

СТЕНОГРАММА
заседания диссертационного совета Д-002.203.01
Протокол № 92 от 16 октября 2015 г.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: доктор физико-математических наук, профессор
Клочкова Валентина Георгиевна

СЕКРЕТАРЬ: кандидат физико-математических наук
Шолухова Ольга Николаевна

Состав совета – 19 человек, присутствует – 13:

- | | | |
|-----------------------|--------------|----------|
| 1. Клочкова В.Г., | д.физ-мат.н. | 01.03.02 |
| 2. Шолухова О.Н., | к.физ-мат.н. | 01.03.02 |
| 3. Афанасьев В.Л., | д.физ-мат.н. | 01.03.02 |
| 4. Бескин Г.М., | д.физ-мат.н. | 01.03.02 |
| 5. Богод В.Н., | д.физ-мат.н. | 01.03.02 |
| 6. Верховданов О.В., | д.физ-мат.н. | 01.03.02 |
| 7. Глаголевский Ю.В., | д.физ-мат.н. | 01.03.02 |
| 8. Засов А.В., | д.физ-мат.н. | 01.03.02 |
| 9. Мингалиев М.Г., | д.физ-мат.н. | 01.03.02 |
| 10. Панчук В.Е., | д.физ-мат.н. | 01.03.02 |
| 11. Романюк И.И., | д.физ-мат.н. | 01.03.02 |
| 12. Трушкин С.А., | д.физ-мат.н. | 01.03.02 |
| 13. Щекинов Ю.А., | д.физ-мат.н. | 01.03.02 |

Председатель.

Прежде всего, перед тем как начать наше заседание, первое, хочу попросить выключить ваши мобильные телефоны, чтобы не мешать нашему докладчику и второе, поскольку теперь по правилам ВАК у нас идет видеозапись, члены Совета выходить из зала не могут, иначе заседание будет признано не состоявшимся. Вот теперь приступаем к работе. Начинаем наше заседание. Кворум у нас есть. В отсутствие председателя Совета проводить заседание буду я, его заместитель, Клочкова Валентина Георгиевна.

К защите представлена работа Васильева Евгения Олеговича, работа называется «Процессы энерго- и массообмена между галактиками и окологалактической средой», работа выполнена в Научно-исследовательском институте физики и на кафедре физики космоса физического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет». Научный консультант – доктор физико-математических наук, профессор, Щекинов Юрий Андреевич, зав. кафедрой физики космоса ЮФУ. Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, Гнедин Юрий Николаевич, присутствующий здесь, заведующий астрофизическим отделом, зам. директора ГАО РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Иванчик Александр Владимирович, старший научный сотрудник, Физико-Технический Институт им. А.Ф.Иоффе

РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Чернин Артур Давидович, главный научный сотрудник отдела внегалактической астрономии ГАИШ МГУ, присутствует здесь. Ведущая организация: Астрокосмический центр Физического института им. П.Н.Лебедева Российской Академии наук. Я попрошу Секретаря Совета огласить состояние дел с документами соискателя.

Секретарь.

Все документы, необходимые для ВАК, диссертант предоставил.

Председатель.

Есть какие-то вопросы по поводу документов. Вопросов нет. Мы можем переходить к докладу. Пожалуйста, у Вас 40 минут, постарайтесь уложиться в это время.

Васильев Е.О.

Доброе утро. В последние годы мы много нового узнали о состоянии межгалактической, окологалактической среды и все это благодаря спектрографам высокого разрешения, установленным на космических и наземных телескопах. Мы узнали о протяженных галактических гало, о неоднородностях металличности в межгалактической среде.

Насколько оказываются важными процессы энерго- и массообмена между галактиками и окружающим пространством можно судить по влиянию на глобальную эволюцию Вселенной и собственно по двум фактам – это то, что межгалактический газ ионизован и ионизован он достаточно рано и кроме этого межгалактический газ обогащен тяжелыми элементами тоже достаточно рано. Хорошо видно, что с уменьшением красного смещения металличность увеличивается.

Соответственно, цель работы – это исследование процессов обмена энергией и массой между галактиками и окружающей средой от начала формирования первых звезд во Вселенной до современной эпохи, определение физических условий и наблюдательных проявлений, характерных для этих процессов. Ну и более конкретно, это изучение первых объектов во Вселенной от сжатия облака до вспышек первых сверхновых, возможное влияние каких-то нестандартных источников ионизации на эволюцию первых объектов, влияние нестационарных эффектов ионизации и охлаждения астрофизической плазмы, и обмен массой и энергией между галактиками – определение условий для зарождения галактических ветров. Диссертация состоит из 6 глав, общий объем – 309 страниц.

Первая глава посвящена охлаждению догалактической плазмы и формированию первых звездных объектов. Собственно, первые протогалактики содержат гало темной материи, газ, который достаточно плохо охлаждается, поскольку в первичном газе охладители – это водород, гелий и небольшая примесь легких элементов. Охлаждение на атомарном водороде малоэффективно, на молекулярном водороде более эффективно, при низких температурах – это молекулы HD и LiH.

Формирование молекул H₂ – это исключительно нестационарный

процесс: по осям концентрация H_2 и температура, это равновесный случай, а вот это неравновесный процесс, видны существенные отличия. Следовательно, нужно учитывать нестационарные уравнения химической кинетики в динамике газа.

Большие протогалактики образуются при столкновении меньших и при этом, соответственно, возникают ударные волны. А где есть ударные волны, появляется дополнительная степень ионизации газа и это провоцирует, стимулирует образование молекул H_2 . Здесь показаны эволюционные треки, стартуем от разной температуры, вот тут степень ионизации немного повышается, эволюция становится немного более длинной и газ охлаждается до низких температур. Охлаждается он благодаря увеличению концентрации H_2 и HD. Вот здесь показан вклад в охлаждение: от H_2 постепенно уменьшается, падает при низкой температуре, а от HD увеличивается. За фронтом ударной волны возникает слой холодного газа, температура этого газа падает вплоть до температуры реликтового излучения, благодаря охлаждению на молекулах HD. Поскольку молекулы H_2 могут охладить до температуры порядка 200 градусов.

Слой может быть гравитационно неустойчивым и, если применить критерий, предложенный Гилденом, то мы можем получить, что при столкновении вот с такой массой на соответствующем красном смещении, массы выше вот этой линии, то есть слой газа при столкновении таких масс становится гравитационно неустойчивым. При этом охлаждение на HD доминирует в слое при столкновении гало вот с такой массой, выше вот этой линии. Тот слой, который становится гравитационно неустойчивым, он становится таким благодаря охлаждению на молекулах HD. Доля такого переохлажденного газа составляет где-то от 20 до 60% в зависимости от красного смещения. Это было показано в простых расчетах и было подтверждено в трехмерных космологических расчетах. Причем масса Джинса в этом слое оказывается ниже примерно в 10 раз, что позволяет рождаться менее массивным звездам.

И заключение по первой главе. Потери в линиях HD оказываются достаточно эффективными, чтобы газ охладился вплоть до температуры реликтового излучения. Газ за фронтом ударной волны становится гравитационно неустойчивым, что связано с эффективным охлаждением молекулами HD.

Поскольку есть идеи о том, что чем больше степень ионизации, тем больше образуется молекул, то можно рассмотреть какие-то дополнительные эффекты, дополнительные факторы, изменяющие ионизацию и нагрев именно догалактической плазмы, чтобы влиять на образование первых объектов.

В стандартной рекомбинации ионизация происходит при активности первых галактик, а нестандартной рекомбинации допустимы дополнительные источники ионизации и нагрева газа. Достаточно давно известно, что это нестабильные частицы темной материи, предложенные Шамоу в начале 1980-х, это модели образования космических лучей сверхвысоких энергий при распаде сверхтяжелых частиц темной материи, это первичные магнитные поля. И данные по измерению реликтового излучения WMAP и Planck допускают

нестандартную рекомбинацию, хотя, конечно, достаточно жестко ограничивают. Здесь мы будем рассматривать влияние на фоновый газ, на образование протогалактик и возможные проявления нестандартной рекомбинации в линии 21 см атомарного водорода, смещенной в метровую область.

Самый простой случай – это дополнительная ионизация. Дополнительная ионизация и слабый нагрев – это влияние космических лучей сверхвысоких энергий. В стандартной рекомбинации соответствует сплошная линия, только в гало с массой выше этого предела могут образовываться первые объекты. При дополнительной ионизации предел понижается и, соответственно, первые объекты могут рождаться в меньших протогалактиках и на более ранних этапах. Забыл сказать, вот эта почти вертикальная линия соответствует 3-сигма возмущениям в стандартной космологической модели. Понижение предела массы приводит к росту звездообразования и здесь показана объемная скорость вспышек сверхновых от красного смещения, на больших красных смещениях видно увеличение, что может быть детектировано на телескопах, например, JWST.

Нестабильные частицы темной материи другого типа могут давать не только ионизацию, но и нагрев. Это представлено здесь радиальными профилями плотности, температуры и скорости для стандартной рекомбинации штриховой линией и для трех вариантов присутствия темной материи. То, что показано, укладывается в ограничения, полученные из измерений реликтового излучения. Профиль плотности меняется слабо. Видно, что меняется темп аккреции на протогалактику. Соответственно меняются свойства линии 21 см. Вот это расстояние от центра линии, это карта для оптической толщины, а это прицельный параметр, на котором производится срез протогалактики. Видно, что в присутствии нагрева и дополнительной ионизации подавляются сильные линии, происходит уменьшение числа линий и уменьшение эквивалентной ширины линии. Что может быть обнаружено с помощью широкополосных наблюдений в линии 21 см.

Перейдем к первичным магнитным полям. Они оказывают похожее действие – нагревают газ. Вот оптическая толщина, а это расстояние от центра линии, для двух значений напряженности. Но при этом магнитные поля оказывают еще дополнительное действие. Возникает понятие магнитной массы Джинса, что стимулирует возникновение дополнительных флуктуаций плотности. Это спектр масс, то есть число объектов в единице объема, это масса. Зеленая линия – стандартная Λ CDM модель. В присутствие магнитных полей с различными напряженностью и показателем спектра можно видеть существенное изменение числа объектов, именно, увеличение числа. Это будет проявляться в абсорбции, числе гало на луче зрения. Вот здесь представлены синтетические спектры. При такой ширине полосы в стандартной рекомбинации не было бы ни одной линии поглощения. Здесь их видно много. И, например, LOFAR способен «увидеть» системы поглощения на красном смещении 10 за 10 часов интегрирования в спектре радиоисточника с яркостью порядка 500 мЯн. О том, что такие яркие объекты существуют, вот есть источник на красном смещении 5 и его спектральный поток довольно высокий. Из этого можно получить независимые ограничения на величину первичных

магнитных полей. Узнать, вообще, существуют магнитные поля или нет на больших красных смещениях.

Краткие выводы к главе. Увеличение степени ионизации газа, благодаря космическим лучам сверхвысоких энергий, оказывает стимулирующее действие на звездообразование в ранней Вселенной. Существование нестабильных частиц темной материи проявляется в свойствах абсорбционных систем в линии 21 см HI. Дополнительные возмущения поля плотности, связанные с воздействием первичных магнитных полей, ведут к росту числа абсорбционных систем в линии 21 см HI.

Вернемся теперь к первым звездам, их свойствам. Рассмотрим, как сжимается газ в первых протогалактиках, как происходит ионизация от первых звезд, как происходят вспышки первых сверхновых, перемешивание. Было сказано, охлаждение в первичном газе определяется молекулами H₂ и HD, с чем связана достаточно низкая эффективность фрагментации. Поэтому считалось и считается, что первые звезды были достаточно массивными. Охлаждение на молекулах HD позволяет получить некий спектр масс первых звезд в интервале примерно от 20 до 200 масс Солнца. В стандартной рекомбинации первые звезды рождаются в галактиках 10⁷ масс Солнца. Видно, это предел 3-сигма возмущений, а это предел масс протогалактик, в которых могут рождаться звезды. Рассмотрим эволюцию от сжатия протогалактики, рождения первой звезды и до образования зоны ионизации. Здесь представлены распределения плотности перед вспышкой сверхновой, то есть, звезда образовалась, светила какое-то время, которое зависит от ее массы. Рисунок для четырех значений массы. Отличия в распределении плотности газа: здесь зона размытая, а при меньшей массе видны неустойчивости, которые могут повлиять на распределение тяжелых элементов после вспышки сверхновой. Поскольку массы звезд разные, то и сверхновые будут разными. Здесь представлено распределение плотности, указано время после вспышки сверхновой. Например, слева после вспышки сверхновой с массой 25 масс Солнца и энергией 10⁵¹ эрг и до массы 200 масс Солнца и энергией 5x10⁵² эрг. Радиальные шкалы разные: здесь 0.1 кпк, а вот здесь 0.7 кпк. При малой энергии вспышки и небольшой зоне ионизации газ постепенно схлопывается под действием гравитации темного гало. А при высокоэнергетичной вспышке, красной линией показан вириальный радиус, значительная часть газа пересекла вириальный радиус, то есть фактически попала в межгалактическое или окологалактическое пространство. Ниже показано распределение металличности. Видно, что оно существенно неоднородно. При этом для массивной звезды основная часть массы металлов сосредоточена в горячей каверне. Построим распределение металличность-плотность. Здесь, чем темнее, тем больше масса газа. Видно, что основная доля массы имеет металличность от -3.5 до 2 в логарифмах солнечного значения. При вспышке сверхновой с энергией 10⁵¹ эрг и массой 25 масс Солнца газ в центральной области протогалактики гравитационно неустойчив. Возможно, что при дальнейшем расчете, больше 25 млн. лет в этих случаях газ также может стать гравитационно неустойчивым. Это имеет серьезные последствия для следующих поколений звезд. Поскольку существует понятие критической металличности, когда охлаждение в линиях тяжелых

элементов становится более эффективным, чем в линиях первичных молекул. Выше нее фрагментация газа становится более эффективной. Но надо иметь в виду плохое перемешивание металлов, что и было показано, и основная масса газа имеет металличность выше критического значения. Таким образом, звезды следующего поколения будут иметь металличность более-менее нормальную и близкую к металличности звезд в гало нашей Галактики. Краткий вывод. Увеличение эффективности перемешивания тяжелых элементов в первых протогалактиках при схлопывании остатка сверхновой дает возможность образования звезд следующего поколения с металличностью выше критического значения.

Понятно, что все это существенно нестационарный процесс. При появлении тяжелых элементов возникает вопрос: насколько равновесны или нестационарны процессы в космической плазме. Известно, что имеются значительные различия ионного состава в неравновесном и равновесном подходах. Причина этого – задержка рекомбинации. Времена рекомбинации больше, чем времена охлаждения. Поэтому газ выглядит более ионизованным в неравновесном случае, по сравнению с равновесным при одинаковой температуре. Но при интерпретации наблюдательных данных по причине простоты и наглядности используется равновесный случай. Вопрос в том, что насколько его можно применять. Здесь видно распределение ионов кислорода в равновесии и при эволюционном охлаждении. Видно существенное различие, иногда на несколько порядков. Это функции охлаждения в равновесном и неравновесном подходах. Функции охлаждения отличаются не так сильно, в 2-3 раза в некоторых случаях, но и это способствует другой динамике газа, различие влияет на динамику газа. Вот видно отношение функции охлаждения в неравновесном газе к функции в равновесном случае при различных параметрах: это фотоионизованный газ, различные плотности, металличности. Видно, что при низком потоке, то есть в этой области, и высокой плотности, например, нижняя правая панель, функция охлаждения стремится к функции для неравновесного столкновительного газа, этот случай показан ниже штриховой линии. Выше есть какие-то отличия и при увеличении потока равновесие становится фоторавновесием и отличия между фоторавновесной и фотонеравновесной функциями становятся малы. Можно найти условия, при которых ожидается близкое равенство: высокое значение параметра ионизации, то есть высокий поток и низкая плотность, и какие изменения параметров приводят к нарушению этого соотношения: это увеличение металличности, уменьшение параметра ионизации, то есть уменьшение потока и увеличение плотности. Поскольку есть разница в ионном составе, темпе охлаждения, то ожидается другая тепловая и динамическая эволюция газа. Можно сформулировать вывод. Найдены интервалы применимости равновесных функций охлаждения в фотоионизованном обогащенном тяжелыми элементами газе.

Как это работает и в чем отличие от равновесного подхода исследовалось в следующей главе. Здесь расскажу только один из примеров, описанных в этой главе. В последнее время вокруг галактик с довольно высокой скоростью звездообразования обнаружены абсорбционные системы OVI с достаточно

высокой лучевой концентрацией. Это найдено в галактиках с активным звездообразованием на близких красных смещениях 0.05-0.2. Вот на рисунке скорость звездообразования, звездная масса 10^{10} - 10^{11} масс Солнца. Серая карта – каталог SDSS. Вопрос в том, как такие лучевые концентрации получаются. Более того, этот газ находится довольно далеко от галактики, вот это прицельный параметр, то есть такой газ наблюдается вплоть до расстояний 150 кпк от галактики. Видно плато в распределении. Для объяснения таких значений концентрации необходимо предположить солнечную металличность, то есть газ с солнечной металличностью до расстояний порядка 150 кпк. Это накладывает очень жесткие ограничения на скорость звездообразования, на эффективность выноса газа из галактики. То есть, в галактике должно образоваться достаточно много кислорода и этот кислород должен быть вынесен на такие расстояния. Откуда же все-таки проблема. Дело в том, что ион OVI очень хрупкий и существует в очень узком интервале температур, его относительная концентрация не превышает 0.1. Если бы можно повысить это значение, то какие-то проблемы решились бы. Учитывая фотонеравновесные модели и спектральную эволюцию родительской галактики, эти точки и есть те самые галактики с активным звездообразованием, а это модели спектральной эволюции, можно получить, что относительная концентрация иона OVI, например, в газе с металличностью 0.1 солнечного значения, достигает 0.9, то есть почти весь кислород находится в состоянии ионизации OVI. А в стандартных таблицах, которые часто применяются, максимальная концентрация составляет 0.1. Это позволяет получить более консервативные оценки на звездообразование в галактиках. Не надо придумывать какие-то модели с увеличенной, повышенной эффективностью обмена между диском и гало. Понятно, что мы не претендуем на объяснение наблюдательных данных, но эти результаты позволяют не придумывать более сложных моделей. Вывод: определены условия для появления высокой концентрации иона кислорода OVI в газе под действием галактического и внегалактического ионизирующего излучения. Это одна из работ, были еще работы, которые относятся к этой главе, посвященные реионизации гелия и распределению металлов вокруг галактик.

Понятно, что это процессы взаимодействия между диском и гало и вопрос в том, как выносятся металлы из галактик с помощью галактических ветров и в том, как образуются эти ветра, какие требования, необходимы для формирования галактического ветра. Понятно также, что это связано со вспышками звездообразования. А процесс звездообразования – это множественные вспышки сверхновых. Модель стационарного ветра предложена Шевалье и Клеггом, это модель стационарного ветра, то есть, никаких условий, как он образовался, не рассматривалось. Следующим этапом было применение модели механической светимости. В ней можно запустить ветер, но не понятны условия, как образуется этот ветер. В работе де Авилеса и Брайтчверта впервые были рассмотрены отдельные вспышки сверхновых. Понятно, что сверхновые распределены случайно в пространстве, взрываются не одновременно и различить достаточное количество сверхновых – сложная и ресурсоемкая задача, требующая мощных компьютеров, поэтому только в последнее время это стало возможным и популярным.

Множественные вспышки сверхновых поддерживают отток газа, но остатки сверхновых охлаждаются и, чтобы этот отток был постоянным, вспышки сверхновых должны быть когерентны. Они сначала должны пересечься и сформировать ветер, а потом охладиться, потому что сохранение энергии гарантирует сохранение импульса. Введем новое понятие эффективности нагрева, которое соответствует отношению остаточной тепловой энергии к полной инжектированной энергии сверхновыми. Сверхновые начинают взрываться, их остатки перекрываются, горячий газ тоже перекрывается. Слева для одной частоты вспышек, справа – для другой. Слева видно, что горячий газ (красным цветом) уже перекрылся, то есть произошла перколяция горячего газа. Справа она произошла позже. Проведя достаточно большое количество расчетов можно исследовать процесс от частоты вспышек. Слева эффективность нагрева, видно, что она падает при уменьшении частоты, справа объемный фактор заполнения горячим газом и видно, что горячий газ с температурой выше нескольких миллионов (больше трех миллионов – синие линии) в какой-то момент начинает быстро расти. Этот момент соответствует выходу на стационар для эффективности нагрева, именно этот момент соответствует перколяции горячего газа. Можно найти масштабное соотношение между эффективностью нагрева, частотой вспышек сверхновых и плотностью газа. Оно здесь представлено. Можно оценить время перколяции, которое зависит от частоты вспышек и плотности. Так получается, что это время оказывается близким к задержке между началом звездообразования и активацией ветра. Эта оценка была сделана Бленд-Хауторном исходя из наблюдений, но непонятно было с чем она связана. Можно предположить, что она связана с перколяцией горячего газа. Для того, чтобы перколяция произошла необходимо достаточное количество газа, иначе время для исчерпания газа должно быть больше времени перколяции. То есть, можно найти условие, когда сверхновые начинают действовать коллективно. Необходимым условием для формирования галактического ветра является перколяция остатков до того, как закончится вспышка звездообразования. Выводы. Было найдено масштабное соотношение между эффективностью нагрева газа сверхновыми до рентгеновских температур, темпом вспышек сверхновых и плотностью окружающего газа. Была интерпретирована временная задержка между началом вспышки звездообразования и активацией галактического ветра, возникающего в результате коллективного действия вспышек сверхновых.

Переходим к положениям на защиту, всего их пять.

1. Переход значительной части дейтерия в молекулы HD за фронтами ударных волн при слиянии первых протогалактик обеспечивает эффективное охлаждение газа до температуры реликтового излучения, стимулирует гравитационную неустойчивость и способствует образованию звезд малой массы.
2. Влияние нестандартных источников ионизации и нагрева – нестабильных частиц темной материи и первичных магнитных полей – на эволюцию газа на красных смещениях $z \sim 10-50$ проявляется в свойствах абсорбционных линий 21 см атомарного водорода, смещенных в

метровый диапазон. Спектральные и широкополосные наблюдения систем поглощения на красных смещениях $z \sim 10$ позволят получить независимые ограничения на свойства нестандартных источников.

3. Начальные этапы обогащения Вселенной тяжелыми элементами определяются массой первых звезд. Взрывы массивных звезд ($M > 120 M_{\odot}$) приводят к обогащению межгалактической среды. Менее массивные звезды ($M < 40 M_{\odot}$) обогащают тяжелыми элементами газ родительской протогалактики и стимулируют образование звезд следующего поколения с металличностью $[Z/H] \sim -(3.5-2)$, превышающей значение "критической металличности" $[Z/H]_{cr} \sim -3.5$.
4. Равновесные функции охлаждения фотоионизованного обогащенного тяжелыми элементами газа применимы только при низкой металличности

Файл file0002.mov

(Васильев Е.О., продолжение)

и высоком потоке ионизирующего излучения. В других условиях функции охлаждения и ионизационная кинетика существенно неравновесны. Отличия могут составлять нескольких раз до нескольких порядков.

5. Возникновение галактического ветра оказывается возможным только после пересечения (перколяции) остатков сверхновых, когда их энергии объединяются. По этой причине между началом вспышки звездообразования и активацией галактического ветра существует временная задержка. Найдена связь между временем перколяции, эффективностью нагрева газа до рентгеновских температур, с одной стороны, и частотой вспышек сверхновых и плотностью окружающего газа, с другой.

Основные результаты диссертации опубликованы в 43 работах, 24 из которых в журналах списка ВАК, 5 – без соавторов. Результаты были доложены на кафедре физики космоса сначала Ростовского университета, потом Южного федерального, в Институте астрономии, Физико-технического института, обсерватории Тарту, Астрономического института Рурского университета, Института им. Рамана в Бангалоре и 25 российских и 18 международных конференциях, всего более 60 докладов. Вот список избранных публикаций. Спасибо!

Председатель.

Спасибо. Прошу вопросы.

Богод В.Н. (САО).

Вообще-то, фоновые объекты и фоновое излучение очень плохо измеряются интерферометрами. Вы тут пишете, что LOFAR может быть использован для такого рода измерений. Это не так. Может, Вы объясните, каким образом, какие объекты, какого размера, как они заполняют диаграмму.

Васильев Е.О.

Могу подробно объяснить. Но ключевая задача LOFAR, он строился – это наблюдения первых объектов в эпоху реионизации. Его строили только для этого. Конечно, есть другие задачи, но это основная задача. Они рассчитывают на какую-то премию. А смысл в том, что, да, эти объекты, их несколько попадает в диаграмму направленности. Конечно. Она из задач – это наблюдение крупных мегапарсековых масштабов

Богод В.Н. (САО).

То есть, эти объекты шире, чем диаграмма.

Васильев Е.О.

Да.

Богод В.Н. (САО).

Это странно.

Васильев Е.О.

Это изучение ионизации газа. Для первых протогалактик, конечно, их много попадает в диаграмму, они не разрешимы. Они разрешимы только если у нас есть какой-то фоновый источник и в его спектре мы сможем наблюдать абсорбционные системы.

Богод В.Н. (САО).

Это не в континууме, а в линиях, он этого не говорил.

Васильев Е.О.

Линия 21 см. Все было для линии 21 см.

Председатель.

Так еще вопросы, пожалуйста.

Бисикало Д.В. (Институт астрономии РАН).

Женя, прежде всего, мне очень понравилась Ваша работа. В частности, в том, что Вы на примерах нескольких задач показали важность неравновесных процессов. В то же время Вы используете уравнения газовой динамики, которые заведомо равновесны. Мой вопрос, оценивали ли Вы влияние неравновесных процессов на газодинамические процессы?

Васильев Е.О.

В газовой динамике в правой части есть функция охлаждения.

Бисикало Д.В. (Институт астрономии РАН).

Нет, там неравновесные они по определению, потому что при выводе газодинамических уравнений вы предполагаете, что функция распределения

максвелловская.

Васильев Е.О.

Это да, но времена, конечно, разные. Времена установления максвелловского распределения меньше, чем для других процессов охлаждения и ионизации.

Бисикало Д.В. (Институт астрономии РАН).

То есть применимо?

Васильев Е.О.

Да, применимо.

Председатель.

Пожалуйста, Засов Анатолий Владимирович.

Засов А.В. (ГАИШ МГУ)

У меня остался открытым вопрос по поведению газа, который является уже выпавшим обогащенным на этапе вспышке звездообразования. Очевидно, что раз он наблюдается на расстояниях 150 килопарсек, он достаточно долго существует. Мне важно понять, каким образом это связано, скажем с массой гало галактики. То есть, газ может частично упасть назад, газ может вообще улететь в межгалактическое пространство. Какие выводы можно сделать уже из того факта, что этот газ на 100-150 килопарсек прогрессирует?

Васильев Е.О.

Те абсорбционные системы, которые наблюдались, имеют скорость меньше скорости убегания, они связаны с родительской галактикой. Именно эти абсорбционные системы, о которых шла речь. Но в принципе, часть газа может теряться, часть газа может падать обратно. Есть группа людей, которые считают, что из галактики все вылетает, и группа людей, которые считают, что на галактику все падает. Вероятно, это что-то среднее, потому что есть наблюдения для одной и той же галактики и для нашей Галактики, которые показывают, что есть галактические фонтаны и в то же время есть высокоскоростные облака, которые частично могут падать на галактики. Это можно видеть достаточно подробно в численном моделировании, ну и в наблюдениях, конечно.

Председатель.

Вас устраивает ответ?

Засов А.В. (ГАИШ МГУ)

Да.

Афанасьев В.Л.

Евгений Олегович, вопрос у меня связан с множественными вспышками первичных сверхновых. Когда вы рисуете вашу картинку, где пузыри

раздуваются. Вопрос следующий, оболочки, которые образуются, могут не только складываться и образовывать звездный ветер, они могут сталкиваться, поэтому должна происходить термализация, резкое охлаждение среды. Вопрос следующий. До какого уровня может довести эта термализация. Может ли она, скажем, привести к охлаждению такому, что из этого выпадут капли расплава?

Васильев Е.О.

Может.

Афанасьев В.Л.

Вопрос по хондрам. Не будут ли хондры в этом случае этапом этого процесса? Потому что при такой термализации импульс очень сильно теряется. Мы можем получить вещество не связанное с галактикой. В межзвездной среде, обогащенной металлами, пыль, которая полностью разрушится до атомов и все такое. Что Вы по этому поводу скажите, насколько эти процессы существенны, потому что сверхновых очень много и процессы термализации будут очень существенны. Я понимаю, что это выходит немножечко за рамки вашей работы, но вот есть такой темный угол.

Васильев Е.О.

Да, газ может охлаждаться при столкновении вплоть до 100 градусов. Меньше я обрезал, поскольку считать очень тяжело. Это происходит в областях звездообразования и при выносе газа из галактики, как только он поднялся достаточно высоко над галактикой, дополнительной подкачки энергии нет, соответственно, эти фрагменты будут охлаждаться, будут лететь фактически баллистически в межгалактическое пространство. Вопрос в том, что они быстрее охладятся или быстрее разрушатся из-за неустойчивостей, но насчет пыли, да, наверняка, как-то пыль доставляется с помощью таких вот фрагментов, поскольку пыль наблюдается на расстояниях порядка Мпк от галактик, наверняка, она доставляется именно таким образом, хотя с другой стороны считается, что за фронтами ударных волн пыль хорошо и быстро разрушается.

Председатель.

Сергей, пожалуйста.

Трушкин С.А. (САО)

По поводу пунктов выносимых на защиту. Надо ли понимать, что это пункты, которые Вы сформулировали в своей диссертации и они являются обнаружением этих эффектов, которые перечислены? Или это по-другому надо как-то формулировать?

Васильев Е.О.

Часть пунктов, в частности, что касается 21 см, наблюдений в линии 21 см атомарного водорода, вполне можно ожидать, что последующие телескопы, LOFAR, MWA могут обнаружить, проверить предсказания о том, можно ли на

этих телескопах обнаружить эти эффекты или нет.

Председатель.

Есть еще у вас вопросы? Григорий Меерович, пожалуйста.

Бескин Г.М. (САО)

Поскольку речь идет о большой шкале времени с самого начала, с самого первичного момента образования галактик по сути, можно говорить об изменении соотношении между темной материей и видимой на этой временной шкале. В какой мере первоначальные соотношения, первоначальные условия такого рода, могут влиять на дальнейшие расчеты, на дальнейшую динамическую эволюцию в тепловом смысле, в кинетическом и так далее?

Васильев Е.О.

Если я правильно понимаю, то имеются ввиду малые протогалактики. Если протогалактика малой массы, то она может содержать меньшее количество газа. То есть, темное гало выросло, образовалась протогалактика, дальше в нее сваливается газ, взорвались первые сверхновые, они будут выметать газ и внутри может остаться мало газа. Именно с этим связано, что наблюдаемая меньшая масса газа, ее отношение к массе темной материи в карликовых галактиках меньше по сравнению с массивными галактиками. Вот то, что сейчас обнаруживают ультраслабые карликовые галактики, в которых очень малая звездная масса и соответственно, можно ожидать, и масса газа по отношению к массе темной материи. Это связано как раз со вспышками сверхновых. Более того, эти вспышки сверхновых могут влиять на перераспределение темной материи. Одно из объяснений того, что в карликовых галактиках наблюдается плоский профиль распределения темной материи связано с тем, что первые вспышки сверхновых могли оттянуть большую часть газа и она уже потянет за собой темную материю.

Председатель.

Следующий вопрос.

Щекинов Ю.А.

А мне можно короткий комментарий?

Председатель.

У нас будет общая дискуссия. Те, кто сейчас не удовлетворён, сможет выступить. Так, вопросы у нас есть к докладчику? Не имеется желающих задать вопрос. В таком случае мы можем сейчас заслушать отзыв научного консультанта. Спасибо большое, Евгений Олегович. Вы можете присесть, где Вам удобно. Научный консультант у нас присутствует, доктор Щекинов. Пожалуйста, Ваш отзыв.

Щекинов Ю.А.

Спасибо. В общем, мне его зачитывать обязательно или нет? Я просто на

представлении, когда это дело было, летом кажется, я его подробно зачитывал. Сейчас, чтобы сделать это как-то более компактно я просто отмечу следующее в том, что рассказал Евгений Олегович. Последнее время, на Западе даже немного раньше, где-нибудь лет 10-12 назад, у нас в стране это начинается вот сейчас, может, 2-3 года, выражаясь нынешним языком, трендом в астрофизике стала совместная работа над одними и теми же наблюдательными проблемами наблюдателей и теоретиков. И вот хорошо, что, приятно отметить, на Западе эти работы развиваются с очень активным участием, присутствием наших соотечественников, многие туда уехали, не буду называть фамилии, они более-менее известны.

И то, что отличает работу Евгения Олеговича является как раз именно это, именно склонность его рассматривать наблюдательные, конкретные наблюдательные задачи в астрофизике и когда, с давних пор, когда мы начинали еще работать, когда он у меня в аспирантуре был, когда мы начинали говорить о какой-то задаче, он обязательно склонял меня в сторону, а как это наблюдается, можно ли это наблюдать, как это будет видно, ну чтобы не делать работу просто так теоретическую, а так чтобы было видно ее соответствие нормальной, реальной природе. Это то, о чем всегда повторяли, вот я слышал это от Виталия Герасимовича Горбацкого и от Иосифа Самуиловича Шкловского: астрофизика – наблюдательная наука. И вот работа Жени, особенно его последние усилия, они подчеркивают именно эту связь, хороших теоретических расчетов, численных, с качественными наблюдательными данными.

И вот самый последний штрих – это, по-видимому, их уже совместная работа с Алексеем Валерьевичем Моисеевым по поводу НП галактик с большим количеством ионизованного водорода. Это является одним из тех, по существу новых направлений, когда астрофизика развивается такими теоретико-наблюдательными комплексами, хотя, безусловно, чисто теоретические работы и чисто наблюдательные работы, которые на первых порах никак не связаны, они тоже составляют основу астрофизики. Это особенность работы Евгения Олеговича. Другая часть, наиболее важная, это, по-видимому, ее можно назвать как новым направлением в астрофизике – это внятное исследование неравновесных процессов, ионизации, кинетики, термодинамики, неравновесных в частном смысле, когда имеется ввиду, это как раз к вопросу Дмитрия Валерьевича Бисикало, когда имеется ввиду нестационарность. Обычно под равновесными процессами как-то по умолчанию понималось, что тепловые и ионизационные процессы они подчиняются своим законам равновесным, долгое время и только в 1985 году стали появляться самые первые, робкие работы по поводу того, что какие-то отклонения от стационарности и равновесности могут быть существенны. Если говорить формально о термодинамическом равновесии, то в последнее время появляются работы, тоже очень редкие, использующие немаквелловское распределение функции электронов, скажем, а так называемое k -распределение с некоторым хвостом. И вот то, о чем я говорил, а именно неравновесность физических процессов в астрофизике, это, по-видимому, ключевое слово в той работе, которую выполнил Евгений Олегович. И в целом, учитывая, по крайней мере,

эти два обстоятельства, работа, на мой взгляд, представляет собой качественное исследование, соответствующее уровню докторских диссертаций. Спасибо.

Председатель.

Спасибо. Я бы хотела обсудить, будем ли мы делать перерыв. Я предлагаю заслушать еще один документ и после этого, не переходя к отзывам оппонентов, сделать перерыв. Хорошо, сейчас мы должны заслушать Заключение организации, где было сделана работа. Я прошу Ольгу Николаевну зачитать.

Секретарь.

Заключение федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет». Диссертация «Процессы энерго- и массообмена между галактиками и окологалактической средой» выполнена в _отделе радиофизики и космических исследований Научно-исследовательского института физики и на кафедре физики космоса факультета физики. В период подготовки диссертации соискатель Васильев Евгений Олегович работал в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет» в должностях младшего научного, научного сотрудника и федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» в должностях научного, старшего и ведущего научного сотрудника.

В 2000 г. окончил Ростовский государственный университет с присуждением степени магистра физики по направлению «Физика».

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук защитил 15 апреля 2004 г. в совете Д002.203.01, созданном при Специальной Астрофизической обсерватории Российской Академии Наук.

Научный консультант - Щекинов Юрий Андреевич, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», физический факультет, кафедра физики космоса, д.ф.-м., профессор, заведующий кафедрой.

По итогам обсуждения принято следующее заключение: диссертационная работа выполнена соискателем на высоком научном уровне и представляет законченное, самостоятельное, научное исследование актуальной проблемы – процессов энерго- и массообмена между галактиками и окружающей средой. Новизна и достоверность полученных результатов не вызывает сомнений и подтверждена публикациями в ведущих российских и зарубежных журналах, в том числе: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Astrophysical Journal, Astronomy and Astrophysics, Astrophysics and Space Science, Astronomische Nachrichten, Astrophysics, Астрономический журнал, Астрофизический бюллетень. Результаты диссертации были представлены соискателем в виде докладов на 25 российских и 18 международных конференциях, в том числе на Генеральной ассамблее МАС в 2006 г., Всероссийской астрономической конференции в 2004-2013 гг., совещаниях рабочей группы «Межзвездная среда» при Научном совете по

астрономии Российской академии наук. Материал диссертации полностью отражен в 43 публикациях в открытой печати, в том числе 24 работах, входящих в список ВАК. Работа соответствует заявленной специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Диссертация содержит всестороннее исследование процессов энерго- и массообмена между галактиками и окологалактической средой от начала формирования первых звезд во Вселенной до современной эпохи.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели исследования, кратко излагается содержание глав.

В первой главе рассмотрена термохимическая эволюция газа в первых протогалактиках. Исследовано образование молекул HD и их роль в охлаждении первичного газа за фронтами ударных волн, возникающих в эпоху формирования галактик. Показано, что при близких к лобовым столкновениям протогалактик с массой $M > 10^7 [(1+z)/20]^2 M_{\odot}$ газ за фронтом ударной волны становится гравитационно неустойчивым, что связано с эффективным охлаждением молекулами HD. Найдено, что потери в линиях HD оказываются достаточными, чтобы газ охлаждался вплоть до температуры реликтового излучения $\sim 2.7(1+z)$ К. Получены оценки доли протогалактик, в которых молекулы HD оказываются важными в охлаждении газа. Найдено, что вклад в скорость звездообразования, ассоциированную с охлаждением в линиях HD, возрастает с 0.5% на красных смещениях $z=18-20$ до 10-30% на $z \sim 10$.

Во второй главе изучено влияние возможных нестандартных источников ионизации и нагрева на тепловую эволюцию барионов в эпоху до вторичной ионизации водорода и наблюдательные проявления этого влияния в свойствах линии 21 см нейтрального водорода, смещенной в метровую область. Показано, что (а) сверхтяжелые частицы темной материи через распад на космические лучи сверхвысоких энергий и электромагнитные каскады способствуют понижению предела массы гало, в которых барионы эффективно охлаждаются, на порядок по сравнению со стандартной рекомбинацией, (б) нагрев газа, обусловленный нестабильной темной материей и первичными магнитными полями, приводит к уменьшению эффективности охлаждения газа и, следовательно, подавлению звездообразования. В зависимости от типа источника ионизации изменения в эволюции проявляются в абсорбционных и эмиссионных свойствах линии 21 см нейтрального водорода, которые могут быть исследованы с помощью радиоинтерферометров в метровом диапазоне, например, Murchison Widefield Array (MWA), Low-Frequency Array (LOFAR) и Square Kilometre Array (SKA).

В третьей главе исследована динамическая, тепловая и химическая эволюция газа после рождения первых звезд в интервале масс $M_* \sim 25-200 M_{\odot}$ и последующих взрывов сверхновых в протогалактиках $M \sim 10^7 M_{\odot}$ на красных смещениях $z \sim 12$. Исследованы свойства распределения тяжелых элементов (металлов), произведенных в родительской звезде, и эффективность их перемешивания с первичным газом в оболочке сверхновой. Найдено, что эффективность перемешивания металлов зависит от энергии взрыва сверхновой и для менее энергетичных ($E < 3 \times 10^{52}$ эрг) сверхновых она оказывается заметно

выше из-за быстрого охлаждения оболочки и ее схлопывания. Найдено, что при схлопывании оболочки сверхновой в центральной области возможно рождение звезд с металличностью, близкой характерным значениям для современных звезд Галактики.

В четвертой главе изучен неравновесный ионный состав и функции охлаждения газа, обогащенного тяжелыми элементами и находящегося в поле внешнего ионизирующего (ультрафиолетового и рентгеновского) излучения. Найден диапазон применимости равновесных фото-ионизационных моделей для межзвездной и межгалактической сред. Показано, что функции охлаждения в равновесных условиях близки к неравновесным только при низкой металличности и высоком потоке ионизирующего излучения. В остальных условиях отличия между равновесными и неравновесными величинами оказываются значительными и могут достигать нескольких раз. Показано, что за фронтами ударных волн в столкновительном газе темп охлаждения газа и диапазон физических условий, благоприятных для развития тепловой неустойчивости, зависят от металличности газа и скорости ударной волны.

В пятой главе рассмотрены процессы перемешивания тяжелых элементов при обдирании обогащенных гало галактик, ионизационная и тепловая эволюция газа в окрестности галактик в эпоху вторичной ионизации гелия и в окологалактическом пространстве галактик с активным звездообразованием на малых красных смещениях. Особое внимание обращено на роль нестационарных процессов ионизации и охлаждения газа. Найдено, что насыщение неустойчивостей, обусловленное затуханием относительных движений газовых потоков, приводит к неполному перемешиванию. Найдено, что отношение $OIII/OIV$ оказывается наиболее многообещающим индикатором поглощения $HeII$ в континууме, $\sim 54-150$ эВ в эпоху реионизации гелия. Определены условия для появления высокой концентрации иона кислорода OVI в газе под действием галактического и внегалактического ионизирующего излучения.

В шестой главе рассмотрены условия, необходимые для возникновения галактических ветров. В рамках трехмерной газодинамической модели исследована динамика множественных вспышек сверхновых, перекрывающихся между собой. Найдено масштабное соотношение между эффективностью нагрева газа сверхновыми до рентгеновских температур, темпом вспышек сверхновых и плотностью окружающего газа. Предсказано существование временной задержки между началом звездообразования и активацией галактического ветра, необходимой для достижения состояния перколяции горячего газа в области звездообразования.

Личный вклад состоит в участии в постановке задач, создании пакетов программ, проведении численных расчетов, интерпретации результатов и написании текста статей.

Степень достоверности результатов проведенного исследования, научных положений и выводов следует из использования современных методов теоретической астрофизики и численных методов, адекватности используемых моделей реальным физическим объектам, проверки выполнения предельных переходов к известным ранее результатам.

Научная новизна диссертационного исследования определяется поставленными задачами, разработанными методами их решения и впервые полученными результатами.

Практическая значимость диссертационного исследования выражается в том, что полученные в диссертации результаты представляют интерес для широкого круга специалистов в области внегалактической астрофизики, физики межзвездной среды, эволюции структуры во Вселенной и космологии. Созданные комплексы компьютерных программ для расчета неравновесного ионного состава обогащенного фотоионизованного газа могут быть использованы при анализе наблюдений абсорбционных систем линий металлов в спектрах квазаров, функций охлаждения и нагрева в численном моделировании динамики газа за фронтами ударных волн.

Участники семинара считают, что по своей актуальности, новизне и практической значимости диссертационная работа Васильева Е.О. полностью удовлетворяет всем требованиям пункта 9 «О присуждении ученых степеней» и является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальных задач физики взаимодействия галактик с окружающим газом, термодинамической истории Вселенной.

Диссертация «Процессы энерго- и массообмена между галактиками и окологалактической средой» Васильева Евгения Олеговича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Заключение принято на заседании объединенного семинара отдела радиофизики и космических исследований Научно-исследовательского института физики и кафедры физики космоса физического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет».

Присутствовало на заседании 14 чел. Результаты голосования: "за" - 14 чел., "против" - 0 чел., "воздержалось" - 0 чел., протокол N 28 от "4" июня 2015 г.

Подписано Мишуровым Юрием Николаевичем, доктором физико-математических наук, профессором, Южный федеральный университет, физический факультет, кафедра физики космоса, профессор, председатель объединенного семинара

Председатель.

Спасибо. Есть ли отзывы на авторефераты?

Секретарь.

Да. На автореферат поступило четыре отзыва. От профессора кафедры астрофизики Санкт-Петербургского государственного университета, доктора физико-математических наук, Вошинникова Николая Васильевича, от заведующего отделом Института прикладной физики РАН, доктора физико-математических наук, Зинченко Игоря Ивановича Зинченко, дальше, из Казанского университета, кафедры космической физики, Валерия Сулейманова, тоже доктора физико-математических наук, и от доктора физико-

математических наук, заведующего отделом физики и эволюции звезд Института астрономии РАН Дмитрия Вибе. Все отзывы положительные. Практически все отмечали связь теоретических расчетов с наблюдениями, что именно и интересно в теоретических работах - возможность подтверждения наблюдениями. Недостаток нашел только Дмитрий Вибе. Он пишет, что к незначительным недостаткам можно отнести некоторые погрешности стиля и чрезмерную афористичность изложения.

Председатель.

Хорошо. Мы уходим на перерыв на 30 минут. Да. Хорошо. На 20 минут. В 10.35 по этим часам.

Файл file0003.mov

Председатель.

Мы продолжаем работу нашего Совета. Теперь у нас этап менее интересный, это отзывы официальных оппонентов. Мы начнем, как полагается, с отзывов оппонентов. Отзывы официальных оппонентов. Я предлагаю Юрию Николаевичу Гнедину выступить.

Гнедин Ю.Н.

Дорогие коллеги, я себе позволю зачитать отзыв. Первый пункт Актуальность темы диссертации.

Исследование процессов формирования и эволюции крупномасштабных структур галактик являются одним из фундаментальных направлений современной астрономии. В последнее время наибольшее внимание привлекают процессы тесного взаимодействия галактик, включая их взаимодействия, слияния и процессы аккреции вещества извне и в особенности процессы взаимодействия галактик с внегалактической средой. Взаимодействие между отдельными компонентами может иметь и внутри самой конкретной галактики, например, между звездным и газовым дисками. Новые данные о существовании пространственных вариаций металличности в межзвездном и межгалактическом газе и новые данные о лучевых концентрациях ионов металлов в протяженном гало приводят к высоким требованиям эффективности обмена массой и энергией между гало и диском для всех галактик, включая галактики с активным звездообразованием.

К сожалению, физика всех этих процессов в таких структурах еще до конца не выяснена, хотя первоначальные идеи и физические модели уже определились. Поэтому главные цели данной диссертационной работы, сформулированные как исследование процессов обмена энергией и массой между галактиками и окружающей средой от начала формирования первых звезд во Вселенной до современной эпохи и определение наблюдательных проявлений, характерных для этих процессов, являются, несомненно, актуальными.

Второй пункт моего отзыва – Научная новизна основных результатов и выводов диссертационной работы.

Существенно новыми, по мнению оппонента, являются следующие результаты диссертации:

1. Впервые найдено масштабное соотношение между эффективностью нагрева газа сверхновыми до рентгеновских температур, темпом вспышек сверхновых и плотностью окружающего газа. Предсказана временная задержка между началом вспышки звездообразования и активацией галактического ветра, возникающего в результате коллективного действия вспышек сверхновых.

2. Впервые обнаружена возможность увеличения эффективности перемешивания тяжелых элементов в первых протогалактиках в результате схлопывания остатков сверхновых. В результате показана возможность образования звезд с высокой металличностью.

3. Впервые определены условия для развития тепловой неустойчивости, обусловленной образованием молекулярного водорода в столкновительном газе с низкой металличностью и начальной температурой выше 10^5K . Показано, что развитию тепловой неустойчивости способствует запаздывание рекомбинации водорода.

4. Впервые определены условия для эффективного образования молекул HD за фронтами ударных волн и ионов кислорода OVI под действием галактического и внегалактического ионизирующего излучения в первичном газе.

5. Представлены новые факторы влияния нестабильных частиц темной материи в пострекомбинационной Вселенной на флуктуации реликтового излучения (СМВ), в линии 21 см атомарного водорода, а также влияния частиц темной материи на лес абсорбционных систем.

Следующее, степень обоснованности и достоверности основных результатов диссертации.

Основные результаты и выводы диссертации вполне достоверны и надежны, так как базируются на реализации эффективных, разработанных при участии автора диссертации, численных программ с использованием результатов наблюдений, полученных на ведущих в мире телескопах. Выполненные расчеты термохимической эволюции газа с определенным первичным составом сравнивались с результатами других авторов и были подтверждены другими авторами (соответствующие ссылки приведены в автореферате и в тексте диссертации). Разработанные программные комплексы для моделирования тепловых процессов в первичном газе тестировались путем сравнения с результатами расчетов других авторов. При расчетах использовались также хорошо известные, широко используемые программные пакеты, такие как CLOUDY и другие, идет перечисление.

Четвертый раздел отзыва – научная и практическая значимость основных результатов и выводов диссертации.

Полученные в диссертационной работе результаты теоретических расчетов могут быть использованы и уже используются в различных теоретических и экспериментальных исследованиях в области внегалактической астрономии. Полученные оценки массы газа, охлаждаемого молекулами HD при слиянии

протогалактик, могут быть использованы в планируемых миллиметровых наблюдениях газа до эпохи реионизации и могут быть использованы в научной программе будущей российской космической обсерватории «Миллиметр». Разработанный диссертантом пакет программ газодинамических расчетов имеет широкую область применения в современной астрономии.

Перехожу к пятому, заключительному пункту отзыва. Это оценка диссертационной работы в целом.

Данная диссертационная работа выполнена на высоком профессиональном уровне.

Замечания к диссертационной работе сводятся к следующим, и носят рекомендательный характер. Автору следовало рассмотреть, хотя бы в краткой форме, проблему связи рассмотренных физических процессов в первичных галактических структурах с активностью центральной сверхмассивной черной дыры в центре галактики, которая является мощной энергетической машиной, имея в виду, что массы сверхмассивных черных дыр, обнаруженных на больших космологических расстояниях с космологическим красным смещением $z > 5$, превышают миллиарды солнечных масс. В настоящее время общепринятой точкой зрения, можно сказать, одной из точек зрения, является утверждение, что мощный релятивистский джет сверхмассивной черной дыры влияет на темп звездообразования в галактике, а также может оказывать воздействие на околозвездную и окологалактическую среду, создавая, в частности, и галактический ветер.

Сделанное замечание, которое носит характер рекомендации, ни в коем случае не снижают ценности выполненной диссертационной работы. Диссертация Е.О.Васильева представляет собой решение крупной научной проблемы – в ней представлены разработанные автором методы и алгоритмы построения численных моделей для расчетов физических процессов в первичном газе ранней Вселенной.

Результаты диссертации опубликованы в ведущих журналах с высоким импакт-фактором и хорошо известны среди специалистов. Апробация результатов диссертации высока.

Считаю, что диссертация Е.О.Васильева удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия, а сам автор диссертации Е.О.Васильев заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по данной специальности.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

И дальше большая, подробная информация об оппоненте с его адресом

Председатель.

Ответите потом по совокупности?

Васильев Е.О.

Да.

Афанасьев В.Л.

Надо сразу.

Председатель.

Нет, это по желанию соискателя делается.

Васильев Е.О.

Давайте сейчас.

Председатель.

Как угодно.

Васильев Е.О.

Я согласен со всеми замечаниями. Действительно, есть различные точки зрения. Это одна из них и это отдельное большое исследование. Спасибо.

Гнедин Ю.Н.

Я удовлетворен.

Председатель.

Переходим к отзыву второго оппонента. Пожалуйста, Артур Давидович Чернин.

Чернин А.Д.

Спасибо. Я не буду зачитывать буквально, тем более, что содержание диссертации очень хорошо изложил и сам диссертант. Разрешите я перейду сразу к оценке работы. Диссертант – теоретик. И он столкнулся в своей работе с самым трудным, что может быть в теоретическом исследовании. Это то, что Зельдович называл «три не»: нестационарность, неравновесность и нелинейность. По каждому из этих пунктов, нестационарность очевидна и хорошо проработана, в соответствующих местах диссертации.

Особенно интересна неравновесность, которая изучена в предыдущих исследованиях других авторов гораздо слабее, чем у сегодняшнего диссертанта. В случае нелинейности, в особенности то, что касается нестационарности и неравновесности, сильной нелинейности процессов в ударных волнах, о чем Вы маловато сказали в своем выступлении. Тем не менее, это очень эффектная и очень интересная глава диссертации. Между прочим, именно по этой у меня есть одно замечание, которое я зачитаю. Автор мог бы - в дополнение к тем существенным результатам, которые получены им по этой теме, привлечь в своем рассмотрении еще и замечательную по своей физической природе неустойчивость ударной волны в среде убывающей плотности, открытую в свое время Л.Э. Гуревичем и А.А. Румянцевым. Таково мое единственное (из заслуживающих упоминания здесь) замечание по диссертации – не столько критическое, собственно, сколько служащее скорее пожеланием на будущее.

Ну и вот общая оценка работы. В первую очередь следует обратить внимание на ее высокий общетеоретический уровень. Автор демонстрирует свободное владение приемами и методами современной теоретической астрофизики,

искусно производит приближенные численные оценки. Это можно заметить как в этой работе, так и во всех работах ростовской школы астрофизики, основанной в свое время Л.С. Марочником. Это замечательный, можно сказать, фирменный прием астрофизиков Ростова. Да. Еще и численные расчеты. Исключительно сложные по существу, в самом деле нелинейные, нестационарные и неравновесные проблемы. Все это дополняет и развивает аналитику, которую предлагает и развивает диссертант для основных задач работы. И что тоже очень важно.

Автор проявляет хорошее владение необходимым наблюдательным астрономическим материалом. Материал огромен, из этого материала диссертант правильно, на мой взгляд, выделяет самые главные, самые надежные результаты наблюдений и в тех случаях, когда удается построить простую ясную теорию для их объяснения, диссертант это успешно делает. Кроме того, диссертант, в тех случаях, когда наблюдательная сторона дела еще не очень сильно развита, он делает предсказания относительно будущих наблюдений, которые бы могли подтвердить или опровергнуть теоретический подход, который диссертант развивает.

Диссертационная работа Е.О. Васильева дает новое полное, обоснованное и достоверное решение одной из наиболее важных и актуальных проблем современной астрофизики. Эта работа открывает новое направление в теоретической астрофизике – аналитическое и компьютерное моделирование нелинейных газодинамических процессов в неравновесной космической плазме. Ну и далее сказаны все необходимые фразы, которые полагается в этом случае зачитать по нашим стандартам. Основные результаты диссертации точно и полно изложены в разделе "Положения, выносимые на защиту". Текст автореферата полностью отражает содержание диссертации. Содержание диссертации полностью соответствует специальности 01.03.02 – астрофизика, звездная астрономия. Основные результаты работы опубликованы в 24 статьях из списка рецензируемых журналов ВАК.

Диссертация Евгения Олеговича удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор несомненно заслуживает присуждения ему искомой научной ученой степени. Спасибо.

Председатель.

Спасибо. Вам слово.

Васильев. Е.О.

Спасибо. Я согласен с этим замечанием. Действительно, эта неустойчивость должна играть роль, она требует последовательного рассмотрения и в будущем, я надеюсь, что смогу это сделать. Спасибо.

Председатель.

Вас устраивает этот ответ?

Чернин А.Д.

Да, ответ содержательный.

Председатель.

Так, третий оппонент у нас по уважительной причине отсутствует. Александр Владимирович Иванчик, профессор Физтеха из Санкт-Петербурга, поэтому мы просим нашего секретаря полностью зачитать его отзыв.

Секретарь.

Галактики, межзвездная и межгалактическая среда, звезды разных поколений, являясь структурными элементами окружающего нас космоса, остаются до сих пор активно изучаемыми объектами, несмотря на огромное количество, полученных наблюдательных данных о них. Это связано как с богатым разнообразием физических параметров, связанных с ними, так и со сложностью процессов эволюции и взаимодействия упомянутых объектов.

В представленной диссертационной работе выполнено исследование процессов взаимодействия, обмена энергией и массой, между галактиками и окружающей средой в ходе эволюции Вселенной, от начала формирования первых звезд до современной эпохи. Определены физические условия и наблюдательные проявления, характерные для этих процессов.

Во Введении представленной диссертационной работы сформулированы актуальность, цели, научная новизна, степень достоверности, практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена эволюция газа в первых протогалактиках. Исследовано образование молекул HD и их роль в охлаждении первичного газа. Рассмотрено влияние вращения в гравитационно-связанных формирующихся структурах на охлаждение межзвездного газа.

Во второй главе изучено влияние возможных нестандартных источников ионизации и нагрева на тепловую эволюцию барионов в эпоху, предшествующую реионизации Вселенной. Исследованы наблюдательные проявления этого влияния на свойства линии 21 см атомарного водорода, попадающей в результате космологического красного смещения в метровый диапазон радиоволн. В качестве нестандартных источников нагрева рассматриваются космические лучи сверхвысоких энергий, возникающие в результате распада (или аннигиляции) частиц темной материи, а также влияние первичных магнитных полей на ионизационную и тепловую первых протогалактик.

В третьей главе исследована динамическая, тепловая и химическая эволюция газа после рождения первых звезд и последующих взрывов сверхновых на красных смещениях $z \sim 12$. Изучены свойства распределения тяжелых элементов, произведенных в родительской звезде, и эффективность их перемешивания с первичным газом в остатке сверхновой.

В четвертой главе изучен неравновесный, эволюционирующий со временем ионный состав и функции охлаждения газа, обогащенного тяжелыми элементами и находящегося в поле внешнего ионизирующего излучения. Найден диапазон применимости равновесных фотоионизационных моделей для межзвездной и межгалактической среды.

В пятой главе рассмотрены процессы перемешивания тяжелых элементов при обдирании обогащенных гало галактик. Исследованы статистические характеристики пространственного распределения тяжелых элементов в межгалактической среде на начальных этапах ее обогащения. Исследован ионный состав межгалактического газа в эпоху вторичной ионизации гелия.

В шестой главе рассмотрены условия, необходимые для возникновения галактических ветров. В рамках трехмерной газодинамической модели исследована динамика множественных вспышек сверхновых. Обсуждаются возможные наблюдательные особенности соотношений ионов, измеряемых в центральных областях галактик со звездообразованием.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

Диссертационная работа четко структурирована, снабжена исчерпывающим списком цитированной литературы. К несомненным плюсам работы можно отнести детальный сравнительный анализ предсказываемых эффектов с потенциальной возможностью их регистрации в планирующихся наблюдательных проектах.

В качестве замечаний можно высказать следующие:

- В первой главе, рассматривая влияние молекул HD на охлаждение первичного газа, автор показывает, что для различных физических условий это влияние может оказаться довольно существенным. При этом один из ключевых параметров, определяющих количество молекул HD и следовательно скорость охлаждения, – первичное отношение D/H – считается заданным, и автор оставляет за рамками количественные изменения, которые могли бы быть связаны с различным значением первичного D/H. Конечно современное значение D/H – определено с очень хорошей точностью, однако в главе 3, рассматривая взрывы первых сверхновых и обогащение межзвездной среды металлами, связанную с этим динамику газа, и вновь образование и роль молекул H₂ и HD, автор упускает из виду, что эта среда локально обеднена дейтерием, практически полностью выгоревшем в сверхмассивной звезде, поэтому в этом случае количественные характеристики влияния молекул HD на охлаждение, могли бы быть меньшими. Также имеет академический интерес и большее первичное значение D/H (скажем на порядок величины, первые наблюдения D/H в квазарах давали на порядок большее значение), в качестве независимого верхнего предела – большее обилие HD могло бы приводить к столь радикальным изменениям функции масс первых звезд и гравитационно-связанных структур, что это входило бы в противоречие с имеющимися наблюдениями.
- В главе два, исследуя влияние возможных нестандартных источников ионизации и нагрева межзвездной и межгалактической среды, автор четко показывает к каким опосредованным наблюдательным проявлениям приведут подобные процессы (абсорбция и эмиссия в линии 21 см), при этом автор никак не комментирует непосредственные наблюдательные проявления этих нестандартных источников. Так любая модель

аннигиляции или распада частиц темной материи ведет к формированию фоновых спектров частиц стандартной модели (барионная и лептонные составляющие). Барионная составляющая должна проявляться добавкой к спектру космических лучей в различных энергетических диапазонах с различным хим. составом (протоны, антипротоны, антидейтерий и др.). Лептонная составляющая могла бы проявляться в виде избытков электрон-позитронной компоненты космических лучей, а также фоновым гамма-излучением. Современные наблюдательные данные задают жесткие ограничения на диапазон параметров и моделей распада частиц темной материи. В связи с этим, автору следовало бы пояснить, что используемый им диапазон параметров распада (аннигиляции) частиц темной материи не приведет к противоречию с наблюдениями фонов в современную эпоху.

Высказанные замечания не носят негативного характера, а лишь являются пояснительными и дополнительными, и ни в коем случае не умаляют научную ценность и значимость диссертационной работы. Считаю, что диссертационная работа Васильева Евгения Олеговича «Процессы энерго- и массообмена между галактиками и окологалактической средой», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия, соответствует требованиям, предъявляемым к работам данного уровня, а ее автор несомненно заслуживает присуждения указанной ученой степени.

Ведущий научный сотрудник сектора теоретической астрофизики Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, доктор физико-математических наук Иванчик А.В.

Председатель.

Спасибо.

Васильев Е.О.

Я в принципе согласен с замечаниями. По поводу обеднения дейтерием, дело в том, что молекулы HD играют роль в охлаждении первичного газа. То, что выброшено из сверхновых, именно это вещество и только оно обеднено дейтерием, если будет, оно содержит металлы, тяжелые элементы, причем их концентрация достаточно высока и в охлаждении уже играют роль тяжелые элементы, поэтому дейтерий тут особо не важен. Замечание правильное, я это не учитываю, но этот недочет покрывается тем, что эффекты охлаждения тяжелыми элементами в этих условиях доминируют.

По поводу второго, да, я согласен тоже, наверняка, это необходимо проделать и получить ограничения, но, насколько мне известно, сейчас наиболее жестким ограничением на все вот эти свойства тяжелых и нестабильных частиц дают измерения реликтового излучения. Измерения гамма-излучения, жесткого рентгеновского излучения, а тем более жесткого гамма-излучения в МэВной и ТэВной области, они дают менее жесткие, мягкие ограничения по сравнению с тем, что дает реликт. Оно необходимо сделать, но пока аппаратура недостаточно чувствительна для того, чтобы это увидеть.

Председатель.

Спасибо. Значит, еще у нас остается отзыв ведущей организации, это АКЦ ФИАН.

Секретарь.

Отзыв ведущей организации на докторскую диссертацию Е. О. Васильева «Процессы энерго- и массообмена между галактиками и окологалактической средой». В настоящее время, возможно, центральной проблемой современной космологии является объяснение процессов, протекающих в эпоху формирования первых гравитационно-связанных объектов во Вселенной, галактик, звезд и межгалактической среды при больших космологических красных смещениях $z \sim 1-10$. С одной стороны, эти процессы из-за их недостаточной изученности как теоретическими, так и наблюдательными методами во многом представляются даже качественно неясными. Этим они отличаются от процессов, протекающих в «горячей» Вселенной, до эпохи рекомбинации $z \sim 1000$, которые во многом изучены благодаря данным по космологическому реликтовому излучению, обилию легких элементов и т. д., так и процессов, протекающих в «современной» вселенной, при $z < 1$, где существуют как весьма разработанные теории, так и множество наблюдательных данных. Исследование эпохи $z \sim 1-10$ позволит не только объяснить важнейшие процессы в наблюдаемой Вселенной, такие, как формирование галактик, звезд, сверхмассивных черных дыр, обогащения межгалактического газа и т. д., но и, возможно, позволит пролить свет на природу темной материи, изучить спектр начальных возмущений на масштабах, существенно меньших, чем масштабы, доступные по данным по анизотропии реликтового излучения, а также, возможно, открыть эффекты, связанные с «новой физикой», такие как распад частиц темной материи, наличие первичных магнитных полей и т. д.. С другой стороны, ряд существующих и планируемых в настоящее время экспериментов (ALMA, LOFAR, MWA, Миллиметрон и т. д.) позволит в ближайшее время проверить теории процессов, протекающих при $z \sim 10$ наблюдениями. Именно изучению этих процессов и посвящена, в основном, диссертация Е. О. Васильева.

Диссертация состоит из Введения, 6 Глав, Заключение, Приложений, посвященных численным методам и химической кинетике, а также списка литературы.

В первой Главе «Охлаждение догалактической плазмы и формирование первых звездных объектов» обсуждаются вопросы, посвященные формированию молекул HD за фронтами ударных волн, возникающих при столкновении двух протогалактик в обсуждаемую эпоху эволюции Вселенной, а также влияние на охлаждение газовой компоненты протогалактик их вращения. В выводах указывается, что, во-первых, кинетические процессы образования молекул за фронтами ударных волн приводят к формированию достаточно большого числа молекул HD, которые являются эффективными «охлаждителями» газа. Утверждается, что потери за счет излучения этими молекулами приводят к

охлаждению газа вплоть до температуры реликтового излучения, что приводит к уменьшению джинсовской массы и, соответственно, меньшим массам формирующихся звезд третьего поколения в определенной фракции газа протогалактик. Рассчитывается зависимость величины этой фракции от красного смещения. Во-вторых, обсуждается влияние вращения протогалактик на тепловую эволюцию и темп фрагментации газа. Показано, что оно увеличивается с ростом массы протогалактики и уменьшением красного смещения. Также в этой Главе изучается влияние вращения протогалактики на тепловую эволюцию и темп фрагментации и показывается, что вращение может привести к образованию нескольких протозвездных облаков.

Во второй Главе «Ионизация и нагрев догалактической плазмы и эволюция первых протогалактик» рассматривается влияние нестандартных ионизирующих факторов, таких как первичные космические лучи сверхвысоких энергий и распадающиеся массивные частицы темной материи, а также первичных магнитных полей на процесс образования первых протогалактик и их абсорбционные свойства в линии 21 см атомарного водорода. В выводах указывается, что увеличение степени ионизации космическими лучами может оказать стимулирующее влияние на процесс образования первых протогалактик и звезд за счет увеличения кол-ва молекул H_2 и HD в слабо ионизованной плазме. Также за счет присутствия указанных выше нестандартных ионизирующих факторов и первичных магнитных полей меняются свойства излучения и поглощения в линии 21 см, что может быть использовано для получения ограничений на присутствие нестандартных компонентов во Вселенной и их свойства.

В третьей Главе «Первые звезды и сверхновые: ионизация и перемешивание» изучаются свойства ионизованных областей вокруг первых звезд во Вселенной и влияние

взрывов первых сверхновых на динамику газа и металлов в протогалактиках двумерными численными методами. Масса звезд полагается лежащей в диапазоне $25-200M_{\odot}$, а протогалактики - порядка 10^7M_{\odot} . Показано, что за время эволюции достаточно массивные звезды способны ионизовать существенную фракцию газа протогалактики, тогда как для масс $< 40 M_{\odot}$ газ остается, в основном, нейтральным. В рамках построенных моделей при взрывах сверхновых с энергией больше либо порядка 5×10^{52} эрг значительная часть газа выбрасывается из протогалактики, хотя основная доля металлов остается внутри горячей разреженной каверны внутри протогалактики. При меньших энергиях взрыва горячая каверна схлопывается, причем в таком случае заметно увеличивается степень перемешивания тяжелых элементов за счет разрушения каверны при схлопывании. В этом случае наибольшая масса обогащенного газа обладает металличностью, большей минимального значения, необходимого для эффективной фрагментации и рождения звезд второго поколения.

Четвертая Глава «Процессы ионизации и энергообмена в нестационарной космической плазме» посвящена изучению неравновесных функций охлаждения разреженной плазмы обогащенной металлами и облучаемой источниками ультрафиолетового излучения. Проведено сравнение равновесных

и неравновесных функций охлаждения и найдены условия, при которых предположение о равновесности является адекватным. Исследовано влияние металличности на развитие тепловой неустойчивости газа, охлаждающегося от высоких температур. Рассчитаны неравновесные функции охлаждения для широкого интервала температур и металличностей.

В пятой Главе «Металлы в межгалактической среде и протяженных гало галактик» изучаются особенности обогащения межгалактической среды (МГС) металлами, выработанными звездами, в частности, предлагается решение проблемы «скрытых металлов» связанной с тем, что оценки темпа звездообразования во Вселенной приводят к переобогащению металлами МГС по сравнению с тем, что следует из наблюдений. Вынос металлов в МГС исследуется в рамках двумерной модели, в которой барионное гало галактики «обдирается» натекающим потоком МГС. В этой модели показано, что перемешивание обогащенного металлами газа галактики с МГС носит неполный характер, причем размеры областей, обладающих металличностью выше некоторого заданного значения, уменьшаются с увеличением этого значения. Отмечается, что, возможно, такой характер распределения металлов в МГС подтверждается наблюдениями. Изучаются обилия различных состояний ионизации углерода, которые могут служить дополнительным источником информации о реионизации гелия и получены ограничения на спектр ионизирующих источников по отношению лучевых концентраций ионов углерода в абсорбционных системах, наблюдаемых на $z \sim 2-3$. В дальнейшем, изучается обилие ионов кислорода в газе, находящемся на расстоянии порядка нескольких сотен кпк от галактики с учетом излучения звезд родительской галактики и неравновесности функции охлаждения. Показано, что эти эффекты увеличивают обилие ионизованного кислорода, что приводит к более консервативной оценке кол-ва кислорода, выброшенного из галактики на эти расстояния.

Шестая Глава «Галактические истечения: требования к источнику» посвящена изучению обогащения МГС металлами на малых и больших красных смещениях за счет формирования истечений из галактик с интенсивным звездообразованием, связанным с множественными вспышками сверхновых, в рамках трехмерной численной гидродинамической модели. Показано, что в рамках изучаемой модели для формирования оттока необходимо нагреть до больших температур (порядка нескольких миллионов кельвинов) большую фракцию межзвездной среды, что, в свою очередь, возможно, когда сверхновые взрываются «согласованно». При этом остатки взрывов сверхновых расширяются до тех пор, пока горячий газ не достигнет стадии перколяции. Эта стадия наступает примерно через 10 млн. лет после начала вспышки звездообразования.

Достоверность и обоснованность диссертации обеспечивается применением тщательно разработанных теоретических и численных методов и сравнением полученных результатов с наблюдениями.

Научная новизна результатов преимущественно обосновывается подходом, основанным на решении кинетических уравнений в тех задачах, где до этого использовался, в основном, гидродинамический подход.

Практическая и научная ценность определяется тем, что результаты диссертации могут быть непосредственно проверены наблюдениями с помощью ряда существующих и планируемых экспериментов. Часть результатов может быть использована в теоретических исследованиях межзвездного и межгалактического газа.

Полнота представления результатов. Результаты диссертации опубликованы в 24 рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, в том числе в 12 высокорейтинговых международных журналах.

Текст автореферата полностью отражает содержание диссертации.

Полученные результаты могут быть использованы в САО РАН, Институте астрономии РАН, АКЦ ФИАН, ГАИШ МГУ, ИПФ РАН, Южном и Уральском федеральных университетах, Волгоградском государственном университете.

Замечания к Диссертации:

Глава 1. 1) Рассматриваемый процесс образования молекул HD за фронтами ударных волн работает, очевидно, только для сталкивающихся протогалактик. Эволюция уединенных объектов будет носить другой характер. 2) Не учтены последние данные обсерватории Planck по космологическим параметрам, см. например Ade P., 2015, arXiv:1502.01589. 3) Не проанализировано возможное отличие температуры электронов и ионов, а также ионов различных сортов, см. стр. 36, которое может возникать в нестационарной задаче, если передача энергии между частицами разных сортов затруднена. 4) Строго говоря, отношение удельных теплоемкостей газа, содержащего частицы разных сортов, отличается от $5/3$, которое предполагается в формуле (1.7).

Глава 2. 1) Неясно до какой степени неопределенности в "стандартной модели" (т.е. без учета рассмотренных дополнительных факторов: космических лучей, распадающихся частиц темной материи и первичных магнитных полей) могут повлиять на полученные в этой Главе ограничения. 2) С другой стороны, сама стандартная модель может допускать изменения, не рассмотренные автором. Например, состав темной материи может отличаться от стандартной холодной модели, а спектр первичных возмущений на малых масштабах - от предсказываемого инфляцией "плоского" спектра, см., например, Demianski, M., Doroshkevich, A. G., 2015, Astronomy Reports, 59, 491. Как могут сказаться такого рода модификации на свойствах объектов, рассмотренных автором?

Глава 3. 1) На Рис. 3.2 представлена эволюция плотности газа в зоне ионизации вдоль некоторого радиус вектора. Она резко падает с течением времени, тогда как вне зоны ионизации она является невозмущенной. Предполагая, что рассматриваемое явление носит приблизительно сферически-симметричный характер, из этого рисунка, как кажется, следует несохранение массы. 2) Перемешивание металлов (пункт 3.4) изучается в рамках двумерной численной модели. Представляется, что результаты могут измениться при использовании трехмерной схемы, т.к. трехмерные течения обладают большими "степенями свободы", что может привести к другому характеру мелкомасштабных течений.

Глава 4. Те же замечания к используемой модели, что и в пунктах 3) и 4) замечаний к Главе 1.

Глава 5. 1) То же замечание к используемой модели, что и в пункте замечаний к Главе 3. 2) Кроме того, в поток газа, натекающий на галактику, может обладать турбулентными движениями. Учет такого рода турбулентности может, вероятно, изменить характер перемешивания мелкомасштабных структур.

Глава 6. 1) В пункте 6.3 этой Главы как дополнительное независимое условие формирования галактических ветров указывается достаточность энергии взрывов для прорыва галактического диска. Однако в дальнейшем, если не ошибаюсь, это условие не обсуждается. 2) Кроме того, так как рассматриваемый процесс носит транзиентный характер, связанный со вспышкой звездообразования, вероятно, необходимо обсуждать не только условия формирования галактического ветра, но и его интенсивность и длительность для объяснения, скажем, металличности МГС. 3) Не обсуждается, насколько реалистичными являются требования на частоту вспышек сверхновых с точки зрения современной теории звездообразования. 4) Не обсуждаются другие возможные механизмы формирования галактических ветров, связанные, например, со звездными ветрами или активностью галактических ядер.

Несмотря на указанные замечания, диссертационная работа Е. О. Васильева производит хорошее впечатление, ее основные результаты опубликованы в ведущих международных журналах.

Заключение. Диссертационная работа Евгения Олеговича Васильева представляет из себя законченное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне и удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Ее содержание полностью соответствует специальности 01.03.02 «Астрофизика, звездная астрономия». Из вышеизложенного следует, что ее автор Е. О. Васильев вполне заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв заслушан и утвержден на семинаре отдела теоретической астрофизики АКЦ ФИАН.

Председатель.

Спасибо. Женя, Вам надо ответить на написанное.

Васильев Е.О.

Спасибо. Значит, во-первых, я в принципе во всеми замечаниями согласен, но некоторые требуют пояснения, в первую очередь из-за количества замечаний.

По первой главе, то, что эволюция уединенных объектов будет носить другой характер. Да, это так. Это было рассмотрено в работе Эммануэле Рипамонти и в свое время мы очень долго выясняли кто из нас прав. Но суть в том, что это дает несколько другой интервал. В уединенных объектах молекулы HD важны в другом интервале масс протогалактик. И это отражено в диссертации, там есть отдельный раздел, посвященный двум интервалам масс, где существенны молекулы HD. По поводу второго, то, что не учтены данные Planck, в данном случае оно важно только для 3-сигма флуктуаций, так

называемого параметра сигма-8, и вот Planck дает интервал от 0.8 до 0.83 для этого значения, я использовал данные WMAP пятого года, по которым это значение было 0.81. Третье. Отличие температур электронов и ионов. Времена кулоновского рассеяния электронов на ионах существенно меньше, чем время охлаждения, соответственно, происходит термализация электронов. Четвертое, да, гамма может отличаться от $5/3$, но поскольку металличность здесь мала, даже если и солнечная будет, то это изменения во втором знаке после запятой, а до полностью молекуляризованного газа я не дохожу в расчетах. Поэтому для $5/3$ отличие будет только в каком-то знаке.

По поводу второй главы. Да, возможны отличия от стандартной модели и различные частицы могут как-то менять возмущения. Вот, в частности, по поводу того, что стандартная модель может допускать какие-то изменения, например, если это смесь теплой и холодной темной материи, как описано в статье Демианского и Дорошкевича, то основное влияние – это на профиль плотности гало. Он становится плоским. Но я и так рассматриваю плоский профиль гало.

По поводу третьей главы. Несохранение массы. На самом деле сохранение массы – это одно из первых требований в газодинамических расчетах. Это, видимо, визуальный эффект. Там, действительно, визуально можно посчитать, что она не сохраняется. В расчетах это проверялось, конечно. Перемешивание металлов может отличаться в двумерном случае может отличаться. Да. Может. Собственно, это известно с работ Бетчелора о том, что двумерная турбулентность

Файл file0004.mov

(Васильев Е.О., продолжение)

отличается от трехмерной турбулентности. Но здесь интересны некоторые статистические свойства, особенности, а именно, распределение плотность-металличность. И так получилось, может, это совпадение, то, что были проведены потом трехмерные расчеты, это работы Jeon, препринт был в прошлом году, опубликовано, наверное, в этом году. Результаты совпали.

По четвертой главе я уже ответил. По пятой главе, по поводу турбулентных движений, ну надо проверять. Но в принципе, основная неустойчивость – это неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, а ее инкремент пропорционален контрасту плотности. Оболочка галактики плотная, на нее налетает плотный объект, надо считать. По шестой главе все замечания по делу, но большая часть этого, наверное, скорее всего, будущие исследования, потому что всего охватить нельзя. Спасибо.

Председатель.

Коллеги, мы переходим к общей дискуссии. Я попрошу высказываться по поводу работы.

Щекинов Ю.А.

Можно я.

Председатель.

Пожалуйста.

Щекинов Ю.А.

Я сегодня уже говорил, мне можно отсюда сказать?

Председатель.

Лучше подойти, чтобы камера Вас видела.

Щекинов Ю.А.

Я хочу обратить внимание сейчас, после защиты, на две параллели, которые происходят, которые видны из того, что нам рассказывал здесь Женя, и того, что происходят в последние несколько лет в астрофизике. В частности, у нас в стране. Первая. Вот сейчас формируется у нас в стране последние, может быть, лет пять. Формируется такое направление как численная, вычислительная астрофизика. Это молодые ребята, которым кто-то ставит задачи по моделированию реальных процессов, причем они понимают это часто буквально и дальше начинают формировать именно такой подход: численное моделирование, проведение численных экспериментов реального, вот того, что реально происходит, как можно меньше предположений, как можно меньше упрощающих ограничений и т.д. То есть, как можно ближе к тому, что в действительности происходит. Трехмерные эффекты, неравновесные эффекты и все прочее, нелинейные ... то, о чем сказал Артур Давидович. И эта группа, как правило, молодые ребята, они как-то общаются между собой, все, что новое возникает, оно там между собой, общение сейчас доступное, быстрое. И эта группа сформировалась. И вот одним из активных участников этой группы является Женя Васильев. Я могу назвать еще несколько имен из различных астрономических учреждений. Но параллельно в этом году, как вы знаете, в МАС организована новая комиссия, которой ранее не было, и это как раз «Вычислительная астрофизика». Туда баллотировался одним из сопредседателей Дмитрий Валерьевич Бисикало, но, мне кажется, что он туда не прошел. Прошел? А ну тогда его надо поздравить. Такая комиссия организована. И вот два направления, которые у нас на глазах растут, а с другой стороны они уже формализованы в рамках Международного астрономического союза. Вторая параллель состоит вот в чем. На съезде Международного астрономического союза, в этом году там происходили выборы, организация комиссий и формирование направлений и на протяжении с весны и где-то в августе шли активные обсуждения по этому поводу и обсуждались новые подходы к более детальному исследованию физики межгалактической среды. А физика межгалактической среды предполагает существенный обмен вещества между галактиками и межгалактической средой. Вот это вот тоже сформировалось и в диссертации Евгения Олеговича это является одним из таких ключевых моментов, что происходит попытка описания от субпарсековых размеров в галактике, от сверхновых, где производятся металлы, и потом заканчивается где-то на мегапарсековых масштабах, то есть, далеко за

пределами галактик. Вот эту часть пока на начальных шагах и есть попытка такого описания. И вот то, что новое. Это два абсолютно новых пункта, которые соответствуют, кстати, тем новостям, которых идут из Международного астрономического союза. Вот мне кажется, что это такая черта диссертации.

Председатель.

Спасибо. Да. Марат. Пожалуйста.

Мингалиев М.Г.

Работа очень интересная. В обсерватории она неоднократно излагалась и получала высокую оценку. Призываю всех голосовать за эту работу. Но у меня есть короткое пожелание. Много произносилось и диссертантом, и выступающими, и в отзывах много говорилось, вопросы даже задавались о будущих экспериментах. Я бы хотел рекомендовать диссертанту и его коллегам быстрее выбираться в заявки на проведение этих экспериментов, потому что предсказания очень интересны и потеря приоритета сейчас. Не только об антеннах, о которых вот упоминалось, но ведь довольно много антенн, которые очень эффективно работают последние год-два LOFAR, MWA упоминалась, патфайндеры SKA уже работают. Нужно туда интенсивно подавать заявки. Вот пункт 2 положений, выносимых на защиту, это очень интересное предсказание. Наверное, надо не только на уровне предсказаний, но надо и наблюдать, продолжать Ваши исследования в этой области.

Васильев Е.О.

Спасибо.

Председатель.

Анатолий Владимирович, пожалуйста.

Засов А.В.

Теоретически объяснять процессы, которые сейчас уже не идут – это, вообще, дело очень неблагоприятное. Я бы сказал, что астрофизика имеет ту специфику, что мы повсеместно встречаем результаты тех процессов, которые когда-то шли, наблюдаем их, и, в этом плане, всегда можем перейти от теории к тому, что есть на самом деле, сопоставляя ее с наблюдениями. И вот как раз работа Жени подкупает тем, что здесь серьезный физико-математический аппарат, он сосуществует с хорошим представлением о том, что как можно, а что нельзя проверить. Я бы хотел отметить еще одну вещь. Реально есть такая проблема, проблема очень малого количества звезд населения III, которые почти не содержат металла и надо тогда объяснить каким образом даже те звезды, которые сейчас являются наиболее старыми в Галактике, имеют в своем составе достаточно высокое содержание металлов. Как раз это очень четко связано с теми процессами, которые исследуются в работе. Я могу констатировать, что как очень крупная проблема формирования, фактически, галактик, первых звезд и обогащения звездной среды, но если она и не решена стопроцентно, то, по крайней мере, показано как она может быть решена и как проверить

правильность решения. И в этом плане диссертация безупречная. И я голосую за то, чтобы ее приняли.

Председатель.

Пожалуйста.

Афанасьев В.Л.

Я вот что хочу сказать. С частью работы Евгения Олеговича я знаком, но с небольшой частью. Не претендую на то, что я широко знаю эту область, но я напомним, что астрономы, живут, вообще, в проекции на плоскости и, на мой взгляд, но еще развертка в прошлое. И в астрономии, вообще, и, в частности, для публики часто рисуют простые схемы, например, камертонная диаграмма Хаббла, сейчас очень популярна эта «труба», которая начинается от инфляции, темное время, когда непонятно что происходит и так далее. В каком-то смысле, это похоже на немое кино, в котором нет субтитров. А вот его диссертация – это вот те субтитры, которые пишутся под этой схемой, некая дорожная карта. А как это все делать? Причем затрагивается область очень тяжелая - газодинамика. Ну, я не буду произносить всех этих слов «нелинейность», эти все имена знают, но не знают, как с ними справляться. Он, кажется, немножечко справился. И я, по крайней мере, сидел, прикидывал, что можно с него получить там для моих интересов. Думаю, еще и многие... Работа заслуживает самой высокой оценки, думаю еще нужно обзор написать по ней. Такой цельный. Обзоры бывают разными. Обзоры которые просто являются повторением того, что у тебя опубликовано, а есть «цельный взгляд»-обзоры. Вот Ваша диссертация была неким цельным взглядом. Я не призываю голосовать всех «за», но я знаю, как я буду голосовать.

Председатель.

Владимир Евгеньевич.

Панчук В.Е.

Значит, мне в защите понравилось все. Это человек, который...это нет слов, да. Почему? Потому что представление своей работы – это неотъемлемая часть всей работы. Мне понравился текст. Вы обратите внимание, нет замечаний по ошибкам оформления. Нет! Да, хорошо учился. Мне много чего понравилось, но вот что мне не понравилось кто-то там сказал: «А вот вы не сослались на astro-ph, который выскочил у пишущего в это время на экране. И я напомним. Я не могу дословно сейчас слова Соломона Борисовича Пикельнера, который сказал: «Я не хочу работать в направлении, где приоритет твой зависит от времени получения препринта». Тогда электронной почты не было.

Вот в работе сделаны вещи, которые не зависят, выражаясь теми же словами, от «времени получения препринта». То есть, это вещи устойчивые. Теперь какую мы, малые люди-звездники, с этого всего имеем пользу. Значит, первый ощутимый намек на то, что не надо заниматься химическими градиентами по звездам, это очень тяжелое исследование, очень тяжелое наблюдение, и они выполнялись здесь практически впервые в мире. А потом появился автореферат

докторской Шустова «галактические фонтаны». Раз. Потом появились упоминания о том, что в спектрах квазаров металличность абсорбционных линий – минус два. По галактике - минус три. Каков вывод? То есть польза может быть и отрицательна, мы эти наблюдения свернули. Поняли. Хотя, какие-то работы выполняются. Например, люди, которые отполировали теор. методы и ходят, ищут, где бы их применить. Применяют учет поправок 0.1-0.15 на градиенты металличности галактик, хотя уже известно, что мерджинг есть и все что угодно. Что по этому счету долго говорить? Работа – очень сильная. Работа в автореферате и в диссертации ссылки идут только на работы, вышедшие после защиты кандидатской, участия в конференциях – после защиты кандидатской. Это такой приличный признак. И я, конечно же, буду «за».

Председатель.

Кто-нибудь еще хочет дополнить? Пожалуйста.

Моисеев А.В.

Я не буду оригинальным, что правильно теоретические работы защищать в обсерватории. В каждой главе, каждом выводе прямой выход на наблюдения, причем не какие-то там далекие, а вот уже существующие установки. LOFAR, в общем-то, построен и прекрасно наблюдает определенные объекты, какие-то статьи уже появляются. Вот. ALMA работает, James Web полетит вот-вот. А меня, конечно, больше всего потряс результат последних глав, связанные с оценками металличности межгалактической среды, потому что это щелчок по носу наблюдателя: вы взяли модели, видите отношение линий, вроде бы, все тоже самое, что есть внутри галактики, тоже самое, что и вне галактик. Давайте возьмем те же модели, только считаем, вот у нас большая металличность. Не все так просто, надо думать о физике. Вот это собственно и показано в работе. Ну а то, что вот последняя глава, галактические ветра – это просто выход на работы, которые мы сейчас ведем на 6-метровом телескопе и мы надеемся, что у диссертанта будет возможность приложить его расчеты к реальным результатам, полученным, в том числе, и на 6-метровом телескопе.

Председатель.

Спасибо. Я не вижу больше желающих высказываться. Похоже, совет приходит к определенному мнению, поэтому думаю, мы завершаем нашу дискуссию. Предоставляем возможность соискателю высказаться последний раз на нашем заседании.

Васильев Е.О.

Спасибо. Я благодарен всем выступавшим. Я благодарен своему научному руководителю, Юрию Андреевичу Щекинову, за долголетнюю работу, за его терпение, за то, что научился чему-то. Я благодарен Борису Михайловичу Шустову за его постоянный интерес к работе и его понимание, и внимание к работе. Благодарен моим соавторам и друзьям Святославу Дедикову, Эдуарду Воробьеву, Мише Еремину, Леше Моисееву, Сергею Хоперскову, Марине Рябовой, Алексею Разумову, Жене Курбатову, Артему Кабанову, Жене

Матвиенко, Леше Шагиняну за помощь, за то, что было интересно работать. Я благодарен Биману Нату и Шиву Сети за их благожелательность и гостеприимство в период моих посещений Рамановского института. Мне было интересно с ними работать. Я благодарен за критические замечания Андреа Ферраре, Доминику Бомансу, Эммануэле Рипамонти. Наконец, я благодарен своим родителям за то, что они меня поддерживали все время. Спасибо!

Председатель.

Так, нам надо выбрать комиссию для проведения голосования по диссертации. У нас есть предложение: Бескин Григорий Меерович, Сергей Трушкин и Владимир Богод. Кто за такой состав комиссии, прошу голосовать. Против и воздержавшихся нет. Так что комиссия переходит к работе. Но по новым положениям ВАК члены комиссии в процессе всех этих процедур подсчета голосов должны присутствовать в зале. Члены совета, я оговорилась, не уходят.

Голосование.

Трушкин С.А.

Прошу заслушать результаты голосования.

Председатель.

Дорогие коллеги! Объявляются результаты голосования.

Трушкин С.А.

Протокол №92 заседания счетной комиссии диссертационного совета. В состав комиссии входят Богод В.М., Бескин Г.М., Трушкин С.А. Комиссия избрана для подсчета голосов тайного голосования по диссертации Васильева Е.О., представленной на соискание степени доктора физ.-мат. наук. Диссертационный совет утвержден в количестве 19 человек на срок действия и так далее. Присутствовало на заседании 13 членов Совета, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации – 12. Роздано бюллетеней – 13, осталось не розданных – 6. Оказалось в урне -13. Результаты голосования: за – 13, против – 0, недействительных – 0. Дата. Подписи.

Председатель.

Нам нужно утвердить результаты голосования. Кто за то, чтобы утвердить прошу поднять руки. Кто против? Кто воздержался? Таких нет. Мы принимаем единогласное решение и можно теперь поздравить Евгения Олеговича.

Васильев Е.О.

Большое спасибо.

Председатель.

У нас теперь обсуждение заключения по диссертации. Кто имеет замечания.

Предлагаются замечания и изменения в тексте Заключения Верховодановым

Олегом Васильевичем, Трушкиным Сергеем Анатольевичем, Клочковой Валентиной Георгиевной, Панчуком Владимиром Евгеньевичем, Мингалиевым Маратом Габдулловичем. После их обсуждения текст Заключения предлагается подправить и принять.

Голосование.

Председатель.

За – 13, против – нет, воздержались – нет. Спасибо большое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.203.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ СПЕЦИАЛЬНОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК.

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 16 октября 2015 г. № 92

О присуждении Васильеву Евгению Олеговичу, Российская Федерация, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Процессы энерго- и массообмена между галактиками и окологалактической средой» по специальности 01.03.02 - "Астрофизика и звездная астрономия" принята к защите 26 июня 2015, протокол № 90 диссертационным советом Д002.203.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной Астрофизической Обсерватории Российской академии наук, Российская академия наук, 369167, КЧР, Зеленчукский район, п. Нижний Архыз.

Соискатель Васильев Евгений Олегович, 1977 года рождения. В 2000 году соискатель окончил Ростовский государственный университет с присуждением степени магистра физики по направлению «Физика». Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук защитил 15 апреля 2004 г. в совете Д002.203.01, созданном при Специальной Астрофизической обсерватории Российской Академии Наук.

Диссертация выполнена в отделе радиофизики и космических исследований Научно-исследовательского института физики и на кафедре физики космоса факультета физики Южного федерального университета.

Научный консультант – Щекинов Юрий Андреевич, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», физический факультет, кафедра физики космоса, д.ф.-м., профессор, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

6. Гнедин Юрий Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, заведующий астрофизическим отделом, зам. директора ГАО РАН.
 7. Иванчик Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, ведущий научный сотрудник сектора теоретической астрофизики.
 8. Чернин Артур Давидович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, отдел внегалактической астрономии ГАИШ МГУ.
- дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Астрокосмический центр Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва, в своем положительном заключении, (составленном доктором физико-математических наук П.Б. Ивановым) подписанном Н.Н. Колачевским, директором ФИ им. П.Н. Лебедева РАН, член-корреспондентом РАН, указала, что диссертация является законченным научным исследованием, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 - "Астрофизика и звездная астрономия", а ее автор Е.О. Васильев заслуживает присуждения ему искомой степени.

Соискатель имеет 43 опубликованные работы по теме диссертации (общим объемом 341 страница), среди которых 24 напечатаны в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК. Пять статей опубликованы без соавторов.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

2. Shchekinov Y. A., Vasiliev E. O. Primordial star formation triggered by UV photons from UHECR // Astron. and Astrophys. 2004. Vol. 419. P. 19–23
3. Васильев Е.О., Щекинов Ю.А. Вклад молекул HD в охлаждение первичного газа // Астрофиз. 2005. Т. 48. С. 585–601

4. Васильев Е.О., Щекинов Ю.А. Влияние космических лучей сверхвысоких энергий на звездообразование в ранней Вселенной // *Астрон. журн.* 2006. Т. 83. С. 872–879
5. Shchekinov Y. A., Vasiliev E. O. Formation of HD molecules in merging dark matter haloes // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2006. Vol. 368. P. 454–460.
6. Shchekinov Y. A., Vasiliev E. O. Particle decay in the early Universe: predictions for 21 cm // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2007. Vol. 379. P. 1003–1010.
7. Vasiliev E. O., Shchekinov Y. A. Low-temperature primordial gas in merging halos // *Astronomische Nachrichten.* 2008. Vol. 329. P. 625–631.
8. Vasiliev E. O., Vorobyov E. I., Shchekinov Y. A. First supernovae in dwarf protogalaxies // *Astron. and Astrophys.* 2008. Vol. 489. P. 505–515.
9. Васильев Е.О., Дедиков С.Ю., Щекинов Ю.А. Химическая неоднородность постреионизационной Вселенной // *Астрофиз. Бюлл.* 2009. Т. 64. С. 333–340.
10. Васильев Е.О., Воробьев Э.И., Щекинов Ю.А. Охлаждение вращающихся протогалактик // *Астрон. журн.* 2010. Т. 87. С. 967–978.
11. Vasiliev E. O., Sethi S. K., Nath B. B. Carbon Ionization States and the Cosmic Far-UV Background with He II Absorption // *Astrophys. J.* 2010. Vol. 719. P. 1343–1349.
12. Vasiliev E. O. Non-equilibrium ionization states and cooling rates of photoionized enriched gas // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2011. Vol. 414. P. 3145–3157.
13. Vasiliev E. O., Sethi S. K., Nath B. B. Nonequilibrium carbon ionization states and the extragalactic far-UV background with HeII absorption // *Astron. Space Sci.* 2011. Vol. 335. P. 211–215.
14. Vasiliev E. O. Thermal instability in a collisionally cooled gas // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2012. Vol. 419. P. 3641–3648.
15. Васильев Е.О., Щекинов Ю.А. Наблюдательные проявления первых протогалактик в линии 21 см // *Астрон. журн.* 2012. Т. 89. С. 99–106.
16. Васильев Е.О., Воробьев Э.И., Разумов А.О., Щекинов Ю.А. Неустойчи

ности в зонах ионизации вокруг первых звезд // Астрон. журн. 2012. Т. 89. С. 624–632.

17. Васильев Е.О., Воробьев Э.И., Матвиенко Е.Е. и др. Эволюция первых сверхновых в протогалактиках: динамика перемешивания тяжелых элементов // Астрон. журн. 2012. Т. 89. С. 987–1007.
18. Vasiliev E. O. Non-equilibrium cooling rate for a collisionally cooled metal-enriched gas // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2013. Vol. 431. P. 638–647.
19. Vasiliev E. O., Shchekinov Y. A. The Signatures of Particle Decay in 21 cm Absorption from the First Minihalos // Astrophys. J. 2013. Vol. 777. P. 8-17.
20. Vasiliev E. O., Sethi S. K. H I Absorption from the Epoch of Reionization and Primordial Magnetic Fields // Astrophys. J. 2014. Vol. 786. P. 142-149.
21. Васильев Е.О., Щекинов Ю.А. Выброс пыли из гало темной материи при больших красных смещениях // Астрон. журн. 2014. Т. 91. С. 583–591.
22. Васильев Е.О. Ионы тяжелых элементов в эпоху реионизации гелия // Астрон. журн. 2014. Т. 91. С. 1069–1082.
23. Vasiliev E. O., Nath B. B., Shchekinov Y. Evolution of multiple supernova remnants // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2015. Vol. 446. P. 1703–1715.
24. Vasiliev E. O., Ryabova M. V., Shchekinov Y. A. Extended O VI haloes of star-forming galaxies // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2015. Vol. 446. P. 3078–3088.
25. Королев В.В., Васильев Е.О., Коваленко И.Г., Щекинов Ю.А. Динамика оболочки сверхновой в облачной межзвездной среде // Астрон. журн. 2015. Т. 92. С. 559–577.

На автореферат поступили отзывы:

1. Вибе Дмитрий Зигфридович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом физики и эволюции звезд Института астрономии РАН
2. Вошинников Николай Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры астрофизики Санкт-Петербургского государственного

университета.

3. Зинченко Игорь Иванович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом Института прикладной физики РАН
4. Сулейманов Валерий Фиалович, доктор физико-математических наук, инженер-проектировщик кафедры астрономии и геодезии Казанского (Приволжского) федерального университета.

Все отзывы положительны.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается темой исследования, высокой компетентностью в вопросах, рассматриваемых в диссертационной работе.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- указано на увеличение эффективности перемешивания тяжелых элементов в первых протогалактиках при схлопывании остатка сверхновой и на возможность образования звезд следующего поколения с металличностью выше значения "критической металличности";
- определены условия для появления высокой концентрации иона кислорода OVI в газе под действием галактического и внегалактического ионизирующего излучения;
- указано, что при учете эффектов развивающихся гидродинамических неустойчивостей в оболочке сверхновой тепловая энергия падает значительно эффективней, чем следует из привычных представлений, основанных на одномерных сферически симметричных расчетах;
- найдено масштабное соотношение между эффективностью нагрева газа сверхновыми до рентгеновских температур, темпом вспышек сверхновых и плотностью окружающего газа;
- предсказана временная задержка между началом вспышки звездообразования и активацией галактического ветра, возникающего в

результате коллективного действия вспышек сверхновых.

Предложены новые подходы к исследованию процессов обмена между галактиками и окологалактической средой. Показана необходимость использования не стационарных моделей химической кинетики как для газа с первичным химическим составом, так и обогащенного тяжелыми элементами.

Теоретическая значимость исследования обоснована использованием не стационарного подхода к изучению процессов в межзвездной и межгалактической средах. Применительно к проблематике диссертации результативно использованы численные методы решения уравнений химической кинетики и газовой динамики. Разработаны компьютерные программы для расчета: (а) термохимической эволюции первичного газа, (б) неравновесного ионного состава обогащенного фотоионизованного газа, (в) переноса в линии 21 см атомарного водорода, (г) динамики газа и тяжелых элементов. Получены условия применимости равновесных функций охлаждения в фотоионизованном обогащенном тяжелыми элементами газе. Изучено влияние развивающихся гидродинамических неустойчивостей в оболочке сверхновой на эффективность потерь энергии в одномерных и многомерных газодинамических расчетах.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что созданные комплексы компьютерных программ для расчета неравновесного ионного состава обогащенного фотоионизованного газа использованы при анализе наблюдений абсорбционных систем линий металлов в спектрах квазаров, функций охлаждения и нагрева в численном моделировании динамики газа за фронтами ударных волн (в Южном и Уральском федеральных университетах, Волгоградском государственном университете, Институте астрономии РАН, Исследовательском институте им. Рамана, Миланском университете). Проведенные расчеты глобального фонового сигнала и флуктуаций яркостной температуры в линии 21 см атомарного водорода в эпоху вторичной ионизации водорода позволят получить ограничения на параметры незвездных источников ионизации и нагрева, планировать наблюдения в метровом диапазоне с помощью существующих и проектируемых радиоинтерферометров, напри

мер, LOFAR, MWA, SKA. Показана необходимость использования неравновесных фотоионизационных моделей для адекватной интерпретации наблюдательных данных абсорбционных систем в около- и межгалактической средах. Рассчитанные неравновесные функции охлаждения для столкновительного газа в широком интервале температуры и металличности могут использоваться для исследования динамики газа за фронтами сильных ударных волн. Заключение о более эффективных потерях энергии при взаимодействии оболочек сверхновых с неоднородной средой имеет важное значение для интерпретации наблюдений остатков сверхновых и галактических ветров. Полученные данные и разработанные программы могут быть использованы и в образовательном процессе.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- результаты расчетов термохимической эволюции газа с первичным химическим составом многократно воспроизводились и подтверждены другими авторами;
- разработанные программные комплексы для моделирования ионизационной и тепловой эволюции газа, обогащенного тяжелыми элементами и находящегося в поле фонового излучения, тестировались путем сравнения с предыдущими результатами и подтверждены в последующих работах других авторов;
- программные пакеты для моделирования эволюции барионов в протогалактиках, движения радиационных и ударных фронтов, динамики остатков сверхновых успешно прошли все основные тесты для газодинамических течений;
- результаты диссертации апробированы на международных и российских конференциях.

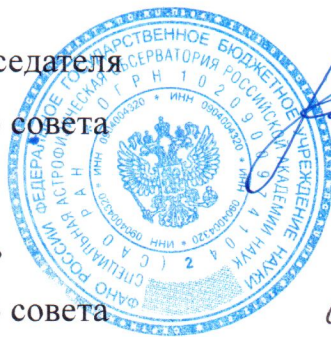
Личный вклад соискателя состоит в постановке задач и написании основного текста большинства статей, проведении численных расчетов, участии в интерпретации результатов. Стоит отметить, что пять работ написано без соавторов.

основного текста большинства статей, проведении численных расчетов, участии в интерпретации результатов. Стоит отметить, что пять работ написано без соавторов.

На заседании 16 октября 2015 г. диссертационный совет принял решение присудить Васильеву Евгению Олеговичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 12 докторов наук по специальности 01.03.02, участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 13, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета



Клочкова В.Г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Шолухова О.Н.