

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

СТЕНОГРАММА
ЗАСЕДАНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
Д 24.1.262.02

17 сентября 2025 года

Защита диссертации

Дедикова Святослава Юрьевича

на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия»

*«Разрушение космической пыли за фронтами ударных
волн в неоднородных средах»*

Присутствовали члены диссертационного совета:

Новиков Игорь Дмитриевич, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, 1.3.1, физ.-мат. науки, председатель диссертационного совета

Лихачев Сергей Федорович, д.ф.-м.н., 1.3.1, техн. науки, заместитель председателя диссертационного совета (*присутствует удалённо*)

Тюльбашев Сергей Анатольевич, д.ф.-м.н., 1.3.1, физ.-мат. науки, заместитель председателя диссертационного совета (*присутствует удалённо*)

Шахворостова Надежда Николаевна, к.ф.-м.н., 1.3.1, техн. науки, учёный секретарь диссертационного совета

Андрианов Андрей Сергеевич, к.ф.-м.н., 1.3.1, техн. науки

Васильев Евгений Олегович, д.ф.-м.н., 1.3.1, физ.-мат. науки

Вибе Дмитрий Зигфридович, д.ф.-м.н., профессор РАН, 1.3.1, физ.-мат. науки

Занин Кирилл Анатольевич, д.т.н., 1.3.1, техн. науки

Каленский Сергей Владимирович, д.ф.-м.н., 1.3.1, техн. науки

Ковалев Юрий Андреевич, д.ф.-м.н., 1.3.1, техн. науки

Лутовинов Александр Анатольевич, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, 1.3.1, физ.-мат. науки (*присутствует удалённо*)

Малофеев Валерий Михайлович, д.ф.-м.н., 1.3.1, техн. науки (*присутствует удалённо*)

Новиков Дмитрий Игоревич, д.ф.-м.н., профессор РАН, 1.3.1, техн. науки

Пушкарев Александр Борисович, д.ф.-м.н., профессор РАН, 1.3.1, физ.-мат. науки (*присутствует удалённо*)

Слемзин Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н., доцент, 1.3.1, физ.-мат. науки (*присутствует удалённо*)

Чашей Игорь Владимирович, д.ф.-м.н., 1.3.1, физ.-мат. науки (*присутствует удалённо*)

Председатель заседания – д.ф.-м.н., председатель диссертационного совета Новиков И.Д.

Секретарь заседания – к.ф.-м.н., учёный секретарь диссертационного совета Шахворостова Н.Н.

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

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Уважаемые коллеги, давайте начнем наше утреннее, первое заседание. Пожалуйста, я попрошу ученого секретаря огласить то, что требуется.

СЕКРЕТАРЬ: Спасибо, Игорь Дмитриевич. Здравствуйте, уважаемые коллеги. Сегодня 17 сентября 2025 года, на часах 12 часов московского времени. Начинаем первое заседание по защите диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соискатель Дедиков Святослав Юрьевич. Заседание проводится у нас в удаленном интерактивном режиме в соответствии с распоряжением администрации ФИАН, которое имеется. Также у нас имеется необходимое согласие от соискателя на проведение заседания в удаленном режиме и заявления от членов диссовета, которые присутствуют онлайн. Я кратко напомним об особенностях проведения защиты в удаленном режиме. Значит, во время защиты члены совета, которые присутствуют лично, не могут покидать зал заседаний, а члены совета, присутствующие онлайн, должны все время находиться с включенными камерами. В случае каких-то технических неполадок, разрыва связи, мы должны объявить технический перерыв для

устранения неполадок. То же самое относится и к присутствующим в зале членам совета. Если по какой-то причине нужен будет такой перерыв, то прошу сообщить об этом председателю, и такой перерыв будет объявлен.

Игорь Дмитриевич поручил мне огласить детали заседания. У нас присутствует на заседании 15 членов Совета. Из них 9 членов Совета присутствуют лично в зале заседаний, и 7 членов Совета присутствуют онлайн, то есть в удаленном интерактивном режиме. Значит, кворум у нас имеется, и также соблюдена пропорция требуемая между личным присутствием и онлайн-участием.

КОВАЛЕВ Ю.А.: Прошу прощения, пятнадцать или шестнадцать?

СЕКРЕТАРЬ: Прошу прощения, спасибо, Юрий Андреевич, шестнадцать человек: девять человек лично присутствуют, я повторюсь, и онлайн – семь человек. Я перечислю. Лично присутствуют Новиков, Шахворостова, Вибе, Васильев, Новиков, Каленский, Ковалев, Андрианов, Занин. Онлайн – Пушкарев, Слемзин, Лихачев, Чашей, Малофеев, Тюльбашев, Лутовинов. Все это будет отражено в стенограмме заседания.

Перейду теперь к аттестационному делу. Итак, соискатель Дедиков Святослав Юрьевич. Название диссертации: «Разрушение космической пыли за фронтами ударных волн в неоднородных средах». Кандидатская диссертация по специальности 1.3.1 “Физика космоса, астрономия”, отрасль физико-математические науки. Диссертация выполнена в Астрокосмическом центре Физического института имени Лебедева Российской академии наук. В период подготовки диссертации Дедиков Святослав Юрьевич работал в АКЦ ФИАН в должности ведущего инженера-программиста. Научный руководитель – доктор физико-математических наук Васильев Евгений Олегович, ведущий научный

сотрудник Астрокосмического центра ФИАН. Ведущая организация – физико-технический институт имени Иоффе Российской академии наук, город Санкт-Петербург. Оппонентами по диссертации выступили Зинченко Игорь Иванович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии Института прикладной физики имени Гапонова-Грехова Российской академии наук, город Нижний Новгород. Игорь Иванович присутствует в зале заседаний. И второй оппонент – Гусев Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института имени Штернберга, МГУ имени Ломоносова, город Москва. Александр Сергеевич тоже присутствует в зале заседаний.

Так, теперь я оглашу основные выдержки из представленных соискателем документов. В аттестационном деле имеются все необходимые документы, диплом о высшем образовании, удостоверение и справка о кандидатских экзаменах, положительное заключение организации, протоколы о принятии диссертации к защите и к рассмотрению, также имеются все необходимые отзывы от ведущей организации и от оппонентов, они поступили все в установленные сроки, все они положительные и удовлетворяют требованиям положения.

Соискатель Дедиков Святослав Юрьевич, 1977 года рождения, в 2001 году окончил Ростовский государственный университет по направлению физика, с отличием. Святослав Юрьевич обучался в заочной аспирантуре Ростовского государственного университета в период с 2001 по 2004 год. Имеется удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов по иностранному языку и специальной дисциплине, которое выдано Южным федеральным университетом. В 2025 году Святослав Юрьевич был прикреплен к ФИАН в качестве соискателя

для сдачи кандидатских экзаменов и сдал кандидатский экзамен по истории и философии науки. Справку о сдаче этого экзамена тоже имеется в деле, она выдана ФИАНом. Как я уже сказала, в настоящее время соискатель работает ведущим инженером-программистом в Астрокосмическом центре ФИАН. Я закончила оглашать выдержки из документов, Игорь Дмитриевич.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Теперь предоставим вам слово, Святослав Юрьевич. Пожалуйста, сделайте доклад.

ДОКЛАД СОИСКАТЕЛЯ

На экран выводится демонстрация слайдов презентации доклада соискателя.

Презентация находится в Приложении № 1 к стенограмме заседания.

СОИСКАТЕЛЬ: Спасибо.

Слайд 1.

Здравствуйте, уважаемые коллеги! Меня зовут Святослав Дедиков, и тема моей диссертации "Разрушение космической пыли за фронтами ударных волн в неоднородных средах".

Слайд 2.

Целью работы является изучение особенностей динамики космической пыли за фронтами ударных волн при их распространении в неоднородной среде, исследование влияния неоднородностей окружающей среды на эффективность разрушения межзвездной пыли в остатках сверхновых, расчет и анализ наблюдательных проявлений в инфракрасном и рентгеновском диапазонах.

Слайд 3.

В настоящее время существует проблема баланса пыли в межзвездной среде – кризис пыли, о котором впервые говорилось в работе McKee 89-го года, который заключается в том, что темпы образования пыли не соответствуют темпам ее разрушения в Галактике. Пыль образуется при вспышках сверхновых, в ветрах звезд красных гигантов и сверхгигантов. Оценки, которые существуют в отношении темпов образования пыли, составляют 5 тысячных масс Солнца в год для нашей Галактики. Пыль разрушается за фронтами сильных ударных волн, и здесь оценка составляет одна десятая массы Солнца в год. Эта же проблема имеет место и для других галактик. А для далеких галактик она усугубляется еще и тем, что источников пыли там меньше. В этой связи возникает необходимость рассмотреть любую возможность для уточнения эффективности разрушения пыли в межзвездной среде.

Слайд 4.

Рассмотрим разрушение пыли в остатке сверхновой, который расширяется в неоднородной среде.

Слайд 5.

Разрушение пыли происходит за фронтами сильных ударных волн, скорость которых превышает 200 км в секунду, и соответствующая температура за фронтом составляет 10 в шестой и более кельвинов. Механизмами разрушения пыли в таких условиях является тепловое и кинетическое испарение. Сильные ударные волны присутствуют в остатках сверхновых. Оценка темпов разрушения пыли в нашей Галактике делалась на основе рассмотрения разрушения пыли в остатке — в единичном остатке — сверхновой, которая расширяется в

однородной среде. Затем оценка делалась исходя из того, что пыль разрушается на стадии Седова, когда скорость, соответственно, превышает 200 км в секунду. И рассматривалась охваченная масса газа и соответственно пыли и делалась оценка разрушения пыли одной сверхновой. Далее она экстраполировалась на Галактику с учетом темпа вспышек сверхновых. Но это было для однородной среды, а что же будет в неоднородной среде?

Слайд 6.

Используем многокомпонентную трехмерную совместную модель, численную, пыль плюс газ. К газодинамической схеме годуновского типа добавляем макрочастицы пыли, для них учитываем взаимодействие с газом. И также учтено охлаждение и процессы теплового и кинетического испарения пылинок.

Слайд 7.

Здесь приведены начальные условия для наших моделей. Рассматривали как однородную среду, так и неоднородную с логнормальным распределением плотности. Межзвездная пыль задавалась полидисперсной с распределением по размерам MRN. Начальные параметры (характеристики) сверхновой и вычислительной сетки здесь также приведены.

Слайд 8.

На данном слайде представлен срез плотности.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Вы извините, мы вынуждены технический перерыв объявить, пожалуйста.

СЕКРЕТАРЬ: Я прошу прощения, Святослав Юрьевич, технический перерыв у нас. Сергей Федорович Лихачев, пропало изображение. Вот, теперь появилось.

Всё, спасибо. Сергей Федорович. Что? Нет, это всё пишется в системе. Всё, спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Продолжайте.

СОИСКАТЕЛЬ: На данном слайде приведен срез распределения плотности в зависимости от степени неоднородности, от однородного случая до сильно неоднородного. Видно, что оболочка искажается при распространении в неоднородной среде.

Слайд 9.

И если посмотреть на массу пыли в остатке, которая растет со временем, то можно отметить следующее. Во-первых, мы видим существенное различие между массой пыли в случае, когда мы учитываем разрушение пыли внутри остатка, и в случае, когда не учитываем. Кроме того, мы видим здесь существенную зависимость от степени неоднородности — разным цветом отмечен разный уровень неоднородности плотности. И часть пыли находится в самой горячей фазе газа, в которой после перехода остатка на радиационную стадию масса пыли быстро сокращается.

Слайд 10.

Если отнести массу пыли в остатке, которая рассчитана с учетом разрушения, к массе пыли в расчетах без разрушения, то можно отследить долю сохранившейся («выжившей») пыли. На начальных временах эта доля быстро падает, происходит эффективное разрушение. Далее, при начале радиационной фазы этот процесс замедляется, и общая масса пыли растет благодаря поступлению межзвездного вещества. При этом видно, что доля разрушенной пыли существенно зависит от

степени неоднородности среды. Снизу это однородный случай, сверху — максимально неоднородный. При этом, если посмотреть.. если изменять среднюю плотность газа, то на поздних временах зависимость от плотности очень слабая, то есть доля сохранившейся пыли слабо зависит от плотности (средней плотности).

Слайд 11.

Итак, таким образом получено, что разрушение межзвездной пыли при расширении оболочки в неоднородной среде оказывается менее эффективным, чем в однородной, и средняя плотность газа слабо влияет на долю сохранившейся пыли на поздних временах.

Слайд 12.

Теперь давайте рассмотрим, как пыль... какова динамика пыли в различных тепловых фазах и как пыль при этом светит в остатке.

Слайд 13.

Здесь приведены срезы плотности газа, плотности пыли и температуры газа для слабо неоднородного и сильно неоднородного случая. Обращают на себя внимание особенности в распределении пыли при сравнении с температурой газа в соответствующих областях (имеются в виду внутренние области внутри остатка).

Слайд 14.

Можно рассмотреть долю массы газа в различных тепловых фазах и эволюцию этой доли со временем. Верхняя панель графиков отражает долю массы газа в конкретной тепловой фазе относительно всей массы газа в остатке для случаев

различной степени однородности. А снизу отображена панель для пыли, которая ассоциирована с этими тепловыми фазами газа. Здесь есть много особенностей, связанных с перераспределением пыли между тепловыми фазами газа и в зависимости от неоднородности, но я сейчас детально на этом останавливаться не буду.

Слайд 15.

Важно то, что если рассмотреть горячую фазу с температурой больше чем 10 в шестой, то в однородном случае (слева) крупной пыли остается очень мало, а в неоднородном ее доля существенно выше. То есть сохраняется больше пыли, крупной пыли, в неоднородном случае.

Слайд 16.

Если посмотреть на... рассчитать светимость пыли, находящейся в соответствующих тепловых фазах газа, то получим вот такие интересные зависимости, на которых также прослеживается разное поведение для разной степени неоднородности — слабо и сильно неоднородного случая.

Слайд 17.

Светимость... изменение светимости остатка интересно посмотреть в линиях ионизованных металлов и в континууме инфракрасном, где излучает пыль. Здесь приведены соотношения между континуумом в дальнем инфракрасном диапазоне и отношением светимости в линии конкретного иона к светимости пылевого континуума под линией. Прерывистые линии соответствуют сильно неоднородному случаю, сплошные — однородному. Видно, что очень

существенна разница между однородным и неоднородным случаем вот для таких диаграмм.

Слайд 18.

Выводы по главе 2. Получено, что при расширении остатка в однородной среде в горячей фазе пыли практически не остается, при этом в неоднородной среде остается некоторая небольшая доля крупных пылинок. Светимость остатка сверхновой в инфракрасных линиях низкоионизованных металлов увеличивается в более неоднородной среде.

Слайд 19.

Продолжим тему эмиссии остатка.

Слайд 20.

Известно, что пыль излучает в континууме, и это в инфракрасном диапазоне. И это отражает фактически охлаждение на пыли горячего газа, в котором она находится. А горячая плазма, соответственно, ее эмиссия приходится на рентгеновский диапазон. И традиционно рассматривают отношение светимости в инфракрасном диапазоне к светимости в рентгене — отношение IRX . И здесь на графике приведены значения этого отношения для известных остатков сверхновых.

Слайд 21.

Для того, чтобы в нашей модели учесть охлаждение на пыли, строим самосогласованную модель, где добавляем охлаждение на пыли в уравнение для энергии.

Слайд 22.

И если посмотреть карту поверхностной яркости, того, что получается в слабо неоднородном и сильно неоднородном случае, мы видим вот такую разницу в инфракрасном и рентгеновском диапазоне.

Слайд 23.

Для того, чтобы провести более детальный анализ, можно усреднить фактически по кольцам значения величин, которые нас интересуют. В частности, здесь в нижней части приведены поверхностные яркости в инфракрасном и рентгеновском диапазоне разным цветом для разных времен. Таким образом можно анализировать зависимость от прицельного параметра.

Слайд 24.

И если построить такие диаграммы для соотношения IRX и рентгеновской температуры, то можно затем исследовать диаграмму

Слайд 25.

соотношения температуры и отношения IRX и сравнить это с известными наблюдательными данными. Здесь на диаграмме группа символов соответствует разным возрастам. Видно, что положение значений IRX на этой диаграмме существенно зависит от возраста. Незаполненные символы — это однородный случай, заполненные — неоднородный. Также мы видим, что, естественно, есть сильная зависимость от прицельного параметра и от металличности. Эти две панели отличаются металличностью. Причем можно сравнить с известными остатками, которые здесь приведены треугольниками (поздними остатками). Слева — это для нашей Галактики, справа — это для Большого Магелланова

облака. В некоторых случаях видим соответствие наблюдательных значений вариантам из наших моделей.

Слайд 26.

Выводы по третьей главе заключаются в том, что величина IRX значительно изменяется в остатке сверхновой в зависимости от его возраста, прицельного параметра, а также сильно зависит от степени неоднородности среды.

Слайд 27.

Когда мы рассматривали распространение ударной волны в неоднородной среде, фактически это взаимодействие ударной волны с ансамблем облаков. Теперь рассмотрим взаимодействие с одиночными облаками.

Слайд 28.

Результатами многолетних предыдущих исследований — основным результатом — является вывод о том, что адиабатическое облако разрушается в течение нескольких времен прохождения ударной волны по облаку. И если сюда добавить

Слайд 29.

учет процессов охлаждения, то к характерному времени прохождения ударной волны (или времени разрушения) добавляется время охлаждения. И здесь уже такого однозначного вывода о разрушении нет, здесь динамика зависит от конкретных параметров. В частности, вы видите здесь диаграмму радиус облака - скорость ударной волны. Крупные облака остаются радиационными и разрушаются слабо, мелкие облака — адиабатические — разрушаются эффективно.

Слайд 30.

При этом, если добавить сюда рассмотрение... добавить сюда пыль, если в облаках есть пыль, то к упомянутым двум характерным временам добавляется также время ускорения (и торможения) частицы пыли.

Слайд 31.

И если поставить задачу отслеживания той пыли, которая была изначально в облаке, причем судьбу этой пыли в зависимости от размеров пыли, то мы можем наблюдать вот такую картину, где на правых панелях показано расположение пыли, которая изначально была в облаке. Ну это время соответствует двадцати временам прохождения облака. А слева отмечено вещество самого облака. Это адиабатическое облако, оно эффективно разрушается. И крупная пыль остается позади вещества облака, а с уменьшением размера пылинки такая пыль увлекается более эффективно вместе с потоком.

Слайд 32.

Выводы по главе 4 заключаются в том, что для адиабатических облаков происходит сегрегация полевых частиц по размерам: крупные остаются далеко позади, мелкие увлекаются облаком. А в радиационно охлаждающихся облаках, которые разрушаются неэффективно, пыль сохраняется в плотных холодных фрагментах облака вне зависимости от размера, и эффективность выживания пыли в таких условиях определяется соотношениями характерных времен.

Слайд 33.

Перейду к положениям на защиту.

Первое. Разрушение межзвездной пыли, нагребенной оболочкой сверхновой, оказывается менее эффективным при ее расширении в неоднородной (облачной) среде. После нескольких характерных времен охлаждения доля разрушенной пыли достигает предельного значения и слабо зависит от средней плотности газа при заданном уровне вариаций плотности.

Светимость остатка сверхновой в инфракрасных линиях низкоионизованных металлов [O III] 88 микрон, [C II] 158 микрон, [N II] 205 микрон увеличивается при его расширении в более неоднородной (облачной) среде. Светимость в этих линиях превышает пылевую в континууме под линией в $\sim 10\text{--}300$ раз.

Отношение светимостей в инфракрасном и рентгеновском диапазонах IRX значительно ($\sim 3 - 30$ раз) изменяется в зависимости от возраста остатка и прицельного параметра. Для остатков сверхновых, расширяющихся в среде с более высокими вариациями плотности, величина IRX оказывается выше благодаря менее эффективному разрушению пыли и большему падению рентгеновской эмиссии.

При взаимодействии радиационно охлаждающихся облаков с сильной ударной волной пылевые частицы сохраняются и переносятся с веществом родительского облака. В отсутствие радиационных потерь мелкие пылевые частицы увлекаются облаком; крупные пылевые частицы, для которых время торможения заметно длиннее времени прохождения ударной волны, отстают от ускоряющегося ударной волной облака и покидают его.

Слайд 34.

Результаты работы представлены в пяти публикациях в рецензируемых научных журналах. Здесь вы видите их список.

Слайд 35.

Также результаты были представлены на пяти российских и двух международных конференциях.

Слайд 36.

Спасибо за внимание!

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Какие будут вопросы к докладчику? Пожалуйста.

КИРСАНОВА М.С.: Скажите, пожалуйста, оптическая толщина линий C+ определялась и если да, то чему она равна?

СОИСКАТЕЛЬ: Да, оптическую толщину мы оценивали, и в данных условиях это оптически тонкий случай. Оптически тонкий, у нас тау значительно меньше единицы. Достигать единицы оптическая толщина для линий CII здесь может только в очень незначительной доли... Поврехностный фактор заполнения очень мал таких фрагментов. Таких фрагментов, если смотреть картину остатка со стороны, то там меньше двух процентов будет на этой картине по площади фрагментов, где она может достигать единицы.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Еще вопросы, пожалуйста.

ВИБЕ Д.З.: У меня вопрос по процессам разрушения. Вот у вас еще в диссертации упоминается процесс дробления пылинок. Насколько эффективность этого процесса может зависеть от выбора распределения пылинок по размерам? Если, например, взять распределение, которое более богато

мелкими частицами типа распределения Джонса? И насколько выводы зависят от учета пыли, которая образуется в остатке?

СОИСКАТЕЛЬ: Да, в отношении... Сейчас, у меня просто есть слайд на эту тему. *(Демонстрируется слайд 54)*. Имеются в виду механизмы разрушения пылинок дроблением, так называемый шаттеринг. Дело в том, что мы производили оценки, насколько в этих условиях может быть эффективен этот процесс. Ну, собственно, доля пыли... Во-первых, он эффективен при температурах меньше чем 10 в пятой кельвинов и для частиц малого размера, которые имеют скорость — взаимную относительную скорость - больше 30 км в секунду. Мы смотрели — оценивали — в наших моделях, какова доля пыли, которая в принципе в эти условия попадает, и вот здесь приведено, что это незначительная доля пыли, особенно в неоднородном случае. В неоднородном случае она существенно меньше, чем в однородном. Но это как бы в принципе условия, в которых выполняются требования к температуре и скорости. Но есть оценки в работах различных авторов, характерных времен, на которых даже в таких условиях шаттеринг эффективно проявляется и приводит к значительному влиянию на долю сохранившейся пыли. И вот эти времена здесь приведены. Это миллион лет и выше, как правило. Да, это обсуждается. Дальнейшее... В каких-то условиях оно может быть более эффективно, например, при взаимных множественных вспышках сверхновых, когда волны с нагретым веществом сталкиваются. Там может быть шаттеринг более эффективным. Что касается зависимости от выбранного распределения, то здесь результат о том, что в неоднородной среде доля в принципе таких условий... доля массы газа с такими условиями существенно мала, она не изменится и для... и при изменении типа распределения.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Еще вопросы?

ВИБЕ Д.З.: Я уточню, можно, Игорь Дмитриевич?

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Пожалуйста.

ВИБЕ Д.З.: То есть тут дело в том, что просто в любом случае объем, где это может действовать, невелик. Правильно?

СОИСКАТЕЛЬ: Да.

ВИБЕ Д.З.: Спасибо.

СОИСКАТЕЛЬ: В данной задаче это так.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Еще вопросы. Заочно?

СЕКРЕТАРЬ: Кирилл Анатольевич.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Пожалуйста, да.

ЗАНИН К.А.: Святослав Юрьевич, скажите пожалуйста, в вашей модели учитывается обмен массой, в некоторых, конечно, условиях между мелкими пылинками и большими? То есть вот бывают такие случаи, когда за счет большой площади мелкие пылинки испаряются, а масса попадает на большие, они расти начинают.

СОИСКАТЕЛЬ: В наших моделях рост пылинок не учитывается. Дело в том, что в этих условиях характерные времена для роста пылинок... они также гораздо выше, чем время наших расчетов до 100 тысяч лет. То есть это существенно более медленный процесс. И то вещество, которое испарилось с пылинок, оно не успевает за это время оседать на другие пылинки.

ЗАНИН К.А.: Спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Еще вопросы. У заочников наших нет?

СЕКРЕТАРЬ: У кого-то из участников онлайн есть вопросы?

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Нет?

СЕКРЕТАРЬ: Вроде бы нет.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Тогда слово предоставляется научному руководителю Евгению Олеговичу. Пожалуйста.

ВЫСТУПЛЕНИЕ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

ВАСИЛЬЕВ Е.О.: Я зачитывать не буду отзыв... А у нас формально есть...?

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Человек один вышел...

СЕКРЕТАРЬ: Это не член диссовета.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Да, извините. Пожалуйста.

ВАСИЛЬЕВ Е.О.: Когда Слава появился... пришел на работу в АКЦ, через некоторое время я предложил ему работу по исследованию разрушения пыли в неоднородных средах. Почему такая тема была выбрана? Потому что у Славы очень хорошая подготовка в области теоретической и, главное, вычислительной астрофизики, вычислительной газовой динамики. И имея это, была предложена такая работа. В процессе этой работы, Слава, ну во-первых, он освоил соответствующие программы, во-вторых, он расширил эти программы и дополнил. В частности, там он упоминал в своем докладе об учете самосогласованном охлаждения на пыли, и кроме этого, была предложена им

методика обработки этих данных. Эти данные, они достаточно большие, то есть это можно сравнить по объемам обработки с космологическими данными, кто представляет это. То есть здесь отдельно... в этой программе, в этих моделях считается отдельно динамика пыли. То есть эти пылинки — это отдельные суперчастицы. И таких суперчастиц в расчете порядка нескольких сотен миллионов. То есть это вот похоже на космологические расчеты, где тоже несколько сотен миллионов задается частиц, но здесь эти частицы взаимодействуют более таким замысловатым образом с газом. Просто не только гравитация, это трение, это разрушение, то есть более замысловатая физика. Ну и вот это вот обрабатывать очень довольно тяжело. Ну вот Слава со всем этим справился, и результатом были пять работ, которые были опубликованы в журналах. Там много результатов, и то, что Слава рассказывал, там достаточно много результатов. Я остановлюсь только на двух.

Считается, что есть этот кризис пыли. Он основан.. связан с тем, что разрушается пыли существенно больше, чем образуется — вроде как. Этого... такого же не должно быть. И все эти оценки были сделаны на основе расчетов Кристофера Макки, сделанных в 1989 году, то есть все дальнейшее исследование было основано вот на его оценках. Это было сделано для однородной среды. Вот только последний год или два начали появляться работы по исследованию разрушения пыли в остатках сверхновых при взаимодействии с неоднородной средой, и работа Славы в этом смысле... в этом направлении — она одна из первых, если не первая. Точно так же... примерно в то же время Эли Двек наблюдал... по результатам наблюдений на спутниках Эйнштейн и IRAS рассматривал, как происходит охлаждение газа и пыли в остатках сверхновых, молодых остатках. Это вот то самое отношение инфракрасного к рентгеновскому

излучению, то есть потери в инфракрасном излучении за счет охлаждения на пыли и потери горячей плазмы за счет рентгеновского излучения. Вот до недавнего времени, собственно, до работы Славы, все это... весь анализ проводился просто на отношении табличных значений функции охлаждения. То есть там вот на графиках были линии вначале, на одном из графиков, где это просто табличные функции. У Славы это первый фактически расчет самосогласованный рентгеновского... инфракрасного излучения пыли и соответствующего рентгеновского излучения. Ну и закончу. То, что считаю, что Слава достоин степени кандидата наук. Спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Какие-нибудь вопросы есть у научному руководителю? У заочников тоже нет? Нет. Переходим тогда к чтению отзывов поступивших. Пожалуйста, тогда слово секретарю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, В КОТОРОЙ ВЫПОЛНЕНА РАБОТА

СЕКРЕТАРЬ: Спасибо. Сейчас я должна зачитать заключение организации, где выполнена работа, полностью.

Зачитывает заключение организации – Физического института имени П.Н. Лебедева РАН. Заключение положительное, прилагается.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

СЕКРЕТАРЬ: Теперь я должна полностью зачитать отзыв ведущей организации на диссертационную работу Дедикова Святослава Юрьевича. Напомню, что

ведущая организация — это Физико-технический институт имени Иоффе, Санкт-Петербург.

Зачитывает отзыв ведущей организации – Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург. Отзыв положительный, прилагается.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Так, теперь вопрос к соискателю. Вы можете сейчас отвечать на вопросы, извините, на замечания, а можете в конце на все замечания вместе. Как вы хотите.

СОИСКАТЕЛЬ: Полагаю, что лучше сейчас ответить.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Пожалуйста.

СОИСКАТЕЛЬ: *(Представляет ответы на замечания из отзыва ведущей организации. Демонстрируются слайды с ответами на замечания, см. приложение 1 к стенограмме).*

Сначала отвечу на вопросы по существу работы. Первый вопрос относительно адекватности приближения оптически тонкого случая. Действительно, ответ такой. Действительно, расчет излучения в линиях производился для оптически тонкого случая. В рассматриваемых моделях такое приближение адекватно, поскольку для линий тонкой структуры значение оптической толщины составляет менее единицы. Например, для линий СII 158 микрон оптическая толщина достигает единицы при лучевой концентрации водорода около 7 на 10 в двадцатой частиц на квадратный сантиметр. В позднем остатке сверхновой радиусом 40 парсек при средней плотности одна частица в кубическом сантиметре, лучевая концентрация будет составлять около 10 в двадцатой.

Оптическая толщина может достигать единицы только в очень плотных фрагментах. Поверхностный фактор заполнения областей с такой оптической толщиной составляет менее 2%.

Следующий вопрос относительно ионизационной структуры CI и учета параметров межзвездной среды, ответ следующий. Населенность уровней CI при высоких плотностях, концентрация частиц больше 10 во второй в кубическом сантиметре, может становиться равновесной. В наших расчетах средняя концентрация газа равна одной частице в кубическом сантиметре и условия, при которых эти эффекты существенны, достигаются для малых долей газа. Масса газа с концентрацией больше 10 во второй частиц в кубическом сантиметре составляет менее 1% от общей массы остатков. Молекуляризация может влиять на населенность уровней, однако после прохождения ударной волны молекулы H_2 преимущественно разрушаются. При этом время образования молекул H_2 в охладившихся фрагментах на 1-2 порядка превышает время расчета. Космические лучи могут приводить к дополнительной ионизации газа и тем самым влиять на населенность уровней. Однако перенос космических лучей в неоднородной среде является довольно сложной задачей. Это тема отдельной работы. Поэтому используемый подход для расчета ионизационного состава представляется достаточным в рамках рассматриваемой задачи.

Вопрос о сходимости расчетов при увеличении численного разрешения. Ответ следующий. Возможно, термин сходимость употреблен не совсем удачно. Здесь утверждение о сходимости означает, что поведение величин при изменении разрешения близко и подобно. Начальное поле плотности является случайным, поэтому для разных пространственных разрешений оно разное. Таким образом, отличие величин на рисунке A2 в пределах 5% определяется разными

начальными условиями. Отличия могут быть связаны с тем, что при распространении ударного фронта по неоднородной среде определяющим является взаимодействие ударных волн с радиационно охлаждающимися облаками, и для этого процесса известно, что численной сходимости при увеличении разрешения нет. В работе Ирака с коллегами 2010 года это отмечено. Сходимость может рассматриваться только с некоторой точностью. Если рассмотреть распространение ударного фронта по однородной среде, то разница между величинами при увеличении разрешения будет уменьшаться. Здесь на графике приведена эволюция доли массы и поверхности выжившей пыли для однородного случая. Видно, что разница между значениями величин для X_2 , X_4 меньше, чем для X_1 , X_2 . Имеет место сходимость с увеличением пространственного разрешения.

По замечаниям к оформлению, в целом согласен, но есть несколько комментариев по поводу необходимости написания слов. Ответ такой, что слова *dusty* и *mass entrainment* в соответствующих местах приведены в скобках для уточнения контекста используемых терминов запыленная плазма и увлечение массы. По функции распределения массовой доли пыли с замечанием согласен, на рисунке 2.2 приведена функция распределения для момента времени 20 тысяч лет, она почти совпадает с изначальной. По единицам измерения замечанием согласен, в формуле 2.2 темп нагрева пылинки приведен в единицах эрг к секунду, температура в формулах и на рисунке 2.5 приведена в кельвинах.

Относительно использования поверхностной яркости в главах 2 и 3 в единицах, содержащих угловые секунды и минуты, ответ такой. Поверхностную яркость представленную на рисунках 2, 6 и 3, 4 легко перевести в наблюдаемые величины, она не зависит от расстояния. Угловые единицы соответствуют

телесному углу, в указанных единицах величина позволяет легко оценить возможности наблюдения.

Вопрос относительно использования усредненных расширенных по остатку величин IRX при сопоставлении с наблюдательными данными. С замечанием согласен, рисунок 3.7 иллюстрирует зависимость отношения IRX от различных параметров, в частности, от прицельного расстояния, возраста остатка, степени неоднородности среды, металличности. При малом прицельном параметре значения RX оказываются близки к усредненному значению по остатку. Усредненные по всему остатку значения IRX приведены на следующем рисунке. Здесь представлены диаграммы TX и IRX в зависимости от возраста остатка в сравнении с наблюдаемыми остатками. Слева наша Галактика, справа Большое Магелланово облако. Все.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо большое. Переходим к выступлению оппонентов. Пожалуйста, первый оппонент Зинченко Игорь Иванович.

ВЫСТУПЛЕНИЕ ПЕРВОГО ОППОНЕНТА ЗИНЧЕНКО ИГОРЯ ИВАНОВИЧА

Официальный оппонент Зинченко И.И. присутствует на заседании лично. Выступает с отзывом. Отзыв положительный, прилагается.

ЗИНЧЕНКО И.И.: Ну, я позволю себе, наверное, пропустить описательную часть и перейду к оценкам, недочетам. В целом хотелось бы отметить, что работа очень интересная, получено много важных результатов, достоверность не вызывает сомнений, как здесь уже отмечалось. Результаты могут быть использованы в различных астрофизических исследованиях межзвездной среды.

Ну и что касается недочетов, которые, как мне показалось, стоит отметить. Первое. Как мы слышали здесь, что в введении и при постановке задачи в качестве стимула для проведения данной работы отмечается сильное расхождение оценок скоростей образования и разрушения пыли в галактике. Результаты работы показывают, что в неоднородной среде разрушение пыли менее эффективно. Однако вопрос о том, достаточно ли этого для преодоления данного противоречия, в работе никак не обсуждается, лишь указывается, что результаты могут быть использованы для уточнения темпов разрушения пыли в галактиках.

Далее. В работе получено много интересных теоретических результатов. При этом сопоставление с наблюдениями имеется, как мы видели, но оно все-таки очень ограничено. Работа бы выиграла, если бы имелось более широкое такое сопоставление результатов с наблюдением. В результатах второй главы и в положениях, выносимых на защиту, говорится об отношении светимости в некоторых линиях к светимости пыли в континууме под линией. Что такое континуум под линией становится понятно из текста диссертации, что это излучение пыли в полосе шириной 8 гигагерц. В результатах, в положениях, выносимых на защиту, эта величина не указана. Почему именно такая взята ширина полосы? Как она соотносится с шириной линии? Каков вообще смысл этого отношения? Не очень понятно. Правильнее было бы, наверное, сравнивать светимость в линиях и полную светимость пыли в континууме. Ну и есть некоторые другие мелкие недочеты. Например, некоторые утверждения о зависимости физических параметров от скорости, от плотности для ударной волны. Стоило бы там дать ссылки.

Но эти замечания не снижают общей высокой оценки работы. В целом диссертационная работа Святослава Юрьевича Дедикова является законченным научно-исследовательским трудом, удовлетворяет всем требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор, безусловно, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо большое. Опять же (*обращаясь к соискателю*), вы можете либо сразу отвечать на замечания, либо после выступления следующего оппонента.

СОИСКАТЕЛЬ: (*Представляет ответы на замечания из отзыва первого оппонента Зинченко И.И. Демонстрируются слайды с ответами на замечания, см. приложение 1 к стенограмме*).

Спасибо. Да, я сейчас отвечу. Первый вопрос о том, достаточно ли полученных результатов для преодоления противоречия между темпами образования и разрушения пыли. Ответ следующий. Неоднородность среды, в которой разрушается одиночный остаток, приводит к менее эффективному разрушению пыли до двух раз. Этот результат получен впервые. Его недостаточно для преодоления несоответствия около порядка величины между оценками скорости образования и разрушения пыли в галактике. При этом известно, что межзвездная среда в галактиках сильно неоднородна. Отметим, что сверхновые в основном вспыхивают скоплениях и кумулятивный эффект, связанный с неоднородностью среды, при множественных вспышках может быть более существенным, это является темой отдельного исследования.

Перейду ко второму замечанию о том, что сопоставления с наблюдениями очень ограничены. Ответ следующий. Важным результатом работы является обнаружение подавления разрушения пыли в неоднородных средах. Этот результат позволяет снизить оценки темпа разрушения пыли в галактике, что может использоваться в интерпретации наблюдений. Рассчитаны поверхностные яркости в инфракрасном и рентгеновском диапазонах, ожидаемые потоки в линиях ионов от остатка сверхновой. Для поздних остатков предсказаны эффекты общего характера и их выделение в имеющихся данных наблюдений представляет отдельную задачу, которая, с одной стороны, требует моделирования эволюции конкретных объектов в конкретных условиях, с другой стороны, имеющиеся данные наблюдений остатков в Галактике и Магеллановых облаках в инфракрасном и рентгеновском диапазонах не всегда достаточны для однозначной интерпретации содержания эволюции пыли. Для поздних остатков, как правило, доступны либо результаты наблюдений отдельных фрагментов, либо модельно-зависимые оценки усредненных величин по остатку. Поэтому в работе сопоставление с наблюдениями ограничено сравнением с имеющимися оценками отношения IRX , а также обсуждается возможность одновременного наблюдения эмиссии пыли ионов металлов в инфракрасном диапазоне.

Третий вопрос. Относительно использования отношения светимости в линиях ионов к светимости пыли в континууме под линией. На рисунке 2.8 приведено сравнение не только со светимостью в континууме под линией, но и со светимостью пыли в континууме в дальнем инфракрасном диапазоне L_{FIR} . В нашей работе рассматривается ширина полосы 8 гигагерц, поскольку такова планируется к реализации на спектрометре высокого разрешения космического телескопа. Сравнение светимости в линиях к светимости пыли в континууме под линией широко используется в наблюдениях, например, в работах Декарли с

коллегами 2018 года и Венеман с коллегами 2018 года на ALMA. Наблюдаемая эмиссия линии CII 158 микрон далеких квазаров на z больше 6 сравнивалась с континуумом под линией (Underlying Continuum), который измерялся в двух близких полосах шириной 3.6 ГГц каждая, непосредственно под линией, за вычетом самой линии, и на меньшей частоте минус 16 ГГц. По измеренному континууму под линией восстанавливалась светимость в дальнем инфракрасном диапазоне L_{FIR} и делались оценки свойств пыли. Отношение светимости в линии к светимости в континууме под линией позволяет сделать вывод, будет ли наблюдаться линия на фоне континуума в тех или иных условиях или нет.

По замечанию относительно того, что некоторые утверждения лучше было бы подкрепить ссылками, ответ следующий. Возможно, в некоторых местах и стоило бы добавить ссылки, но поскольку не приведены конкретные примеры, сложно ответить на это замечание конкретно.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Слово представляется второму оппоненту Гусеву Александру Сергеевичу.

ВЫСТУПЛЕНИЕ ВТОРОГО ОППОНЕНТА ГУСЕВА АЛЕКСАНДРА СЕРГЕЕВИЧА

Официальный оппонент Гусев А.С. присутствует на заседании лично. Выступает с отзывом. Отзыв положительный, прилагается.

ГУСЕВ А.С.: Спасибо. Уважаемые коллеги, прежде всего хочу сказать, что диссертация мне очень понравилась, такая добротная, солидная работа. И, наверное, половина успеха этой диссертации, это, во-первых, очень хорошо выбранная цель работы и хорошая идея, как эту цель достичь, как решить

поставленную задачу. Действительно проблема дисбаланса пыли она уже давно назрела, потому что теория нам предсказывает одно, а наблюдения показывают, что по крайней мере последние там один-два миллиарда лет точно у нас пыль находится в балансе примерно, сколько ее образуется, столько и разрушается. Но вот с теорией возникают проблемы, и как раз Святослав Юрьевич эту проблему взялся решить. Проблема актуальная, и идея, как ее можно решить, это рассмотреть разрушение пыли, используя фактор неоднородности среды. Это, конечно, не ноу-хау диссертанта или его научного руководителя, это сейчас мейнстрим, потому что сейчас очень многие вещи пытаются объяснить с помощью неоднородности, фактора неоднородности среды, объясняют эти вещи в самых различных областях, и вот, собственно, диссертанту это удалось. Ну, а вторая половина, это, собственно, дело техники, а с техникой, я так понимаю, диссертант на ты. Я не буду повторять содержание диссертации. Что мне понравилось еще в диссертации. Там, где у нас есть наблюдение, там, где автор диссертации сравнивает свои модели с наблюдением, может сравнить, вот в четвертой главе все совпадает. Наблюдения хорошо соответствуют моделям, что подтверждает достоверность результата. Что мне еще понравилось, это то, что в четырех работах из пяти диссертант является первым автором, что кстати встречается может быть даже не так часто в кандидатских работах, что безусловно говорит о его большом личном вкладе. Две вещи мне больше всего понравились, я считаю, это действительно результат фундаментальный, что Святославу Юрьевичу удалось показать, что в неоднородной межзвездной среде пыль разрушается менее эффективно, что уменьшает предсказываемый ранее баланс пыли в галактиках. Только, конечно, зря постеснялся, надо вот слово до двух раз было вставить в положение, выносимое на защиту, потому что у меня первое замечание как раз такое же, как и ваше сначала было, то я вспомнил, что в

главе 1 действительно, в выводах главы 1, указаны цифры два раза. И второе, как наблюдателю понравилось, что диссертант дает предсказание именно на наблюдения, на предсказание, какая будет светимость в эмиссионных линиях в субмиллиметровом диапазоне, что можно будет, во-первых, проверить его модель и определить, может быть, более точные параметры среды. Ну, это, конечно, интересно для будущих наблюдательных проектов, подобная вещь. Отмечу очень хороший литературный русский язык, которым была написана диссертация. Явно текст был вылизан. Я вот практически не нашел, нашел только две опечатки, что мне тоже очень понравилось.

Так, теперь о замечаниях. О всем хорошем я сказал, перейду к замечаниям. Значит, первое замечание. При моделировании диссертант использует в качестве входного параметра лишь одно значение энергии взрыва сверхновой, $1 \text{ на } 10 \text{ в } 51 \text{ степени эрг}$, масса газа и тяжелых элементов. Но диапазон, на самом деле, энергии взрыва сверхновых второго типа больше чем полпорядка, примерно от $0.5 \text{ до } 2 \text{ на } 10 \text{ в } 51 \text{ эрг}$. И, конечно, хорошо бы было, причем в некоторых случаях он еще выше, до $3.6 \text{ на } 10 \text{ в } 51 \text{ эрг}$. Стоило бы рассмотреть, как меняется темп разрушения пыли в однородной неоднородной среде в зависимости от энергии взрыва. Взять хотя бы еще две точки, там в два раза меньше, в два раза больше энергии взрыва, и рассмотреть это. Ну, либо в качестве альтернативы привести аргументы, почему использовалась только одна точка. То, что вообще о начальной функции масс мы знаем, мы примерно можем сказать, что у нас будет средний такой выход будет получаться, но для этого хотелось бы понять, как у нас меняется поведение разрушения пыли, вот, для менее энергичных и более высокоэнергичных сверхновых. Второе. В качестве базового параметра масштаба неоднородности среды используется величина 6.25 парсек . В качестве аргумента приводятся ссылки на работы, в том числе и научным руководителем, где

определяются типичные размеры молекулярных облаков, для которых он действительно близкий. Но данная аргументация не совсем корректна, поскольку размер неоднородности зависит не только от размеров сгустков, но и от расстояния между ними. Но при этом диссертант игнорирует работу Хэншоу 2020 год, в *Nature Astronomy*, в которой показано, что на основе наблюдений, что флуктуации плотности в нашей галактике, центральной молекулярной зоне, имеют период, там несколько периодов, но на интересующий диссертанта шкале период как раз $6.0 \pm 0.8 \pm 0.6$ парсек. То есть надо было на эту работу сослаться, и тогда вообще вопроса бы не возникло, почему мы используем 6.25 парсек.

На странице 26, это третье замечание, автор утверждает, что пространственный размер неоднородности также не оказывает заметного влияния на глобальный приток пылевой массы через поверхность остатка. Цитирование закончено. Стоило бы проиллюстрировать это на рисунке, чтобы в этом могли убедиться не только диссертант, но и читатели диссертации. Так, замечание 4. Это, собственно, повторяет замечание ведущей организации по поводу отсутствия формулы для функции распределения массы пылинок по размерам. Пятое замечание, тоже касается наблюдений. В разделе 3.2.3 автор рассматривает эволюцию светимости остатков сверхновых в линиях ионизированных элементов O3, C2, N2. Но из текста неясно, проводились ли ранее подобные наблюдения, потому что никаких тут хорошо было показать, есть ли связь с наблюдениями, ее нет. Я подозреваю, что она не проводилась, то есть такие наблюдения не проводились, но вот, например, есть работа Милларда и других 2025 года в *Astrophysical Journal Supplement*, где вообще-то остатки сверхновых исследуются, именно в этих линиях. Вот непонятно, почему, например, эта работа не была использована. Или, может, слишком молодые объекты или еще что-то, но надо было бы в диссертации это упомянуть. Так, и у меня замечания по оформлению, совсем

такие немногочисленные. Я так понимаю, если они там есть в тексте ответа, есть они, да? Ну, тогда я их не буду зачитывать. Тут, собственно говоря, там где-то индексы опущены, где-то там лишние цифры вставлены в приложение А. То есть я на этом, пожалуй, закончу, потому что эти замечания чисто редакторские. Данные замечания принципиального характера не носят, не умаляют высокий научный уровень диссертанта, значимость полученных результатов, автореферат полностью отражает содержание диссертации. Считаю, что диссертация полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по нашей специальности, а диссертант заслуживает присуждение искомой ученой степени.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Пожалуйста, ответы. Слово соискателю.

СОИСКАТЕЛЬ: *(Представляет ответы на замечания из отзыва второго оппонента Гусева А.С. Демонстрируются слайды с ответами на замечания, см. приложение 1 к стенограмме).*

Ответы на замечания. Первое замечание относительно одного значения энергии взрыва сверхновой, почему использовали только одно, ответ такой. Пыль разрушается в газе с температурой больше миллиона градусов, что соответствует скорости ударной волны выше 200 километров в секунду. Эти условия реализуются в остатке, пока он находится на адиабатической стадии расширения, которая определяется соотношением – энергия, деленная на плотность, в степени $1/5$. А в наших расчетах варьировалась плотность ρ , поэтому необходимости в изменении значения энергии взрыва нет. Имеется в виду плотность газа, в котором распространяется остаток.

Второе замечание относительно типичных размеров молекулярных облаков и о том, что неоднородность - это не только размер изгустков, но и расстояние между ними. Ответ следующий. Распределение возмущений плотности в межзвездной среде определяется турбулентными истечениями с колмогоровским спектром, что характерно в среднем для галактики. Именно такое поле возмущений было использовано в расчетах в качестве начальных условий. Расстояние между возмущениями является свойством случайного поля, в противном случае случайное поле перестает быть колмогоровским. В качестве стандартного значения была использована величина максимального размера возмущения около 6 парсек. Помимо этого были проведены расчеты динамики остатка в среде с максимальным размером от 5 до 25 парсек моделью LM6-LM9 в таблице 1.1.1. Соответственно, в генерируемых случайных полях изменялись и расстояния между возмущениями. В результате анализа не было найдено существенных отличий от базовой модели в оценке доли массы выжившей пыли, о чем упомянуто на странице 35 и показано на рисунке 1.8. Благодарю оппонента за ссылку на интересную работу.

Третье замечание о том, что пространственный размер неоднородности также не оказывает заметного влияния на глобальный приток пылевой массы через поверхность остатка. Ответ следующий. С замечанием согласен. Рисунок, иллюстрирующий зависимость пространственного размера не вошел в диссертацию, хотя этот вывод можно сделать из рисунка 1.8 на странице 35, где проиллюстрирована эволюция доли массы выжившей пыли в моделях с различным максимальным пространственным размером неоднородности.

В главе 2 отсутствует формула для функции распределения масс пылинок по размерам. Ответ следующий. В диссертации в большинстве расчетов, как и в

разделе 2.2, используется начальное распределение пыли по размерам из работы Матисс с коллегами 1977 года, распределение MRN , dN/da пропорционально “ a ” в степени минус три пятых. Соответственно, это количество пыли. На рисунках 2.2, 2.3 представлена массовая функция распределения $f(a) \sim a^3 (dN/da) \Delta a$.

Следующее замечание относительно наблюдений в инфракрасных линиях ионизованных металлов, почему не было проведено сравнение модельных результатов с данными наблюдений? Ответ следующий. В диссертации рассматривается эволюция поздних остатков с возрастом больше 20000 лет, когда оболочка остывает и в ней появляются соответствующие ионы. При взаимодействии с плотными неоднородностями эти ионы могут наблюдаться в более молодых остатках с возрастом менее нескольких тысяч лет, что и обнаружено в работе Миллард с коллегами 2021 года. Моделирование этого процесса требует значительно более высокого пространственного разрешения и в общем является отдельным направлением исследования. Поскольку целью диссертации являлось изучение разрушения именно межзвездной пыли, моделирование проводилось до возрастов остатка несколько десятков тысяч лет. Эти остатки также излучают в инфракрасных линиях и, по-видимому, для них пока нет наблюдательных данных. Однако потоки в этих линиях позволяют исследовать остатки с помощью космической обсерватории Миллиметрон.

По замечаниям, по оформлению. В целом с замечаниями согласен, относительно того, что на рисунке 2.3 на странице 44 некоторые линии обрываются в пустоту, особо это касается зеленой гистограммы на нижнем левом графике. Ответ такой, что обрыв линий соответствует отсутствию значимой доли массы пылинок с такими значениями функции распределения. С остальными замечаниями согласен.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Спасибо оппонентам. Теперь диссертация открывается для общей дискуссии. Можно задавать вопросы, делать замечания. Общая дискуссия есть общая дискуссия. Пожалуйста, желающие. Пожалуйста.

ВИБЕ Д.З.: Коллеги, я хочу поддержать диссертанта. Это действительно очень существенная проблема, та проблема, о которой говорится в диссертации. Действительно, пыль – это очень важный фактор не только в тех исследованиях, которые касаются физики и химии межзвёздной среды, это фактор, который затрагивает очень многие области и наблюдательной, и теоретической астрофизики. И, конечно, те проблемы, которые в диссертации решены, продвинул наше понимание этого фактора. Я призываю всех голосовать «за». Спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Пожалуйста.

ДРОЗДОВ С.А.: У меня вопрос к диссертанту. Дроздов Сергей, АКЦ ФИАН. Святослав, скажите, как Вы думаете, может ли влиять на полученный Вами результат, я сейчас говорю про выживаемость пыли в неоднородной среде в расширяющемся остатке, если размер неоднородности характерный будет сопоставим с размером сверхновой на поздних этапах ее развития, скажем, в районе 50 тысяч лет. То есть, если это неоднородности размером 40-100 парсек. Спасибо.

СОИСКАТЕЛЬ: В этой ситуации динамика расширения будет такова, что она будет напоминать динамику в однородном случае, просто потому что такие большие расстояния между неоднородностями будут приводить к тому, что взрыв будет происходить... если вы говорите, что на начале радиационной стадии размеры, ну там на самом деле 25 парсек может быть радиус, то собственно мы

не рассматривали размеры больше, просто потому что это уже будет либо задача о распространении в однородной среде, либо задача о взаимодействии с одиночным облаком. То есть это уже немножко другая задача. И соответственно, результаты в таких случаях по доле разрушенной пыли будут другими.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Еще желающие выступить? Нет больше?

СЕКРЕТАРЬ: Можно я? Шахворостова. Хотела бы тоже поддержать диссертацию Святослава Юрьевича. Когда я с ней знакомилась, как ученый секретарь, она показалась мне очень обстоятельной, обстоятельно написанной прекрасным языком, очень четко структурирована, и особенно мне понравились четкие цели и как полностью они были достигнуты, все поставленные цели. Ну и сама проблема очень важная. Я соглашусь со всеми позитивными высказываниями из предыдущих отзывов. И в целом поддерживаю и эту работу, и соискателя, считаю, что он безусловно достоин присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук. Призываю всех тоже голосовать за эту работу.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Еще желающие выступить?

СЕКРЕТАРЬ: Если онлайн участники что-то хотели бы сказать... видимо нет.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Нет. Тогда будем считать общую дискуссию тоже закрытой. Слово предоставляется соискателю. Заключительное слово.

СОИСКАТЕЛЬ: Спасибо. Я хотел бы поблагодарить своего научного руководителя Евгения Васильева за интересную совместную работу, за доверие, терпение, помощь, которую он оказывал и продолжает оказывать в течение выполнения этой работы и других совместных работ. Также хотел бы выразить благодарность Сергею Александровичу Дроздову за плодотворные

многочисленные обсуждения и за поддержку. Хотел бы поблагодарить АКЦ ФИАН за те условия, которые созданы для проведения исследований. Это очень хорошие, я считаю, условия. И, конечно, подготовка диссертации не состоялась бы без моих родителей и поддержки близких. Спасибо им. Хотел бы поблагодарить также оппонентов и ведущую организацию за очень интересные вопросы. Спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Тогда будем считать, что эта часть нашего заседания выполнена, и теперь переходим к тайному голосованию. Слово ученому секретарю, пожалуйста.

СЕКРЕТАРЬ: Спасибо. В соответствии с обновленным положением ВАК, при проведении заседания диссовета в удаленном режиме, тайное голосование проводится тоже онлайн, с использованием информационных технологий. А именно в нашей организации мы используем систему Криптовече. Всем членам Совета сейчас будут разосланы индивидуальные ссылки для голосования по адресам почты, которые указаны в явочном листе. Для того, чтобы проголосовать, я просто напоминаю, нужно пройти по ссылке из письма, которая придет на почту, войти в личный кабинет голосующего, нажать на кнопку «зарегистрироваться», ну то есть это равносильно тому, что вы взяли бюллетень электронный, после чего вам будет доступна повестка голосования. Требуется выбрать один из вариантов, “за” или “против”. Если будут выбраны оба варианта или не выбрано ни одного, то такой электронный бюллетень будет учтен в системе как недействительный. Все, кто имеет доступ к своим личным устройствам, компьютерам, ноутбукам, могут проголосовать с них. Если доступа к личному устройству нет, то вот у нас специально здесь в зале заседаний, предусмотрен отдельный ноутбук, и можно им воспользоваться.

Конфиденциальность гарантирована. Голосование начнется... то есть письма придут приблизительно через три минуты. На 13:45 запланирована (рассылка), и на время голосования у нас объявляется перерыв. Игорь Дмитриевич, сколько мы...?

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: 15 минут, как положено.

СЕКРЕТАРЬ: Хорошо, 15 минут, значит, будет перерыв. Ну давайте, получается, до 14:00, да?

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: До 14:00, не считая секунд, это и будет.

СЕКРЕТАРЬ: То есть до 14:00, во время перерыва можно голосовать. По окончании тогда будут объявлены итоги.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Пожалуйста, не задерживайтесь. В 14 уже будет все заканчиваться. Спасибо.

ТАЙНОЕ ГОЛОСОВАНИЕ

Объявляется перерыв на тайное голосование (15 минут). Во время перерыва все члены диссовета, присутствующие на заседании, голосуют с помощью системы онлайн-голосования “Криптовече”.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Объявляется окончание перерыва. Пожалуйста, слово учёному секретарю.

СЕКРЕТАРЬ: Так, спасибо. Значит, голосование у нас завершено. Сейчас я выведу на экран результаты. Видно? Видно. У нас было роздано 16 электронных бюллетеней. Результаты по вопросу “Присудить Святославу Юрьевичу Дедикову ученую степень кандидата физико-математических наук”: ЗА – 16 голосов,

ПРОТИВ – 0, недействительных бюллетеней – 0. Таким образом, единогласно все проголосовали ЗА.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо! Подождите еще аплодировать. Нам нужно утвердить итоги тайного голосования открытым голосованием. Значит, пожалуйста, командуйте. Кто за то, чтобы утвердить?

Члены совета голосуют поднятием руки за утверждение результатов тайного голосования.

СЕКРЕТАРЬ: Владимир Алексеевич? Да, тоже поднял руку.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Против нет, недействительных нет. Тогда утверждается. Вот теперь можно поздравить и поаплодировать. (*Аплодисменты*). Поздравляю вас! Так, все у нас?

СОИСКАТЕЛЬ: Спасибо!

СЕКРЕТАРЬ: Да нет, теперь еще мы должны обсудить и принять заключение.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: А, обсудить, да. Обсудить и принять заключение по диссертации, пожалуйста.

СЕКРЕТАРЬ: Проект заключения всем был заранее разослан. Большое спасибо Дмитрию Зигфридовичу, как всегда, а также Кириллу Анатольевичу за высказанные замечания. Так что я все замечания внесла. Надо сказать, что Дмитрий Зигфридович всегда находит к чему придраться, как бы я не старалась, но я буду асимптотически приближаться к своему идеальному заключению, и когда-нибудь у вас, Дмитрий Зигфридович, не будет замечаний.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Так, никаких замечаний больше нет? Возражения? Ничего. Тогда будем голосовать опять. Кто за то, чтобы утвердить?

Члены совета голосуют поднятием руки за утверждение заключения диссертационного совета.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Кто против? Воздержался? Нет. Все, вот теперь мы поздравляем опять соискателя. Все формальности закончены. Поздравляем! (Аплодисменты).

СОИСКАТЕЛЬ: Спасибо!

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо всем тогда. Заседание закрыто.

Председатель заседания,
председатель диссертационного совета,
д.ф.-м.н., член-корр. РАН

Новиков И.Д.

Секретарь заседания, учёный
секретарь диссертационного совета,
к.ф.-м.н.

Шахворостова Н.Н.

17 сентября 2025 г.