

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Ярововой Анастасии Дмитриевны
на тему «Исследование взаимодействия массивных звезд и
межзвездной среды в близких низкометаллических галактиках»
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Диссертация Ярововой А.Д. посвящена исследованию массивных звезд и взаимодействующей с ними межзвездной среды (МЗС) в близких карликовых галактиках с низкой металличностью. В рамках этого исследования были проведены наблюдения, получены и проанализированы фотометрические и спектроскопические данные, а также привлечены архивные данные. **Актуальность работы** обоснована недостатком массива данных об объектах с низкой металличностью в целом, а в особенности о массивных звездах. В связи с малочисленностью данных до сих пор нет чёткой картины звездной эволюции при низкой металличности и определенности в процессе обогащения МЗС тяжелыми элементами на ранних этапах жизни Вселенной. Так как в литературе выборка изучаемых объектов чрезвычайно мала (например, число известных звезд LBV (аббревиатура от Luminous Blue Variables, в рус. переводе - яркие голубые переменные) всего несколько десятков, часть из которых не подтверждены достоверно), то каждый новый объект, дополняющий выборку, становится ценным для построения теоретических моделей.

Диссертация представлена на 143 страницах и состоит из введения, четырёх глав и заключения. Диссертация изложена последовательно, написана четким и ясным языком, без лишних деталей. **Во введении** приведена стандартная информация об актуальности, целях и задачах, новизне, значимости и достоверности проведенных исследований, показаны основные положения, выносимые на защиту, а также перечислены публикации по теме диссертации, доклады на конференциях и семинарах, указан личный вклад соискателя. **Первая глава** посвящена описанию спектральных и фотометрических наблюдательных данных (как авторских,

так и архивных), которые используются в диссертации, а также методам их анализа, а именно: методике построения кинематической картины в объектах, оценки физических параметров среды (электронная плотность и температура, металличность), способу выявления природы объектов по диаграммам «интенсивность-дисперсия скоростей» и оценке наличия энергетического баланса между излучением массивных звезд и степенью ионизации окружающей их МЗС. Приведенная в первой главе информация далее необходима для понимания описания исследований в последующих главах. **Во второй главе** представлено детальное исследование компактной туманности (объект #A) в галактике NGC 4068. Показаны два подхода к изучению: 1) на основании анализа непосредственных наблюдательных величин или параметров, оцененных по ним; 2) с помощью подгонки теоретических эволюционных треков и синтетического спектра туманности. При первом подходе вычислены скорость расширения, содержание некоторых химических элементов, электронная плотность, эффективная температура ионизующего источника, видимые и болометрические звездные величины источника в разных фильтрах и полная болометрическая светимость. С помощью второго подхода был определен наиболее вероятный кандидат в центральный источник туманности — одиночная звезда Вольфа-Райе с массой $\sim 80 M_{\odot}$, а также параметры этой звезды и окружающей её туманности. **В третьей главе** изучаются слабые эмиссионные объекты в галактике IC 1613 и механизмы их возбуждения. Практически все объекты отнесены к НII областям, сформированным вследствие излучения ОВ звезд. В главе также проводится проверка и уточнение ранее найденных кандидатов в звезды Вольфа-Райе в этой галактике, в результате чего из 8 источников подтвержден только 1 кандидат. Наконец, представлены два объекта с эмиссионными свойствами типа Р Сyg, которые по результатам анализа соискателя могут рассматриваться как кандидаты в звезды LBV. Для исследований использовались длиннощелевая и 3D спектроскопия, фотометрические оптические данные, радионаблюдения

на 21 см, рентгеновские данные. **Четвертая глава** посвящена определению химического состава областей НП в галактике NGC 2366 и выявлению объектов, которые обладают наиболее выраженными признаками кинематического взаимодействия между массивными звездами и МЗС, а именно, высокой дисперсией скоростей. Для выполнения задач использовались фотометрические данные, длиннощелевая и 3D спектроскопия. По результатам исследования предложен один кандидат в звезды Вольфа-Райе и два остатка сверхновых, построена карта металличности галактики и высказано предположение об обогащении МЗС за счет истечения газа из мощной области звездообразования Mrk71. В Заключении приводятся основные результаты, полученные в рамках исследований, представленных в диссертации.

Научные результаты диссертации имеют высокую **достоверность**, так как получены с применением стандартных и апробированных многими исследователями методик, использования большого массива независимых друг от друга наблюдательных данных с разных инструментов, тщательного учета погрешностей, комплексного подхода к анализу и интерпретации результатов. Наблюдательные данные и теоретические модели имеют ряд ограничений (недостаточная глубина или разрешение данных, фундаментальные неопределенности в теоретических моделях и др.), однако соискатель ясно обозначает эти ограничения, обсуждает возможные последствия и указывает на пути решения в будущем.

Основными объектами исследования в диссертации являются слабые, малоизученные и редкие по численности объекты. Соответственно, характеристики этих объектов, полученные с помощью наблюдений и сопутствующего анализа, являются **новыми** результатами, которые вносят ценный и значимый вклад в развитие фундаментальной науки. Помимо того, что соискателем дополнены и скорректированы крайне малочисленные каталоги низкометаллических звезд Вольфа-Райе и LBV, выявлен уникальный представитель звезд Вольфа-Раей с низкой металличностью, содержание

азота в котором является повышенным. Впервые детально изучены химические и кинематические свойства галактики NGC 2366 и получен важный вывод о том, что в галактике присутствует существенный градиент металличности, наличие которого противоречит устоявшемуся предположению о быстром и эффективном перемешивании вещества в карликовых галактиках и об их однородной металличности. Это несоответствие между теорией и наблюдениями может привести к пересмотру фундаментальных положений в теории динамической и химической эволюции галактик. Таким образом, этот результат несомненно является **очень значимым**.

Соискателем проведена очень аккуратная работа с наблюдательными данными, при необходимости и возможности задействованы все возможные архивные материалы. В процессе проведения исследований соискатель овладел множеством навыков для работы с наблюдениями и их интерпретации, конкретно, для работы со спектроскопическими и фотометрическими данными по карликовым галактикам, массивным звездам на разных стадиях эволюции и объектам МЗС, окружающих их. В тексте диссертации продемонстрировано умение четко и кратко описывать методику и результаты, проводить обзор литературы по интересующей проблеме и дискутировать о природе изучаемых объектов.

Безусловно, представленные исследования и результаты имеют высокий уровень на международной арене. Однако можно высказать ряд **замечаний** к работе.

У автора «в руках» богатый эмпирический материал для построения картины взаимодействия массивных звезд с МЗС, однако, в основном, дискуссия ведется только на уровне конкретных объектов, и не производится обобщение результатов на масштабы галактик и теории их эволюции, не показывается, как результаты могут быть внедрены в общие картины эволюции. Подобные рассуждения присутствуют только частично. К примеру, не обсуждается, как именно обнаруженные соискателем

особенности в галактике NGC 2366 (неоднородность по металличности, мелкомасштабная кинематика и газовые истечения) влияют на наши представления о механизмах реионизации и химической эволюции ранних галактик, то есть нет какой-то обобщающей связки между конкретной галактикой, объектами Green Pea и галактиками ранней Вселенной, которая предполагалась, так как в начале главы было указано, что эта галактика интересна своей схожестью с галактиками Green Pea. В этом вопросе, помимо адаптации результатов изучения взаимодействия между массивными звездами и МЗС, интересно бы было обсуждение, насколько корректно сравнивать близкую карликовую галактику, для которой заранее известно, что звездообразование протекает нестандартно относительно крупных галактик, с галактиками ранней Вселенной.

Другие замечания по диссертации:

1) В работе ведется отбор и классификация объектов нескольких типов - звезд Вольфа-Райе, LBV, голубых сверхгигантов, остатков сверхновых, областей НII. Было бы полезно в начале привести сводную таблицу, содержащую по каждому типу объекта его ключевые наблюдательные признаки, согласно которым соискатель может с достоверностью отнести объект к определенному типу, и второстепенные, которые могут присутствовать, но не являются достаточными для отнесения к определенному типу.

2) На с. 21 приводится информация о том, что при расчете ошибки потоков в линиях с помощью метода Монте-Карло проводилось сто итераций. Нужно пояснить, почему именно сто, и является ли это число оптимальным для такой процедуры.

3) Один и тот же объект в заголовках разделов и подразделов главы 2 назван по-разному, что ведет к недопониманию, все ли подразделы относятся к этому объекту: присутствуют названия «пекулярная туманность», «объект #A», «наблюданная туманность», «изучаемая туманность» и просто «туманность».

4) В галактике IC 1613 в работе Armandroff et al. 1985 было найдено 8 звезд Вольфа-Райе, но соискателю удалось подтвердить только 1 из них. Необходимо уточнение, на каких инструментах были получены предыдущие данные, в чем конкретно прежние наблюдения или анализ были хуже авторских и почему были получены неверные выводы.

5) Почему на ВРТ диаграммах (рис. 3.3, 4.9) точки, полученные соискателем преимущественно лежат выше или правее основной массы модельных точек? Есть ли какие-то различия в параметрах изучаемых и моделируемых объектов?

6) На с. 88 приведена методика классификации областей по типам C1-C5. Во-первых, не все пограничные линии проиллюстрированы на рис. 4.3b, что уменьшает наглядность процедуры отбора. Во-вторых, неясно, почему на рис. 4.3b есть объекты, которые по описанной методике должны быть C3, но отнесены к C2 (лежат выше пунктирной линии, но изображены голубым цветом), и наоборот.

7) На рис. 4.9 изображена голубая кривая, по положению объекта относительно которой можно судить о механизме ионизации. По каким данным эта кривая нарисована и почему она обрывается и не продолжается в сторону объектов с более низким содержанием серы?

8) Одним из интересных и важных выводов работы является обнаружение неоднородности в галактике NGC 2366. До работы соискателя, в одной статье (James et al. 2016) была обнаружена неоднородность внутри области звездообразования Mrk71, при этом не было отслежено общей неоднородности по галактике в другой статье (Roy et al. 1996), значение металличности в которой к тому же выше полученных соискателем. Возникают вопросы, какие методы расчета металличности использовались в работе Roy et al. 1996 и почему результаты соискателя отличаются от этих результатов.

9) Соискатель неоднократно упоминает о том, что T_e -метод и S-калибровка имеют ограничения, в частности, для объектов, в которых может

быть ударная ионизация. Более того, на с. 105 отмечается, что метод, основанный на линиях [O III]/NII некорректен для металличности ниже 8.2. Однако, в диссертации эти методы используются для всех объектов, независимо от механизма ионизации и металличности. Необходимо пояснить, к каким погрешностям в металличности такой подход может приводить.

10) Для большинства объектов, исследуемых в галактике NGC 2366, электронная плотность зафиксирована на уровне 30 см^{-3} из-за ограничений используемой модели. Как эта фиксация n_e может оказаться на значениях металличности? Автор добавляет (без ссылок на источник), что металличность практически не зависит от n_e при низкой плотности. Но было бы яснее, если бы это «практически» было выражено количественно или было бы приведено какое-то выражение, подкрепляющее отсутствие зависимости.

В дополнение, автор пишет, что такие низкие плотности типичны для областей H II. Это утверждение справедливо только для областей HII при низкой металличности, а не для всех областей HII.

Наконец, на с. 29 автор пишет, что во всех случаях погрешности n_e вычислялись с помощью метода Монте-Карло. Из этого следует, что и в случае областей в NGC 2366 погрешности тоже вычислялись, так ли это?

В диссертации встречаются некорректно сформулированные предложения или выражения:

- На с. 23 «Карта галактики в линии H \square позволяет выявить области ..., где водород ионизован ультрафиолетовым излучением молодых массивных звёзд или другими механизмами.... Линия [O III] чувствительна к более высокоэнергетичному ионизирующему излучению...». То есть, линия [OIII] чувствительна к излучению более высокоэнергетичному, чем ультрафиолетовое излучение молодых массивных звёзд, так?

- На с. 23 «Изображения в фильтре He II ($\square 4686 \text{ \AA}$) позволяют обнаружить звёзды типа Вольфа-Райе, поскольку одна из характерных эмиссионных линий этих звёзд попадает в данный фильтр.» Про какую

линию идет речь? Разве кроме Не II (λ 4686 Å) попадает еще какая-то характерная для звезд Вольфа-Райе линий?

- В табл. 1 в столбце №7 должен быть спектральный диапазон, судя по названию к таблице. Но спектральный диапазон указан только в половине строк, тогда как в остальных строках — указаны либо центральная длина волны фильтра либо линия, под которую сделан фильтр, тогда как сам спектральный диапазон не указан.

- Записи Fe/H=-0.8 (на с. 46), N/O=-1.5 (на с. 62) некорректны.

- В формуле на с. 50 есть величины β и wl , которые однозначно должны были написаны греческими символами, так как ниже идет расшифровка греческих символов.

- В таблицах (2,5,7,10) в записях чисел количество знаков после запятой разное, хотя величины сопоставимы. Как правило, все числа оформляются единообразно.

В тексте присутствует множество опечаток и повторов, пунктуационных ошибок, а также отсутствует расшифровка некоторых аббревиатур (напр., ВРТ-диаграммы) или использование англоязычных аббревиатур при введенных русскоязычных (напр., SNR вместо ОСН).

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Яровова Анастасия Дмитриевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт астрономии Российской академии наук, старший научный сотрудник отдела физики и эволюции звезд Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт астрономии Российской академии наук, лаборант-исследователь лаборатории астрохимических исследований Института естественных наук и математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина»

Мурга Мария Сергеевна

01.12.2025

Контактные данные:

тел.: +7-495-951-55-57, e-mail: murga@inasan.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

Адрес места работы:

119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48,
Институт астрономии Российской академии наук, администрация
Тел.:7(495)951-54-61; e-mail: admin@inasan.ru

Подпись сотрудника Института астрономии Российской академии наук
Мурги М. С. удостоверяю:

директор

М. Е. Сачков
01.12.2025