

На правах рукописи

Дедиков Святослав Юрьевич

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

Специальность 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

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

Научный руководитель:

Васильев Евгений Олегович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник АКЦ ФИАН

Официальные оппоненты:

Зинченко Игорь Иванович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

Гусев Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела внегалактической астрономии Государственного Астрономического Института имени П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Ведущая организация:

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН

Защита состоится «XX» XX 2025 г. в XX часов XX минут на заседании Диссертационного совета Д 24.1.262.02 Физического института им. П.Н. Лебедева по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, подъезд А2, 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, д. 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <https://www.lebedev.ru/> и <http://www.asc-lebedev.ru/> в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан «XX» XX 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 24.1.262.02, к. ф.-м. н.

Н. Н. Шахворостова

Актуальность работы

Проблема несоответствия производства и разрушения пыли в межзвездной среде остается нерешенной и достаточно острой [1, 2, 3, 4]. За последние тридцать лет сделан ряд оценок темпов образования и разрушения межзвездной пыли в галактиках, и все они демонстрируют существенное расхождение между темпами образования и разрушения пыли (недавние оценки обсуждаются в работах [2, 3, 4]). Суммарный темп образования пыли в Галактике в планетарных туманностях, атмосферах красных гигантов и сверхгигантов, в ветрах углеродных звезд и выбросах сверхновых II типа оценивается как $\dot{M}_d^+ \sim 0,005 M_\odot/\text{год}$, при этом предполагается образование $\sim 0,1 M_\odot$ пыли на одну сверхновую [1]. Рост частиц пыли посредством коагуляции в межзвездной среде также считается эффективным механизмом для плотных облаков. Однако недавние исследования продемонстрировали, что этот механизм довольно чувствителен к условиям окружающей среды и не может быть надежным источником пополнения пыли [5, 6, 7]

Обычно считается, что частицы пыли эффективно разрушаются за фронтами сильных ударных волн со скоростями $v_s \geq 150$ км/с и в горячем газе с температурой $T \gtrsim 10^6$ К вследствие теплового и инерционного (кинетического) испарения [8, 9, 10], при взаимных столкновениях частиц пыли в среде с меньшей температурой [11, 12, 13]. Характерное время жизни частицы пыли в межзвездной среде Галактики из-за испарения оценивается от $t_{sp} \lesssim 3 \times 10^8$ лет [14, 15] до $t_{sp} \lesssim 3 \times 10^9$ лет [16, 17], что приводит к темпу разрушения пыли $\dot{M}_d^- \lesssim (0,1 - 0,01) M_\odot/\text{год}$.

Некоторые механизмы могут уменьшить это расхождение, например, возможное разделение пыли и газа [18, 19, 20], рост частиц пыли в межзвездной среде [21, 22, 23, 24, 1, 25, 26, 27, 28] и образование пыли в условиях сверхзвуковой турбулентности [18, 19, 29, 30, 31, 32, 33]. Однако, такая значительная разница между $\dot{M}_d^+$ и $\dot{M}_d^-$ требует рассмотрения любых возможностей для снижения эффективности разрушения межзвездной пыли за фронтами ударных волн.

Вместе с тем, до сих пор оценки темпов разрушения пыли основывались на исследовании динамики сильных ударных волн остатков сверхновых в однородной среде. Важно рассмотреть вопрос о

разрушении межзвездной пыли в более реалистичных условиях – при расширении остатка сверхновой в неоднородной (облачной) среде.

Цель работы – исследование динамики и разрушения межзвездной пыли за фронтами ударных волн в облачной среде, влияния неоднородностей окружающей среды на эффективность разрушения межзвездной пыли ударными волнами в остатках сверхновых, поиск наблюдательных проявлений, характерных для этих процессов.

- Изучение эффективности разрушения межзвездной пыли в остатке сверхновой в зависимости от степени неоднородности среды, в которой расширяется остаток.
- Исследование тепловой эволюции остатка сверхновой, расширяющегося в неоднородной среде.
- Исследование эмиссии остатка сверхновой в инфракрасном диапазоне с учетом разрушения нагретой пыли и определение наблюдательных проявлений свойств неоднородностей в среде, в которой расширяется остаток.
- Исследование влияния особенностей расширения остатка сверхновой в неоднородной среде на соотношение между инфракрасной и рентгеновской светимостью.
- Определение условий разрушения пыли и ее выноса из облаков при распространении ударных волн в облачной среде.

Научная новизна работы

1. Впервые определено влияние неоднородностей межзвездной среды, в которой расширяется остаток сверхновой, на эффективность разрушения пыли.
2. Показано, что распределение пыли по тепловым фазам газа внутри остатка сверхновой зависит от степени неоднородности среды, в которой он расширяется.

3. Показано, что неоднородность среды, в которой расширяется остаток сверхновой, существенно влияет на эмиссию остатка в инфракрасном диапазоне.
4. Впервые показана зависимость отношения светимостей остатка сверхновой в инфракрасном и рентгеновском диапазонах (IRX) от прицельного параметра (расстояния между лучом зрения и направлением на центр остатка), степени неоднородности среды, возраста остатка.
5. Найдено, что при взаимодействии радиационно охлаждающихся облаков с ударными волнами пылевые частицы сохраняются и переносятся с веществом облака. При разрушении слабо охлаждающихся (адиабатических) облаков крупные пылевые частицы эффективно покидают родительское облако, мелкие частицы остаются связанными с веществом разрушенного облака.

Научная и практическая значимость работы

1. Полученные оценки эффективности разрушения межзвездной пыли в остатках сверхновых в зависимости от степени неоднородности среды могут быть использованы для уточнения темпа разрушения пыли в галактиках.
2. Проведенные расчеты эмиссии остатка сверхновой в неоднородных средах могут быть использованы для интерпретации и планирования наблюдений в дальнем инфракрасном, рентгеновском диапазонах с помощью существующих и проектируемых телескопов, например, «Миллиметрон», «Спектр-РГ» и др.
3. Полученные оценки условий сохранения пыли внутри межзвездных и межгалактических облаков при взаимодействии с ударными волнами, условий сегрегации пыли по размерам, ее переноса из облаков в межоблачную среду могут быть использованы для уточнения содержания пыли в межзвездной и межгалактической средах.

Методология и методы исследования

Результаты, изложенные в тексте диссертации, получены с использованием методов численного моделирования трехмерной многокомпонентной динамики газа и полидисперсной пыли. Для газодинамических расчетов применяется конечно-объемная схема с использованием приближенного метода годуновского типа, хорошо зарекомендовавшая себя в различных астрофизических расчетах [34, 35]. Для описания динамики пыли используется метод «суперчастиц» [?], также реализованный в широко применяемых астрофизических пакетах PLUTO [36] и RAMSES [37]. Эмиссия остатка сверхновой в линиях тяжелых элементов получена на основе самосогласованных расчетов ионизационных состояний элементов и теплового состояния газа по методике [38]. Суммарные скорости охлаждения и нагрева рассчитаны с использованием пакета CLOUDY [39].

Достоверность полученных результатов

Достоверность подтверждается использованием хорошо разработанных численных методов, сравнением тестовых расчетов с известными аналитическими и численными результатами. Достаточность выбранного пространственного разрешения вычислительной сетки в газодинамических расчетах проверена тестами. Достоверность обоснована апробацией основных результатов на научных конференциях и публикацией в российских и международных рецензируемых журналах.

Положения, выносимые на защиту

Все результаты, выносимые на защиту, являются новыми.

1. Разрушение межзвездной пыли, нагретой оболочкой сверхновой, оказывается менее эффективным при ее расширении в более неоднородной (облачной) среде. После нескольких характерных времен охлаждения газа доля разрушенной пыли достигает предельного значения и слабо зависит от средней плотности газа при заданном уровне вариаций плотности.
2. Светимость остатка сверхновой в инфракрасных линиях низкоионизованных металлов [O III] 88 мкм, [C II] 158 мкм, [N II]

205 мкм 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.

3. Отношение светимостей в инфракрасном и рентгеновском диапазонах IRX значительно ($\sim 3\text{--}30$ 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.
4. 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 ускоряемого ударной волной облака и покидают его.

Публикации

Основное содержание диссертации изложено в пяти научных статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки:

- A1. Dedikov, S.Yu. Inhibited destruction of dust by supernova in a clumpy medium / S.Yu. Dedikov, E.O. Vasiliev // *New Astronomy*. – 2025. – V.114. – id.102293.
- A2. Дроздов, С.А. Эмиссия в дальнем инфракрасном диапазоне от позднего остатка сверхновой в неоднородной среде / С.А. Дроздов, С.Ю. Дедиков, Е.О. Васильев // *Астрофизический бюллетень*. – 2025. – том 80. – № 1. – С.23–38.
Drozdov, S.A. Far-Infrared Emission from a Late Supernova Remnant in an Inhomogeneous Medium / S.A. Drozdov, S.Yu. Dedikov, E.O. Vasiliev // *Astrophysical Bulletin*. – 2025. – Vol. 80. – No. 1. – pp. 22–37.

А3. Дедиков С.Ю. Инфракрасное и рентгеновское излучение остатка сверхновой в неоднородной среде / С.Ю. Дедиков, Е.О. Васильев // *Астрономический журнал*. – 2025. – том 102. – № 3. – С.159–169.

Dedikov, S.Yu. Infrared and X-ray Emission of Supernova Remnant in a Clumpy Medium / S.Yu. Dedikov, E.O. Vasiliev // *Astronomy Reports*. – 2025. – V.69. – Issue1. – pp. 1-13.

А4. Dedikov, S. Tracking Dusty Cloud Crushed by a Hot Flow / S. Dedikov, E. Vasiliev // *Universe*. – 2024. – V.10. – no.4:155.

А5. Дедиков С.Ю. Динамика газа и пыли при взаимодействии диффузных облаков с ударной волной / С.Ю. Дедиков, Е.О. Васильев // *Краткие сообщения по физике*. – 2024. – № 12. – С.3–12.

Dedikov, S.Yu. Dynamics of Gas and Dust during Interaction of Diffuse Clouds with a Shock Wave / S.Yu. Dedikov, E.O. Vasiliev // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. – 2024. – Vol. 51. – No.12. – pp. 493–499.

Общий объем опубликованных работ по теме диссертации составляет 62 страницы.

Апробация работы

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на следующих 5 российских и 2 международных конференциях:

- всероссийская конференция «Ультрафиолетовая Вселенная – 2023» (Москва, 2023),
- всероссийская конференция «Звездообразование и планетообразование» (Москва, 2023, 2024),
- всероссийская астрономическая конференция ВАК-2024 «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр» (Нижний Архыз 2024),
- всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2023),

- международная конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2024),
- 3-я международная конференция «Субмиллиметровая и миллиметровая астрономия: цели и инструменты» (Москва, 2025)

Личный вклад

Численные трехмерные многокомпонентные расчеты динамики газа и пыли выполнены лично автором диссертации. Пакет программ для обработки результатов этих расчетов создан автором. Диссертант активно участвовал в постановке задач, анализе и обсуждении результатов, самостоятельно выполнил обработку данных, полученных в численных расчетах. Диссертант внес определяющий вклад в написание текста статей [A1, A3–A5], в работе [A2] участие было равным с другими соавторами.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 117 страниц, включая 32 рисунка и 2 таблицы. Список литературы содержит 168 наименований.

Содержание работы

Во введении кратко приводятся современные представления о процессах образования и разрушения космической пыли в галактиках, обосновывается актуальность исследования механизмов разрушения пыли, формулируется цель и задачи работы, дается общая характеристика диссертации.

Первая глава посвящена численному трехмерному многокомпонентному моделированию эволюции остатка сверхновой, расширяющегося в облачной среде с разной степенью неоднородности. Рассмотрены модели динамики остатка сверхновой на временах до нескольких времен охлаждения газа в оболочке, расширяющегося в межзвездной среде с полидисперсной и монодисперсной пылью с различным распределением плотности газа – как однородным, так и неоднородным с логнормальным распределением амплитуды плотности. В исследуемых моделях дисперсия логарифма плотности σ варьируется от 0,2 до 3,0, так что контраст плотности достигает 300 для наибольшего значения σ . Пространственные размеры

неоднородностей имеют степенной спектр Колмогорова, в рассмотренных моделях максимальный размер неоднородностей задан в диапазоне от 25 до 5 пк, что соответствует типичным размерам молекулярных облаков в Галактике.

Результаты численного моделирования показали зависимость эффективности разрушения межзвездной пыли в остатке сверхновой от степени неоднородности среды, в которой расширяется остаток. Разрушение межзвездной пыли, нагретой расширяющейся оболочкой сверхновой, оказывается менее эффективным при эволюции в более облачной среде: до 2-х раз больше пыли выживает при значительных амплитудах флуктуаций плотности. Изменение средней плотности газа в среде, в которой расширяется остаток, слабо влияет на значение доли сохранившейся пыли на временах больше нескольких характерных времен охлаждения. Обнаруженный эффект практически не зависит от изменения максимального пространственного масштаба неоднородностей в диапазоне от 5 до 25 пк.

Во второй главе исследованы тепловая эволюция газа и пыли в остатке сверхновой для моделей, рассмотренных в первой главе, и эмиссионные характеристики этого остатка в инфракрасном диапазоне. При расширении остатка в неоднородной среде найдены особенности распределения газа и пыли по тепловым фазам, что должно влиять на инфракрасную эмиссию остатка.

Найдено, что при эволюции остатка сверхновой в однородной среде пыль эффективно разрушается в горячем газе ($T > 10^6$ К) или переходит в более холодные фазы на временах нескольких характерных времен охлаждения (для $\langle n \rangle \sim 1 \text{ см}^{-3}$ $t \sim 100$ тыс. лет), поэтому в горячей фазе пыли практически не остается. В неоднородной среде в горячей фазе присутствует небольшая доля крупных пылинок за счет продолжающегося поступления из более холодных и плотных фрагментов разрушенных облаков.

Получено, что светимость остатка сверхновой в инфракрасных линиях ионов [O III] 88 мкм, [C II] 158 мкм, [N II] 205 мкм увеличивается при его расширении в более неоднородной среде и превышает светимость пыли в континууме под линией в $\sim 10 - 300$ и более раз.

В третьей главе изучено отношение светимостей в инфракрасном и рентгеновском диапазонах IRX для остатка сверхновой, расширяющегося в неоднородной среде, для моделей эволюции, рас-

смотренных в первой главе. Исследовано влияние охлаждения горячего газа пылью на динамику остатка сверхновой. Прослежена эволюция пространственного распределения поверхностных яркостей рентгеновского излучения от горячего газа внутри остатка сверхновой и инфракрасной эмиссии от нагретой оболочки, средней температуры горячего газа T_X . Выполнено сравнение с наблюдениями некоторых остатков сверхновых в Галактике и Большом Магеллановом Облаке.

Найдено, что величина IRX значительно (~ 3 – 30 раз) изменяется в остатке сверхновой в зависимости от его возраста и прицельного параметра (расстояния от места взрыва). Эволюция области значений для остатка сверхновой на диаграмме T_X – IRX определяется степенью неоднородности среды: для более облачной среды значение IRX в среднем выше (на временах более 20 тыс. лет) и медленнее спадает с возрастом остатка. В сильно неоднородной среде высокие значения IRX поддерживаются благодаря менее эффективному разрушению пыли и более значительному падению рентгеновской эмиссии. В газе с меньшими значениями металличности (относительно солнечной) сохраняются высокие значения температуры и IRX .

В четвертой главе исследовано взаимодействие диффузных облаков, содержащих пыль, с ударной волной. В рамках трехмерной многокомпонентной численной модели рассмотрены прохождение ударной волны по облаку и дальнейшая эволюция вещества облака, включая пыль, с учетом процессов охлаждения за фронтом ударной волны.

Обнаружено, что динамика пыли при взаимодействии облака с ударной волной существенно зависит от соотношения времен охлаждения и разрушения облака. В процессе разрушения небольших облаков, эволюционирующих адиабатически, происходит сегрегация пылевых частиц, принадлежащих облаку: крупные частицы пыли остаются далеко позади газовых фрагментов облака, мелкие частицы остаются связанными с веществом разрушенного облака. В радиационно охлаждающихся облаках пыль вне зависимости от ее размера сохраняется в плотных холодных фрагментах облака. Эффективность выживания пыли при взаимодействии ударных волн с межзвездными облаками определяется соотношениями времен охлаждения газа, разрушения облака и ускорения частиц.

В Заключении сформулированы результаты диссертации.

В Приложениях приведены результаты исследования зависимости выводов, полученных в главе 1, от пространственного разрешения вычислительной сетки, и описан метод расчета светимости остатка сверхновой в линиях ионов, используемый в главе 2.

Список литературы

1. Draine B. T. [Interstellar Dust Models and Evolutionary Implications](#) // Cosmic Dust - Near and Far / Ed. by T. Henning, E. Grün, J. Steinacker. Vol. 414 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2009. — . P. 453. [arXiv:astro-ph.GA/0903.1658](#).
2. Mattsson L. The Minimal Astration Hypothesis-a Necessity for Solving the Dust Budget Crisis? // [Research Notes of the American Astronomical Society](#). 2021. — . Vol. 5, no. 12. P. 288. [arXiv:astro-ph.GA/2112.07735](#).
3. Kirchsclager F., Mattsson L., Gent F. A. Supernova induced processing of interstellar dust: impact of interstellar medium gas density and gas turbulence // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2022. — . Vol. 509, no. 3. P. 3218–3234. [arXiv:astro-ph.GA/2109.01175](#).
4. Péroux C., De Cia A., Howk J. C. Observed dust surface density across cosmic times // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2023. — . Vol. 522, no. 4. P. 4852–4861.
5. Ferrara A., Viti S., Ceccarelli C. The problematic growth of dust in high-redshift galaxies // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2016. — . Vol. 463, no. 1. P. L112–L116. [arXiv:astro-ph.GA/1606.07214](#).
6. Ceccarelli C., Viti S., Balucani N., Taquet V. The evolution of grain mantles and silicate dust growth at high redshift // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2018. — . Vol. 476, no. 1. P. 1371–1383. [arXiv:astro-ph.GA/1802.01142](#).
7. Priestley F. D., De Looze I., Barlow M. J. The efficiency of grain growth in the diffuse interstellar medium // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2021. — . Vol. 502, no. 2. P. 2438–2445. [arXiv:astro-ph.GA/2101.04710](#).
8. Barlow M. J. The destruction and growth of dust grains in interstellar space - I. Destruction by sputtering. // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 1978. — . Vol. 183. P. 367–395.
9. Draine B. T., Salpeter E. E. On the physics of dust grains in hot gas. // [Astrophys. J.](#) 1979. — . Vol. 231. P. 77–94.
10. Draine B. T., Salpeter E. E. Destruction mechanisms for interstellar dust. // [Astrophys. J.](#) 1979. — . Vol. 231. P. 438–455.
11. Borkowski K. J., Dwek E. The Fragmentation and Vaporization of Dust in Grain-Grain Collisions // [Astrophys. J.](#) 1995. — . Vol. 454. P. 254.

12. Jones A. P., Tielens A. G. G. M., Hollenbach D. J. Grain Shattering in Shocks: The Interstellar Grain Size Distribution // [Astrophys. J.](#) 1996. — . Vol. 469. P. 740.
13. Bocchio M., Marassi S., Schneider R. et al. Dust grains from the heart of supernovae // [Astron. and Astrophys.](#) 2016. — . Vol. 587. P. A157.
14. McKee C. Dust Destruction in the Interstellar Medium // *Interstellar Dust* / Ed. by L. J. Allamandola, A. G. G. M. Tielens. Vol. 135. 1989. — . P. 431.
15. Jones A. P., Tielens A. G. G. M., Hollenbach D. J., McKee C. F. Grain Destruction in Shocks in the Interstellar Medium // [Astrophys. J.](#) 1994. — . Vol. 433. P. 797.
16. Jones A. P., Tielens A. G. G. M. The formation of small grains in shocks in the ISM // *The Diffuse Interstellar Bands* / Ed. by A. G. G. M. Tielens. 1994. — . P. 79–83.
17. Slavin J. D., Dwek E., Jones A. P. Destruction of Interstellar Dust in Evolving Supernova Remnant Shock Waves // [Astrophys. J.](#) 2015. — . Vol. 803, no. 1. P. 7. [arXiv:astro-ph.GA/1502.00929](#).
18. Hopkins P. F., Lee H. The fundamentally different dynamics of dust and gas in molecular clouds // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2016. — . Vol. 456, no. 4. P. 4174–4190. [arXiv:astro-ph.GA/1510.02477](#).
19. Mattsson L., Bhatnagar A., Gent F. A., Villarroel B. Clustering and dynamic decoupling of dust grains in turbulent molecular clouds // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2019. — . Vol. 483, no. 4. P. 5623–5641. [arXiv:astro-ph.GA/1811.01082](#).
20. Mattsson L., Hedvall R. Acceleration and clustering of cosmic dust in a gravoturbulent gas I. Numerical simulation of the nearly Jeans-unstable case // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2022. — . Vol. 509, no. 3. P. 3660–3676. [arXiv:astro-ph.GA/2111.01289](#).
21. Draine B. T. Evolution of interstellar dust. // *The Evolution of the Interstellar Medium* / Ed. by L. Blitz. Vol. 12 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 1990. — . P. 193–205.
22. Chokshi A., Tielens A. G. G. M., Hollenbach D. Dust Coagulation // [Astrophys. J.](#) 1993. — . Vol. 407. P. 806.
23. Dwek E. The Evolution of the Elemental Abundances in the Gas and Dust Phases of the Galaxy // [Astrophys. J.](#) 1998. — . Vol. 501. P. 643. [arXiv:astro-ph/9707024](#).

24. Calura F., Pipino A., Matteucci F. The cycle of interstellar dust in galaxies of different morphological types // [Astron. and Astrophys.](#) 2008. — . Vol. 479, no. 3. P. 669–685. [arXiv:astro-ph/0706.2197](#).
25. Mattsson L. Dust in the early Universe: evidence for non-stellar dust production or observational errors? // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — . Vol. 414, no. 1. P. 781–791. [arXiv:astro-ph.CO/1102.0570](#).
26. Inoue A. K. The origin of dust in galaxies revisited: the mechanism determining dust content // [Earth, Planets and Space.](#) 2011. — . Vol. 63, no. 10. P. 1027–1039.
27. Ginolfi M., Graziani L., Schneider R. et al. Where does galactic dust come from? // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2018. — . Vol. 473, no. 4. P. 4538–4543. [arXiv:astro-ph.GA/1707.05328](#).
28. Heck P. R., Greer J., Kööp L. et al. Lifetimes of interstellar dust from cosmic ray exposure ages of presolar silicon carbide // [Proceedings of the National Academy of Science.](#) 2020. — . Vol. 117, no. 4. P. 1884–1889.
29. Mattsson L., De Cia A., Andersen A. C., Petitjean P. Dust-depletion sequences in damped Lyman- α absorbers. II. The composition of cosmic dust, from low-metallicity systems to the Galaxy // [Astron. and Astrophys.](#) 2019. — . Vol. 624. P. A103. [arXiv:astro-ph.GA/1901.04710](#).
30. Mattsson L. Galactic dust evolution with rapid dust formation in the interstellar medium due to hypersonic turbulence // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2020. — . Vol. 491, no. 3. P. 4334–4344. [arXiv:astro-ph.GA/1911.12751](#).
31. Mattsson L. On the grain-sized distribution of turbulent dust growth // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2020. — . Vol. 499, no. 4. P. 6035–6043. [arXiv:astro-ph.GA/2010.01953](#).
32. Li X.-Y., Mattsson L. Dust Growth by Accretion of Molecules in Supersonic Interstellar Turbulence // [Astrophys. J.](#) 2020. — . Vol. 903, no. 2. P. 148. [arXiv:astro-ph.GA/2009.00151](#).
33. Commerçon B., Lebreuilly U., Price D. J. et al. Dynamics of dust grains in turbulent molecular clouds. Conditions for decoupling and limits of different numerical implementations // [Astron. and Astrophys.](#) 2023. — . Vol. 671. P. A128. [arXiv:astro-ph.GA/2301.04946](#).
34. Vasiliev E. O., Nath B. B., Shchekinov Y. Evolution of multiple supernova remnants // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2015. —

- . Vol. 446, no. 2. P. 1703–1715. [arXiv:astro-ph.GA/1401.5070](#).
35. Vasiliev E. O., Shchekinov Y. A., Nath B. B. Evolution of clustered supernovae // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2017. — . Vol. 468, no. 3. P. 2757–2770. [arXiv:astro-ph.GA/1703.07331](#).
 36. Mignone A., Flock M., Vaidya B. A Particle Module for the PLUTO Code. III. Dust // [Astrophys. J. Suppl.](#) 2019. — . Vol. 244, no. 2. P. 38. [arXiv:astro-ph.EP/1908.10793](#).
 37. Moseley E. R., Teyssier R., Draine B. T. Dust dynamics in RAMSES - I. Methods and turbulent acceleration // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2023. — . Vol. 518, no. 2. P. 2825–2844. [arXiv:astro-ph.GA/2204.07681](#).
 38. Vasiliev E. O. Non-equilibrium cooling rate for a collisionally cooled metal-enriched gas // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2013. Vol. 431, no. 1. P. 638–647. [arXiv:astro-ph.CO/1302.0159](#).
 39. Ferland G. J., Korista K. T., Verner D. A. et al. CLOUDY 90: Numerical Simulation of Plasmas and Their Spectra // [PASP](#). 1998. — . Vol. 110, no. 749. P. 761–778.