

Отзыв официального оппонента о диссертационной работе А. А. Гроховской

“Исследование влияния локальной плотности окружения на физические свойства галактик до  $z = 0.8$  на основе среднеполосного фотометрического обзора на 1-метровом телескопе Шмидта”,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Полнота выборки исследуемых объектов абсолютно необходима для правильного понимания их физики. На протяжении уже довольно долгого времени стало понятно, что недооценка вклада маломассивных галактик в общую популяцию из-за селекции, определяемой эффектом Малмквиста, недооценка влияния окружения на условия образования и роста галактик, особенно в более поздние эпохи  $z < 3$ , когда вариации плотности, температуры и степени ионизации газа в процессе формирования крупномасштабной структуры способны модулировать динамику процессов, определяющих образование галактик и их скоплений. В результате общая картина эволюции Вселенной, включая формирование функции светимости галактик, сценарий реионизации и химической эволюции оказывается неполной. Это становится понятным, если принять во внимание, что именно маломассивные галактики теряют большую долю производимых ими ионизирующих квантов и тяжелых элементов в межгалактическую среду, и поэтому вносят определяющий вклад в реионизацию и обогащение Вселенной. Роль этих аспектов становится в последние годы все более очевидной, и столь же очевидной становится и необходимость проведения обзоров на все больших площадках. Таким образом, вся логика развития внегалактических исследований вводит к необходимости перехода от спектральных методов к фотометрическим с использованием среднеполосных фильтров в широком диапазоне. Диссертация А.А. Гроховской посвящена исследованию этих возможностей на телескопах метрового класса, и поэтому она несомненно **актуальна**. Чтобы удовлетворить требованиям к достоверности результатов в диссертации развиты **новые** теоретические инструменты **новые** подходы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Объем диссертации 110 стр., 36 рисунков, 5 таблиц, список литературы из 172 наименований достаточно полон.

Во введении дается краткий исторический очерк и более подробный обзор

современных представлений о проблеме формирования и эволюции галактик в контексте основной задачи исследования, описывается общая характеристика работы, формулируются цели исследования и предлагаются методы его реализации, описывается актуальность исследования, его практическая значимость, описывается личный вклад соискателя и апробация результатов, формулируются основные положения, выносимые на защиту, приводится список публикаций по результатам диссертации.

В первой главе описываются принципы среднеполосной фотометрии и ее преимущества в задачах анализа крупномасштабного распределения галактик, выявления зависимости из свойств от физических условий в ближайшем окружении, формулируются критерии отбора объектов для создания среднеполосного фотометрического каталога, дается краткое описание методики определения красных смещений с помощью фотометрических измерений спектральных распределений энергии галактик. Приводятся аргументы в пользу использования телескопов метрового класса для решения этой задачи и подробно описываются особенности использования 1-метрового телескопа Шмидта Бюраканской обсерватории НАН для создания каталога. Показано, что среднеполосная фотометрия на телескопах метрового класса позволяет измерять красные смещения с точностью  $\Delta z / (1 + z) < 0.0043$ . В заключении первой главы дается описание созданного каталога, включающего 16 509 объектов с предельной звездной величиной  $R_{AB} \leq 22.5^m$ .

Во второй главе анализируются эволюционные свойства звездных населений галактик из каталога, описанного в первой главе. Анализ предваряется обсуждением методов аппроксимации спектральных распределений энергии в рамках среднеполосной фотометрии, с последующим обсуждением статистических характеристик спектральных свойств галактик каталога: показатель цвета  $(u - r)_{res}$ , масса звездных населений, их возраст, экстинкция  $A_v$ , соотношение “масса-показатель цвета” вместе с их экстинкциями. С использованием фотометрических красных смещений подтверждено бимодальное распределение показателя цвета для выборки  $\simeq 16500$  галактик и, тем самым, показана высокая эффективность используемого подхода для больших обзоров галактик в пределах красных смещений  $z \lesssim 0.8$ . С использованием полученных данных обсуждятся эволюционные свойства галактик выборки: разделение галактик на две эволюционные группы на диаграмме “масса-возраст”, описываются физические свойства звездных населений галактик, полученных с использованием пакета SIGALE. Основным результатом является прямое определение

с хорошей точностью значения скорости звездообразования в локальной Вселенной  $0.05 \leq z \leq 0.15$ :  $\text{SFR} \simeq 0.012 M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$ , что на полпорядка превышает скорость ЗО, определенную по измерениям в УФ области спектра, но хорошо согласуется с ИК измерениями скорости ЗО (Madau & Dickinson, 2014, ARAA, 52, 415). Нельзя исключить того, в предшествующих оценках терялся вклад маломассивных галактик.

Третья глава диссертации посвящена анализу крупномасштабного распределения галактик каталога. В первых трех разделах этой главы подробно описывается математический аппарат, включая используемые для анализа алгоритмы и проверку сходимости результатов. В анализе были использованы три независимых алгоритма: алгоритм, основанный на построении мозаики Вороного, алгоритм построения поверхностной плотности и алгоритм машинного обучения OPTICS для анализа иерархических структур. Описаны результаты сравнительного анализа их использования в применении к галактикам в объеме  $z \leq 0.8$ . Глава завершается описанием новых каталогов крупномасштабных скучиваний галактик и каталог групп галактик.

В четвертой главе полученные результаты используются для решения сформулированных во введении задач выявления эволюционных зависимостей физических свойств галактик от внешнего окружения. Одним из фундаментально значимых результатов этой главы является зависимость скорости ЗО в галактиках от плотности ближайшего окружения.

В заключении кратко формулируются основные результаты.

В целом, постановка задач, используемые для их решения методы, полученные результаты убедительно демонстрируют высокий уровень квалификации автора, соответствующий уровню кандидата физико-математических наук. Работа выполнена скрупулезно с должным вниманием к деталям, и это вызывает доверие к полученным в диссертации результатам.

Есть несколько замечаний к точности формулировок.

- Одно из них связано с процедурой моделирования спектральных свойств звезд. В разделе 2.1, стр. 36-37 обращает на себя внимание, что в задаче моделирования спектральных свойств звездных населений галактик с помощью шаблонов спектров сетки значений металличности и экстинкции задаются независимо. Естественно думать, что в последующем моделировании с использованием

пакета SIGALE процедура минимизации  $\chi^2$  по металличности осуществляется независимо от минимизации по экстинкции. Вместе с тем, из общих соображений кажется, что металличность и экстинкция *могут* быть связаны между собой определенным соотношением, если предположить, что металличность в газе, окружающем звездные населения равна (или близка) металличности звезд. Если так, то экстинкция и металличность связаны между собой линейным соотношением типа  $A_v \propto D \simeq 0.3Z$ , где  $D$  – массовая концентрация пыли,  $Z$  – металличность, хотя в последние годы обсуждается более крутой закон  $D \propto Z^\alpha$ ,  $\alpha > 1$ . Так или иначе, какая-то связь между металличностью звезд, газа и концентрацией пыли должна существовать, если только не “выгорела” под действием жесткого излучения звезд или ударных волн от сверхновых. Если такую связь между пылью и газом допустить, то процедура минимизации  $\chi^2$  должна осуществляться с учетом этой связи и ее результаты могут оказаться отличным от того, который представлен в диссертации с независимыми сетками по металличности и плотности. Поэтому при описании представленной в разделе 2.1 процедуры желательны были бы обсуждения такой возможности или возможности пренебречь ею.

- Другое, связанное с предыдущим, касается уже интерпретации полученных результатов. На рис. 2.3 приведены распределения свойств звездных населений, сходящихся по мере редукции  $\chi^2$  к его минимальному значению. Обращает на себя внимание антикорреляция  $A_v$  и  $Z$ , что тут же вызывает недоумение, если довериться интуитивным ожиданиям. Если говорить о галактиках с какой-то долей массы, скажем 5–10% от звездной, заключенной в газе, то кажется естественным ожидать большую в среднем экстинкцию для звездных населений с большей металличностью. Обратная зависимость требует специальных условий, связанных с разрушением пыли, или пространственным распределением пыли и высокометаллических звезд. Не связана ли антикорреляция  $A_v$  и  $Z$  с предположением об их независимости в процедуре минимизации  $\chi^2$ ? С этим же связано, по-видимому, и изобилие звезд со сверхсолнечной металличностью на правой границе распределения “масса-металличность” и с минимальной экстинкцией на правой границе в распределении “масса-экстинкция” на рис. 2.4. Учитывая значимость результатов для понимания эволюции галактик,

желательны были бы дополнительные комментарии.

Существуют также некоторые более мелкие стилистические неточности и опечатки.

Среди них можно отметить следующие:

1. Не вполне понятно, утверждение в последних двух строчках на стр 40 – в принципе, все используемые величины распределены дискретно, но почему проблемы с сервером возникают только в случае с несколькими значениями металличности.

2. На рис. 4.4 не указаны единицы для SFR и  $\tau_{SF}$ . На правой панели  $\tau_{SF}$  для  $0.05 \leq z \leq 0.25$  и высокого контраста плотности  $\delta = 10$  увеличивается почти на порядок по сравнению с менее плотными областями. Учитывая важность результата желательно было бы указать причины такой резкой зависимости от  $\delta$ .

3. На стр. 83 и в подписи к рис. 4.6. желательно было бы более внятно определить величину “перцентиль плотности”. В настоящем виде утверждение “Ос новной вклад SFRD возникает в средах с более низкой плотностью в каждом диапазоне красного смещения” воспринимается неоднозначно.

4. Некоторые рисунки расположены слишком далеко от их первого упоминания в текстке (например, ссылка на рис. 1.5 появляется на стр. 27, а сам рисунок – на стр. 33)

В целом, в диссертации выполнена работы высокого научного уровня, в ней представлены важные, фундаментально значимые результаты. Приведенные выше замечания носят в основном методический и технический характер или касаются стилистики изложения и не умаляют значимости и практической ценности результатов, полученных в диссертации, не могут снизить общую положительную оценку работы и никак не затрагивают основных её выводов и положений, выносимых на защиту. Автореферат диссертации соответствует её содержанию. Результаты, представленные в диссертации, выполнены на высоком научном уровне, являются **новыми, актуальными и практически важными**. Они могут быть использованы в исследованиях, проводимых в области внегалактической астрономии, физики галактик, физики звездообразования в целом ряде научных и учебных организациях страны, таких как АКЦ ФИАН, ИКИ РАН, ГАИШ, ЮФУ, СПбГУ. Все результаты **оригинальны** и опубликованы в научной печати в ведущих профессиональных журналах, **апробированы** на многочисленных российских и международных астрофизических конференциях и демонстрируют высокий профессиональный уровень

её автора. Диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор А.А. Гроховская безусловно заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 "Астрофизика и звездная астрономия".

8 сентября 2022 г.

Доктор ф.-м. н., профессор,  
гл. научн. сотр. ФГБУН Астрокосмический Центр,  
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Щекинов Юрий Андреевич

Тел: +7(495)3333366

email: yus@asc.rssi.ru

Ленинский пр., 53

Москва, В-333,

Россия, 119991

Подпись Щекинова Ю.А. заверяю:

Ученый секретарь ФИАН

Кандидат физ.-мат. наук



Колобов А.В.