

Отзыв

официального оппонента

на диссертационную работу Дроздова Сергея Александровича

«Эмиссионные характеристики внутренних областей галактик в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Актуальность проблемы

Межзвёздная пыль является неотъемлемой составляющей межзвёздной и окологалактической среды. Помимо того, что пыль влияет на тепловое состояние среды, а, следовательно, является важным элементом в цикле эволюции барионного вещества в галактиках, тепловое излучение пыли повсеместно используется для оценок массы газа в галактиках. Такие оценки в основном выполняются в предположении однородной температуры, которое, как показано в некоторых работах, может плохо работать для пыли, подвергающейся активному нагреву за счёт излучения или столкновений с частицами газа. Однотемпературное приближение может приводить к существенной переоценке массы пыли и газа, что критически важно для корректного описания эволюции барионного вещества и процесса звездообразования в галактиках. Поэтому требуются развитие моделей тепловой динамики пыли, учитывающей распределение частиц пыли по температурам, сортам и размерам. Диссертационная работа Дроздова С.А. как раз и посвящена этой актуальной задаче современной астрофизики, а именно изучению теплового состояния и эмиссионных характеристик пыли, находящейся в горячей межзвёздной и окологалактической среде.

Научная и практическая значимость

Результаты, полученные, в диссертации Дроздова С.А. показывают необходимость построения и использования физически-согласованных моделей эволюции теплового состояния пыли и газа, а также их эмиссионных характеристик. Последние достижения в развитии наблюдательных возможностей позволяет изучать далёкие галактики и квазары, на временах вплоть до эпохи реионизации Вселенной. При этом изучаемые объекты имеют чрезвычайно высокие светимости, что указывает на то, что межзвёздное вещество в таких объектах скорее всего, находится в условиях повышенного энерговыделения от звёзд и активных ядер галактик. В этих случаях, простейшее – стационарное и однотемпературное, приближение для пыли могут быть плохо применимы. Поэтому результаты, полученные в диссертации Дроздова С.А. могут быть использованы для построения адекватного описания теплового состояния пыли и эмиссионной способности, что необходимо для корректного перевода наблюдаемых характеристик в физические. Не менее важным, в связи с недавним запуском космического телескопа им. Дж. Вебба, является возможность использовать полученные результаты, для изучения теплового излучения горячей пыли в локальной Вселенной.

Научная новизна

Впервые показано, что эмиссионная способность пылинок малых размеров (<100 Ангстрем), нагреваемой в горячем газе за счёт столкновений, существенно выше, чем у пылинок больших размеров (>100 Ангстрем). Впервые исследован стохастический нагрев пыли в газе за фронтом ударной волны. Впервые предложен метод учёта влияния разрушения пыли на эмиссионные свойства в инфракрасном диапазоне в горячих газодинамических течениях. Впервые предложен метод поиска маломассивных звёздных скоплений в нашей Галактике, используя эмиссионные характеристики пыли в образованных ими пузырях над плоскостью галактики.

Оценка содержания диссертации

Диссертация Дроздова С.А. состоит из введения, четырех содержательных глав, заключения, приложения и списка литературы. Объем диссертации – 108 страниц, включая 32 рисунка и 2 таблицы. Список литературы состоит из 143 наименований.

В Главе 1 (**введение**) автор описывает мотивацию изучения эмиссионных свойств пыли, обосновывает актуальность поставленной задачи.

Глава 2 посвящена описанию тепловых свойств пыли, находящейся в горячей плазме. Разработана статистическая процедура расчёта функции распределения температуры пыли в зависимости от размера пылинок, учитывающая флуктуаций температуры пыли, возникающие за счёт столкновений пылинок с частицами плазмы. Показано, что спектр излучения пыли в горячей плазме имеет бимодальную форму, в которой возникает дополнительный максимум на высоких частотах (~ 20 ТГц), который производится мелкими пылинками, испытывающими большие флуктуации температуры (до ~ 100 К). Также показано, что основной вклад в этот избыток даёт углеродная пыль (по сравнению с силикатной).

В **Главе 3** рассмотрен стохастический нагрев пыли столкновениями в остывающей горячей плазме, возникающей после прохода ударной волны в среде. Показано, что, в зависимости от размера, тепловая эволюция пылинок существенно различается: крупные пылинки остывает вместе с газом, в то время как мелкая пыль нагревается пока не достигнет максимума эффективности передачи энергии при столкновениях с электронами. Это приводит к искажению эмиссионного спектра пыли от теплового. Исследованы эволюционные треки излучения пыли в газе после прохождения ударной волны, используя диаграммы цвет-цвет.

В **Главе 4** представлен метод для оценки влияния процесса разрушения частиц пыли в горячем газе на эмиссионные свойства пыли, основанный на сравнении характерных времён. Данный метод применён к модели динамики газа в горячем пузыре газа, образующемся в результате последовательных взрывов сверхновых в диске галактики. Показано, что с учётом разрушения пыли поверхностная яркость теплового излучения пыли от пузыря существенно уменьшается ($\sim 3-10$ раз) за счёт разрушения мелких пылинок, дающих наибольший вклад в излучение за счёт выраженных флуктуаций температуры.

В **Главе 5** исследованы эволюция и морфология пузырей горячего газа, формирующихся скоррелированными взрывами сверхновых в галактическом диске. Показано, что в зависимости от количества сверхновых и их расположения, могут формироваться различного размера структуры, заполненные горячим газом над плоскостью диска. Исследованы эмиссионные

свойства таких структур в линии $H\alpha$, рентгеновском диапазоне, а также в тепловом излучении пыли. На основе рассмотренных свойств, предложен метод поиска звёздных скоплений в нашей Галактике, используя наблюдения газовых структур горячего газа над плоскостью Галактики.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Выводы диссертации соответствуют выводам, опубликованным в автореферате.

Соответствие темы диссертации специальности 01.03.02. Содержание диссертации Дроздова С.А. соответствует специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Основные результаты диссертации Дроздова С.А. опубликованы в 4 статьях в рецензируемых журналах, во всех из них, Дроздов С.А. является первым автором, и неоднократно представлялись на международных и всероссийских конференциях.

Недостатки и замечания

1. В разделе 3.4 сказано, что времена соударений выбирались случайным образом в интервале от 0 до τ_f . Из текста диссертации непонятно какая функция распределения для этого использовалась.

2. В разделе 3.5.2 обсуждается вариация тепловой светимости пыли в процессе остывания газа за фронтом ударной волны (см. рис. 3.6.). Из рисунка 3.6. видно, что рассчитанные кривые показывают “мелкомасштабное дрожание”, в то время как из постановки задачи стоило бы ожидать гладких кривых. Является ли это проявлением какого-то физического эффекта? Если нет, и это связано с точностью расчёта, то из текста диссертации непонятно как определялись положения максимумов светимостей с учётом погрешности расчёта. Также было бы логично для представлений результатов такого расчёта выбрать более равномерный шаг в пространстве времени или концентраций газа.

3. В разделе 3.5.2 обсуждаются эволюция спектров пыли и диаграмм цвет-цвет, и сказано, что наблюдаемые диаграммы цвет-цвет могут быть использованы для диагностики среды. Из представленных рисунков и текста в разделе 3.5.2 не очень ясно каким образом это можно сделать. Также непонятно как определяется возраст, на котором возможно определение параметров среды, и как имея наблюдения конкретного объекта, по диаграмме цвет-цвет можно понять, что наблюдаемые значения будут адекватны физическим, т.е. диагностика возможна.

4. В Главе 4 (и Главе 5) рассматривается процесс разрушения пыли посредством столкновений с частицами газа, при этом, по-видимому, не учитывается, то, что при таком разрушении более крупные пылинки становятся более мелкими, т.е. в уравнении для эволюции концентрации пылинок (как функции размера) необходимо учитывать некоторое дополнительное слагаемое, описывающее поток из пылинок больших размеров в меньшие. Может ли такой процесс компенсировать процесс разрушение пыли, рассмотренный автором? Видится необходимым сделать оценку на поправку за счёт этого эффекта.

5. В диссертации обсуждается и показан ряд конкретных эмиссионных особенностей пыли в горячем газе. Диссертация бы значительно выиграла, если бы в ней имелись сравнения с наблюдениями. Например, в Главе 5 предложен метод определения нижележащих в плоскости

Галактики ОВ-ассоциаций, по излучению пыли в кавернах газа над плоскостью галактики. Эмиссионные карты Галактики в линии $\text{H}\alpha$ и для пыли (по данным телескопа Planck) имеются и находятся в свободном доступе. Можно ли применить этот метод к имеющимся данным? Если нет, то что необходимо с наблюдательной точки зрения для того, чтобы это стало возможно?

Хотя в целом работа написана понятно и логично, присутствуют недостатки в оформлении. В особенности это касается значительного количества (около двадцати) опечаток и неточностей в формулах. Например, в некоторых формулах (например, 3.3, А.3, А.4, а также по тексту) не указаны единицы измерения. В формуле А.8 перепутаны τ_c и τ_E . Формула 3.3 некорректно домножена на энергию (сравни с формулой А.1), а в формуле 5.1. неправильная степень у T_6 . (сравни с формулой 4.1). Помимо этого, присутствуют орфографические опечатки в тексте (порядка 30 штук на весь текст), а также замечания к оформлению таблиц (таблица 2.1: указано слишком много значащих цифр и не указаны единицы измерения у T и n_e) и графиков (например, не указаны единицы в подписи по оси ординат на рис. 2.3). Также было бы логично поместить раздел 5.3.3, в котором сравниваются характерный нагрев за счёт столкновений в горячем газе с нагревом за счёт поглощения ультрафиолетовых фотонов, в начало диссертации, так как на выводе, полученном в этом разделе, построены предыдущие главы.

Общее заключение

Несмотря на сделанные замечания и отмеченные недостатки диссертация Дроздова Сергея Александровича производит благоприятное впечатление, выполнена на высоком уровне и является завершённой научно-квалификационной работой по исследованию эволюции и эмиссионным характеристикам пыли в горячей межзвёздной и околосгалактической среде. Она содержит значительный объём фактического материала и полученных результатов. Таблицы и рисунки в диссертации полностью соответствуют тексту и содержанию работы.

В диссертационной работе Дроздова С.А. получены новые важные результаты в области астрофизики и физики межзвёздной среды – исследована эволюция теплового состояния пыли и её эмиссионных характеристик, возникающая в горячих газодинамических течениях, за счёт столкновений с частицами газа. Полученные результаты могут быть **использованы** для моделирования эмиссионных характеристик пыли и её эволюции, что чрезвычайно важно для корректной интерпретации данных наблюдений, выполненных на различных обсерваториях, работающих в видимом, инфракрасном и суб-мм диапазонах. Результаты работы могут быть использованы в АКЦ ФИАН, ГАО РАН, ГАИШ МГУ, ИНАСАН, ИКИ РАН, САО РАН, СПбГУ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе и др.

Считаю, что диссертационная работа «Эмиссионные характеристики внутренних областей галактик в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах», **полностью соответствует** требованиям положения о присуждении ученых степеней ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Сергей Александрович Дроздов, **безусловно заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук** по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия».

Официальный оппонент,

С.А. Балашев

кандидат физ.-мат. наук

01.03.02 – Астрофизика и радиоастрономия

научный сотрудник сектора теоретической астрофизики

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26,

Тел. +7 (812) 2927180

Электронная почта: s.balashhev@gmail.com

Подпись к.ф.-м.н. Балашева С.А. удостоверяю

Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

кандидат физ.-мат. наук, профессор

М.И. Патров