

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Теликовой Ксении Николаевны.

«Изучение теплового состояния ранней Вселенной методами абсорбционной спектроскопии квазаров»

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия

Диссертационная работа К.Н. Теликовой «Изучение теплового состояния ранней Вселенной методами абсорбционной спектроскопии квазаров» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук. Она состоит из Введения, пяти глав, Заключения, Списка литературы, содержащего 143 наименования, и четырех приложений. Общий объем диссертации – 183 страницы.

Эволюция и формирование галактик — одна из основных проблем современной теоретической и наблюдательной астрофизики, на стыке с космологией. Не вызывает сомнения тот факт, что набор барионной массы галактиками происходит за счет захвата (аккреции) газа из межгалактического пространства. При этом имеет место и обратный процесс — отток газа во внешнюю среду под воздействием мощного звездообразования и активности галактических ядер. Физика барионного цикла чрезвычайно важна для построения адекватных галактических моделей, но серьезные трудности связаны с плохим знанием параметров межгалактической среды. Именно этой проблеме и посвящена рассматриваемая диссертация, что обеспечивает ее **актуальность** для современной астрофизики.

Диссертация представляет собой хорошую иллюстрацию подхода, характерного для научной школы Дмитрия Александровича Варшаловича: сочетание высокоточных экспериментальных данных с теоретическими расчетами и математическими методами анализа наблюдаемых спектров.

Диссертант последовательно рассматривает различные аспекты проблемы изучения теплового состояния газа на красных смещения $z=2-4$, дав в **первой главе** краткий обзор с основными соотношениями касающимися анализа абсорбционных спектров DLA систем и их классификации. Зависимость температуры от плотности межгалактической среды рассматривается **во второй главе**, где описан разработанный диссертантом новый оригинальный метод автоматического поиска однокомпонентных абсорбционных систем Лайман-леса квазаров. Для анализа пространства параметров «плотность-ширина линии» разработан собственный статистически метод, дающий новые оценки эволюции параметров межгалактической среды с красным смещением. Сравнение с существующими моделями приводит к новым свидетельствам в пользу сценария о реионизации HeII на $z>3$. Дальнейшим шагом является изучение эффектов связанных с влиянием космологического расширения на наблюдаемые спектральных линий межгалактической среды, что сделано в **следующей главе диссертации**. С учётом этого эффекта определены характерные размеры филаментов межгалактической среды, выполнено сравнение с опубликованными результатами численных гидродинамических расчетов. С точки зрения оппонента, одним из наиболее интересных выводов является рис. 3.7 иллюстрирующий явное изменение размера с красным смещением. При этом финальный результат выносимый на защиту несколько более консервативен — говорится лишь о полном диапазоне размеров.

Кроме межгалактического вещества в диссертации с помощью спектроскопии абсорбционных систем также исследуются параметры окологалактической и внутригалактической сред. В **главе 4** для определения кинетической температуры суб-DLA системы на красном смещении 2.2 используются данные нового прибора ESPRESSO - лидера среди спектрографов высокого разрешения. Представленная в четвертой главе работа

является первым примером измерений температуры нейтрального окологалактического газа со столь высоким разрешением. И, что не менее важно, диссертантом выполнено сравнение с оценками, полученными для того же квазара той же методикой, но на приборе, где разрешение в 3 раза хуже. Показано, что для облаков с простой скоростной структурой по лучу зрения результаты одинаковы, однако для систем с более высокой металличностью или лучевой концентрацией, необходимо разрешение ESPRESSO. Это — важный практический вывод для постановки новых наблюдений.

Несколько другой тип данных — спектры среднего разрешения, но в широком диапазоне от УФ до ИК, используются в диссертации для изучения темпа охлаждения газа в линиях металлов на внутригалактических масштабах. Оппоненту было приятно отметить, что Ксения Николаевна, кроме прекрасного владения математическим аппаратом обращает внимание даже на такие экспериментальные тонкости, как зависимость разрешения спектрографа от неравномерности засветки щели (**раздел 5.3**). Диссертантом предложена и обоснована новая интерпретация ранее уже известной бимодальности в распределении темпа охлаждения газа в линии ионизованного углерода. Изящно показано, что этот эффект объясняется наличием систем с холодной и теплой фазами межгалактической среды, а не различием темпов звездообразования.

Переходя к общей оценке диссертационной работы, следует отметить четкую и последовательную **обоснованность** выносимых на защиту научных положений и выводов. Их **достоверность и новизна**, обеспечивается приложением современных методов математической статистики и спектрального анализа к высокоточным данным наблюдений квазаров на 8-метровых телескопах VLT. Диссертация четко структурирована, богато иллюстрирована, содержит обширное приложение с детальным описанием наблюдательных данных. Серьезные опечатки и жаргон практически отсутствуют, хотя англицизм «деплеция» несколько резковат. Обилие фактического материала, мощный математический аппарат, большое число ссылок на литературу — все это заметно превосходит большинство кандидатских диссертаций по астрофизике, с которыми приходилось иметь дело оппоненту. Тем не менее, есть место некоторым комментариям и замечаниям:

- В разделе 2.5.1 указаны верхние и нижние границы по лучевым скоростям, гарантирующие то, что газовые облака не связаны с подсвечивающим квазаром: +3000 и — 2000 км/с. Не объяснено, почему границы несимметричны.
- В этом же или последующих разделах хотелось бы увидеть сравнение преимуществ разработанного в диссертации метода поиска абсорбций Лайман-альфа с применяемыми ранее другими авторами.
- В главе 4 ничего не говорится о красном смещении самого квазара HE0001-2340. Насколько далеко от его линий находились линии DLA системы?
- В главе 4.7 при сравнении возможностей спектрографов ESPRESSO и UVES автор, говоря о меньшей проникающей звездной величине ESPRESSO, не учитывает тот факт, что в анализируемых наблюдениях этот спектрограф работал «в четверть силы», забирая свет лишь с одного из четырех телескопов VLT. И, конечно, нельзя сравнивать эффективность и перспективность того или иного метода наблюдений в терминах сигнал/шум не приводя времен экспозиций, которые его и определяют.
- В приложении D (материалы к главе 5) обращает на себя внимание, что модельные профили HI систематически уже наблюдаемых в трёх из семи систем (HI 949.74 для квазаров J1353+0956, J2205+1021 и J2351-0639). Это желательно прокомментировать.
- В главе 5 в связи с обсуждением темпов охлаждения в линии [CII] на 158 мкм, было бы крайне желательно обсудить имеющиеся непосредственные наблюдения эмиссии в этой линии по данным телескопа ALMA. Хотя такие наблюдения, связанные с DLA системами пока редки, они имеются — к примеру статья Neeleman et al.

2019ArJ...870L..19N

Перечисленные выше замечания являются, скорее, пожеланиями к будущим исследованиям в этом направлении, нежели недостатками работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Все выносимые на защиту положения опубликованы в 9 статьях в ведущих международных журналах, при этом 5 публикаций – в журналах 1-го квартиля WoS, что существенно превосходит требования положения о присуждении ученых степеней ФТИ им А. Ф. Иоффе. Личный вклад в совместных публикациях четко обозначен.

Считаю, что работа К.Н. Теликовой «Изучение теплового состояния ранней Вселенной методами абсорбционной спектроскопии квазаров» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Положением о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а её автор, Теликова Ксения Николаевна заслуживает присуждения ей искомой степени по специальности 1.3.1 - Физика космоса, астрономия.

13 октября 2023 г.

/Алексей Валерьевич Моисеев,

доктор физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия, ведущий научный сотрудник лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

Рабочий почтовый адрес: САОРАН, п. Нижний Архыз, Зеленчукский район, Карачаево-Черкесская республика, Россия 369167
Телефон: +7 87822 93 396
Эл. почта: moisav@sao.ru

Подпись А.В. Моисеева заверяю: