

УДК: 524.726

ВЕРЕНИЦЫ ВОРОНЦОВА-ВЕЛЬЯМИНОВА В ГИГАНТСКИХ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИКАХ: ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

А.Д. ЧЕРНИН

Поступила 10 июня 1998

Принята к печати 20 июля 1998

Изучается открытый Воронцовым-Вельяминовым феномен верениц - прямолинейных сегментов в спиральной структуре гигантских галактик. На примере галактик М 101 и особенно М 51 демонстрируются основные геометрические и физические характеристики этих структур. Показано, что вереницы очерчивают регулярные спиральные рукава на почти полной их протяженности в М 101, М 51 и ряде других галактик. Прослеживается связь верениц с прямолинейными темными пылевыми полосами на внутренних кромках спиральных ветвей. В предположении, что эти полосы представляют собой слои газа, сжатые спиральной ударной волной, обсуждается возможность формирования верениц в уплощающихся локальных участках фронта спиральной ударной волны. Количественные следствия этой газодинамической картины находят подтверждение в новых наблюдательных фактах о вереницах.

1. *Введение.* Воронцов-Вельяминов [1] первым обратил внимание на протяженные структурные элементы спиральных галактик, названные им вереницами. Это "спрямленные, изолированные участки спиральных ветвей... или изолированные прямолинейные образования". Важно, что они "встречаются довольно часто"; примеры приведены в параграфе 8 "Признаки магнитоподобных явлений", гл. III книги Воронцова-Вельяминова [1]: М 101, NGC 2805, NGC 3134, NGC 309, NGC 3310.

Стоит сразу же заметить, что речь идет не о мелких или слабых деталях, которые нужно еще специально отыскивать, а о бросающихся в глаза крупных и ярких формах. Длины верениц могут достигать 10-15 кпк. Они обычно заметно ярче (и голубее) других участков спиральных ветвей в той же галактике.

Арп [2] отметил (позднее) прямолинейность цепочек, образуемых областями Н II в М 81, и счел это фактом, достойным удивления. Прямолинейная геометрия длинных, до 10-15 кпк, сегментов спирального узора действительно удивительна, если учесть, что крупномасштабная структура гравитационного потенциального рельефа, связанного со спиральными волнами плотности (гранд-дизайн), не содержит прямоли-

нейных участков. К этому нужно добавить, что на масштабах порядка 10 кпк вращение галактических дисков отнюдь не является твердотельным. О проблеме прямолинейных цепочек, образуемых звездными комплексами, упоминается также в книге Ефремова [3] (где содержится, насколько известно, единственная до последнего времени ссылка на феномен верениц Воронцова-Вельяминова).

Ниже на ряде новых примеров рассматриваются основные физические характеристики верениц Воронцова-Вельяминова и обсуждается их возможная физическая природа. Предполагается, что прямолинейные сегменты спиральных рукавов обязаны своим происхождением газодинамическим процессам в ударных волнах, возникающих в межзвездном газе при его протекании сквозь потенциальную яму волнового спирального узора. Скорее всего, магнитогидродинамические эффекты, которые, возможно, имелись в виду у Воронцова-Вельяминова, когда он говорил о "магнитоподобных явлениях", тоже могли бы быть существенными в рассматриваемой картине; но, как кажется, стоит ограничиться пока рассмотрением ударных волн без магнитного поля.

2. *Вереницы в галактике М 101.* Архетипом спиралей с вереницами служит у Воронцова-Вельяминова [1] близкая (расстояние ≈ 5 Мпк) гигантская галактика М 101, видимая почти плашмя. В ее внешней области имеются две вереницы размерами примерно по 10 кпк каждая, отчетливо различимые как в голубых лучах, так и по распределению поверхностной плотности H I. Недавно эта галактика наблюдалась в ультрафиолетовых лучах с помощью 38-см инструмента UIT (Ultraviolet Imaging Telescope), установленного на космическом челноке "Endeavour". На полученном снимке [4] диск М 101 выглядит как распределение ярких дискретных областей звездообразования. Последние представляют собой звездные комплексы - обширные агрегаты ярких звезд и газовых облаков с массой до миллиона масс Солнца и размером около 1 кпк, описанные и изученные Ефремовым на материале наблюдений нашей Галактики, М 31, других гигантских спиралей.

В общем распределении звездных комплексов, рассеянных по диску М 101, вырисовывается сложная крупномасштабная спиральная структура, в которой можно различить две основные квазирегулярные ветви. В западной ветви располагаются две мощные вереницы, о которых говорится у Воронцова-Вельяминова [1]. Валлер и др. [4] находят в этом распределении еще 10 прямолинейных цепочек с длинами в интервале от 5 до 20 кпк.

Более строгий анализ, учитывающий дополнительно данные о распределении H I [6], а также данные по излучению в линии H_α и радиоизлучению CO (см. [7] и указанную там литературу), приводит к несколько

иной картинс: надежно могут быть выявлены 8 верениц. Все они располагаются в регулярных спиральных рукавах и ни одной нет во флоккулентных, хаотических рукавах (рис.1).

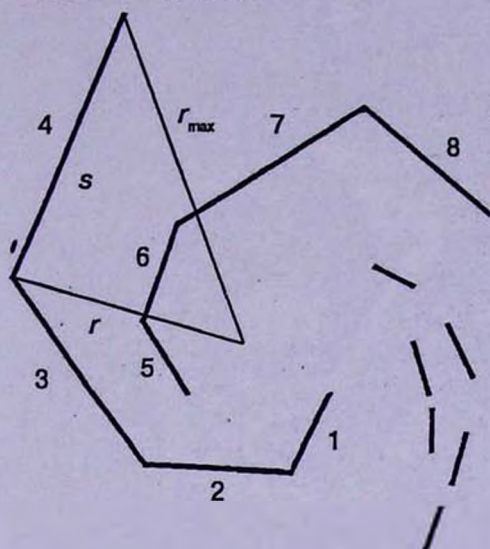


Рис.1. Схема верениц и спиральных рукавов в М 101.

Из сегментов-верениц, показанных на рис.1, сегменты с номерами 1, 2, 3, 4, 6, 8 совпадают соответственно с сегментами 4, 6, 10+12, 11, 8, 1 работы [4]. Сегменты 5, 7 нашего рисунка в [4] отсутствуют; пять сегментов из двенадцати, указанные в работе [4], не подтверждаются нашим анализом. В работе [4], в отличие от рис.1, не была выделена структура регулярных рукавов, составленных из верениц.

Вереницы очерчивают в М 101 регулярные рукава на протяжении почти всей их длины; только в самой внутренней части диска, области с радиусом 3-5 кпк, наблюдательные данные недостаточны для выяснения геометрии рукавов. Длины верениц, измеренные в единицах максимального расстояния от центра, составляют, в порядке их номеров, 0.30; 0.30; 0.65; 0.85; 0.30; 0.50; 0.40. Угол между соседними, примыкающими друг к другу вереницами практически всегда близок к 120° ; последнее замечено и в [4].

3. *Вереницы и пылевые полосы в М51.* Обратимся теперь к другой близкой галактике, видимой тоже почти плашмя, - это замечательная спираль М 51 в созвездии Гончих Псов, служащая уже более 150 лет (со времен Росса, открывшего в ней спиральную структуру в 1845г.) объектом детального изучения. Геометрия ее спирального узора очерчивается яркими вереницами звездных комплексов и - еще более четко - резкими и узкими темными полосами на внутренней кромке рукавов (рис.2а).

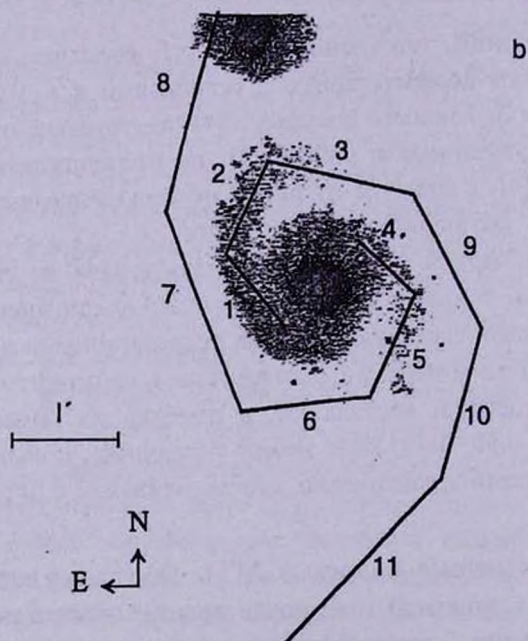
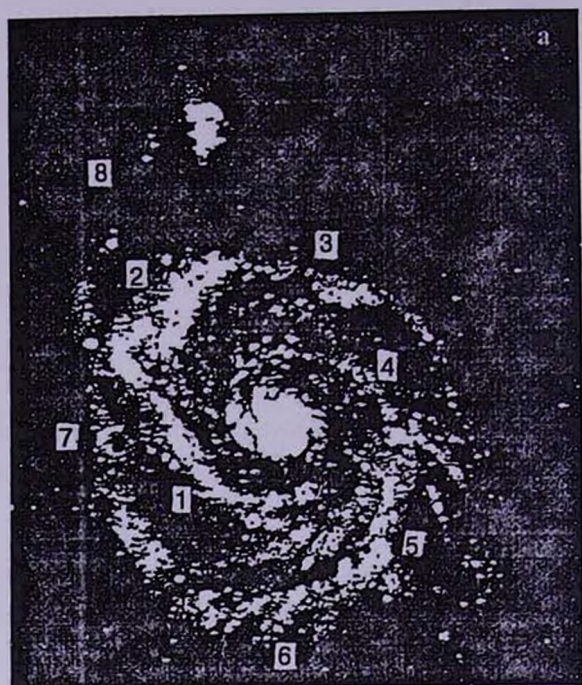


Рис.2. а) М 51 на фотографии Цвикси [8]. б) Схема темных пылевых полос на внутренних кромках регулярных спиральных рукавов М 51; наложена на изображение М 51 в К-полосе спектра [24].

Полосы очень хорошо прослеживаются на протяжении практически всей длины обоих главных регулярных рукавов - см. также фотографии М 51 в голубых, желтых и красных лучах в книге Воронцова-Вельяминова [1]. Важным дополнительным материалом для изучения геометрии, а также и поперечного строения рукавов служат карты ионизованного, атомного и молекулярного газа в М 51 [9-14]. В своей совокупности упомянутые данные позволяют различить 11 основных верениц в двух главных спиральных рукавах М 51, из которых по крайней мере 8 или 9 практически безупречно прямолинейны. Схема верениц в М 51 показана на рис.2b. (Как ни удивительно, Воронцов-Вельяминов не заметил очень ярких верениц в этой галактике, приведя вместе с тем в своей книге, помимо М101, несколько других примеров верениц в более далеких и гораздо хуже, чем М 51, изученных галактиках).

На рис.3 воспроизводится карта интенсивности излучения молекулы СО, а на рис.4а - синхротронного излучения в диске М 51; линия

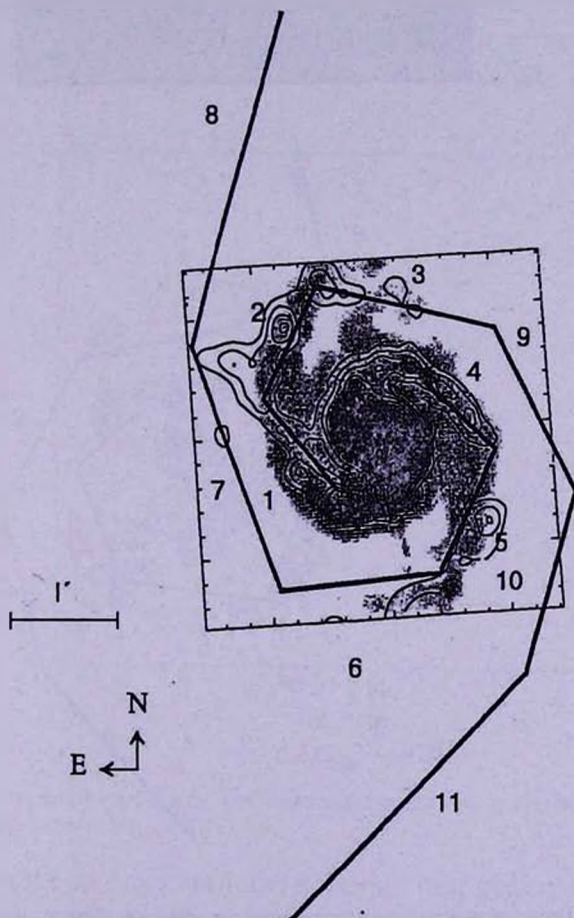


Рис.3. То же; наложено на карту М 51 в излучении молекулы СО [9].

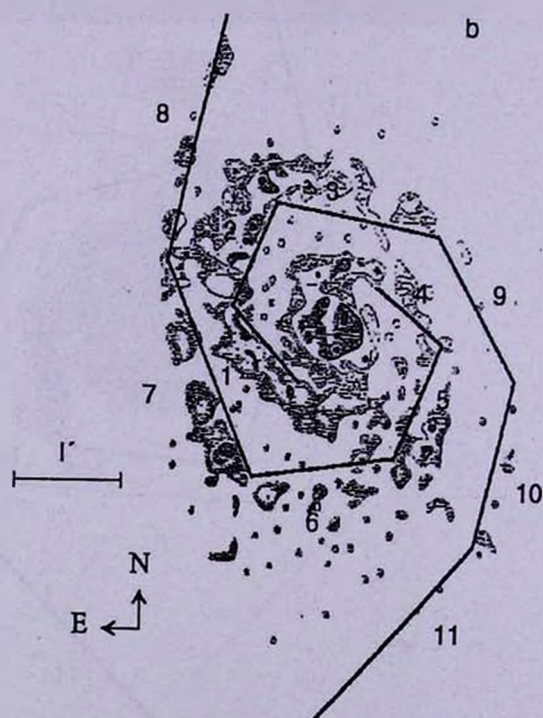
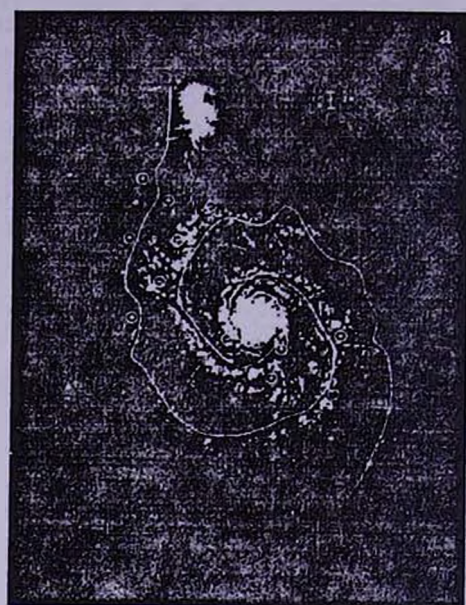


Рис.4. а) Линия максимумов синхротронного излучения М 51 [15]. б) Темные полосы и карта М 51 в излучении H_α [35].

максимумов излучения хорошо совпадает в обоих случаях с темными полосами в рукавах. Рис.4b показывает положение темных полос на карте М 51 в излучении H_α .

В каждом из рукавов вереницы почти везде примыкают друг к другу, так что в результате геометрия рукава представляется - с некоторой небольшой долей упрощения и схематизации - ломаной линией на протяжении практически всей его длины (кроме самой внутренней области диска, где строение рукава прослеживается не очень уверенно).

Длины верениц, измеренные в единицах наибольшего расстояния от центра, составляют, в порядке номеров: 0.35; 0.30; 0.60; 0.80; 0.85; 0.45; 0.50; 0.60; 0.80; 0.85. Как и в М 101, угол между соседними вереницами близок к 120° .

Сравнивая геометрию основных рукавов в М 51 и М 101, можно сказать, что во всех четырех случаях они очерчиваются очень схожими ломаными линиями. Кроме близости углов излома этих линий, обращает на себя внимание и другое свойство рукавов: длины сегментов-верениц возрастают с удалением от центра по закону, близкому к линейному (рис.5).

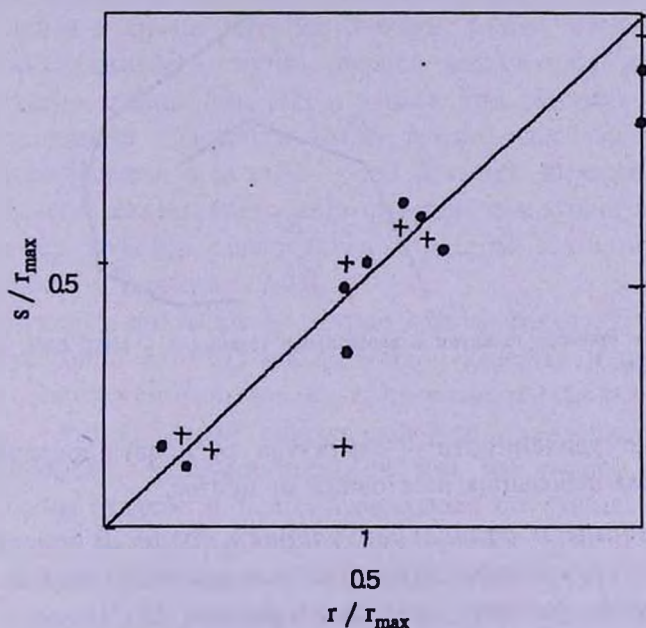


Рис.5. Зависимость длины вереницы s от расстояния до центра r , кресты - М 101, точки - М 51 (s , r , $r_{\max}$ определены на рис.1).

Замечательно и еще одно свойство верениц: они представляют собою чаще всего самые яркие и самые голубые отрезки спиральных рукавов. В каждой из них обычно сосредоточено от 5 до 15-20 звездных комплексов, в которых протекает эффективное звездообразование. Если в

галактике имеются сверхассоциации, то последние находятся, как правило, именно в вереницах. Так, в одной из западных верениц галактики М 101 находится сверхассоциация, известная под номером NGC 5462; другой ярчайший объект той же вереницы, NGC 5461, тоже, вероятно, может считаться сверхассоциацией. Сверхассоциации рассматриваются как звездные комплексы с экстремально высокой скоростью и эффективностью преобразования газа в звезды [16,17]. Самые яркие области звездообразования в М 51 располагаются в вереницах 1, 2, 3, 5.

Судя по ряду известных примеров [18], эти свойства верениц являются распространенными, а, может быть, и универсальными. На рис.6 показаны 3 примера более далеких галактик с вереницами, в которых -

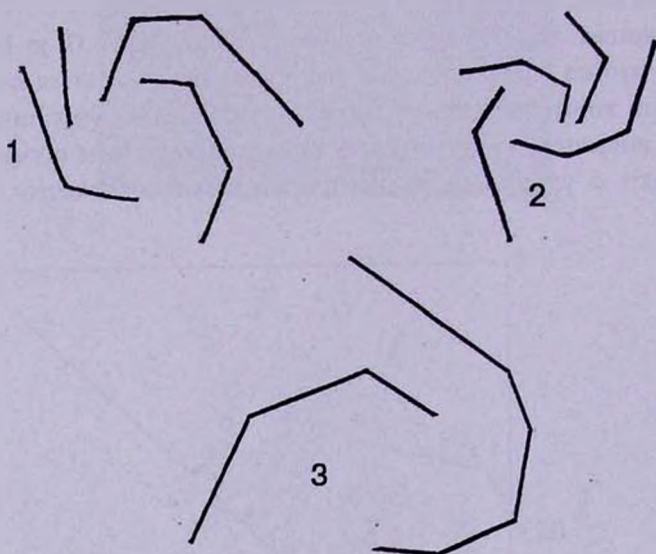


Рис.6. Три примера галактик с вереницами (схема); 1 - NGC 6946, 2 - NGC 5457, 3 - NGC 2997.

по причине удаленности - структура рукавов прослеживается до сравнительно небольших расстояний от центра.

4. Вереницы и спиральная ударная волна. В поисках ответа на вопрос о физической природе верениц будем следовать газодинамическому подходу, начало которому положено в работах [19-21]; см. также книги [22,23], где имется обзор дальнейших исследований в этой области. В духе этого подхода спиральные рукава рассматриваются как волновые образования двоякого рода: во-первых, это области максимума плотности в крупномасштабных спиральных волнах плотности, распространяющихся по распределению звезд диска; во-вторых, это ударные волны в межзвездном газе, возникающие при его протекании сквозь

гравитационный потенциальный рельеф, обязанный этим волнам. Максимумы плотности в распределении звезд диска создают минимумы гравитационного потенциала, и именно в этих минимумах происходит торможение сверхзвукового потока газа и формирование ударных волн. Уплотнение газа за фронтами ударных волн создает условия для конденсации газа в звезды, и таким путем в спиральных рукавах возникают очаги звездообразования, самые крупные из которых являются звездными комплексами Ефремова. Молодые и яркие звезды, родившиеся в этом процессе, очерчивают рукава и создают в диске наблюдаемый крупномасштабный и регулярный спиральный узор (который часто называют гранд-дизайном).

В этой общей картине далеко не все элементы разработаны к настоящему времени одинаково надежно и детально. Для нашего обсуждения важнее всего то обстоятельство, что существование крупномасштабных спиральных ударных волн, предсказанных в упомянутых выше пионерских работах, нашло прямое наблюдательное подтверждение. В дисках, видимых плашмя (как М 101 или М 51), фронты ударных волн наблюдаются в виде тонких темных полос, располагающихся вдоль рукава с его (обычно) внутренней стороны (в книге [1] приведено немало примеров, когда в дисках ищутся "тонкие, резкие темные волокна"). Так и должны выглядеть сжатые ударной волной слои плотного газа сразу за фронтом волны (см. [22] и данные там ссылки).

Далее за темной полосой в толщу рукава идет чаще всего слой молекулярных облаков, а за ним - слой областей звездообразования и зон Н II. Таково обычно внутреннее строение спиральных рукавов [3]. Все это тоже хорошо согласуется в целом с общими идеями газодинамического подхода [19-21].

Обратим теперь внимание на другую группу фактов. В ряде случаев (особенно уверенно в М 51) наблюдения в красных и инфракрасных лучах обнаруживают спиральную структуру в распределении старых звезд диска (рис.3). Этот "красный" спиральный узор отличается от "голубого" узора, образуемого молодыми звездами, тем, что рукава в нем более широкие, более гладкие и более правильные по форме - см. [24] и упомянутые там работы. Красный узор очерчивает в действительности упомянутый выше гравитационный потенциальный рельеф диска с ямами вдоль его рукавов, создаваемыми спиральной волной плотности в основном в звездном населении II.

Для нашего рассмотрения особенно существенно, что в красных рукавах отсутствуют какие-либо прямолинейные сегменты. Отсюда, по-видимому, вытекает, что вереницы имеют негравитационное происхождение, так как их геометрия не повторяет геометрию потен-

циальных ям. Показанная на рис. 2-4 схема верениц в рукавах М 51 опирается на картину темных волокон в этой галактике. Поперечный профиль верениц, судя по всему, не отличается от стандартного: на их внутренней, обращенной к натекающему потоку газа, кроме имеется практически всегда четкая темная и - в данном случае - прямолинейная полоса. Голубые вереницы уже красных рукавов (т.е. потенциальных ям) и целиком помещаются в них; они следуют геометрии потенциального рельефа в целом, но не повторяют его буквально в локальных участках рукава.

В духе всего сказанного нетрудно заключить, что прямолинейная темная полоса в вереницах тоже представляет собой видимый с ребра плотный слой газа за плоским фронтом ударной волны. Так как ударный фронт - самый молодой структурный элемент в рукаве и, в частности, в веренице, то естественно предположить, что прямолинейная геометрия вереницы задается и определяется местной геометрией ударного фронта. Иными словами, вереницы потому прямолинейны, что они формируются за плоскими участками ударного фронта.

Если так, то ключевой вопрос физики верениц таков: почему в глобальной спиральной ударной волне формируются плоские локальные участки? Поиск ответа на этот вопрос возможен, как кажется, на основе общих представлений об устойчивости плоской ударной волны в газе с "обычными" термодинамическими свойствами (см. пионерские работы [25,26] и книги [27-30]). Примем во внимание, что вскоре после возникновения ударной волны в гравитационной потенциальной яме, а фактически уже в ходе этого процесса, структура и эволюция фронта волны определяется как гравитацией, так и нелинейными газодинамическими эффектами, которые даже сильнее последней на самом фронте. Поэтому в данном случае можно - по крайней мере при качественном локальном рассмотрении - пренебречь гравитацией (см. работу [31]) и судить о поведении ударного фронта на основании стандартных газодинамических соображений.

Так, хорошо известно, что "обычный" плоский ударный фронт обладает высокой степенью устойчивости относительно слабых возмущений, искажающих его поверхность [25-30]. Если, например, на этой поверхности возникла слабая рябь, или "гофрировка", то немедленно включается механизм уплощения поверхности фронта, который приводит к замедлению выступивших вперед участков фронта и ускорению отставших. В результате поверхность фронта стремится быстро сгладиться и распрямиться.

Этот механизм уплощения фронта должен, очевидно, действовать и в случае глобальной спиральной ударной волны (как было замечено

ранее [32,33]). Под возмущением поверхности фронта в этом случае нужно понимать отклонение этой поверхности от плоскости, причем такое отклонение должно быть малым. Некоторый участок поверхности фронта можно считать слабо искаженным, если "стрелка прогиба" этой поверхности δ мала по сравнению с некоторой линейной характеристикой геометрии фронта. В качестве последней должны фигурировать длина отрезка хорды s и/или локальный радиус кривизны фронта R (в средней точке данного участка фронта): $\delta \ll s, R$. Уместно положить в данном случае, что $s \approx R$. Тогда эти два соотношения дают критерий локального уплощения фронта спиральной ударной волны.

Соображения об устойчивости плоской ударной волны не означают, что ударный фронт сначала возникает как спиральный, а затем уплощается в отдельных участках рукава. Скорее оба процесса протекают одновременно за время приблизительно одного оборота галактики. Это происходит на ранней стадии формирования диска галактики, когда спиральная структура приобретает законченные очертания и выходит на квазистационарный режим, который длится потом миллиарды лет.

5. Обсуждение. Рассмотрим, что вытекает из полученного выше критерия уплощения для, например, спирального фронта, который с ребра имеет форму логарифмической спирали (по замечанию Воронцова-Вельяминова [1], "как многие спирали в природе, спиральные ветви галактик являются логарифмическими спиралями"). Из уравнения спирали, $r = r_0 \exp(k\phi)$, (где r_0, k - константы, r, ϕ - полярные координаты) вытекает, что радиус кривизны R возрастает линейно с расстоянием: $R \propto r$. Вместе с критерием уплощения это соотношение ведет к выводу, что длины распрямляющихся участков фронта растут линейно с расстоянием от центра, и именно так должны тогда зависеть от радиального расстояния длины верениц в наблюдаемых спиралях. Как мы видели (раздел 3), эта закономерность замечена в М 101, М 51 (да и в других случаях).

Можно также видеть, что при выполнении условия $s \approx R$ угол между соседними вереницами $\alpha \approx 120^\circ$. Тем самым находит объяснение и второе из геометрических свойств верениц, указанных в разделе 3.

Третье свойство верениц - повышенная яркость - требует, как кажется, более сложного объяснения, не сводящегося целиком к геометрическим соображениям, но, несомненно, зависящее от них. Можно лишь предположить, что в плоской геометрии вереницы легче реализуется возможность взаимностимулированного звездообразования [33, 34, 17], которое, вероятно, ответственно за повышение эффективности и скорости преобразования газа в звезды, наблюдаемое в сверхассоциациях.

Наконец, необходимо понять, почему вереницы наблюдаются во

многих, но все же далеко не всех галактиках. Например, почти идеальную спиральную структуру имеют рукава в галактике NGC 4622. Скорее всего, возможность уплощения ударного фронта на достаточно большом протяжении спирального рукава связана с профилем гравитационной потенциальной ямы рукава. Мы видели (раздел 3), что в М 51 потенциальные ямы весьма широкие и не туго закрученные. Напротив, в NGC 4622 видимые в оптике рукава являются более узкими и гораздо более туго закрученными. Весьма вероятно, в этом случае потенциальные ямы тоже весьма узкие и резкие. При таких условиях ударная волна, фронт которой должен - по условию существования - располагаться в пределах потенциальной ямы, оказывается запертой в узкой спиральной яме.

Перечислим в заключение основные результаты работы.

1. Найдены прямолинейные сегменты - вереницы Воронцова-Вельяминова - в спиральных рукавах галактики М 51 и ряда других галактик.

2. На примере галактик М 51 и М 101 показано, что вереницы способны очерчивать регулярные (гранд-дизайн) спиральные рукава почти на полной их протяженности.

3. Геометрия таких рукавов весьма схожа: это ломаные линии с одинаковым углом излома ($\approx 120^\circ$), в которых длина сегментов возрастает линейно с удалением от центра.

4. Предложена физическая интерпретация феномена верениц, основанная на представлениях о спиральной ударной волне в регулярных рукавах, и на этой основе дано объяснение основных количественных характеристик верениц и очерчиваемых ими спиральных рукавов.

Некоторые из затронутых в работе вопросов требуют дальнейшего более детального наблюдательного и теоретического изучения. Это касается доли галактик, содержащих вереницы в своих спиральных рукавах, корреляции феномена верениц с общими характеристиками галактик и их спиралей (массы диска и балджа, угол закрутки спиральных ветвей и т.п.), повышенной яркости верениц и происхождения сверхассоциаций в них. Эти вопросы предполагается рассмотреть в последующих работах.

Некоторые из результатов данной работы были представлены в нашем докладе на конференции "Актуальные проблемы внегалактической астрономии" (Пушино, 13-16 мая 1997г.). Благодарю В.Г.Горбачкова, В.М.Конторовича и других участников конференции за ценные замечания по этому докладу. За многочисленные обсуждения проблемы верениц я благодарен также В.П.Архиповой, Ю.Н.Ефремову и А.В.Засову. Работа выполнена при частичной поддержке Программы "Университеты России".

VORONTSOV - VEL' YAMINOV' S ROWS IN GIANT GALAXIES: GEOMETRY AND PHYSICS

A.D.CHERNIN

The phenomenon of rows which are straight segments of spiral arms discovered by Vorontsov-Vel'yaminov are studied. The galaxies M 101 and especially M 51 are used to demonstrate geometrical and physical characteristics of the rows. I demonstrate that the rows constitute the spiral arms of these galaxies almost completely along their length. A relation between rows and straight dark dust lanes on the inner edges of the spiral arms is followed. Assuming that the dark lanes are gas layers compressed by the spiral shock, a mechanism of the formation of the rows is discussed via local flattening segments of the spiral shocks. Qualitative consequences of this gasdynamical picture seem to be confirmed by the new observational facts concerning rows.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.А.Воронцов-Вельяминов, Внегалактическая астрономия, Наука, М., 1978.
2. H.C.Arps, IEEE Trans. Plasma Sci., PS-14, 748, 1986.
3. Ю.Н.Ефремов, Очаги звездообразования в галактиках. Наука, М., 1989.
4. W.H.Waller, R.C.Bohlin, R.H.Cornett et al., Astrophys. J., 481, 169, 1997.
5. Yu.N.Efremov, Astron. J., 110, 2757, 1995.
6. J.Kamphuis, R.Sancisi, in "Panchromatic View of Galaxies", eds. G.Gensler, Ch. Theis, J. Gallagher; Kiel, 1993, p. 317.
7. J.H.Knapen, J.E.Beckman, J.Сера, N.Nakai, Astron. Astrophys., 308, 27, 1996.
8. F.Zwicky, in "Handbuch der Physik", vol. 53, Berlin, Springer, 1959.
9. S.Garcia-Burillo, M.Gu  lin, J.Cernicharo, Astron. Astrophys., 274, 123, 1993.
10. H.Visser, Astron. Astrophys., 88, 159, 1980.
11. G.Rydbeck, A.Hjalmarsen, O.E.H.Rydbeck, Astron. Astrophys., 144, 282, 1985.
12. H.Petit, C.T.Hua, D.Bersier, G.Cout  s, Astron. Astrophys., 309, 446, 1996.
13. H.Hippelein, D.Lemke, M.Haas, et al, Astron. Astrophys., 315, L82, 1996.
14. J.E.Beckman, R.F.Peletier, J.H.Knapen, et al, Astrophys. J., 467, 175, 1996.

15. *D.S.Mathewson, P.C. van der Kruit, W.N.Broun*, *Astron. Astrophys.*, 17, 468, 1972.
16. *Yu.N.Efremov, A.D.Chernin*, *Vistas Astron.*, 38, 165, 1994.
17. *А.Д.Чернин*, *Письма в Астрон. ж.*, 23, 1, 1997.
18. *В.П.Архипова, А.В.Засов, А.Д.Чернин* (готовится к печати).
19. *C.C.Lin, F.Shu*, *Astrophys. J.*, 140, 646, 1964.
20. *W.W.Roberts*, *Astrophys. J.*, 158, 123, 1969.
21. *С.Б.Пикельнер*, *Астрон. ж.*, 47, 254, 1970.
22. *Л.С.Марочник, А.А.Сучков*, *Галактика*, Наука, М., 1984.
23. *G.Bertin, C.C.Lin*, *Spiral Structure in Galaxies*, The MIT Press, 1996.
24. *R.A.González, J.R.Graham*, *Astrophys. J.*, 460, 651, 1996.
25. *С.П.Дьяков*, *Ж. эксперим. и теор. физ.*, 27, 288, 1954.
26. *В.М.Конторович*, *Ж. эксперим. и теор. физ.*, 33, 1527, 1957.
27. *Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц*, *Гидродинамика*, Наука, М., 1986.
28. *Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер*, *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*, Наука, М., 1966.
29. *В.Г.Горбачукский*, *Космическая газодинамика*, Наука, М., 1977.
30. *G.B.Whitham*, *Linear and Nonlinear Waves*, New York: John Wiley and Sons, 1974.
31. *V.V.Dwarkadas, S.A.Balbus*, *Astrophys. J.*, 467, 87, 1996.
32. *А.Д.Чернин*, *Астрофизика*, 39, 627, 1996.
33. *В.Г.Сурдин*, *Письма в Астрон. ж.*, 20, 378, 1994.
34. *B.G.Elmegreen*, *Astrophys. J.*, 231, 372, 1979.
35. *R.B.Tully*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 27, 437, 1974.