

СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

УДК 524.7-8



Васильев Евгений Олегович

**Процессы энерго- и массообмена между
галактиками и окологалактической
средой**

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Архыз – 2015

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
заведующий астрофизическим отделом,
зам. директора ГАО РАН

доктор физико-математических наук, профессор
Иванчик Александр Владимирович
старший научный сотрудник
ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН

доктор физико-математических наук, профессор
Чернин Артур Давидович
главный научный сотрудник отдела
внегалактической астрономии ГАИШ МГУ

Ведущая организация: Астрокосмический центр Физического
института им. П.Н.Лебедева РАН

Защита состоится 16 октября 2015 г. в 09:00 часов на открытом заседании Диссертационного совета Д002.203.01 при Специальной Астрофизической Обсерватории РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос.Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

кандидат физико-математических наук  О.Н. Шолухова

Актуальность работы

Активность звездного населения галактик приводит к наблюдаемому обмену массой и энергией между межзвездной и межгалактической средами [1]. Считается, что рождение первых звезд положило начало вторичной ионизации Вселенной и обогащению окологалактического вещества тяжелыми элементами (металлами) [2]. В свою очередь процессы нагрева, реионизации и потери массы способствуют фотоиспарению газа и подавлению звездообразования в карликовых галактиках [2]. Очевидно, что это многообразное взаимодействие в значительной степени зависит от физических свойств первых звезд, а в общем, от способности газа эффективно охлаждаться [2]. Любые возможности, приводящие к увеличению концентрации молекул водорода или появлению других вероятных агентов охлаждения газа, оказывают влияние на динамику реионизации и обогащения вещества продуктами звездного нуклеосинтеза, то есть на процессы энерго- и массообмена.

Современные измерения анизотропии реликтового излучения допускают существование нестабильных частиц темной материи и первичных магнитных полей [3, 4]. Эти дополнительные незвездные источники могут давать свой, пусть и не основной, вклад в реионизацию и нагрев вещества во Вселенной [5], приводить к подавлению или стимулированию звездообразования до эпохи реионизации и тем самым менять историю обогащения металлами газа во Вселенной.

В наблюдениях систем поглощения (от Ly α леса до насыщенных систем) в спектрах квазаров металлы обнаруживаются вплоть до красных смещений $z \sim 6$ [6]. Причем в последние несколько лет найдено значительное количество металлов в окологалактической среде на расстояниях $\sim 100 - 150$ кпк от галактик [7], а пыли – вплоть до Мпк [8]. Определенно это может привести к решению хорошо известных проблем скрытых барионов и металлов (например, [9]). Кроме того, в межзвездном и межгалактическом газе выделены существенные пространственные вариации металличности (например, [10]), что свидетельствует о неполном перемешивании металлов в процессе обогащения [11]. Новые данные о лучевых концентрациях ионов металлов в протяженных гало приводят к высоким требованиям эффективности обмена массой и энергией между гало и диском даже для галактик с активным звездообразованием

[7]. Для интерпретации этих наблюдений используются равновесные модели фотоионизации, хотя давно известно о существенном отличии равновесного ионного состава от эволюционного (например, [12]), что вполне может привести к некорректным выводам о температуре и плотности газа и, как следствие, о массе металлов и размере областей поглощения.

Обмен энергией, массой газа и металлов между галактиками и окружающей средой неразрывно связан с газовыми и пылевыми истечениями [1, 13]. Постепенное накопление данных о распределении металлов и пыли вокруг галактик привело к пониманию, что традиционные методики численного моделирования галактических ветров, в частности, использование понятия механической светимости, не позволяют объяснить в достаточной мере причины и условия зарождения ветров [14].

Все перечисленные процессы энерго- и массообмена требуют внимательного рассмотрения с целью предсказания возможных наблюдательных проявлений, важных, в том числе, и для планирования наблюдений, в результате создания целостной картины взаимодействия галактик со своим окружением.

Цель работы – 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.

- Изучение формирования первых объектов во Вселенной от сжатия протогалактики до вспышек сверхновых и обогащения газа тяжелыми элементами.
- Исследование влияния нестандартных источников ионизации и нагрева на тепловую и ионизационную эволюцию газа на красных смещениях $z \sim 10 - 50$ и сопутствующих наблюдательных проявлений в линии 21 см атомарного водорода.
- Исследование нестационарных процессов ионизации и охлаждения астрофизической плазмы с целью интерпретации наблюдательных данных по абсорбционным системам в окологалактической среде.

- Определение условий для зарождения галактических ветров.

Научная новизна работы

Все результаты, выносимые на защиту, являются новыми.

1. Определены условия для эффективного образования молекул HD за фронтами ударных волн в первичном газе.
2. Показано, что существование нестабильных частиц темной материи в пострекомбинационной Вселенной проявляется в свойствах глобального сигнала, флуктуациях яркостной температуры и статистики абсорбционных систем (или "леса") в линии 21 см атомарного водорода.
3. Впервые 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".
4. Указаны интервалы применимости равновесных функций охлаждения в фотоионизованном обогащенном тяжелыми элементами газе.
5. Впервые найдены условия для развития тепловой неустойчивости, обусловленной образованием молекулярного водорода в низкометаллическом, $[Z/H] \lesssim -2$, столкновительном газе, охлаждающемся от высоких температур $T \gtrsim 10^5$ К. Обнаружено, что запаздывание рекомбинации водорода способствует развитию тепловой неустойчивости в газе с металличностью $Z \gtrsim Z_{\odot}$.
6. Впервые определены условия для появления высокой концентрации иона кислорода OVI в газе под действием галактического и внегалактического ионизирующего излучения.
7. Впервые 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 (например, [15]).
8. 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 ре-

зультате коллективного действия вспышек сверхновых.

Научная и практическая значимость работы

1. Полученные оценки массы газа, охлаждаемого молекулами HD, при слияниях протогалактик могут быть использованы для планирования миллиметровых наблюдений газа до эпохи реионизации. Расчеты скорости звездообразования, ассоциированной с охлаждением газа в линиях HD, могут применяться для оценки вероятности наблюдений маломассивных экстремально малометаллических звезд в Галактике.
2. Проведенные расчеты глобального фонового сигнала и флуктуаций яркостной температуры в линии 21 см атомарного водорода на красных смещениях $z \sim 10 - 20$ могут быть использованы для интерпретации и планирования наблюдений в метровом диапазоне с помощью существующих и проектируемых радиоинтерферометров, например, LOFAR, MWA, SKA.
3. Показано, что исследование статистики абсорбционных систем в линии 21 см HI от первых протогалактик – леса в линии 21 см, в том числе и в широкополосных наблюдениях, позволит получить ограничения на незвездные источники ионизации и нагрева в пострекомбинационной Вселенной. В частности, могут быть получены ограничения на величину первичных магнитных полей в случае если магнитные поля приводят к дополнительным флуктуациям плотности.
4. В результате численного моделирования вспышек сверхновых в первых протогалактиках найдено, что при взрывах сверхновых с энергией, $E \lesssim 3 \times 10^{52}$ эрг, в сферической протогалактике $M \sim 10^7 M_{\odot}$ на $z \sim 12$ после расширения оболочка сверхновой схлопывается и эффективность перемешивания тяжелых элементов заметно усиливается. Причем наибольшая масса обогащенного газа имеет металличность $[Z/H] \sim -(3.5 - 2)$, что выше критического значения $[Z/H]_{cr} \sim -3.5$, при котором металлы начинают доминировать в охлаждении над молекулами водорода. Следовательно, в эпоху до реионизации вероятно рождение звезд с металличностью, близкой к характерным значениям для современных звезд в гало Галактики.
5. Найдены условия применимости равновесных фотоионизацион-

ных моделей и показана необходимость использования неравновесных фотоионизационных моделей для адекватной интерпретации наблюдательных данных абсорбционных систем в около- и межгалактической средах. Получены менее жесткие ограничения на эффективность обмена массой (в частности, металлов) и энергией между диском и гало галактик.

6. Рассчитанные неравновесные функции охлаждения для столкновительного газа в широком интервале температуры и металличности могут использоваться для исследования динамики газа за фронтами сильных ударных волн, в частности, при изучении остатков сверхновых и галактических истечений.

7. Полученное масштабное соотношение, связывающее эффективность нагрева газа до рентгеновских температур и темп вспышек сверхновых, условия для перколяции горячего газа и предсказание задержки между началом вспышки звездообразования и иницированием ветра имеют важное практическое значение для понимания наблюдений галактических истечений.

8. Заключение о более эффективных потерях энергии при взаимодействии оболочек сверхновых с неоднородной средой имеет важное значение для интерпретации наблюдений остатков сверхновых и галактических ветров.

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. Часть из них используется в настоящее время в Южном и Уральском федеральных университетах, Волгоградском государственном университете, Институте астрономии РАН, Исследовательском институте им. Рамана (Индия), Миланском университете (Италия).

Достоверность полученных результатов

Расчеты термохимической эволюции газа с первичным химическим составом сравнивались с результатами хорошо известных работ (например, [16]) и многократно воспроизводились и подтверждены другими авторами (например, [17, 18]).

Разработанные программные комплексы для моделирования ионизационной и тепловой эволюции газа, обогащенного тяжелыми элементами и находящегося в поле фонового излучения, тестировались путем сравнения с результатами расчетов других авторов (например, [12]), и подтверждены в последующих работах других авторов (например, [19, 20]).

Программные пакеты для моделирования эволюции барионов в протогалактиках, движения радиационных и ударных фронтов, динамики остатков сверхновых успешно прошли все основные тесты для газодинамических течений [21]. Результаты численного моделирования были подтверждены последующими работами других авторов [22, 23].

Некоторые результаты в работе получены с помощью хорошо проверенных программных пакетов других авторов: для расчета части равновесных фотоионизационных моделей использовался пакет CLOUDY, для исследования газодинамических течений – ZEUS-MP, для расчета спектрофотометрической эволюции звездных систем – PEGASE, для изучения динамики рекомбинации водорода – RECFAST.

Положения выносимые на защиту

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 ($M \gtrsim 120M_{\odot}$) приводят к обогащению межгалактической среды. Менее массивные звезды ($M \lesssim 40M_{\odot}$) обогащают тяжелыми элементами газ родительской протогалактики и стимулируют образование звезд следующего поколения с металличностью $[Z/H] \sim -(3.5 - 2)$, превышающей значение "критической металличности" $[Z/H]_{\text{cr}} \sim -3.5$.

4. Равновесные функции охлаждения фотоионизованного обогащенного тяжелыми элементами газа применимы только при низкой металличности 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.

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано:

в рецензируемых журналах

1. Shchekinov Y. A., Vasiliev E. O. Primordial star formation triggered by UV photons from UHECR // Astron. and Astrophys. 2004. Vol. 419. P. 19–23.
2. Васильев Е.О., Щекинов Ю.А. Вклад молекул HD в охлаждение первичного газа // Астрофиз. 2005. Т. 48. С. 585–601.
3. Васильев Е.О., Щекинов Ю.А. Влияние космических лучей сверхвысоких энергий на звездообразование в ранней Вселенной // Астрон. журн. 2006. Т. 83. С. 872–879.

4. 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.
5. 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.
6. Vasiliev E. O., Shchekinov Y. A. Low-temperature primordial gas in merging halos // *Astronomische Nachrichten.* 2008. Vol. 329. P. 625–631.
7. Vasiliev E. O., Vorobyov E. I., Shchekinov Y. A. First supernovae in dwarf protogalaxies // *Astron. and Astrophys.* 2008. Vol. 489. P. 505–515.
8. Васильев Е.О., Дедиков С.Ю., Щекинов Ю.А. Химическая неоднородность постреионизационной Вселенной // *Астрофиз. бюл.* 2009. Т. 64. С. 333–340.
9. Васильев Е.О., Воробьев Э.И., Щекинов Ю.А. Охлаждение вращающихся протогалактик // *Астрон. журн.* 2010. Т. 87. С. 967–978.
10. 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.
11. 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.
12. Vasiliev E. O., Sethi S. K., Nath B. B. Nonequilibrium carbon ionization states and the extragalactic far-UV background with HeII absorption // *Asron. Space Sci.* 2011. Vol. 335. P. 211–215.
13. Vasiliev E. O. Thermal instability in a collisionally cooled gas // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2012. Vol. 419. P. 3641–3648.
14. Васильев Е.О., Щекинов Ю.А. Наблюдательные проявления первых протогалактик в линии 21 см // *Астрон. журн.* 2012. Т. 89. С. 99–106.

15. Васильев Е.О., Воробьев Э.И., Разумов А.О., Щекинов Ю.А. Неустойчивости в зонах ионизации вокруг первых звезд // Астрон. журн. 2012. Т. 89. С. 624–632.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Васильев Е.О., Щекинов Ю.А. Выброс пыли из гало темной материи при больших красных смещениях // Астрон. журн. 2014. Т. 91. С. 583–591.
21. Васильев Е.О. Ионы тяжелых элементов в эпоху реионизации гелия // Астрон. журн. 2014. Т. 91. С. 1069–1082.
22. Vasiliev E. O., Nath B. B., Shchekinov Y. Evolution of multiple supernova remnants // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2015. Vol. 446. P. 1703–1715.
23. 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.
24. 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.

в рецензируемых изданиях и сборниках

25. Vasiliev E. O., Shchekinov Y. A. Additional sources of ionization in the early universe and the 21cm line // Highlights of Astronomy. 2007. Vol. 14. P. 267–267.
26. Vasiliev E. O., Shchekinov Y. A. Critical Metallicity for Post-Pop III Stars // EAS Publications Series / Ed. by E. Emsellem, H. Wozniak, G. Massacrier et al. Vol. 24 of EAS Publications Series. 2007. P. 295–296.
27. Vasiliev E. O., Shchekinov Y. A. Critical Metallicity for Population II Stars // Odessa Astronomical Publications. 2008. Vol. 21. P. 139-140.
28. Щекинов Ю.А., Шустов Б.М., Васильев Е.О., Дедиков С.Ю., Перемешивание металлов и скрытые барионы в межгалактической среде // Труды конференции «Ультрафиолетовая Вселенная» (19-20 мая, 2008, Москва, Институт астрономии РАН) под ред. Б.М. Шустова, М.Е. Сачкова, Е.Ю. Кильпио. Москва, Изд-во Янус-К, 2008, с. 229-238.
29. Vasiliev E. O., Vorobyov E. I., Shchekinov Yu. A., First Supernovae in Dwarf Protogalaxies, // Odessa Astronomical Publications. 2008. Vol. 21. P. 135-139.
30. Matvienko E. E., Vasiliev E. O., Shchekinov Y. A. Formation of Small-Scale Structures in the Interstellar Medium // Odessa Astronomical Publications. 2008. Vol. 21. P. 70-73.
31. Dedikov S. Y., Shchekinov Y. A., Vasiliev E. O. Mixing Metals Under Stripping Galactic Gaseous Haloes: Radiative Losses // Odessa Astronomical Publications. 2008. Vol. 21. P. 33-34.
32. Dedikov S. Y., Shchekinov Y. A., Vasiliev E. O. Peculiarities of Mixing Metals in Intergalactic and Interstellar Media // Odessa Astronomical Publications. 2008. Vol. 21. P. 29-32.
33. Васильев Е.О., Воробьев Э.И., Щекинов Ю.А., Первые сверхновые в карликовых протогалактиках, // Труды конференции «Субпарсекковые структуры в межзвездной среде» (4-5 июля, 2007, Москва, ГАИШ МГУ) под ред. Н.Г. Бочкарева, Ю.А. Щекинова. Ростов-на-Дону, Изд-во РСЭИ, 2008, с. 189-194

34. Матвиенко Е.Е., Дедиков С.Ю., Васильев Е.О., Мелкомасштабные структуры, возникающие при разрушении межзвездных облаков, // Труды конференции «Субпарсекковые структуры в межзвездной среде» (4-5 июля, 2007, Москва, ГАИШ МГУ) под ред. Н.Г. Бочкарева, Ю.А. Щекинова. Ростов-на-Дону, Изд-во РСЭИ, 2008, с. 130-132.
35. Дедиков С.Ю., Васильев Е.О., Матвиенко Е.Е., Перенос химических неоднородностей по масштабам при столкновении межзвездных облаков // Труды конференции «Субпарсекковые структуры в межзвездной среде» (4-5 июля, 2007, Москва, ГАИШ МГУ) под ред. Н.Г. Бочкарева, Ю.А. Щекинова. Ростов-на-Дону, Изд-во РСЭИ, 2008, с. 126-129.
36. Щекинов Ю.А., Васильев Е.О., Критическая металличность: переход от звезд населения III // Труды конференции «Химическая и динамическая эволюция галактик» (28-30 сентября, 2009, Ростов-на-Дону, ЮФУ) под ред. Н.Г. Бочкарева, Ю.А. Щекинова. Ростов-на-Дону, Изд-во РСЭИ, 2010, с. 217-223.
37. Васильев Е.О., Кабанов А.А., Шустов Б.М., Щекинов Ю.А., Первые звезды во Вселенной // Сборник статей РФФИ, Москва: Изд-во ЗАО ИТЦ МОЛНЕТ, 2011 с. 40-49.
38. Shchekinov Y. A., Vasiliev E. O., Nath B. B. MgII statistics in GRB and QSO absorptions // Astronomical Society of India Conference Series. Vol. 5 of Astronomical Society of India Conference Series. 2012. P. 135-139.
39. Vasiliev E. O. Ionization state of the interstellar medium in GRB host galaxies // Astronomical Society of India Conference Series. Vol. 5 of Astronomical Society of India Conference Series. 2012. P. 129-133.
40. Shchekinov Y. A., Vasiliev E. O. Enrichment history of the universe as seen from GRB statistics // Astronomical Society of India Conference Series. Vol. 5 of Astronomical Society of India Conference Series. 2012. P. 41-47.

41. Vasiliev E. O., Ryabova M. V., Shchekinov Y. A. The Ionized Gas Around Starforming Galaxies // *Odessa Astronomical Publications*. 2013. Vol. 26. P. 219-221.
42. Vasiliev E. O., Ryabova M. V., Shchekinov Y. A. Ionized oxygen around starforming galaxies // *Mem. Soc. Astron. It.*. 2014. Vol. 85. P. 335-338.
43. Васильев Е.О., Еремин М.А., Королев В.В., Численные модели межзвездной и межгалактической сред: неравновесная химическая кинетика в газовой динамике // *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика.* №6 (25) 2014 , с. 6-17

Основные результаты диссертации опубликованы в 43 работах общим объемом 341 страница, 38 работ написаны совместно с другими авторами.

Апробация работы.

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на семинарах кафедры физики космоса РГУ и ЮФУ, Института Астрономии РАН, Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, обсерватории университета Тарту (Тыравере, Эстония), Астрономического института Рурского университета (Бохум, Германия), Института им. Рамана (Бангалор, Индия) и следующих 25 российских и 18 международных конференциях и семинарах: Всероссийской астрономической конференции (ВАК, Москва 2004, Казань 2007, Нижний Архыз 2010, Санкт-Петербург 2013), "Актуальные проблемы внегалактической астрономии" (Пушино, 2005, 2012, 2013, 2014, 2015), "Астрофизика высоких энергий" (Москва, 2008, 2012, 2013, 2014), "Cosmology and High Energy Astrophysics (Zeldovich-90)" (Москва, 2004), "Open questions in cosmology: the first billion years" (Гархинг, 2005), "Астрономия-2006" (Санкт-Петербург, 2006), "Chemodynamics-2006" (Лион, 2006), "XXVI Генеральной ассамблеи МАС" (Прага, 2006), "Joint seminar of cosmology and particle physics" (Тарту, 2007), "First stars" (Копенгаген, 2007), "Astrophysics in the LOFAR era" (Эммен, 2007), "Субпарсековые структуры в межзвездной среде" (Москва, 2007), "Первые звезды" (Москва, 2007), "Химическая и динамическая эволюция звезд и

галактик" (Одесса, 2008), "Astrophysics with E-LOFAR" (Гамбург, 2008), "Nearby dwarf galaxies" (Нижний Архыз, 2009), "Non-stationary processes in astrophysics" (Волгоград, 2009), "Chemical enrichment of the intergalactic medium" (Лейден, 2009), "Ultraviolet Universe-2010" (Санкт-Петербург, 2010), "Проблемы физики межзвездной среды" (Волгоград, 2010), "Перенос излучения и спектры объектов межзвездной среды" (Екатеринбург, 2011), "Gamma-ray bursts, the evolution of massive stars and star forming at high red shifts" (Найнитал, 2011), "Galaxies: origin, structure, dynamics and astrophysical discs" (Сочи, 2012), "Тепловая и химическая эволюция межзвездной среды" (Волгоград, 2012), "The low-metallicity ISM: Chemistry, turbulence and magnetic fields" (Геттинген, 2012), "Наблюдаемые проявления эволюции звезд" (Нижний Архыз, 2012), "Галактики привычные и неожиданные" (Ростов-на-Дону, 2013), "The physical link between galaxies and their halos" (Гархинг, 2013), "Астрономия на стыке наук: астрофизика, космология и гравитация, космофизика, радиоастрономия и астробиология" (Одесса, 2013), "Metal production and distribution in the hierarchical universe" (Париж, 2013), "Современная звездная астрономия - 2014" (Ростов-на-Дону, 2014), "Superbubbles. HI holes, and Supershells" (Фрайзинг, 2014), "Галактики" (Ессентуки, 2014), "Астрономия от ближнего космоса до космологических далей" (Москва, 2015).

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы из 359 наименований, 85 рисунков, 11 таблиц. Общий объем диссертации 309 страниц.

Личный вклад.

В всех работах, выполненных в соавторстве, диссертанту принадлежит проведение численных расчетов (кроме [24]), участие в интерпретации результатов, написании текста и обсуждении постановки задачи. В тех публикациях, где диссертант является первым автором, ему также принадлежит постановка задачи и написание основного текста работы (кроме [8,22]). В работе [24] диссертанту принадлежит написание текста, интерпретация данных и участие в постановке задачи. В работах [8,22] диссертанту принадлежит проведение численных расчетов, участие в интерпретации результатов

и написании текста. Пять работ написано без соавторов.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, кратко изложено 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 столкновениях 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. Потери в линиях HD оказываются достаточными, чтобы газ охлаждался вплоть до температуры реликтового излучения, $\sim 2.7(1+z)$ К. В этих условиях масса первых протозвездных облаков уменьшается до $M_J \lesssim 500 - 10^3 M_\odot$ [24], что почти в 10 раз ниже, чем при охлаждении только молекулами H₂. Получена оценка доли массы газа в протогалактиках, при охлаждении которого потери в линиях молекул HD оказываются доминирующими. 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 $z \sim 10$. Отмечается существование двух интервалов масс первых протогалактик, для которых охлаждение газа в линиях молекул HD является определяющим. В частности, ранее в моделях сферически симметричного сжатия первых минигало было получено, что молекулы HD могут влиять на тепловую эволюцию маломассивных гало $M \lesssim 2 \times 10^5 M_\odot$ [25].

Рассмотрена динамическая, тепловая и химическая эволюция газа в протогалактиках массой $M \sim 10^7 M_\odot$ на красных смещениях $z = 12$ с вращательным моментом у газовой компоненты. Найдено, что при вращательном моменте $\lambda \gtrsim 0.005$ в протогалактиках формируется дископодобная структура, увеличивается время охлаждения газа, что задерживает начало рождения первых звезд. Отмечается, что увеличение вращательного момента газа приводит к охлаждению газа до более низкой температуры, $T < 100$ К, при которой в охлаждении доминируют молекулы HD. Исследована устойчивость дискообразных структур в центральных областях протоба-

лактик. Показано, что образовавшийся диск оказывается гравитационно неустойчивым и при увеличении начального вращательного момента протогалактики в диске возможна множественная фрагментация.

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 атомарного водорода, смещенной в метровую область.

Рассматривается роль космических лучей сверхвысоких энергий, произошедших при распаде сверхтяжелых частиц темной материи [26]. Показано, что минимальная масса протогалактик, в которых газ эффективно охлаждается и возможно рождение звезд, уменьшается по сравнению с моделью стандартной рекомбинации – при отсутствии незвездных источников ионизации и нагрева. При этом момент образования этих протогалактик сдвигается в сторону больших красных смещений. Возможными наблюдательными следствиями этого будет, например, рост темпа вспышек сверхновых.

Исследовано влияние космических лучей сверхвысоких энергий и нестабильных частиц темной материи на абсорбционные и эмиссионные свойства линии 21 см атомарного водорода. Показано, что существование дополнительных источников ионизации и нагрева в пострекомбинационной Вселенной приводит к изменению ионизационной и тепловой эволюции барионов и проявляется в характеристиках глобального сигнала и флуктуациях яркостной температуры в линии 21 см атомарного водорода, которые могут быть исследованы с помощью радиоинтерферометров в метровом диапазоне, например, например, Murchison Widefield Array (MWA), Low-Frequency Array (LOFAR) и Square Kilometre Array (SKA).

Исследованы абсорбционные характеристики первых протогалактик в линии 21 см HI как в модели стандартной рекомбинации, так и в присутствии дополнительных источников ионизации и нагрева. Для этого подробно изучена динамика ионизации и нагрева газа, прослежена эволюция абсорбционных свойств протогалактик с учетом влияния нестабильных частиц темной материи и первичных магнитных полей. Найдено, что абсорбционные свойства протогалактик сильно зависят как от массы протогалактик, так и от эволюционного статуса протогалактики заданной массы. Показано,

что присутствие нестабильных частиц приводит к значительному уменьшению оптической толщины и уширению линии 21 см HI.

Изучено влияние первичных магнитных полей на ионизационную и тепловую эволюцию первых протогалактик. Найдено, что наличие первичного магнитного поля $\gtrsim 0.3$ нГс значительно влияет на абсорбционные свойства линии, также меняются статистические свойства "леса" в линии 21 см, что в принципе позволяет получить независимое ограничение на величину первичного магнитного поля на красных смещениях $\sim 10 - 15$. Показано, что дополнительные возмущения поля плотности, связанные с воздействием первичных магнитных полей [27], ведут к росту числа абсорбционных систем в линии 21 см HI на луче зрения.

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 условия возникновения неустойчивостей в зонах ионизации. Показано, что неустойчивости Релея-Тейлора и тепловая эффективно развиваются в зонах ионизации вокруг звезд с массами $25 - 40 M_\odot$. Изучены свойства распределения тяжелых элементов (металлов), произведенных в родительской звезде, и эффективность их перемешивания с первичным газом в остатке сверхновой. Найдено, что для взрывов сверхновой с высокими энергиями, $E > 5 \times 10^{52}$ эрг, характерна очень низкая эффективность перемешивания металлов, для менее энергетичных, $E \lesssim 3 \times 10^{52}$ эрг, сверхновых эффективность перемешивания тяжелых элементов заметно выше из-за быстрого охлаждения оболочки и ее схлопывания. Найдено, что при схлопывании оболочки сверхновой металличность газа в центральной области протогалактики заметно выше, $[Z/H] \sim -(1 - 0)$, чем на периферии $[Z/H] \sim -(2 - 4)$, причем наибольшая масса обогащенного газа имеет металличность $[Z/H] \sim -(3.5 - 2)$, что выше критического значения $[Z/H]_{cr} \sim -3.5$, при котором металлы начинают доминировать в охлаждении над молекулами водорода [28].

В четвертой главе изучен неравновесный (зависящий от времени) ионный состав и функции охлаждения газа, обогащенного тяжелыми элементами и находящегося в поле внешнего ионизирующего (ультрафиолетового и рентгеновского) излучения. Найден диапазон применимости равновесных фотоионизационных моделей

для межзвездной и межгалактической среды. 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.

Проведены расчеты неравновесного ионного состава и функций охлаждения газа за фронтами ударных волн 50-150 км/с. Найдено, что функции охлаждения газа за фронтом ударных волн 50 – 120 км/с существенно отличаются от темпа потерь энергии в случае охлаждения от $T \sim 10^8$ К, который обычно приводится в таблицах (например, [12]). Концентрации ионов в равновесном и неравновесном газе, охлаждающимся от $T > 10^6$ К, отличаются в несколько раз, а за фронтами ударных волн с $T \lesssim 5 \times 10^5$ К их отношение может достигать десятков раз.

Изучена тепловая неустойчивость за фронтом ударных волн со скоростями 50-150 км/с и найдено, что температурный интервал, в котором газ оказывается термически неустойчивым, существенно изменяется по сравнению со случаем охлаждения газа от $T \sim 10^8$ К [12]. Показано, что при металличности выше $0.1 Z_{\odot}$ область температур, в которой критерий тепловой неустойчивости для изохорических возмущений не выполняется, значительно расширяется, а при солнечной металличности газ за фронтом ударных волн со скоростями меньше 65 км/с оказывается термически устойчивым. Для изобарических возмущений интервал неустойчивости остается практически без изменений.

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.

Исследованы статистические характеристики пространственного распределения металлов в межгалактической среде на начальных этапах ее обогащения в условиях, когда перемешивание определяется неустойчивостями Кельвина-Гельмгольца и Релея-Тейлора. Найдено, что насыщение неустойчивостей, обусловленное затуха-

нием относительных движений газовых потоков, приводит к неполному перемешиванию, так что на малых масштабах выделяются области с высокой (практически начальной) металличностью.

Исследован ионный состав межгалактического газа в эпоху вторичной ионизации гелия, $z \sim 3$. Проведены вычисления неравновесного ионного состава, функций охлаждения и нагрева межгалактического газа, обогащенного тяжелыми элементами и находящегося в поле фонового ультрафиолетового излучения от галактик и квазаров. Рассмотрены внегалактические спектры, соответствующие разным сценариям вторичной ионизации. Проведен статистический анализ соотношений ионов тяжелых элементов, выполнено сравнение с существующими наблюдательными данными в абсорбционных системах квазаров [29], получены ограничения на физические свойства в этих абсорбционных системах, а также предпринята попытка получить ограничения на модель вторичной ионизации гелия во Вселенной. Проведенный статистический анализ показал, что модели спектров с запаздывающей реионизацией [30] не соответствуют наблюдательным данным.

В рамках неравновесного подхода рассмотрена тепловая и ионизационная эволюция около- и межгалактического газа в эпоху реионизации гелия HeII. Исследовано как поглощение в линиях и континууме HeII влияет на ионные состояния металлов и отношения их лучевых концентраций в диффузном ($T \lesssim 10^5$ К) около- и межгалактическом газе, облучаемом ионизирующим излучением со степенным спектром, характерным для квазаров, искаженным поглощением в HeII, и внегалактическим фоновым излучением [30]. Подтверждено, что отношения лучевых концентраций ионов CIII/CIV и SiIII/SiIV являются хорошими индикаторами поглощения в резонансных линиях гелия, $\sim 40 - 54$ эВ, и что отношение SiIV/CIV слабо зависит от изменений спектра в этом диапазоне энергий. Найдено, что отношение OIII/OIV оказывается наиболее многообещающим индикатором поглощения HeII в континууме, $\sim 54 - 150$ эВ.

Исследована ионизационная и тепловая эволюция окологалактического газа, находящегося в поле изменяющегося во времени ионизирующего излучения от ближайшей галактики со звездообразованием и почти постоянного (на временах около 100 млн. лет) внегалактического фона излучения. Определены условия для появления высокой концентрации иона кислорода OVI в спектрах погло-

щения в протяженных гало галактик с активным звездообразованием. Найдено, что наблюдаемые лучевые концентрации OVI можно получить и при более низкой металличности газа, чем предполагалось в работе [7]. Получена более консервативная оценка массы кислорода в протяженных гало, чем в работе [7].

В шестой главе рассмотрены условия, необходимые для возникновения галактических ветров. В рамках трехмерной газодинамической модели исследованы динамика множественных вспышек сверхновых, перекрывающихся между собой, эволюция эффективности нагрева межзвездной среды и объемного фактора заполнения горячим газом. Найдено, что для высокой эффективности и большого фактора заполнения остатки сверхновых должны быть сгруппированы во времени и пространстве, остатки сверхновых должны продолжать расширяться до тех пор пока горячий газ не достигнет перколяции во всей области звездообразования, для того, чтобы скомпенсировать потери энергии при радиационном охлаждении. Отмечается, что при эффективном развитии гидродинамических неустойчивостей в оболочке сверхновой тепловая энергия падает согласно $E_t \sim t^{-2.3}$, что значительно эффективней, чем следовало из ранее проведенных одномерных расчетов (например, [15]).

Найдено, что для случая постоянной скорости звездообразования горячий газ ($T \geq 10^{6.5}$ К) достигает перколяции при факторе заполнения выше 0.3. В серии трехмерных моделей оценена эффективность нагрева газа, объемные факторы заполнения газа в различных температурных интервалах. Эффективность нагрева газа до $T \geq 10^{6.5}$ К может быть выше 0.1 после наступления перколяции, которая начинается ~ 10 млн.лет для типичной частоты вспышек сверхновых $\nu_{\text{SN}} \approx 10^{-9}$ пк $^{-3}$ год $^{-1}$ и плотности газа $n \approx 10$ см $^{-3}$ в областях звездообразования. В более общем случае показано, что эффективность нагрева выше $10^{6.5}$ К меняется примерно как $\nu_{\text{SN}}^{0.2} n^{-0.6}$. Найденная оценка времени, необходимого для наступления перколяции горячего газа, согласуется с наблюдениями [31], в которых обнаружена задержка ~ 10 млн. лет между началом звездообразования и активацией галактического ветра. Обсуждаются возможные наблюдательные особенности соотношений ионов, измеряемых в центральных областях галактик со звездообразованием.

В заключении сформулированы выводы.

В приложении кратко описаны численные методы, модели

химической кинетики и тепловой эволюции газа, начальные условия, используемые при решении задач.

Цитированная литература

1. Veilleux S., Cecil G., Bland-Hawthorn J. Galactic Winds // *An. Rev. Astron. Astrophys.* 2005. Vol. 43. P. 769–826.
2. Ciardi B., Ferrara A. The First Cosmic Structures and Their Effects // *Space Sci. Rev.* 2005. Vol. 116. P. 625–705.
3. Yang Y. Constraints on the basic parameters of dark matter using the Planck data // *Phys. Rev. D.* 2015. Vol. 91, no. 8. P. 083517.
4. Paoletti D., Finelli F. Constraints on a stochastic background of primordial magnetic fields with WMAP and South Pole Telescope data // *Physics Letters B.* 2013. Vol. 726. P. 45–49.
5. Schleicher D. R. G., Banerjee R., Klessen R. S. Reionization: A probe for the stellar population and the physics of the early universe // *Phys. Rev. D.* 2008. Vol. 78, no. 8. P. 083005.
6. Songaila A. The Minimum Universal Metal Density between Redshifts of 1.5 and 5.5 // *Astrophys. J. Let.* 2001. Vol. 561. P. L153–L156.
7. Tumlinson J., Thom C., Werk J. K. et al. The Large, Oxygen-Rich Halos of Star-Forming Galaxies Are a Major Reservoir of Galactic Metals // *Science.* 2011. Vol. 334. P. 948–.
8. Ménard B., Scranton R., Fukugita M., Richards G. Measuring the galaxy-mass and galaxy-dust correlations through magnification and reddening // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2010. Vol. 405. P. 1025–1039.
9. Bregman J. N. The Search for the Missing Baryons at Low Redshift // *An. Rev. Astron. Astrophys.* 2007. Vol. 45. P. 221–259.
10. Simcoe R. A., Sargent W. L. W., Rauch M., Becker G. Observations of Chemically Enriched QSO Absorbers near $z \sim 2.3$ Galaxies: Galaxy Formation Feedback Signatures in the Intergalactic Medium // *Astrophys. J.* 2006. Vol. 637. P. 648–668.
11. Дедиков С.Ю., Щекинов Ю.А. Перемешивание металлов при обдирании газовых гало галактик // *Астрон. журн.* 2004. Т. 81. С. 11–23.
12. Sutherland R. S., Dopita M. A. Cooling functions for low-density astrophysical plasmas // *Astrophys. J. Suppl.* 1993. Vol. 88. P. 253–327.
13. Shustov B., Wiebe D., Tutukov A. Evolution of disk galaxies and loss of heavy elements into the intracluster medium. // *Astron. and*

- Astrophys. 1997. Vol. 317. P. 397–404.
14. Nath B. B., Shchekinov Y. Conditions for Supernovae-driven Galactic Winds // [Astrophys. J. Let.](#) 2013. Vol. 777. P. L12.
 15. Cioffi D. F., McKee C. F., Bertschinger E. Dynamics of radiative supernova remnants // [Astrophys. J.](#) 1988. Vol. 334. P. 252–265.
 16. Galli D., Palla F. The chemistry of the early Universe // [Astron. and Astrophys.](#) 1998. Vol. 335. P. 403–420.
 17. Cen R. Formation of First Stars Triggered by Collisions and Shock Waves: Prospect for High Star Formation Efficiency and High Ionizing Photon Escape Fraction // [Astrophys. J.](#) 2005. Vol. 624. P. 485–490.
 18. Prieto J., Jimenez R., Verde L. Overcooled haloes at $z \geq 10$: a route to form low-mass first stars // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2014. Vol. 437. P. 2320–2327.
 19. Oppenheimer B. D., Schaye J. Non-equilibrium ionization and cooling of metal-enriched gas in the presence of a photoionization background // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2013. Vol. 434. P. 1043–1062.
 20. Gnedin N. Y., Hollon N. Cooling and Heating Functions of Photoionized Gas // [Astrophys. J. Suppl.](#) 2012. Vol. 202. P. 13.
 21. Klingenberg C., Schmidt W., Waagan K. Numerical comparison of Riemann solvers for astrophysical hydrodynamics // [Journal of Computational Physics.](#) 2007. Vol. 227. P. 12–35.
 22. Jeon M., Pawlik A. H., Bromm V., Milosavljević M. Recovery from Population III supernova explosions and the onset of second-generation star formation // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2014. Vol. 444. P. 3288–3300.
 23. Kim C.-G., Ostriker E. C. Momentum Injection by Supernovae in the Interstellar Medium // [Astrophys. J.](#) 2015. Vol. 802. P. 99.
 24. 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.
 25. Ripamonti E. The role of HD cooling in primordial star formation // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2007. Vol. 376. P. 709–718.
 26. Kuzmin V. A., Rubakov V. A. Ultrahigh-energy cosmic rays: A window on postinflationary reheating epoch of the Universe? // [Physics of Atomic Nuclei.](#) 1998. Vol. 61. P. 1028–1030.

27. Kim E.-J., Olinto A. V., Rosner R. Generation of Density Perturbations by Primordial Magnetic Fields // *Astrophys. J.* 1996. Vol. 468. P. 28.
28. Bromm V., Loeb A. The formation of the first low-mass stars from gas with low carbon and oxygen abundances // *Nature*. 2003. Vol. 425. P. 812–814.
29. Agafonova I. I., Levshakov S. A., Reimers D. et al. Spectral shape of the UV ionizing background and He II absorption at redshifts $1.8 < z < 2.9$ // *Astron. and Astrophys.* 2007. Vol. 461. P. 893–909.
30. Madau P., Haardt F. He II Absorption and the Sawtooth Spectrum of the Cosmic Far-UV Background // *Astrophys. J. Let.* 2009. Vol. 693. P. L100–L103.
31. Sharp R. G., Bland-Hawthorn J. Three-Dimensional Integral Field Observations of 10 Galactic Winds. I. Extended Phase ($\gtrsim 10$ Myr) of Mass/Energy Injection Before the Wind Blows // *Astrophys. J.* 2010. Vol. 711. P. 818–852.