

УТВЕРЖДАЮ:  
Директор  
Федерального государственного  
бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики им. А.В.  
Гапонова-Грехова Российской академии  
наук»

Академик РАН Г.Г. Денисов



«12» сентября 2023 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук»

Диссертационная работа Землянухи Петра Михайловича «Свойства областей образования массивных звезд и звездных скоплений на различных масштабах» выполнена в «Лаборатории высокочувствительных приемников миллиметрового диапазона (181)» Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

В период подготовки диссертации соискатель Землянуха Петр Михайлович работал в ИПФ РАН (лаб.№181) в должности младшего научного сотрудника и, позднее, научного сотрудника. В этот же период Землянуха П. М. проходил обучение в магистратуре, а затем в аспирантуре Национального исследовательского Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского.

В 2015 году Петр Михайлович завершил обучение в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского” очно.

С 2015 по 2019 год проходил обучение в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского” очно по специальности 03.06.01 «Физика и астрономия».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2023 году ФГУП Физический Институт им. П.Н. Лебедева (№08-23) по дисциплине 1.3.1 - “Физика космоса, астрономия”

Научный руководитель – Зинченко Игорь Иванович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии (180) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

По результатам рассмотрения принято следующие заключение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### **Оценка выполненной соискателем работы**

Диссертационная работа посвящена методам обработки пространственных карт областей звездообразования в спектральных линиях атомов, ионов и молекул с целью определить физические параметры данных объектов: температуру, химический состав, концентрацию газа, характерные размеры структурных элементов и кинематические образования в виде аккреционных дисков, торов. В работе предложены технические приёмы ускорения процесса поиска физических параметров объектов, соответствующих наблюдаемой карте источника.

### **Актуальность**

Массивные звезды играют существенную роль в жизни Вселенной. Их эволюция в большей мере, чем звезд малой массы, связана с окружающим газом межзвездной среды. Массивными звездами считаются звезды классов О и В. Это относительно короткоживущие звезды, чья температура довольно высока. Звезды образуются из газа межзвездной среды. Предполагается, что в результате развития гравитационных неустойчивостей конденсируется вещество. По достижению определенной массы и плотности сгусток образует звезду. По мере притока вещества увеличивается оптическая толщина среды, что уменьшает отвод энергии из центра, кинетическая температура газа в котором возрастает. Если изначальная масса облака не велика, то большая часть вещества аккрецирует и образует протозвезду. При больших массах светимость возрастает, что, вкупе со смещением спектра излучения в ультрафиолетовую область спектра, приводит к ионизации и разогреву втекающего газа, что усложняет акрецию, останавливает ее или приводит к движению газа от центрального источника. Как следствие, масса протозвезды в такой модели ограничена. Очевидно, однако, что природа процессов сложнее описанной выше схемы.

В настоящее время существует по крайней мере шесть конкурирующих теоретических сценариев образования массивных звезд: сценарий турбулентного ядра с постоянной акрецией и монолитным коллапсом, конкурентной акреции, глобального иерархического коллапса, глобального неизотопного коллапса и акреции вследствие инерциальных внешних потоков, набор массы вследствие ударных волн и коллапса (*collect and collapse*). Обсуждается роль стимулированного звездообразования, в которой плотные области газа могут быть дополнительны скжаты давлением вследствие нагрева УФ излучением или сверхзвуковыми систематическими движениями. Такое разнообразие сценариев вызвано тем, что в данный момент меняется парадигма понимания процессов образования звезд большой массы, что в свою очередь, вызвано инструментальными успехами последнего времени. От предположения о квазиравновесности процессов образования звезд переходят к предположениям, в которых газ молекулярного облака и массивная протозвезда/клuster динамически связаны. Для дальнейшего понимания процессов эволюции требуются наблюдения в различных частотных диапазонах, сопоставления излучения в различных молекулярных линиях трассирующих разные области около протозвездного объекта с данными наблюдения пылевого континуума и излучения компактных ионизированных зон, совместно - на разных масштабах.

Таким образом, изучение процессов образования массивных звезд является актуальной темой современных исследований: за недавнее время выдвинут ряд теоретических сценариев образования звезд большой массы, и для их подтверждения необходимо сопоставление с наблюдаемыми явлениями.

**Целью настоящей диссертационной работы** является изучение процессов образования звезд на разных пространственных масштабах (от сгустка до ядра), извлечение физических свойств газа и его кинематических характеристик и сопоставление наблюдаемых феноменов и оценок с известными сценариями образования массивных звезд.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1) Провести наблюдения выборки протозвездных ядер на телескопах 30m IRAM, 20m ONSALA, VLA и других.

2) Разработать ряд методов обработки и анализа данных, упрощающих решение задач приведенных ниже.

3) Восстановить радиальные профили физических параметров и кинематическую структуру ядра L1287 с целью соотнесения оценок параметров с предполагаемыми в сценариях эволюции.

4) Проанализировать распределение газа в окрестностях протозвездных объектов W42 MME, S255IR NIRS3 и S255N SMA1 и сравнить его с предполагаемыми сценариями эволюции газа.

5) Проанализировать распределение атомарного газа и особенности эволюции оболочки HII зоны S187.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Представлено три оригинальных алгоритма анализа спектральных карт. Предложено использовать метод k ближайших соседей при вписывании модельных спектров в наблюдаемые, что позволяет уменьшить доверительные диапазоны оценок физических параметров. Предложено использовать статистические процедуры снижения размерности, включая метод главных компонент, благодаря чему возможно вписывание результатов моделирования переноса излучения в разных линиях в наблюдаемые спектральные карты, а также увеличить число свободных параметров модели при том же объеме вычислительных затрат на минимизацию.

2. В результате обзора выборки областей образования массивных звезд (~50 источников) установлено, что в большинстве источников линии  $\text{HCO}^+$  и  $\text{HCN}$  (1-0) имеет значительную оптическую толщину. Показано, что излучение в линии  $\text{HCO}^+$ ,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ ,  $\text{HCN}$  и  $\text{H}^{13}\text{CN}$  (1-0) являются инструментом изучения крупномасштабных движений газа плотных ядер. Обнаружены признаки сжатия или расширения у источников L1287, G37.427+1.518, G77.462+1.759.

3. Установлено, что распределение физических параметров в ядре L1287 на масштабах порядка 0.1-1 пк может быть описано степенными функциями. Показано, что скорость сжатия газа ядра убывает по закону  $r^{-0.1}$ , что не совместимо со сценарием коллапса в режиме свободного падения, но согласуется с предположением, что в L1287 наблюдается акреция ядра вследствие инерциальных потоков или глобального иерархического коллапса.

4. Представлены результаты анализа выборки массивных протозвездных источников. В источнике S255N SMA1(a&b) обнаружен квази кеплеровский тор большого размера (12000 а. е.). Выявлены признаки наличия потоков газа между окружающим веществом, тором и сгустками около протозвезд. Показано, что в области S305 наблюдается пара H II зон, идентифицирована область фотодиссоциации около них. Выявлен признак накопления массой оболочки H II зоны, установлено, что масса оболочки ~560 M солнца. Подтверждено, что источник W42 MME является массивной протозвездой на раннем этапе

эволюции, до образования ультракомпактной Н II области, характерной для звезд класса "O".

5. Установлено, что атомарный газ, ассоциированный с областью S187, является оболочкой Н II зоны, связан с областью фотодиссоциации и сильно фрагментирован ( $\sim 100$  фрагментов). Установлены физические параметры фрагментов, их медианная масса  $\sim 1.1 M_{\odot}$  солнца, размеры лежат в пределах 0.03-0.23 пк. Установлено, что соотношение масс-размер для фрагментов описывается степенным законом, показатель которого ( $2.39 \pm 0.08$ ) близок к таковому для дозвездных ядер и газовых структур больших масштабов. Выявлены признаки того, что звездообразование в крупных молекулярных сгустках инициируется возмущениями, созданными расширением Н II зоны. Показано, что для большей части фрагментов не обнаружено ассоциированных молодых звездных объектов.

## Научная новизна

Используя передовые методы обработки интерферометрических данных, на основе комбинированных данных наблюдений на нескольких антенных решетках, с рекордным разрешением для галактических источников исследовано распределение атомарного газа в области S187 в линии атомарного нейтрального водорода. Наблюдения в линии эмиссии атомарного водорода галактических источников, в особенности оболочки Н II зон, редки и важны для изучения структуры областей фотодиссоциации, и представленные результаты являются таковыми. Используя информацию, извлеченную из профиля поглощения и прибегая к оригинальному методу определены физические параметры газа оболочки, получены карты распределения оптической толщины, лучевой концентрации и спиновой температуры по источнику. Представленные наблюдения обладают наилучшим разрешением для галактических источников (8" против 30" GASKAP и  $\sim 40"$  THOR), что позволило впервые обнаружить и описать фрагментарную структуру атомарного газа. Подобная фрагментарность предполагается рядом теоретических работ, но наблюдательные свидетельства приводятся впервые.

В методической части работы впервые предложено использовать метод снижения размерности при регрессионном анализе моделей. Данный подход позволяет расширить число свободных параметров модели при вписывании при тех же вычислительных затратах.

Используя оригинальные методы, было проведено восстановление радиального распределения физических параметров в ядре L1287. Исследования, в которых проводится вписывание в спектральные карты модельных, редки. Такие исследования позволяют изучать вероятное распределение модельных параметров и интерпретировать сложные физические процессы в объектах. Аналогичная задача решалась, например, для изучения свойств турбулентности в протопланетном диске и вызвала бурную дискуссию о физике процессов в них. Изучение пространственных профилей плотных ядер является научно важной задачей астрофизики, так как позволяет оценить реализуемость различных сценариев эволюции ядра. Благодаря использованию методов снижения размерности, был получен важный результат о распределении поля систематических скоростей в ядре L1287, что предполагает доминирование механизма накопления газа ядром в следствии инерциальные потоков газа из периферии, что не совместимо с предположением о коллапсе в режиме свободного падения.

## **Научная и практическая ценность работы**

Алгоритмы регрессионного анализа, включающие процедуры снижения размерности, используются для решения практических задач, например, астроклиматических. Алгоритмы могут использоваться при проектировании систем облучения приемной аппаратуры и для других задач оптимизации. Идеи, на которых основан алгоритм оказали влияние на другие методы статистического анализа.

Особенности, выявленные при анализе объектов S255IR, S255N и W42 MME оказали влияние на последующие работы, в т.ч. других авторов. Особенности дифференциации нейтрального атомарного водорода в объекте S187 важны для изучения физики областей фотодиссоциации. Профили физических параметров ядра L1287 представляет интерес как для задач физического моделирования эволюции ядер так и для моделирования химических процессов в ядрах.

## **Степень достоверности результатов проводимых исследований**

Достоверность результатов обеспечивается использованием высококлассных инструментов и апробированных методов обработки данных, а также подтверждается их согласием с теоретическими представлениями об эволюции рассматриваемых объектов. Представленные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК, а также обсуждались на конференциях и семинарах в т.ч. международного уровня.

## **Методология и методы исследования.**

В исследовании использовались данные с обсерваторий IRAM-30м, ONSALA-20м, VLA, SMA, ALMA и GMRT, а также ряд архивных. В работе используются передовые методы обработки данных и их анализа, такие как CASA, MIRIAD, astropy, scikit-learn и самостоятельно разработанные автором.

## **Личный вклад автора**

Автор проводил обработку наблюдений протозвездных ядер, участвовал в подготовке и подаче заявок на наблюдения, обработке интерферометрических данных и данных одиночной антенны, анализе наблюдений, оценке параметров и интерпретации результатов.

Идеи и реализации алгоритмов также являются авторскими. Все представленные результаты получены лично автором или при его определяющем вкладе.

## **Апробация работы и публикации.**

Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях, 11 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 11 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Основные результаты работы докладывались на:

1. Russian-Indian Workshop "Radio Astronomy And Star Formation"
2. Astrochemistry VII: Through the Cosmos from Galaxies to Planets
3. YERAC 2015

4. Физика Космоса. 44,45,46,47-ая всероссийские с международным участием студенческие научные конференции.
5. XX, XXI и XXII научная конференция по радиофизике, ННГУ
6. Всероссийская астрономическая конференция 2017г.
7. Всероссийская конференция "Звездообразование и планетообразование" 2021
8. Семинары секции "Межзвездная среда и Звездообразование" Научного совета по астрономии РАН

**Материалы диссертации опубликованы автором достаточно полно в следующих публикациях:**

1. Пространственно-кинематическая структура области образования массивных звезд S255N на разных масштабах. / **П. М. Землянуха**, И. И. Зинченко, С. В. Салий, О. Л. Рябухина, Ш. .-. Лью // Астрономический Журнал. 2018
2. Метод Главных Компонент для вписывания моделей с множеством связанных параметров: определение физических характеристик протозвездных яде. / Л. Е. Пирогов, **П. М. Землянуха** // Астрономический Журнал. 2021
3. Fragmented atomic shell around S187 H II region and its interaction with molecular and ionized gas. / **P. Zemlyanukha**, I. I. Zinchenko, E. Dombek, L. E. Pirogov, A. Topchieva, G. Joncas, L. K. Dewangan, D. K. Ojha, S. K. Ghosh // MNRAS. 2022
4. Многочастотные исследования массивных ядер со сложной пространственно-кинематической структурой. / Л. Е. Пирогов, В. М. Шульга, И. И. Зинченко, **П. М. Землянуха**, А. Н. Патока, М. Томассое // Астрономический Журнал. 2016
5. Study of the filamentary infrared dark cloud G192.76+00.10 in the S254-S258 OB complex. / О. Л. Рябухина, И. И. Зинченко, М. Р. Самал, **П. М. Землянуха**, Д. А. Ладеyschikov, А. М. Sobolev, С. Henkel, D. K. Ojha // Research in Astronomy and Astrophysics. 2018
6. Обзор областей образования массивных звезд в линиях дейтерированных молекул. / Е. А. Трофимова, И. И. Зинченко, **П. М. Землянуха**, М. Томассон // Астрономический Журнал. 2020
7. Deuterated molecules in regions of high-mass star formation. / I. I. Zinchenko, A. G. Pazukhin, E. A. Trofimova, **P. M. Zemlyanukha**, C. Henkel, M. Thomasson // PoS. 2022
8. The Disk-Outflow System around the Rare Young O-type Protostar W42-MME. / L. K. Dewangan, I. I. Zinchenko, **P. M. Zemlyanukha**, S. .-. Liu, Y. .-. Su, S. E. Kurtz, D. K. Ojha, A. G. Pazukhin, Y. D. Mayya // ApJ. 2022
9. Probing Gas Kinematics and PDR Structure around O-type Stars in the Sh 2-305 H II Region. / N. K. Bhadari, L. K. Dewangan, **P. M. Zemlyanukha**, D. K. Ojha, I. I. Zinchenko, S. Sharma // ApJ. 2021
10. Multiline observations of S255IR with ALMA. / I. Zinchenko, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, **P. Zemlyanukha** // Proceedings of the International Astronomical Union. 2017
11. The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation. / I. Zinchenko, S. .-. Liu, Y. .-. Su, S. V. Salii, A. M. Sobolev, **P. Zemlyanukha**, H. Beuther, D. K. Ojha, M. R. Samal, Y. Wang // ApJ. 2015

### **Полнота изложения**

Материалы диссертации достаточно полно изложены в работах, опубликованных соискателем.

Содержание диссертации полностью соответствует специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия»

В диссертационной работе отсутствует заимствованный материал без ссылки на автора и/или источник заимствования, а также отсутствуют результаты научных работ, выполненных соискателем ученой степени в соавторстве без ссылок на соавторов.

Диссертационная работа Землянухи Петра Михайловича «Свойства областей образования массивных звезд и звездных скоплений на различных масштабах» удовлетворяет всем требованиям, предъявленным ВАК к докторским диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия»

Заключение принято на заседании семинара Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ИПФ РАН. Присутствовали на заседании 30 человек. Результаты голосования: “за” - 30 чел., “против” - нет, “воздержались” - нет. Протокол №б/н от 28 марта 2023г

Председатель семинара

д. ф-м. н., профессор РАН,

зам. директора учреждения по научной работе, рук. отделения

г. н. с. лаборатории ионных источников (122) отдела физики плазмы (120)

В.А.Скалыга

Секретарь семинара

к.ф-м.н., н.с., ученый секретарь отделения.

О.С. Моченева