**Берман В.Г.. Крупномасштабная динамика межзвездного газа в спиральных галактиках : ил РГБ ОД 61:85-1/923**

**РОСТОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им.М.А.СУСЛОВА**

**На правах рукописи**

**В.Г. БЕРМАН**

**УДК 524.3**

**КРУПНОМАСШТАБНАЯ ДИНАМИКА МЕЖЗВЕЗДНОГО ГАЗА В СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИКАХ**

**01.03.02 - астрофизика**

**Диссертация**

**на соискание ученой степени кандидата**

**физико-математических наук**

**Научный руководитель:**

**доктор физико-математических**

**наук,профессор А.А.СУЧКОВ**



***^(рЛ<***

**Ростов-на-Дону, 1984 г.**

**ВВЕДЕНИЕ**

**Настоящая диссертация посвящена исследованию крупномасштаб­ного течения межзвездного газа в спиральных галактиках. Важность этой проблемы для физики спиральных галактик заключается в сле­дующем. С одной стороны, для интерпретации многочисленных наблю­дательных данных, например, радиоастрономических, необходимо зна­ние крупномасштабной кинематики и структуры газа. С другой, дан­ная задача имеет большое значение для понимания различных аспек­тов самой спиральной структуры галактик. В спиральных рукавах концентрируются наиболее молодые и активные объекты. Здесь имеют место такие фундаментальные процессы, как рождение ярких звезд, вспышки сверхновых и т.д. Взаимодействие газа со спиральными ру­кавами должно, несомненно, влиять и на физику межзвездной среды. Всем этим и обусловливается большой интерес, который представля­ет для астрофизических приложений данная проблема.**

**Исследования, выполненные в предлагаемой работе,проводились в рамках волновой теории спиральной структуры [ I], в основе ко­торой лежит идея о том, что спиральные рукава в галактиках явля­ются твердотельно вращающимися волнами плотности. Отметим, что существуют и другие, альтернативные теории, например, такие, как магнитная [2-4]> взрыва [б], аккреционная [6,7], солитонная [8-Ю] и некоторые другие. В силу того, что в диссертации не ста­вится цель изучения вопросов, связанных с происхождением и под­держанием спирального узора, мы не будем давать сравнительный анализ существующих теорий спиральной структуры. Ограничимся лишь замечанием, что,на наш взгляд, крупномасштабная картина спираль-**

**- з -**

**ных рукавов в настоящее время наиболее адекватно описывается в теории волн плотности.**

**Итак, согласно гипотезе, выдвинутой Линдбладом [іі] и раз­витой Лином и др. [і], спиральная структура галактик связана со спиральной волной плотности (СВП), распространяющейся по звездно­му диску. Эта волна плотности своим гравитационным полем возмуща­ет движение газа, отклоняя его от кругового. Впервые задача о движении межзвездного газа в гравитационном поле СВП рассматрива­лась в 1966 г. Фуджимото [l2]. Однако значительный прогресс в этой области наметился после опубликования в 1969 г. статьи Ро-бертса [l3J. Им было показано, что при течении межзвездного га­за в спиральных рукавах в газе могут формироваться мощные удар­ные волны. Масштаб этих ударных волн сравним с радиусом галакти­ческого диска. Поэтому они впоследствии были названы галакти­ческими ударными волнами (ГУВ). Для амплитуды гравитационной си­лы СВП и скорости вращения спирального узора, характерных для на­шей Галактики, интенсивность ГУВ по плотности может достигать значения гч-/ 10 [I3-I5J.**

**Развитие представлений о ГУВ сыграло важную роль в понима­нии процессов, происходящих в галактиках. В [l3j была высказана идея о том, что ГУВ служит "триггерным" механизмом звездообразо­вания. Под этим понимается следующее: достаточно массивное обла­ко, попадая во фронт ГУВ, испытывает резкое поджатие, вследствие чего оно может начать коллапсировать, приводя к рождению звезд. Следовательно, ГУВ должна влиять на глобальные свойства галакти­ческого диска.**

**Хорошо известно, и на это обращалось внимание в целом ряде работ, что спиральные рукава в других галактиках наиболее отчет­ливо прослеживаются по областям ионизованного водорода.Возраст**

**- 4 -**

**наиболее ярких из них ^10 лет |\_16\_], т»е. примерно на два по­рядка меньше галактического года. По галактическим меркам это очень молодые образования. Следовательно, возникает вопрос: какой механизм управляет рождением звезд в масштабах галактического диска, "поджигая" звездообразование практически одновременно на всем радиусе галактики, причем именно вдоль спиральных рукавов?**

**В последнее время (начиная с 1978 г.) в работах [17-20J по­лучила развитие теория так называемого стохастического саморас­пространяющегося звездообразования, в которой в качестве такого механизма предлагается цепная реакция звездообразования. Под этим термином понимается следующее: ударные волны от вновь рож­даемых массивных звезд вызывают рождение других массивных звезд и т.д. Однако, в численных расчетах, проведенных авторами этой теории, не удается получить правильной, двухрукавной крупномас­штабной структуры (и этот факт признается ими в [і?]), а наблю­даются многорукавные, клочковатые конфигурации. Кроме того, как указывается в работе |211, в теории стохастического звездообра­зования, базирующейся в основном на численном моделировании, ос­таются невыясненными многие вопросы, связанные с образованием спиральной структуры и зависимостью последней от физических пара­метров. В Г2іП показано, что в такой модели спирали будут распро­страняться как в направлении вращения галактического диска, так и против него, что приводит к их взаимодействию и разрушению. На наш взгляд, в спиральных галактиках действие механизма стохас­тического звездообразования может служить объяснением лишь не­правильных, локальных структур, сопутствующих глобальному спи­ральному узору, но не самой крупномасштабной картины спиральных рукавов (см. также [22J).**

**В то же время, как уже говорилось выше, при исследовании**

**- 5 -течения газа в рамках волновой теории спиральной структуры га­лактик, было обнаружено явление ГУВ. ГУВ, имеющая геометрию ру­кава, размеры, сравнимые с диском галактики, и во фронте которой реализуются условия, благоприятные для звездообразования, и мо­жет быть ответственна за существование крупномасштабной картины спиральных рукавов, наблюдаемой по ярким молодым звездам и обла­стям НІ. Наличие узкой области сильного сжатия газа в ГУБ поз­воляет понять положение и структуру пылевых полос в спиральных ветвях [23,24]. Она же ответственна за усиление синхротронного излучения [25,26]. Даже такой небольшой перечень явлений, свя­занных в ГУВ, объясняет неопадающий интерес к физике этого явле­ния.**

**Свойства течения газа в сильной степени зависят от парамет­ров СВП (ее геометрии, скорости вращения узора, амплитуды грави­тационной силы) и характеристик межзвездной среды. В наиболее известных расчетах ГУВ (см., например, [I3-I5J) делаются два существенных предположения: I) движение газа является изотерми­ческим; 2) гравитация газа мала, поэтому его движение полностью определяется внешним гравитационным полем - полем звездной вол­ны плотности. Оба предположения представлялись вполне разумными и справедливыми на первых этапах развития теории ГУВ. Однако сейчас и первое, и второе требуют более тщательного рассмотрения.**

**Роберте [із], Шу и др. [l4j рассматривали как сплошную сре­ду по существу систему диффузных облаков нейтрального водорода, предполагая, что "температура" среды от плотности не зависит. "Температура" определяет скорость звука, которая отождествляется с дисперсией скоростей облаков и считается известной константой порядка 5-Ю км/с. Но структура межзвездной среды, ее динамиче­ские и тепловые свойства значительно сложнее.Здесь большую роль**

**- 6 -**

**играют процессы нагрева и охлаждения. Газ разбит, по крайней ме­ре, на две фазы - холодную плотную облачную фазу и горячую раз­реженную межоблачную. Стационарное нелинейное движение двухфаз­ной среды в поле спиральной волны рассчитывалось в [27]. В этой работе принято, что облака уже существуют (задается масса обла­ков, фактор объемного заполнения), и рассмотрено, как изменяют­ся параметры течения отдельно облачной и межоблачной среды. При этом по-прежнему предполагается, что движение системы облаков описывается уравнениями газодинамики с изотермическим уравнением состояния. Очень важным для приложения к проблеме звездообразова­ния явилось исследование в этой работе гравитационного коллапса облака, испытавшего сжатие в ГУБ (впрочем, как показали двумер­ные расчеты |\_28J, картина здесь гораздо сложнее). Необходимо,од­нако, отметить, что в силу стационарности задачи вопрос об обра­зовании облаков, естественно, не мог быть здесь рассмотрен, хотя уже существовали ясные физические соображения о том, что при движении газа через ударную волну может происходить фазовый пе­реход, и течение, в принципе, может быть существенно нестацио­нарным. Еще на УІ симпозиуме по космической газодинамике Пикель-нер и Гринберг высказали идею, что сами облака могут рождаться на фронте ГУБ вследствие тепловой неустойчивости (см. доклад Филда и дискуссию после него [29J). Поэтому для того, чтобы проследить временную эволюцию межзвездного газа при его течении в поле СВП с учетом тепловых процессов, необходимо решать неста­ционарную задачу.**

**Однако первый же прямой расчет течения газа с учетом тепло­вого баланса, выполненный в 1974 г. Бейкером и Баркером [30],дал неожиданный результат: оказалось, что, во-первых, в этом случае ударная волна не формируется, и возникает совершенно новый тип**

**- 7 -**

**течения ("аккреционный фронт"); во-вторых, фазовый переход, со­провождающийся образованием холодных и плотных облаков, не про­исходит. В этом расчете рассматривалось одномерное прямолинейное течение газа через потенциальную яму. Следующая работа на эту тему была выполнена в 1980 г. Таббсом [ЗҐ], который решал анало­гичную задачу, но для спирального потенциала. Его результат ока­зался диаметрально противоположным: ударная волна возникает, и возникает вторичное облако холодной фазы, появляющееся при фазо­вом переходе в галактической ударной волне. В итоге вопрос ока­зался открытым: как же все-таки влияет тепловой баланс на тече­ние и структуру газа?**

**Чтобы ответить на этот вопрос, в настоящей работе решалась задача о течении газа в поле СВП для серии различных начальных условий. Оказалось, что в зависимости от начальных условий и расстояния от центра Галактики возможны разнообразные, качествен­но отличающиеся друг от друга варианты развития течения и струк­туры газа, среди них течение с фазовым переходом, сопровождаю­щимся образованием холодных плотных конденсаций, а также совер­шенно новый тип волнового движения газа - аккреционная волна. Амплитуда этой волны по плотности составляет два и более порядка. Значение такого типа течения для физики межзвездной среды заклю­чается в том, что это есть механизм мощного увеличения плотности газа в рукавах с одновременным сильным понижением температуры, что как раз и необходимо для начала процесса звездообразования.**

**Обратимся теперь к вопросу об учете самогравитации газа. Если принять в качестве поверхностной плотности газа плотность нейтрального водорода, значение которой более, чем на порядок меньше плотности "эффективной" звездной подсистемы,определяющей динамику СВП [J32-35] ,и считать при этом течение газа изотерми-**

**- 8 -**

**ческим, то, как будет показано в настоящей работе, влияние соб­ственной гравитации мало по сравнению с влиянием поля СВП. Эти результаты убедительно подтверждают справедливость проводимых ранее расчетов изотермических ГУБ без самогравитации газа (такой же вывод сделан в |\_31,36J).**

**Картина может стать иной, если плотность газа взять равной плотности молекулярного водорода, количество которого согласно выводам работ [32,37,38j в Галактике может быть значительным, и по-прежнему считать течение газа изотермическим. Действительно, в этом случае собственная гравитация будет велика (см. § 4). Од­нако, здесь необходимо учесть следующие обстоятельства. Во-пер­вых, согласно исследованию Блитца и Шу [39] на самом деле плот­ность молекулярного водорода не превышает плотности атомарного водорода, и этот результат согласуется с результатами других ав­торов и по нашей Галактике (см., например, [40,41]), и по внеш­ним галактикам [42,43]. Во-вторых, система молекулярных облаков является бесстолкновитєльной, поэтому ее динамика описывается не изотермическими уравнениями движения, а адиабатическими с пока­зателем адиабаты Т= 2 [44]. В этом случае возмущения плотности газа при его течении в СВП оказываются на порядок меньшими, чем в изотермическом. Следовательно, и здесь роль собственной грави­тации газа мала. Более того, бесстолкновительную систему молеку­лярных облаков следует включать в те же самые;/уравнения, что и звездную компоненту.**

**Как уже говорилось выше, с учетом тепловых процессов тече­ние газа в СВП сопровождается появлением очень плотных и холод­ных образований газа. В настоящей работе показано, что в случае аккреционной волны влияние собственного гравитационного поля на эволюцию газа может быть велико. Под действием самогравитации**

**- 9 -**

**конденсации, возникающие при течении межзвездного газа в СВП, схлопываготся. Этот коллапс, очевидно, должен приводить к рожде­нию новых звезд. Не исключено, что в отдельных случаях будет су­щественным обратное влияние мощных уплотнений газа на звездную спиральную волну.**

**В большинстве работ, связанных с расчетами ГУВ, не учитыва­лось галактическое магнитное поле (исключение составляют, пожа­луй, работы [45,4б], где показано, что его учет несколько умень­шает интенсивность ГУВ). В настоящей работе магнитное поле так­же не включалось в рассмотрение. Сделано это было не потому, что связанные с ним эффекты считались несущественными, а только с тем, чтобы упростить решение поставленных задач, которое и без того оказывается достаточно сложным. В дальнейшем одним из воз­можных направлений развития исследований, проведенных в диссер­тации, является учет магнитного поля.**

**Ранее было уже отмечено, что задача о крупномасштабном те­чении газа в спиральных галактиках имеет большое значение также с точки зрения интерпретации наблюдательных данных и определения параметров самой СВП. Важным здесь представляется исследование структуры и движения нейтрального водорода и молодых звезд (т.е. объектов с малой дисперсией скоростей), что позволяет понять распределение гравитационных полей и, следовательно, масс в Га­лактике .**

**В ряде работ (см., например, [^47-54]) дана интерпретация наблюдений радиоизлучения НІ в линии 21 см в нашей и других га­лактиках (в частности, М 81) с помощью теории волн плотности. Авторами [47-49] сделан вывод о хорошем согласии теории Лина и др. [і] с радионаблюдениями НІ. Однако, на наш взгляд,этот вы­вод недостаточно обоснован, так как в этих работах использован-**

**-ІО-**

**нне. для расчетов модели не являлись самосогласованными с точки зрения волновой теории спиральной структуры галактик.**

**В диссертации в отличие от работ [47-54] расчеты течения межзвездного газа в СВП и для нашей Галактики, и для М 81 выпол­нялись согласно теории спиральной структуры, предложенной Мароч­ником и др. [34]. В целом, из результатов расчетов следует вывод, что модель спиральной структуры галактик Марочника и др. £34] согласуется с данными по НІ.**

**Из наблюдений хорошо известна следующая проблема. Количест­во ионизованного водорода и других индикаторов спиральной стру­ктуры' в Галактике падает с расстоянием от центра, так что при R^8 кпк их практически нет. В то же время HI тянется почти с постоянной плотностью гораздо дальше, приблизительно до 14-15 кпк (см., например, [33,55] , аналогичная ситуация имеет место и в М 81 |\_56,57j). Возникает вопрос, чем вызвана такая особенность в распределении этих объектов? Как следует из проведенных нами расчетов, в модели спиральной структуры [34] изменение с рассто­янием степени сжатия газа в ГУВ коррелируется с распределением по радиусу зон НЕ и других индикаторов спиральной структуры. Поэтому в настоящей работе выдвигается гипотеза о пропорциональ­ности количества молодых объектов (при прочих равных условиях) интенсивности ГУВ. Эта гипотеза основывается на идее о том, что сжатие газа в ГУВ инициирует звездообразование (см. также [l3 , 58]).**

**Для определения параметров спиральной структуры Галактики необходимо привлекать всю совокупность наблюдательных данных,по­лученных по различных объектам. Возможно, что наиболее прямым путем нахождения параметров является анализ кинематики молодых звезд [26J. Эта задача решалась рядом авторов (см.,например,**

**- II -**

**[35,59-63] ). В работах [35,61^ для расчета поля скоростей звезд с учетом возмущения от спиральных рукавов использовалось линей­ное приближение. Представляется интересным выяснить на том же самом наблюдательном материале, к каким изменениям параметров спиральной структуры приведет учет нелинейного характера возму­щенного движения звезд. Поскольку решение уравнений нелинейной кинетики затруднительно, естественно воспользоваться газодинами­ческой моделью движения. В самом деле, звезды, вошедшие в выбор­ки, молодые, поэтому есть основание полагать, что они в зна­чительное мере "наследуют" кинематику газа, из которого родились (такое же предположение использовано в [64], см» также |j50J). Результаты оказались в качественном и количественном согласии с полученными при линейном описании |\_GIJ . И они близки к парамет­рам СВП, предсказанным в работе Марочника и др. [34].**

**Суммируя вышесказанное, можно заключить, что в настоящей работе в рамках теории спиральной структуры, развитой в [і,34], на основе эффективных численных методов газодинамики изучается крупномасштабное движение газа в спиральных галактиках.В резуль­тате исследования радиоизлучения нейтрального водорода в линии 21 см, кинематики молодых звезд, распределения по галоктоцентри-ческому радиусу молодых объектов оценены параметры спиральной структуры нашей Галактики и М 81. Для данных параметров в нашей Галактике рассчитывается течение газа в спиральной волне плотно­сти с учетом его самогравитации и тепловых свойств и проводится анализ возникающих при этом разнообразных типов эволюции межзве­здной среды.**

**В диссертационной работе:**

**- разработан разностный метод, который позволяет находить численные решения задач газодинамики о движении межзвездного га-**

**- 12 -**

**за в спиральных рукавах, отличающихся как начальными условиями, так и типами рассматриваемых течений (изотермическое, адиабати­ческое, течение с учетом тепловых процессов, течение с включени­ем собственной гравитации газа);**

**- в рамках модели спиральной структуры [34 ] показано, что**

**в случае изотермической ГУВ, распространяющейся по газовому дис­ку с небольшой величиной поверхностной плотности, влияние собст­венной гравитации газа мало;**

* **исследованы динамические свойства ансамбля молекулярных облаков в Галактике и найдено, что даже в случае экстремально больших оценок их количества (см., например, [32,37,38] ) они представляют собой бесстолкновительную, неувлекаемую сплошной средой систему;**
* **из расчетов следует, что в этой системе, движение кото­рой в гидродинамическом приближении является адиабатическим с показателем адиабаты Т= 2, формируется слабое возмущение плот­ности с пренебрежимо малой собственной гравитацией;**
* **по пяти выборкам, включающим долгопериодические цефеиды и сверхгиганты спектральных классов В,А,р-С,М, (всего около 500 объектов) с помощью нелинейного описания возмущенного под дейст­вием спиральных рукавов движения молодых звезд находятся параме­тры СВП в нашей Галактике, которые оказываются близкими к най­денным ранее в рамках линейного приближения [61];**
* **для этих параметров строятся теоретические контуры радио­излучения в нашей Галактике нейтрального водорода в 21 см, кото­рые согласуются с наблюдательными;**
* **следуя модели Марочника и др. [34], рассчитывается гео­метрия рукавов и параметры СВП для галактики М 81;**
* **обнаружена корреляция между распределением по радиусу га-**

**- ІЗ -**

**лактик молодых объектов (зон НЕ, У- излучения и др.) и измене­нием по радиусу степени сжатия газа в ГУВ, что позволяет выдви­нуть гипотезу о зависимости количества молодых объектов от ин­тенсивности ударной волны;**

**- как показали расчеты, при учете тепловых процессов в меж­  
звездной среде возможны такие движения газа, как ударная волна**

**с фазовым переходом, трехфазное течение и аккреционная волна, характерной особенностью которых является формирование очень пло­тных и холодных конденсаций газа;**

**- найдено, что самогравитация газа существенно влияет на  
развитие течения в случае аккреционной волны.**

**Все перечисленные выше результаты обосновываются и выносят­ся на защиту.**

**Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и спи­ска литературы.**

**В главе I излагается постановка задачи о течении межзвезд­ного газа в гравитационном поле спиральных рукавов и демонстри­руется численный метод ее решения. В § I этой главы исходные не­стационарные двумерные газодинамические уравнения, описывающие движение газа в плоскости галактического диска, приводятся в предположении тугой закрутки рукавов к более простому асимптоти­ческому виду. Здесь же записывается также в приближении малости угла закрутки спиралей уравнение Пуассона, которое используется для нахождения собственного гравитационного потенциала в расче­тах с учетом самогравитации газа. Далее для моделей спиральной структуры Лина и др. р] и Марочника и др. [34] обсуждается за­дание параметров, присутствующих в задаче. В § 2 описывается численный метод счета полученных в § I нелинейных нестационар­ных газодинамических уравнений.**

**- 14 -**

**В главе 2 рассчитываются в рамках модели [J34] изотермиче­ское и адиабатическое течения и анализируется влияние собствен­ной гравитации межзвездного газа. В § 3 приводятся результаты исследования изотермического течения газа для параметров модели [34]. Здесь же описывается метод решения уравнения Пуассона, применяемый для нахождения собственного гравитационного потенци­ала газа, если его вариации плотности не слишком велики, и рас­считывается изотермическая ГУВ, распространяющаяся по нейтраль­ному водороду, поверхностная плотность которого мала по сравнению со звездной. В § 4 на основе современных наблюдательных данных исследуется система молекулярных облаков и делаются определенные выводы о ее динамических свойствах.**

**В главе 3 исследуется течение межзвездного газа с учетом его тепловых свойств и самогравитации. В § 5 дается краткая ха­рактеристика тепловых процессов, происходящих в межзвездной сре­де и описывается роль ГУВ в звездообразовании в спиральных галак­тиках. В §§ 6,7 решается ряд задач (самогравитация газа в этих параграфах не рассматривается), отличающихся начальными услови­ями и галактоцентрическими расстояниями, демонстрируются и обсу­ждаются полученные результаты, делаются сравнения с результатами других авторов. В § 8 получен метод решения уравнения Пуассона, который может быть использован для нахождения собственного гра­витационного потенциала газа при произвольном профиле его плот­ности, и изучается комбинированное действие самогравитации и процессов охлаждения и нагрева на развитие движения и структуры газа при его взаимодействии со спиральными рукавами.**

**В главе 4 в рамках волновой теории спиральной структуры ин­терпретируются различные наблюдательные данные в нашей Галактике и в М 81 с целью оценок параметров СВП. В § 9 строятся теорети-**

**- 15 -**

**ческие профили радиоизлучения нейтрального водорода и делается их сравнение с наблюдательными. В § 10 согласно модели [34] рас­считывается геометрия рукавов в М 81 и найдены параметры волны плотности. В § II проводится интерпретация поведения по галакто-центрическому радиусу наблюдательных распределений в нашей Га­лактике и в М 81 количества молодых объектов (зон НЦ , Y-излу­чения и т.д.). Содержание § 12 составляет решение задачи об опре­делении параметров спиральной структуры Галактики из анализа ки­нематики молодых звезд. При этом предполагается, что возмущенное полем СВП движение звезд имеет нелинейный характер.**

**Автор выражает благодарность своему научному консультанту Мищурову Ю.Н. за постоянное внимание и помощь в работе.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главной целью настоящей работы явилось исследование круп­номасштабного движения газа в спиральных галактиках. Основные результаты диссертации получены в процессе изучения таких ас­пектов этой проблемы, как а) интерпретация с позиций волновой теории различных наблюдательных данных по нашей Галактике и М 81 и оценка для этих галактик параметров спиральной структу­ры; б) анализ влияния самогравитации и тепловых процессов на кинематику и структуру газа при его течении в поле спиральных рукавов.

В рамках сформулированной проблемы в предлагаемой работе был рассмотрен ряд газодинамических задач. Решение этих задач оказалось возможным благодаря применению разработанной в дис­сертации полностью консервативной разностной схемы, основан­ной на использовании быстродействующей ЭВМ. В многочисленных расчетах, проведенных с помощью данного численного метода, он зарекомендовал себя как универсальное и эффективное средство исследования эволюции газа в спиральных галактиках.

Анализ результатов, полученных в диссертации, позволяет сделать следующие выводы:

I. Параметры СВП в нашей Галактике, полученные по пяти выборкам, включающим долгопериодические цефеиды и сверхгиган­ты спектральных классов В, А, Р - G , М (всего около 500 объектов), с помощью нелинейного описания возмущенного грави­тационным полем спиральных рукавов движения молодых звезд, оказываются близкими к найденным ранее в рамках линейного опи-

- 129 -

с алия Q>l] и совпадают с принимаемыми в модели спиральной структуры [34~].

1. Теоретические контуры радиоизлучения нейтрального во­дорода в линии 21 см, построенные для параметров модели спи­ральной структуры |\_34J, согласуются с наблюдательными.
2. Геометрия рукавов и параметры СВП, рассчитанные в рам­ках модели Марочника и др. [34] для галактики М 81, удовлетво­ряют наблюдательным данным по кинематике и структуре нейтраль­ного водорода в этой галактике.
3. Существует корреляция между распределением по галакто-центрическому радиусу молодых объектов (зон НІГ, У-излуче­ния и т.д.) и изменением по радиусу степени сжатия газа в ГУБ.
4. Для нейтрального водорода, плотность которого невелика по сравнению со звездной, учет его собственной гравитации прак­тические не влияет на расчет изотермического течения газа, в частности, на параметры галактической ударной волны, откуда, следует, что расчеты ГУВ без учета собственной гравитации впол­не оправданы.
5. Эффекты **собственной гравитации могли** бы быть сущест­венными и для течения газа, и для спиральной волны в целом, если бы такой компонент межзвездной среды, как молекулярный водород имел большую плотность [32,37,38] и представлял собой при этом сплошную среду с изотермическим уравнением состояния.
6. Однако, в случае экстремально больших оценок плотности Но динамически роль Hg определяется тем обстоятельством, что молекулярный водород образует бесстолкновительную, неувлекае-мую сплошной средой систему газовых облаков. Она должна рас­сматриваться в рамках тех же уравнений, что и звездная компо­нента. В гидродинамическом приближении движение этой системы

- 130 -

является адиабатическим с показателем адиабаты У = 2. При этом, как следует из расчетов, даже на расстоянии R = 5 кпк формируется не мощная ударная волна, как в сплошной изотерми­ческой среде, а лишь слабое возмущение плотности с пренебрежи­мо малой собственной гравитацией.

8. Учет процессов нагрева и охлаждения в межзвездной сре­де, с которыми в равновесном состоянии связана возможность двухфазного состояния газа, оказывает существенное влияние на эволюцию газа в спиральной волне. Если не рассматривать этих процессов, то возможны два типа течения: непрерывное и галак­тическая ударная волна. При включении тепловых процессов в до­полнение к этим известным типам течения реализуются следующие:

а) Галактическая ударная волна с фазовым переходом-образо­  
ванием плотных холодных облаков, такой же переход может быть и  
при непрерывном течении в области сжатия газа. Эта ситуация  
реализуется при низкой начальной плотности газа, соответствую­  
щей горячей фазе на кривой равновесия. Расчет этого варианта  
позволяет увидеть не только фазовый переход, но и действие  
триггерного механизма звездообразования в ударной волне.

б) Трехфазное течение - то есть течение с образованием  
горячих каверн и плотных холодных облаков, которые сосуществу­  
ют с начальной умеренно холодной плотной фазой. Этот вариант  
реализуется при большой начальной плотности, соответствующей  
холодной фазе кривой равновесия. Фазовый переход развивается  
не в области сжатия газа, а в области разрежения, то есть в  
межрукавном пространстве.

в) Аккреционная волна - новый тип нелинейной волны с амп­  
литудой на полтора порядка большей, чем у галактической удар­  
ной волны в тех же условиях, но без процессов нагрева и охлаж-

- 131 -

дения. Течение с аккреционной волной не сопровождается образо­ванием облаков. Реализуется оно также при большой начальной плотности, соответствующей холодной фазе.

9. Включение собственной гравитации газа в случае аккре­ционной волны ведет к чрезвычайно интенсивному уплотнению и охлаждению газа в области пика волны.

****

****

****

****

****

****

****

****

****

****

****

****



***^(рЛ<***

****

****

**­­­­­­­­**

**­­­­**

****

****

**­­­­­­­­­­**

**­­­­**

**­**

****

**­**

**­­­­­­­­­­­­**

****

**­­­­­­­**

**­­­­**

**­­**

****

**­­­­­­­­­­­­**

**­**

****

**­­­­­­­**

**­­­­­**

****

****

**­**

**­­­­­­­­**

**­­**

****

**­­**

**­­­­­­**

**­­**

**­­**

****

****

**­­**

**­­­­**

**­**

****

**­­­­­­**

**­­­**

****

****

****

**­­**

** **

**­­**

1. ****
2. **­­**
3. **­­­**
4. **­­**
5. **­**
6. ****

****

**­­­**

** ­  
**

**­**

**   
**

**­**

**­**

**­­­­­­­**

****

**­­­­­**

**­­­­­­­**

**­**

****

**­­­­­**

****