

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН

СТЕНОГРАММА  
ЗАСЕДАНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА  
Д002.023.01

15 сентября 2022 года

Защита диссертации  
Дроздова Сергея Александровича  
на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.03.02 «Астрофизика и звёздная  
астрономия»

*“Эмиссионные характеристики внутренних областей  
галактик в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах”*

Присутствовали члены диссертационного совета:

Новиков И.Д., д.ф.-м.н., член-корр. РАН, 01.03.02, физ.-мат. науки

Ковалев Ю.Ю., д.ф.-м.н., член-корр. РАН, 01.03.02, физ.-мат. науки

Богачев С.А., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Вибе Д.З., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Дагкесаманский Р.Д., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки

Дорошкевич А.Г., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Иванов П.Б., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Каленский С.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки

Лукаш В.Н., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Новиков Д.И., 01.03.02, д.ф.-м.н., физ.-мат. науки

Ларионов М.Г., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (присутствует онлайн)

Попов М.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (присутствует онлайн)

Тюльбашев С.А., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (присутствует онлайн)

Чашей И.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (присутствует онлайн)

Щекинов Ю.А., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (присутствует онлайн)

**Председатель заседания** – доктор физико-математических наук, председатель диссертационного совета И.Д. Новиков.

**Секретарь заседания** – доктор физико-математических наук, и.о. учёного секретаря, заместитель председателя диссертационного совета Ю.Ю. Ковалев (распоряжение директора ФИАН Колачевского Н.Н. о возложении обязанностей учёного секретаря совета находится в приложении №1 к стенограмме).

Заседание проводится с участием членов диссертационного совета и оппонентов в удалённом интерактивном режиме. Распорядительный акт директора ФИАН Колачевского Н.Н. о проведении заседания диссертационного совета с участниками в удалённом интерактивном режиме находится в приложении №2 к стенограмме.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Дорогие коллеги, мы начинаем наше заседание, посвящённое защите диссертации Дроздова Сергея Александровича. К сожалению, учёный секретарь нашего совета Шахворостова Надежда не может присутствовать лично, она присутствует онлайн (*Прим.: позднее Шахворостова Н.Н. была вынуждена покинуть заседание и, таким образом, была исключена из кворума*). Мы попросили Юрия Юрьевича Ковалёва исполнять обязанности секретаря заседания. Пожалуйста, Юрий Юрьевич.

СЕКРЕТАРЬ: Спасибо! Здравствуйте, дорогие коллеги. Начинаем наше сегодняшнее заседание. Напоминаю ещё раз, что видеозапись включена. Сегодня 15 сентября 2022 года, 15 часов 3 минуты и позвольте мне объявить, опять же, для краткости, пофамильно членов совета, кто присутствует сейчас на заседании в АКЦ и тех, кто присутствует онлайн, удалённо через Zoom, начиная с присутствующих на месте. Новиков, Ковалев младший, Богачев, Вибе, Дагкесаманский, Дорошкевич, Иванов, Каленский, Лукаш, Новиков младший, и на этом у меня всё с людьми, которые присутствуют на месте. Я посчитаю – 10 человек присутствуют на месте. Теперь удалённо, тоже пофамильно. Шахворостова, Ларионов, Попов, Тюльбашев, Чашей, Щекинов – 6 человек. Итого десять плюс шесть – шестнадцать человек присутствуют на данном заседании совета – кворум есть, мы можем начать. Ну что, Игорь Дмитриевич, позвольте мне рассказать детали?

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Да, пожалуйста, технические детали.

СЕКРЕТАРЬ: Так, фамилия имя отчество соискателя: Дроздов Сергей Александрович. Название диссертации: “Эмиссионные характеристики внутренних областей галактик в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах”, специальность – 01.03.02, физико-математические науки, астрофизика и звёздная астрономия. Диссертация выполнена в ФИАН. Научный руководитель – доктор физико-математических наук Щекинов Юрий Андреевич, главный научный сотрудник АКЦ ФИАН. Ведущая организация – МГУ им. М.В. Ломоносова, а именно ГАИШ МГУ. Оппоненты: Павлюченков Ярослав Николаевич доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИНАСАН, Москва, присутствует у нас здесь. Здравствуйте, Ярослав Николаевич! Второй оппонент – Балашев Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ФТИ им. Иоффе из Санкт-Петербурга, тоже присутствует здесь лично, за что мы ему отдельно благодарны. Здравствуйте, Сергей Александрович. Теперь, позвольте мне огласить документы. У нас все документы на месте имеются.

Были поданы все в срок, вот в этой папочке лежат. Заявление соискателя, диплом о высшем образовании, справка о сдаче кандидатского минимума, отзывы в наличии, всё поступило в срок. Выдержки из документов. Ещё раз, соискатель – Дроздов Сергей Александрович, 1992 года рождения. В 2016 году окончил МГУ им. М.В. Ломоносова с присвоением квалификации – астроном, по специальности – астрономия. А в период с 1 июля 2016 года по 30 июня 2020 года обучался в очной аспирантуре ФИАН по направлению физика и астрономия. Как я уже сказал, справка о сдаче кандидатского минимума имеется, выдана в ФИАН 6 июня 2022 года. В настоящее время соискатель работает младшим научным сотрудником в АКЦ ФИАН. Закончил.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо! Слово представляется для доклада Сергею Александровичу.

*(Начинается демонстрация презентации на экране в зале заседаний и на экране в зоот для участников в удаленном режиме).*

## **ДОКЛАД СОИСКАТЕЛЯ**

**СОИСКАТЕЛЬ:** *(Выступает с докладом. В докладе демонстрирует и комментирует слайды 1-28, номера которых даны в начале соответствующих строк ниже. Слайды к докладу приведены в Приложении №3 к стенограмме и приложены к аттестационному делу в бумажной и электронной форме).*

### Слайд 1.

Добрый день, уважаемые коллеги! Разрешите представить свою диссертационную работу и доклад по ней. Эмиссионные характеристики внутренних областей галактик в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах.

### Слайд 2.

Давайте, сразу к делу. Мы в нашей диссертационной работе в первую очередь рассматриваем поведение пыли, термодинамическое поведение пыли в горячем газе, в разреженном горячем газе, который встречается повсеместно в большом количестве в разнообразных объектах во Вселенной. Это и газ в скоплениях галактик, это и центральная молекулярная зона.

СЕКРЕТАРЬ: Я прошу прощения, коллеги, за прерывание доклада. Я не вижу Михаила Васильевича Попова у нас на картинке. Михаил Васильевич, пожалуйста, отзовитесь. Когда я объявлял в начале, он был. Тогда, дорогие коллеги, Игорь Дмитриевич, тогда в соответствии с правилами мы объявляем технический перерыв.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Объявляется технический перерыв.

СЕКРЕТАРЬ: Объявляем технический перерыв, пока Михаил Васильевич не вернётся. Дорогие коллеги, я объявляю, что Надежда Шахворостова приняла решение не участвовать в данном заседании, ей стало хуже. Она считает, что до конца заседания не продержится. Поэтому, мы её из кворума убираем. Таким образом, мы одного человека из списка – онлайн убираем. Благодаря чему у нас, позвольте я ещё раз назову эту цифру, обновлённую. 10 человек присутствуют на месте и 5 человек присутствуют онлайн, кворум у нас всё равно есть, мы можем продолжать наше заседание.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо! Возобновим наше заседание. Ещё раз предоставляю слово соискателю, пожалуйста.

СОИСКАТЕЛЬ:

Слайд 2.

Спасибо! Давайте я продолжу с того места где всё остановилось, а именно для чего эта задача вообще ставилась. Такой газ, разреженный и горячий встречается повсеместно в большом количестве разнообразных объектов, как в локальной Вселенной, так и на более далёких красных смещениях, более высоких красных смещениях. Характерные примеры подобных объектов: Ультраяркие инфракрасные галактики, газ в северном полярном шпуре над плоскостью диска нашей Галактики, межгалактический газ в скоплениях, центральная молекулярная зона, и, в принципе, практически любые области звездообразования. Поэтому нашей главной, актуальной задачей, является корректная интерпретация спектров в областях звездообразования и, в принципе, за фронтами ударных волн, который, как я уже говорил, встречаются повсеместно. Одним из таких главных примеров является галактика NGC 891, где наблюдаются длинные, протяжённые инфракрасные гало, которые поднимаются высоко надо плоскостью диска. И разнообразные ультраяркие инфракрасные галактики, как например, Arp 299.

### Слайд 3.

Как выглядят, примерно, инфракрасные спектры можно увидеть на этих двух характерных изображениях. Это всё ИК-галактики. ИК спектр, в первую очередь, интерпретируется здесь с излучением нагретой пыли. Нагревается она либо ударным механизмом – столкновением с частицами плазмы, либо поглощением ультрафиолетовых квантов. Но, в принципе, все спектры, практически все, которые наблюдаются, они характеризуются неким отличием от чернотельного распределения. А именно таким, высокочастотным избытком, который здесь можно увидеть на правом изображении, здесь на вот этом плато.

### Слайд 4.

Одна из важных задач, которая в принципе, сейчас является актуальной задачей в астрофизике – это изучение центральной молекулярной зоны. Центральная молекулярная зона – область в Галактике, в центре Млечного пути, в которой идёт достаточно интенсивное звёздообразование и подобные условия встречаются во многих объектах во Вселенной. Поэтому, подобная структура рядом с нами позволяет изучить процессы звёздообразования при высокой температуре и высокой плотности. Однако, существуют некоторые проблемы, связанные с тем, что, когда мы смотрим на центральную молекулярную зону, мы видим по пути довольно много других объектов. В том числе возможных скрытых областей звёздообразования, вокруг которых могут сформироваться протяжённые сверхоболочки от множественных взрывов сверхновых и вклад пыли в этих сверхновых может исказить наблюдаемый спектр от центральной молекулярной зоны. Поэтому, правильная, грамотная интерпретация этих спектров и учёт вклада от пыли вдоль луча зрения в диске Галактики является важной задачей.

### Слайд 5.

Итак, цель нашей работы. Исследование свойств пыли в областях звёздообразования, в галактических истечениях. Исследование излучательной способности пыли, нагреваемой в стохастическом режиме. Этому посвящена глава 2. Исследование эволюционных особенностей спектрального распределения эмиссии пыли, но уже в газе, который остывает за фронтом ударной волны. Это мы исследуем в главе 3. Дальше, какое влияние оказывает процесс разрушения пыли при моделировании протяжённых газовых истечениях над областями звёздообразования. Этому посвящена глава 4. И, наконец, в главе 5 мы моделируем небольшую ОВ-ассоциацию, истечение газа над ней, над плоскостью диска галактики, и рассуждаем о том,

можно ли по эмиссионным характеристикам в ИК и СММ диапазонах, отождествлять и находить подобные образования в диске Галактики. Моя диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, приложений, списка литературы – всего 143 наименования. Общий объем – 108 страниц.

#### Слайд 6.

Перейдём к главе №2 – Температура пыли в горячей плазме.

#### Слайд 7.

Пыль нагревается стохастически. Особенно если мы рассматриваем разреженный и горячий газ, где каждая частица обладает высокой энергией. Стохастический режим начинает работать, когда среднее время между последовательными ударами частиц газа по пылинке сравнимо с характерным временем остывания. Т.е. пылинка просто успевает остыть. Здесь на этих четырёх диаграммах показаны, так называемые Функции распределения температур. Здесь цветом, как слева можно увидеть, показаны различные размеры. Давайте рассмотрим одну из панелей. Самые маленькие – 30 ангстремные пылинки в нашей модели. За счёт того, что у них малая масса они могут прогреться в результате столкновения с частицами газа до достаточно высоких температур. Однако, в то же время, могут до достаточно низких, где-то в районе 5-6 К. Где как раз находится пик. Чем больше пылинка, чем больше у неё масса, тем ближе функция распределения температур подходит, превращается в дельта-функцию равновесной температуры. Подобные условия, которые здесь описываются, они характерны в северном полярном шпуре, в остатках сверхновых и во множестве других объектов. Таким образом, когда вы наблюдаете целый ансамбль пыли, вы наблюдаете в том числе пылинки, которые находятся при высоких температурах и дают избыток в высокочастотной, т.е. коротковолновой области спектра. Как раз коротковолновая область спектра будет описываться и определяться этими мелкими пылинками, вот этим хвостом функции распределения у мелких пылинок при высоких температурах.

#### Слайд 8.

Как выглядит спектр. Здесь мы получаем модельные спектры для тех же самых параметров, что и на предыдущем слайде. Толстая жирная линия – это суммарный спектр, который мы получаем. Ну и как в предыдущих во введении модельных спектрах, которые из наблюдений. Мы аппроксимируем получаемый нами спектр от стохастически нагреваемой пыли двумя

компонентами – холодной и горячей. Пунктирная зелёная – это некая горячая компонента в высокочастотной области, штрихпунктирная – это некая холодная компонента. Т.е. часто такие спектры, для простоты интерпретации, аппроксимируют двух температурным распределением пыли, что на самом деле не верно и не отображает всей природы условий, в которых находится пыль. В то же время мелкие пылинки обладают более высокой температурой. Их вклад в суммарную эмиссию преобладающий, по сравнению с более крупной пылью.

#### Слайд 9.

Это значит, что удельная светимость мелких пылинок существенно выше, чем более крупных пылинок. Они (мелкие пылинки), особенно в коротковолновой части спектра, дают больший вклад, чем крупная пыль.

#### Слайд 10.

Итак, выводы. При стохастическом нагреве пыли отнесённая к единице массы излучательная способность мелких пылинок, при размере, примерно меньше 100 ангстремм, существенно превосходит таковую для крупных пылинок и пылинок с равновесной температурой, что наблюдательно проявляется в бимодальности эмиссионного спектра пыли с пиками на коротких, около 30 микрон, и длинных, около 300 микрон волнах и в цветовых характеристиках виновской части спектра.

#### Слайд 11.

Дальше мы рассматриваем эмиссионные характеристики пыли, но уже в процессе температурной эволюции газа.

#### Слайд 12.

Предполагается, что через газ прошла ударная волна, нагрела его и он остывает. Мы задаём два значения металличности: солнечную и более бедный металлами газ. Функции охлаждения взяты из работы Васильева 2013 года. И здесь на рисунках показана эволюция этого газа – как меняется температура. Начальная температура  $2.2 \times 10^7$  К. И на правом рисунке – как меняется плотность. Газ остывает и сжимается.

#### Слайд 13.

В первую очередь у нас есть некая эффективность нагрева. Дело в том, что частицы, падающие на пылинку, обладают некой длиной свободного пробега в материале пылинки, т.е. если у нас длина свободного пробега падающей

частицы превышает размер пылинки, то частица просто прошивает пылинку насквозь, передавая только часть энергии. Поэтому в газе с высокой температурой, где большое количество высокоэнергичных частиц, эффективность нагрева, особенно пылинок малых размеров, будет меньше. Это можно увидеть на левом рисунке. Забыл упомянуть, мы рассматриваем в первую очередь нагрев электронной компонентой газа, потому что если рассматривать суммарный поток тепла на пылинку, то больший вклад дают электроны, за счёт больших скоростей, с которыми они двигаются в газе. Левая картинка, снизу показана зависимость энергии с которой электроны падают на пылинку от энергии, которую они ей передают. Пунктирная линия – это кремниевые частицы, сплошной – углеродные. Т.е. газ остывает с  $2.2e7$  К, а здесь мы взяли среднекинетическую энергию газа, как энергию частицы, и энергия, которую передаёт пылинке электрон увеличивается, несмотря на остывание газа, пока не достигнет некоего пика, после которого начинает падать. Пылинки мелких размеров начинают греться лучше с остыванием газа, так как эффективность растёт. Чем крупнее пыль, тем точка перегиба смещается в более высокие энергии, так как с большей вероятностью электрон передаст пылинке всю свою энергию. Соответственно, 300 ангстрем сверху, а 1000 и 3000 ангстрем за пределами рисунка. Стрелками показано направление температурной эволюции газа. Я в процессе остывания газа строю функции распределения температур и оцениваю некую характерную среднюю температуру, полученную из усреднённой функции распределения температур, для разных состояний газа в процессе его остывания. На средней панели синими кружками показаны изменения средней по функции распределения температуры самых мелких пылинок. Видно, что средняя температура постепенно растёт, несмотря на то, что газ остывает. Но, не доходя последней точки, наблюдается некий перегиб, что можно отождествить с перегибом зависимости эффективности нагрева. 100 ангстремные пылинки – это красные треугольники. Мы видим, что происходит излом при температуре, примерно, 3 миллиона градусов после которого температура начинает падать. В то же время крупные пылинки сразу начинают чувствовать остывание газа и сразу температура их уменьшается. Таким же образом будет меняться полная светимость пыли в результате такой эволюции. Это можно увидеть на правой панели. Синяя жирная кривая – это изменение полной светимости графитовых и силикатных пылинок. Мы видим, что на примерно 3 миллионах градусов происходит перегиб, т. е. газ остывает, но излучение пыли растёт, после достижения этого перегиба, излучательная способность пыли начинает падать.

#### Слайд 14.

Переходим к выводам к главе 3. Исследованы тепловые свойства пыли за фронтами сильных ударных волн. Показано, что тепловые режимы мелкой ( $< 300$  ангстрем) и более крупной пыли различаются: мелкие пылинки на начальном этапе, порядка 3 миллионов лет продолжают нагреваться, пока окружающая плазма не остынет до температуры примерно 3 миллиона градусов. Это свойство мелкой пыли оказывает влияние на суммарный эмиссионный спектр, который отличается от квазипланковского спектра равновесной пыли, и может служить способом диагностики окружающей плазмы.

#### Слайд 15.

Теперь стоит всё это приложить к моделированию крупных газовых истечений. Но на больших временах развития подобных структур нужно учитывать разрушение пыли.

#### Слайд 16.

В этой главе мы добавляем на стадию пост-обработки полученных результатов гидродинамических расчётов влияние разрушения пыли на её светимость. Слева показаны панели с распределениями плотности и температуры выброса газа, который формируется над областью звездообразования с характерным темпом  $0.1$  массы Солнца в год. Динамический возраст подобных структур порядка 25 миллионов лет. Т.е. 25 миллионов лет пыль находится в таком агрессивном состоянии и как-то разрушается. Мы решили разработать метод, основанный на анализе характерных времён, которые встречаются в таких структурах. Время жизни пылинок нужно сравнивать либо с динамическим временем, либо с характерным временем остывания газа. Но плотность здесь очень маленькая, а температура высокая, и при таких плотностях время остывания существенно превышает динамическое время, т. е. газ не успевает остыть. Поэтому мы сравниваем время разрушения пыли с динамическим временем развития таких структур.

#### Слайд 17.

Как этот метод работает. Мы сравниваем динамическое время и время жизни, если время жизни больше динамического, то пылинка из определённого бина размеров выживает в тех условиях, в которых она оказалась. Здесь на панелях можно увидеть для разных размеров пыли, как выглядят разные соотношения времён. Цвет – это логарифм соотношения времён жизни к

динамическому. Чем более фиолетовый цвет, тем с большей вероятностью у вас пыль выживает. Очевидно, что крупная пыль выживает, практически повсеместно. В то же время мелкая пыль не везде. Внутри этой каверны, где плотность опускается до  $1.e-4$  пыль может выживать достаточно продолжительное время и к динамическому времени в 25 млн. лет остаться. Однако в оболочке, которая более плотная, порядка  $1.e-2$  и  $3.e-1$ , пылинки эффективно разрушаются, особенно мелкие, поэтому мы их при построении карт эмиссии не учитываем.

#### Слайд 18.

Здесь показаны карты распределения поверхностной яркости такой структуры в субмиллиметровом и ИК диапазонах: от 3 мкм до 3 мм. Можно видеть, что в центре, где плотность маленькая и выживаемость пылинок лучше, особо не меняется интенсивность, однако оболочка заметным образом проседает. Это связано с разрушением мелких пылинок, которые ответственны больше, чем крупные, за излучательную способность.

#### Слайд 19.

Переходим к выводам. Описан метод оценки влияния разрушения пылевых частиц нескольких размеров в горячем газе на эмиссионные свойства в ИК диапазоне. Рассчитаны эмиссионные характеристики пыли с учётом и без учёта разрушения пылинок в горячем газе галактического ветра.

#### Слайд 20.

Теперь, накопленные знания мы применяем в главе 5, где моделируем конкретную вспышку звездообразования в диске галактики, предполагая, как можно отыскивать не известные ранее скопления.

#### Слайд 21.

Одна из проблем при наблюдении и изучении центральной молекулярной зоны – у вас на луче зрения большое количество областей звездообразования. Некоторые видны – их мы наблюдаем, некоторые не видны, так как теряются на общем фоне. Мы предлагаем метод диагностики таких скоплений по горячим «шапкам», которые поднимаются над этими областями звездообразования.

#### Слайд 22.

Эти «шапки» вызваны множественными вспышками сверхновых. Мы проводим гидродинамическое моделирование и видим, что эти структуры

поднимаются, к 18 млн. лет, на высоту порядка 400 парсек. Здесь показаны диаграммы плотности и температуры газа.

#### Слайд 23.

Далее мы применяем метод, который учитывает разрушение пылинок. Но в данном случае, в отличие от остальных, где мы учитывали только столкновительный нагрев, как основной механизм нагрева пыли, здесь мы добавляем некую стационарную компоненту в нагрев, связанную с УФ излучением диска галактики. Она не учитывает стохастический нагрев падающими фотонами – это равномерный поток тепла, связанный с поглощением УФ квантов. Мы получаем такие эмиссионные структуры. В нейтральном водороде можно видеть, как выглядит такая «шапка», которая поднимается – это разреженная структура. Вот так это будет выглядеть, если мы оцениваем температуру пыли по наблюдаемому спектру. Т.е. это температура максимума в спектре излучения пыли. Видно, что эти горячие шапки будут выделяться на общем фоне, я напомним, что диффузное межзвёздное излучение не будет нагревать пыль больше 20 К, фон будет ещё прохладнее. И поэтому области с температурой 25-27 К будут сигнализировать нам о том, что снизу идёт подпитка горячим газом и пыль там греется не только УФ-излучением, но и ударным механизмом.

#### Слайд 24.

Проведены 3D гидродинамические расчёты эволюции ветра над OB-ассоциацией с массой от  $1.e3$  до  $1.e4$  масс Солнца в диске Галактики. Построены карты излучения в ИК диапазоне для горячих пузырей над областями звездообразования. Показано, что по наблюдаемым эмиссионным характеристикам в ИК диапазоне такие пузыри могут быть выделены на фоне пыли, которая нагревается только диффузным УФ полем.

#### Слайд 25.

Подхожу к положениям, выносимым на защиту своей диссертации. Позвольте я их зачитаю.

Первое. При стохастическом нагреве пыли отнесённая к единице массы излучательная способность мелких пылинок ( $a < 100$  ангстрем) существенно превосходит таковую для крупных пылинок и пылинок с равновесной температурой. Это наблюдательно проявляется в бимодальности эмиссионного спектра пыли с пиками на коротких (около 30 микрон) и длинных (около 300 микрон) волнах и в цветовых характеристиках виновской части спектра.

Второе. В остывающем газе тепловой режим мелкой ( $a < 300$  ангстрем) и более крупной пыли различаются: мелкие пылинки на начальном этапе эволюции (около 3 миллионов лет) продолжают нагреваться, пока окружающая плазма не остынет до температуры примерно 3 миллиона градусов. Следовательно, суммарный спектр пыли в этот период эволюции определяется более горячей мелкой пылью.

Третье. В расширяющихся гигантских сверхоболочках вокруг ОВ-ассоциаций большая часть пыли сохраняется, благодаря большему различию динамического времени сверхоболочек и времени разрушения пылинок. Пузыри от коллективных вспышек сверхновых в ОВ-ассоциациях малой массы (от  $1 \cdot 10^{-3}$  до  $1 \cdot 10^{-4}$  солнечных масс) за пределами одной шкалы высоты их распределения (около 100 пк), могут достигать высоты 0.4 кпк над плоскостью Галактического диска. Их эмиссионные характеристики, в том числе неравновесной пыли, могут служить для идентификации маломассивных звёздных скоплений, особенно в направлении центра Галактики.

#### Слайд 26.

Публикации. Диссертация основана на 4 публикациях, всё опубликовано в журналах из списка ВАК.

#### Слайд 27.

Апробировано на 14 конференциях, как устными, так и постерными докладами. В том числе 3 международные конференции.

#### Слайд 28.

Большое спасибо вам за внимание.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо, какие вопросы будут? Пожалуйста, Павел Борисович.

**ИВАНОВ П.Б.:** У меня вопрос, который я уже задавал, но ответ на который я не помню. Вы сравнивали размер мелких пылинок длиной волны Де-Бройля электрона? Что больше?

**СОИСКАТЕЛЬ:** Размер пылинки, особенно самой мелкой, которую мы рассматривали – 30 ангстрем. Это  $3 \cdot 10^{-7}$  см, а длина волны Де-Бройля таких высокоэнергичных электронов, которые падают, порядка  $1 \cdot 10^{-12}$  –  $1 \cdot 10^{-10}$  см. Сильно меньше.

ИВАНОВ П.Б.: Спасибо!

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо! Ещё вопросы? Андрей Георгиевич, пожалуйста.

ДОРОШКЕВИЧ А.Г.: Вы упомянули про трёхмерные расчёты, а чуть подробнее можете сказать?

СОИСКАТЕЛЬ: Это чистая гидродинамика без учёта магнитного поля.

ДОРОШКЕВИЧ А.Г.: Что там трёхмерного?

СОИСКАТЕЛЬ: Берётся трёхмерная сетка, куб с размером ячейки порядка 4 пк и соответственно инициируются вспышки в газовом диске.

ДОРОШКЕВИЧ А.Г.: Какой примерно размер?

СОИСКАТЕЛЬ: Смотря в какой главе. Если мы рассматриваем главу 4, то там мы делали пробные вспышки и у нас структура поднималась до 15 кпк.

ДОРОШКЕВИЧ А.Г.: Сколько у вас ячеек?

СОИСКАТЕЛЬ: В 4 главе вдоль Z около 500 ячеек и вдоль X и Y по 500 ячеек.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Ещё вопросы?

СЕКРЕТАРЬ: Игорь Владимирович из Пущино хотел. К микрофону поближе, пожалуйста.

ЧАШЕЙ И.В.: У вас рассматривается пыльная плазма, где каждая пылинка – это отдельная частица. Последние лет 20 по физике плазмы было много работ, посвящённых свойствам запылённой плазмы, в частности Цитович много этим занимался и потом его ученики. Речь идёт вот о чём: специфика пыльной плазмы состоит в том, что на пылинках может скапливаться очень большой заряд – сотник и даже тысячи зарядов электронов. И из-за этого пыльная плазма может быть сильно структурирована. В частности можно ожидать, что это как-то скажется на определении температур пыли. Вы что-то об этом можете сказать? Это первая часть вопроса. А вторая, как вы считаете

можно ли какими-то астрономическими методами эти специфические свойства пыльной плазмы как-то выявить? Спасибо.

**СОИСКАТЕЛЬ:** Спасибо большое за вопросы. По поводу электрических зарядов на пыли. Мы об этом думали и на самом деле, если по хорошему, электрические заряды пылинок нужно учитывать. Так как электрические заряды пылинок – это всегда какой-то потенциал, который либо ускоряет электроны, падающие на пылинку, либо наоборот немного отталкивающий, что меняет количество энергии, которое передаёт частица пылинке. В данном случае электрические заряды пылинок ограничены определённым образом сверху и в части задач не учитываются, так как помимо частиц, которые остаются на пылинке и накапливают заряд, у вас существуют налетающие фотоны, которые может не сильно добавляют энергии самой пылинке, т. е. нагревают её, но при этом могут вызывать обратное движение заряда. Таким образом мы делали некоторые расчёты в диссертации и заряд будет оставаться, примерно нейтральным. Но в некоторых специфических случаях, например, в протопланетных дисках и не только, не будет равенства между натеканием и выходом заряда, и заряд пылинки нужно будет учитывать. Мы планируем в будущих исследованиях добавлять влияние этого эффекта. Астрономическими методами подобные вещи можно идентифицировать. В диссертации упоминается, а я не стал это здесь упоминать, так как это не входит в положения выносимые, диаграмма «цвет-цвет» с помощью которых, наблюдая разные области за фронтом ударной волны можно оценивать параметры газа.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Ещё вопросы? Нет больше вопросов. Тогда слово предоставляется научному руководителю Щекинову Ю.А.

## **ВЫСТУПЛЕНИЕ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

**ЩЕКИНОВ Ю.А.:** Спасибо, Игорь Дмитриевич. Я, может быть в начале, прежде чем расскажу немного о моём знакомстве с Сергеем и моей совместной работе с ним, я прокомментирую вопросы Игоря Владимировича и дополню то, о чём сказал Сергей. Плазменные эффекты для тех условий космической пыли, о которых мы говорим, они не существенны по той причине (чисто плазменные эффекты, о которых писал Цитович), что здесь параметры плазмы таковы, что все плазменные частоты слишком малы для того чтобы замечать их проявления в электромагнитном спектре. С другой стороны, если говорить о более крупных структурах, соответствующих

плазменных эффектам: плазменных солитонов, то там эти эффекты, пылевые солитоны в частности, то там они могут существовать, но нарушается их устойчивость магнито-гидродинамическими течениями космической плазмы, т. е. по сути турбулентностью. В какой-то мере они могут проявляться в плотной плазме: молекулярные облака или околозвёздные аккреционные диски, но там существует эффект, который связан с зарядом пылинки. В этих условиях пылинка какую-то часть времени заряжена, а большую часть времени не заряжена. Поэтому она в тот промежуток времени, когда заряжена, связана с магнитными полями, а в другой период движется свободно. И плазменные эффекты требуют детального численного счёта, у нас пока до этого руки не дошли. И когда они дойдут нам понадобятся очень хорошие вычислительные ресурсы, потому что расчёты требуют хороших разрешений. Теперь о нашей работе с Сергеем, чтобы охарактеризовать его, я скажу несколько слов. Я не буду зачитывать отзыв научного руководителя, но скажу несколько слов, которые его охарактеризуют его как уже сложившегося научного сотрудника, что он собственно сегодня демонстрирует. Он попал в аспирантуру ко мне в 2016 году. Ему было предложено несколько задач и среди которых была задача связанная с активностью галактических ядер, в том числе с активностью ядра нашей Галактики. Он выбрал эти активные галактические ядра и центр нашей Галактики. Первоначально, я бы сказал, с пылающим энтузиазмом он взялся за дело, за те задачи, что связаны с центральной молекулярной зоной нашей Галактики, как лаборатории центральных активных галактических ядер. У него хорошая астрономическая школа и физическая подготовка, он получил её в ГАИШ и там люди знают своё дело. Кроме того он увлечён численным моделированием, практически любым. Это он любит делать. С тех пор он сделал несколько численных кодов. Во первых, численные коды они очень трудоёмкие, время затратные – коды связанные с стохастическим нагревом пыли, о котором сегодня Сергей говорил. Особенно мелкие пылинки, которых очень много, их где-то на 6-7 порядков больше чем крупных пылинок в обычной стандартной смеси космической пыли. Они дают существенный вклад в термодинамические характеристики пыли: эмиссия, тепловой режим и всё в этом духе. Это требует скрупулёзного программирования, чтобы корректно описывать флуктуации температуры пыли. Последние два-три года начинает активно развиваться эта деятельность, а именно стохастический нагрев пыли всюду в мире. В этом смысле, то что делает Сергей, его численные коды, они находятся в правильном месте, в правильное время. Стохастический нагрев он считает за фронтами ударных волн в горячей плазме с учётом возможного разрушения и кроме этого стохастический нагрев УФ и рентгеновскими

квантами в окрестности ярких областей звездообразования, центральных областей галактик и т. д. Первоначальная наша работа была направлена на центральную область нашей Галактики, но потом мы по мере продвижения поняли, что надо изучить свойства пыли в окрестности OB-ассоциаций, в окрестности вспышек сверхновых и этому получилось, что посвящена диссертация Сергея. Чтобы охарактеризовать его как научного работника я могу сказать следующее: за всё это время, пока мы с ним работали Сергей проявил два таких свойства: он норовит работать всегда самостоятельно, причём на первых порах его самостоятельность получалась с некоторым ущербом для нашей деятельности, потому что, когда мы обсуждали постановку некой задачи он настолько увлекался, что через две-три недели уже я и он забывали постановку задачи. По мере того как Сергей обучался процесс стал сходиться всё больше и больше. Сейчас мы знаем какую задачу ставили и какой результат ожидаем. Это демонстрируется теми публикациями, которые Сергей сделал и сегодняшней работой. Это его свойство работать самостоятельно с энтузиазмом, я думаю, характеризует его как настоящего, сложившегося научного работника. На мой взгляд он вполне заслуживает учёной степени кандидата физико-математических наук. Всё что я хочу сказать. Спасибо!

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Какие вопросы будут к научному руководителю? Нет вопросов? Спасибо! Тогда, пожалуйста, мы переходим к зачитанию поступивших отзывов.

### **ОТЗЫВ ОРГАНИЗАЦИИ, ГДЕ ВЫПОЛНЕНА РАБОТА**

**СЕКРЕТАРЬ:** Спасибо, Игорь Дмитриевич. Опять же, чтобы не забыть, сразу скажу, что у нас есть заключение организации где выполнена работа, у нас есть отзыв ведущей организации. Других отзывов на диссертацию или автореферат не поступило. Я начинаю с зачитания заключения ФИАН – организации, где была выполнена работа. *(Зачитывает отзыв Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. Отзыв положительный, прилагается).*

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

**СЕКРЕТАРЬ:** Перехожу к отзыву ведущей организации – это ГАИШ МГУ. На диссертационную работу Дроздова Сергея Александровича. *(Зачитывает отзыв Государственного астрономического института им. П.К.*

*Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ). Отзыв положительный, прилагается).*

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо! Сергей Александрович, вы предпочитаете сразу отвечать или потом всё вместе?

СОИСКАТЕЛЬ: Давайте я отвечу всё вместе.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Тогда переходим к следующему пункту. Слово представляется первому оппоненту Павлюченкову Ярославу Николаевичу.

### **ВЫСТУПЛЕНИЕ ПЕРВОГО ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

ПАВЛЮЧЕНКОВ Я.Н.: Ещё раз здравствуйте. Разрешите мне зачитать свой отзыв, но не весь. Я пропущу актуальность диссертации, которую мы прослушали и которая у меня не вызывает сомнений, а также опущу краткое содержание диссертации и позвольте мне сразу перейти к личным впечатлениям. *(Зачитывает свой отзыв. Отзыв положительный, прилагается).* Спасибо!

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо! Вы будете в конце отвечать или сейчас?

СОИСКАТЕЛЬ: Да, я отвечу сразу на всё.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Хорошо, тогда предоставляется слово второму оппоненту. Пожалуйста, Балашёву Сергею Александровичу.

### **ВЫСТУПЛЕНИЕ ВТОРОГО ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

БАЛАШЕВ С.А.: Здравствуйте. Но я коротко всё же скажу про актуальность своими словами. Зачитаю недостатки и замечания, на которые надо ответить и общие выводы. Я бы хотел подчеркнуть актуальность. Об этом говорилось, что сейчас появились данные с космического телескопа JWST, но помимо этого люди повсеместно используют наблюдения пыли в далёких галактиках. Появились сейчас данные и используются для оценок масс газа в этих галактиках. В диссертации чётко показано, что нужно очень аккуратно с этим быть, потому что эти галактики они, естественно, далёкие и яркие, в них процесс звёздообразование повышенный и другие есть экстремальные свойства. Ну и в таких случаях однотемпературным приближением, которым

люди пользуются для оценок массы и следующих физических выводах, пользоваться не очень хорошо – нужно получать самосогласованные решения. Поэтому это очень важно с точки зрения интерпретации наблюдений и нашего понимания о структуре пыли. Давайте я перейду к замечаниям и общим выводам. (*Зачитывает свой отзыв в части замечаний. Отзыв положительный, прилагается*). Спасибо!

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо! Теперь, Сергей Александрович, ответьте, пожалуйста, на вопросы.

## **ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ В ОТЗЫВАХ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ И ОППОНЕНТОВ**

**СОИСКАТЕЛЬ:** Давайте я начну по порядку. Начну с замечаний из оппонировавшей организации, а именно ГАИШ МГУ, и конкретно Олега Егорова. Замечания, которые он указал по тексту, я с ними согласен. Действительно, это опечатки, здесь всё понятно. Замечания касаются статистического метода и его точности я ещё упомяну в ответах на другие замечания. Однако, упомяну, что метод зависит от количества событий соударений, по крайней мере его точность и с увеличением этого числа функции распределения меняются незначительно, таким образом я предполагал, что, достигая определённого значения точности, значимо результаты не поменяются. Кроме того сами функции распределения сравнивались с теми, которые были получены другими авторами и другими методами. Замечания, связанные с разрушением пыли, я чуть позже ещё упомяну, сейчас о замечании связанном с дроблением пыли. Насколько я помню, дробление или фрагментация пылинки происходит в первую очередь за счёт столкновения пылинок друг с другом, и этот процесс играет активную роль в более плотных средах: плотные молекулярные облака или течения аккрецирующего газа на молодые звёзды, или просто протопланетные диски. Однако, у нас очень разреженная плазма, и концентрация пылинок в такой плазме порядка  $1 \cdot 10^{-10}$  частиц на кубический сантиметр. Поэтому, вероятность того, что пылинки будут сталкиваться друг с другом есть, но вклад таких событий мал. Про вопросы связанные с наблюдениями таких объектов или «шапок» над галактическим диском чуть позже.

*На экране демонстрируются слайды 29-33.*

Слайд 30.

Переходим к замечаниям Ярослава Павлюченкова. Первое замечание связано с вкладом различных компонент в распределение излучения от нагретой пыли. Здесь на левом рисунке я дополнительно построил спектр излучения пыли при параметрах газа, которые указаны сверху. Стохастически нагреваемой пыли. И здесь показаны вклады различных размеров в ту или иную часть спектра. Здесь можно хорошо увидеть, как 30 ангстремные маленькие пылинки, обладая более высокой температурой дают вклад на коротких длинах волн. Справа это отдельно вклад 30 ангстремных и вклад в общий спектр от конкретных температур пыли. Здесь кривыми показано, что мелкие пылинки, обладающие маленькой температурой 10 Кельвин – это правая нижняя линия. И с увеличением температуры они обеспечивают непрерывную, гладкую кривую спектра, которая достигает своего максимуму в районе 10 микрон.

### Слайд 32.

Дальше вопрос связанный с достоверностью значений и флуктуации кривых. На этом рисунке зависимости для 5 разных размеров пылинок от 30 слева до 3000 ангстрем справа средних по функциям распределения температур и как они меняются в процессе остывания газа. Снизу это изменение плотности в процессе остывания а по вертикальной оси температура. Жирная линия с точками показана кривая, которая представлена в диссертации, а полосы это некий доверительный интервалы. Я запустил около 50 моделирований для каждого значения параметра газа и построил 50 точек для определения температур. Очевидно, что 50 не покрывает с большой достоверностью весь диапазон, но в среднем вы можете видеть, как флуктуируют значения температур самих пылинок. С увеличением размера доверительный интервал сужается. Показанные в результате кривые полностью сходятся с этими доверительными интервалами.

### Слайд 31.

Это ответ на замечание Сергея Балашева, о том какой доверительный интервал для изменения полной светимости пыли в процессе остывания газа. Так же получен для 50 запусков моделирования. Она колеблется, метод за счёт того, что он статистический и большого количества соударений достичь можно, но это долго и занимает большие вычислительные мощности, которых у меня, к сожалению, нет. Поэтому я ограничивался определённым количеством событий соударения и с их увеличением этот доверительный интервал будет сужаться. Однако, как вы можете заметить, положение этого перегиба оно не сильно меняется.

Замечание про разрушение пылинок. Вы правы, я не учитывал процесс перехода крупных пылинок, которые постепенно разрушаются и переходят в более мелкоразмерный бин в распределении пылинок по размерам. Однако стоит учесть, что распределение по размерам пылинок достаточно крутое, если мы берём стандартное MRN распределение, которое рассматривается в диссертации, то там степенное распределение с показателем степени  $-3.5$ . Соответственно это значит, что у вас крупных пылинок гораздо меньше чем мелких, поэтому крупные пылинки, переходя в более нижний бин, они дают меньший вклад по количеству, по сравнению с тем количеством, которое там уже было. Поэтому такие переходы нужно учитывать, но в наших расчётах, особенно в том методе учёта разрушения по анализу характерных времён, влияние этого эффекта незначительно.

#### Слайд 29.

Переходя к наблюдательным проявлениям, я ещё раз покажу эту карту миссии Planck. Это карта всего неба. Здесь цветом показано распределение наблюдаемых температур пыли, как то что мы строили для горячих «шапок» над диском галактики. Это именно то, о чём говорил Юрий Андреевич. Эти красно-коричневые пятна – это области где Planck наблюдает более высокую температуру пыли. По ним можно отождествлять такие структуры. Наши структуры имеют высоту порядка 300 пк и на расстоянии порядка 5,6 кпк от нас, такие объекты будут несколько градусов в поперечнике. Здесь мы наблюдаем в районе диска Галактики достаточно много горячих пятен, которые при детальном исследовании можно интерпретировать как проявление скрытых областей звездообразования. Однако, стоит сказать, что Planck работает, если я не ошибаюсь, не уходит в высокочастотную часть. Однако, стоит сказать, что если мы будем рассматривать полный спектр пыли от ближнего до дальнего ИК спектра, то подобные структуры можно наблюдать и пытаться отождествлять скрытые молодые ОВ-ассоциации.

#### Слайд 33.

Теперь возвращаясь к диаграммам «цвет-цвет». Метод основан на сравнении поток на соседних длинах волн. Как заметил Олег Егоров в отзыве оппонировавшей организации, в некоторых диапазонах не будут сильно отличаться. Здесь две кривые: жирная жёлтая линия – это пыль, нагреваемая стохастически, которую мы строим при моделировании наших спектров, а тонкая жёлтая линия – это равновесная пыль, пыль температура, которой не флуктуирует. Здесь взята средневзвешенная пыль размером порядка 0.1

микрона. В рэлеевской части спектра различия малы, однако в виновской части спектра проявляется это отличие от равновесной. Есть условия, когда сравнения на этой диаграмме могут выявить механизмы нагрева этих пылинок. С другой стороны, при наблюдении расширяющихся сверхоболочках, мы видим фронт расширяющейся ударной волны и газ, который остался за этим фронтом. Наблюдая области ближе к фронту и чуть дальше за ним мы видим газ, который находится в начале своего остывания и в конечной части своей эволюции. Сравнивая положения на этой диаграмме, при наблюдении подобных объектов, можно пытаться понять какие условия вокруг пыли, которая нагревается в этой области. Мы не делали напрямую с наблюдениями по простой причине, что каждое сравнение в этих работах это ещё одна работа, а задач очень много и хочется закончить некий инструментарий и только потом заниматься некой интерпретацией. Это в планах, часть результатов, которые мы получили они просто не вошли в диссертацию и в ближайшее время, я надеюсь, они будут опубликованы. Работа в этом направлении идёт.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо! А теперь диссертация открывается для общей дискуссии. Пожалуйста, у кого какие будут вопросы, замечания, высказывания.

## **ОБЩАЯ ДИСКУССИЯ**

**ЩЕКИНОВ Ю.А.:** Игорь Дмитриевич, мне можно?

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Конечно!

**ЩЕКИНОВ Ю.А.:** Немного расширить те ответы, которые Сергей сейчас дал, прокомментировать. Эта претензия была высказана, по существу, и оппонентами и оппонировавшей организацией. Возможность использования такой цветовой диаграммой, то что последнее говорил Сергей и включить такого рода исследования в диссертацию. Я могу сказать и Сергей это подтвердит, что эту возможность я тормозил из простого принципа, который был высказан в своё время Козьмой Прутковским: «Нельзя объять необъятное». Объекты для такого сравнения это достаточно старые с одной стороны сверхновые, а с другой стороны не очень, так чтобы от них была ещё ударная волна, которая греет пыль. Таких объектов у нас не так много. Это объекты с возрастом порядка 3000 лет, которые нагребли достаточное количество пыли и это не молодые остатки, такие как остаток в Магелановом

Облаке 1987А. Когда пройдёт пару тысяч лет, можно будет наблюдать остаток в Касиопее или в родственных остатках, у которых сейчас возраст порядка тысячи лет. Других мы не знаем. Но то что сказал Сергей про центр Галактики, про направление на центр там это может быть. Но нужно идентифицировать – это отдельная, кропотливая и требующего большого времени работа. Спасибо!

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо! Ещё есть желающие?

ЛУКАШ В.Н.: У меня вопрос больше к Сергею Балашеву. Появились данные, как я понял, James Webb. Это ещё не время сравнить численные модели, о которых говорил Сергей Дроздов с другими группами. Так как разные группы с разными моделями получают разные результаты.

БАЛАШЕВ С.А.: Я так понимаю там есть пару программ наблюдательных, но там выполняется первая фаза программ. А есть конкретные наблюдательные программы про пыль в нашей Галактике, но ближайšie я не помню уже.

ЩЕКИНОВ Ю.А.: Можно я прокомментирую.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Да, конечно, пожалуйста.

ЩЕКИНОВ Ю.А.: Вопрос Владимира Николаевича. Володя, да, действительно появились данные James Webb, появились данные о наличии или отсутствии пыли в галактиках на красных смещениях больше 10 и даже больше 13. И сейчас нами готовится, она давно уже готовится статья совместно с нашими индийскими коллегами как раз по галактике, у которой красное смещение равно 11. И мы интерпретируем те наблюдательные проявления, которые связаны с наличием или отсутствием пыли. В основном проблема в том, что похоже там пыль быстро выметается из галактик из-за быстрого звездообразования. Быстрое звездообразование – большой поток излучения и ударные волны они разбрызгивают пыль в пространстве и на некоторое время галактика производит впечатление пустыми от пыли. Таков последний результат James Webb. Сейчас у нас готовится статья вместе с Сергеем Дроздовым.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Всё у вас?

ЩЕКИНОВ Ю.А.: Да-да, всё, спасибо!

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо, Юрий Андреевич. Ещё кто желает высказаться?

БАЛАШЕВ С.А.: А можно я как оппонент. Я не знаю как у вас принято, но я на своё замечание номер 1 про выбор времён соударений не услышал ответа.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Пожалуйста.

СОИСКАТЕЛЬ: Спасибо большое, Сергей. Я прошу прощения. Отвечу. Событие соударения само по себе случайный процесс, и поэтому мы функцию распределения брали просто одородной. Однако, мы понимаем, что каждое событие соударения по энергиям распределено по Максвеллу. Однако сами события соударений я разбрасывал однородно.

БАЛАШЕВ С.А.: Казалось бы нужно экспоненциально брать. Я не знаю насколько там будет отличие в расчётах, но это более адекватно.

СОИСКАТЕЛЬ: Спасибо большое за замечание, я обязательно изучу этот вопрос. Мы брали именно однородное распределение.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо! Ещё желающие? Нет больше? Тогда дискуссию будем считать закрытой и предоставляем заключительное слово соискателю.

СОИСКАТЕЛЬ: Спасибо большое за внимание, за дискуссию, за вопросы, за комментарии. Это важно и для защиты диссертации, и для моей дальнейшей работы в этом направлении. В качестве последнего слова хочется в первую очередь высказать слова благодарности. Самая главная благодарность – моему научному руководителю, Юрию Андреевичу Щекинову, чья мудрость, терпение и живой интерес к тому, чем мы занимаемся, к тому, чем я начал заниматься, позволили пройти через трудности, непонимание, проблемы с написанием статей. Большая заслуга моего научного руководителя в том, что диссертация состоялась. Огромное спасибо оппонентам, которые нашли время приехать, даже из другого города, это очень приятно. Спасибо большое, что вы пришли лично. Я надеюсь, что наша дальнейшая коллаборация будет продолжаться. Спасибо большое всем членам диссертационного совета, что вы нашли время и заслушали мою диссертацию. Спасибо руководству Астрокосмического центра и теор. отделу и спасибо моим родным и близким, друзьям, которые с живым интересом

всегда следили за тем, чем я там занимаюсь и поддерживали, помогали, хвалили и ругали и т. д. Большое спасибо.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо. Переходим к тайному голосованию. Юрий Юрьевич, пожалуйста.

**СЕКРЕТАРЬ:** Коллеги, итак мы снова заседаем в режиме смешанном: часть здесь, часть онлайн. Соответственно, мы снова все голосуем в системе Криптовече. Каждый из нас получил письмо, нужно сначала как обычно залогиниться, зарегистрироваться и проголосовать. Думаю, что можно начинать. Мы с технической стороны ко всему готовы.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо. Тогда объявляется перерыв на 15 минут. Ровно в 5 часов мы продолжим наше заседание.

## **ТАЙНОЕ ГОЛОСОВАНИЕ**

*Перерыв на голосование с использованием системы для электронного тайного голосования Криптовече. Во время перерыва все присутствующие на заседании члены диссертационного совета голосуют со своих устройств, либо с помощью компьютера, установленного в зале заседаний.*

**СЕКРЕТАРЬ:** Уважаемые коллеги, все члены совета на месте, можем продолжать.

*На экран выводятся результаты тайного голосования.*

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Продолжаем заседание нашего совета. Результаты голосования выведены на экран. Пожалуйста, Юрий Юрьевич.

**СЕКРЕТАРЬ:** Так, у нас участвовало в заседании 15 членов совета. Было разослано 15 приглашений, все участвующие члены совета зарегистрировались и проголосовали. Результаты следующие. За — 15, против — 0, недействительных — 0.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:** Спасибо! Нам надо утвердить результаты тайного голосования. Пожалуйста, голосуем. Кто за?

СЕКРЕТАРЬ: Юрий Андреевич, Вам нужно или руку поднять или «желтую руку», как Михаил Васильевич.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Считаем результаты утвержденными. Теперь надо принять заключение. Юрий Юрьевич, пожалуйста.

СЕКРЕТАРЬ: Спасибо. Коллеги, заключение было разослано по диссертационному совету вчера. Мы получили значительное количество правок со стороны Димы, которое, я так понимаю, было пропорционально температуре нашего ученого секретаря в процессе завершения работы над этим текстом. Поэтому большое спасибо вдвойне: Наде, которая невзирая на побеждающую ее немоготу доделала этот текст и Диме за то, что он помог побороться с мелкими моментами, огрехами, которые там все еще остались. Все полученные по тексту заключения диссовета замечания учтены в документе, который был разослан вчера вечером и, соответственно, распечатан и лежит сейчас у нас на столах. Есть ли еще какие-то замечания по этому тексту. Коллеги?

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Так, коллеги, есть еще замечания? Нет замечаний. Тогда будем голосовать. Кто за принятие? Единогласно принято. Теперь поздравим с успешной защитой. (*Аплодисменты*). Заседание будем считать закрытым.

Председатель заседания, председатель  
диссертационного совета, доктор  
физико-математических наук

И.Д. Новиков

Секретарь заседания,  
и.о. учёного секретаря, заместитель  
председателя диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

Ю.Ю. Ковалев

15 сентября 2022 г.