

УДК: 524.7

Обзоры

СВЕРХАССОЦИАЦИИ И ЗВЕЗДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ  
В ГАЛАКТИКАХ

Ю.Н.ЕФРЕМОВ

Поступила 24 июля 2003

Принята к печати 10 октября 2003

Рассматриваются основные характеристики звездных комплексов и сверхассоциаций и различия между этими типами гигантских группировок молодых звезд. Главное из них состоит в том, что сверхассоциации являются результатом индуцированного звездообразования, тогда как в звездных комплексах звезды и скопления возникают в результате спонтанных процессов, обычных в галактических газовых дисках.

1. *Введение. Очерк истории сверхассоциаций и комплексов.* Как известно, в 1947г. В.А.Амбарцумян [1] ввел понятие звездных ассоциаций для обозначения больших группировок горячих звезд, разреженных и потому предположительно гравитационно-несвязанных. Размеры их были оценены в 30-200 пк. Затем, уже с конца 1950-х годов стало появляться все больше данных о том, что подобно тому, как горячие молодые звезды встречаются обычно не поодиночке, а в ассоциациях, так и сами ОВ-ассоциации образуют группы. Для нашей Галактики это было впервые показано Копыловым [2].

В 1958г. В.Бааде, в своих Гарвардских лекциях, рассказывая о больших группировках голубых звезд в Большом Магеллановом Облаке (БМО), говорил: "Шепли заметил их несколько лет назад и назвал созвездиями; я думаю, что по аналогии с термином "ассоциации" мы можем назвать их сверхассоциациями..." Он отметил, что "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" [3].

Независимо от Бааде термин "сверхассоциации" (СА) ввели в употребление Каллоглян [4] и Амбарцумян и др. [5]. Авторы [5] нашли, что из 68 исследованных ими галактик 12 имеют СА. Границу между сверхассоциациями и яркими ассоциациями они провели у  $M_B = -14$ .

Провести разграничение между различными типами молодых звездных группировок нелегко. Забегая вперед, скажем, что это является следст-

вием их иерархического строения, отражающего фрактальную структуру межзвездной среды, и отсутствия предпочтительного размера для каждого типа группировок - что впрочем остается дискуссионным.

Так, Воронцов-Вельяминов [6] одно время настаивал на том, что реальными группировками в нашей Галактике являются именно звездные облака, а ассоциации отвечают лишь "окнам прозрачности" в направлении этих облаков. Позднее же он пришел к выводу, что "размеры сгущений сверхгигантов в М33, начиная со звездных облаков диаметром в 500 пк, без перерыва уменьшаются до размеров обычных звездных скоплений, так что естественного разделения этих сгущений на типы, различающиеся своими диаметрами, не существует" [7], а затем выделил в этой галактике 65 "крупных компактных групп сверхгигантов, которые, если угодно, можно назвать ассоциациями"; их средний диаметр он определил в 90 пк [8].

В противоположность этому, ван ден Берг [9], выделив в М31 188 группировок голубых звезд со средним диаметром в 480 пк, обозначил их как звездные ассоциации, и заключил, что в нашей Галактике размеры ассоциаций впятеро меньше лишь потому, что в ней мы способны выделить лишь более плотные части ассоциаций. (Беседы и переписка с этим выдающимся астрономом показывают, что он и по сей день придерживается этой точки зрения).

Затем было обнаружено, что в нашей Галактике в обширных группах (с размером в 0.5-1 кпк), часто включающих и ОВ-ассоциации, сконцентрированы и звезды значительно более старые - цефеиды. Эти группы получили название звездных комплексов [10]. Позднее Ефремов [11] подметил, что и в группировках ван ден Берга в М31 концентрируются цефеиды, и по этому признаку и по размерам они тождественны звездным

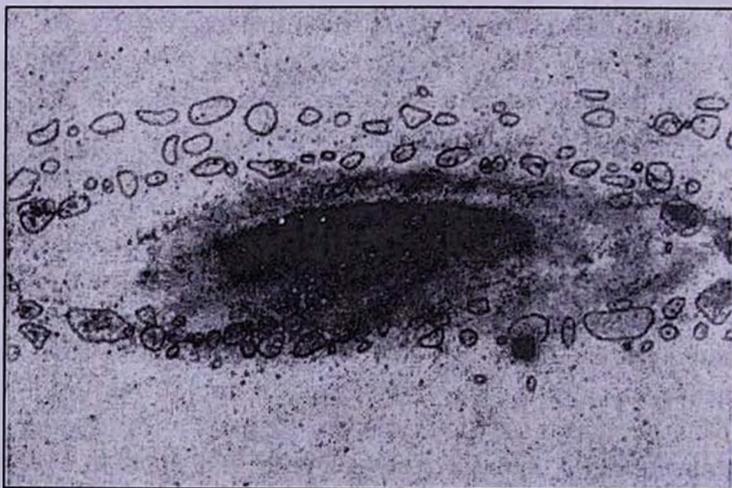


Рис.1. Звездные комплексы в спиральных рукавах М31. Сверхассоциация ОВ78 = NGC206 - близ правого края рисунка, заимствованного из работы ван ден Берга [9].

комплексам Галактики. Затем Ефремов и др. [12] по крупномасштабным пластинкам галактики Андромеды в синих лучах нашли, что группировки звезд, наиболее яркие в ультрафиолетовых лучах имеют средний размер лишь в 80 пк (как и ассоциации в БМО) и при этом 95% из них находятся внутри больших группировок голубых звезд. Иными словами, как и в

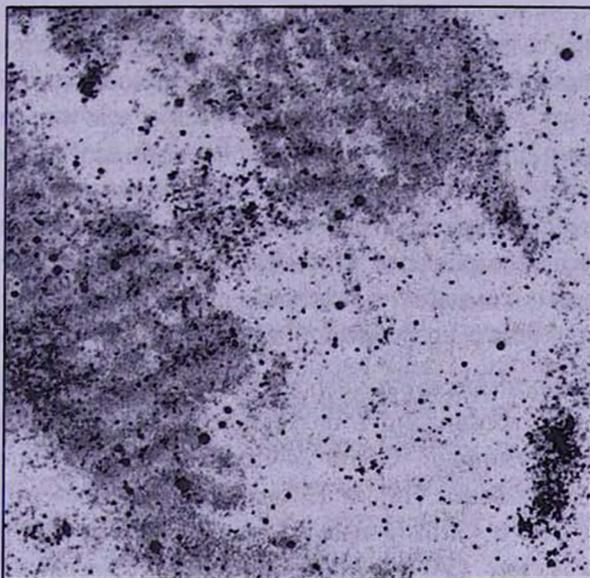


Рис.2. Сверхассоциация OB78 (справа внизу) и нормальный звездный комплекс OB21 (близ середины) в галактике Андромеды. Использовалась пластинка 2-м телескопа на горе Рожан (Болгария).

нашей Галактике, в M31 ассоциации находятся внутри звездных комплексов (рис.1 и 2).

Итак, звездные комплексы выделяются как группировки сверхгигантов (особенно цефеид) и звездных скоплений с размером до 1 кпк и возрастом до 100-200 млн лет. Оказывается при этом, что около 90% ассоциаций находятся внутри звездных комплексов; это установлено по крайней мере для нашей Галактики и ряда галактик Местной группы [13,14].

Теперь мы можем сказать, что звездные комплексы, целиком охваченные звездообразованием, определяются как сверхассоциации. В нормальных галактиках они встречаются редко - в Местной группе галактик сверхассоциаций известно только две или три (30 Dog в БМО, NGC 604 в M33 и NGC 206 в M31), сравнительно с минимум тремя сотнями звездных комплексов. Важно при этом, что все известные и достаточно близкие сверхассоциации всегда можно разбить на отдельные ассоциации (30 Dog в БМО, например, содержат не менее 19 ассоциаций, собранных в трех группах, три богатых молодых скопления и много небольших скоплений [13]).

Иерархическое сгущение молодых звезд высокой светимости, вытекающее из вышеописанных работ, и отмеченное эксплицитно впервые в работах Ефремова [15] и Фейнцингера и Браунсфурта [16], очевидно отражает распределение исходных газовых облаков (а лучше сказать, пространственное распределение плотности звездообразующего газа, см. ниже).

Понимание его причин составляет крупнейшую проблему в исследовании крупномасштабных процессов звездообразования [17].

В отличие от комплексов, сверхассоциации, как правило, содержат много ионизованного водорода и в последние годы все чаще обозначаются как сверхгигантские области HII, а также как *starburst clumps*. Они обычны в карликовых галактиках с активным звездообразованием, которые часто рассматриваются как реликты строительных блоков больших галактик. Изучение звездных комплексов и сверхассоциаций приводит нас к самым актуальным проблемам современной астрофизики.

2. *Сверхассоциации и взрывы звездообразования.* Систематическое исследование сверхассоциаций в более далеких галактиках было начато в Бюраканской обсерватории. Среди 84 галактик ранних типов (Sc, SBc и Irr), изученных Шахбазян [18], в 15 она обнаружила сверхассоциации со средним диаметром в 450 пк и нашла, что нет минимума в распределении по светимости между СА и ассоциациями. В спиральных галактиках с ультрафиолетовым избытком и встречаемость, и размеры сверхассоциаций существенно выше; Петросян, Саакян и Хачикян [19] нашли, что в таких галактиках диаметр сверхассоциаций составляет 1.0 кпк (хотя встречаются объекты с поперечником до 4 кпк), а средняя светимость  $M_v$  равна  $-15^m$  (диапазон светимостей от  $-10^m$  до  $-18^m$ ). Присутствие больших и ярких СА само по себе может быть причиной наличия ультрафиолетового избытка.

Фотометрия сверхассоциаций очень трудна и надежных данных очень мало. Между тем многоцветная фотометрия могла бы дать оценки возраста, состава звездного населения и вклада областей HII в интегральную светимость комплекса и тем самым установить, имеется ли непрерывный переход от типичных сверхассоциаций к типичным звездным комплексам.

Врей и Вокулер [20] получили величины  $B$  для ярчайших сверхассоциаций (отобранных именно как голубые яркие пятна) в 78 галактиках; они нашли, что интегральные величины заключены в пределах от  $-10^m$  до  $-15^m$ , причем светимость измеренных ими группировок растет с уменьшением показателя цвета, что косвенным образом свидетельствует о том, что более молодые СА не являются наименьшими по размерам. Вопрос о том, имеется ли разрыв в распределении по размерам между ассоциациями и сверхассоциациями, остается открытым.

Компактные голубые галактики (называемые также карликовыми

III галактиками) часто неотличимы по своим свойствам (во всяком случае, спектральным) от больших сверхассоциаций и давно уже рассматриваются как межгалактические сверхгигантские III области. Важное отличие состоит однако в том, что в этих галактиках почти всегда обнаруживаются признаки наличия звезд и с населением в несколько миллиардов лет. Это, как и низкое содержание металлов в большинстве таких галактик, указывает на то, что в них вспышка звездообразования произошла в уже существовавшей галактике и связана в большинстве случаев с взаимодействием с другими галактиками [21]. Характерные размеры областей наиболее активного звездообразования в этих галактиках также составляют несколько сотен парсек [22].

Как вероятные реликты строительных блоков больших галактик, дожившие до нашего времени в изоляции, они пользуются возрастающим вниманием у исследователей космогонии галактик и космологии. Эти галактики часто содержат гигантские молодые скопления, прогениторы классических шаровых скоплений, и таким образом могут нам рассказать об условиях, имевшихся в формирующихся больших галактиках десятков миллиардов лет назад (см., например, [23-26]). Доля "нормальных" галактик, содержащих несколько сверхассоциаций, возрастает с увеличением расстояния и уменьшением возраста галактики; их много среди далеких галактик в глубоких полях HST [27].

Одной из ближайших галактик, содержащих несколько сверхассоциаций, является NGC 7673 = Mrk 325, в которой имеется пять областей взрывного звездообразования с размерами около 1 кпк; в каждой из них имеется по десятку молодых массивных скоплений, а светимость одного из clump'ов в основном обусловлена единственным сверхгигантским молодым скоплением [28] - как и в комплексе Ходжа в NGC 6946 (см. [29,30]). Подобные скопления известны уже во многих взаимодействующих галактиках, исследованных с HST, и во многих случаях они образуют комплексы; такие одиночные скопления почти всегда погружены в комплексы более слабых скоплений и звезд.

Сравнение работы [28], основанной на данных HST, с предыдущими исследованиями Mrk 325 особенно ярко показывает значение высокого пространственного разрешения для выводов о морфологии и связи между возрастными и размерами молодых звездных группировок. Эта галактика по темпу звездообразования на единицу площади сравнима лишь с немногими еще более удаленными, и данные о нескольких сверхассоциациях в Местной группе могут быть непредставительными.

Столкновения газовых облаков при взаимодействии галактик являются очевидной причиной формирования сверхассоциаций. Особенно ярко это видно на примере гигантского комплекса, который содержит около 40 молодых массивных скоплений и находится посередине между соприкасаю-

щимися галактиками NGC 6621/2; он обнаруживает собственное вращение [31].

Падение быстрых облаков на диск галактики также может быть причиной формирования областей активного звездообразования. Возможно, однако, и действие эндогенных причин - приступа звездообразования в результате столкновения ударных волн (связанных прежде всего со множественными взрывами сверхновых звезд), распространяющихся в газовом диске галактик от действующих по соседству и одновременно очагов спонтанного звездообразования [32].

Понятно, что этот механизм с большей вероятностью действует в галактиках с более высоким темпом звездообразования, чем бы последнее не объяснялось. Поскольку толщина газовых дисков галактик возрастает к их краям, он может объяснить и преимущественное положение сверхассоциаций на окраинах галактик - при большей толщине газового диска больше вероятность столкновения расширяющихся оболочек до их прорыва из газового диска. Активное звездообразование в ядрах галактик мы в этой статье не рассматриваем.

3. *Природа звездных комплексов.* Данные о фрактальном распределении размеров газовых облаков приводят к выводу, что не должно быть предпочтительных размеров и у молодых звездных группировок. Согласно теории звездообразования, определяемого взаимодействием турбулентности и гравитации, их размеры должны быть тем больше, чем они старше, пока мы не приходим к звездным комплексам, размеры которых определяются уже параметрами содержащей их галактики (см. [33,17]).

Обнаружение у ассоциаций среднего размера (около 80-100 пк), примерно одинакового у разных галактик [14], что подтверждается данными и для далеких галактик [34], в таком случае могло бы быть следствием близости возрастов всех группировок, обозначаемых как ассоциации. В нашей Галактике выделение ассоциаций действительно проводилось всегда по каталогам ранних звезд, но подобных ограничений не существует для других галактик.

Физически выделенные размеры у звездных группировок появляются тогда, 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, как оказалось, зависят от динамических и морфологических параметров, содержащих комплексы галактик - размеры таких комплексов больше у галактик больших размеров и светимостей [35]. Такие комплексы являются, по-видимому, потомками сверхгигантских газовых облаков, обособившихся вследствие действия крупномасштабной

гравитационной нестабильности в газовом диске галактики.

Однако в картине звездообразования в фрактально структурированном газе, параметры которого определяются прежде всего турбулентностью, по-видимому, трудно говорить о физической общности происхождения звезд комплекса и вопрос об особом механизме происхождения звездных комплексов в этом случае снимается. Их можно тогда рассматривать просто как наибольшие из структур, еще сохранивших округлую форму в сети межзвездного газа, охваченной звездообразованием.

Косвенные признаки увеличения размеров области звездообразования с возрастом были найдены в БМО в работе [33], а в работе [36] были сопоставлены размеры и возрасты многих группировок в нескольких галактиках и сделан вывод о наличии корреляции между ними. Однако отсутствие измерений блеска в ультрафиолете делает возрасты, использованные в этой работе, ненадежными; кроме того, использовались и небольшие объекты, которые могут быть гравитационно-связанными скоплениями. Пренебрежение классификацией рассматриваемых звездных группировок затрудняет и понимание заключения Селмана и Мельника [37] о том, что "сверхассоциации" являются частью фрактальной иерархии структур, размеры которых простираются от звездных до размеров целой галактики. Обе работы на самом деле практически не включают объекты, которые можно было бы классифицировать как сверхассоциации.

Как уже говорилось, Эльмегрин и др. [35] нашли, что размеры наибольшего в галактике звездного комплекса увеличиваются с размерами галактики и объяснили это возрастанием масштабов крупномасштабной гравитационной нестабильности вращающегося галактического диска с увеличением размеров галактики. Авторы [37] считают этот вывод результатом эффекта величины выборки и настаивают на универсальности фрактального распределения звездных группировок по размерам. Во всяком случае, в регулярных спиральных рукавах несомненно образуются изолированные сверхоблака, внутри которых появляется со временем звездное население комплекса.

Необходимы новые исследования связи между размером молодых звездных группировок и их возрастом. Другим важнейшим нерешенным вопросом является возможность индивидуального образования даже массивных звезд, по-видимому, возможное в газе, обладающем мелко-масштабной турбулентностью. Исследование комплексов, населенных либо только звездами, либо только скоплениями, может сказать, какие механизмы определяют моду звездообразования [38].

4. *Различия между сверхассоциациями и комплексами.* Рождение сверхассоциаций является следствием возникновения особо благоприятных физических условий для вспышки крупномасштабного коллективного

звздообразования в изолированной большой области. Само существование интенсивного процесса звездообразования в области с размером около 1 кпк является нарушением соотношения возраст - размер. Сверхассоциации не могут быть продуктом спонтанного звездообразования в турбулентном газе. В то же время они иногда встречаются и в нормальных галактиках, так что взаимодействие галактик не является единственным условием их образования.

Размеры комплексов и сверхассоциаций похожи и главные отличия между ними состоят в том, что 1) дисперсия возрастов звезд в сверхассоциациях невелика, по-видимому, не более ~30 млн лет; 2) вся область сверхассоциации охвачена текущим звездообразованием, т.е. содержит O и WR звезды, сконцентрированные в скоплениях и ассоциациях, а также ионизованный газ; 3) сверхассоциации встречаются гораздо реже комплексов. Данные о Местной группе галактик показывают, что в нормальных галактиках они составляют не более 1% от общего числа комплексов [39].

Эти три отличия означают, что сверхассоциации не могут рассматриваться как кратковременная начальная стадия эволюции, через которую проходит каждый звездный комплекс. Остается возможность, что первоначально вспышка звездообразования охватывает весь комплекс (называемый тогда сверхассоциацией), а затем продолжается долгое время лишь в отдельных его местах (рис.1 и 2). Однако ряд данных свидетельствует о том, что продолжения звездообразования в сверхассоциациях на срок, существенно превышающий возраст его самых старых звезд, ожидать нельзя. Так, в сверхассоциации NGC 206 = OB78 в M31 больше нет ни атомарного, ни молекулярного водорода, - он пошел на звездообразование, а остатки его были изгнаны на периферию сверхассоциации, где и наблюдаются еще слабые области HII. Нет заметных запасов молекулярного газа и в сверхассоциации 30 Dor - большие облака HI и H<sub>2</sub> наблюдаются лишь за ее пределами близ юго-западной границы.

Еще более определенные свидетельства о малой протяженности периода активного звездообразования являют постаревшие сверхассоциации, которые выглядят как звездные комплексы с аномально высокой плотностью звезд высокой светимости и аномально малой дисперсией возрастов. Так, весьма высокая плотность цефеид на востоке бара БМО в области с поперечником около 300 пк сочетается с малым интервалом их периодов и, значит, возрастов [38]. Содержащий сверхгигантское молодое скопление комплекс Ходжа в NGC 6946 также можно рассматривать как постаревшую сверхассоциацию. Возраст звезд высокой светимости в нем заключен в пределах 5-30 млн лет и плотность их очень высока, а области HII находятся у границы комплекса [29,30].

Старейшие звезды и скопления в комплексах имеют возраст до 150 млн лет и в тех же комплексах обычно имеются и области продолжающегося звездообразования. Иными словами, кратковременная вспышка интенсивного звездообразования наблюдается в сверхассоциациях, но не в комплексах. Она явно стимулирована какими-то особыми редкими причинами. Дугообразная форма сверхассоциаций AS 102 в NGC 300 и NS 137 = IC133 в M33, погруженных в облака HII, явно об этом свидетельствует; близ обоих дуг находятся яркие рентгеновские источники, возможные реликты явлений, ответственных за их образование [40,41].

Еще более яркий пример индуцированного звездообразования являет система звездных комплексов в БМО, два из которых имеют форму совершенно правильных дуг окружностей. На их примере мы рассмотрим возможные механизмы возбуждения интенсивного звездообразования. Отметим, что разброс возрастов в этих комплексах невелик, а плотность звезд высока, так что это несомненно постаревшие сверхассоциации.

5. Система дугообразных звездных комплексов в БМО. В области газовой сверхоболочки LMC4 на северо-востоке БМО наблюдаются четыре или пять гигантских (с радиусом в 150-300 пк) дуг, образованных звездами высокой светимости и молодыми скоплениями. Самую яркую из этих дуг первыми отметили в 1966г. Вестерлунд и Метьюсон [42]. Ныне она известна как ассоциация LH77 или же "Квадрант"; вторая четкая дуга получила название "Секстант" [43]. Три прочие дуги могут быть



Рис.3. Гигантские звездные дуги в БМО. Квадрант в центре и Секстант справа внизу. Они являются частями правильных окружностей.

нереальными (рис.3).

Происхождение дуги Квадранта и водородной полости LMC4, внутри которой она находится, Вестерлунд и Метьюсон [42] объяснили взрывом гипотетической сверх-сверхновой. Имевшиеся в то время карты распределения HI имели низкое разрешение и эти авторы заключили, что гигантская звездная дуга замыкает с юга полость в HI - дуга возникла в той стороне сверхоболочки HI, где больше плотность окружающего газа. На самом деле дуга Квадранта находится глубоко внутри HI оболочки LMC4 (рис.4).

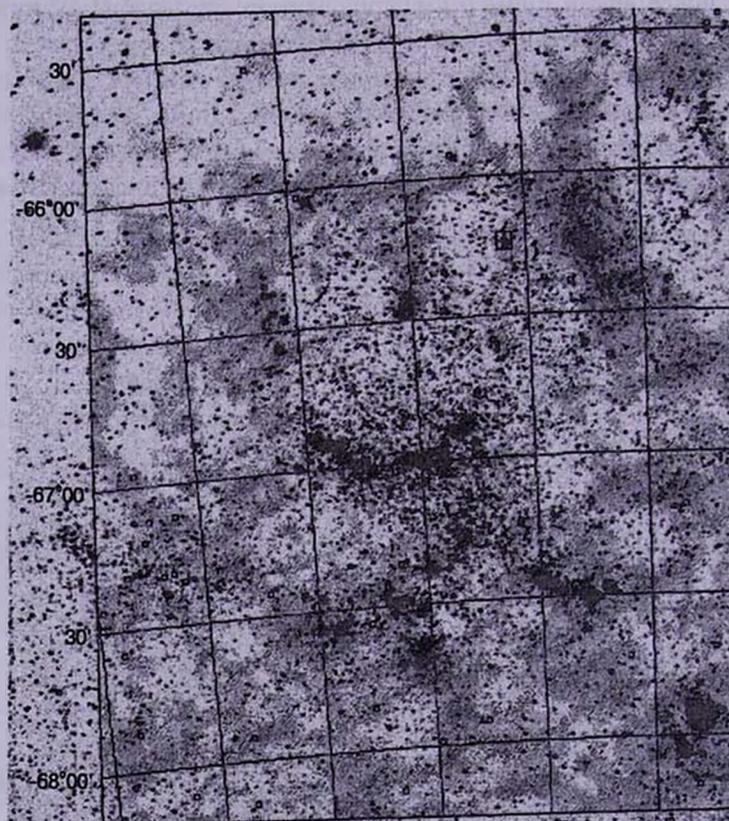


Рис.4. Звездные дуги в БМО на фоне распределения HI в области сверхоболочки LMC4. Скопление NGC 1978 отмечено квадратиком.

Эту дугу ярких голубых звезд Вестерлунд и Метьюсон [42] отождествили (неверно, см. [43]) с "созвездием III" Шепли. Они, однако, не заметили, что по соседству с рассматриваемой звездной дугой, находятся еще несколько. Их существование было впервые отмечено в краткой статье Ходжа [44] об "остатке сверх-сверхновой в NGC 6946", в которой он дал схему "созвездия III" в БМО и несколько схожего образования в спиральной галактике NGC 6946. Этот объект в NGC 6946 - единственная структура,

которую Ходж (частное сообщение) обнаружил при систематических поисках чего-то похожего на систему звездных дуг в БМО. Природа его будет рассмотрена в другой статье.

Проблема возникновения этой системы дуг была рассмотрена тридцать лет спустя в работе Ефремова и Эльмегрини [43]. Оценив возрасты скоплений, входящих в дуги по существующим измерениям их интегральных показателей цвета, авторы нашли, что возраст и радиус Квадранта составляют около 16 Муг и 280 пк, а Секстанта соответственно 7 Муг и 170 пк. Важно при этом, что разброс возрастов скоплений в каждой из дуг очень мал и не превышает ошибки их определения (2-3 млн лет). В предположении, что дуги расширяются с одинаковой скоростью, ее можно оценить из этих данных в  $\sim 12$  км/с [45].

Легко убедиться в том, что Квадрант и Секстант являются частями правильных окружностей, а не эллипсов, соответствующих наклону плоскости БМО к картинной плоскости (около 33 градусов) (рис.5).

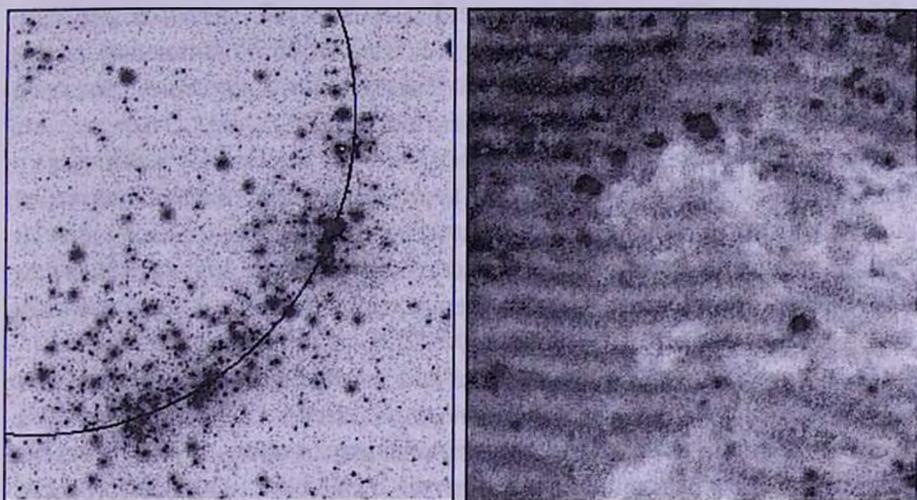


Рис.5. Наверху - комплекс Секстанта (изображение получено на UIT) представлен дугой идеальной окружности (север слева вверх), внизу - дугообразный комплекс из 5 (включая одно тройное) скоплений на востоке M83 (изображение получено на VLT). В центре его скоплений нет, см., [45].

Предположение о том, что обе дуги лежат в плоскостях, наклоненных к диску БМО именно таким образом, чтобы скомпенсировать его наклон к картинной плоскости, кажется искусственным, хотя известен наклон в 18 градусов между плоскостями Галактики и звездного комплекса Местной системы (пояса Гульда). Более вероятно, что обе дуги являются видимыми в проекции частями сферических оболочек. Это предположение подтверждается сравнением прямого изображения Квадранта с моделью сегмента сферического слоя, случайным образом заполненного точками.

Наилучшее согласие достигается при толщине слоя 0.2 радиуса и углом при центре в 130 градусов, если центральный радиус-вектор сегмента сферы мы видим под углом около 10 градусов к картинной плоскости.

В статье Ефремова и Эльмегрин [43] правильная круговая форма дуг Квадранта и Секстанта была объяснена их образованием из газа, нагретого давлением излучения О-звезд и взрывов сверхновых, которые могли быть в их центрах; необходимая для этого энергия составляет около  $10^{52}$  эрг. Эти авторы отметили концентрацию А-сверхгигантов близ центра Квадранта, которая могла быть остатком ассоциации, и существование небольшого неизученного скопления близ центра Секстанта. В них должны были вспыхнуть до нескольких десятков сверхновых, чтобы дать необходимую энергию центрального давления.

Газовые сверхоболочки, образованные коллективным действием сверхновых и О-звезд очевидно должны существовать, и теория указывает, что они должны распадаться на звездные скопления, расположенные по дуге окружности. Однако реальных примеров таких звездных структур очень мало (рис.5), а наличие внутри их более старого скопления, звезды которого могли бы быть источником центрального скопления, доказано лишь в единственном случае в галактике IC 2574 [46]. Отметим, что более молодые скопления расположены в этом комплексе хаотическим образом, отнюдь не образуя дуг или цепочек, а рентгеновское излучение от внутренней части водородной полости, считавшееся приходящим от горячей плазмы, как это и следовало из теории образования сверхоболочек вследствие множественных взрывов сверхновых звезд, оказалось обязанным точечному рентгеновскому источнику [47].

Различные гипотезы о происхождении сверхоболочек рассмотрены в работах [40,41]. В целом проблема возникновения сверхоболочек HI с диаметрами около 1 кпк, для возникновения которых нужны энергии порядка  $10^{52}$ - $10^{53}$  эрг, не может считаться решенной. Об этом говорит уже отсутствие сверхоболочек вокруг почти всех скоплений подходящего возраста и массы, а не только отсутствие родительских скоплений внутри почти всех известных сверхоболочек. Именно последнее обстоятельство стимулировало работы по объяснению сверхоболочек падением на газовый диск галактики быстрых облаков, и первая такая работа была стимулирована именно необходимостью объяснения происхождения дуги Квадранта (Тенорио-Тагле [48]).

Позднее Ефремов [49] и Ефремов и Эльмегрин [50] отметили трудности гипотезы о происхождении звездных дуг в БМО, предложенной в [43]. Непонятно, почему именно вокруг малозаметных скоплений могли бы возникнуть столь необычные структуры, отсутствующие вокруг великого множества более богатых скоплений такого же возраста. Еще более непонятно, почему гигантские звездные дуги, вообще очень редкие

структуры, имеются в БМО в количестве не менее двух (а возможно пяти) и к тому же находятся по соседству друг с другом. Однородная малая плотность газа внутри HI оболочки LMC4 могла бы возможно объяснить правильную форму Квадранта, находящегося близ середины полости LMC4. Однако она скорее является результатом последующего воздействия звезд Квадранта на межзвездную среду. Не менее правильная дуга Секстанта окружена плотными облаками HI и HII, которые имеются и внутри дуги (рис.4).

Скопления, расположенные вдоль периферии LMC4, в большинстве не моложе скоплений дуги Квадранта, так что их происхождение вряд ли связано с этой оболочкой, градиент возрастов отсутствует [51]. Фотометрические данные, полученные в этой работе, не подтвердили наличия близ центра Квадранта звездной группировки подходящего для формирования этой дуги возраста.

В качестве источника энергии порядка  $10^{52}$ - $10^{53}$  эрг, пригодного для образования сверхоболочек нагретого газа, рассматривались всплески гамма-излучения (GRB) (см. [49] и ссылки там). Концентрация звездных дуг в одной области БМО при этом объяснялась выбросом их прогениторов из плотного скопления при динамическом взаимодействии звезд. Такое скопление, NGC 1978 - массивное и плотное, действительно существует в этой области и оно было предложено в качестве источника выброшенных из него тесных систем компактных объектов, которые слившись в гамма-всплеске, могли породить систему звездных дуг неподалеку от скопления [49].

В работе Ефремова и др. [52] было показано, что как единовременный мощный изотропный взрыв, так и длительное поступление энергии из центра, находящегося внутри, но на окраине плотного облака, может объяснить наблюдаемые характеристики дуги Секстанта, сходные расстояния между скоплениями которого интерпретируются при этом как результат развития гравитационной неустойчивости в газовой оболочке. Иными словами, для объяснения звездных дуг в этой гипотезе требуется высокая неоднородность среды и специальное положение источника давления.

В работе [52] было также показано, что сегмент сферической газовой оболочки возникает и в случае изотропного взрыва вне плоскости газового диска; такая локализация равновероятна с любой другой, если прогениторы взрыва были выброшены из звездного скопления. Изотропный взрыв на известной высоте над плоскостью симметрии газового диска дает в проекции одностороннюю дугу (проекцию сферического сегмента), но при этом линия, соединяющая середину дуги с ее центром кривизны, должна быть перпендикулярна линии пересечения плоскости галактики с картинной плоскостью, что резко противоречит ориентации всех дуг БМО, кроме Пятой дуги [52]. Итак, гипотеза изотропного центрального давления

совместима лишь с предположением о локализации его источника на окраине плотного облака.

Гипотеза о наклонном падении группы облаков могла бы объяснить соседство всех дуг, равно как и близкую ориентацию дуг Квадранта и Секстанта (хотя ориентации Третьей и Пятой дуг совсем другие, их реальность под сомнением). Эта гипотеза самым естественным образом объясняет отсутствие парных дуг (симметричных относительно поворота на 180 градусов вокруг центра кривизны) и их правильную форму, напоминающую форму лидирующего края некоторых галактик, движущихся в сопротивляющейся среде [40,41].

Концентрация дуг в северо-восточном углу БМО тогда может быть связана с тем, что именно он смотрит на центр нашей Галактики. На передней поверхности падающих под малым углом к плоскости БМО плотных облаков образуется головная ударная волна, в которой затем происходит звездообразование. Результирующий звездный комплекс на какое-то время сохраняет форму породившей его ударной волны.

Однако веские возражения против объяснения особенностей области LMC4 падением высокоскоростных облаков выдвинули Браун и др. [51]. Трудно совместить с гипотезой падения группы облаков существенно разный возраст дуг. И самое главное, еще Домгорген и др. [53] отметили, что как морфология, так и кинематика нейтрального водорода в области LMC4 не согласуются с гипотезой выпадения в ней высокоскоростных облаков. Было бы, однако, желательно более детальное рассмотрение данных об H I именно вдоль возможной траектории наклонного падения облаков, задаваемой положением и ориентацией дуг Квадранта и Секстанта.

Остается рассмотреть возможность образования звездных дуг под действием "направленных взрывов" - джетов - либо широких, либо узких, - но тогда мультипрецессирующих. Направленный взрыв гиперновой, по видимому, исключен, но мультипрецессирующие длительно действующие джеты, рабочие поверхности которых заполняют с течением времени сегменты сферических оболочек, остаются заслуживающей рассмотрения возможностью. В применении к гамма-всплескам ее выдвинул Фаржион (см. [54]) и она остается дискуссионной.

Однако известны объекты, длительно испускающие релятивистские струи электронов и позитронов, которые являются результатами взрыва сверхновой в тесной двойной системе. Эти струи взаимодействуют с веществом и могут инициировать звездообразование. Иными словами, это те из рентгеновских двойных звезд, которые временами испускают узкие релятивистские джеты и известны как микрокварзы [55].

Правда, прецессия джетов наблюдается лишь в одном из них - в SS433. Вокруг SS433 - звездного остатка сверхновой W50 с возрастом  $2 \cdot 10^4$  лет уже наблюдается расширяющаяся оболочка H I с радиусом

около 60 пк; кинетическая энергия джетов SS433 составляет  $\sim 10^{39}$  эрг/с и за время жизни остатка (около 20 000 лет) они поставили в межзвездную среду  $\sim 10^{51}$  эрг; масса уже нагретого газа составляет  $\sim 30\,000$  солнечных [56]. Для образования звездных дуг в БМО потребовалось около  $10^{52}$  эрг [43], так что если стадия истечения джетов, подобных наблюдаемым в SS433 продлится  $10^5$  лет, они могли бы такие дуги создать. Полный раствор конуса прецессии ( $\sim 40$  градусов в случае SS433) джетов в таком случае может определять телесный угол при центре сегмента сферической поверхности, которая (видимая сбоку) будет выглядеть как звездная дуга.

Однако же область контакта рабочей поверхности джета с межзвездным веществом сама по себе может быть источником энергии для формирования расширяющейся оболочки, нагревающей окружающий газ. Такого рода сверхгигантские оболочки известны вокруг концов джетов, истекающих из ядер радиогалактик. Угол при центре дуги в таком случае не связан с углом раствора прецессионного конуса джета и вообще сама прецессия может не иметь места.

Моисеев и др. [57] выдвинули гипотезу о том, что конусы ионизации, характеризующие морфологию областей, излучающих узкие линии в ряде Сейфертовских галактик, связаны с гидродинамической нестабильностью, вызванной скачком скоростей между межзвездной средой и джетом, испускаемым ядром галактики; при этом оси конусов совпадают с осями джетов, а углы при центре конусов могут составлять 50-60 градусов. Мы можем допустить, что горячий газ на рабочей поверхности такого широкого конуса вокруг узкого джета способен инициировать звездообразование в сферическом сегменте нагретого межзвездного газа, и что аналогичная ситуация может иметь место для джетов гамма-всплесков и/или микроквazarов.

Для второй, противоположно ориентированной парной дуги от того же источника в диске БМО просто нет места, поскольку его толщина меньше радиуса звездной дуги - второй джет бьет в пустоту.

Ситуация в целом может быть подобна таковой близ концов радиоджетов из ядер галактик, стимулированное которыми звездообразование хорошо известно в галактиках Cen A и NGC 4258. В последней галактике у концов джета наблюдаются и газовые образования, имеющие характерную дуговую форму головной ударной волны [58]. Теория процесса звездообразования, стимулированного джетами, разработана еще плохо (см. [59]), однако признаки звездообразования действительно наблюдаются и близ концов джетов некоторых из галактических "микроквazarов" [60].

Итак, воздействие на межзвездную среду и индуцирование звездообразования - реально наблюдаемые свойства микроквazarов. Наблюдаются у них и высокие пространственные скорости, позволяющие допустить

рождение некоторых из них в звездном скоплении и уход из него. Так, с высокими скоростями двигаются микрокварзы GRO J1655-40, Cyg X-1 и LS 5039 (последний со скоростью 150 км/с), Рибо и др. [61].

Микрокварзы в БМО пока не известны (во всей нашей Галактике их пока обнаружено около 15), но уникальная для БМО концентрация рентгеновских двойных действительно наблюдается именно неподалеку от NGC 1978 (Ефремов, [49]). Отметим также, что именно в этой же области, к востоку от NGC 1978, расположен самый яркий в БМО молодой остаток сверхновой N49, в котором находится единственный известный за пределами Галактики источник мягкого повторяющегося гамма-излучения, SGR 0526-66, открытый 5 марта 1979г. Вспышки гамма-излучения также не могут быть исключены из списка возможных прогениторов звездных дуг в БМО, тем более что связанные с GRB релятивистские джеты могут быть подобны джетам микрокварзов и активных ядер галактик, и могут взаимодействовать с окружающим веществом [62]. Кроме того, появление GRB в результате слияния нейтронных звезд остается реальной возможностью [63,64], а такие пары, как и рентгеновские двойные, могут формироваться в плотных ядрах скоплений и затем выбрасываться из них.

Возможно, что концентрация рентгеновских двойных неподалеку от NGC 1978 объясняется именно рождением их прогениторов в этом скоплении. Предположение о том, что значительная часть рентгеновских двойных родилась в шаровых скоплениях при динамических взаимодействиях

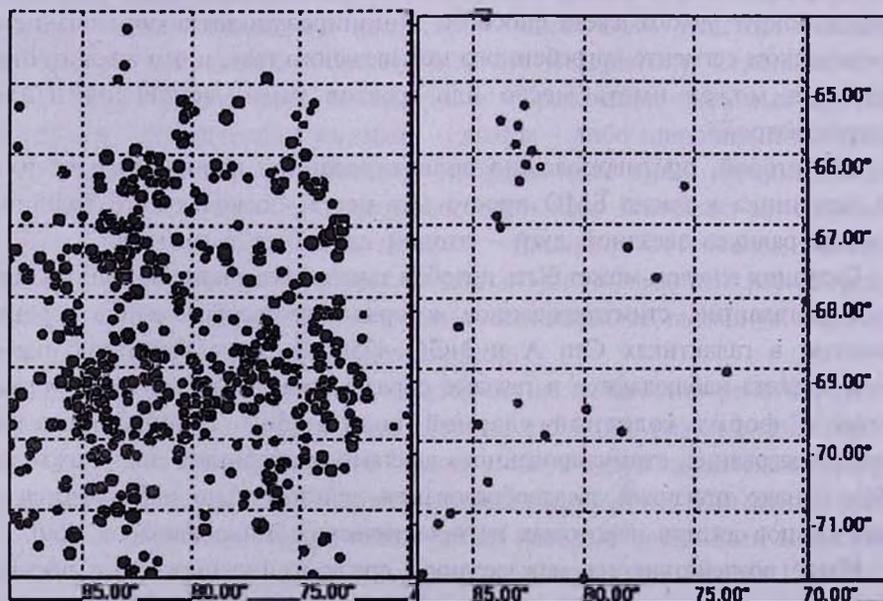


Рис.6. Слева - распределение звездных скоплений в БМО, справа - распределение рентгеновских двойных звезд в БМО, скопление NGC 1978 отмечено кружком.

в плотном ядре скопления и были затем из них выкинуты, было высказано давно и ныне хорошо обосновано и наблюдательными, и теоретическими данными (см., например, [65]).

Само распределение рентгеновских двойных в БМО, резко отличающееся от распределения звездных скоплений (и звезд вообще), неоспоримо показывает, что эти объекты часто имеют высокие скорости, позволяющие им уйти далеко от места рождения. Особенно показательны присутствие рентгеновских двойных на окраинах БМО, далеко от областей звездообразования (рис.6).

Трудностью гипотезы о рождении прогениторов звездных дуг в NGC 1978 представлялось эксцентричное положение скопления относительно системы дуг, к северу от них. Однако к северу от скопления на краю БМО плотность HI уже очень мала, так что взаимодействие источника энергии с межзвездной средой здесь вряд ли могло привести к звездообразованию. Рентгеновские же двойные известны и далеко к северу от скопления.

Так или иначе, пример звездных дуг в БМО показывает, что области с кратковременным интенсивным звездообразованием (сверхассоциации, localized bursts of star formation) образуются именно под действием тех или иных высокоэнергичных процессов, воздействовавших на межзвездную среду.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 03-02-16288 и НШ 389.2003.2. Широко использовались данные Astrophysics Data System NASA.

Гос. Астрономический институт им. П.К.Штернберга, МГУ,  
Россия, e-mail: efremov@sai.msu.ru

## Reviews

# SUPERASSOCIATIONS AND STELLAR COMPLEXES IN GALAXIES

Yu.N.EFREMOV

The main properties of the stellar complexes and superassociations are considered, as well as the differences between these types of the giant assemblages of the young stars. The main difference is the stellar complexes being the results of the spontaneous processes common for the galaxy gas disk, the superassociations are results of the triggered star formation.

Key words: *Review:superassociation:stellar complexes*

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.А.Амбарцумян, Астрон. ж., 26, 3, 1949.
2. И.М.Копылов, Астрон. ж., 35, 390, 1958.
3. W.Baade, Evolution of stars and galaxies (Harvard U. Press, 1963) (рус. пер. - Мир, М., 1966; УРСС, 2002).
4. А.Т.Каллоглян, ДАН АрмССР, 33, 205, 1961.
5. В.А.Амбарцумян, С.Г.Исхударян, К.А.Саакян, Р.К.Шахбазян, Бюракан. Сообщ., 33, 3, 1963.
6. Б.А.Воронцов-Вельяминов, Труды 2-го Совещания по вопросам космогонии. Изд. АН СССР, М., 1953.
7. Б.А.Воронцов-Вельяминов, Астрон. ж., 32, 401, 1955.
8. Б.А.Воронцов-Вельяминов, Астрон. ж., 33, 205, 1956.
9. S. van den Bergh, Astrophys. J. Suppl. Ser., 9, 65, 1964.
10. Ю.Н.Ефремов, Письма в Астрон. ж., 4, 125, 1978.
11. Ю.Н.Ефремов, Письма в Астрон. ж., 6, 275, 1980.
12. Yu.N.Efremov, G.R.Ivanov, N.S.Nikolov, Astrophys. Sp. Sci., 75, 407, 1981.
13. Ю.Н.Ефремов, Очаги звездообразования в галактиках, Наука, М. 1989.
14. Yu.N.Efremov, Astron. J., 110, 2757, 1995.
15. Ю.Н.Ефремов, Вестник РАН XXXX 12, 56, 1984.
16. J.V.Feitsinger, E.Braunsfurth, Astron. Astrophys., 139, 104, 1984.
17. B.Elmegreen, Yu.Efremov, R.Pudritz, H.Zinnecker, in: Protostars and Planets IV, p.179, eds. V.Mannings et al, U. Arizona Press: 2000.
18. Р.К.Шахбазян, Астрофизика, 4, 273, 1968.
19. А.Р.Петросян, К.А.Саакян, Э.Е.Хачикян, Астрофизика, 21, 57, 1984.
20. J.D.Wray, G. de Vaucouleurs, Astron. J., 85, 1, 1980.
21. S.A.Pustilnik, A.Y.Kniazev, V.A.Lipovetsky, A.V.Ugryumov, Astron. Astrophys., 373, 24, 2001.
22. E.Telles, J.Melnick, R.Terlevich, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 288, 78, 1997.
23. L.Vanzi, L.K.Hunt, T.X.Thuan, Astron. Astrophys., 390, 481, 2002.
24. S.Silich, G.Tenorio-Tagle, C.Munoz-Tunon, L.M.Cairos, Astron. J., 123, 2438, 2002.
25. Yu.I.Izotov, T.X.Thuan, Astrophys. J., 567, 875, 2002.
26. M.R.Corbin, W.D.Vacca, Astrophys. J., 581, 1039, 2002.
27. S. van den Bergh, J.G.Cohen, C.Crabbe, Astron. J., 122, 611, 2001.
28. N.Homeier, J.S.Gallagher III, A.S.Pasquali, Astron. Astrophys., 391, 857, 2002.
29. S.S.Larsen, Yu.N.Efremov, B.G.Elmegreen et al., Astrophys. J., 567, 896, 2002.
30. Yu.N.Efremov, S.A.Pustilnik, A.Y.Kniazev et al., Astron. Astrophys., 389, 855, 2002.
31. W.C.Keel, K.D.Borne, astro-ph/0307025, 2003.
32. A.D.Chernin, Yu.N.Efremov, P.A.Voinovich, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 275, 313, 1995.
33. Yu.N.Efremov, B.G.Elmegreen, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 299, 588, 1998.

34. *F.Bresolin, R.C.Kennicutt, L.Ferrare et al.*, *Astron. J.*, **116**, 119, 1998.
35. *D.M.Elmeegreen, B.G.Elmeegreen, C.Lang, C.Stephens*, *Astrophys. J.*, **425**, 57, 1994.
36. *D.M.Elmeegreen, J.J.Salzer*, *Astron. J.*, **117**, 764, 1999.
37. *F.J.Selman, J.Melnick*, *Astrophys. J.*, **534**, 703, 2000.
38. *Ю.Н.Ефремов*, *Астрон. ж.*, **79**, 879, 2002.
39. *Yu.N.Efremov*, in *Violent Star Formation*, ed. G.Tenorio-Tagle, Cambridge Univ. Press, 1994, p.61.
40. *Yu.N.Efremov*, *Astron. Astrophys. Trans.*, **21**, 251, 2002.
41. *Yu.N.Efremov*, *Astro-ph/0206408*, 2002.
42. *B.E.Westerlund, D.S.Mathewson*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **131**, 371, 1966.
43. *Yu.N.Efremov, B.G.Elmeegreen*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **299**, 643, 1998.
44. *P.W.Hodge*, *Publ. ASP*, **79**, 29, 1967.
45. *Ю.Н.Ефремов*, *Астрон. ж.*, **78**, 887, 2001.
46. *S.G.Stewart, F.Walter*, *Astron. J.*, **120**, 1794, 2000.
47. *M.W.Pakull, L.Mirioni*, *astro-ph/0202488*, 2002.
48. *G.Tenorio-Tagle*, *Astron. Astrophys.*, **88**, 61, 1980.
49. *Ю.Н.Ефремов*, *Письма в Астрон. ж.*, **25**, 100, 1999.
50. *Yu.N.Efremov, B.G.Elmeegreen*, in: *New Views of the Magellanic Clouds*, IAU Symposium №190, ed. by You-Hua Chu et al. (Sheridan Books, Chelsea), 1999, p.422.
51. *J.Braun, K.S. de Boer, M.Altmann*, *astro-ph/0006060*, 2000.
52. *Yu.N.Efremov, S.Ehlerova, J.Palous*, *Astron. Astrophys.*, **350**, 457, 1999.
53. *H.Domgorgen, D.J.Bomans, K.S. de Boer*, *Astron. Astrophys.*, **296**, 523, 1995.
54. *Yu.N.Efremov, D.Fargion*, *astro-ph/9912562*, 1999.
55. *I.F.Mirabel*, *astro-ph/0211085*, 2002.
56. *G.M.Dubner, M.Holdaway, W.M.Goss, I.F.Mirabel*, *Astron. J.*, **116**, 1842, 1998.
57. *A.V.Moiseev, V.I.Afanasiev, S.N.Dodonov, V.V.Mustevoi, S.S.Khrapov*, 2000, *astro-ph/0006323*.
58. *G.Cecil, L.J.Greenhill, C.G.DePree et al.*, *Astrophys. J.*, **536**, 675, 2000.
59. *G.Mellema, J.D.Kurk, H.J.A.Rottgering*, *astro-ph/0209601*, 2002.
60. *L.F.Rodrigues, I.F.Mirabel*, *astro-ph/9811250*, 1998.
61. *M.Ribo, J.M.Paredes, G.E.Romero et al.*, *Astron. Astrophys.*, **384**, 954, 2002.
62. *A.M.Beloborodov*, *Astro-ph/0305518*, 2003.
63. *S.Rosswog, E.Ramirez-Ruiz, M.B.Davies*, *Astro-ph/036418*, 2003.
64. *Yu.N.Efremov*, In: *Gamma-ray bursts in the afterglow era*, eds. E.Costa, F.Frontera, J.Hjorth, p.243 (Springer: 2001) = *astro-ph/0102161*, 200165.  
*D.Pooley, W.H.G.Lewin, S.F.Anderson et al.* *Astro-ph/0305003*, 2003.
65. *D.Pooley, W.H.G.Lewin, S.F.Anderson et al.*, *astro-ph/0305003*, 2003.