

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Научная сессия Отделения общей физики и астрономии Российской академии наук

(26 апреля 2000 г.)

26 апреля 2000 г. в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии Российской академии наук. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Брагинский В.Б.** (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва) *Новые методы измерений для гравитационных антенн*¹.

2. **Гуревич А.В.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва) *Кинетическая теория пробоя на убегающих электронах*.

3. **Ефремов Ю.Н.** (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва) *Очаги звездообразования в галактиках*.

4. **Максимов Е.Г.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва) *Современное состояние теоретических исследований ВТСП в купратных системах*².

5. **Цебро В.И., Омеляновский О.Е.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва) *Незатухающие токи и захват магнитного потока в многосвязной углеродной нанотрубной структуре*.

6. **Кулаковский В.Д., Тартаковский А.И., Крижановский Д.Н., Армигаж А., Робертс Дж., Сколник М.С.** (Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Московская область; Университет Шеффилда, Шеффилд, Великобритания) *Двумерные экситонные поляритоны и их взаимодействие*.

Краткое содержание некоторых докладов публикуется ниже.

PACS number: 97.10.Bt

Очаги звездообразования в галактиках

Ю.Н. Ефремов

1. Введение. Звездные комплексы

Звезды — важнейший предмет астрономии, и не только потому, что в них заключена большая часть видимой массы Вселенной. Наше Солнце, от которого зависит вся

жизнь на Земле, лишь рядовая звезда; изучение происхождения и эволюции нашей планеты невозможно без соответствующих знаний о звездах. Они собраны в гигантские системы — галактики, одной из них является наша Галактика — система Млечного пути, на окраине которой находится Солнце. Изменяющаяся со временем интенсивность и локализация процессов звездообразования в эволюционирующей галактике породила бесконечное разнообразие наблюдаемых ныне форм галактик, которые лишь в первом приближении можно разбить на спиральные, неправильные и эллиптические. Последние практически исчерпали свои запасы газа в первоначальной вспышке звездообразования, и в настоящее время звезды образуются лишь в неправильных и спиральных галактиках, в дисках которых сохранилось еще много газа. Распределение молодых звезд повторяет структуру газовой среды, породившей их; в свою очередь молодые горячие звезды и взрывы сверхновых звезд оказывают глубокое воздействие на окружающий газ. Эти процессы представляют большой интерес для газовой динамики и для теоретической физики вообще. С процессами звездообразования, как будет показано в этой статье, связаны косвенным образом также и события, которым сопутствует выделение огромной энергии и которые наблюдаются, прежде всего, как вспышки гамма-излучения; их изучение является сейчас самой актуальной задачей астрофизики.

Поскольку звезды образуются, в конечном счете, в результате гравитационного коллапса и фрагментации наиболее плотных газовых облаков, молодые звезды встречаются всегда группами — скоплениями и менее плотными, но большими по размеру ассоциациями. В свою очередь, эти группировки объединяются в гигантские звездные комплексы с размером 0,5–1 кпк (напомним, что расстояние от Солнца до центра Галактики составляет около 7 кпк). Звездные комплексы с сосредоточенными в них ассоциациями и скоплениями, связанными с газовыми облаками, внутри которых продолжается звездообразование, являются наибольшими структурными единицами в иерархии молодых звездных группировок. Как самостоятельный класс они были впервые выделены в наших работах [1, 2].

В комплексах, образовавшихся спонтанно, под действием различных нестабильностей в газовой среде, наблюдается большой разброс возрастов звезд. Они включают как небольшие и плотные области продол-

¹ Обзор по материалам доклада опубликован в УФН, т. 170, № 7 (2000).

² Обзор по материалам доклада будет опубликован в УФН, т. 170, № 10 (2000).

жающегося звездообразования, так и довольно старые звезды, например, цефеиды с возрастом до 100 млн лет, разбросанные по всему комплексу. Имеются, однако, комплексы, в которых разброс возрастов не превосходит нескольких миллионов лет. Они иногда имеют дугообразную или сфероидальную форму и образовались, очевидно, после воздействия на газовую среду какого-то локального события, связанного с выбросом энергии в межзвездную среду и ее последующим уплотнением. Такими триггерами звездообразования могут служить неоднократные вспышки сверхновых в скоплениях, падение на газовый диск галактики достаточно массивных и быстрых облаков (или звездных скоплений), и, как выяснилось в последнее время, явления, связанные со вспышками гамма-излучения.

2. Спонтанное образование звездных комплексов

Спонтанное звездообразование в газовых дисках галактик определяется, прежде всего, сочетанием процессов гравитационной неустойчивости в газе и его турбулентных движений. Сформировавшиеся в этих процессах более плотные облака дают начало звездным группировкам разного масштаба. Неудивительно, что в распределении по размерам и массам газовых облаков и возникших из них звездных группировок имеется большое сходство. Ряду, начинающемуся от кратных звезд, и далее через скопления, ассоциации и группы ассоциаций к звездным комплексам, соответствует последовательность газовых облаков — от уплотнений в ядрах молекулярных облаков до сверхоблаков. Накапливается все больше свидетельств того, что за исключением сравнительно редких случаев, когда на газ действуют регулярные силы (например, гравитация в спиральных волнах плотности), межзвездные облака представляют собой протяженную сеть турбулентного газа с иерархической фрактальной структурой.

Звездообразование, идущее в газовых облаках разного масштаба, также должно быть иерархически организованным, приводящим к появлению вложенных друг в друга звездных группировок разного масштаба, что и проявляется в структуре звездных комплексов. При этом звездообразование в меньших облаках должно идти быстрее, чем в больших, если оно идет во временной шкале, характерной для развития турбулентности в газовой среде. Такая картина спонтанного звездообразования подтверждается обнаруженной недавно зависимостью между взаимным расстоянием и различием возрастов достаточно молодых звезд и скоплений [3]. Особенно уверенно она выявляется по данным о скоплениях Большого Магелланова облака (БМО).

С увеличением расстояния между скоплениями БМО различие их возрастов (которое можно рассматривать как длительность звездообразования в области соответствующего размера) растет, что отвечает теоретическим ожиданиям для звездообразования в турбулентном газе. Поскольку в меньших облаках оно идет быстрее, чем в больших, то меньшие и более молодые звездные группировки (звездные ассоциации и скопления) находятся внутри больших и более старых (звездных комплексов). Меньшие области звездообразования возникают и исчезают многократно, прежде чем оно закончится в большей области. Первые звезды, родившиеся в меньших активных областях внутри большей области — звездного комплекса — успеют уже превратиться в цефеиды с харак-

терным возрастом около 50 млн лет, прежде чем звездообразование закончится во вновь образовавшихся внутри него ассоциациях. Такая же картина, но на меньших временных и пространственных масштабах, наблюдается и внутри ОВ-ассоциаций (разреженных группировок молодых звезд спектральных классов О и В): компактные субгруппы внутри них имеют меньший возраст.

Фрактальная иерархическая структура не имеет выделенного масштаба. Как же объяснить предпочтительный размер (80 пк), вроде бы наблюдающийся у звездных ассоциаций, по крайней мере, в близких галактиках [4]? Вопрос подлежит дальнейшему изучению, но вполне возможно, что этот размер является следствием того, что ОВ-ассоциации выделяются по звездам определенного возраста. Это наиболее яркие звезды, и обрисовываемые ими группировки наиболее заметны. Возможно, что ОВ-ассоциации — лишь масштаб в континууме размеров звездных группировок, соответствующий возрасту около 10 млн лет [3].

Размеры же звездных комплексов приблизительно соответствуют толщине газового диска галактик. Если определить комплексы как наибольшие округлые группировки звезд безотносительно к их возрасту, то их диаметры окажутся зависящими от характеристик вмещающих их галактик. При дальнейшем увеличении размеров и возраста дифференциальное галактическое вращение придает звездной группировке форму обрывка спирального рукава [5]. Короткие, хаотически разбросанные по галактике фрагментарные спиральные рукава можно назвать большими звездными комплексами, растянутыми галактическим вращением. В них нет старых звезд. Большинство спиральных галактик обладает рукавами именно этого типа, однако наиболее известны и красивы галактики с регулярными длинными и симметричными рукавами. Их объясняет волновая теория спиральной структуры, согласно которой такие рукава представляют собой волны повышенной плотности звезд и газа, вращающиеся как твердое тело вокруг центра галактики. В волновых спиральных рукавах звездно-газовые комплексы часто находятся на примерно одинаковых расстояниях друг от друга, что объясняется их образованием под действием развивающейся вдоль газового рукава гравитационной неустойчивости.

3. Гигантские звездные дуги в Большом Магеллановом облаке

Обычные звездные комплексы имеют более или менее округлую форму, но только недавно стало ясно, что существует немногочисленный класс комплексов, имеющих дугообразную, а иногда и правильную круговую форму. Этим странным структурам известно сейчас около десятка в разных галактиках. Иногда это дугообразная цепочка скоплений, огибающая темную область, указывающую на высокую плотность газа и пыли в ней (рис. 1). Возраст скоплений в некоторых из них известен, он практически одинаков внутри каждого такого комплекса, что указывает на индуцированное образование этих гигантских дуг скоплений и звезд. Какое-то внешнее событие синхронизировало звездообразование в исходном газовом облаке, предварительно придав ему дугообразную форму или, скорее, сформировав это облако из более разреженного газа.

Совершенно поразительным является то обстоятельство, что после трех работ 1964–1967 гг. [6–8], в которых

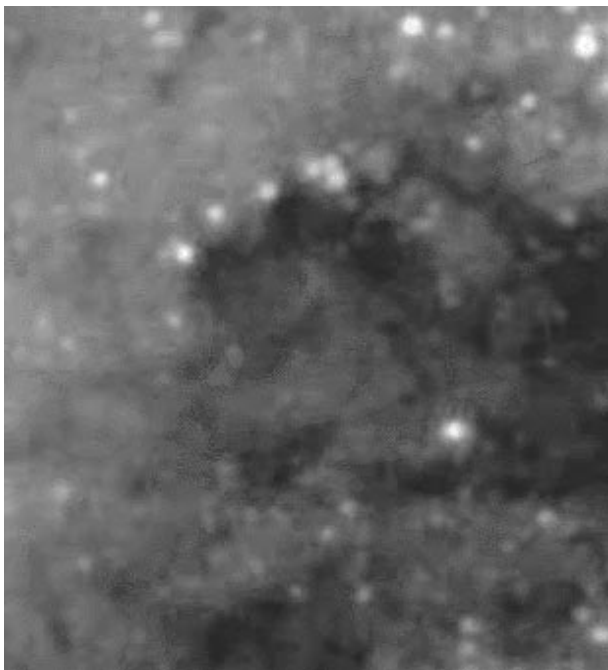


Рис. 1. Дуга из семи скоплений, окружающая полукольцо пылевой материи в спиральной галактике M83. Регулярное расстояние между пятью скоплениями может говорить об их образовании под действием гравитационной неустойчивости в газовой сверхоболочке.

приводились примеры гигантских звездных дуг, они были полностью забыты. Между тем и природа породивших их объектов, и возможность изучения процессов триггерированного звездообразования в самом чистом виде представляют огромный интерес. Особенно интересны кратные системы дугообразных звездных комплексов, само существование которых доказывает, что породившие их объекты должны были иметь общее происхождение где-то поблизости.

В БМО, ближайшей к нам галактике, имеются три или четыре гигантские дуги с радиусом в 200–300 пк, они находятся на северо-восточной окраине галактики (рис. 2). Одну из таких дуг можно видеть в World Wide

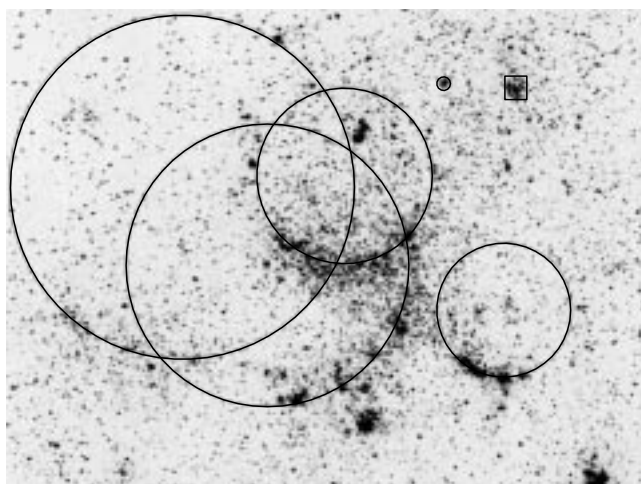


Рис. 2. Система из трех (или четырех) звездных дуг в БМО. В центре Квадрант, справа внизу Секстант. Скопление NGC 1978 обведено кружком, объект SGR0526-66 — квадратиком.

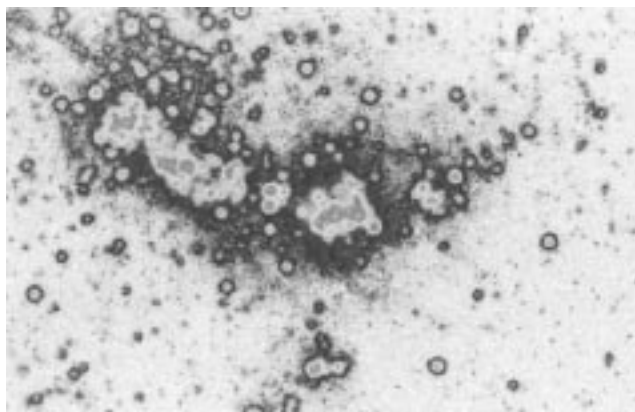


Рис. 3. Дуга Секстанта в ультрафиолетовых лучах, регистрирующих только молодые звезды. Легко убедиться в том, что дуга является частью правильной окружности.

Web на известном многим сайте Astronomical Picture of the Day (APOD). Ее изображения в лучах ионизованного водорода $H\alpha$ помещены там 25 июня 1995 г. и 23 августа 1997 г., а в ультрафиолетовых лучах — 11 октября 1995 г. (рис. 3). В подписи к этому рисунку говорится, что "причина, по которой эта арка имеет наблюдаемую форму, в настоящее время неизвестна".

Действительно, только за двумя исключениями, в многочисленных исследованиях этой области БМО звездные дуги не только не объяснялись, но даже и не упоминались, может быть потому, что они хорошо видны лишь на мелкомасштабных фотографиях в синих лучах (см. рис. 2). Дугообразная форма этих структур является следствием эффекта проекции: они представляют собой сегменты сферических поверхностей, видимые сбоку (рис. 4), а не части окружностей в плоскости галактики. В последнем случае у них была бы не правильная круговая форма, а эллиптическая, поскольку угол между плоскостью диска БМО и картинной плоскостью составляет около $30^\circ - 40^\circ$. Угол при центре

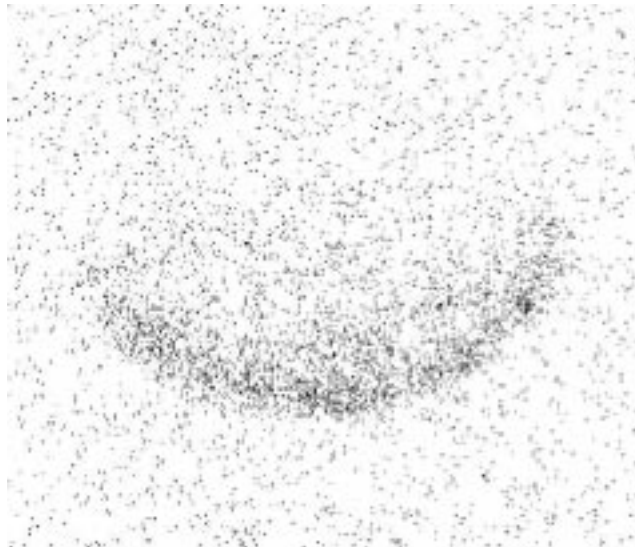


Рис. 4. Сегмент сферического слоя толщиной в 0,1 радиуса с углом при центре в 90° , видимый сбоку. Ср. с рис. 2 и 3.

дуги — проекции частичной сферической оболочки — примерно соответствует углу раствора конического пучка излучения или направленного взрыва, уплотнившего окружающий газ, в котором затем родились звездные скопления.

Эта система дуг находится в области сверхоболочки HI LMC4, охватывающей наибольшую в БМО область пониженной плотности водорода. Самую четкую из них давно уже отметили Вестерлунд и Мэтьюсон [7], связавшие происхождение и этой дуги, и водородной полости LMC4 со взрывом сверх-сверхновой. Первым обратил внимание на всю эту систему арок Ходж [8], который также предположил, что все они являются остатком сверх-сверхновой. При поисках аналогичных структур в других галактиках он обнаружил лишь одну такую, в спиральной галактике NGC 6946, и опять-таки она привлекла внимание лишь в 1999 г., когда была случайно переполучена (см. ниже).

Происхождение двух наиболее четко обрисованных дуг в области LMC4 было рассмотрено в работе Ефремова и Эльмегринна [9]. Правильная форма этих арок, которым мы дали название Квадрант и Секстант (см. рис. 2 и 3), как охватывающих соответствующие части окружности, была объяснена их образованием из газа, "выметенного" (swept-up) давлением из центра, где были когда-то O-звезды и сверхновые. Для Секстанта было указано рассеянное скопление близ его центра, по видимому, более старое, чем звезды самого Секстанта. Близ центра Квадранта была найдена группа из шести сверхгигантов класса A1 практически одинакового возраста, и причем большего, чем у звезд Квадранта. Эта относительно старая ассоциация могла в свое время содержать O-звезды и сверхновые, способные наместить газовую оболочку, из которой затем образовались звезды Квадранта. Для формирования такой оболочки нужна энергия порядка 10^{52} эрг, эквивалентная выделяющейся при взрыве десятка сверхновых. Однако в недавней работе [10] было найдено, что возраст сверхгигантов близ центра Квадранта лишь 12 млн лет, примерно такой же, как и в нем самом, а два небольших скопления там же, напротив, слишком стары.

В любом случае остается неясным, почему звездные дуги образовались вокруг бедных звездных группировок, и почему они отсутствуют вокруг множества более богатых скоплений подходящего возраста, и, наконец, почему все арки, известные в БМО, сгруппировались в одной и той же области, в пределах 1 кпк друг от друга. Наиболее вероятным объяснением представляется отказ от идеи образования звездных дуг в результате последовательных взрывов многих сверхновых в скоплении. Эта идея подвергается все большему сомнению и в отношении газовых сверхоболочек, не связанных со звездными дугами.

Весной 1997 г. появились первые данные в пользу существования объектов, способных давать сверхмощные взрывы типа предполагаемых сверх-сверхновых и порождать газовые сверхоболочки и гигантские звездные дуги. Мы имеем в виду вспышки гамма-излучения. Ныне красные смещения измерены у десятка гамма-вспышек, и измеряемые по ним расстояния означают чудовищно гигантские энергии вспышек — до 10^{53} – 10^{54} эрг, как у сотен и тысяч сверхновых звезд, вспыхнувших одновременно (см. обзор [11]).

Сверхмощные взрывы должны оказывать огромное воздействие на межзвездную среду. Блиников и Постнов [12] первыми упомянули об этом в статье, посвященной природе гамма-всплесков — они должны образовывать в межзвездном газе гигантские полости с размером в несколько сотен парсек. Совместно с Эльмегринном и Ходжем мы рассмотрели этот вопрос детально [13] и заключили, что при существующих оценках частоты вспышек гамма-излучения (одна вспышка в десять тысяч–миллион лет) и времени жизни сверхоболочки в десятки миллионов лет, от 10 до 100 образованных таким путем сверхоболочек может наблюдаться в каждой галактике, подобной нашей, что близко к данным наблюдений. Мы привели ряд примеров сверхоболочек в ряде галактик, для которых такое происхождение наиболее вероятно, ибо нет ни центральных скоплений, ни признаков падения облаков на газовый диск галактики. Это означает, что и звездные дуги могут быть отдаленными реликтами гамма-всплесков. Старая идея о сверхмощных взрывах, порождающих эти структуры, получила новую жизнь.

Таким образом, присутствие богатых скоплений в центрах звездных дуг не является необходимым, эти дуги могли образоваться и в результате единичного гамма-всплеска. Однако если это так, то возникает вопрос, почему все три такие вспышки, имевшие место в БМО за последние ~ 30 млн лет (интервал возрастов скоплений в дугах), происходили в одной и той же области, неподалеку друг от друга. Единственным объяснением представляется наличие в этой области какого-то общего источника, в котором могли бы возникать прогениторы (прародители) гамма-вспышек. Согласно мнению большинства авторов, это тесные двойные системы, включающие нейтронные звезды или черные дыры. Естественно предположить, что таким источником может быть достаточно богатое и плотное скопление, за время жизни которого сближения звезд могли породить много тесных двойных систем, и некоторые из них могли покинуть скопление и стать прогениторами гамма-всплесков. Такое скопление есть, и к тому же весьма необычное. Оно находится всего лишь в нескольких сотнях парсек от дуг! Это скопление NGC 1978, возраст которого, судя по диаграмме цвет–величина, около 2 млрд лет. Оно самое яркое и, следовательно, самое богатое из всех скоплений БМО такого возраста. По своему богатству, массе (сотни тысяч масс Солнца M_{\odot}) и плотности оно заслуживает названия шарового, хотя классические шаровые скопления старше примерно на 10 млрд лет.

Более того, рядом с этим скоплением, всего в 18', находится еще один весьма необычный объект — заведомый родственник гамма-всплесков! Это SGR 0526-66, единственный в БМО Soft Gamma Repeater, источник повторяющегося излучения мягких гамма-лучей. Первая его вспышка была зарегистрирована 5 марта 1979 г., и после долгих споров объект был признан членом БМО. Концентрируются близ скопления NGC 1978 и двойные звезды — источники рентгеновского излучения, которые также могут быть родственниками объектов, порождающих гамма-всплески [14]. Случайное нахождение всех этих объектов поблизости друг от друга и от звездных дуг немислимо, между ними должна быть генетическая связь [15].

4. Система звездных дуг в спиральной галактике NGC 6946

Поразительно, что весьма массивное скопление было недавно найдено и близ второй известной системы кратных дуг, в спиральной галактике NGC 6946, которую Ходж [8] описал в той же статье, что и систему дуг в БМО. Прошло более тридцати лет, прежде чем она привлекла внимание! Автор данной статьи заподозрил существование большого скопления внутри структуры, описанной Ходжем как остаток сверх-сверхновой, летом 1998 г., изучая пластинку, полученную на 6-метровом телескопе [15], а весной 1999 г. появился препринт Ларсена и Рихтлера [16], в котором сообщались результаты поиска молодых массивных скоплений в 21 галактике. Не зная о работе Ходжа, они переоткрыли систему кратных дуг в NGC 6946, описав ее как сферическое скопление звездных скоплений. Внутри него они нашли молодое шаровое скопление, самое яркое из всех молодых скоплений в изученных ими галактиках.

В совместной работе [17] мы изучили эту уникальную систему, остающуюся, однако, загадочной. Правильная круговая форма этого комплекса звездных комплексов и наличие внутри него нескольких дуг скоплений с примерно равными возрастами говорит о возникновении их из сверхоболочек, об индуцированном звездообразовании, но источников центрального давления не видно. Возраст гигантского скопления, оцененный в [17] по интегральной трехцветной фотометрии, примерно такой же, как и у других скоплений в этой системе, а масса составляет около $10^6 M_{\odot}$.

Как и в случае БМО, можно предположить, что прогениторы звездных дуг ушли из этого скопления и дали сверхмощные взрывы. Диаметры этих дуг говорят о том, что они могли возникнуть под действием взрывов, эквивалентных десятку-другому обычных сверхновых. Молодость скопления — если действительно оно ответственно за образование всей системы — указывает на взрывы очень массивных вращающихся звезд — гиперновых, которые могут сопровождаться вспышкой гамма-излучения [18]. Заметим, однако, что к юго-западу от сверхкомплекса находится объект, который может быть либо звездой переднего фона (нашей Галактики), либо массивным и компактным скоплением в NGC 6946 с возрастом около 600 млн лет. Наблюдения на Хаббловском космическом телескопе и 6-метровом телескопе САО, для которых нашей команде уже выделено время, скоро должны решить проблему.

Следует обратить внимание на поразительное сходство размеров четырех дуг внутри кругового звездного комплекса и вблизи него. Учитывая, что возраст всех скоплений в комплексе примерно одинаков, сходство размеров должно означать близость величин энергии, потребовавшейся для формирования каждой дуги (рис. 5). В недавней работе [19] высказывается смелое предположение, что истинное количество энергии, выделяемой при вспышках гамма-излучения, всегда одинаково, а наблюдаемые различия связаны либо с разным углом конуса излучения, либо с разной его ориентацией. Авторы [19] основываются на известных примерах постоянства энергии вспышек сверхновых типа Ia и очень узком интервале измеренных масс нейтронных звезд, около $1,4 M_{\odot}$, и полагают, что слияние нейтронных звезд в двойной системе может дать постоянную энергию гамма-вспышки, $\sim 5 \times 10^{51}$ эрг. Эта энергия

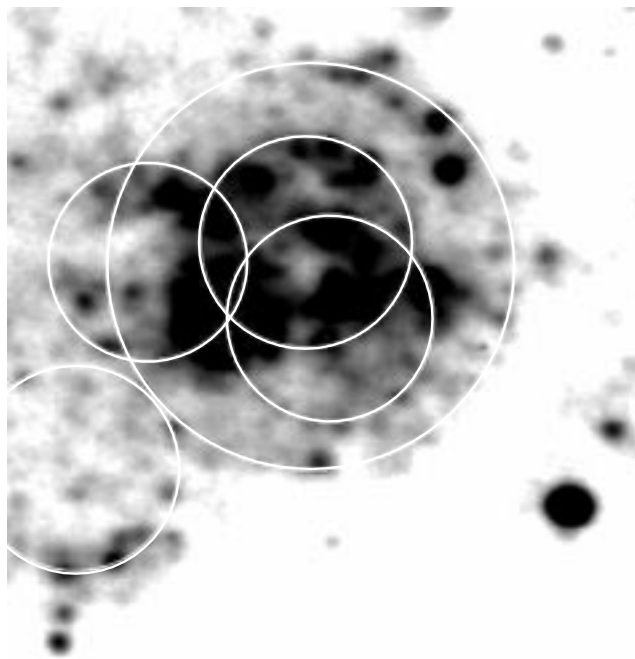


Рис. 5. Сферический комплекс звездных скоплений в спиральной галактике NGC 6946. Деталь снимка, полученного С. Ларсеном на 2,5-метровом телескопе (Nordic Optical Telescope) на острове Ла Пальма.

близка к требующейся для формирования дуг скоплений в NGC 6946. Возможно, пересечение трех дуг скоплений как раз в центре массивного скопления (см. рис. 5) не случайно и означает, что оно сформировалось при столкновении породивших их газовых оболочек. Повышенное внешнее давление может быть одним из условий образования гравитационно связанных массивных скоплений.

6. Природа прогениторов гамма-всплесков

Каковы бы ни были прогениторы гамма-всплесков, ясно, что это редкий вид звезд, и вероятность найти их в массивном богатом скоплении больше. Возможно, что особенности тех двух скоплений, которые мы заподозрили как источник этих объектов, могут что-то сказать об их природе.

Но почему же нет ни сверхоболочки, ни звездных дуг или колец непосредственно вокруг NGC 1978, если их прогениторы родились в этом скоплении? Если эта гипотеза верна, то объекты, породившие дуги, должны обладать уникальным сочетанием свойств: они рождаются в скоплении, но покидают его и, прежде чем взорваться, уходят на большое расстояние, до нескольких сотен парсек. Как ни удивительно, такие объекты существуют, более того, это именно те объекты, которые давно уже были предложены как кандидаты в прародители гамма-всплесков, причем вне какой бы то ни было связи с предположением о способности гамма-всплесков инициировать звездообразование! Такое совпадение вряд ли может быть случайным. Оно подкрепляет нашу уверенность в том, что звездные дуги в области NGC 1978 обязаны своим происхождением гамма-всплескам.

Уникальный вид объектов, которые рождаются именно в плотном звездном скоплении, но неизбежно с течением времени покидают его — это тесные двойные системы, оба компонента которых представляют собой

компактные объекты — нейтронные звезды и черные дыры. Логика рассуждений здесь такова. Многие двойные системы, включающие компактные объекты, не являются первичными, а образуются в плотных центральных частях шаровых скоплений в результате тройных звездных сближений. Хорошо известно, что именно такого рода процессами объясняется высокая, на два порядка больше, чем в поле, относительная частота рентгеновских двойных звезд в шаровых скоплениях.

При повторяющихся сближениях с третьей звездой тесная двойная система становится все более тесной, а скорость обоих участников встречи в скоплении увеличивается. В системе из нормальных звезд может произойти слияние компонентов, в результате которого образуется пекулярная голубая звезда — голубой страгглер. Подчеркнем, что именно их обилием объясняется высокая яркость плотной центральной области NGC 1978 в ультрафиолетовых лучах [20]. Однако если система состоит из двух компактных объектов (размеры которых на много порядков меньше, чем у нормальных звезд, около 3 км у черных дыр и 15 км у нейтронных звезд), то в результате многократных сближений с проходящими поблизости звездами она с большой вероятностью приобретет скорость, достаточную для ухода из скопления, прежде чем произойдет слияние компонентов. Эта скорость для типичного шарового скопления составляет $\sim 40 \text{ км с}^{-1}$ [21].

Итак, можно предположить, что вопреки обычному мнению, тесная система компактных объектов возникает чаще не после взрывов как сверхновых обеих массивных звезд в первоначальной двойной системе (что приводит если не к распаду системы, то к высокой ее скорости, не наблюдающейся, однако, у трех известных в нашей Галактике пар нейтронных звезд (см. [22]), а вследствие захвата при звездных сближениях в плотной центральной части звездного скопления. Результаты недавнего моделирования динамической эволюции скоплений, принимающего во внимание неодинаковые массы звезд, говорят о высокой эффективности образования пар при сближениях звезд в плотных скоплениях и подкрепляют старый аналитический вывод о том, что системы из компактных объектов при дальнейших сближениях с другими звездами рано или поздно выбрасываются из скопления [23].

Понятно, что скорости выброшенных систем могут быть самыми разными, но следует ожидать, что преимущественно они близки к минимально необходимой для ухода из массивного скопления ($\sim 40 \text{ км с}^{-1}$), хотя для проверки этого нет еще необходимых данных. Пара из черных дыр выкидывается из массивного скопления, будучи уже очень тесной, и поэтому слияние происходит достаточно быстро, за миллионы или десятки миллионов лет после ухода из скопления [23]. Задачей работы [23] была оценка наблюдаемости всплесков гравитационного излучения, но при слиянии черных дыр происходит и вспышка гамма-излучения, если они окружены аккреционными дисками. Схожая судьба должна быть и у пары из черной дыры и нейтронной звезды. Приведенные оценки скорости и времени дают для расстояния между родительским скоплением и местом слияния — гамма-вспышкой — сотни парсек, что и наблюдается в БМО.

Из вышеизложенного следует, что вполне можно отождествить объекты, индуцирующие образование

звездных дуг, с объектами, рождающими гамма-вспышки. Это следует уже из принципа экономии гипотез, хотя для стимулирования звездообразования важен лишь выброс энергии в межзвездную среду. Отметим, что сверхновые с энергией вспышки порядка 10^{52} эрг, несомненно, существуют, например, такой была SN 1998bw, связанная со слабым гамма-всплеском GRB 980425¹. Имеется ряд аргументов в пользу предположения, что всплески гамма-излучения связаны с направленными взрывами сверхновых некоторых типов (см. обзор [18]). Однако наблюдаемые проявления такой связи можно объяснить и тем, что вспышка гамма-излучения стимулировала взрыв как сверхновой ближайшей созревшей для этого массивной звезды, чем можно объяснить и известное рассогласование координат SN 1998bw и GRB 980425 (точнее, связанного с GRB рентгеновского источника). Слабость этого гамма-всплеска могла быть связана именно с тем, что пучок был направлен не в нашу сторону. Взрыв сверхновой, определенно, мог быть индуцирован в компоненте кратной системы, в которой произошла гамма-вспышка [24].

Как уже упоминалось, правильная круговая форма звездных дуг в БМО говорит о том, что они являются проекциями сегментов сферических оболочек. Их ориентация, не связанная с ориентацией плоскости БМО, указывает, что эти видимые сбоку сегменты звездных сфер являются результатом направленного взрыва или истечения, а не изотропного взрыва вне плоскости симметрии газового диска галактики [25]. В последнем случае вершины дуг, образовавшихся из-за градиента плотности газа, смотрели бы *на* или *от* линии пересечения картинной плоскости и плоскости БМО. Отметим, что угол при центре звездных дуг в десятки градусов и отсутствие парных дуг, симметричных относительно центра их кривизны, согласуются с моделью Усова [26, 27], согласно которой источниками гамма-излучения являются несимметричные замагнетизированные релятивистские плазменные джеты. Развитием этой модели является гипотеза Спруита [14] о родственных прародителей гамма-вспышек и рентгеновских двойных.

7. Звездообразование, инициированное гамма-всплесками

Гипотеза о способности гамма-всплесков создавать сверхоболочки HI и, в конечном счете, инициировать звездообразование находится в согласии с данными о вспышке гамма-источника GRB 971214 внутри сверхоболочки, возможно, порожденной предыдущей гамма-вспышкой в этой же области [28]. Повторение гамма-всплесков в той же области галактики, бесспорно, говорит о наличии в ней же источника их прародителей, вокруг которого формируется гигантская область звездообразования, содержащая несколько звездных комплексов. Характерным ее признаком является изолированность в галактике, как это имеет место для области LMC4. Данные о том, что послесвечения гамма-всплесков наблюдаются в областях звездообразования, таким образом, вовсе не доказывают, что непосредственными прогениторами гамма-вспышек были массивные молодые звезды. Эти области звездообразования могли быть созданы предшествующими

¹ Недавно обнаружено (GCN 704), что этот GRB вспыхнул на окраине звездного скопления.

гамма-вспышками в той же области. Интервал возрастов дуг скоплений в БМО составляет около 30 млн лет.

Возможность вспышек как гиперновых (сопровождаемых вспышкой гамма-излучения) массивных звезд (до половины из которых выбрасывается из ядра рассеянного скопления за время, не превышающее 50 млн лет [29]), впрочем, не исключается, тем более, что данные о послесвечении гамма-всплесков согласуются с наличием двух типов их прародителей [30]. Однако, вопреки Пачински [18], гамма-вспышки в областях звездообразования не противоречат гипотезе об их возникновении при слиянии компактных объектов с возрастными до нескольких миллиардов лет. Эти предположения можно будет проверить, когда данных о послесвечении гамма-всплесков станет достаточно для статистики.

Вполне возможно, что явления, соответствующие по энерговыделению сотням и тысячам сверхновых, происходят достаточно часто и что именно с ними можно связать возникновение и других изолированных звездных комплексов с малым разбросом возрастов, известных, например, в БМО [2]. Понятно, что инициированные джетами комплексы выглядят дугообразными лишь при определенном угле зрения, а возможно, что они приобретают дугообразную форму лишь в достаточно однородной среде. При малом угле конуса выброса результирующая область звездообразования вообще не будет иметь характерной формы.

Инициированное синхронное звездообразование может быть гораздо более распространенным явлением, чем это принято думать. Имеются признаки звездообразования близ концов джетов у так называемых микрокварзов в нашей Галактике [31]. Этим объектам родственен SS433, у которого прецессирующий релятивистский джет бьет из двойной системы, включающей черную дыру. Газовая оболочка с размером около 100 пк уже наблюдается вокруг этого объекта и приписывается воздействию прецессирующего джета, хотя вспышка сверхновой, породившая его, произошла всего лишь около 10 000 лет назад [32]. Не исключено, что через несколько сотен тысяч лет в этой оболочке начнется звездообразование.

Можно даже предположить, что именно всплески гамма-излучения, начавшиеся после того, как большая часть двойных черных дыр или нейтронных звезд покинула массивные скопления, в которых они образовались, инициировали звездообразование в газовых дисках галактик. Может быть, именно поэтому звездообразование в дисках спиральных галактик началось примерно на 2 млрд лет позже, чем в их гало (шаровые скопления в гало галактик родились почти одновременно). Близость этого времени задержки к возрасту NGC 1978 может быть не случайной. После появления в галактических дисках массивных звезд они и сами могут способствовать дальнейшему звездообразованию. Процесс образования массивных звезд еще не до конца ясен, и возможно, что он идет только при внешнем давлении на газовое облако, так что для появления первых О-звезд и сверхновых были нужны другие источники.

8. Заключение

Таким образом, процесс замыкается. Нейтронные звезды и черные дыры, конечные стадии эволюции звезд, порождая явление гамма-вспышки, дают начало новым областям звездообразования. Характеристики этих областей указывают на то, что их породили широкие (десятки градусов) односторонние джеты, что согласуется с моделью гамма-всплесков [26, 27]. Если же пучки узкие, то

они должны быть мультипрецессирующими, длительно действующими [33] и заполняющими широкий конус, чтобы можно было с их помощью объяснить характеристики звездных дуг [34].

Так или иначе, заключение, что дугообразные звездные комплексы родились в результате гамма-вспышек, прародителями которых были двойные системы из компактных объектов, кажется неизбежным. Систему кратных дуг в NGC 6946 еще можно было бы объяснить падением на плоскость галактики роя облаков, но эта гипотеза не проходит для звездных дуг в БМО, возрасты которых заметно различаются. Существование кратных систем звездных дуг означает, что их прародители рождаются в плотных звездных скоплениях в результате звездных сближений и выбрасываются из них при дальнейших сближениях. Скорее всего, прародители гамма-всплесков покидают скопление в течение короткой, возможно, повторяющейся стадии максимальной плотности его ядра.

Конкретный механизм индуцированного джетами гамма-всплесков звездообразования еще не изучен. Можно только предположить, что двигающаяся поверхность взаимодействия джета и окружающего газа нагревает газ, и плотность результирующего сегмента сферической поверхности в конце концов становится достаточной для звездообразования. Во всяком случае, хорошо известно, что в ряде галактик наблюдается активное звездообразование, индуцированное релятивистскими джетами, бьющими из их ядер.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 00-02-17804 и 00-15-96627).

Список литературы

1. Ефремов Ю Н *Письма в астроном. ж.* **5** 21 (1979)
2. Ефремов Ю Н *Очаги звездообразования в галактиках* (М.: Наука, 1989)
3. Efremov Yu N, Elmegreen B G *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **299** 588 (1988)
4. Efremov Yu N *Astron. J.* **110** 2757 (1995)
5. Elmegreen B G, Efremov Yu N *Astrophys. J.* **466** 802 (1996)
6. Hayward R *Publ. ASP* **76** 35 (1964)
7. Westerlund B E, Mathewson D S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **131** 371 (1966)
8. Hodge P W *Publ. ASP* **79** 29 (1967)
9. Efremov Yu N, Elmegreen B G *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **299** 643 (1998)
10. Braun J M, De Boer K S, Altmann M, astro-ph/0006060 (submitted to *Astron. Astrophys.*)
11. Постнов К А *УФН* **169** 545 (1999)
12. Blinnikov S I, Postnov K A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **293** L29 (1998)
13. Efremov Yu N, Elmegreen B G, Hodge P W *Astrophys. J.* **501** L163 (1998)
14. Spruit H C *Astron. Astrophys.* **341** L1 (1999)
15. Ефремов Ю Н *Письма в астроном. ж.* **25** 100 (1999)
16. Larsen S S, Richtler T *Astron. Astrophys.* **345** 59 (1999)
17. Elmegreen B G, Efremov Yu N, Larsen S S *Astrophys. J.* **535** 748 (2000)
18. Paczynski B, astro-ph/9909048; to be publ. in *The Largest Explosions Since the Big Bang: Supernovae and Gamma Ray Bursts* (Eds M Livio, K Sahu, N Panagia) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999)
19. Postnov K A, Prokhorov M E, Lipunov V M, astro-ph/9908136
20. Cole A A et al. *Astron. J.* **114** 1945 (1997)
21. Davis M B, in *IAU Symp. 174* (Eds P Hut, J Makino) (Dordrecht: Kluwer, 1995) p. 243
22. Fryer C, Kalogera V *Astrophys. J.* **489** 244 (1997)
23. Portegies Zwart S, McMillan S L W *Astrophys. J.* **528** L17 (2000)
24. Milgrom M, Usov V V, astro-ph/0001283; to be publ. *Astrophys. J. Lett.*
25. Efremov Yu N, Ehlerova S, Palous J *Astron. Astrophys.* **350** 457 (1999)

26. Usov V V *Nature* (London) **357** 344 (1992)
27. Usov V V, astro-ph/9909435
28. Ahn S-H *Astrophys. J.* **530** L9 (1999)
29. Kroupa P, astro-ph/0001202
30. Chevalier R A, Li Z-Y *Astrophys. J.* **520** L29 (1999)
31. Rodriguez L F, Mirabel I F, astro-ph/9811250
32. Dubner G M et al. *Astron. J.* **116** 1842 (1998)
33. Fargion D *Astron. Astrophys. Suppl.* **138** 507 (1999)
34. Efremov Yu N, Fargion D, astro-ph/9912562

PACS numbers: 72.80.Rj, 74.70.Wz

Незатухающие токи и захват магнитного потока в многосвязной углеродной нанотрубной структуре

В.И. Цебро, О.Е. Омеляновский

1. Углерод, этот удивительный элемент, являющийся основой множества природных и синтетических материалов, в последние годы уходящего столетия необычайно удивил еще раз, представ перед миром после таких своих хорошо известных твердотельных кристаллографических форм, как алмаз и графит, в форме фуллеренов и нанотрубок. Не прошло еще и десяти лет с момента первой публикации [1] об обнаружении в катодном депозите при электродуговом синтезе фуллеренов многослойных углеродных нанотрубок. Понятно, что их свойства являются предметом повышенного интереса и интенсивных исследований (см., например, обзоры [2–6]). Среди работ последнего времени, посвященных электронным свойствам углеродных нанотрубок, выделим экспериментальные и теоретические работы по когерентному электронному транспорту в однослойных нанотрубках [7–11] и теоретические работы [12–14], рассматривающие связанный с этим вопрос о циркуляционных незатухающих токах в замкнутых тороидальных нанотрубках. В частности, данные, полученные методом транспортной спектроскопии [7, 8], говорят о том, что в однослойных нанотрубках при низких температурах имеет место когерентный электронный транспорт, причем на очень больших расстояниях — по оценкам [7], вплоть до полной длины нанотрубки в несколько микрон.

Предмет нашего сообщения — экспериментальное обнаружение [15] такого явления, как захват магнитного потока в многосвязной структуре из многослойных углеродных нанотрубок, которая образуется в катодных депозитах в электродуговом процессе их синтеза. Этот захват потока происходит точно так же, как если бы мы имели дело с многосвязным нитевидным сверхпроводником, подобным так называемой "губке Мендельсона" [16] — многосвязной системе тонких нитей сверхпроводника в нормальной матрице. Таким образом, этим как бы делается заявка на сверхпроводимость такой структуры, причем при очень высоких температурах (как будет видно из дальнейшего, существенно выше комнатной). Однако сверхпроводимость в обычном понимании этого явления (образование бозе-конденсата куперовских пар ниже точки перехода) — не единственное объяснение обнаруженного эффекта. Возможно, следует говорить о первом экспериментальном наблюдении так называемых persistent currents — незатухающих токов, циркули-

рующих по замкнутым мезоскопическим путям такой многосвязной структуры. Вопрос о незатухающих токах, построении основного состояния, допускающего их существование в мезоскопических замкнутых объектах [17] и приводящего также к захвату магнитного потока, теоретически рассматривался в последнее время в работах [18–20] (см. также [12–14]). Так или иначе, в нашем случае речь идет не о каком-то слабом (на грани обнаружения) или спорном (в смысле интерпретации) явлении, а о вполне заметном макроскопическом эффекте, как если бы мы действительно имели дело с обычным нитевидным сверхпроводником, или, скажем, сверхпроводником второго рода с предельно малым первым критическим полем.

2. Коротко о том, что привело нас к обнаруженному эффекту. Известно (см., например, [21]), что аномально высокое значение диамагнитной восприимчивости графита при ориентации магнитного поля перпендикулярно графитовым плоскостям связывают с очень большой величиной эффективного радиуса циркуляции ρ кольцевых индукционных токов в формуле Лармора–Ланжевена $\chi = -(Ne^2/4mc^2)\rho^2$, где c — скорость света, m и e — масса и заряд электрона, N — число Авогадро (для молярной восприимчивости). Для π -электронов графита этот радиус равен 7,8 Å, т.е. площадь петли циркуляции охватывает примерно 36 элементарных ячеек графита. Это приводит к величине $\chi \sim 10^{-4}$ СГСМ моль $^{-1}$, что в 25 раз больше диамагнитной восприимчивости ароматических π -электронов бензола и примерно на 2 порядка больше χ ароматических σ -электронов бензола или, скажем, диамагнитной восприимчивости алмаза.

С появлением углеродных нанотрубок естественно встал вопрос о том, возможен ли гигантский диамагнетизм в упорядоченной системе нанотрубок при ориентации магнитного поля вдоль их осей, если циркуляция кольцевых токов в ответ на приложенное магнитное поле будет осуществляться по стенкам нанотрубок вокруг их осей. В этом случае при среднем радиусе нанотрубок ~ 80 Å связанная с этими кольцевыми токами диамагнитная восприимчивость такой системы должна быть в 100 раз больше, чем χ графита. Обнаруженная в [22] сильная анизотропия диамагнитной восприимчивости некоторой искусственно упорядоченной тонкослойной системы углеродных нанотрубок, казалось бы, говорит в пользу такого предположения, которое, конечно, носит очень простой качественный характер. Однако возможный гигантский диамагнетизм углеродных нанотрубок при ориентации магнитного поля вдоль их осей становится предметом и более строгих теоретических рассмотрений. Здесь прежде всего следует отметить работу Овчинникова [23], в которой были проведены вычисления диамагнитной восприимчивости углеродных нанотрубок в рамках простой модели с использованием гамильтониана Хюкеля (Hückel model), и показано, что при ориентации нанотрубок вдоль направления магнитного поля их диамагнитная восприимчивость может достигать значения $\sim 10^{-2}$ СГСМ моль $^{-1}$, что на два порядка больше, чем в графите при ориентации магнитного поля перпендикулярно графитовым плоскостям.

В попытке экспериментальной проверки выводов работы [23] нами и были предприняты исследования магнитных свойств образцов катодных депозитов. Дело в том, что искусственно создать образцы, содержащие достаточное количество в высокой степени упорядочен-