

«УТВЕРЖДАЮ»:

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
профессор А.А. Федянин

4/04/22 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1) на диссертационную работу Дроздова Сергея Александровича на тему «Эмиссионные характеристики внутренних областей галактик в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия»

Основное содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Дроздова Сергея Александровича «Эмиссионные характеристики внутренних областей галактик в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах» состоит из шести глав (включая Введение и Заключение), Приложений и списка цитируемой литературы, включающей 143 научные работы. Общий объем диссертации составляет 108 страниц, 2 таблиц и 32 рисунков.

Диссертация посвящена численному моделированию свойств пыли в межзвездной среде нашей и других галактик, в частности – наблюдаемого спектра излучения пыли в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах. Существенное внимание в диссертационной работе уделено исследованию влияния ударных волн в горячем ионизованном газе на нагрев и разрушение пылинок. Показано, что эти процессы могут существенно исказить наблюдаемый спектр пыли по сравнению с часто используемой стационарной моделью излучения, и что учет этих факторов важен при

интерпретации результатов наблюдений. В работе описан метод расчета функции распределения температуры пыли и результирующего эмиссионного спектра, учитывающий эти процессы. Построены модели распределения физических свойств и эмиссионного спектра пыли в горячей плазме, связанной с галактическими ветрами и с газовыми сверхоболочками, сформированными действием множественных сверхновых на межзвездную среду.

В Первой главе (Введении) диссертации обосновывается актуальность работы, описываются свойства пыли в различном окружении, подчеркивается важность учета флуктуаций температуры при определении наблюдательных свойств пыли. Также во введении формулируются цели и задачи исследования, приводятся основные положения, выносимые на защиту, апробация результатов, научная новизна и значимость полученных результатов.

Вторая глава посвящена анализу тепловых свойств и спектра пыли в горячей и разреженной плазме. Во введении к этой главе отмечается, что изучаемая нагретая пыль в горячей плазме встречается повсеместно в нашей и других галактиках – например, в областях активного звездообразования, остатках сверхновых, галактических ветрах. Далее продемонстрировано, что столкновение с электронами плазмы приводит к скачкообразному изменению температуры частиц пыли с последующими длительными периодами остывания, причем соотношение между частотой столкновений и характерным временем охлаждения зависит от массы частицы. При значительно менее существенном вкладе ультрафиолетового излучения, это приводит к заметным температурным флуктуациям пыли, амплитуда меняется в зависимости от массы пылинок. В главе приведены расчеты функции распределения температуры для углеродных и силиконовых частиц пыли различной массы, проведенные для различных параметров (температуры и плотности) горячей плазмы. Показано, что крупные частицы пыли имеют узкий диапазон температуры при любых рассмотренных

условиях, в то время как для мелкой пыли широкое распределение с пиком на низких температурах. Делается вывод о том, что флуктуации температуры пыли приводят к существенно более высокой излучающей способности пылинок с размером менее 0.01 мкм по сравнению с более крупной пылью и с частицами фиксированной температуры. Численный расчет спектра пыли, учитывающий неоднородности температуры, демонстрирует бимодальность распределения интенсивности в зависимости от частоты. Показано, что такой спектр может быть аппроксимирован двухтемпературным квази-планковским спектром с пиками на 20-60 К и 150-250 К в зависимости от температуры и плотности горячей плазмы.

Третья глава посвящена исследованию стохастического нагрева пыли, находящейся в остывающей горячей плазме. Рассматривается сценарий, в котором наблюдаемый спектр пыли соответствует областям, излучающим за фронтом ударной волны вдали от источников ионизирующего ультрафиолетового излучения. В главе описывается предложенный новый статистический метод расчета функции распределения температуры пыли, в котором вероятность найти частицу с заданной температурой вычисляется из моделирования прямых столкновений электронов с пылинкой. Утверждается, что предложенный метод позволяет существенно уменьшить скорость вычислений без значимых потерь точности. Рассматривается эволюция условий (температуры и плотности) в плазме на основе табличных значений функции охлаждения газа и рассчитывается функция распределения температуры и спектр пыли для каждого момента времени. Обнаружено, что тепловая эволюция частиц пыли разного размера за фронтом ударной волны существенно различается: температура наиболее крупной пыли падает вместе с температурой газа, в то время как мелкие частицы продолжают нагреваться под действием стохастических столкновений с электронами. Показано, что в результате этого, интегральные спектры пыли в остывающей горячей плазме принципиально отличаются от квази-планковских спектров при термодинамическом равновесии. Предложено использовать диаграмму

«цвет-цвет» в ИК диапазоне для диагностики состояния плазмы, окружающей излучающую пыль.

Четвертая глава посвящена учету описанных в предыдущих главах эффектов, связанных с флуктуациями температуры, а также происходящего разрушения частиц пыли, при расчетах эмиссионных спектров пылевой компоненты межзвездной среды в гидродинамических моделях горячих истечений под действием множественных вспышек сверхновых. Для этого рассчитывается функция распределения температуры для пылевых частиц (методом, описанным в главе 3), соответствующая параметрам горячей плазмы в каждой ячейке гидродинамической модели. При этом учитывается, что в каждый момент времени определенная доля частиц пыли разрушается под действием ударных волн, а значит не дает более вклада в интегральный спектр. Показано, что характерное время жизни частиц пыли зависит от их размера, а также температуры и плотности окружающего газа. Приведены карты распределения времени жизни пылинок разного размера в гидродинамической модели галактического ветра. Показано, что учет разрушения пыли приводит к значимым отличиям итогового распределения поверхностной яркости в ИК-диапазоне для галактического ветра по сравнению с более простыми моделями. Как следствие, учет разрушения пыли в наблюдательных данных приводит к существенно отличающейся оценке массовой доли пыли в межзвездной среде.

Пятая глава посвящена моделированию пузырей горячего газа, связанных со звездными скоплениями, и исследованию их возможных наблюдаемых проявлений в ИК-диапазоне над плоскостью диска галактик. Приведены результаты трехмерного гидродинамического моделирования взрывов сверхновых (10 и 20 за все время эволюции формирующейся газовой оболочки) внутри скопления, находящегося в галактическом диске и над ним (на расстоянии 20 и 60 пк). Показано, что модели для 10 сверхновых в галактическом диске не воспроизводят формирование истечений горячего газа, в то время как остальные рассмотренные сценарии приводят к

формированию протяженных областей горячего газа над плоскостью диска галактики, которые могут наблюдаться в линиях ионизованного водорода, рентгеновском и ИК-диапазонах. Для расчета светимости пыли, связанной с газовыми пузырями, использован метод, представленный в предыдущих главах, но в данном случае учитывался также вклад ионизирующего ультрафиолетового излучения. Продемонстрировано, что мелкие пылинки (меньше 0.03 мкм) преимущественно нагреваются за счёт ударного механизма, тогда как крупные – за счёт поглощения фотонов. Показано, что температура пыли в формирующихся протяженных облаках над плоскостью диска (на расстоянии 0.2-0.4 кпк) достигает 25 К, что согласуется с результатами наблюдений обсерватории Planck, выявившей множественные области нагретой пыли с температурой 23-27 К вблизи Галактической плоскости. Предложено использовать эмиссию нагретой пыли в облаках над плоскостью диска в качестве индикатора при поиске остатков сверхновых в маломассивных ОВ-ассоциациях.

В Шестой главе (Заключении) приводятся выводы и перечисляются основные результаты, полученные в этой диссертации

Актуальность выполненной работы не вызывает сомнений. Инфракрасный и субмиллиметровый диапазоны спектра являются важными источниками информации о процессах звездообразования, состоянии межзвездной среды и эволюции галактик. Пыль является одним из основных источников непрерывного излучения в ИК-диапазоне, но при этом это довольно сложный и все еще недостаточно изученный компонент межзвездной среды. Понимание свойств пыли в различном окружении и их влияния на наблюдаемый спектр необходимо для корректной интерпретации результатов наблюдений. Важность этого наглядно продемонстрирована в данной диссертационной работе, показывающей, что учет флуктуаций температуры пыли и ее разрушения под действием ударных волн приводит к существенным отличиям результирующего спектра (и, как следствие, определяемым из него физическим параметрам) по сравнению с часто

используемыми более простыми стационарными моделями. Изучение пылевой компоненты межзвездной среды активно проводится в последние 20 лет в связи с развитием наблюдательных возможностей в ИК-диапазоне, и актуальность подобных исследований еще более возросла в последние годы, так как многие из будущих крупных телескопов наземного и космического базирования будут работать в этом диапазоне спектра. В частности, наблюдательные данные с недавно запущенного космического телескопа JWST позволят изучать пылевую компоненту межзвездной среды нашей и других галактик (в том числе и на больших красных смещениях) с недоступным до этого разрешением и чувствительностью. Наличие проработанных моделей, описывающих физическое состояние и спектр пыли, очень важно для интерпретации наблюдательных данных.

Наиболее важные и новые результаты. По теме диссертации опубликовано 4 научные статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Результаты исследований были доложены на международных и всероссийских конференциях. Результаты работы получили признание как в научной литературе, так и на конференциях, что подтверждает **достоверность** положений и выводов диссертационной работы. Представлены новые результаты диссертации:

1. Стохастический нагрев пыли в межзвездной среде благодаря столкновениям с электронами в горячей плазме приводит к более высокой излучающей способности (нормированной на единицу массы) для мелких частиц (менее 0.01 мкм) по сравнению с более крупной пылью и с пылинками с равновесной температурой. Этот факт приводит к наблюдаемой бимодальности результирующего спектра.
2. Температура мелкой (менее 0.03 мкм) и более крупной пыли эволюционирует по-разному при нахождении в остывающей горячей плазме. Мелкие пылинки продолжают нагреваться в процессе остывания плазмы, что приводит к доминированию их вклада в суммарном спектре пыли.

3. В расширяющихся сверхоболочках, образованных множественными взрывами сверхновых, существенная часть пыли должна сохраняться благодаря значительному различию динамического времени сверхоболочек и времени разрушения пыли. Это приводит к формированию излучающих в ИК областей над плоскостью диска Галактики, что может быть использовано как индикатор наличия остатков сверхновых в маломассивных ОВ ассоциациях в направлении таких областей.

Научное значение полученных результатов работы состоит в том, что проведенное моделирование дает представление о свойствах и эволюции пылевой компоненты межзвездной среды в нестационарных условиях в горячей плазме, часто встречаемых в реально наблюдаемых объектах (например, остатки сверхновых, галактические ветра, центр нашей Галактики).

Практическое значение полученных результатов состоит в том, что разработанные в процессе ее выполнения методы и модели могут быть использованы другими авторами. В частности, полученные результаты могут быть использованы при интерпретации данных наблюдений с нового космического телескопа JWST, которые появятся в открытом доступе уже в этом году.

Замечания по содержанию диссертации.

1. В части приведенных формул отсутствует расшифровка некоторых используемых переменных. Например, не описано, что означает параметр $a_{0,1}$ в уравнении 2.2, M_c и M_h в таблице 2.1, а в главе 3 для характерного времени охлаждения используются разные обозначения (t_c , τ_{cool}), что затрудняет восприятие текста.
2. Глава 2, рис. 2.1 – в тексте диссертации написано, что температура на различных панелях меняется в вертикальном направлении, а плотность – в горизонтальном. Это не соответствует подписям на самом рисунке. Также общий комментарий по поводу многих

рисунков в диссертации – расшифровка различных символов и линий на самих рисунках, а не в подписях под ним, существенно облегчило бы их восприятие.

3. Глава 3 – цитируется книга Т.А. Лозинской, ссылка на которую почему-то находится в сноске, а не в основном списке литературы.
4. Глава 3 – отсутствует информация об эффективности и точности представленного нового статистического метода расчета функции распределения температуры. Непонятно, насколько он быстрее, чем обычно используемый итеративный метод и, главное, насколько точно он воспроизводит результаты.
5. Глава 3, рис. 3.2 – ни на рисунке, ни в подписи под ним нет расшифровки использованных обозначений (линий различного цвета).
6. Глава 3 – предлагается использовать диаграммы «цвет-цвет» в инфракрасных полосах для диагностики свойств горячей плазмы. Однако при этом не очевидно, какие именно свойства можно получить из таких диаграмм. Предположительно – температуру и плотность горячей плазмы, однако практически на всех диаграммах области с разной температурой имеют очень близкие цвета – надежное измерение их в наблюдениях маловероятно.
7. Глава 3 – на рисунках приводятся графики для зависимости температуры пыли от плотности среды для разного химического состава пыли, однако описание влияния этого фактора на тепловую эволюцию пыли в тексте не обсуждается.
8. Глава 4 – рассматривается влияние полного разрушения (испарения) пылинок на результирующий спектр. Однако действие ударных волн и УФ излучения может также приводить к дроблению крупных пылинок на более мелкие составляющие. Подобный процесс в работе не рассматривается. Не ясно, насколько существенным

может быть его вклад и может ли он повлиять на полученные результаты.

9. Глава 5 – предполагается использовать эмиссию в ИК над плоскостью Галактики как указание на наличие остатков сверхновых в маломассивных ОВ ассоциациях в диске. Не очевидно, какую информацию о свойствах ОВ ассоциаций можно извлечь из таких наблюдений (кроме самого факта их наличия) и насколько достоверной она может быть. Учитывая, что время существования таких структур может превышать время жизни массивных звезд – самих ассоциаций, связанных с подобными областями, может уже и не быть.

10. В диссертации встречаются опечатки и стилистические неточности.

Перечисленные замечания не умаляют научной ценности выполненных диссертантом исследовательских работ.

Заключение ведущей организации по диссертации

Диссертация С.А. Дроздова представляет значительный вклад в исследование межзвездной среды в нашей и других галактиках, в первую очередь – свойств и эволюции ее пылевой компоненты. Результаты работы могут быть использованы для интерпретации наблюдательных данных новых ИК телескопов. Диссертант провел численный расчет флуктуаций температуры и разрушения пыли под действием ударных волн в горячей плазме на ее измеряемые свойства и итоговый спектр. Диссертант разработал новый статистический метод расчета функции распределения температур пыли и применил его для исследования свойств пыли в гидродинамических моделях галактических ветров и газовых сверхоболочек. Основываясь на построенных моделях, автор предложил использовать диагностические диаграммы «цвет-цвет» в ИК-диапазоне для диагностики свойств плазмы, а наблюдения облаков пыли над плоскостью Галактики – для индикации

наличия остатков сверхновых в маломассивных скоплениях в Галактическом диске. Результаты диссертации опубликованы в 4 статьях в российских и международных рецензируемых журналах.

Автореферат диссертации правильно и адекватно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа С.А. Дроздова «Эмиссионные характеристики внутренних областей галактик в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах» соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия».

Отзыв принят на заседании Координационного Совета по астрофизике Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова. На заседании присутствовало 20 члена Совета из 30. Результаты голосования: «за» – 16; «против» – 0; «воздержалось» – 4. Протокол № 15 от «22» июня 2022 г.

Отзыв составил старший научный сотрудник Отдела радиоастрономии ГАИШ МГУ кандидат физико-математических наук О.В. Егоров.

Председатель Координационного совета
по астрофизике ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук

А.С. Гусев

Директор ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН

К.А. Постнов