

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физический
ИНСТИТУТ**



*имени
П.Н.Лебедева*

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, ГСП-1, Москва
Ленинский проспект, 53 ФИАН
Телефон: (495) 135 1429
(495) 135 4264
Телефакс: (495) 135 7880
<http://www.lebedev.ru>

Дата *03.09.15 г.* № *11220-9224 АКЦ-838*

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

Федерального государственного

бюджетного учреждения науки

Физического института им. П. Н. Лебедева

Член-корреспондент РАН



[Signature]
Н. Н. Колачевский

ОТЗЫВ

**ведущей организации на докторскую диссертацию
Е. О. Васильева «Процессы энерго- и массообмена между
галактиками и окологалактической средой»**

В настоящее время, возможно, одной из наиболее **актуальных** проблем 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, особенности обогащения межгалактического газа тяжелыми элементами 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, Заключения, 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 ионизированной 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 $\sim < 40M_{\odot}$ газ остается, в основном, нейтральным. В рамках построенных моделей при взрывах сверхновых с энергией больше либо порядка $5 \cdot 10^{52}$ 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 обеспечиваются 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 определяются 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 CAO 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 и различными степенями свободы затруднена. 4) Строго говоря, отношение удельных теплоемкостей газа, содержащего частицы разных сортов со внутренними степенями свободы, 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 2) замечаний к Главе 3. 2) Кроме того, 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

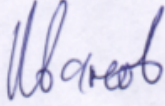
не ошибаюсь, это условие не обсуждается. 2) Кроме того, так как рассматриваемый процесс носит транзитный характер, связанный со вспышкой звездообразования, вероятно, необходимо обсуждать не только условия формирования галактического ветра, но и его интенсивность и длительность для объяснения, скажем, 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.

ведущий научный сотрудник
Астрокосмического центра
Физического Института
им. П.Н. Лебедева
Российской Академии Наук
(АКЦ ФИАН),
д. ф.-м. н.
П. Б. Иванов 

Подпись П. Б. Иванова заверяю

И. О. ученого секретаря
Физического Института
им. П.Н. Лебедева
Российской Академии Наук
к. ф.-м. н.
Топчиев Н. П. 