

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу

Землянухи Петра Михайловича

«Свойства областей образования массивных звезд и звездных скоплений на

различных масштабах», представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.1. Физика космоса, астрономия

**Актуальность темы диссертации.** Диссертация посвящена наблюдательному исследованию областей образования массивных звезд. Определение условий образования массивных звезд представляет большой интерес с точки зрения построения начальной функции масс звезд в Галактике. Кроме того, массивные звезды в значительной степени определяют эволюцию металличности межзвездного газа и влияют на скорость звездообразования в Галактике. В настоящее время предложено несколько сценариев образования массивных звезд в гигантских молекулярных облаках. Для проверки моделей необходимо проведение наблюдений областей образования массивных звезд с высоким пространственным разрешением в различных спектральных диапазонах. Эта задача усложнена тем, что исследуемые области удалены от Земли на большие расстояния, а сами массивные молодые звезды погружены в очень плотный газ. Интерпретация наблюдений конкретных протозвездных облаков представляет сложную задачу, поскольку для построения модельных спектров необходимо проведение численного моделирования структуры облаков для широкого набора возможных значений параметров облаков. Перспективным представляется использование современных статистических методов, позволяющих снизить вычислительные затраты при аппроксимации наблюдаемых спектров модельными функциями.

В связи с вышеизложенным многоволновые наблюдательные исследования областей образования массивных звезд и разработка статистических алгоритмов сравнения результатов наблюдений с предсказаниями моделей, которым посвящена диссертация П.М Землянухи, являются актуальными задачами.

**Содержание диссертации.** Диссертация посвящена двум взаимосвязанным направлениям: наблюдательное исследование ряда областей образования массивных звезд и разработка алгоритмов анализа наблюдаемых спектров протозвездных облаков. **Во введении** отмечается актуальность задачи, формулируются цель и задачи, приводятся положения, выносимые на защиту, отмечаются новизна и значимость результатов работы, обосновывается достоверность полученных результатов, приводится список публикаций автора и его личный вклад в работу.

**В первой главе** описываются оригинальные авторские методы анализа спектров. Представлен метод к-ближайших соседей (кБС), предназначенный для анализа линий со сверхтонкой структурой с целью определения числа компонент с различными доплеровскими скоростями. Описан алгоритм применения метода кБС для анализа карт в линии НI. Алгоритм основан на предположении о том, что соседние участки на картах излучения характеризуются схожими физическими условиями, поэтому их спектры могут быть описаны близкими по значениям параметрами. Кроме того, предложен эффективный метод вписывания модельных спектральных карт в наблюдаемые. Метод основан поиске корреляций между параметрами модели, используемой для построения спектров сравнения, с последующим исключением параметров, для которых обнаружена значимая корреляция.

**Во второй главе** представлены результаты и анализ наблюдений набора из примерно 50 протозвездных ядер в линиях основного и дейтерированного изотопов водорода с целью изучения распространенности дейтерированных молекул и определения физических условий в ядрах. В том числе описаны наблюдения, которые проводились автором на 20-метровом телескопе Onsala и 30-метровом телескопе IRAM.

**Третья глава** посвящена описанию результатов наблюдений и последующему исследованию кинематики темного облака L1287, в котором имеются признаки образования массивных звезд. Выполнен анализ карт облака в различных молекулярных линиях, в том числе по собственным наблюдениям. Алгоритм анализа спектров, предложенный в главе 1, применен для определения параметров распределения плотности и скорости в ядре облака L1287 в предположении о его сферической симметрии.

**В четвертой главе** представлен анализ области ионизованного водорода S187, в расширяющейся оболочке которой наблюдаются признаки звездообразования. Проведены уникальные наблюдения атомарной оболочки S187 в линиях НI, а также наблюдения в различных молекулярных линиях и инфракрасном излучении пыли. На основе наблюдений исследованы особенности распределения атомарного и молекулярного газа в оболочке.

**Пятая глава** посвящена наблюдательному исследованию ряда областей образования массивных звезд в S255N SMA1, S255IR NIR3, W42-MME и S305 VM2 и VM4. Для каждой области построены карты излучения различных молекулярных линий, для ряда объектов – диаграммы позиция-скорость. Результаты наблюдений применены для анализа сценариев звездообразования для каждой из областей.

Вышеперечисленные наблюдательные исследования областей образования массивных звезд соответствуют заявленной специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

**Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** В диссертации получены следующие новые результаты.

Предложены оригинальные статистические методы анализа спектров протозвездных облаков. Отличительной особенностью методов является оптимизация алгоритма подбора параметров для расчета модельных спектров. Это позволяет ускорить процесс оценивания соответствующих физических параметров облаков в рамках предполагаемой модели.

На основе собственных наблюдений в источниках G121.28+0.65, G34.403+0.233, G37.427+1.518, G77.462+1.759 и G99.982+4.17 впервые обнаружены плотные ядра с молодыми звездными объектами внутри. В объекте G77.462+1.759 выявлено вращение, в объекте G192.76+00.10 обнаружена сложная внутренняя структура и определена кинетическая температура газа.

На основе анализа спектров плотного ядра в облака L1287 с помощью оригинального авторского метода впервые определены показатели степенных зависимостей плотности, турбулентной скорости и скорости сжатия облака от его радиуса. Показано, что профиль плотности характеризуется показателем -1.7, а профиль скорости сжатия – показателем -0.1. На основе полученных результатов автор сделал вывод о том, что сжатие облака может быть описано моделью глобального иерархического коллапса.

Выполнены наблюдения атомарной оболочки области ионизованного водорода S187 в линии НI с высокими пространственным разрешением и чувствительностью. Впервые определены масса, температуры и толщина оболочки атомарного газа. Впервые обнаружена клочковатость атомарной оболочки, и определены массы, размеры и плотности ее фрагментов. Показано, что размер и масса фрагментов связаны степенным законом с показателем 2.4, близким к соответствующему показателю распределения ядер молекулярных облаков по размерам. В оболочке обнаружено два молекулярных ядра близких масс, в одном из которых имеются признаки звездообразования, в другом – нет.

Впервые вокруг массивного молодого звездного объекта S255N SMA1 обнаружен околозвездный тор внутренним радиусом 8000 а.е. и внешним радиусом 12000 а.е. Предполагается, что из тора происходит акреция на двойную систему в центре. Обнаружена клочковатость газа в истечении из объекта W42 MME, что указывает на возможный эпизодический характер акреции на молодую звезду. Впервые удалось получить свидетельства того, что в объектах S255IR и S255N имеет место последовательное стимулированное звездообразование, а звездообразование в области S305 обусловлено расширением области ионизованного водорода.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность.** Достоверность представленных результатов и сформулированных выводов подтверждается использованием современных наблюдательных инструментов, а также соответствующих хорошо разработанных и апробированных пакетов для обработки наблюдательных данных.

Основные результаты диссертации апробированы на многочисленных региональных, всероссийских и международных конференциях и опубликованы в 12 ведущих российских и мировых рецензируемых научных журналах, в том числе журналах первого квартиля Scopus.

**Значимость научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Практическая значимость заключается в возможности применения разработанных оригинальных алгоритмов анализа спектров протозвездных облаков для новых объектов. Данные наблюдений, проведенных авторов, и карты излучения, построенные для многочисленных исследованных областей, могут быть использованы для дальнейшего анализа отдельных аспектов звездообразования в рассмотренных объектах. Разработанные автором методики анализа физических свойств областей звездообразования на основе сравнения результатов наблюдений в различных спектральных диапазонах будут полезными при изучении других областей звездообразования.

Результаты диссертации могут представлять интерес для астрофизиков и астрономов Института прикладной физики РАН, СПбГУ, Института астрономии РАН, Коуровской астрономической обсерватории УрФУ и других астрономических организаций, в которых проводятся исследования областей звездообразования.

**Соответствие автореферата диссертации ее содержанию.** В автореферате сформулированы и обоснованы цель и задачи диссертации, описано содержание диссертации по главам, приведены основные результаты работы, отмечены публикации автора. Нумерация глав в автореферате не соответствует нумерации глав в диссертации. Тем не менее, описание фактического содержания глав соответствует содержанию диссертации.

#### **Недостатки и замечания по диссертации.**

1. Текст диссертации написан небрежно, содержит грамматические ошибки и неточности в формулировках.
- Присутствуют ошибки в расстановке знаков препинания. Например, предложение «Очевидно, однако, что такое рассмотрение является упрощенным и природа процессов сложнее описанной выше схемы и требует как рассмотрения более сложных физических принципов так и внимательного и детального изучения наблюдательных данных» на стр. 5, формулировка задачи 2 на стр. 7, и т.д.

- Некоторые опечатки и неточные формулировки искажают смысл используемых терминов и могут вводить читателя в заблуждение, например термин «неизотопный коллапс» на стр. 5 и 115. Вместо терминов «гомогенный/негомогенный» в предложениях на стр. 74 и 80 следовало использовать устоявшиеся в русском языке «однородный/неоднородный», вместо термина «феномен» на стр. 7, 121, 156, 157, 159, 163 и 174 – понятие «явление», вместо термина «компрессия» на стр. 73, 103 и 128 – «сжатие». Использованные автором термины являются результатом буквального перевода с английского языка соответствующих формулировок из собственных статей.
  - Списки статей автора, приведенные в начале каждой главы для подтверждения аprobации соответствующих результатов, неформатированы и избыточны. Достаточно было сослаться с помощью цифровых ссылок на соответствующий список, приведенный во введении.
  - Многие рисунки, иллюстрирующие результаты наблюдений, приведены в настолько низком качестве, что чтение подписей на них практически невозможно (пр., рис 2.1–2.3 и 2.8 в главе 2, рис. 3.2–3.7 в главе 2, рис. 4.2, 4.4, 4.12 и 4.13 в главе 4, рис 5.11, 5.19–5.24 в главе 5). Таблицы на стр. 44–49 и 82 выходят за пределы полей страниц так, что текст в соответствующих полях оказывается обрезанными.
2. В главе 3 автор использует модель сферически симметричного облака для построения модельных спектров плотного ядра в облаке L1287. Известно, что большинство ядер молекулярных облаков характеризуется наличием вращения и крупномасштабного магнитного поля. Центробежная и электромагнитная силы приводят к анизотропии гравитационного коллапса ядер, так что их эволюция не может рассматриваться в рамках одномерного сферически-симметричного приближения. Автору следовало хотя бы на качественном уровне обсудить эти эффекты и их потенциальное влияние на спектры изучаемого объекта.
3. В главе 4 на стр. 91–94 обсуждается клочковатость распределения атомарного газа вокруг области S187. Из текста неясно, из каких физических соображений определяются границы фрагментов и насколько алгоритм является однозначным. В подписи к рисунку 4.8 автор ссылается на то, что распределение фрагментов определено с помощью CUPID Fellwalker, но без ссылки трудно понять, что за алгоритм или программное обеспечение имеется ввиду.

Указанные замечания не затрагивают основные положения и выводы работы, не снижают ее научной значимости и не влияют на общую положительную оценку работы.

**Заключение.** Диссертация удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее автор, Землянуха Петр Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

**Официальный оппонент:**

Кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник кафедры  
гидроаэромеханики федерального  
государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Санкт-Петербургский  
государственный университет».

 Хайбрахманов С.А.

«29» ноябрь 2023 г.

Адрес места работы:

199034, Санкт-Петербург, Университетский пр., 28

Контактные данные:

Тел. +7 (812) 363-63-41

E-mail: s.khaybrakhmanov@spbu.ru



Текст документа размещен  
в открытом доступе  
на сайте СПбГУ по адресу  
<http://spbu.ru/science/expert.html>