

## ОТЗЫВ

научного консультанта на диссертацию Евгения Олеговича Васильева  
«Процессы энерго- и массообмена между галактиками  
и окологалактической средой»,  
представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.

Обмен массой и энергией между галактиками и окружающей их средой определяют их собственные наблюдательные и эволюционные свойства, а также свойства Вселенной на больших масштабах. В последние десятилетия преобладающей стала парадигма иерархического формирования галактик путем последовательного сгущивания и слияния мелких структур в большие. В рамках этой парадигмы энерго- и массообмен оказывается определяющим динамическим фактором на всех стадиях эволюции. В диссертации Е.О. Васильева рассмотрены отдельные, наиболее значимые элементы этого глобального процесса, начиная от этапов формирования самых первых звезд в коллапсирующих и сливающихся маломассивных гало темной материи и первых эпизодов звездного нуклеосинтеза, и заканчивая динамикой и наблюдательными свойствами протяженных газовых гало вокруг современных галактик.

Принципиально важным в диссертации Е.О. Васильева является явное построение логики исследования вокруг динамичности и нестационарности вовлеченных в общую картину явлений. В этом смысле весь цикл работ, положенных в основу диссертации, отличен от большинства современных исследований в этом направлении. В качестве примера можно привести исследования «катастрофической» чувствительности термодинамики дозвездного газа от возможности образования в нем молекул HD, каковая определяется в свою очередь отклонениями динамики вириализации гало темной материи от стандартного сценария квазистационарной вириализации. Результатом является возможность образования в ранней Вселенной звезд околосолнечной массы. Другой пример в этом же ряду – учет влияния нестационарности на наблюдательные характеристики абсорбционного “леса”, создаваемого вириализуемыми гало на догалактических красных смещениях в линии 21 см. Оказалось, что особенности “леса” 21 см в нестационарной схеме допускают возможность получения наблюдательных ограничений *снизу* на свойства темной материи, доступных уже сейчас на телескопе *LOFAR*.

Очень ярко эффекты нестационарности проявляются в более близкой Вселенной ( $z < 1$ ), в частности, при определении химического состава горячего газа протяженных корон галактик. Традиционно определение химического состава горячего газа основывается на предположении о его ионизационном равновесии и на сравнении лучевых концентраций различных ионов. В действительности, простые оценки показывают, что в большинстве случаев равновесие отсутствует, и это приводит к существенным искажениям относительной распространенности различных ионов по сравнению с привычным. Соответственно, и определение химического состава, основанное на предположении о равновесной ионизации оказывается ошибочным.

В диссертации Е.О. Васильева выполнено систематическое исследование влияния эффектов нестационарности ионного состава и их влияние на термодинамику диффузной космической среды. Более того, он развил метод включения кинетических ионизационных и в некоторых случаях молекулярных явлений в гидродинамические численные модели. Сама по себе эта проблема далеко не тривиальна из-за сильного различия гидродинамических и кинетических характерных времен. Известно, что химически активные гидродинамические среды представляют собой жесткие с точки зрения численного моделирования системы. В настоящее время в мире существует лишь несколько групп, способных осуществлять численное моделирование астрофизических течений с той же степенью сложности, как это достигнуто в работах Е.О. Васильева. В этом смысле можно уверенно говорить о том, что в его диссертации представлено **новое направление**. Роль его работы, кроме того, что в ней представлены **новые результаты** о динамике и наблюдательных свойствах вполне конкретных астрофизических объектов, состоит еще и в том, что в ней впервые явно демонстрируется необходимость начинать интерпретацию наблюдательных данных с анализа характерных времен основных динамических и кинетических процессов. Это обуславливает **актуальность и практическую значимость** темы диссертационной работы «Процессы энерго- и массообмена между галактиками и окологалактической средой».

Все научные результаты достаточно полно представлены в публикациях Е.О. Васильева. По теме диссертации опубликовано в общей сложности 43 статьи, из которых 24 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования материалов диссертаций. Наиболее значимые результаты диссертационной работы Е.О. Васильева состоят в следующем:

- Описаны режимы слияния протогалактик, при которых основным охлаждающим агентом становятся молекулы HD, обеспечивающие радиационное остывание газа до температур реликтового излучения  $\sim 2.7(1+z)$  К. Это приводит к уменьшению джинсовской массы на порядок по сравнению со «стандартным» значением при охлаждении барионов только молекулами H<sub>2</sub>. Доля такого газа составляет около 10%.
- Выявлена зависимость термодинамики протогалактического газа и условий звездообразования в них от ионизации и нагрева, обусловленного нестабильными частицами темной материи. Исследовано влияние нагрева протогалактик нестабильными частицами темной материи и возмущений поля плотности в них первичными магнитными полями на их динамику и абсорбционные свойства в линии 21 см. Оказалось, что это влияние может проявляться в статистических свойствах соответствующих абсорбционных систем и поэтому допускает возможность получить ограничения на параметры нестабильных частиц темной материи и первичные магнитные поля во Вселенной. Более того, выяснилось, что при определенных допустимых параметрах нестабильных частиц темной материи ее влияние может принципиально изменить всю историю звездообразования во Вселенной.
- На основе скрупулезного численного анализа им выявлены пределы применимости равновесных моделей для межзвездной и межгалактической среды, выработаны рекомендации для использования упрощенных равновесных моделей и оценены связанные с таким использованием ошибки (достигающие в некоторых случаях порядков величин). В настоящее время рекомендации применяются в нескольких группах у нас и за рубежом. На их основе в последнее время выполнен ряд задач, в том числе численная модель 3-мерной динамики ударных волн и возбуждаемого ими газа при множественных вспышках сверхновых – задача чрезвычайной важности для исследования галактических истечений. Эта задача решена впервые в мире.
- Им продемонстрировано, что корректные оценки металличности газа в протяженных галактических коронах и в межгалактическом газе могут быть получены только на основе неравновесных моделей ионизацион-

ной кинетики и термодинамики. Пренебрежение этим обстоятельством может повлечь ошибку в несколько порядков величины, а вслед за этим и неправильную оценку динамических параметров и эволюционного статуса.

В процессе работы над диссертацией Е.О. Васильева проявил себя как сложившийся исследователь. Подавляющая часть задач, представленных в диссертации, была сформулирована им самостоятельно. Его отличают высокий уровень инициативы и профессионализма, трудолюбие, целеустремленность и скрупулезность в получении результатов. Эти качества предопределили высокую научную и практическую значимость, несомненную достоверность полученных Е.О. Васильевым результатов.

Все представленные в диссертации результаты **новы и оригинальны**, прошли хорошую апробацию, известны научной общественности и хорошо цитируются.

Считаю, что диссертационная работа Е.О. Васильева «Процессы энерго- и массообмена между галактиками и окологалактической средой» является научно-квалификационной работой высокого уровня, имеющей принципиально важное значение для физики межзвездной и межгалактической среды, физики галактик и космологии. Считаю поэтому, что Евгений Олегович Васильев, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой физики космоса  
федерального государственного автономного  
образовательного учреждения  
высшего образования  
«Южный федеральный университет»

Ю. А. Щекинов

25 июня 2015 г.

Почтовый адрес: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5,  
физический факультет, Южный федеральный университет.  
Тел. 8(863)297-51-23; E-mail: yuri.and.s@gmail.com, yus@sfedu.ru



Щекинов Ю. А.  
Васильев Е. О. В.