

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ П. Н. ЛЕБЕДЕВА  
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

На правах рукописи

**Дроздов Сергей Александрович**

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

Специальность 01.03.02 –  
«Астрофизика и звездная астрономия»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Астрокосмическом центре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН), г. Москва.

*Научный руководитель:*

**Щекинов Юрий Андреевич**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Астрокосмического центра ФИАН

*Официальные оппоненты:*

**Павлюченков Ярослав Николаевич**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института астрономии РАН (ИНАСАН)

**Балашев Сергей Александрович**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН (ФТИ РАН)

*Ведущая организация:* Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга), г. Москва.

Защита состоится «15» сентября 2022 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д002.023.01 на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, Институт космических исследований РАН, зал семинаров – к. 707.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <http://www.lebedev.ru> и <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан « » июня 2022 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
Д002.023.01, к.ф.-м.н.

Шахворостова Н. Н.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Современная астрофизика – это всеволновая наука, которая на сегодняшний день описывает весь наблюдаемый спектр электромагнитных (ЭМ) волн. Важным для понимания процессов, протекающих во Вселенной, является инфракрасный (ИК) диапазон (1–700 мкм), а также премыкающий к нему субмиллиметровый (300 мкм–1 мм) диапазон. Впервые ИК излучение было открыто Гершелем в 1800 году. В 60-х годах прошлого века начали проводиться первые астрономические наблюдения неба [1] в ближнем ИК диапазоне. Из-за сильного поглощения в атмосфере наблюдателю на поверхности Земли доступна только малая часть спектра в этих диапазонах. Вследствие этого телескопы необходимо было поднимать или на аэростатах, или в горы, либо выводить на орбиту.

Одним из основных источников излучения в ИК диапазоне является пыль. Она встречается повсеместно в межзвёздной среде (МЗС) Галактики и за её пределами [2]. В Млечном пути (МП) бóльшая её часть сосредоточена в газовом диске, что заметно в наблюдениях в виде сильного поглощения излучения оптического и ультрафиолетового (УФ) диапазонов в плоскости диска. Наибольшее поглощение наблюдается в направлении холодных молекулярных облаков, где она играет ключевую роль в процессе звёздообразования (ЗО). Нагрев пыли в результате столкновения с частицами газа позволяет отводить в виде теплового излучения пылинок лишнее тепло из молекулярного облака, обеспечивая его коллапс. Пыль может способствовать формированию молекул на своей поверхности, вплоть до самых сложных [3, 4]. В то же время пылевые частицы хорошо поглощают энергичные фотоны, что защищает от разрушения молекулы в плотных газовых конденсациях. Пылинки, которые обладают вытянутой геометрической структурой, имеют пространственную ориентацию вдоль силовых линий магнитного поля МП, что приводит к поляризации излучения в Галактике. Это является важным инструментом исследования магнитного поля в МЗС [5].

Нагретая пыль, как отмечалось выше, сама является источником излучения. В МЗС основной механизм нагрева пылинок происходит через поглощения фотонов видимого и УФ диапазонов, которые излучаются в первую очередь звёздным населением Галактики. Звёзды ранних спектральных классов являются мощными источниками УФ излучения. Вокруг них формируются области ионизованного водорода (НИИ), которые также являются мощными

ми источниками в ИК диапазоне [6, 7]. Высокоэнергичные кванты от молодых звёзд в OB-ассоциациях, поглощённые пылью, вызывают температурные флуктуации, особенно заметные у мелких пылинок. Впервые это было описано в работах [8, 9], а впоследствии детально изучено в работах [10, 11, 12]. Мощными источниками ИК излучения, которое ассоциируется с тепловой эмиссией пыли, являются остатки сверхновых звёзд (см., например, [13]). В горячем газе за фронтом ударной волны нагрев пыли будет, помимо УФ и рентгеновского излучения, осуществляться за счёт столкновений с частицами горячего газа [14, 15]. На поздних стадиях, когда собственное излучение остатка становится несущественным, а газ за фронтом ударной волны всё ещё достаточно горячий ( $T \sim 10^6 - 10^7$  К), основным источником нагрева пыли становятся столкновения с частицами газа. Такие внешние условия, когда пыль греется преимущественно столкновениями, встречаются во множестве объектов: сверхоболочках от множественных вспышек сверхновых вокруг областей ЗО, галактических ветрах [16] или, как в нашей Галактике, в горячем газе Северного полярного шпура [17].

Понимание тепловых и эмиссионных свойств пыли важно также для интерпретации наблюдаемых спектров в ИК диапазоне от скоплений галактик [18]. В скоплениях пыль выносится в межгалактическое пространство вместе с горячим газом, выметаемым из галактик в результате вспышек ЗО [19, 20]. Впервые присутствие пыли в межгалактическом пространстве заметили по эффектам покраснения фоновых источников [21, 22, 23], а впоследствии обнаружили и её собственную эмиссию [24]. Пылинки в скоплениях галактик находятся в горячей ( $1 - 5$  кэВ) и разреженной плазме ( $10^{-5} - 10^{-3}$  см $^{-3}$ ). Пыль в таких экстремальных условиях будет разрушаться под воздействием налетающих частиц газа [25, 26], при этом тем быстрее, чем меньше радиус пылинки. Поэтому распределение пыли будет меняться в таких условиях, что будет влиять на наблюдаемый ИК спектр излучения [27]. Учёт этого эффекта важен при моделировании эмиссии пыли в горячем газе скоплений галактик и не только, так как такие характеристики плазмы можно встретить и в расширяющихся остатках сверхновых, и в горячих ветрах над областями ЗО.

Пыль в центральной молекулярной зоне (ЦМЗ) будет греться как столкновениями с частицами газа, так и в результате поглощения фотонов. ЦМЗ – это область в центральной части Галактики, ограниченная размером примерно 250 пк [28], которая характеризуется высокой плотностью газа и большой дисперсией скоростей. Такие экстремальные свойства окружающего вещества

позволяют исследовать процессы ЗО в исключительных условиях. Скорость звездообразования в ЦМЗ оценивается в  $SFR = 0.04 - 0.1 M_{\odot}/\text{год}$ , а полная масса газа  $4 - 7 \times 10^7 M_{\odot}$  [29]. В то же время из соотношения Кенниката-Шмидта [30] темп звездообразования в ЦМЗ получается больше наблюдаемого на 1-2 порядка [31]. Это несоответствие наблюдаемых и предсказанных величин требует более детального исследования. Наблюдения ИК эмиссии от пыли может дать нам информацию об окружении, в котором она находится, и о механизмах её нагрева. Эта задача является очень важной для понимания процессов, которые идут в ЦМЗ, так как часто по температурам пыли, оцененным по наблюдениям спектра, восстанавливается температура газа. Однако отмечается несоответствие между наблюдаемой температурой пыли и газа в ЦМЗ, хотя ранние теоретические модели [32] предсказывали их связь при высоких лучевых концентрациях газа. Так, из наблюдений в центре Галактики получена оценка температуры газа в  $60 - 100 \text{ K}$ , в то время как оценка температуры пыли составляет  $\sim 20 - 30 \text{ K}$  [33].

При наблюдении ЦМЗ в ИК диапазоне на луч зрения будет попадать большое количество областей ЗО, которые лежат вне этой зоны. Поэтому, чтобы получить параметры излучения и свойства пыли в ЦМЗ, нам необходимо выделять и оценивать влияние эмиссии от пыли, лежащей вдоль луча зрения, которая будет находиться в принципиально других условиях, а именно в разреженной ( $n \approx 10^{-4} - 10^{-1} \text{ см}^{-3}$ ) и горячей ( $T \approx 3 \times 10^7 - 10^6 \text{ K}$ ) плазме, заполняющей расширяющиеся пузыри вокруг областей ЗО. Такие условия, как отмечалось выше, будут приводить к сильным температурным флуктуациям пылинок, заметным образом искажающим спектр излучения. Эти искажения могут менять наше представление о природе пыли в ЦМЗ и её окружении. Кроме того, количество областей ЗО на луче зрения по направлению к ЦМЗ известно с большой неопределенностью. Из оценок распределения массы НII в зависимости от галактоцентрического расстояния на рисунке 1 (см. подробнее [34]) можно оценить, что основная масса областей ЗО находится не далее  $R_G \simeq 3 - 6 \text{ кпк}$  от центра МП. В Главе 5 мы рассматриваем область ЗО в этой внутренней области Галактики, учитывая что поиск и отождествление новых ОВ-ассоциаций и вычет их вклада в эмиссионные характеристики пыли из ЦМЗ важны для решения наблюдаемых особенностей центра Галактики.

Исследование процессов, протекающих в объектах, о которых упоминалось выше, предполагает достоверную интерпретацию наблюдаемых спектров в ИК диапазоне, где основным источником излучения является пыль.

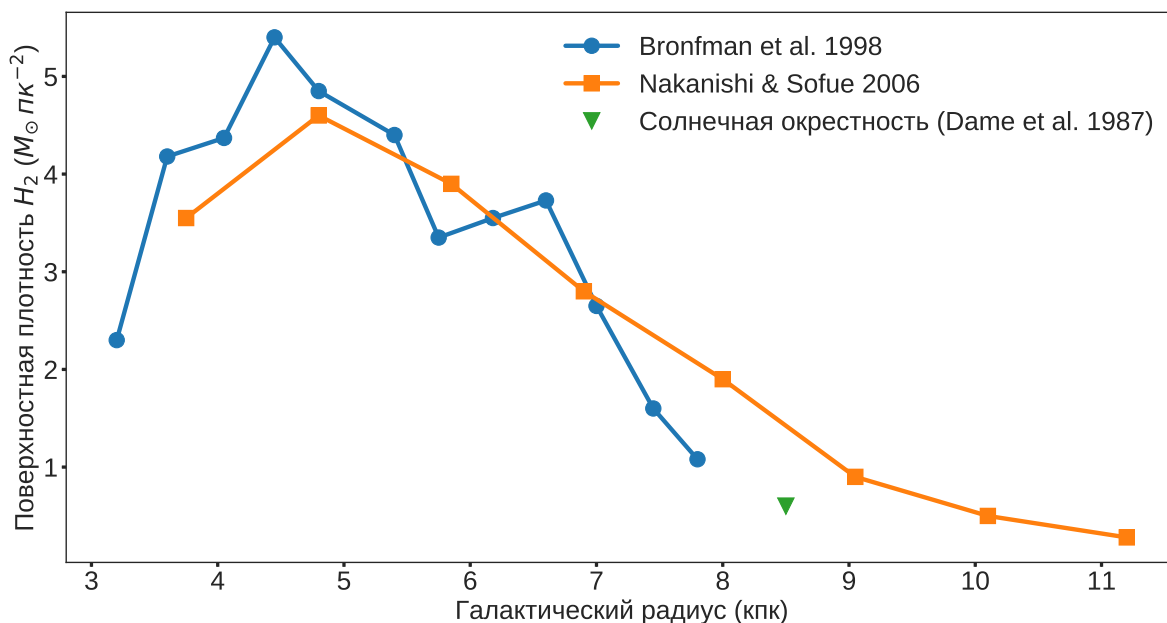


Рис. 1: Радиальное распределение поверхностной плотности ИП, как функции галактоцентрического расстояния. Иллюстративный рисунок из работы [34]

Она, находясь в условиях горячей и разреженной плазмы, будет испытывать сильные температурные флуктуации (подробнее об этом идёт речь в Главе 2-3), что не позволяет рассматривать её температурное поведение, как стационарный процесс. Следовательно, необходимо построение математической модели стохастического нагрева пылинок в горячем газе для изучения эмиссионных характеристик в ИК диапазоне пыли. Целью данного диссертационного исследования является:

- Построение функций распределения температур силикатных и графитовых пылинок разных размеров в зависимости от параметров окружающего газа (температуры и плотности). Расчёт суммарного спектра излучения, который получается интегрированием по спектру размеров пылинок, а также изучение его эволюционных особенностей. Исследование удельной эмиссионной способности пыли, нагреваемой в стохастическом режиме в газе за фронтами ударных волн (Глава 2).
- Разработка статистического метода построения функций распределения температур пылинок, который являлся бы более быстрым методом, чем описанный ранее в работе [35] итеративный метод. Рассмотрение тепловой эволюции газа за фронтом ударной волны в процессе его остывания. Анализ теплового поведения пыли, а также изучение влияния изменения параметров остывающего газа на эмиссионные ха-

рактеристики пыли (Глава 3).

- Разработка метода построения карт излучения пыли в горячих газодинамических течениях при трёхмерном моделировании. Оценка влияния процесса разрушения пылинок на их излучательную способность при моделировании сверхоболочек над галактикой со вспышкой звездообразования (Глава 4). Моделирование формирования истечений над областями ЗО и создание карт излучения в ИК и субмм диапазонах. Изучение возможности обнаружения молодых звёздных скоплений по эмиссионным характеристикам пыли в горячих "шапках" над областями звездообразования (Глава 5).

### Научная новизна:

- Впервые показано, что удельная эмиссионная способность мелкой пыли ( $a \leq 100 \text{ \AA}$ ), нагреваемой в стохастическом режиме столкновениями с частицами газа, заметно превосходит таковую для крупной пыли ( $a > 100 \text{ \AA}$ ) и для пыли, температура которой оценена из предположения о равновесии между нагревом и охлаждением.
- Впервые исследовано тепловое поведение стохастически нагреваемой пыли в остывающем газе за фронтом ударной волны. Показано, что тепловые режимы мелкой пыли ( $a < 300 \text{ \AA}$ ) и более крупной различаются. Мелкие пылинки за счёт растущей эффективности передачи энергии со стороны частиц остывающего газа продолжают нагреваться, но в то же время крупные начинают остывать сразу.
- Впервые представлен метод учёта влияния разрушения пылинок на эмиссию пыли в ИК диапазоне в горячих газодинамических течениях, полученных в результате численного моделирования.
- Впервые показано, что эмиссионные характеристики пыли в горячем газе расширяющихся пузырей могут служить для идентификации маломассивных звёздных скоплений, особенно в направлении на центр Галактики.

Научная и практическая значимость. В последние несколько лет заметно возрос интерес к исследованию теплового режима пыли в центральных (ядерных) областях галактик, в окружении квазаров и областей активного

звздообразования (вспышек звездообразования) как в локальной Вселенной, так и на больших красных смещениях, вплоть до начала периода реионизации. В этой связи можно указать несколько примеров направлений современных исследований: центр нашей Галактики – Центральная молекулярная зона с радиусом  $\sim 100$  пк вокруг источника SgrA\*, где наблюдается избыток инфракрасной эмиссии пыли (см., например, [36, 37]), галактика Arp220 вместе с популяцией ярких инфракрасных галактик ULIRGs – UltraLuminous Infrared Galaxies (см., например, [38, 39, 40, 41]), квазары на красных смещениях в эпоху реионизации  $z \gtrsim 6$  (см., например, [42, 43]), пыль на больших красных смещениях – программа REBELS (см., например, [44, 45]). Во всех этих случаях тепловой режим пыли неявно предполагается стационарным, то есть эффектами стохастического нагрева пренебрегается. Вместе с тем, как следует из результатов, полученных в диссертации, при стохастическом нагреве излучательная способность пыли на единицу массы может быть заметно выше, чем для “равновесной” пыли. Пренебрежение этим обстоятельством может приводить к заметным ошибкам в определении температуры пыли, её массы и мощности нагревающих источников, и в целом к ошибочной интерпретации результатов наблюдений.

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. При стохастическом нагреве пыли отнесённая к единице массы излучательная способность мелких пылинок ( $a < 100 \text{ \AA}$ ) существенно превосходит таковую для крупных пылинок и пылинок с равновесной температурой. Это наблюдательно проявляется в бимодальности эмиссионного спектра пыли с пиками на коротких ( $\lambda \sim 30 \text{ мкм}$ ) и длинных ( $\lambda \sim 300 \text{ мкм}$ ) волнах и в цветовых характеристиках виновской части спектра.
2. В остывающем газе тепловые режимы мелкой ( $a < 300 \text{ \AA}$ ) и более крупной пыли различаются: мелкие пылинки на начальном этапе эволюции ( $\sim 3$  млн. лет) продолжают нагреваться, пока окружающая плазма не остынет до температуры  $T \sim 3 \times 10^6 \text{ К}$ . Следовательно, суммарный спектр пыли в этот период эволюции определяется более горячей мелкой пылью.
3. В расширяющихся гигантских сверхоболочках вокруг OB-ассоциаций большая часть пыли сохраняется, благодаря большому различию динамического времени сверхоболочек и времени разрушения пылинок. Пу-



зыри от коллективных вспышек сверхновых в OB-ассоциациях малой массы ( $\sim 10^3\text{--}10^4 M_\odot$ ) за пределами одной шкалы высоты их распределения  $z_0 \sim 100$  пк могут достигать высоты  $\sim 400$  пк над плоскостью Галактического диска. Их эмиссионные характеристики, определяемые неравновесной пылью, могут служить для идентификации маломассивных звездных скоплений, особенно в направлении центра Галактики ( $-30^\circ < l < 30^\circ$  и  $-5^\circ < b < 5^\circ$ ).

Все результаты, выносимые на защиту, являются новыми и получены впервые.

**Достоверность результатов.** Достоверность представленных результатов подтверждается апробацией на российских и зарубежных конференциях, где присутствовали специалисты в данной области, а также публикациями в ведущих научных рецензируемых журналах.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах отдела теоретической астрофизики Астрокосмического центра ФИАН (Москва, Россия), на конференциях и симпозиумах:

1. Актуальные проблемы внегалактической астрономии. ПРАО АКЦ, г. Пущино, 18-21.04 2017, «Эмиссионный спектр остатка сверхновой в области субмиллиметрового минимума» (устный доклад)
2. Актуальные проблемы внегалактической астрономии. ПРАО АКЦ, г. Пущино, 24-27.04 2018, «Спектральные особенности тепловой эмиссии многотемпературной пыли в центральной молекулярной зоне Галактики» (устный доклад)
3. Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра. ИКИ РАН, г. Москва, 2018. «Бимодальный спектр тепловой эмиссии пыли в горячих остатках сверхновых и центральных областей галактик» (постер)
4. Актуальные проблемы внегалактической астрономии. ПРАО АКЦ, г. Пущино, 24-26.04 2019, «Особенности эмиссии пыли в горячей плазме» (устный доклад)
5. 21 Gamow International Conference, Odessa, Ukraine, 15-21.08 2019. «Dust temperature in hot plasma» (постер)
6. Diversity of the local Universe. SAO RAS, 30.09-4.10 2019, «Emission characteristics of dust in cooling plasma» (постер)

7. Современная звёздная астрономия. САО РАН, п. Нижний Архыз, 7-11.10 2019. «Моделирование спектра в субмиллиметровой и ИК области молодого звёздного скопления» (устный доклад)
8. Планетообразование и звёздообразование. АКЦ ФИАН, г. Москва, 12-13.11. 2019. «Модель стохастического нагрева пыли за фронтами ударных волн» (устный доклад)
9. Планетообразование и звёздообразование. АКЦ ФИАН, г. Москва, 10-11.11. 2020. «Диагностика этапов жизни звёздных скоплений в ИК диапазоне» (устный доклад)
10. Конференция «Идеи С.Б. Пикельнера и С.А. Каплана и современная астрофизика». ГАИШ МГУ, г. Москва, 8-12.02 2021. «Слабый галактический ветер в спокойных галактиках» (устный доклад)
11. 1st Moscow International Conference on mm/submm Astronomy. ASC LPI, Moscow, 12-15.04 2021. «Emission from hot bubbles by a quiescent star formation» (устный доклад)
12. Всероссийская астрономическая конференция. ГАИШ МГУ, г. Москва. 23-28.08 2021. «Эмиссия пыли в областях звёздообразования» (устный доклад)
13. Планетообразование и звёздообразование. АКЦ ФИАН, г. Москва, 23-24.11. 2021. «Эмиссия пыли в областях звёздообразования» (устный доклад)
14. Конференция, посвящённая 90-летию Николая Семёновича Кардашёва. «Вселенная: от большого взрыва до наших дней». АКЦ ФИАН, г. Москва, 25-26.04.2022. «ИК эмиссия пыли в горячих ветрах молодых ОВ-ассоциаций» (устный доклад)

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах. Всего имеется 4 научных статей [A1–A4]. Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, суммированы в 4 статьях [A1–A4], которые изданы в рецензируемых журналах, входящих в список Web of Science и Scopus и удовлетворяющих

требованиям Высшей аттестационной комиссии (ВАК) при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации. Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

- A1** Drozdov S.A., Shchekinov Yu.A. Temperature of Dust in Hot Plasmas // Astrophysics – 2019, Vol. 62, Issue 4, P. 540–555.
- A2** Drozdov S.A. Emission Spectrum of Dust in a Cooling Gas // Astrophysics – 2021, Vol. 64, № 1, P. 126–140.
- A3** Drozdov S.A., Vasiliev E.O. Dust Destruction in Hot Gas Dynamic Flows // Bulletin of the Lebedev Physics Institute – 2021, Vol. 48, № 10, P. 327–331
- A4** Drozdov S.A., Vasiliev E.O., Ryabova M.V., Shchekinov Yu.A., Nath B.B. Bubbles and OB associations // Open Astronomy – 2022, Vol. 31, № 1, P. 154–165.

**Личный вклад.** Автор диссертационной работы совместно с научным руководителем и соавторами активно участвовал в постановке исследовательских задач, выборе методов их решения, разработке программных пакетов для численного моделирования, интерпретации и обсуждении результатов и формулировке выводов. Во всех выносимых на защиту результатах вклад автора является основным и определяющим. Автор диссертации лично провёл следующие работы:

- В работе [A1] автор самостоятельно разработал программный пакет для построения функций распределения температур пыли в горячем газе на основе итеративного метода. Численный код реализован на языке программирования Python и C. С помощью численного кода получены автором все результаты, которые описаны в работе.
- В работе [A2] автор самостоятельно провёл все исследования и написал текст работы.
- В работе [A3] автор самостоятельно разработал и применил метод учёта влияния разрушения пылинок на эмиссионные карты в ИК и субмм диапазонах в горячих газодинамических течениях. Также автор подготовил текст статьи.
- В работе [A4] автором получены карты ИК и субмм эмиссии и оценки

наблюдаемой температуры пыли в горячем ветре над ОВ-ассоциацией. Также автор подготовил текст соответствующих глав статьи.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 6 приложений. Полный объем диссертации составляет 108 страниц с 32 рисунками и 2 таблиц. Список литературы содержит 143 наименований на 15 страницах.

## Содержание работы

В Первой главе обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Также приводятся основные результаты работы, выносимые на защиту.

Вторая глава посвящена анализу тепловых свойств пыли, погруженной в горячую плазму ( $T = 10^6 - 10^7$  К). Такая плазма встречается повсеместно в межзвёздной, окологалактической и межгалактической средах. Пылинки в таком агрессивном окружении могут сохраняться ограниченное время  $\sim 0.3n^{-1}$  млн. лет,  $n$  – концентрация плазмы, и излучать в ИК диапазоне. Это даёт возможность диагностики свойств окружающего газа, в котором будет нагреваться и излучать пыль. Особенность теплового режима пылевых частиц, помещённых в разреженную плазму, состоит в том, что они испытывают флуктуации температуры в широком интервале. Мы строим Функции Распределения Температур (ФРТ) пыли с помощью итерационного метода, описанного в работе [35]. Теплоёмкость пыли в нашей модели взяты из работы [35, 11], а для коэффициентов излучения использованы аппроксимации описанные в [46] (см. также обсуждение в разделе 24.1 в книге [47]). Общим для этих распределений является узкое распределение для крупных частиц ( $a > 0.05$  мкм) и все более широкое для частиц меньших размеров, для которых порция энергии от отдельного электрона ( $\Delta E \sim 0.01$  эВ) сравнима с энтальпией частицы. Для мелких частиц ФРТ демонстрирует протяженный хвост в области высоких температур  $T \gtrsim \Delta E/k_B \sim 100$  К. В области низких температур при  $n \lesssim 0.3$  см<sup>-3</sup> распределение для мелких пылинок тянется в область  $T \lesssim 5$  К: легко оценить, что пылинка с радиусом  $a = 0.003$  мкм в плазме с  $T = 10^6$  К и  $n = 0.01$  см<sup>-3</sup> между двумя последовательными столкновениями остынет от своей максимальной температуры до  $T_d \simeq 5$  К.

Углеродные частицы имеют более широкие распределения температуры при одинаковых размерах пылевых частиц и параметров окружающей плазмы. Эта особенность была впервые обнаружена в работе [35] и в области низких температур объясняется различиями в теплоемкостях  $C_m(T)$  и коэффициентах абсорбции  $\langle Q_{\text{abs}} \rangle$  для углеродной и силикатной пыли. В области высоких температур видимое, хотя и незначительное, более широкое распределение для углеродных частиц объясняется тем, что для них один акт столкновения электрона приводит к несколько большему увеличению температуры, чем для силикатных пылинок. Это приводит к большему вкладу в высокочастотную часть спектра от углеродных пылинок, по сравнению с силикатными.

Анализируя тепловые свойства пыли мы получили, что отнесенная к единице массы излучательная способность пылинок малых размеров ( $a \lesssim 100 \text{ \AA}$ ) существенно превосходит таковую для более крупных пылинок и для пылинок с фиксированной температурой, определяемой балансом нагрева и радиационного охлаждения. Мы получили, что спектры демонстрируют бимодальное (двухпиковое) распределение, как если бы на луч зрения попадали две области, в которых пыль имеет разную температуру. Холодная пыль с пиком на низких частотах ( $\nu \sim 2 \text{ ТГц}$ ), обусловленная сильным максимумом функции распределения пылинок в области низких температур ( $T_d \sim 5\text{--}6 \text{ К}$ ), и горячая с пиком на высоких частотах ( $\nu \sim 20 \text{ ТГц}$ ) связанная с избытком мелких пылинок с высокой ( $T_d \sim 10^2 \text{ К}$ ) температурой. Бимодальный вид тепловой эмиссии типичен для пыли с флуктуирующей температурой, особенно для пыли, окруженной горячей плазмой, где высокотемпературные “хвосты” в ФРТ более развиты, чем при нагреве пыли ультрафиолетовым излучением. Впервые примеры бимодальных спектров были описаны в работах [11, 35] и недавно – в [48].

**Третья глава** посвящена исследованию эффекта стохастического нагрева пыли в остывающей изначально горячей плазме. Мы задаем плотность фоновой среды, по которой проходит ударная волна:  $n_0 = 0.3, 1, 3, \text{ см}^{-3}$  и задаем скорость ударной волны  $v_s = 10^3 \text{ км/с}$ , что соответствует начальной температуре газа  $T_0 = 2.2 \times 10^7 \text{ К}$ . Для остывающего и сжимающегося газа мы разработали новый статистический метод построения ФРТ, основанный на прямом моделировании столкновений электронов с пылинкой. Этот метод позволяет сильно ускорить построение ФРТ в плотном газе, по сравнению с итерационным методом, который применялся в Главе 2. Функции охлажде-

ния газа мы задаём в виде таблицы со значениями температур от  $10^5$  К до  $10^8$  К и для двух случаев металличности:  $Z = Z_{\odot}$  и  $0.1 Z_{\odot}$ . Данные мы берём из [49]. Тепловые и оптический свойства пыли взяты из работ [35, 11, 46].

Для наглядности эволюции ФРТ пыли в остывающем газе мы определяем характерную температуру пыли и показываем её изменение. При этом отличия в усреднённых температурах пыли в случаях солнечной металличности и  $0.1 Z_{\odot}$  незначительны, поэтому далее мы рассматриваем только результаты для  $Z = Z_{\odot}$ . После выполнения расчётов мы получаем ФРТ для разных размеров пылинок на сетке параметров остывающего газа для трёх значений начальной фоновой плотности газа. Для наглядности, чтобы качественно охарактеризовать эволюцию ФРТ мы оцениваем значение температуры, усреднённой по функции распределения:

$$\langle T_d(a) \rangle_G = \frac{\int G(a, T'_d) T'_d dT'_d}{\int G(a, T'_d) dT'_d} \quad (1)$$

Мы получили, что тепловые свойства пыли за фронтами ударных волн существенно неравновесны – пылинки разных размеров демонстрируют принципиально разную тепловую эволюцию. Это обстоятельство проявляется в особенностях спектра их суммарной эмиссии. По мере остывания газа пылинки с радиусом  $30 \text{ \AA}$  продолжают нагреваться, так как растёт эффективность передачи энергии при столкновениях с электронами. Пылинки радиусом  $100 \text{ \AA}$  вначале продолжают нагреваться, но после достижения максимума эффективности передачи энергии начинают остывать вместе с газом. Более крупная пыль ( $a \geq 300 \text{ \AA}$ ) начинает остывать сразу вместе с газом, что слабо сказывается на суммарном спектре, который определяется преимущественно мелкими пылинками.

Эволюция ФРТ пылинок в процессе остывания газа имеет наблюдательные проявления, легко различимые на двухцветных диаграммах. В качестве иллюстрации мы строим диаграмму "цвет–цвет" эмиссии пыли, находящейся за фронтом ударной волны. Такие диаграммы являются хорошим и наглядным способом диагностики изменения эмиссионного спектра (см., например, [50, 51]).

Мы обнаружили, что на начальном этапе (до момента времени  $(4-5) \times 10^5$  лет) в процессе остывания плазмы диаграммы "цвет–цвет" описывают эволюционные треки, однозначно соответствующие тепловому состоянию окружающей остывающей плазмы, и в этом смысле дают возможность её на-

блюдательной диагностики. Почти во всех диапазонах изменение эволюционной последовательности "цвет–цвет" происходит с характерным изломом диаграммы, после которого направление эволюционной последовательности меняется на обратное. Таким образом, в процессе остывания газа спектр смещается сначала в длинноволновую часть, а после достижения некоторой критической температуры газа, в коротковолновую.

Для примера мы сравниваем спектр, полученный с учётом температурных флуктуаций, с квази-планковским спектром облака пыли, попадающего на луч зрения, состоящего из пылинок с средневзвешенным радиусом  $\langle a \rangle = 0.1$  мкм, определяемым согласно [52] и имеющих равновесную температуру, которая считается из условия теплового равновесия потока энергии от столкновения с электронами и тепловой эмиссией пылинок:  $H_{coll}(\langle a \rangle, T_g, n_e) = L_{IR}(\langle a \rangle, T_{eq})$ , где  $H_{coll}$  – вычисляется с помощью выражения представленного в работе [53], а  $T_g$  – температура газа. Пыль состоит из двух сортов: силикатной и графитовой с плотностями:  $3.2 \text{ г/см}^3$  и  $2.2 \text{ г/см}^3$  соответственно. Показатель поглощения пыли  $\beta = 2$ . Так же, как и в случае с флуктуирующей пылью, мы предполагаем, что масса излучающей пыли единична. Мы показали, что эмиссионные спектры пыли, окружённой горячей остывающей плазмой, принципиально отличаются от квази-планковских спектров пыли с равновесной температурой. Эти отличия связаны с тем, что для мелких пылинок существенны эффекты температурных флуктуаций, которые усиливают их эмиссию в коротковолновой части спектра. Зависимость стохастического нагрева пылинок от теплового состояния плазмы позволяет использовать особенности спектра пылинок с флуктуирующей температурой для диагностики окружающей их плазмы. В качестве "инструмента" такой диагностики могут служить диаграммы "цвет–цвет" на временах  $t < (4 - 5) \times 10^5$  лет в коротковолновой (виновской) области эмиссионного спектра пыли.

**Четвёртая глава** посвящена предложенному нами приближённому методу оценки влияния разрушения полидисперсной пыли в горячих газовых течениях на её излучательную способность в ИК диапазоне.

Столкновения с частицами газа способствуют эффективному разрушению пылевых частиц наименьших размеров [25] и тем самым меняют заметным образом спектральное распределение. По этой причине учёт разрушения пылинок важен для моделирования излучения пыли в горячем газе, где пылевые частицы могут находиться в агрессивном окружении  $\sim 30 - 100$  млн. лет [54]. Описание движения пылинок в газе должно представлять собой в общем

случае динамику системы лагранжевых частиц. Распределение пыли по размерам в межзвездной среде оказывается довольно крутым:  $f(a) \sim a^{-3.5}$  [55]. Для полидисперсной пыли с размерами в интервале 30–3000 Å это означает одну крупную частицу на  $\sim 10^7$  мелких. Из-за этого соотношения, в основном, ограничиваются рассмотрением частиц только одного размера (сорта). Однако для расчета эмиссионных характеристик и массы пыли необходимо учитывать несколько размеров, поскольку в случае указанного выше распределения по размерам мелкие частицы определяют экстинкцию, а крупные – массу. При таком количестве мелких частиц, приходящихся на одну крупную, практически невозможно отслеживать траектории частиц. Таким образом, общая задача для описания движения пылевых частиц оказывается практически не реализуемой. В этом случае имеет смысл рассмотреть приближенные методы для конкретных физических условий.

Мы описываем метод оценки влияния разрушения пылевых частиц нескольких размеров в горячем газе на эмиссионные свойства в ИК и субмм диапазонах. В основе метода лежит анализ соотношения характерных времен, в частности, сравнение времен жизни пылинок различного размера и динамического времени газопылевого течения. Также для примера мы рассчитываем эмиссионные характеристики пыли с учётом и без разрушения пылинок в горячем газе галактического ветра и получаем оценки изменения полной светимости и массы пыли. Если учитывать только те пылинки, чьё время жизни оказалось больше возраста пузыря (25 млн. лет), то этом случае, массовая доля разрушенной пыли составит всего  $5 \times 10^{-3}$ .

**Пятая глава** посвящена моделированию формирования пузырей горячего газа над звёздными скоплениями и их наблюдательному проявлению. Такие газовые структуры, расположенные над плоскостью Галактического диска, могут указывать на низлежащие звёздные скопления.

Скопления средних и больших масс  $M \gtrsim 10^3 M_\odot$  более или менее легко идентифицируются, тогда как нижний предел массы скоплений  $M_{min} \sim 300 M_\odot$  плохо определён, особенно в внутренней части галактического диска на галактоцентрическом расстоянии  $r \lesssim 3 - 5$  кпк с довольно плотным звёздным окружением. Проблема усугубляется при учёте поглощения излучения на пыли – это не позволяет наблюдать ОВ-ассоциации в направлении центра Галактики дальше 3 кпк [56]. Однако величина нижнего предела для звёздных скоплений имеет большое значение для понимания процесса звёздообразования. В частности, он определяет наименьшую массу, при которой



взаимосвязь между скоростью звездообразования и массой газа перестаёт работать [57].

Мы проводим трёхмерное гидродинамическое моделирование взрывов сверхновых внутри скопления, расположенного в галактическом диске в декартовой системе координат. Мы задаём газовый диск так, чтобы он изначально находился в гидростатическом равновесии в гравитационном потенциале (см., например, [58, 59, 60]), который состоит из двух компонент: гало тёмной материи (ТМ) и барионного диска. Сверхновые распределены случайным образом в скоплении с радиусом 10 пк. Мы рассчитываем три модели: в первой центр скопления расположен в плоскости диска ( $z = 0$ ), а в других он смещён над диском на высоту  $z = 20$  и  $60$  пк. В обоих случаях смещение скопления меньше половины высоты шкалы диска для галактоцентрического расстояния равного 3 кпк. Предполагается, что энергия сверхновой составляет  $10^{51}$  эрг.

Тепловое поведение пылевых частиц, применяемое для построения карт ИК и субмм эмиссий в пузыре, описано в Главе 3. В расчётах учитывается нагрев пылинок УФ излучением. Локальная плотность энергии УФ излучения в пределах одной шкалы высоты диска принимается фиксированной и равной  $u_* = 1.5 \times 10^{-13}$  эрг см<sup>-3</sup>

Мы изучили эволюцию пузырей, сформированных несколькими сверхновыми (до 20) в галактическом диске. Такое число сверхновых может быть присуще небольшой ОВ-ассоциации. Морфология пузырей зависит как от свойств диска, так и от свойств самого скопления, в частности, толщина диска, плотность газа в плоскости диска и высота скопления над диском, размер скопления и т.д.

Мы показали, что энергии, вбрасываемой скоплением с  $\sim 20$  сверхновыми в плоскости диска, достаточно, чтобы сформировать истечение на галактоцентрическом расстоянии  $\sim 3$  кпк, которое может достигать 2-3 шкал высот, газ в истечении может излучать в линии  $\text{H}\alpha$  и рентгеновских лучах (0.7-1.2 кэВ) на протяжении нескольких млн. лет. В тоже время скопление, образованное  $\sim 10$  сверхновыми в плоскости диска, неспособно создать истечение над диском. Нами показано, что скопление, сформированное  $\sim 10$  сверхновыми и расположенное на высоте  $\sim 0.2-0.5$  шкалы высот над плоскостью диска, создаёт заметные  $\text{H}\alpha$ , рентгеновские и ИК структуры, достигающие размеров  $\sim 0.5 - 2$  шкал высот, которые можно обнаружить по эмиссии в этих диапазонах и по дисперсии скоростей ионизованного газа. Также мы показали, что

скопление, образованное  $\gtrsim 20$  сверхновыми, находящееся в плоскости диска, может создавать яркие в ИК и субмм диапазонах пылевые "шапки" на 2-3 шкалах высот. Наблюдаемая температура пыли в таких "шапках"  $\gtrsim 20$  К, которая определяется в первую очередь пылинками малых размеров, нагревающимися преимущественно столкновениями с частицами горячей плазмы пузыря.

В заключении сформулированы результаты диссертации.

## Список литературы

- [1] Walker H. J. A brief history of infrared astronomy // *Astronomy and Geophysics*. 2000. Vol. 41, no. 5. P. 10.
- [2] Shchekinov Y. A., Nath B. B., Vasiliev E. O. Dust in Clusters of Galaxies // *Universe*. 2022. Vol. 8, no. 4. P. 212. arXiv:astro-ph.GA/2203.14073.
- [3] Gould R. J., Gold T., Salpeter E. E. The Interstellar Abundance of the Hydrogen Molecule. II. Galactic Abundance and Distribution. // *Astrophys. J.* . 1963. Vol. 138. P. 408.
- [4] Bron E., Le Boulrot J., Le Petit F. Surface chemistry in the interstellar medium. II. H<sub>2</sub> formation on dust with random temperature fluctuations // *Astron. and Astrophys.* . 2014. Vol. 569. P. A100. arXiv:astro-ph.GA/1407.4473.
- [5] Planck Collaboration, Abergel A., Ade P. A. R. et al. Planck 2013 results. XI. All-sky model of thermal dust emission // *Astron. and Astrophys.* . 2014. Vol. 571. P. A11. arXiv:astro-ph.GA/1312.1300.
- [6] Pavlyuchenkov Y. N., Kirsanova M. S., Wiebe D. S. Infrared emission and the destruction of dust in HII regions // *Astronomy Reports*. 2013. Vol. 57, no. 8. P. 573–585. arXiv:astro-ph.GA/1307.6504.
- [7] De Buizer J. M., Lim W., Karnath N. et al. Surveying the Giant HII Regions of the Milky Way with SOFIA: IV. Sgr D, W42, and a Reassessment of the Giant HII Region Census // arXiv e-prints. 2022. P. arXiv:2205.06220. arXiv:astro-ph.GA/2205.06220.
- [8] Greenberg J. M. *Interstellar Grains // Nebulae and Interstellar Matter* / Ed. by B. M. Middlehurst, L. H. Aller. 1968. P. 221.
- [9] Greenberg J. M., Hong S. S. The Chemical Composition and Distribution of Interstellar Grains (review) // *Galactic Radio Astronomy* / Ed. by F. J. Kerr, S. C. Simonson. Vol. 60. 1974. P. 155.
- [10] Purcell E. M. Interstellar grains as pinwheels. // *The Dusty Universe* / Ed. by G. B. Field, A. G. W. Cameron. 1975. P. 155–167.
- [11] Draine B. T., Anderson N. Temperature fluctuations and infrared emission from interstellar grains. // *Astrophys. J.* . 1985. Vol. 292. P. 494–499.
- [12] Draine B. T., Li A. Infrared Emission from Interstellar Dust. I. Stochastic Heating of Small Grains // *Astrophys. J.* . 2001. Vol. 551, no. 2. P. 807–824. arXiv:astro-ph/astro-ph/0011318.

- [13] Indebetouw R., Matsuura M., Dwek E. et al. Dust Production and Particle Acceleration in Supernova 1987A Revealed with ALMA // *Astrophys. J. Lett.* . 2014. Vol. 782, no. 1. P. L2. arXiv:astro-ph.SR/1312.4086.
- [14] Burke J. R., Silk J. Dust Grains in a Hot Gas. *Basic Physics* // *Astrophys. J.* . 1974. Vol. 190. P. 1–10.
- [15] Dwek E., Arendt R. G. Dust-gas interactions and the infrared emission from hot astrophysical plasmas. // *Annual Rev. Astron. Astrophys.* . 1992. — . Vol. 30. P. 11–50.
- [16] Yoon J. H., Martin C. L., Veilleux S. et al. Exploring the dust content of galactic haloes with Herschel III. NGC 891 // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2021. Vol. 502, no. 1. P. 969–984. arXiv:astro-ph.GA/2012.08686.
- [17] Shchekinov Y. Multi-Wavelength Observations and Modeling of Loop I // *Galaxies*. 2018. Vol. 6, no. 2. P. 62.
- [18] Planck Collaboration, Adam R., Ade P. A. R. et al. Planck intermediate results. XLIII. Spectral energy distribution of dust in clusters of galaxies // *Astron. and Astrophys.* . 2016. Vol. 596. P. A104. arXiv:astro-ph.CO/1603.04919.
- [19] Larson R. B. Effects of supernovae on the early evolution of galaxies // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 1974. Vol. 169. P. 229–246.
- [20] Mac Low M.-M., Ferrara A. Starburst-driven Mass Loss from Dwarf Galaxies: Efficiency and Metal Ejection // *Astrophys. J.* . 1999. Vol. 513, no. 1. P. 142–155. arXiv:astro-ph/astro-ph/9801237.
- [21] Zwicky F. The Coma Cluster of Galaxies // *Publ. Astron. Soc. Pacific* . 1951. Vol. 63, no. 371. P. 61.
- [22] Zwicky F. New Observations of Importance to Cosmology // *Problems of Extra-Galactic Research* / Ed. by G. C. McVittie. Vol. 15. 1962. P. 347.
- [23] Karachentsev I. D., Lipovetskii V. A. Absorbing Material in Clusters of Galaxies. // *Astron. Zh.* . 1968. Vol. 45. P. 1148.
- [24] Stickel M., Klaas U., Lemke D., Mattila K. Far-infrared emission from intracluster dust in Abell clusters // *Astron. and Astrophys.* . 2002. Vol. 383. P. 367–383. arXiv:astro-ph/astro-ph/0112063.
- [25] Draine B. T., Salpeter E. E. On the physics of dust grains in hot gas. // *Astrophys. J.* . 1979. Vol. 231. P. 77–94.
- [26] McKee C. F., Hollenbach D. J., Seab G. C., Tielens A. G. G. M. The Structure of Time-dependent Interstellar Shocks and Grain Destruction in the Interstellar Medium // *Astrophys. J.* . 1987. Vol. 318. P. 674.

- [27] Polikarpova O. L., Shchekinov Y. A. Dust in galaxy clusters // *Astronomy Reports*. 2017. Vol. 61, no. 2. P. 89–102.
- [28] Morris M., Serabyn E. The Galactic Center Environment // *Annual Rev. Astron. Astrophys.* . 1996. Vol. 34. P. 645–702.
- [29] Longmore S. N., Bally J., Testi L. et al. Variations in the Galactic star formation rate and density thresholds for star formation // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2013. Vol. 429, no. 2. P. 987–1000. arXiv:astro-ph.GA/1208.4256.
- [30] Kennicutt J., Robert C. The Global Schmidt Law in Star-forming Galaxies // *Astrophys. J.* . 1998. Vol. 498, no. 2. P. 541–552. arXiv:astro-ph/9712213.
- [31] Kruijssen J. M. D., Longmore S. N., Elmegreen B. G. et al. What controls star formation in the central 500 pc of the Galaxy? // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2014. Vol. 440, no. 4. P. 3370–3391. arXiv:astro-ph.GA/1303.6286.
- [32] Hollenbach D. J., Tielens A. G. G. M. Photodissociation regions in the interstellar medium of galaxies // *Reviews of Modern Physics*. 1999. Vol. 71, no. 1. P. 173–230.
- [33] Longmore S. N., Rathborne J., Bastian N. et al. G0.253 + 0.016: A Molecular Cloud Progenitor of an Arches-like Cluster // *Astrophys. J.* . 2012. Vol. 746, no. 2. P. 117. arXiv:astro-ph.GA/1111.3199.
- [34] Heyer M., Dame T. M. Molecular Clouds in the Milky Way // *Annual Rev. Astron. Astrophys.* . 2015. Vol. 53. P. 583–629.
- [35] Dwek E. Temperature Fluctuations and Infrared Emission from Dust Particles in a Hot Gas // *Astrophys. J.* . 1986. Vol. 302. P. 363.
- [36] Clark J. S., Patrick L. R., Najarro F. et al. Constraining the population of isolated massive stars within the Central Molecular Zone // *Astron. and Astrophys.* . 2021. Vol. 649. P. A43. arXiv:astro-ph.GA/2102.08126.
- [37] Lu X., Li S., Ginsburg A. et al. ALMA Observations of Massive Clouds in the Central Molecular Zone: Ubiquitous Protostellar Outflows // *Astrophys. J.* . 2021. Vol. 909, no. 2. P. 177. arXiv:astro-ph.GA/2101.07925.
- [38] Sakamoto K., Martín S., Wilner D. J. et al. Deeply Buried Nuclei in the Infrared-luminous Galaxies NGC 4418 and Arp 220. II. Line Forests at  $\lambda = 1.4\text{--}0.4$  mm and Circumnuclear Gas Observed with ALMA // *Astrophys. J.* . 2021. Vol. 923, no. 2. P. 240. arXiv:astro-ph.GA/2109.08437.

- [39] Dwek E., Arendt R. G. Dust Masses, Compositions, and Luminosities in the Nuclear Disks and the Diffuse Circumnuclear Medium of Arp 220 // *Astrophys. J.* . 2020. Vol. 901, no. 1. P. 36. arXiv:astro-ph.GA/2008.04196.
- [40] Aalto S., Muller S., König S. et al. The hidden heart of the luminous infrared galaxy IC 860. I. A molecular inflow feeding opaque, extreme nuclear activity // *Astron. and Astrophys.* . 2019. Vol. 627. P. A147. arXiv:astro-ph.GA/1905.07275.
- [41] Baba S., Imanishi M., Izumi T. et al. The Extremely Buried Nucleus of IRAS 17208-0014 Observed at Submillimeter and Near-infrared Wavelengths // *Astrophys. J.* . 2022. Vol. 928, no. 2. P. 184. arXiv:astro-ph.GA/2202.11105.
- [42] Bañados E., Venemans B. P., Mazzucchelli C. et al. An 800-million-solar-mass black hole in a significantly neutral Universe at a redshift of 7.5 // *Nature* . 2018. Vol. 553, no. 7689. P. 473–476. arXiv:astro-ph.GA/1712.01860.
- [43] Decarli R., Walter F., Venemans B. P. et al. An ALMA [C II] Survey of 27 Quasars at  $z > 5.94$  // *Astrophys. J.* . 2018. Vol. 854, no. 2. P. 97. arXiv:astro-ph.GA/1801.02641.
- [44] Ferrara A., Sommovigo L., Dayal P. et al. The ALMA REBELS Survey. Epoch of Reionization giants: Properties of dusty galaxies at  $z \sim 7$  // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2022. Vol. 512, no. 1. P. 58–72. arXiv:astro-ph.GA/2202.07666.
- [45] Dayal P., Ferrara A., Sommovigo L. et al. The ALMA REBELS survey: the dust content of  $z \sim 7$  Lyman break galaxies // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2022. Vol. 512, no. 1. P. 989–1002. arXiv:astro-ph.GA/2202.11118.
- [46] Draine B. T. Infrared emission from dust in shocked gas // *Astrophys. J.* . 1981. Vol. 245. P. 880–890.
- [47] Draine B. T. *Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium*. 2011.
- [48] Camps P., Misselt K., Bianchi S. et al. Benchmarking the calculation of stochastic heating and emissivity of dust grains in the context of radiative transfer simulations // *Astron. and Astrophys.* . 2015. Vol. 580. P. A87. arXiv:astro-ph.IM/1506.05304.
- [49] Vasiliev E. O. Non-equilibrium cooling rate for a collisionally cooled metal-enriched gas // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2013. Vol. 431, no. 1. P. 638–647. arXiv:astro-ph.CO/1302.0159.
- [50] Yuan F., Buat V., Burgarella D. et al. The spectral energy distribution of galaxies at  $z > 2.5$ : Implications from the Herschel/SPIRE color-color dia-

- gram // *Astron. and Astrophys.* . 2015. Vol. 582. P. A90. arXiv:astro-ph.GA/1506.07397.
- [51] Cortese L., Fritz J., Bianchi S. et al. PACS photometry of the Herschel Reference Survey - far-infrared/submillimetre colours as tracers of dust properties in nearby galaxies // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2014. Vol. 440, no. 1. P. 942–956. arXiv:astro-ph.GA/1402.4524.
- [52] Hildebrand R. H. The determination of cloud masses and dust characteristics from submillimetre thermal emission. // . 1983. Vol. 24. P. 267–282.
- [53] Dwek E. The Infrared Diagnostic of a Dusty Plasma with Applications to Supernova Remnants // *Astrophys. J.* . 1987. Vol. 322. P. 812.
- [54] Heckman T. M., Armus L., Miley G. K. On the Nature and Implications of Starburst-driven Galactic Superwinds // *Astrophys. J. Suppl.* . 1990. Vol. 74. P. 833.
- [55] Mathis J. S., Rumpl W., Nordsieck K. H. The size distribution of interstellar grains. // *Astrophys. J.* . 1977. Vol. 217. P. 425–433.
- [56] Bronfman L., Casassus S., May J., Nyman L. Å. The radial distribution of OB star formation in the Galaxy // *Astron. and Astrophys.* . 2000. Vol. 358. P. 521–534. arXiv:astro-ph/astro-ph/0006104.
- [57] Kruijssen J. M. D., Longmore S. N. An uncertainty principle for star formation - I. Why galactic star formation relations break down below a certain spatial scale // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2014. Vol. 439, no. 4. P. 3239–3252. arXiv:astro-ph.GA/1401.4459.
- [58] de Avillez M. A. Disc-halo interaction - I. Three-dimensional evolution of the Galactic disc // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2000. Vol. 315, no. 3. P. 479–497. arXiv:astro-ph/astro-ph/0001315.
- [59] Walch S., Girichidis P., Naab T. et al. The SILCC (SIMulating the LifeCycle of molecular Clouds) project - I. Chemical evolution of the supernova-driven ISM // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2015. Vol. 454, no. 1. P. 238–268. arXiv:astro-ph.GA/1412.2749.
- [60] Li M., Bryan G. L., Ostriker J. P. Quantifying Supernovae-driven Multiphase Galactic Outflows // *Astrophys. J.* . 2017. Vol. 841, no. 2. P. 101. arXiv:astro-ph.GA/1610.08971.