверхзвуковые движения газа создают в нем первоначальные уплотнения, которые затем дают начало гравитационной конденсации газа в звезды. Рассмотрены вопросы образования звездных скоплений, ассоциаций и комплексов, а также возможность возникновения изолированных звезд. Особое внимание уделено проблеме возникновения звезд под действием динамического давления.*

PACS numbers: 97.10.-q, 98.20.Bg, 98.58.Db

### Содержание

1. Введение (3).
2. Звезды образуются и в наше время (4).
3. Иерархические звездные группировки (7).
4. Природа звездных комплексов (9).
5. Образование звездных скоплений (10).
6. Две модели звездообразования (11).
7. Происхождение сверхболочек HI (13).
8. Звездные дуги в БМО и вспышки гамма-излучения (14).
9. Пекулярный звездный комплекс в NGC 6946 (15).
10. Динамическое давление и звездообразование (16).
11. Происхождение дугообразных звездных комплексов (18).
12. Дугообразные звездные комплексы и гиперновые (19).
13. Сверхассоциации (20).
14. Столкновение ударных волн: газодинамический сценарий локальной вспышки звездообразования (22).
15. Заключение (23).
- Список литературы (24).

### 1. Введение

Астрономия — эволюционная наука; нет ни одной ее области, в которой не стоял бы вопрос о происхождении рассматриваемых объектов. Великим триумфом естествознания явилось понимание источников энергии и закономерностей эволюции звезд, достигнутое в основном в 40–60-х годах XX века. В те же годы стало ясно, что звезды образуются путем конденсации разреженного газа, но о движущих силах этого процесса до сих пор продолжаются споры. Эволюция галактик определяется историей звездообразования в них, и наиболее заметные детали их структуры являются обширными областями продолжающегося в наше время звездообразования. Понимание же эволюции галактик — необходимая предпосылка для решения вопроса об их происхождении, глубинно связанного с космологической проблемой, решение которой остается крупнейшей задачей науки.

Газ, служащий исходным материалом для формирования звезд, представляет собой сложную многофазовую среду с областями разной плотности, температуры и степени ионизации. Имеются, в частности, холодные (температура около 100 К) и плотные облака, погруженные в теплую (около 10<sup>4</sup> К), а то и горячую (до 10<sup>6</sup> К) разреженную среду. Этот газ находится в состоянии крупномасштабных хаотических движений, возбуждаемых в нем взрывами сверхновых звезд и интенсивным звездным ветром от молодых массивных звезд. Скорости движения газа чаще всего превышают скорость звука; по этой причине такие сложные сверхзвуковые хаотические движения межзвездной среды называют для краткости "сверхзвуковая турбулентность". Отличительная черта такой турбулентности — наличие распространяющихся по среде ударных волн различных пространственных масштабов и интенсивности. Межзвездная среда является к тому же еще и замагниченной, причем энергия магнитного поля сравнима иногда с энергией турбулентных движений.

**Ю.Н. Ефремов.** Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга,  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119992 Москва, Университетский просп. 13, Российская Федерация  
Тел. (095) 939-16-22. Факс (095) 932-88-41

E-mail: efremov@sai.msu.ru

**А.Д. Чернин.** Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга,  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119992 Москва, Университетский просп. 13, Российская Федерация  
Тел. (095) 939-16-22. Факс (095) 932-88-41

E-mail: chernin@sai.msu.ru

Tuorla Observatory, University of Turku, Piikkiö, FIN-21500 Finland  
Astronomy Division, University of Oulu, FIN-90014 Finland

Статья поступила 26 марта 2002 г.,  
после доработки 28 августа 2002 г.

В газе галактических дисков идет самопроизвольное, спонтанное звездообразование, обусловленное в конечном счете гравитационным коллапсом — сжатием газовых облаков и превращением их в звезды. Флуктуации плотности межзвездной среды создаются сверхзвуковой турбулентностью; те из них, масса и плотность которых превышают критические, дают начало звездам. Турбулентность и гравитация присутствуют всегда и можно даже сказать, что самопроизвольного звездообразования не существует вовсе, по крайней мере в том смысле, в каком спонтанным является процесс распада радиоактивных ядер. Однако звездообразование, обусловленное процессами (и, в частности, неустойчивостями разного рода), включение которых не связано с какими-то специальными явлениями, но которые составляют неотъемлемое свойство межзвездной среды, вполне можно считать спонтанным.

Все большие исследователей приходят к выводу, что звездные скопления образуются в тех участках облаков молекулярного водорода (наиболее плотных структурах межзвездной среды), где турбулентность оказывается слишком слабой для того, чтобы противостоять гравитации. Преодолеть противоборствующую с гравитацией турбулентность могут процессы, увеличивающие плотность и давление в межзвездной среде (звездный ветер от горячих звезд, ударные волны от взрывов сверхновых звезд, всегалактические спиральные волны плотности, столкновения газовых облаков и ударных волн и т.д.) и запускающие механизмы триггерного (стимулированного, инициированного) звездообразования.

Наш обзор посвящен крупномасштабным процессам звездообразования в межзвездной среде и порожденным ими структурам. Особое внимание уделено обсуждению роли турбулентности в образовании звездных группировок различного масштаба, а также структурам, возникающим при воздействии на межзвездную среду ударных волн, особенно, обусловленных динамическим давлением. Движение газовых облаков и целых галактик через менее плотную среду приводит к стимулированному звездообразованию и возникновению характерных, почти неизученных феноменов.

## 2. Звезды образуются и в наше время

Звезды образуются и в наше время — этот вывод стал общепринятым полвека назад, и мы вначале вкратце расскажем о том, как к нему пришли. В начале 30-х годов XX в. господствовало представление, что все звезды образовались одновременно в незапамятные времена. К 1950 г. почти все стали согласны с тем, что различие возрастов звезд составляет миллиарды лет и звездообразование продолжается и по сей день.

Научная постановка вопроса о происхождении звезд принадлежит В. Гершелью, который первым начал систематически наблюдать звездные скопления и туманности с достаточно большими телескопами. Он пришел к заключению, что разные объекты могут находиться на разных стадиях эволюции и, поскольку изменения в мире звезд слишком медленны и мы не можем их непосредственно заметить, задача состоит в том, чтобы правильно определить место объекта в эволюционной последовательности. Гершель писал в 1789 г.: "Чтобы доказать развитие растения, не будет ли одним и тем же последовательно наблюдать прорастание, цветение,

листву, плодоношение, увядание и гибель одного экземпляра данного растения или же одновременно наблюдать огромное число экземпляров, демонстрирующих все стадии, которые проходит это растение в течение своего существования". Гершель считал, что он непосредственно наблюдает образование звезд, глядя на планетарные туманности, и в некоторых из них, казалось ему, этот процесс уже свершился — в центре сияет звезда! Мы знаем теперь, что именно эти туманности — оболочки, которые звезды сбрасывают незадолго до смерти. Задача определения стадии эволюции звезды, поставленная Гершлем, нашла правильное решение лишь в середине XX в.

К концу XIX в. были получены достаточно надежные данные о светимостях, температурах и массах звезд и появились первые попытки связать эти данные физической теорией и дать им эволюционное истолкование. Особое значение для наблюдательного подхода к проблеме эволюции звезд имело появление диаграммы спектр–светимость Э. Герцшпрунга и Г. Рессела (1905—1913 гг.). Рессел, основываясь на идеи Локьера, предположил в 1913 г., что звезды, возникая как холодные огромные гиганты, сжимаются, нагреваются и приходят на главную последовательность на этой диаграмме, после чего постепенно охлаждаются и "скатываются" по ней вниз. Источником энергии звезд считалось их гравитационное сжатие. Однако уже к 1926 г., в основном благодаря работам А. Эддингтона, стало ясно, что эта эволюционная схема не проходит. Сроки жизни Солнца получались на два порядка меньше возраста горных пород Земли, быстрого уменьшения периода пульсаций цефеид (из-за предполагаемого сжатия) отнюдь не наблюдалось. А. Эддингтон указывал на ядерный синтез как на возможный источник энергии звезд, а Дж. Джинс более вероятным считал переход вещества звезды в излучение, подразумевая слияние протонов с электронами. Эта аннигиляция обеспечивала время жизни Солнца  $10^{13}$  лет. Для всей совокупности звезд Галактики Джинс получил такую же оценку возраста из динамических соображений, по срокам распада звездных скоплений и статистике орбит двойных звезд.

Казалось бы, проблема происхождения звезд отодвигается в глубокое прошлое, сливаясь с проблемой происхождения галактик. Правда, уже в середине 30-х годов Б. Бок и В.А. Амбарцумян получили динамические сроки испарения звездных скоплений существенно более короткие, чем возраст Галактики по оценке Джинса. Вскоре появились и астрофизические данные о краткости жизни, по крайней мере, массивных звезд. В начале 30-х годов появились работы, в которых в качестве источника энергии звезд предлагались ядерные реакции. Эта идея стала почти общепринятой после работы ныне здравствующего Г. Бете 1938-го года, в которой он показал, что этим источником может быть превращение водорода в гелий. Теория ядерных реакций позволяла оценить время, на которое в звезде хватит ядерного горючего. Сроки жизни звезд можно было получить по оценкам запасов ядерного горючего (т.е. массы звезды) и темпов его расходования (т.е. светимости), а поскольку светимость пропорциональна кубу массы, стало ясно, что чем больше светимость звезды, тем короче ее жизненный путь.

Одним из первых, кто понял, что звезды высокой светимости образовались совсем недавно, был

Ф. Уиппл. В работе, представленной в январе 1942 г. Межамериканскому астрофизическому конгрессу, Уиппл (1946) отметил, что никакой известный физический процесс генерации энергии не может поддерживать излучение сверхгигантских звезд в течение трех миллиардов лет — минимально допустимого времени жизни Галактики и поэтому должен существовать какой-то процесс современного нам звездообразования. "Межзвездное вещество, — заключил Уиппл, — обеспечивает единственный очевидный источник материала для построения звезд". Опираясь на работу Л. Спитцера о динамике межзвездной среды, Ф. Уиппл пришел к выводу, что за срок порядка  $10^9$  лет наблюдаемые ныне межзвездные газово-пылевые облака могут превозмочь в звездные скопления, чем и объясняется сходство пространственно-кинематических характеристик скоплений и облаков и тенденция молодых звезд ассоциироваться с поглощающими свет пылевыми облаками. По существу, тем самым были сформулированы основы современных представлений о происхождении звезд.

В 1944 г. Унзольд рассчитал, на какой срок хватит термоядерных источников энергии для звезд высокой светимости; он нашел, например, что время жизни звезды класса O7 всего лишь  $1,3 \times 10^7$  лет. Работа Унзольда также задержалась с публикацией и появилась лишь в 1947 г. Отмечая, что звезды высокой светимости обычно встречаются по соседству с поглощающими свет облаками, Рессел в 1948 г. пришел к выводу, что это объясняется продолжающейся конденсацией звезд из дозвездной материи — газово-пылевого вещества. В 1946 г. Бок, рассмотрев всевозможные способы оценки возрастов звезд и галактик, пришел к выводу, что "мы почти вынуждены допустить вероятность того, что звезды все еще "рождаются" или что по крайней мере некоторые сверхгиганты начали существование менее  $5 \times 10^8$  лет назад". В 1952 г. Б. Стремгрен также констатировал, что "рассмотрение времен жизни массивных О и В звезд ведет к заключению, что такие звезды непрерывно образуются из межзвездного вещества".

Однако в те же годы Ф. Хайл (1915–2001) пытался объяснить существование горячих звезд высокой светимости их омоложением путем акреции межзвездного вещества — именно в надежде согласовать их возраст с возрастом Галактики. Позиции сторонников образования всех звезд в далеком прошлом еще не были сданы.

Важную роль в признании продолжающегося в наши дни звездообразования сыграли работы В.А. Амбарцумяна (1908–1996) о звездных ассоциациях, начатые в 1947 г. Ассоциации в нашей Галактике обычно не заметны на фотографиях. Они выделяются из звезд фона лишь как сгущения звезд определенного типа (рис. 1). Еще в 1910–1914 гг., после появления первых каталогов спектров и лучевых скоростей звезд, Я. Капtein, В. Босс и А. Эддингтон обнаружили большие группировки горячих звезд (спектральных классов O и B) и, в частности, известные ныне как ОВ-ассоциации в Орионе, Скорпионе и Кентавре. В 1929 г. А. Паннекук опубликовал список 37 конденсаций ОВ-звезд, среди которых наряду со скоплениями были и весьма большие группировки.

Х. Шепли в 1927 г. пришел к выводу, что звездные скопления в ряде случаев являются концентрированными частями больших систем. Аналогичное заключе-

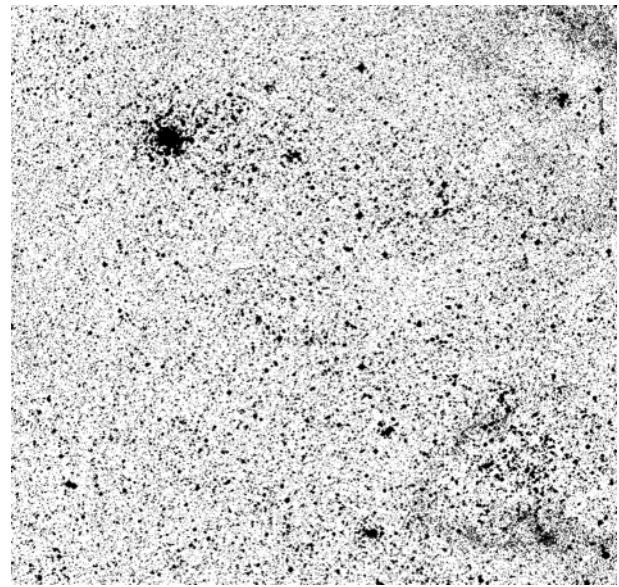


Рис. 1. Участок ближайшей галактики — Большого Магелланова Облака. Слева вверху — молодое массивное скопление NGC 2100, справа внизу — ОВ-ассоциация LH 104 = NGC 2081.

ние сделал и В. Биделман, опубликовавший в 1943 г. результаты исследования сверхгигантов в области двойного скопления  $\eta$  и  $\chi$  Персея. Их физическая связь со скоплением несомненна, но размеры всей группировки составляли примерно 200 пк (у рассеянных скоплений они очень редко превосходят 5 пк). В. Биделман считал, что эти сверхгиганты не могли быть выходцами из двойного скопления, каждое из которых способно удержать своих членов, и что проблема динамики звездных облаков еще далека от решения. О. Струве исследовал в 1945 г. аналогичную группу сверхгигантов вокруг рассеянного скопления NGC 6231 (в Скорпионе) и отметил, что тенденция скоплений быть окружеными протяженными группами сверхгигантов — одна из наиболее важных их структурных особенностей.

Именно эти две группы были приведены В.А. Амбарцумяном в 1947 г. как примеры разреженных группировок ОВ-звезд; он предложил для них название "звездные ассоциации". Но дело было, конечно, не в новом названии для известных уже группировок. В.А. Амбарцумян оценил их плотность и пришел к выводу, что она недостаточна для устойчивости группировки, подверженной действию приливных сил Галактики. Ни В. Бидельман, ни О. Струве на это заключение не отважились, хотя Амбарцумян первоначально оперировал лишь их данными. Он нашел, что за срок порядка  $10^7$  лет ассоциации должны были бы распасться. Из динамической неустойчивости ассоциаций следовала молодость их звезд, и поэтому эти оценки возраста ассоциаций привлекли большое внимание. Они получили подтверждение в 1952 г., когда В. Блаау обнаружил, что собственные движения звезд небольшой О-ассоциации вблизи  $\zeta$  Персея указывают на ее расширение со скоростью около  $10 \text{ km s}^{-1}$ . Вывод о молодости звезд высокой светимости стал общепринятым.

Об "открытии нового типа звездных систем", о "победе советской материалистической космогонии", пришедшей к выводу о групповом образовании звезд,

продолжающемся в наше время, говорилось в резолюциях наших космогонических совещаний в 1951–1954 гг. О. Струве, наследник астрономической династии Струве и белоэмигрант, пристально следивший за нашей астрономией, в 1949 г. написал в *Sky and Telescope* сочлененную статью о звездных ассоциациях, должным образом оценив вывод В.А. Амбарцумяна об их динамической неустойчивости. Но в 1952 г., в разгар кампании "борьбы за приоритет русской науки", в статье, озаглавленной "Астрономия в духе 1984", Струве говорил уже по-другому: "Амбарцумян не "открыл" существование "звездных ассоциаций", хотя ему принадлежит огромная заслуга выдвижения замечательно стимулирующих идей, касающихся их свойств и происхождения. "Испарились" ли в Советском Союзе память о Каптейне и не стал ли великий голландский астроном "нелицом"?

Звездные группировки, которым В.А. Амбарцумян дал название "звездные ассоциации", в большинстве действительно были известны и до его работ, и он сам (в отличие от своих последователей) об "открытии" ассоциаций не говорил. Термин "ассоциация" также употреблялся и раньше, однако именно Амбарцумян ввел понятие "ассоциаций" как больших разреженных группировок молодых звезд, и оно оказалось весьма полезным. Однако на выводе о динамической неустойчивости ассоциаций В.А. Амбарцумян не остановился. По его оценке, за срок порядка  $10^7$  лет ассоциации должны заметным образом растянуться параллельно галактической плоскости, однако имевшиеся тогда наблюдательные данные этого не показывали. Отсюда В.А. Амбарцумян заключил, что звезды ассоциаций уже при рождении получили скорость не менее  $1 \text{ км с}^{-1}$  (иначе влияние дифференциальной галактического вращения (т.е. приливные силы Галактики) сказалось бы на форме ассоциаций), но и не более  $10 \text{ км с}^{-1}$  (такие большие скорости были бы легко заметны). А поскольку конденсация диффузного вещества (при сохранении исходной массы) может дать только гравитационно-связанную звездную систему, Амбарцумян был вынужден предположить, что звезды образуются вследствие взрывного распада компактных массивных ненаблюдаемых тел. Это предположение влечет и физические, и чисто логические проблемы, что побудило многих астрономов выступить против них. Представления о самом существовании звездных ассоциаций, их расширении и взрывном образовании звезд из ненаблюдаемых сверхплотных тел часто рассматривались как единое "учение", что побуждало противников В.А. Амбарцумяна выступать и против самой реальности звездных ассоциаций. Битва разгорелась на II совещании по вопросам космогонии в мае 1952 г. и закончилась победой В.А. Амбарцумяна. Он и его сторонники заняли господствующие высоты в отечественной астрономии.

Отметим, что сама возможность критиковать "учение о звездных ассоциациях" (а оно было в 1950 г. удостоено Сталинской премии) говорит о том, что моральный климат в отечественной астрономии существенно отличался от такового, скажем, в биологии... Впрочем, в решении этого совещания в отношении А.И. Лебединского и Л.Э. Гуревича было высказано пожелание об "учете критики и более полном использовании богатых фактических данных". В теоретических исследованиях рекомендовалось "еще полнее разоблачать идеалистическую сущность и научную несостоя-

тельность "теорий" физических идеалистов Хойля, Вейцекера, Иордана и др.". На этом совещании Б.А. Воронцов-Вельяминов, А.И. Лебединский и Л.Э. Гуревич особенно активно выступали против неведомо как возникших дозвездных "сверхплотных тел", которые то выбрасывают из себя отдельные звезды, то рождают гравитационно-связанные скопления и газовые облака (которые неизменно связаны с молодыми звездными группировками) и, будучи бесстолкновительной системой, тем не менее концентрируются почему-то (как и газ, и молодые звезды) в плоскости Галактики. Ни один из них не стал членом Академии наук. Позднее неоднократно проваливали на выборах в АН и С.Б. Пикельнера, одного из основоположников современной теории звездообразования (см. [1]), который говорил осенью 1975 г., что невозможность научной дискуссии со сторонниками "бюраканской концепции" является позором для нашей науки. Оспаривающая эту концепцию статья П.Н. Холопова была в начале 1970-х годов отвергнута *Астрономическим журналом*.

Критики "учения об ассоциациях" (которое позднее стало называться бюраканской концепцией) оспаривали и реальность существования звездных ассоциаций, и их расширение. Странным образом роль поступления в окружающую среду энергии, вырабатываемой внутри звезд (в виде звездного ветра и расширяющихся зон НII вокруг О-звезд), а также при взрывах сверхновых, недоучитывалась; в 1956 г. Лебединский и Хорошева определенно высказались против потери газа протоскоплением как причины расширения ассоциаций. Правда, для должной оценки ее влияния необходимы были еще современные знания о весьма низкой эффективности звездообразования в большинстве протоскоплений. Если достаточно быстро уходит много газа, новорожденная звездная группировка становится гравитационно-несвязанной и довольно скоро должна стать разреженной и большой по размерам, так что будет классифицироваться как ассоциация. Возможно, острые дискуссии, сотрясавшие нашу астрономию в начале 50-х годов и возобновившиеся в 70-е, и не имели бы места, если бы этот простой механизм расширения и распада ассоциаций был тогда общепринят, как сейчас. Он был известен давно, но сведения о низкой эффективности звездообразования, о молекулярных облаках накопились лишь в 80-е годы. Проблема сейчас состоит в том, как вообще объяснить рождение массивных гравитационно-связанных скоплений, ведь в них обязательно должны были быть О-звезды и сверхновые. Обычная палочка-выручалочка, предположение о различии начальной функции масс звезд в скоплениях, не проходит, потому что во многих случаях в массивных старых скоплениях имеются огарки массивных звезд — нейтронные звезды.

Заканчивая историческое введение, заметим, что в некотором смысле протоскопления действительно оказались плотными (но отнюдь не сверхплотными) ненаблюдаемыми (примерно до 1975 г.) телами. В давно сошедшей со сцены "бюраканской концепции" можно увидеть задним числом рациональное зерно. Плотность молекулярных облаков, исследование которых началось с середины 70-х годов, намного выше, чем у порождаемых ими звездных скоплений. Однако еще в 1986 г. В.А. Амбарцумян утверждал, что и звезды и туманности образуются из чего-то другого (и с тех пор он по этому вопросу публично не высказывался). Эта настойчивость

в отставании заведомо безнадежной концепции кажется странной, трудно вообразить, что он сам не понимал ее безнадежности. И.С. Шкловский в разговоре (которому суждено было стать последним) с одним из авторов в декабре 1984 г. назвал ее лысенковщиной и добавил, что и социальные корни те же... Впрочем, есть сведения, что в частных разговорах В.А. Амбарцумян признавал, что "концепция" стала чем-то вроде фирменного знака Бюраканской обсерватории, от которого не след отказываться...

Заметим, что другими составными частями бюраканской концепции стали затем представления о распаде скоплений галактик и об особой роли ядер галактик; в обоих случаях опять-таки подразумевалось рождение галактик из ненаблюданного сверхплотного вещества. Схожие мысли о появлении в ядрах галактик нового вещества высказывал еще Дж. Джинс, а затем Ф. Хайл и Х. Арп. В образовании галактик много неясного и по сей день, однако имеется уже ряд наблюдательных свидетельств того, что в ядрах галактик и в квазарах сидят "обыкновенные" черные дыры, а "вириальный парадокс" для скоплений галактик объяснялся существованием ненаблюданной массы. В.А. Амбарцумян возражал против обоих этих объяснений, однако, как и в случае звездных ассоциаций, он привлек внимание к действительно важным проблемам. Рассмотренные в этом введении вопросы более подробно обсуждаются в книгах [1–3].

### 3. Иерархические звездные группировки

С конца 1950-х годов стало появляться все больше данных о том, что подобно тому, как горячие молодые звезды встречаются не по одиночке, а в ассоциациях, так и сами ОВ-ассоциации образуют группы (рис. 2). Затем было обнаружено, что в обширных группах сконцентрированы и звезды значительно более старые — цефеиды, пульсирующие строго регулярно массивные звезды. Благодаря зависимости период–светимость расстояния до цефеид определяются столь же уверенно, как и

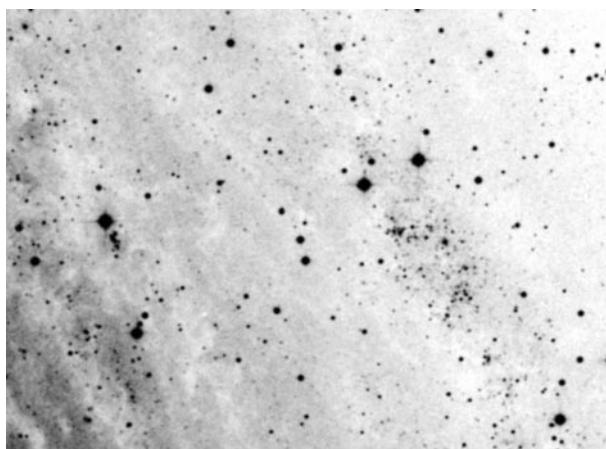
расстояния до рассеянных звездных скоплений. У цефеид была найдена также зависимость период–возраст. Чем больше масса и светимость звезды, тем больше ее радиус и меньше возраст и плотность, а последняя определяет период. Цефеиды наибольших периодов имеют возраст около 20 млн лет, а наименьших — 200 млн лет [4], тогда как возраст О-звезд не более нескольких миллионов лет. В состав выделенных по цефеидам групп входили и более молодые объекты, в том числе и звездные ассоциации, средний их размер составлял около 600 пк. Этим группам было дано название звездных комплексов [5].

Дальнейшие исследования показали, что около 90 % ассоциаций в нашей Галактике и ближайших галактиках входят в состав звездных комплексов [3, 6]. Осознание этого факта, что ОВ-ассоциации, как правило, погружены в звездные группировки гораздо большего размера, состоящие из более старых звезд меньшей светимости, помогло понять противоречивые результаты, получавшиеся при изучении звездных ассоциаций в других галактиках. В 1964 г. С. ван ден Берг [7] выделил в галактике Андромеды около 200 группировок голубых звезд со средним поперечником в 500 пк. Он рассматривал эти группировки как ОВ-ассоциации, а их вдвое превышающие, чем в нашей Галактике, размеры объяснил тем, что окраинные части ассоциаций в нашей Галактике теряются в более плотном, чем в М31, звездном фоне. Однако затем было обнаружено, что в обширных группировках голубых звезд в М31 концентрируются и цефеиды. После выделения звездных комплексов в нашей Галактике стало ясно, что в М31 они выглядели бы в точности как группировки, описанные ван ден Бергом под названием ОВ-ассоциаций.

Больший возраст и размеры звездных комплексов сравнительно с ОВ-ассоциациями позволили объяснить большое различие в размерах "ассоциаций", выделенных и в нескольких других галактиках (многие из них следовало бы классифицировать как звездные комплексы). Подлинные ОВ-ассоциации были выделены и внутри группировок ван ден Берга в М31 при поисках наиболее голубых и ярких (а следовательно, наиболее молодых) звезд, причем для этих "истинных" ОВ-ассоциаций был получен средний размер в 80 пк. Оказалось, что примерно такой же размер имеют ассоциации во всех изученных галактиках, если выделять именно наиболее яркие звезды [6]. Этот вывод был неоднократно подтвержден, в том числе при использовании объективных методов объединения звезд в группы, и при высоком разрешении, даваемом космическим телескопом Хаббла [8].

Возникало впечатление, что размер в 80 пк является выделенным, характерным для ОВ-ассоциаций, и мы предполагали, что его существование может быть связано с наличием среднего размера (около 40 пк) у гигантских молекулярных облаков, прародителей ОВ-ассоциаций. При обычно низкой эффективности звездообразования и повсеместно малой вероятности образования массивных О-звезд именно гигантское облако с массой порядка 100 000 солнечных нужно для того, чтобы в возникающей из него звездной группировке появились О-звезды и она заслужила бы названия О-ассоциации [6].

Однако новые данные позволяют усомниться в наличии выделенного размера у газовых облаков, а в

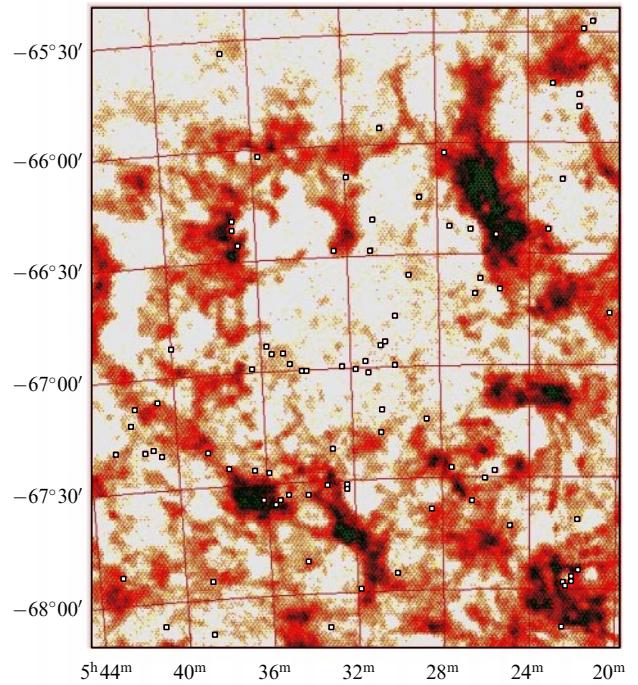


**Рис. 2.** Участок ближайшей спиральной галактики — Туманности Андромеды (М31). Справа — звездный комплекс ОВ 122, слева (под яркой звездой переднего фона) — звездная ассоциация ОВ 132. Она выглядит цепочкой из нескольких звезд из-за наклона плоскости М31 к лучу зрения. Диаметр ОВ 132 около 100 пк. Это редкий пример изолированной ОВ-ассоциации.

распределении по размерам и массам у газовых облаков и звездных группировок имеется большое, генетически обусловленное сходство. Ряду, начинающемуся от кратных звезд, и далее от скоплений, ассоциаций и групп ассоциаций к звездным комплексам, соответствует последовательность газовых облаков, от уплотнений в ядрах молекулярных облаков размером в доли парсека до сверхоблаков с массами до  $10^7$  солнечных и размерами до 1 кпк. По всей видимости, только эти сверхоблака можно считать самостоятельными, отдельно существующими структурными единицами, и встречаются они, как правило, в спиральных рукавах галактик, к чему мы еще вернемся. Меньшие структуры являются, по-видимому, артефактом ограниченного пространственного разрешения радиотелескопов; точнее говоря, они являются лишь условно выделяемыми звеньями континуума.

Накапливается все больше данных о том, что, за исключением тех сравнительно редких случаев, когда на газ действуют регулярные силы (вроде гравитации в спиральных волнах плотности), облачная структура межзвездного газа представляет собой, в основном, протяженную сеть турбулентного газа со сверхзвуковыми движениями и иерархическим, фрактальным распределением плотности. Облака в этой сети имеют иерархическую, самоподобную, фрактальную структуру, и параметр, называемый объемной фрактальной размерностью, был найден равным  $D \simeq 2,3$  [8]. (Напомним, что при однородном распределении плотности масса внутри сферы данного радиуса пропорциональна кубу радиуса и фрактальная размерность в этом предельном случае равна 3. Чем меньше значение фрактальной размерности, тем меньший объем данной сферы занимают заполняющие его объекты фрактальной природы.)

Это значение близко к наблюдаемому в земных лабораториях в процессах, связанных с турбулентностью, что может указывать на ее значительную роль и в образовании межзвездных газовых облаков [9]. Звездообразование, идущее в газовых облаках разного масштаба, также должно быть иерархическим, приводящим к появлению вложенных друг в друга группировок разного масштаба, наибольшими из которых являются звездные комплексы [10]. Но во фрактальном распределении нет характерного размера, нет выделенных масс. Недавние наблюдения Большого Магелланова Облака (БМО) в линии нейтрального водорода, проведенные с большим разрешением (рис. 3), подтверждают, что индивидуальных облаков, по существу, нет, это идеализация действительности; на самом деле имеется неоднородное распределение плотности с волокнами, уплотнениями и разрежениями, с многочисленными полостями, природа которых обсуждается дальше [11]. Фрактальность означает, что плотность газа уменьшается с увеличением рассматриваемого объема, а турбулентность означает наличие иррегулярных движений в газе, которые характеризуются дисперсией скоростей в данном объеме. Турбулентное время пересечения облака примерно равно отношению размера  $\lambda$  облака к гауссовой дисперсии скоростей  $v$ , и в соответствии с наблюдательными данными о молекулярных облаках — наиболее плотных областях межзвездного газа — это время примерно пропорционально корню квадратному из размера  $\lambda$  (см. [11] и ссылки там).



**Рис. 3.** Карта поверхности плотности нейтрального водорода (НI) в северо-восточной области БМО (по данным [11]) и звездных скоплений (квадратики). Обширная полость/сверхоболочка LMC4 занимает середину рисунка.  $1^\circ = 900$  пк. Эпоха координат 2000.0.

Последний результат находится в замечательном согласии с теорией, развитой С.А. Капланом [12] для квазизотропной акустической турбулентности с разрывами и ударными волнами. Спектр такой турбулентности, т.е. зависимость скорости от масштаба движения, имеет вид  $v \propto \lambda^{1/2}$ , так что размер, деленный на соответствующую ему скорость, действительно пропорционален квадратному корню из размера. Как уже говорилось выше, турбулентность в областях звездообразования обязана своим происхождением главным образом энерговыделению при взрывах сверхновых звезд, а также потокам газа, создаваемым звездным ветром от молодых массивных звезд. При этом в среде возникают движущиеся со сверхзвуковыми скоростями оболочки большого масштаба (до сотен парсек в диаметре), которые могут сталкиваться друг с другом, создавая в процессе столкновений движения меньших масштабов. Эти вторичные коротковолновые движения имеют сложную пространственную структуру, включают в себя как акустическую, так и вихревую составляющую и тоже могут быть сверхзвуковыми. При этом во всей области масштабов, от самых малых до размера больших оболочек, имеются ударные волны, создающие значительные уплотнения в межзвездном газе.

Возникающий таким путем и описываемый спектром Каплана сверхзвуковой каскад турбулентных движений похож на колмогоровские каскады в вихревой турбулентности несжимаемой среды. Сходство усиливается еще и тем, что в обоих случаях возможно возникновение универсальных фрактальных спектров хаотических движений, причем показатели степени в этих спектрах не слишком сильно отличаются друг от друга. Однако имеется и существенное различие, состоящее в том, что в колмогоровском каскаде нет диссипации энергии (она

происходит лишь в самом малом масштабе каскада, где действует вязкость), тогда как в сверхзвуковом каскаде диссипация имеет место в каждом акте нелинейного взаимодействия ударных фронтов. Поэтому, в частности, в акустической турбулентности скорость падает с масштабом быстрее, чем в случае турбулентности несжимаемой среды. Сверхзвуковой каскад порождает (именно вследствие диссипации своей энергии) соответствующую иерархическую систему уплотнений в газе, которая лишь в самом грубом приближении напоминает ансамбль облаков. Но даже на грубом языке облаков возможна разумная интерпретация наблюдательных данных, которая подтверждает существование самого каскада движений и даже дает правильную фрактальную размерность, отражающую спектр исходных сверхзвуковых хаотических движений.

Оказывается, что длительность звездообразования в данной области возрастает по закону  $Dt \simeq 3.3\lambda S^{0.38}$ , где  $Dt$  — возраст скоплений, млн лет,  $S$  — взаимное расстояние, пк, что было установлено при сравнении взаимных расстояний  $S$  и различий возрастов  $Dt$  звездных скоплений в Большом Магеллановом Облаке [13]. Показатель степени в этом эмпирическом законе не слишком сильно отличается от 1/2.

Эти данные ясно указывают на то, что именно сверхзвуковая турбулентность ответственна за формирование уплотнений газовой среды, начинающих коллапс в протозвезды, причем звездообразование заканчивается быстро, за полтора-три турбулентных времени пересечения. Образование звезд в скоплении может начаться, когда энергия турбулентности в исходном облаке диссирировала, причем время диссипации невелико и согласно оценкам, основанным на численном моделировании магнитогидродинамической сверхзвуковой турбулентности, равно одному-двум временам пересечения (см. [10] и ссылки там).

Предположение о быстром звездообразовании подтверждается оценками разброса возрастов звезд в скоплениях [14]. Оно означает, что мы наблюдаем молодые звезды практически там, где они возникли как протозвезды, так что их распределение сохраняет определяемую турбулентностью фрактальную структуру исходного газа, от которой зависит и начальная функция масс звезд. Снимается проблема источников энергии поддержки молекулярных облаков против быстрого коллапса, ибо звездообразование действительно совершается быстро. Однако лишь небольшая доля массы этих облаков существует в нем в каждый момент, и быстрый коллапс этой доли не ведет к быстрому исчезновению облаков. Звездообразование неэффективно на больших масштабах, и проблема объяснения долгого времени жизни всей фрактальной сети молекулярных облаков не возникает [15]. Фрактальная структура вложенных друг в друга звездных группировок, отражающая структуру межзвездного газа, установлена надежно [16].

Зависимость размеров области звездообразования от ее возраста (т.е. от возраста старейших звезд в ней) позволяет по-другому подойти и к проблеме расширения звездных ассоциаций, и к наличию у них выделенного среднего размера. Более старые ассоциации имеют больший размер в соответствии с приведенной выше формулой, а не потому, что они расширились и постарели за это время. Расширение из общего центра,

предполагавшееся в бюраканской концепции выброса звезд из "сверхплотных тел", означало бы линейную зависимость возраста от размеров. Это не отрицает динамической нестабильности ассоциаций, но ставит под сомнение то, что именно она ответственна за связь размеров и возрастов. Последние работы показывают, что движения звезд в гравитационно-несвязанной группировке зависят от слишком многих факторов (например, наличия proximity газовых облаков) и момент начала расширения ассоциации и, следовательно, ее возраст по движениям звезд определяются крайне неуверенно.

Как уже было упомянуто, фрактальная иерархическая структурность не имеет выделенного масштаба, что противоречит наблюдаемому наличию предпочтительного размера. Возможно, этот выделенный размер является следствием того, что ОВ-ассоциации выделяются по звездам определенного возраста — О и ранним В-звездам. Вопрос требует дальнейшего изучения. Не исключено, что ассоциации не существуют как отдельный класс звездных группировок, это лишь масштаб в континууме размеров этих группировок, соответствующий возрасту около 10 млн лет. Размеры звездных группировок сопоставлены с их возрастом в работе [17], и признаки большего возраста у больших группировок были действительно найдены. Однако возрасты неразрешимых на звезды группировок, рассматривавшихся в [17], определены без привлечения данных в полосе U и поэтому очень ненадежны. Задача остается актуальной.

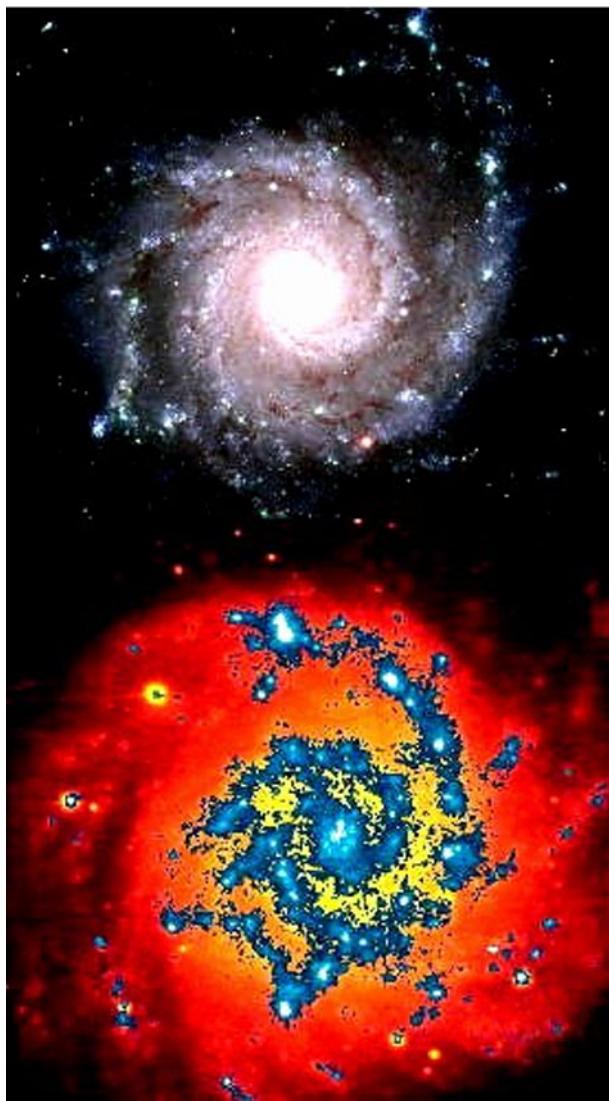
#### 4. Природа звездных комплексов

Физически выделенные размеры появляются, когда мы подходим к масштабам, соответствующим толщине спирального рукава или газового диска галактик. Это размеры наибольших округлых, еще не растянутых дифференциальным вращением звездных комплексов, которые зависят от динамических и морфологических параметров содержащих комплексы галактик, возрастающая с увеличением их диаметров [18, 19].

Области еще большего размера теряют название комплексов. Когда их диаметры становятся близкими к толщине галактического диска (несколько сотен парсек), они растягиваются дифференциальным вращением галактики в короткие обрывки спиральных рукавов. В этом смысле в иерархический ряд возрастающих по размеру областей звездообразования можно включить и следующий после комплексов класс объектов — флоккулентные спиральные рукава [20].

Однако не все области звездообразования являются турбулентными и не все структуры фрактальны. Расширяющиеся газовые оболочки, спиральные волны плотности, звездные скопления после релаксации и вообще все структуры, морфология которых определяется силами внешнего давления или непосредственно гравитацией, не являются фрактальными [21].

Большинство звездно-газовых комплексов является, по-видимому, потомками сверхгигантских газовых облаков, обособившихся вследствие действия крупномасштабной гравитационной нестабильности в газовом диске галактики [22, 23]. Именно сверхоблака с массой около  $10^7$  солнечных должны возникать первыми согласно критерию Джинса при плотности и дисперсии



**Рис. 4.** Спиральная галактика NGC 628 = M74. Наверху — снимок, полученный на 8-метровом телескопе Gemini, внизу — на UIT (ультрафиолетовый телескоп на борту "Шаттла"). Звездные комплексы выделяются как яркие пятна в спиральных рукавах.

скоростей, обычно наблюдающихся в газовых дисках галактик. Значение критической плотности в дисках галактик, ниже которого звездообразование не идет, соответствует как раз массам в  $10^7$  солнечных и джинсовской длине волн в 1 кпк [24]. Столь массивные облака и возникающие из них звездные комплексы являются флуктуациями плотности, достаточно большими для развития спиральной структуры в галактических дисках, находящихся на границе устойчивости [25]. Однако спиральные рукава существуют и там, где плотность ниже критической, например в М33. Вопрос о необходимости достижения пороговой плотности газа для начала крупномасштабного звездообразования рассмотрен в [26].

На изображениях весьма далеких и, следовательно, молодых галактик в глубоких полях телескопа Хаббла часто действительно обнаруживается присутствие нескольких очень ярких звездных комплексов — сверхассоциаций, обычно находящихся в спиральных рукавах [27]. В правильных двурукавных спиральных галактиках, рукава которых являются волнами плотности, многочи-

сленные звездно-газовые комплексы концентрируются в спиральных рукавах (рис. 4) и часто интервалы между ними вдоль рукава примерно одинаковы [23]. Последнее обстоятельство указывает на то, что эти (так сказать, вторичные) комплексы образовались под действием гравитационной неустойчивости [28] или же магнитогравитационной нестабильности [29], развивающихся вдоль рукава. В последнем случае магнитное поле вдоль рукава должно быть регулярным, и это действительно наблюдается именно для того участка западного спирального рукава М31, в котором расстояния между звездными комплексами одинаковые. В то же время такого рода регулярность полностью отсутствует в рукавах спиральной галактики NGC 6946, магнитное поле в которых иррегулярное (регулярное магнитное поле имеется в этой галактике между видимыми в оптике рукавами). Отсюда мы приходим к выводу, что магнитогравитационная неустойчивость является доминирующим механизмом образования звездно-газовых комплексов вдоль волновых спиральных рукавов, такими обладают *grand design* галактики.

Таким образом, в настоящее время существуют две точки зрения на происхождение наибольших структурных объединений молодых звезд. В контексте звездообразования во фрактально структурированном газе трудно говорить о физической общности происхождения звезд комплекса, и вопрос о происхождении звездных комплексов просто снимается. Это области сети межзвездного газа, охваченные звездообразованием. Остаются, однако, непонятными причины постоянства появления выделенного размера О-ассоциаций, все еще необходима наблюдательная проверка соотношения между возрастом и размерами звездных группировок. Многие данные указывают на существование изолированных сверхоблаков, внутри которых появляется со временем звездное население комплекса. По крайней мере внутри длинных спиральных рукавов в галактиках, имеющих *grand design*, звездные комплексы бесспорно образуются из первоначально обособленных сверхоблаков. Внутри же них имеется все то же фрактальное распределение плотности.

## 5. Образование звездных скоплений

До последнего времени считалось, что звезды всегда образуются группами, а наличие изолированных молодых звезд объяснялось быстрым распадом группировок, в которых они родились. Низкая эффективность звездообразования ставит вопрос, как вообще могли сохраняться гравитационно-связанными скопления, содержащие массивные звезды, которые на стадии О-звезд и сверхновых интенсивно воздействуют на межзвездный газ, изгоняя его из молодого скопления. Этот вопрос относится также и к классическим (старым) шаровым скоплениям, в которых массивные звезды, несомненно, были, как это следует из наличия в них большого количества нейтронных звезд (да и вообще из естественного и имеющего много подтверждений заключения о единстве начальной функции масс звезд в скоплениях вкупе с большой массой (до  $10^6$  солнечных) этих скоплений).

Можно говорить и о единстве функции масс для самих звездных скоплений, от маломассивных рассеянных до шаровых, причем вид этой функции аналогичен

распределению по массам газовых облаков. Иерархическая самоподобная структура, в том числе и газовых облаков, при любой фрактальной размерности этой структурированности должна иметь распределение по массам вида  $n(M) dM \propto M^{-2} dM$ , и это подтверждается наблюдениями (см. [21] и ссылки там). Таково же распределение по массам и всех звездных скоплений (после учета ухода звезд из старых скоплений), что говорит о происхождении их всех из фрактально структурированных турбулентных газовых облаков [30]. Массивные шаровые скопления образуются в областях с высоким давлением, которое делает исходное газовое облако устойчивым к разрушающему воздействию излучения О-звезд и взрывов сверхновых. В таких облаках и должны рождаться плотные гравитационно-связанные скопления [30, 31].

Единство происхождения рассеянных и шаровых скоплений, аргументированное в [30], согласуется с выводом Ларсена [32] о том, что традиционное различие между рассеянными, массивными и шаровыми скоплениями условно и в существенной степени обусловлено низким темпом образования звезд и скоплений в современной Галактике. Близкие идеи давно были сформулированы П.Н. Холоповым [2]. Классические старые шаровые скопления в гало нашей и других галактик образовались в условиях высокой плотности в первичной вспышке звездообразования, что и объясняет их почти одинаковый возраст.

В обычных же условиях, как в современном диске Галактики, воздействие О-звезд и сверхновых на газ приводит к его потере и возникновению гравитационно-несвязанной ассоциации. Поэтому молодых массивных компактных скоплений в нашей Галактике почти нет — более массивные группировки, образование которых продолжается в ее диске, являются разреженными ассоциациями. Только NGC 3603 и Cyg OB2 могут быть отнесены к молодым шаровым скоплениям.

Массивные гравитационно-связанные молодые скопления, однако, многочисленны в Магеллановых Областиах, а в последние годы молодые шаровые скопления в изобилии обнаруживаются во взаимодействующих галактиках [33–35]. Гипотеза о возникновении таких скоплений в областях с высоким давлением естественным образом это объясняет. Такое давление возникает в газе при сближениях галактик, провоцирующих столкновения облаков внутри них. Оба Магеллановых Областиах периодически сближаются друг с другом, что, очевидно, и объясняет многочисленность в них богатых звездных скоплений.

Распределение по массам наблюдающихся в нашей Галактике старых шаровых скоплений, однако, не степенное, а гауссово, большинство скоплений имеют массу около  $10^5$  солнечных. Это рассматривалось обычно как указание на то, что механизм образования рассеянных скоплений (для которых многие авторы давно уже получали степенное распределение с показателем около 2) совершенно иной, чем для шаровых скоплений. Однако отсутствие старых шаровых скоплений с малой массой объясняется тем, что за время около  $12 \times 10^9$  лет, прошедшее с момента их образования, такие скопления успели разрушиться в основном вследствие сближений с центром Галактики и гигантскими молекулярными облаками, а также испарения звезд, как вслед за Сурдным [36] заключают многие авторы.

Молодые компактные скопления, напоминающие богатые молодые скопления БМО, недавно обнаружены во многих неправильных и спиральных галактиках, в последних в первую очередь благодаря систематическому их поиску, проведенному Ларсеном и Рихтлером [20] в 21 спиральной галактике. Оказалось, что численность массивных молодых скоплений, нормированная к светимости хозяйской галактики, колеблется в широких пределах, но при этом коррелирует с темпом звездообразования в ней. Эти авторы отмечают, что высокого темпа звездообразования и результирующей большой плотности горячих звезд, поставляющих энергию в межзвездную среду, может быть достаточно для создания в ней высокого турбулентного давления и формирования гравитационно-связанных скоплений. Они приходят к выводу, что массивных молодых скоплений много там, где вообще много молодых звезд, и образование многочисленных массивных компактных скоплений во взаимодействующих и охваченных вспышкой звездообразования галактиках объясняется теми же механизмами, что и в обычных галактиках, но действующими в экстремальных условиях [34]. Это вывод подтвердил Уитмор [22], который нашел, что зависимость между темпом звездообразования и численностью молодых массивных скоплений, определенная в [34], может быть продолжена и на взаимодействующие галактики, содержащие много молодых богатых скоплений.

## 6. Две моды звездообразования

Однако не всегда образование массивных скоплений является простым следствием общего высокого темпа звездообразования. В нашей Галактике и в БМО известны примеры звездных комплексов, в которых необычно много или же необычно мало скоплений по отношению к числу изолированных звезд того же возраста [3]. Особенно поразительна в БМО группа массивных скоплений одинакового возраста вокруг NGC 2164 (рис. 5), в которой известны лишь три (и еще несколько

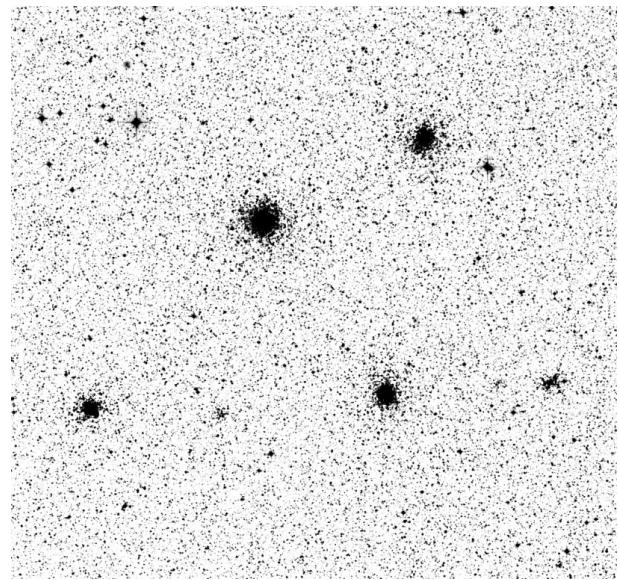


Рис. 5. Группа молодых массивных скоплений близ NGC 2164 в БМО.

внутри скоплений) цефеиды, хотя возраст этого комплекса оптимальный для появления цефеид.

В результате объективного сравнения распределения цефеид и скоплений того же возраста в БМО были найдены еще три группы скоплений, и оказалось, что лишь одна из четырех групп скоплений совпадает с концентрацией цефеид [37]. Эта группа находится на восточном крае бара галактики, где вокруг массивных скоплений NGC 2058 и NGC 2064 имеется еще два десятка меньших скоплений и около 150 цефеид, из которых более 20 являются членами скоплений. Непосредственно к юго-востоку от этого комплекса имеется плотная группа примерно того же размера (около  $200 \times 300$  пк), состоящая из 180 цефеид, но не содержащая сколько-нибудь заметных скоплений (рис. 6). В центральной части этой группы на площади около 0,1 кп<sup>2</sup> нет никаких скоплений, а плотность цефеид составляет около 900 на квадратный килопарсек, т.е. на два порядка выше, чем в окрестностях Солнца. Периоды и, следовательно, возрасты этих цефеид заключены в узких пределах. Отсюда вытекает, что этот комплекс к SE от NGC 2058 является реликтом вспышки звездообразования и причем необычной, не давшей, по крайней мере, гравитационно-связанных скоплений либо же порождавшей только изолированные звезды. Детальное изучение всего этого участка БМО критически важно для понимания причин, определяющих возникновение либо скоплений и изолированных звезд, либо только последних. Надо отметить, что почти симметрично с этой группой цефеид относительно оси бара находится область современной вспышки звездообразования 30 Dor. Такая локализация благоприятна, по-видимому, для интенсивного звездообразования.

Имеются и более масштабные рассогласования между появлением скоплений и изолированных звезд как в пространстве, так и во времени. Например, темп образования скоплений в неправильной галактике Местной группы IC 1613, нормированный к тому же темпу образования звезд, что и в БМО, в 600 раз меньше, чем в БМО — галактике того же типа [38]. Подобное несответствие наблюдается не только в разных локализациях, но и в разные времена в одной и той же галактике. Перерыв в образовании скоплений (по крайней мере,

массивных), продолжавшийся в БМО 4–14 млрд лет назад, не сопровождался уменьшением темпа образования звезд [39].

Ситуацию, по-видимому, можно понять опять-таки с позиций теории звездообразования в турбулентной среде. Согласно этой теории от свободного быстрого коллапса молекулярные облакадерживаются не магнитным полем, а турбулентностью, в зависимости от физических характеристик которой (интенсивности, пространственного масштаба) преимущественно образуются либо скопления, либо изолированные звезды.

Наличие только гравитации приводит к быстрому формированию скоплений, оно возможно также при затухающей турбулентности и турбулентности с большой длиной волны, тогда как при меньшей длине волны образуются только изолированные звезды [40, 41].

Последнее обстоятельство весьма важно, поскольку может быть наилучшим объяснением не только существования комплекса звезд без скоплений (впрочем, не объясняя еще его высокой плотности), но и вообще существования изолированных молодых массивных звезд. Оно с несомненностью доказано в цикле работ Массея и др. [42, 43], исследовавших звезды высокой светимости в поле и в ассоциациях БМО и показавших, что в поле находится половина таких звезд. С учетом их молодости это нельзя объяснить уходом ныне изолированных звезд столь далеко от возможных мест рождения в ассоциациях. По-видимому, слишком много таких звезд и для предположения, что они выброшены при динамических взаимодействиях звезд в ядрах плотных молодых скоплений. Важно при этом, что функция масс в поле имеет значительно больший наклон (т.е. указывает на большую долю звезд меньших масс), чем для звезд ассоциаций [43]. Крутой наклон этой функции для звезд больших масс получен как раз для случая турбулентности с малой длиной волны, который соответствует именно изолированному звездообразованию [44].

Вывод о том, что при отсутствии турбулентности или затухающей турбулентности (и незначительной роли магнитного поля в поддержке облака против гравитационного коллапса, аргументируемой сторонниками этой теории) образуются скопления, а не изолированные звезды, очевидно, означает, что звездообразование в скоплении идет весьма быстро, ибо при отсутствии турбулентной поддержки (и общего вращения) быстро совершается коллапс газового протоскопления. Клессен и др. [41] нашли, что при больших плотностях газ коллапсирует в плотные ядра за небольшие времена свободного падения и эффективность звездообразования превышает 50 %. Эти авторы также пришли к выводу, что различия в силе и характере турбулентности могут быть вполне достаточны, чтобы объяснить образование изолированных звезд и звезд в скоплениях.

Вполне возможно, что и наблюдаемые ныне старые классические шаровые скопления образовались при отсутствии турбулентной поддержки исходного облака. Как заключил Финни [45], большое количество нейтронных звезд и массивных белых карликов (т.е. остатков массивных звезд) в шаровых скоплениях свидетельствует о том, что большая часть газа в протоскоплении быстро, за время пересечения, должна сформировать все массивные звезды, прежде чем хотя бы 1 % массивных звезд начнет воздействовать на окружающий газ как сверхновые или О-звезды. Это означает, что время формирова-

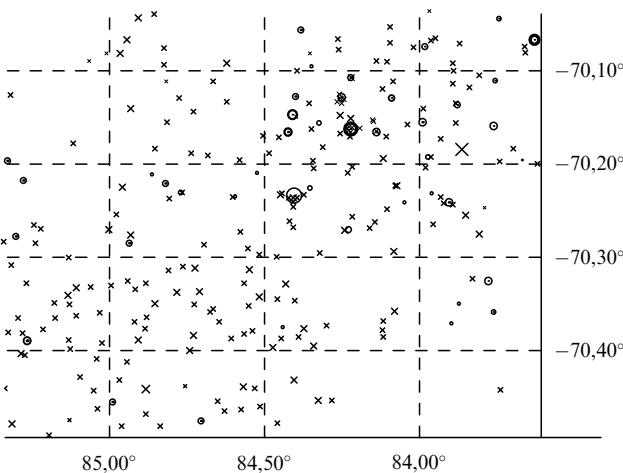


Рис. 6. Цефеиды (крестики) и скопления (кружки) близ восточной оконечности бара БМО.

ния массивных компактных скоплений действительно невелико и близко ко времени свободного падения, которое для половины радиуса шарового скопления составляет 1 млн лет, что меньше времени жизни массивных звезд.

Итак, возможно, что не только высокое внешнее давление, но и весьма быстрый коллапс протоскопления при отсутствии турбулентности благоприятны для формирования массивных гравитационно-связанных скоплений. Тогда надо допустить, что иногда отсутствие турбулентности имеет место в достаточно больших областях, вроде  $300 \times 300$  пк для группы скоплений вокруг NGC 2164. В рамках теории быстрого звездообразования, контролируемого турбулентностью, нет необходимости в допущении регенерации турбулентности для предотвращения коллапса молекулярных облаков, они действительно могут быть кратковременно живущими формациями [46].

По-видимому, нет нужды в поисках специальных причин существования областей без сильных турбулентных движений; перемежаемость в пространстве (и времени) ячеек с ламинарными и турбулентными течениями хорошо известна в гидродинамике, и это стохастическое явление вполне возможно, в принципе, и в межзвездной среде. Было бы важно найти и другие признаки его существования и выяснить, каковы его типичные пространственные и временные шкалы в газовых дисках галактик. Наличие комплексов только скоплений и комплексов только звезд может означать, что вне спиральных рукавов звездные комплексы соответствуют наибольшим ячейкам сходного характера турбулентности в межзвездном газе [47].

## 7. Происхождение сверхоболочек НI

Как мы видели, обычные звездные комплексы возникают вследствие процессов, непременно свершающихся в газовых дисках галактик. Однако изредка встречаются комплексы дугообразной формы или ограниченные правильной дугой окружности, образованные, очевидно, каким-то особым образом; они описаны в [48, 49].

Характерная форма таких комплексов наводила на мысль, что их образование связано с действием какого-то центрального источника давления, сформировавшего расширяющуюся оболочку нагребенного газа, которая затем распалась на звезды. Проблема образования дугообразных комплексов, таким образом, представлялась частным случаем старой проблемы образования гигантских оболочек нейтрального водорода, известных в ряде галактик. Энергия источника центрального давления, способного сформировать сверхоболочку нагребенного газа размером около 1 кпк, в десятки и сотни раз превышает энергию единичного взрыва сверхновой (обычно принимаемой равной  $10^{51}$  эрг), и в качестве ее источника рассматриваются последовательные взрывы сверхновых в достаточно богатом скоплении плюс звездный ветер от его горячих звезд. Для гигантской дуги скоплений в NGC 1620 эту возможность рассмотрели Вадер и Шабуайер [50], и для двух дуг на северо-востоке БМО — Ефремов и Эльмегрин [51]. Предполагается, что в нагребенной газовой оболочке скопления образуются под действием гравитационной нестабильности, наступающей по достижению определенной плотности газа в оболочке.

Когда центральное скопление отсутствует, привлекается гипотеза формирования расширяющихся сверхоболочек при падении на плоскость галактики быстрого газового облака. Первоначально она была предложена именно для объяснения происхождения звездных "сверхколец" [52]. Однако во многих случаях было доказано отсутствие таких облаков близ галактик, обладающих сверхоболочками НI.

Невидимость центрального скопления иногда можно объяснить тем, что сверхоболочка находится в области с малой дифференциальностью галактического вращения и/или большой толщины газового диска. Тогда она живет долго и ее возраст может быть столь велик, что центральное родительское скопление уже достаточно старо и поэтому незаметно [36, 41]. Однако по возрасту и размерам сверхоболочки можно сказать, каковы должны быть параметры скопления, которое могло бы ее породить, и тем самым проверить эту "стандартную модель" происхождения сверхоболочек.

Как это ни странно, такая проверка была осуществлена только недавно. Роуд и ее коллеги [53] провели тщательные поиски скоплений внутри сверхоболочек НI в неправильной галактике Но II. Только внутри 6 из 44 сверхоболочек они нашли скопления, для которых количество звезд и возраст совместимы с предположением, что они содержали в свое время массивные звезды в количестве, достаточном для того, чтобы породить эти сверхоболочки. В Но II отсутствуют скопления и внутри наибольших сверхоболочек, которые к тому же (как и сверхоболочки в нашей Галактике) находятся на периферии галактики, где вообще нет или очень мало молодых массивных звезд.

Возможно, что лишь в весьма массивных (порядка  $10^6$  масс Солнца) скоплениях взрывы сверхновых происходят достаточно часто для образования сверхоболочек. Авторы [54] отмечают, что средний темп поступления энергии даже от 1000 сверхновых на протяжении  $2 \times 10^7$  лет означает темп нагрева межзвездной среды, близкий к темпу ее охлаждения при нормальном давлении, и вполне возможно, что для образования сверхоболочки нужны действительно весьма массивные скопления. Распределение многочисленных полостей НI в БМО показывает весьма слабую связь со скоплениями (см. рис. 3).

Имеются и другие, малоисследованные возможности. Сверхоболочка с последующим инициированием звездообразования, возможно, возникает вокруг места пересечения газовой галактической плоскости достаточно массивным (шаровым) и быстрым скоплением [55]. Гипотеза о возникновении гигантских полостей в турбулентной межзвездной среде вследствие нелинейного развития комбинированных гравитационной и тепловой нестабильностей, без участия поступления энергии от звезд, по-видимому, не проходит [56].

Если галактика движется в достаточно плотной межгалактической среде, первоначально небольшие полости в ее газовом диске могли бы стать больше под действием динамического давления [57]. Эта гипотеза была предложена (но не обоснована) в [57] для объяснения многочисленных полостей в галактике Но II. Внешние изоденсы НI в этой галактике ограничены с одного бока правильной дугой окружности, что свидетельствует о движении галактики сквозь межгалактический газ группы M81 [57] (см. ниже).

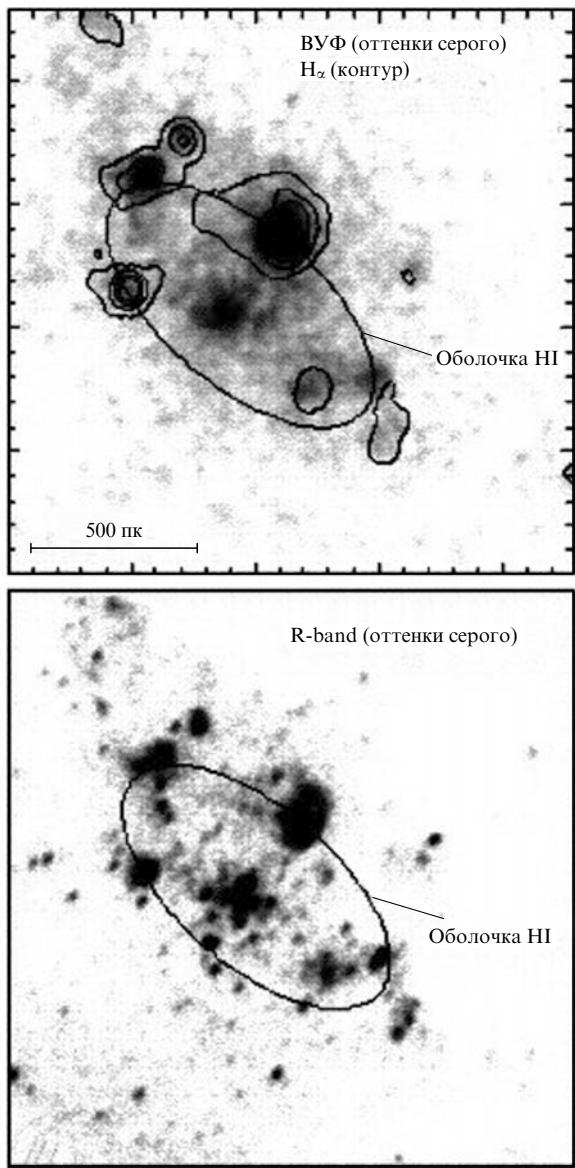


Рис. 7. Звездный комплекс в галактике IC 2574, образованный нагребенной оболочкой HII (деталь рисунка из работы [61]).

Проблема происхождения сверхболочек имеет давнюю историю. Хейлес [58], первым обнаруживший десяток сверхболочек в нашей Галактике, отмечал, что, хотя они могли бы быть произведены большим числом сверхновых типа II, вспыхивавших в ОВ-ассоциациях, "отсутствие их [сверхболочек] ассоциированности с экстремальными объектами населения I является сильным аргументом против такой возможности". Он предположил даже, что "агент, ответственный за существование сверхболочек, еще никогда непосредственно не наблюдался. Этот агент может быть сам по себе новым неизвестным видом астрономических объектов" [58, с. 544]. Возможно, Хейлес был прав. В качестве такого рода объектов, поставляющих в межзвездную среду энергию, достаточную для образования сверхболочек, были предложены гамма-всплески (см. [54, 59]).

Если сверхболочки образуются под воздействием многих сверхновых и горячих О-звезд на межзвездную среду, то почему вокруг множества скоплений, в которых

эти объекты (судя по количеству наблюдаемых ныне в этих скоплениях звезд и их возрасту), без сомнения, были, никаких сверхболочек не наблюдается? Объяснение могло бы состоять в том, что вокруг таких скоплений плотность нейтрального и/или молекулярного водорода очень высока. Морфологические соотношения между оболочками ионизованного водорода вокруг горячих звезд и окружающим газом действительно сложны и неоднозначны [60].

Было бы интересно решать обратную задачу — искать не скопления внутри сверхболочек, а сверхболочки вокруг массивных скоплений, и, исходя из массы и возраста скопления и параметров окружающей среды, найти объяснение случаю отсутствия полостей HII.

До настоящего момента известны лишь два четких случая (в галактиках NGC 1620 и IC 2574), когда близ центра комплекса скоплений или сверхболочки HII имеется более старое скопление, которое могло быть ответственным за образование всей структуры. Важно при этом, что молодые скопления в комплексе IC 2574 расположены иррегулярно внутри эллипса, очерчивающего полость в HII (рис. 7). Его форма соответствует окружности, выглядящей как эллипс из-за наклона плоскости галактики к лучу зрения [61].

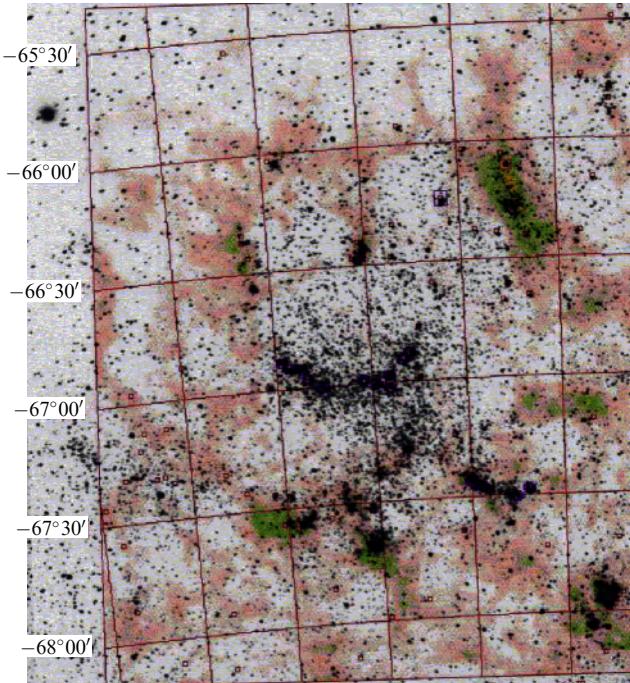
Неправильную форму имеет и гигантская дуга в NGC 1620 [50], которая, впрочем, судя по изображениям галактики, может быть и обычным фрагментом спирального рукава. Оба этих образования мало похожи на правильные звездные дуги в БМО или на западную границу комплекса Ходжа в NGC 6946, являющиеся частями идеальной окружности.

## 8. Звездные дуги в БМО и вспышки гамма-излучения

Само существование кратной системы гигантских звездных дуг в БМО означает, что для них гипотеза о происхождении в сверхболочке, нагребенной сверхновыми и О-звездами, существовавшими в центральных скоплениях, не проходит. Можно еще допустить, что эти специфические скопления ныне почти уже неразличимы, но почему все дуги находятся по соседству друг с другом? Была выдвинута гипотеза, согласно которой эти дуги могли возникнуть в результате единичных сверхмощных взрывов, связанных с гамма-всплесками (GRB), прогениторы которых были выброшены из массивного скопления NGC 1978, находящегося в той же области БМО (рис. 8). Эта гипотеза исходит из предположения, что GRB возникают при слиянии двойных систем компактных объектов, образующихся в результате динамического взаимодействия компактных объектов со звездами в плотном ядре звездного скопления ([62] и ссылки там).

Форма и размеры звездных дуг в БМО в этом случае могут отражать центральный угол джетов гамма-всплесков, но скорее они могли бы быть результатом длительного действия на межзвездную среду узкого мультипрецессирующего джета, подобного тому, который образовал наблюдаемую оболочку HII вокруг SS433 [48, 63].

Если гигантские звездные дуги порождены выделениями энергии, связанными с гамма-всплесками, то следуют важные выводы о природе последних. Данные о том, что эти вспышки происходят в областях звездообразования, считаются несовместимыми с гипотезой,



**Рис. 8.** Звездные дуги в области сверхоболочки LMC4 в БМО (на фоне нейтрального водорода). В центре — Квадрант, справа внизу — Секстант. Скопление NGC 1978 отмечено большим квадратиком.

согласно которой прародителями гамма-вспышек являются системы компактных объектов, поскольку для слияния изначальных пар таких объектов требуется время, за которое они должны уйти на десятки килопарсек от места рождения [64]. Однако в гипотезе о рождении пар компактных объектов, порождающих гамма-вспышки, при сближениях звезд в плотных ядрах скоплений эти трудности не возникают. Неоднократные гамма-вспышки возможны поблизости от родительского скопления, и они способны породить области звездообразования, неподалеку от которых происходят и последующие вспышки.

Недавно появились некоторые наблюдательные указания на справедливость такого сценария. Ближайший к нам всплеск гамма-излучения GRB 980425 произошел в звездном скоплении внутри области звездообразования, причем близ него имеется дугообразная структура, центр кривизны которой находится в районе скопления [65]. Важно отметить, что это единственный GRB, достаточно близкий для того, чтобы можно было заметить эти обстоятельства. Цветков и др. [66] нашли, что вопреки выводам авторов [64] распределение GRB по расстояниям от центра галактики не похоже на распределение ни областей звездообразования, ни остатков сверхновых. На наш взгляд, оно близко к распределению классических старых шаровых скоплений и обнаруживает четкую концентрацию к центру сводной галактики [63].

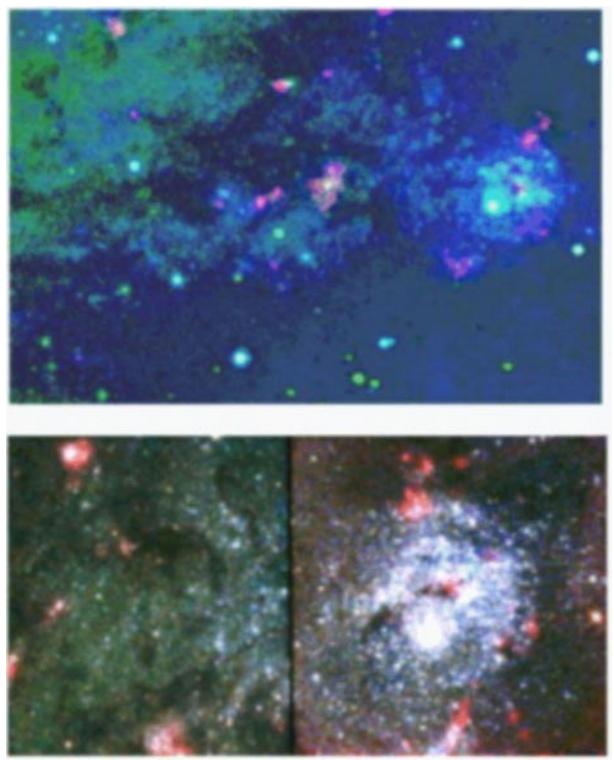
Весьма любопытно, что распределение GRB по величине красного смещения указывает на то, что большинство из наблюденных вспышек произошло около 8–12 млрд лет назад, т.е. когда классические шаровые скопления имели возраст, близкий к возрасту NGC 1978, который составляет примерно 2 млрд лет. Возможно, именно массивные скопления примерно такого возраста становятся эффективными источниками

объектов, порождающих вспышки гамма-излучения [63]. Эта стадия, однако, не слишком продолжительна, поскольку ныне классические шаровые скопления (возраст которых около 12–14 млрд лет) с гамма-всплесками, очевидно, не связаны.

## 9. Пекулярный звездный комплекс в NGC 6946

Пекулярный звездный комплекс в NGC 6946, открытый П. Ходжем в 1967 г., уникален своей правильной полуокруговой границей и высокой плотностью звезд и скоплений (рис. 9). История его обнаружения и исследований описана в [49]. В результате наблюдений комплекса на HST в нем обнаружено около 20 богатых молодых скоплений, помимо известного ранее гигантского скопления с возрастом около 15 млн лет, которое имеет массу около  $10^6$  солнечных и является (при нормальной функции светимости) гравитационно-связанным [67, 68]. В галактике, особенно ее западной половине, много высокоскоростных облаков и пустот HI; есть они и близ комплекса Ходжа, но поразительным образом он не совпадает ни с одной из дыр HI. Отсутствие по крайней мере большой полости HI вокруг гигантского достаточно молодого скопления весьма странно.

Вокруг NGC 6946 обнаружена группа из восьми карликовых галактик поздних типов, из которых почти все зарегистрированы в линии HI [69], так что они могли быть источником газовых облаков при приливном взаимодействии с главной галактикой. Это уже позволяет считать падение газового облака на плоскость



**Рис. 9.** Пекулярный звездный комплекс в спиральной галактике NGC 6946. Наверху — изображение, полученное на NOT (Оптический телескоп Северных стран), внизу — на HST (космический телескоп Хаббла).

галактики вероятной причиной образования комплекса [47].

Спектроскопия комплекса в линии ионизованного водорода  $H_{\alpha}$  на телескопах БТА и Keck-I показала, что лучевая скорость главного скопления комплекса составляет  $150 \text{ км с}^{-1}$ , что на  $20-30 \text{ км с}^{-1}$  превышает локальную скорость вращения галактики по НП [70]. Это небольшое отличие указывает на то, что, если гипотеза падения облака справедлива, его траектория была сильно наклонена к плоскости галактики. Имеются значительные возмущения поля скоростей, особенно к востоку от комплекса; некоторые из них можно интерпретировать как быстро расширяющиеся оболочки ионизованного газа.

Возможна, однако, и другая интерпретация особенностей кривых лучевых скоростей, предполагающая существование вихревых движений газа внутри комплекса. Весь комплекс может быть связан с единственным гигантским вихрем [71].

Галактика NGC 6946 известна как обладающая сильным магнитным полем, причем регулярным вне пределов ярких спиральных рукавов (см. [72] и ссылки там). Столкновение высокоскоростного облака с галактикой, обладающей таким полем, было промоделировано при различных допущениях о траектории облака в [73]. Согласно этой работе при определенных углах траектории облака по отношению к плоскости галактики и силовым линиям поля оно препятствует проникновению падающего облака в диск галактики, и можно предположить, что это и вызывает отсутствие вокруг комплекса, по крайней мере, большой полости НП. При наклонном падении возникает сложная картина магнитогидродинамических волн, и можно предположить, что столкновение ударных волн и приводит к возникновению пекулярной структуры комплекса. Этот процесс, являющийся, возможно, самым эффективным триггером звездообразования, мы рассмотрим отдельно в конце обзора.

В вариантах наклонного падения облака, просчитанных в [73], предсказывается возникновение головной ударной волны, появление вихревых движений в осциллирующем хвосте облака, а затем возникновение паркеровской нестабильности. Судя по резкому дугообразному западному краю комплекса, облако двигалось по наклонной траектории от востока к западу, и, возможно, именно поэтому наиболее заметные возмущения лучевых скоростей наблюдаются к востоку от комплекса [70]. Паркеровская нестабильность может быть ответственна за возникновение гигантского молодого гравитационно-связанного скопления. Впрочем, оно вполне может быть и просто еще одним результатом столкновения ударных волн.

## 10. Динамическое давление и звездообразование

Поразительная особенность дугообразных звездных комплексов в БМО и NGC 6946 состоит в том, что большие участки их границ очень близки по форме к дугам правильных окружностей (рис. 10). Такая почти идеальная геометрия способна, возможно, подсказать ответ на вопрос о происхождении этих структур. Плоскости и БМО и NGC 6946 наклонены к картинной плоскости (на угол около  $30-40^\circ$ ), так что дуги окружностей, лежащих в плоскости галактики, выглядели бы

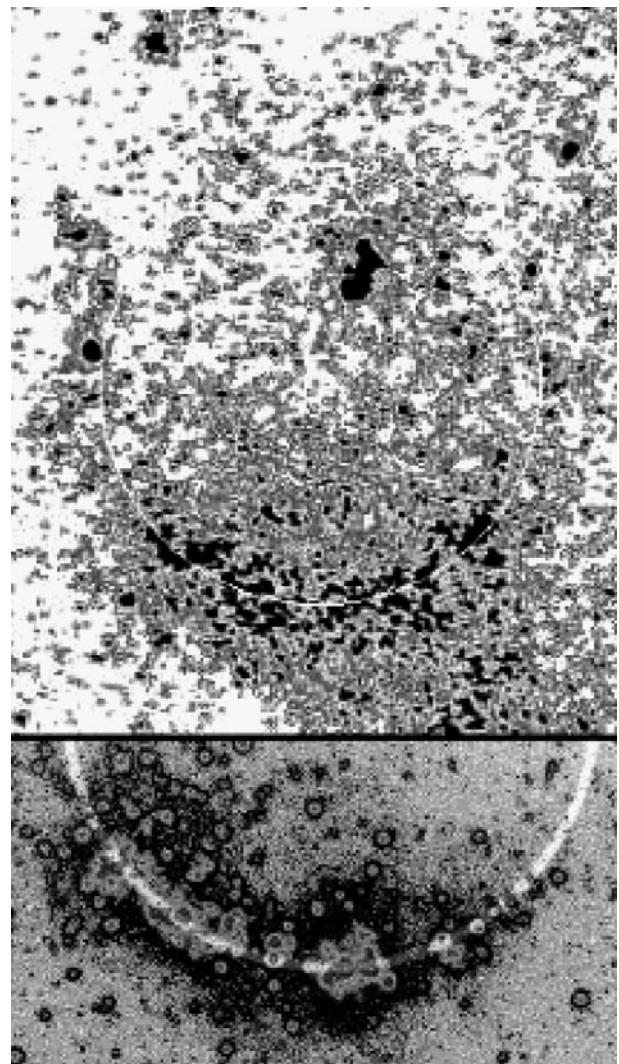
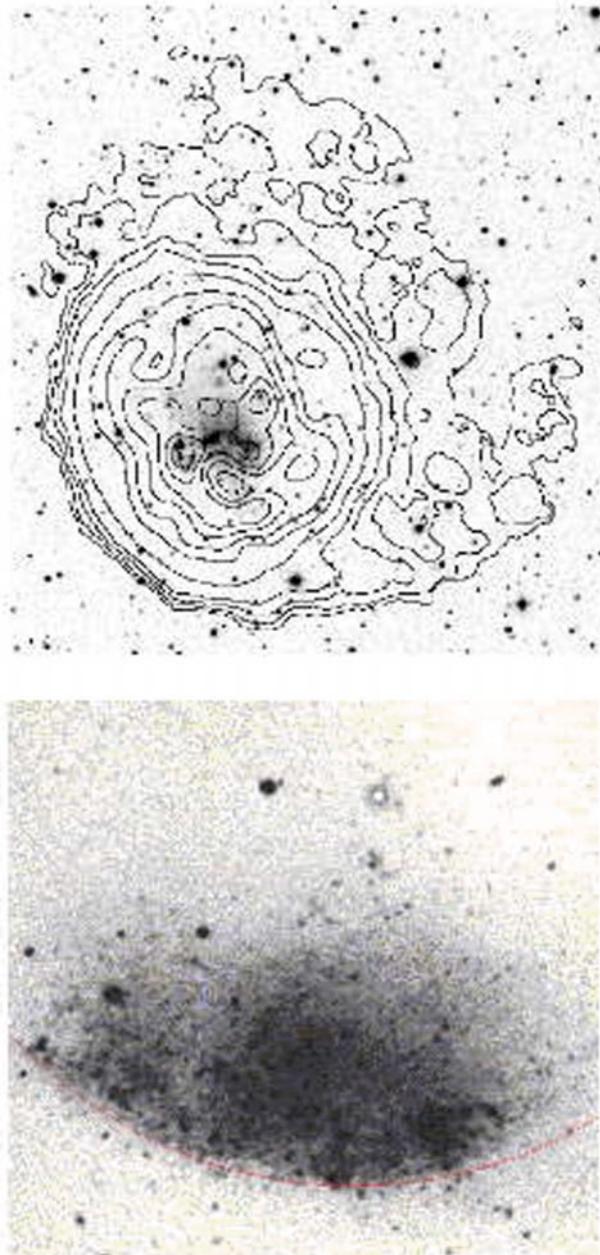


Рис. 10. Дуги Квадранта (вверху) и Секстанта (внизу) являются частями правильной окружности.

эллипсами, заметно отличающимися от наблюдаемой картины. Естественным объяснением правильной круговой формы является предположение, что такие структуры являются сегментами сферических слоев (в случае дуг Квадранта и Секстанта в БМО) или сегментом заполненного шара (в случае комплекса Ходжа в NGC 6946), видимыми сбоку [49]. Нагребенная газовая оболочка представляет собой окружность в плоскости галактики и остается таковой только в том случае, если мы смотрим на галактику точно сверху.

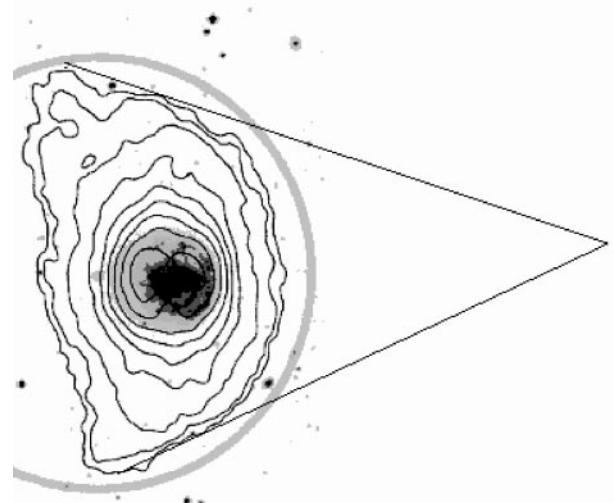
В мире галактик, однако, почти правильные полуслепые известны. Газовая корона галактики, движущейся в достаточно плотной межгалактической среде, под воздействием динамического давления приобретает характерную кометообразную форму, с резкой полукруговой границей, обращенной в сторону движения. Так, внешние изоденсы НП для неправильной галактики Но II [57] и спиральной галактики NGC 7421 [74] имеют с одной стороны форму правильной дуги окружности (рис. 11, 12), что рассматривается как проявление головной ударной волны, возникающей при движении галактики сквозь межгалактический газ групп галактик, в которых они находятся.



**Рис. 11.** Внешние изоденсы НI галактики Но II (наверху) и граница распределения звезд в галактике DDO 165 (внизу). На значительном протяжении и изоденсы, и звездные границы описываются дугами правильных окружностей.

Правильную дугу окружности, ограничивающую с юга звездный диск карликовой галактики DDO 165 (см. рис. 11) в группе M81, трудно объяснить иначе как следствие того, что звездообразование в этой галактике в существенной степени определялось динамическим давлением межгалактического газа [49, 47]. Данные о газе для этой галактики отсутствуют, так что для нее эта интерпретация лишь гипотеза. Однако она почти бесспорна для ряда других галактик.

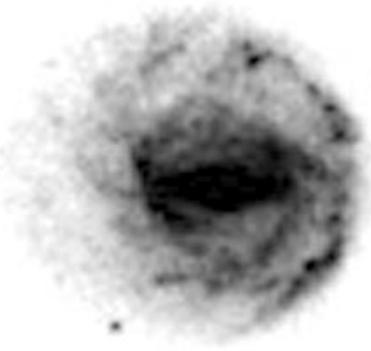
Так, давно уже была замечена необычная форма спиральной галактики NGC 2276, члена группы NGC 2300. Она ограничена с запада правильной дугой окружности, которую повторяет и форма изолиний ионизованного водорода, наиболее плотного именно



**Рис. 12.** Изоденсы нейтрального водорода в NGC 7421 (по данным [74]). Внешние изоденсы на ее западной границе (запад справа) хорошо описываются дугой окружности; для удобства сравнения вне изоденс проведена вспомогательная дуга окружности. Показан также угол Маха, построенный по тем участкам внешних изоденс, где заметно направление перехода к асимптотикам головного ударного фронта; значение угла соответствует числу Маха между 1,5 и 2.

вдоль этой полукруглой границы [75]. Именно вдоль этой дуги расположены и наиболее яркие в галактике источники рентгеновского излучения [76], которые согласно теории и должны очерчивать головную ударную волну.

Упоминавшаяся выше галактика NGC 7421 отличается не только полукруговой западной границей ее водородной короны (см. рис. 12). Западная же граница распределения звезд галактики более яркая и резкая, чем вся остальная периферия, и она в первом приближении также является полукруглой. При более детальном рассмотрении обнаруживается, что эта граница обрисована тремя прямолинейными сегментами с углами между ними около  $120^\circ$  (рис. 13). Имеются и другие



**Рис. 13.** Спиральная галактика NGC 7421 в синих лучах. Головная ударная волна на западном крае галактики имеет три плоских участка, составляющих друг с другом угол около (чуть больше)  $120^\circ$ .

морфологические признаки движения галактик в скоплениях в сопротивляющейся среде. При плоской форме их газовых дисков и их соответствующей ориентации должна возникнуть "подъемная сила", аналогичная появляющейся при обтекании крыла потоком воздуха, что, возможно, и наблюдается в форме их изогнутых газовых хвостов [77].

Головная ударная волна с плоскими сегментами фронта поразительно напоминает полигональную (коленчатую) структуру спиральных рукавов многих галактик, обнаруженную и описанную в [78]. В духе этой аналогии можно ожидать, что размеры плоских сегментов головного фронта примерно равны локальному радиусу кривизны "невозмущенного" круглого фронта. Если так, то углы между сегментами должны быть близки к  $120^\circ$  там, где "невозмущенная" линия фронта близка к окружности, что и наблюдается на обращенном в сторону движения галактики резком западном крае NGC 7421 (см. рис. 12).

Вероятно, плоская (ломаная) геометрия является непостоянным, кратковременно живущим состоянием фронта и сменяется время от времени состоянием окружной геометрии. Эти состояния, по-видимому, представляют собой два аттрактора в пространстве состояний системы, и система спонтанно переходит из одного из них в другое. Судя по аналогии с феноменом полигональных спиральных рукавов [78], время жизни состояния с плоскими сегментами в 8–10 раз короче, чем для окружной геометрии.

Необходимо теперь отметить, что западная граница пекулярного комплекса в NGC 6946 выглядит полукругловой лишь в первом приближении. Изображения, полученные на космическом телескопе Хаббла, позволяют считать, что более точно она описывается тремя отрезками прямых линий, напоминая западную границу NGC 7421 (см. рис. 9). Мы рассматриваем это как сильный аргумент в пользу предположения, что пекулярный комплекс в NGC 6946 тоже подвергся воздействию динамического давления. Тем самым подтверждается гипотеза о том, что он мог возникнуть (и приобрести свою наблюдаемую форму) в результате наклонного падения быстрого плотного облака, достаточно долго двигавшегося сквозь газовый диск галактики [47]. К этому надо добавить, что правильная дугообразная форма западной границы комплекса обусловлена высоким локальным поглощением света, т.е. дугообразным в проекции газопылевым облаком.

Звездообразование на периферии галактики, стимулированное ее движением сквозь окружающую среду, почти не изучено, однако признаки влияния динамического давления на морфологию галактик заслуживают большого внимания. Они позволяют судить о скорости и направлении движения галактики, о плотности окружающего вещества и т.п. В применении к относительному движению скоплений галактик говорят даже [79] о возможности получить таким путем какие-то ограничения на сечения взаимодействия гипотетических частиц темного вещества с обычным веществом.

О влиянии динамического давления на форму галактических дисков может свидетельствовать высокая доля галактик с пекулярной формой в глубоких полях телескопа Хаббла, отмеченная ван ден Бергом [80], который считает такие галактики ранней стадией развития спиральных галактик. Авторы [81] находят, что спиральная

галактика NGC 922 напоминает по форме отдаленные галактики, обсуждаемые ван ден Бергом, но объясняют ее пекулярную форму влиянием большого содержания пылевого вещества, поглощающего свет. Однако же асимметричная форма с правильной полукругловой границей обнаруживает полное подобие картине, обусловленной наличием динамического давления. В глубоких полях телескопа Хаббла действительно можно найти ряд галактик асимметричной формы или с полукругловой границей, которая вполне может быть обусловлена динамическим давлением [77]. Так, галактика #293 в Северном хаббловском поле (красное смещение  $Z = 0,95$ ) [82] имеет с одной стороны дугообразную резкую границу, а с противоположной — два голубых сгущения, являющихся, по-видимому, результатом звездообразования в вихрях газового следа, возникающих при движении тела в достаточно плотной среде. Контуры галактики #293 очень похожи на контуры NGC 922 (рис. 14), а также и на более плотную часть комплекса в NGC 6946 (см. рис. 9), в восточной ("хвостовой") части которого тоже наблюдаются, возможно, следы вихревых структур.

Многие галактики в глубоких полях HST входят в состав малых групп, в пределах которых естественно ожидать наличие динамического давления. Однако проверка возможности систематического увеличения доли галактик, форма которых отражает наличие динамического давления, с ростом красного смещения и особенно вне групп и скоплений, позволила бы сделать важные для космологии выводы о физических условиях во Вселенной в эпоху формирования первых галактик (а может быть, и о природе ненаблюданного вещества).

## 11. Происхождение дугообразных звездных комплексов

Возвращаясь снова к звездным комплексам, мы заключаем, что прямые наблюдательные данные приводят к выводу, что дугообразные или ограниченные дугой окружности комплексы могут быть продуктом звездообразования, индуцированного действием одностороннего внешнего давления на плотное газовое облако при его движении сквозь газовый диск галактики.

Для дуги Квадранта в БМО центральный радиус-вектор сферического сегмента наклонен примерно на  $10^\circ$  к картинной плоскости, что следует из моделирования этой дуги как проекции сегмента сферического слоя (см. рис. 3 в [49]). Лучевые скорости звезд в Квадранте в среднем превышают примерно на  $10 \text{ км с}^{-1}$  скорость звезд в соседних областях, как и среднюю скорость нейтрального водорода, указывая на движение структуры (и, следовательно, родительского облака) в нашу сторону. Учитывая направление движения исходного облака (задаваемое, очевидно, осью симметрии дуги) и экстремальные существующие оценки ориентации в пространстве плоскости БМО, можно сказать, что наклон траектории облака к плоскости галактики составлял от  $10$  до  $40^\circ$ . Наиболее вероятное значение близко к  $20^\circ$ , и тогда относительная скорость облака и галактики составляла около  $30 \text{ км с}^{-1}$ . Однако это лишь нижний предел, поскольку наблюдаемые ныне скорости звезд отражают скорость облака на момент звездообразования, в конце тормозного пути.

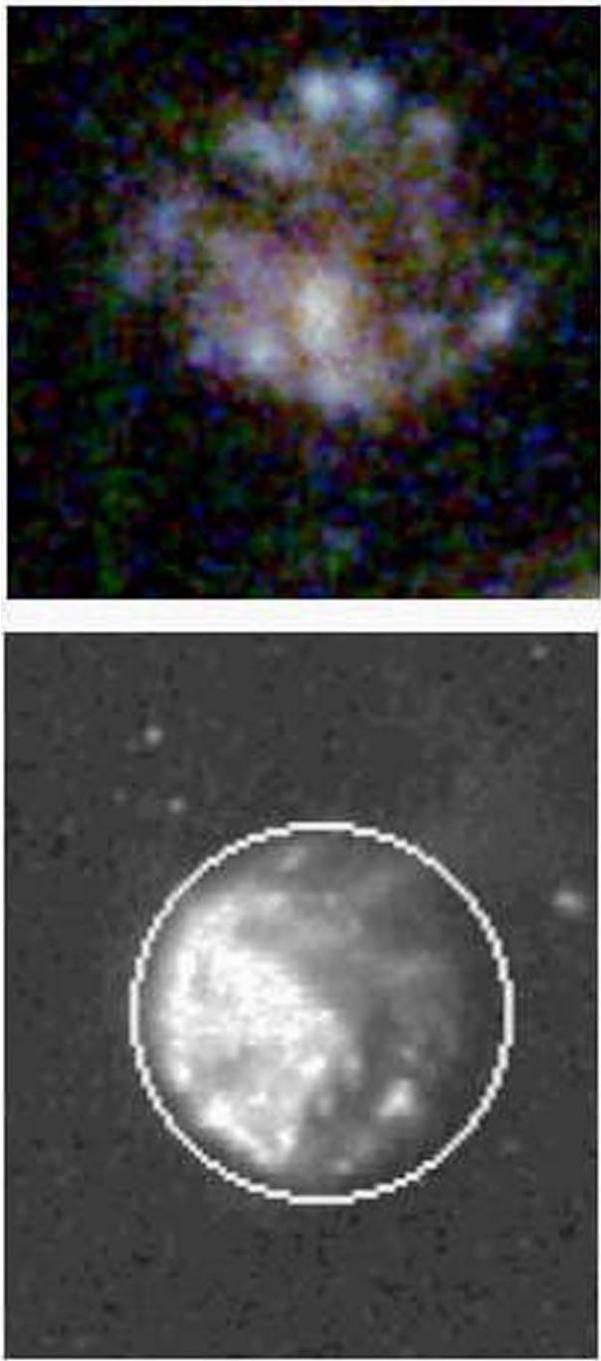


Рис. 14. Галактика #293 в Северном глубоком хаббловском поле (наверху) и галактика NGC 922 (внизу).

Вероятно, именно достаточно длинный при наклонной траектории путь облака внутри газового диска галактики и приводит к возможности звездообразования в головной ударной волне. Если эта гипотеза справедлива, концентрация дуг по соседству друг с другом на северо-востоке БМО может быть связана с тем, что именно этот край галактики является ведущим в орбитальном движении БМО. Ориентация дуг Квадранта и Секстанта почти одинакова и близка к направлению движения БМО на NNE, аргументы в пользу которого приведены в [83]. Заметим, что и внешнюю границу распределения НИ в БМО на севере и востоке составляют прямые линии, что, возможно, указывает на

2\*

движение БМО со сверхзвуковой скоростью сквозь газовую корону Галактики.

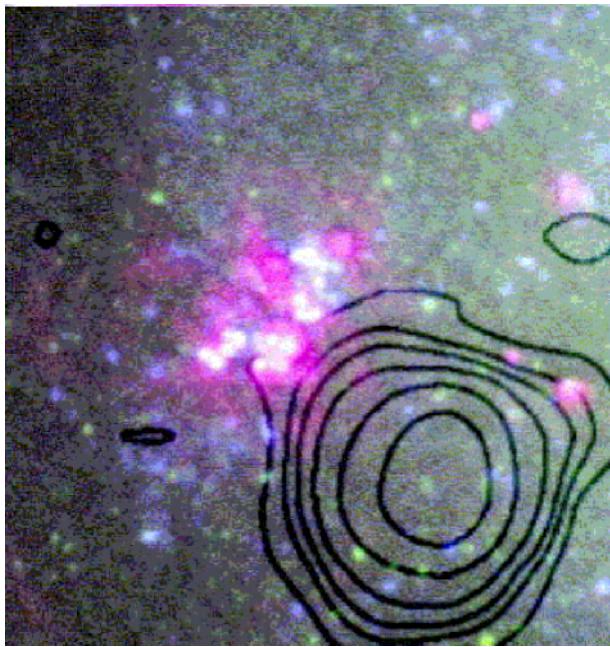
По-видимому, только предположение о происхождении в результате внешнего давления на плотное облако позволит объяснить, почему у всех таких комплексов примерно одинаковый (около  $100 - 150^\circ$ ) угол при центре (opening angle), как это наблюдается и в картине головной ударной волны для галактик. В пользу этого предположения говорит и слабое продолжение дуги Квадранта на север, напоминающее широкий хвост кометы, хорошо видное на рис. 1 в [49].

Имеющиеся теоретические данные показывают, что диапазон условий, ведущих к инициированному звездообразованию при столкновении облаков, невелик [84], и тем более при требовании сохранения у результирующего звездного комплекса формы головной ударной волны, чем, очевидно, и объясняется малочисленность дугообразных звездных комплексов. Одним из таких условий может быть наличие магнитного поля [85], что, по-видимому, применимо к случаю комплекса в NGC 6946.

## 12. Дугообразные звездные комплексы и гиперновые

Физически похожая ситуация возникает и при воздействии на достаточно плотное облако ударной волны от сравнительно близкого и мощного внешнего взрыва, распространяющейся в менее плотном газе диска галактики. Понятно, что выпуклая сторона фронта взаимодействия ударной волны и облака должна быть обращена при этом в сторону взрыва и результирующий дугообразный звездный комплекс должен быть симметричен относительно линии, направленной на источник ударной волны. Имеется случай, когда напрашивается именно такая интерпретация. Мы обнаружили [47], что в спиральной галактике NGC 300 дуга из ярких звезд и скоплений, имеющая размер по хорде около  $45''$  ( $\simeq 400$  пк), находится вблизи самого интенсивного точечного рентгеновского источника в этой галактике, и обращена к нему выпуклой стороной (рис. 15). Это объект P42 = H13, который классифицируется как рентгеновская двойная система, содержащая черную дыру (с массой около пяти солнечных), единственный такой объект в NGC 300 [86]. Он вполне может быть звездным остатком гиперновой. Дуга скоплений, о которой идет речь, вошла в список ОВ-ассоциаций и комплексов в NGC 300 как AS 102 с размером в 360 пк [87], она классифицируется как звездный комплекс, поскольку, как видно из рис. 15, состоит из четырех подгрупп. Оценка возраста комплекса по диаграмме цвет–светимость составляет около 5 млн лет [88]; это согласуется с тем, что комплекс погружен в яркую НИ область, как и дуга Секстанта. За это время видимый в оптическом или в радиодиапазонах газовый остаток сверхновой исчезает, но звездный остаток, черная дыра, аккрецирующая вещество от другого компонента двойной системы, при некоторых условиях еще может быть обнаружена как источник рентгеновского излучения.

Рисунок 15, построенный путем совмещения изображения, полученного С. Ларсеном на NOT, и карты рентгеновских источников из [86], показывает, что уникальный для NGC 300 рентгеновский источник находится не только вблизи комплекса, но и точно на его оси



**Рис. 15.** Дугообразный звездный комплекс AS 102 в спиральной галактике NGC 300 и положение рентгеновского источника P42.

симметрии. К сожалению, существующие для NGC 300 данные о нейтральном водороде получены с разрешением, недостаточным для того, чтобы обнаружить возможные особенности в этой области. В случае справедливости изложенной выше гипотезы между комплексом AS 102 и рентгеновским источником P42 газ должен отсутствовать. Если это подтвердится, тогда будут все основания считать эту рентгеновскую двойную с черной дырой звездным остатком гиперновой.

Это, по-видимому, справедливо и для рентгеновского источника X-4 в галактике Треугольника (M33). Он находится внутри дугообразного звездного комплекса HS137 = IC133, в центре сверхбабочки II, и возможно, что в данном случае справедлива классическая картина звездообразования в нагребенной газовой оболочке [71].

Аналогичных рентгеновских источников нет близ звездных дуг в БМО. Хотя возраст дуги Квадранта, наверное, превышает возможное время жизни рентгеновского излучения в звездном остатке сверхновой, уже само наличие двух (а не исключено и пяти, см. [49]) дуг по соседству друг с другом делает рассмотренный выше механизм их возникновения маловероятным. Как уже говорилось, существование нескольких соседствующих дугообразных звездных комплексов может быть объяснено либо возникновением их прогениторов неподалеку, в одном и том же звездном скоплении, либо тем, что северо-восточный край БМО, где они располагаются, первым натыкается на более плотные облака гало нашей Галактики.

### 13. Сверхассоциации

Галактики, охваченные вспышкой звездообразования, — одна из самых популярных тем исследований последних лет. Почти всегда они являются взаимодействующими или же претерпевшими тесное сближение с

другими галактиками в недалеком прошлом; активное звездообразование в них вызвано повышением плотности газа и столкновениями молекулярных облаков. Во многих обычных галактиках наблюдаются, однако, локальные вспышки звездообразования, природа которых неясна, если не говорить об активном звездообразовании в центральных областях с высокой плотностью газа.

Изолированные области бурного звездообразования давно известны под названием сверхассоциаций. Этот термин предложил В. Бааде в знаменитых Гарвардских лекциях [89] на основе изучения объекта 30 Золотой Рыбы в БМО и подобных ему звездных группировок в других галактиках, имея в виду группировки ОВ-звезд, существенно превосходящие по своим размерам обычные ассоциации. Бааде говорил: "Шепли заметил их несколько лет назад и назвал созвездиями; я думаю, что по аналогии с термином "ассоциации" мы можем назвать их сверхассоциациями..."

Сравнение с ассоциациями было существенно для Бааде; он отмечал, что сверхассоциации — это не просто очень большие ассоциации, превышающие по размеру обычные ассоциации в десятки раз, а совершенно особый новый класс объектов. "Я полагаю, очень важно осознать, что звездообразование происходит на двух масштабах — в ассоциациях, как их определил Амбарцумян, с диаметрами порядка 10 или 100 пк и в обширных областях с диаметрами в 500 пк или даже 600 пк" [89].

Сверхассоциации — довольно редкие объекты; в нормальных галактиках их не более 1 % от числа звездных комплексов, имеющих те же размеры и массы. Например, в Местной группе имеется по крайней мере три сотни "стандартных" комплексов и только три сверхассоциации: это уже упомянутые выше объект 30 Золотой Рыбы (30 Doradus) в БМО и объект NGC 206 = OB78 в M31, а также NGC 604 в M33 [90].

Бюраканские астрономы [91] нашли 150 сверхассоциаций в 57 гигантских спиральных галактиках за пределами Местной группы. Относительно часто сверхассоциации встречаются в неправильных галактиках типа БМО и особенно в так называемых "клюковатых" неправильных галактиках, которые по существу просто состоят каждая из нескольких (иногда до десятка) сверхассоциаций [3 (§ 12.1), 92, 93].

Ряд аргументов свидетельствуют в пользу того, что сверхассоциации вряд ли представляют собой короткую начальную эволюционную стадию в истории каждого стандартного комплекса [3, 90]. Скорее, их рождение обязано возникновению каких-то особенно благоприятных физических условий для вспышки крупномасштабного коллективного звездообразования в данной области межзвездной среды. Само существование интенсивного процесса звездообразования в области размером около 1 кпк является нарушением соотношения возраст – размер, которое мы обсуждали в начале статьи. Правда, сверхассоциации всегда можно разбить на десяток-другой обычных ассоциаций [3], но концентрация последних в одной и той же области требует объяснения. Сверхассоциации не могут быть продуктом спонтанного звездообразования в турбулентном газе. В то же время они встречаются и в нормальных галактиках, так что взаимодействие галактик далеко не всегда является условием их образования. Падение быстрого



Рис. 16. Сверхассоциация NGC 206 = OB78 в спиральном рукаве галактики Андромеды.

облака, как мы видели, может вызвать локальную вспышку звездообразования, и комплекс Ходжа в NGC 6946 выглядел 10–20 млн лет назад как яркая сверхассоциация, хотя и необычной формы.

Типичная сверхассоциация — яркое звездное облако NGC 206 = OB78 в спиральном рукаве галактики Андромеды (рис. 16). В ней можно усмотреть две отчетливо отделенные друг от друга звездные группировки сравнимых размеров с примерно сотней ОВ-звезд в каждой из них. Возраст этих звезд меньше 10 млн лет. На внешнем крае одной из компонент сверхассоциации располагаются области НII. В другой компоненте наряду с ОВ-звездами наблюдаются цефеиды с возрастом около 50 млн лет. Между компонентами протянулась пылевая полоса. Можно сказать, что данная сверхассоциация обнаруживает не только бинарную пространственную структуру, но также и бинарную временную структуру. Очевидно, что в ее истории имели место по крайней мере два события коллективного звездообразования — одно около 50 млн лет назад, а другое менее 10 млн лет назад. По-видимому, именно это второе событие и превратило систему в сверхассоциацию: бурное звездообразование охватило практически одновременно целиком обе области двухкомпонентной системы.

Классическая сверхассоциация 30 Золотой Рыбы обладает весьма сложной пространственной структурой; в ней, однако, определенно могут быть выделены две доминирующие компоненты приблизительно одинаковых размеров — восточная и западная. Стоит уточнить, что под сверхассоциацией мы понимаем всю так называемую область IV, которая включает в себя компоненты 30 Dor East и 30 Dor West, причем последняя состоит из более слабых звезд (см. [3]). Две эти компоненты находятся в пределах сверхоболочек НII, обнаруженных Мибурном [94, 95]; при этом границы компонент по своим очертаниям почти точно совпадают с этими оболочками.

дают с этими оболочками. Их границы — почти правильные круги с практически равными радиусами, составляющими 450–500 пк. Между компонентами имеется пылевая полоса, а с востока к этой полосе примыкает самый яркий объект сверхассоциации — Туманность Тарантул. Она представляет собой обширную область НII, ионизованную множеством молодых ОВ-звезд центрального скопления NGC 2070.

Еще один интересный пример бинарной пространственно-временной структуры демонстрирует комплекс OB21 в M31. Это не "классическая" сверхассоциация — для такой классификации светимость этого комплекса недостаточно велика, но не исключено, что он может соответствовать сверхассоциации на самой ранней стадии своего формирования [95]. Молодые области НII в этом комплексе располагаются по обеим сторонам пылевой полосы. Два поколения звезд отчетливо различимы в обеих подобластиях системы — сравнительно старое поколение цефеид и очень молодое поколение ОВ-звезд и областей НII.

Надо, правда, иметь в виду, что пылевые полосы, пересекающие NGC 206 (OB78) и OB21 могут быть деталями спиральной структуры галактики Андромеды, обе полосы можно проследить далеко за пределами обоих звездных комплексов. Однако бинарная структура определенно характерна для большинства крупномасштабных областей бурного звездообразования. Немалое число объектов такого рода обнаружено в наблюдениях космического телескопа Хаббла (см., например, сообщения на конференции [96]). Часто встречается более сложная — трехкомпонентная или даже многокомпонентная — структура [96].

К такого рода структурам можно отнести и пекулярный звездный комплекс в NGC 6946, рассмотренный выше. Два вытянутых пылевых облака пересекают комплекс, имеются два поколения звезд, отличающихся по возрасту на 20–30 млн лет. Они разделены пространственно — более старые звезды сконцентрированы близ гигантского скопления, а более молодые — в широкой дуге к западу от него, по ту сторону от пылевых облаков. Возраст старейших звезд в комплексе около 30 млн лет, но в некоторых областях еще идет звездообразование. Около 10–20 млн лет область выглядела как яркая сверхассоциация, сейчас же ее высокая поверхностная яркость объясняется высокой плотностью B-звезд.

Комплекс в NGC 6946 находится далеко от центра галактики, и толщина газового диска здесь также может быть достаточно большой. Темп звездообразования в нем был неравномерный, с максимумами около 30 и 5 млн лет назад, причем в промежутке между этими эпохами образования изолированных звезд и обычных звездных скоплений возникло гигантское звездное скопление [67]. Роль начального события в цепочке, приведшей к образованию этого комплекса, возможно, сыграло наклонное падение межгалактического газового облака, причем существенное значение имело сильное магнитное поле этой галактики, регулярное за пределами оптических спиральных рукавов [47].

Какие же обстоятельства превращают звездный комплекс в крупномасштабную область экстремально эффективного звездообразования? Расскажем о некоторых соображениях, в основе которых лежит газодинамический подход к данной проблеме.

## 14. Столкновение ударных волн: газодинамический сценарий локальной вспышки звездообразования

Начнем с примера возможной последовательности событий, способных привести в итоге к возникновению явления сверхассоциации. Это сценарий, в котором ключевая роль принадлежит ударным волнам и их взаимодействиям [95]. В самом простом варианте он мог бы выглядеть следующим образом.

1. В отдельных, но соседних участках межзвездной среды происходит почти одновременное формирование двух очагов звездообразования (например, в спиральном рукаве за фронтом спиральной ударной волны). Энерговыделение, обязанное интенсивному звездному ветру от массивных звезд, а также множественным вспышкам сверхновых, порождает в каждой из этих областей сферическую ударную волну, которая быстро расширяется и собирает газ в плотную оболочку. При достижении определенной плотности гравитационная нестабильность приводит к возникновению в каждой оболочке звездных скоплений [96], но при наличии соседней оболочки дело этим не ограничивается.

2. Два расширяющихся сферических фронтов в определенный момент приходят в соприкосновение друг с другом в области между центрами исходных очагов звездообразования и испытывают затем нелинейное взаимодействие. Один из результатов взаимодействия — формирование отраженных ударных волн, которые движутся назад к центрам первоначальных сферических ударных фронтов.

3. Отраженные фронты увлекают за собой значительные массы газа, который оказывается весьма плотным: он дважды сжат ударными волнами — сначала исходными, а затем и отраженными. Этот плотный газ впрыскивается таким путем внутрь почти пустых сферических объемов, что вызывает эффект прорыва (как это называют в теории сильного взрыва в неоднородной атмосфере) или, что то же, эффект шампанского (как чаще говорят в астрофизике). Распространение газа в этих объемах сопровождается его турбулизацией и фрагментацией, что в конечном итоге создает условия для эффективного и повсеместного бурного звездообразования одновременно в обоих объемах.

Первая стадия этой эволюционной схемы опирается на довольно хорошо изученную газодинамику формирования расширяющихся сферических оболочек — или, как часто говорят, сверхоболочек, учитывая их килопарсековые размеры — вокруг областей звездообразования, изложенную, например, в обзоре [97].

Для второй стадии привлекается нелинейная физика столкновения ударных волн. Базовым образцом для этого анализа служит теория, построенная Курантом и Фридрихсом [98] (рис. 17) и дополненная современным компьютерным моделированием [99–103] (рис. 18).

Особенно интересно, что и вся картина в целом, и важнейшие ее детали находят полное подтверждение в специально поставленном по нашей инициативе лабораторном эксперименте [104].

Третья стадия в обрисованном выше сценарии основывается как на результатах теории столкновения ударных волн, так и на результатах, относящихся к эффекту прорыва [97, 105, 106].

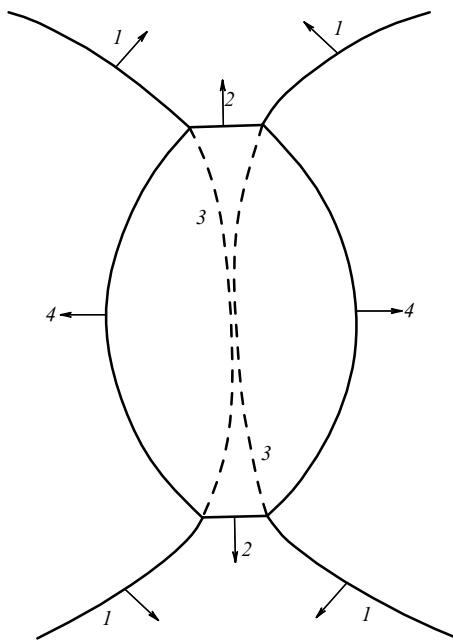


Рис. 17. Столкновение расширяющихся ударных фронтов: конфигурация Куранта–Фридриха [98]: 1 — первоначальные фронты, 2 — маховский фронт, 3 — тангенциальные разрывы, 4 — отраженные фронты.

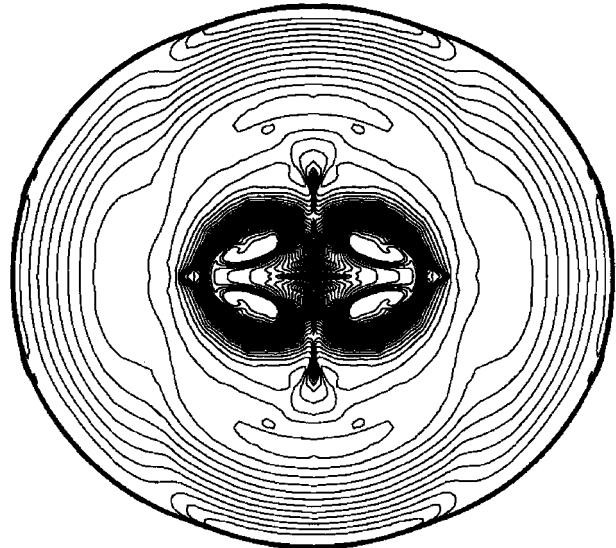


Рис. 18. Столкновение расширяющихся ударных фронтов: компьютерное моделирование [102, 103]. Конфигурация Куранта–Фридриха на поздних стадиях эволюции; изолинии плотности показывают общую расширяющуюся оболочку, образованную участками первоначальных фронтов и кольцевым маховским фронтом, а также внутреннюю систему завихренных сверхзвуковых потоков.

Высокая эффективность массового звездообразования в турбулизированном газе большой плотности, как это предполагается на третьей стадии процесса, не вызывает сомнений, на этот счет имеются аргументы, частично уже приведенные выше (см. также работы [21, 90, 107, 108]).

В изложенном сценарии речь идет о двух соседних и приблизительно одновременно возникших областях звездообразования. Такая ситуация должна действительно часто встречаться. Например, звездообразова-

ние за фронтом спиральной ударной волны происходит так, что более или менее одновременно возникают отдельные области звездообразования, образующие цепочки вдоль спиральных рукавов. Это надежный наблюдательный факт (см., например, [3]). Но тогда из условия "единства места и времени" вытекает возможность "единства действия" — столкновение фронтов ударных волн ведет к повторной и, вероятно, более яркой вспышке звездообразования одновременно в обеих областях в результате вспышки вещества в эти области отраженными ударными фронтами.

Похоже, что такого рода сценарий дает возможность ответить на ряд существенных вопросов, связанных со структурными особенностями сверхассоциаций, с их происхождением. Вот лишь некоторые из них. Почему взаимодействие соседних и одновременно возникающих областей звездообразования происходит так редко в нормальных спиральных галактиках? Чем определяется возможность этого взаимодействия, когда оно действительно происходит? Почему в неправильных (особенно, клюковатых) галактиках сверхассоциации встречаются, как правило, чаще, чем в регулярных дисковых?

Возможно, все дело в том, что взаимодействие ударных волн, о котором идет речь в обсуждаемом сценарии, представляет собой существенно трехмерный эффект. Для столкновения расширяющихся сферических фронтов требуется, чтобы в дисковой галактике соседние сверхоболочки смогли как минимум прийти в соприкосновение друг с другом. Это не так легко, ибо в тонком диске расширение фронтов происходит крайне анизотропно — фронт быстрее всего движется в вертикальном направлении, перпендикулярно плоскости диска, тогда как встречные горизонтальные движения довольно быстро замедляются и останавливаются. Из сверхоболочки, радиус которой достиг полутолщины газового диска галактики, горячий газ уходит за пределы диска, и она прекращает расширяться. Возможность столкновения фронтов возникает только там, где толщина газового слоя достаточно велика, т.е. сравнима с расстояниями между центрами расширяющихся фронтов или больше их; тогда горизонтальные встречные движения фронтов могут оказаться достаточно быстрыми и продолжительными.

Если так, то в спиральных галактиках сверхассоциации должны располагаться на краях дисков, где толщина газового слоя максимально велика, но плотность газа все еще достаточна для эффективного звездообразования. Тенденция сверхассоциаций располагаться на периферии галактик и спиральных рукавов отмечалась еще Воронцовым-Вельяминовым [109]. Сверхассоциации часты в неправильных галактиках, вероятно, именно по причине большой толщины их газовых дисков.

Не исключено также, что относительная малочисленность сверхассоциаций — локальных вспышек звездообразования связана с тем, что далеко не каждое молодое скопление способно вызвать расширяющуюся оболочку НI/НII. Особенно показательно в этом отношении отсутствие заметной полости НI вокруг гигантского (с массой в миллион солнечных) скопления в пекулярном комплексе в NGC 6946. Его возраст (около 15 млн лет) оптимален для выдувания большой оболочки, более подходящих для этого скоплений нет во всей галактике. Тем не менее, хотя в NGC 6946 известно два десятка

сверхоболочек/полостей НI, ни одна из них не облекает пекулярный звездный комплекс. Впрочем, как уже говорилось, это может быть связано с особыми условиями возникновения этого комплекса.

Рассмотренный здесь сценарий описывает взаимодействие двух начальных центров давления. Но более частым случаем может оказаться возникновение на подходящем пространственно-временном интервале нескольких таких центров, и в общем случае отождествить наблюданную картину как вызванную действием описанного здесь взаимодействия фронтов ударных волн нелегко. Однако оно неизбежно существует и вполне может дать высокую плотность газа и последующую локальную вспышку звездообразования, не связанную с общей структурой галактики или взаимодействием с другими галактиками.

## 15. Заключение

Изучение крупномасштабных характеристик звездообразования представляет собой область исследований, в которой прогресс достигается совместными усилиями специалистов по физике межзвездной среды и физике и морфологии галактик. Возникающая при этом общая картина явления сложна, многообразна и все еще весьма далека от завершенности. Только сейчас мы начинаем понимать причину локальных вспышек звездообразования в галактиках и странную морфологию некоторых из них. Проблема звездообразования не входит в список В.Л. Гинзбурга [110], и мы старались показать, что ее исследование может привести к выводам, важным и для понимания самых актуальных проблем физики и астрофизики.

Несомненно, что звезды возникают из сгущений газа, а в процессе конденсации межзвездной среды в звезды и их группировки решающая роль принадлежит собственной гравитации газа — по крайней мере на заключительной фазе процесса. Становится все очевиднее, что не менее важную роль играет гидродинамика газа, особенно в самом начале конденсации. Похоже, что именно крупномасштабные движения газа создают в нем первоначальные уплотнения, которые дают начало звездным группировкам и отдельным звездам. При этом движения должны быть чаще всего сверхзвуковыми. Этот мотив и объединяет те, на первый взгляд, разрозненные наблюдения и теоретические соображения, которые представлены в нашем обзоре.

В сверхзвуковых потоках газа возникают ударные волны, которые и создают сильные сгущения в протозвездном газе. Более того, ударные волны распространяются в различных направлениях, и потому они способны энергично взаимодействовать, когда их фронты сталкиваются друг с другом. Результатом столкновения ударных фронтов становятся новые еще более плотные сгущения газа, а также новые ударные волны. При благоприятных обстоятельствах могут возникать целые каскады ударных волн разных масштабов, питающихся энергией, запасенной в движениях самых крупных размеров. Астрономы употребляют в этом случае термин "сверхзвуковая турбулентность", которым и мы тоже пользуемся в нашем тексте.

Каковы источники энергии, порождающие сверхзвуковую гидродинамику протозвездного газа? В первую очередь, это сами звезды, вернее, наиболее массивные из

них. Такие звезды создают потоки звездного ветра, срывающегося с их поверхностных слоев. На поздних стадиях эволюции звезды способны взрываться как сверхновые, впрыскивая таким путем огромные порции энергии в окружающую их среду. Но кроме этих давно уже известных генераторов сверхзвуковых движений возможны и иные не менее эффективные источники возбуждения крупномасштабных движений внутри галактик. Это прямые столкновения галактик друг с другом, при которых движения газа порождаются как приливными силами, так и за счет высвобождения кинетической энергии исходного относительного движения взаимодействующих галактик. Последняя обязана своим происхождением падению галактик в поле тяготения их групп и скоплений, так что ее источником служит в конечном счете собственная гравитация этих систем. Такое же гравитационное происхождение имеют и движения газа, заимствующие свою энергию из дифференциального вращения галактических дисков.

Сложную сверхзвуковую гидродинамику с возникновением головных ударных фронтов, контактных разрывов, турбулентных слоев, крупномасштабных вихревых ядер и т.п. создают орбитальные движения галактик в межгалактической среде скоплений галактик. Процессы обтекания галактик внешним газом непосредственно наблюдаются с помощью как оптических, так и рентгеновских и радиотелескопов. Стимулированные этим процессом вспышки звездообразования иногда обрисовывают яркий и резкий лидирующий в движении край галактики. Мы полагаем, что такого рода механизм бурного звездообразования может действовать и в субгалактическом масштабе, и результатом его являются дугообразные звездные комплексы, образовавшиеся, вероятно, при движении внешнего облака в газовом диске галактики. О наличии стимулирующей звездообразование ударной волны, возникающей благодаря динамическому давлению, свидетельствуют границы таких объектов, обращенные в сторону движения, — они иногда обрисовываются прямолинейными отрезками.

По-видимому, все многообразие молодых звездных группировок различного масштаба обязано своим происхождением сложной игре нелинейной сверхзвуковой гидродинамики и собственной гравитации газа галактик; этот процесс только сейчас начинает по-настоящему изучаться как в наблюдательном, так и теоретическом плане.

Мы благодарны Б. Эльмегрину и А.В. Засову за многочисленные полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 00-02-17804 и 00-15-96627 (научные школы).

## Список литературы

1. *Происхождение и эволюция галактик и звезд* (Под ред. С Б Пильяниера) (М.: Наука, 1976)
2. Холопов П Н *Звездные скопления* (М.: Наука, 1981)
3. Ефремов Ю Н *Очаги звездообразования в галактиках* (М.: Наука, 1989)
4. Ефремов Ю Н *Астрон. журн.* **55** 272 (1978); Ефремов Ю Н (готовится к печати)
5. Ефремов Ю Н *Письма в Астрон. журн.* **4** 125 (1978)
6. Efremov Yu N *Astron. J.* **110** 2757 (1995)
7. Van den Bergh S *Astrophys. J. Suppl.* **9** 65 (1964)
8. Bresolin F et al. *Astron. J.* **116** 119 (1998)
9. Elmegreen B G, Falgarone E *Astrophys. J.* **471** 816 (1996)
10. Elmegreen B et al., in *Protostars and Planets IV* (Eds V Mannings, A P Boss, S S Russell) (Tucson: Univ. of Arizona Press, 2000) p. 179
11. Kim S et al. *Astrophys. J.* **503** 674 (1998)
12. Каплан С А *Межзвездная газодинамика* (М.: Наука, 1958)
13. Efremov Yu N, Elmegreen B G *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **299** 588 (1998)
14. Hartmann L *Astron. J.* **121** 1030 (2001)
15. Elmegreen B G *Astrophys. J.* **530** 277 (2000)
16. Elmegreen B G, Elmegreen D M *Astron. J.* **121** 1507 (2001)
17. Elmegreen D M, Salzer J J *Astron. J.* **117** 764 (1999)
18. Elmegreen D M et al. *Astrophys. J.* **425** 57 (1994)
19. Elmegreen B G et al. *Astrophys. J.* **467** 579 (1996)
20. Elmegreen B G, Efremov Yu N *Astrophys. J.* **466** 802 (1996)
21. Elmegreen B G, in *Extragalactic Star Clusters* (IAU Symp., Vol. 207, Eds E K Grebel, D Geisler, D Minniti) (San Francisco, CA: Astron. Soc. of the Pacific, 2002) (in press)
22. Ефремов Ю Н *Письма в Астрон. журн.* **5** 21 (1979)
23. Elmegreen B G, Elmegreen D M *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **203** 31 (1983)
24. Kennicutt R C (Jr) *Astrophys. J.* **344** 685 (1989)
25. Efremov Yu N, Chernin A D *Vistas Astron.* **38** 165 (1994)
26. Van den Bergh S, Cohen J G, Crabbe C *Astron. J.* **122** 611 (2001)
27. Zasov A V, Bizyaev D V, in *Physics of the Gaseous and Stellar Disks of the Galaxy* (ASP Conf. Ser., Vol. 66, Ed. I R King) (San Francisco, CA: Astron. Soc. of the Pacific, 1994) p. 73
28. Elmegreen B G *Astrophys. J.* **433** 39 (1994)
29. Franco J et al. *Astrophys. J.* **570** 647 (2002); astro-ph/0111406
30. Elmegreen B G, Efremov Yu N *Astrophys. J.* **480** 235 (1997)
31. Jog C J, Solomon P M *Astrophys. J.* **276** 114 (1984)
32. Larsen S S, in *Extragalactic Star Clusters* (IAU Symp., Vol. 207, Eds E K Grebel, D Geisler, D Minniti) (San Francisco, CA: Astron. Soc. of the Pacific, 2002) (in press); astro-ph/0105489
33. Larsen S S, Richtler T *Astron. Astrophys.* **345** 59 (1999)
34. Larsen S S, Richtler T *Astron. Astrophys.* **354** 836 (2000)
35. Whitmore B C, astro-ph/0012546
36. Сурдин В Г *Астрон. журн.* **56** 1149 (1979)
37. Battinelli P, Efremov Yu N *Astron. Astrophys.* **346** 778 (1999)
38. Wyder T K, Hodge P W, Cole A *Publ. Astron. Soc. Pac.* **112** 594 (2000)
39. Van den Bergh S, in *New Views of the Magellanic Clouds* (IAU Symp., Vol. 190, Eds Y-H Chu et al.) (San Francisco, CA: Astron. Soc. of the Pacific, 1999) p. 569
40. Mac Low M-M, astro-ph/0012499
41. Klessen R S, Heitsch F, Mac Low M-M *Astrophys. J.* **535** 887 (2000)
42. Massey P et al. *Astrophys. J.* **438** 188 (1995)
43. Massey P, in *New Views of the Magellanic Clouds* (IAU Symp., Vol. 190, Eds Y-H Chu et al.) (San Francisco, CA: Astron. Soc. of the Pacific, 1999) p. 173
44. Klessen R S *Astrophys. J.* **556** 837 (2001)
45. Phinney E S, in *The Origins, Evolution, and Destinies of Binary Stars in Clusters* (ASP Conf. Ser., Vol. 90, Eds E F Milone, J-C Mermilliod) (San Francisco, CA: Astron. Soc. of the Pacific, 1996) p. 163
46. Elmegreen B G *Astrophys. J.* **530** 277 (2000)
47. Ефремов Ю Н *Астрон. журн.* **79** 879 (2002)
48. Ефремов Ю Н УФН **170** 899 (2000)
49. Ефремов Ю Н *Астрон. журн.* **78** 887 (2001)
50. Vader J P, Chaboyer B *Astrophys. J.* **445** 691 (1995)
51. Efremov Yu N, Elmegreen B G *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **299** 643 (1998)
52. Tenorio-Tagle G *Astron. Astrophys.* **88** 61 (1980)
53. Rhode K et al. *Astron. J.* **118** 323 (1999)
54. Efremov Yu N, Elmegreen B G, Hodge P W *Astrophys. J.* **501** L163 (1998)
55. Wallin J F, Higdon J L, Staveley-Smith L *Astrophys. J.* **459** 555 (1996)
56. Sánchez-Salcedo F J *Astrophys. J.* **563** 867 (2001)
57. Bureau M, Carignan C, in *Dwarf Galaxies and Their Environment: 40th Meeting of the Graduiertenkolleg "The Magellanic Clouds and Other Dwarf Galaxies", Germany, 2001* (Eds K S De Boer, R-J Dettmar, U Klein) (Aachen: Shaker-Verlag, 2001) p. 141; astro-ph/0104117
58. Heiles C *Astrophys. J.* **229** 533 (1979)

59. Loeb A, Perna R *Astrophys. J.* **503** L35 (1998)
60. Oey M S et al. *Astron. J.* **123** 255 (2002)
61. Stewart S G, Walter F *Astron. J.* **120** 1794 (2000)
62. Ефремов Ю Н *Письма в Астрон. журн.* **26** 649 (2000)
63. Efremov Yu N, in *Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era: Proc. of the Intern. Workshop, Italy, 2000* (Eds E Costa, F Frontera, J Hjorth) (Berlin: Springer, 2001) p. 243; astro-ph/0102161
64. Bloom J S, Kulkarni S R, Djorgovski S G *Astron. J.* **123** 1111 (2002); astro-ph/0010176
65. Fynbo J U et al. *Astrophys. J.* **542** L89 (2000); astro-ph/0009014
66. Tsvetkov D Yu, Blinnikov S I, Pavlyuk N N, astro-ph/0101362
67. Larsen S S et al. *Astrophys. J.* **567** 896 (2002)
68. Larsen S S et al. *Astrophys. J.* **556** 801 (2001)
69. Karachentsev I D, Sharina M E, Huchtmeier W K *Astron. Astrophys.* **362** 544 (2000)
70. Efremov Yu N et al. *Astron. Astrophys.* **389** 855 (2002)
71. Efremov Yu N, astro-ph/0206408
72. Fendt Ch, Beck R, Neininger N *Astron. Astrophys.* **335** 123 (1998)
73. Santillán A et al. *Astrophys. J.* **515** 657 (1999)
74. Ryder S D et al. *Publ. Astron. Soc. Aust.* **14** 81 (1997)
75. Gruendl R A et al. *Astrophys. J.* **413** L81 (1993)
76. Davis D S et al. *Bull. Am. Astron. Soc.* **27** 1354 (1995)
77. Efremov Yu N, Chernin A D, in preparation
78. Chernin A D *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **308** 321 (1999)
79. Markevitch M et al. *Astrophys. J.* **567** L27 (2002)
80. van den Bergh S et al. *Astron. J.* **112** 359 (1996)
81. Block D L et al. *Astron. Astrophys.* **371** 393 (2001); astro-ph/0101340
82. Gwyn S, <http://astrowww.phys.uvic.ca/grads/gwyn/pz/hdfn/pages/293.html>
83. Efremov Yu N, in *Extragalactic Star Clusters* (IAU Symp., Vol. 207, Eds E K Grebel, D Geisler, D Minniti) (San Francisco, CA: Astron. Soc. of the Pacific, 2002) (in press)
84. Klein R I, Woods T, McKee C F *Bull. Am. Astron. Soc.* **33** (2) 87.04 (2001)
85. Mac Low M-M et al. *Astrophys. J.* **433** 757 (1994)
86. Read A M, Pietsch W *Astron. Astrophys.* **373** 473 (2001)
87. Pietrzynski G et al. *Astron. Astrophys.* **371** 497 (2001); astro-ph/0103374
88. Kim S C, Sung H, Lee M G *J. Korean Astron. Soc.* **35** (1) 9 (2002); astro-ph/0203032
89. Baade W *Evolution of Stars and Galaxies* (Ed. C Payne-Gaposchkin) (Cambridge: Harvard Univ. Press, 1963) [Бааде В *Эволюция звезд и галактик* (М.: Мир, 1966); 2-е изд. (М.: УРСС, 2002)]
90. Efremov Yu N, in *Violent Star Formation from 30 Doradus to QSOs* (Ed. G Tenorio-Tagle) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994) p. 61
91. Khachikian E Y, in *Astronomy with Schmidt-Type Telescopes: Proc. of the 78th Colloq. of the IAU, Asiago, Italy, Aug. 30–Sept. 2, 1983* (Astrophys. and Space Sci. Library, Vol. 110, Ed. M Capaccioli) (Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1984) p. 427
92. Boesgaard A M, Edwards S, Heidmann J *Astrophys. J.* **252** 487 (1982)
93. Heidmann J, in *Star Forming Regions: Proc. of the 115th Symp. of the IAU, Tokyo, Japan, November 11–15, 1985* (Eds M Peimbert, J Jugaku) (Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1987) p. 125
94. Meaburn J *Astron. Astrophys.* **75** 127 (1979)
95. Meaburn J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **192** 365 (1980)
96. Ehlerová S, Palous J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **330** 1022 (2002)
97. Tenorio-Tagle G, Bodenheimer P *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **26** 145 (1988)
98. Courant R, Friedrichs K O *Supersonic Flow and Shock Waves* (New York: Interscience Publ., 1948)
99. Бараусов Д И *Письма в Астрон. журн.* **11** 883 (1985)
100. Бараусов Д И, Войнович П А, Чернин А Д, Препринт No. 1274 (Л.: ФТИ АН СССР, 1988)
101. Бараусов Д И, Войнович П А, Чернин А Д *Письма в Астрон. журн.* **18** 1095 (1992)
102. Войнович П А, Чернин А Д *Письма в Астрон. журн.* **21** 926 (1995)
103. Chernin A D, Efremov Yu N, Voinovich P A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **275** 313 (1995)
104. Рыбаков В А и др. *Письма в Астрон. журн.* **24** 874 (1998)
105. Зельдович Я Б, Райзэр Ю П *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (М.: Наука, 1966)
106. Tenorio-Tagle G, in *Violent Star Formation from 30 Doradus to QSOs* (Ed. G Tenorio-Tagle) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994) p. 50
107. Гуревич Л Э, Румянцев А А *Письма в Астрон. журн.* **4** 505 (1978); Горбацкий В Г *Газодинамические неустойчивости в астрофизических системах* (СПб: Изд-во СПбГУ, 1999)
108. Elmegreen B G, in *Violent Star Formation from 30 Doradus to QSOs* (Ed. G Tenorio-Tagle) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994) p. 220
109. Воронцов-Вельяминов Б А *Внегалактическая астрономия* (М.: Наука, 1978)
110. Гинзбург В Л *УФН* **172** 213 (2002)

## Large-scale star formation in galaxies

**Yu.N. Efremov**

Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University  
Universitetskii prosp. 13, 119992 Moscow, Russian Federation  
Tel. (7-095) 939-16 22. Fax (7-095) 932-88 41  
E-mail: efremov@sai.msu.ru

**A.D. Chernin**

Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University  
Universitetskii prosp. 13, 119992 Moscow, Russian Federation  
Tel. (7-095) 939-16 22. Fax (7-095) 932-88 41  
E-mail: chernin@sai.msu.ru  
Tuorla Observatory, University of Turku, Piikkiö, FIN-21500 Finland  
Astronomy Division, University of Oulu, FIN-90014 Finland

A brief review is given of the history of modern ideas on the ongoing star formation process in the gaseous disks of galaxies. Recent studies demonstrate the key role of the interplay between the gas self-gravitation and its turbulent motions. The large scale supersonic gas flows create structures of enhanced density which give then rise to the gravitational condensation of gas into stars and star clusters. Formation of star clusters, associations and complexes is considered, as well as the possibility of isolated star formation. The special emphasis is placed on star formation under the action of ram pressure.

PACS numbers: 97.10.-q, 98.20.Bg, 98.58.Db

Bibliography — 110 references

Received 26 March 2002, revised 28 August 2002