

Разрушение космической пыли за фронтами ударных волн в неоднородных средах

Дедиков Святослав Юрьевич

АКЦ ФИАН

диссертация на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук
Специальность 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия»

Научный руководитель
д. ф.-м. н.
Васильев Евгений Олегович

Цель работы:

- исследование динамики космической пыли за фронтами ударных волн в неоднородных (облачных) средах,
- исследование влияния неоднородностей окружающей среды на эффективность разрушения межзвездной пыли ударными волнами в остатках сверхновых,
- расчет эмиссионных свойств газа и пыли в этих процессах и анализ наблюдательных проявлений в инфракрасном и рентгеновском диапазонах.

Актуальность

Проблема баланса пыли в межзвездной среде — кризис пыли (*McKee 1989*;
Mattsson 2021; Kirchschrager et al. 2022)

Образование:

- при вспышках СН, ветрах от красных гигантов и сверхгигантов
~0.005 $M_{\odot}/\text{год}$ при скорости звездообразования $5M_{\odot}/\text{год}$ (*Draine 2009*)

Разрушение:

- за фронтами сильных ударных волн: $v > 200$ км/с (например, *Draine & Salpeter 1979*)
тепловое и кинетическое разрушение
~0.1 $M_{\odot}/\text{год}$ (*McKee 1989, Jones et al 1994*)

Отсутствие баланса пыли в **других галактиках**:

- на $z \gtrsim 5$ (*Todini & Ferrara 2001*) производится SNIИ и ими же разрушается
- на $z \sim 1\text{—}5$ избыток пыли в ярких ИК-галактиках (*Michailowski et al 2010, Dunne et al 2011*)
- богатые пылью галактики до $z \sim 10$ (JWST)

Глава 1

Разрушение межзвёздной пыли в остатке сверхновой
в неоднородной среде

Разрушение пыли

разрушение за фронтами сильных УВ ($v > 200$ км/с $\longleftrightarrow T > 10^6$ К)

тепловое и кинетическое испарение

В остатках сверхновых в **однородной** среде (McKee 1989):

$$M v_s^2 \approx E_0 \quad \text{фаза Седова, } v > 200 \text{ км/с}$$

$$M(v_s > 200 \text{ км/с}) \approx \frac{10^{51} \text{ эрг}}{(200 \text{ км/с})^2} \approx 1260 M_\odot$$

Для содержания пыли в газе с солнечной металличностью
масса пыли, разрушенной одной СН: $\sim 10 M_\odot$

В неоднородной среде - ?

Модель

Совместная трехмерная динамика «газ+пыль» (*Vasiliev et al 2015,2017, Vasiliev & Shchekinov 2024*)

газ: 3D TVD MUSCL Hancock + HLLC (например, *Toro 2009*)

пыль: макрочастицы, взаимодействие с газом (*Youdin & Johansen 2007*)

охлаждение газа: неравновесная функция охлаждения
(*Vasiliev 2011*)

разрушение пыли: тепловое и кинетическое испарение
(*Draine & Salpeter 1979, Nozawa et al 2007*)

Модель

Начальные условия:

Распределение вещества

однородное

неоднородное:

логнормальное распределение плотности, дисперсия σ

Колмогоровский спектр (5/3), минимальный масштаб $k_{\min}$

Газ: $\langle n \rangle = 0.3, 1, 3, 10 \text{ см}^{-3}$, металличность $Z = Z_{\odot}$

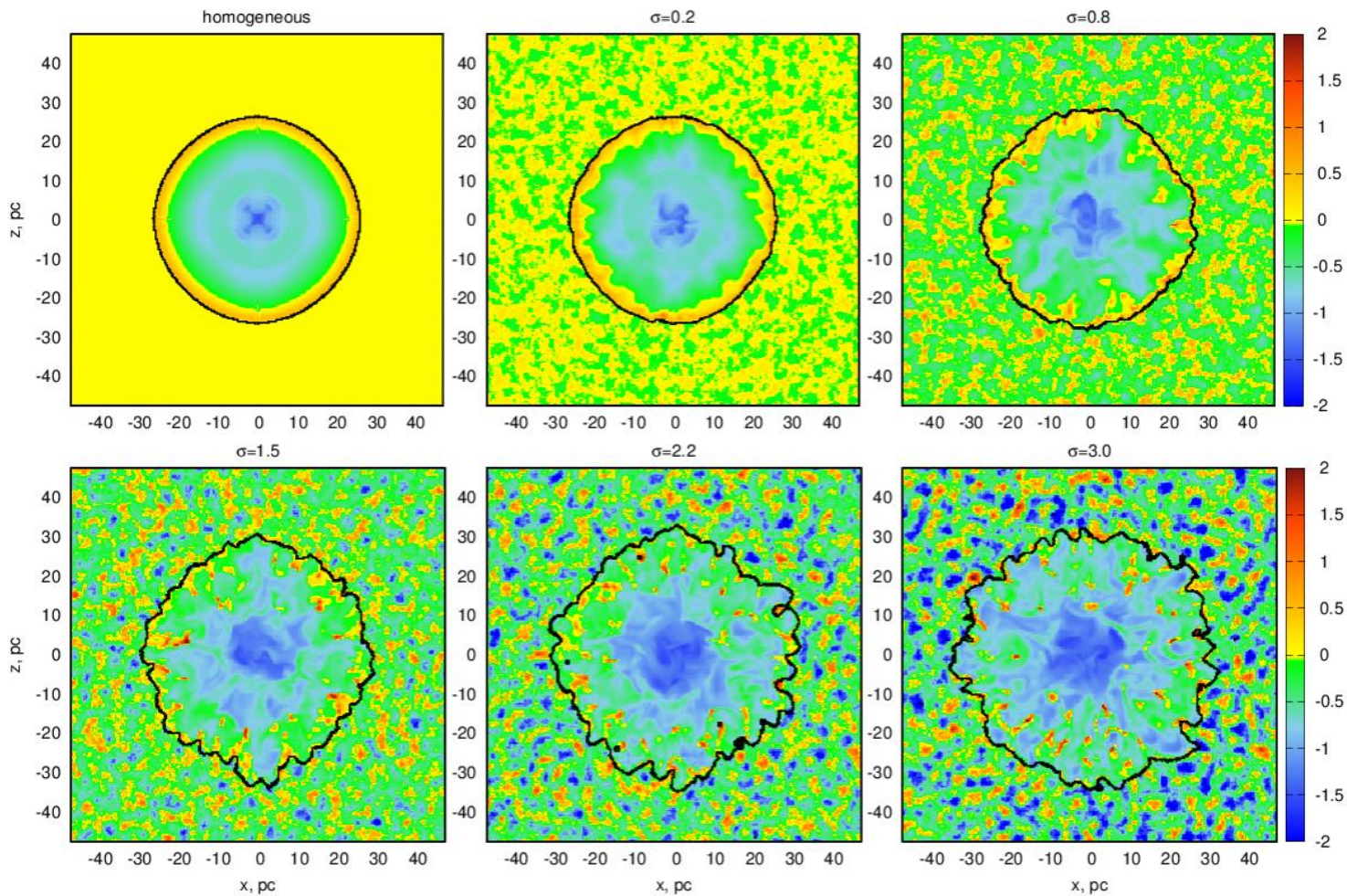
Межзвездная пыль: полидисперсная, 0.003 - 0.3 мкм, 11 размеров
распределение по размерам MRN: $dN/da \sim a^{-3.5}$ (*Mathis et al 1977*)
 $\rho_{\text{dust}} / \rho_{\text{gas}} = 10^{-2}$

СН: энергия 10^{51} эрг, масса $30 M_{\odot}$, масса металлов $10 M_{\odot}$ (*Woosley & Weaver 1995*)

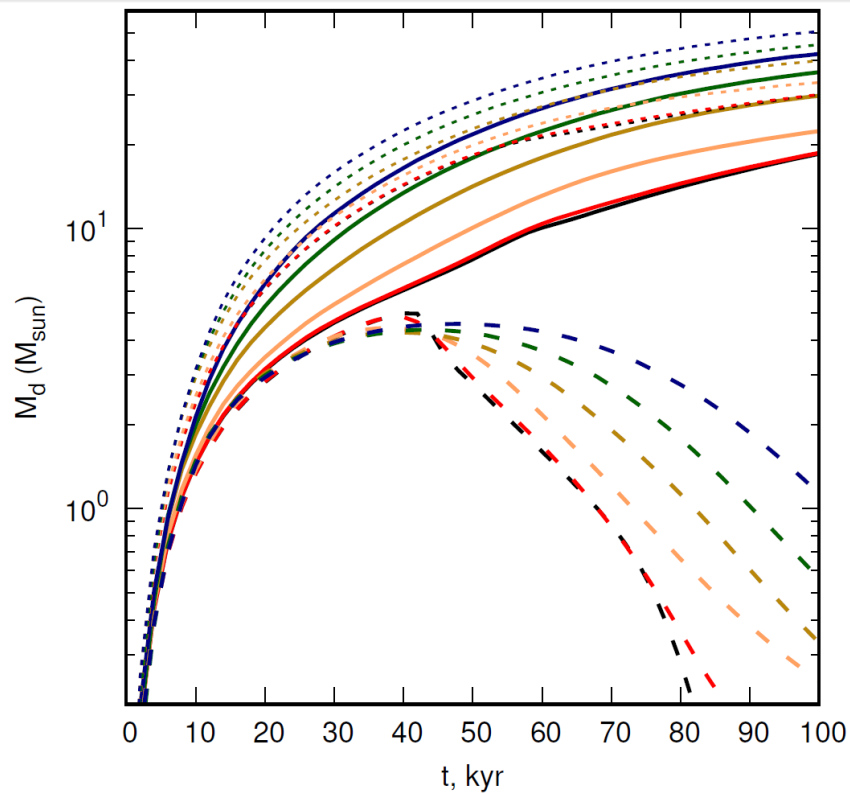
Сетка: $(96 \text{ пк})^3 = (256)^3$ разрешение 0.375 пк

Пылевые макрочастицы: до 200 млн.

2D-распределение плотности газа к возрасту 50 тыс. лет



Масса пыли в остатке



(homog) —
($\sigma=0.2$) —
($\sigma=0.8$) —
($\sigma=1.5$) —
($\sigma=2.2$) —
($\sigma=3.0$) —

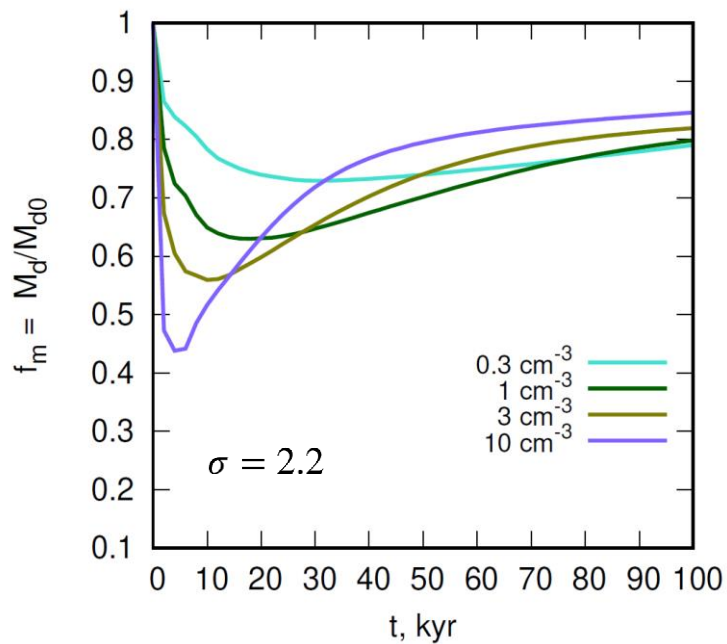
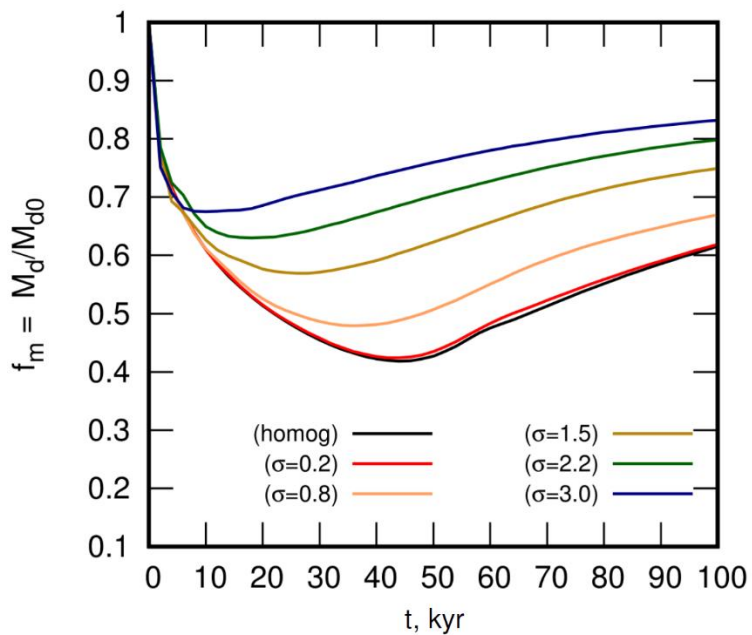
Сплошные — с разрушением

Пунктиром — без разрушения

Штриховые — в газе с $T > 10^6 \text{ K}$

Dedikov & Vasiliev 2025 (NewA)

Доля сохранившейся пыли



Dedikov & Vasiliev 2025 (NewA)

Выводы

(глава 1)

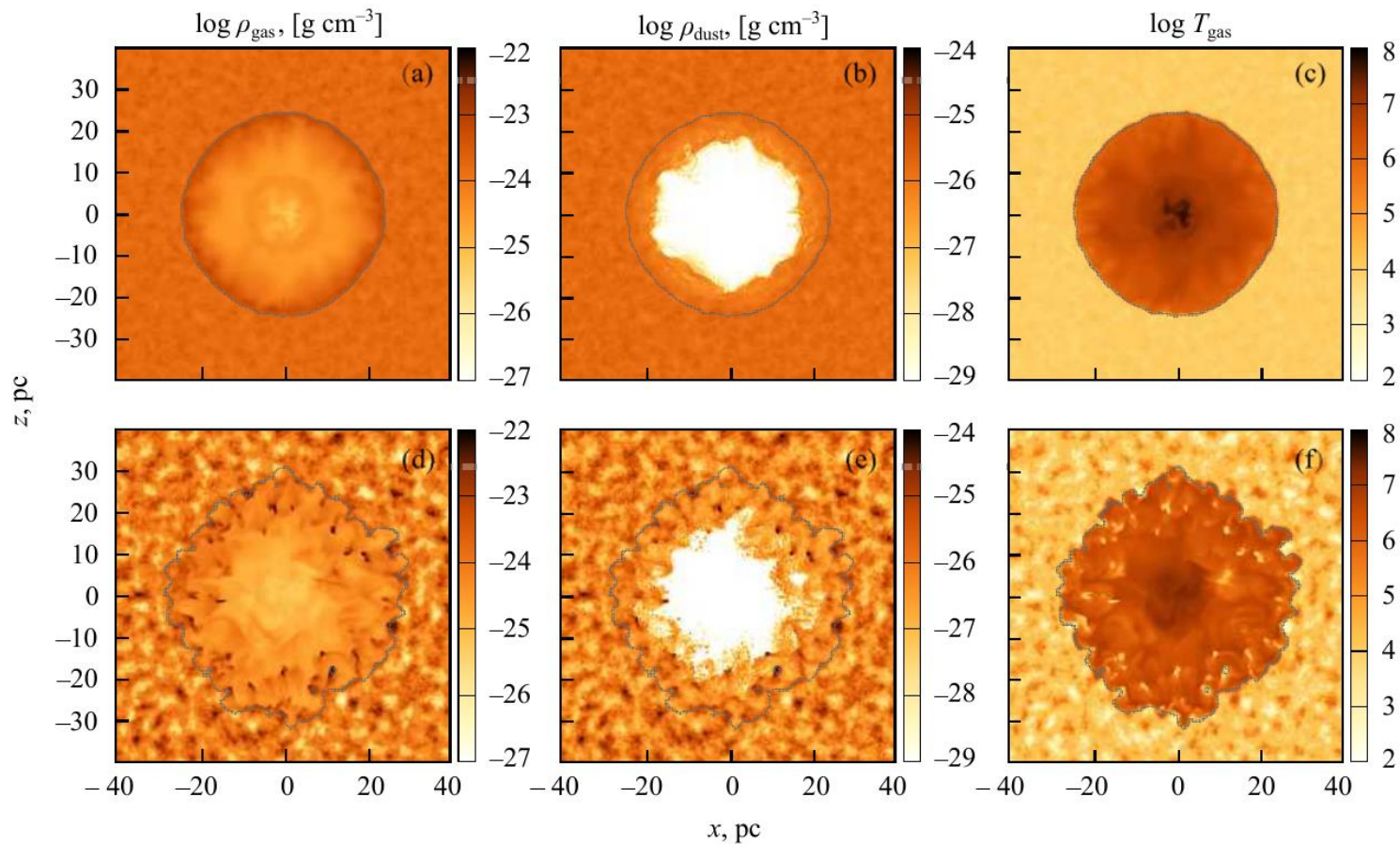
1. Разрушение межзвездной пыли, нагретой расширяющейся оболочкой сверхновой, оказывается менее эффективным при эволюции в неоднородной среде: до 2-х раз больше пыли выживает в более облачной среде.
1. Изменение средней плотности газа слабо влияет на долю сохранившейся пыли на временах больше нескольких характерных времен охлаждения.

S.Yu. Dedikov, E.O. Vasiliev, Inhibited destruction of dust by supernova in a clumpy medium // *New Astronomy*. - 2025. - V.114. - id.102293.

Глава 2

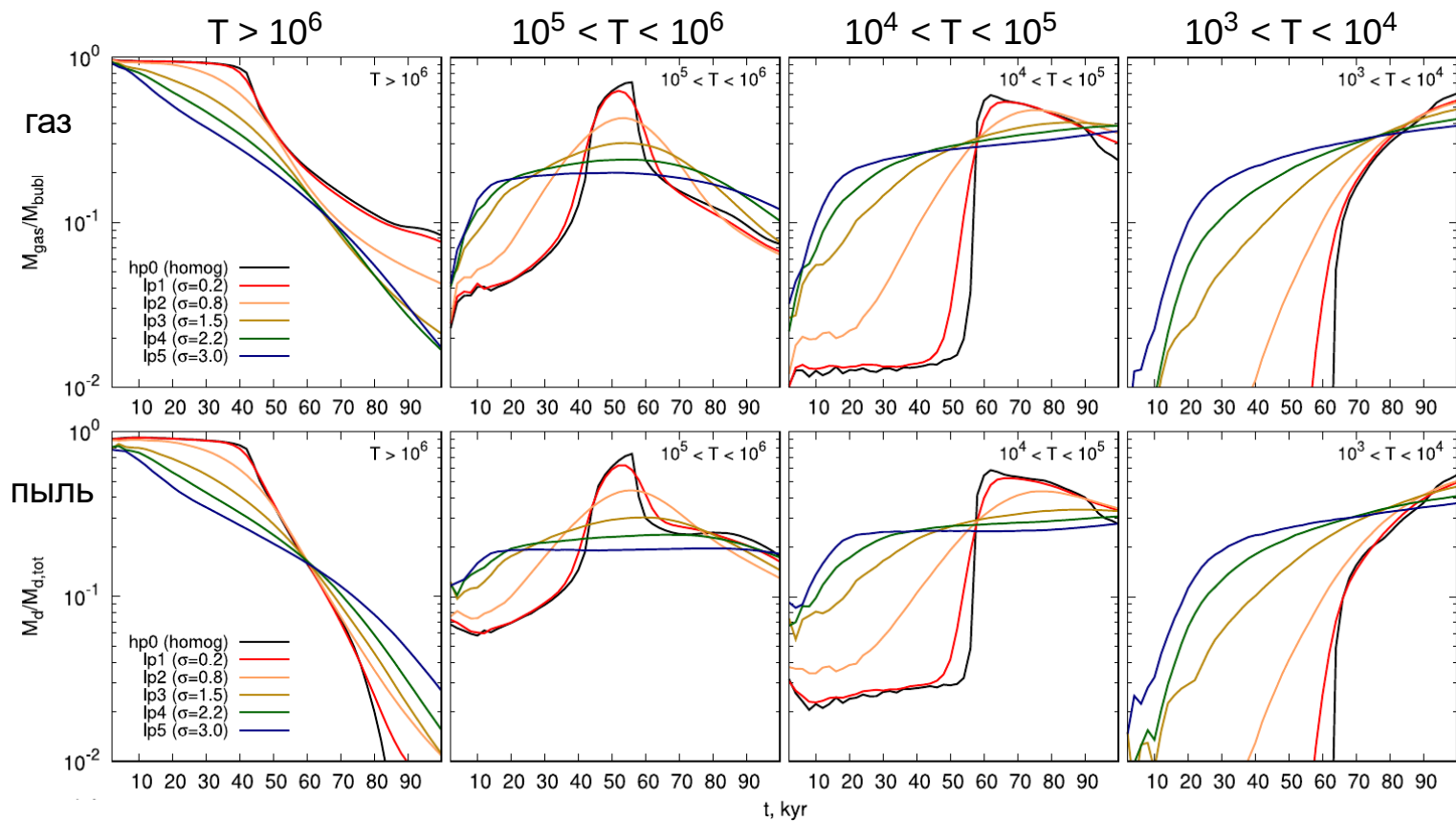
Газ и пыль в различных тепловых фазах и их светимость
в остатке сверхновой

Газ и пыль на момент 50 тыс. лет



Drozдов, Dedikov & Vasiliev 2025 (AstBul)

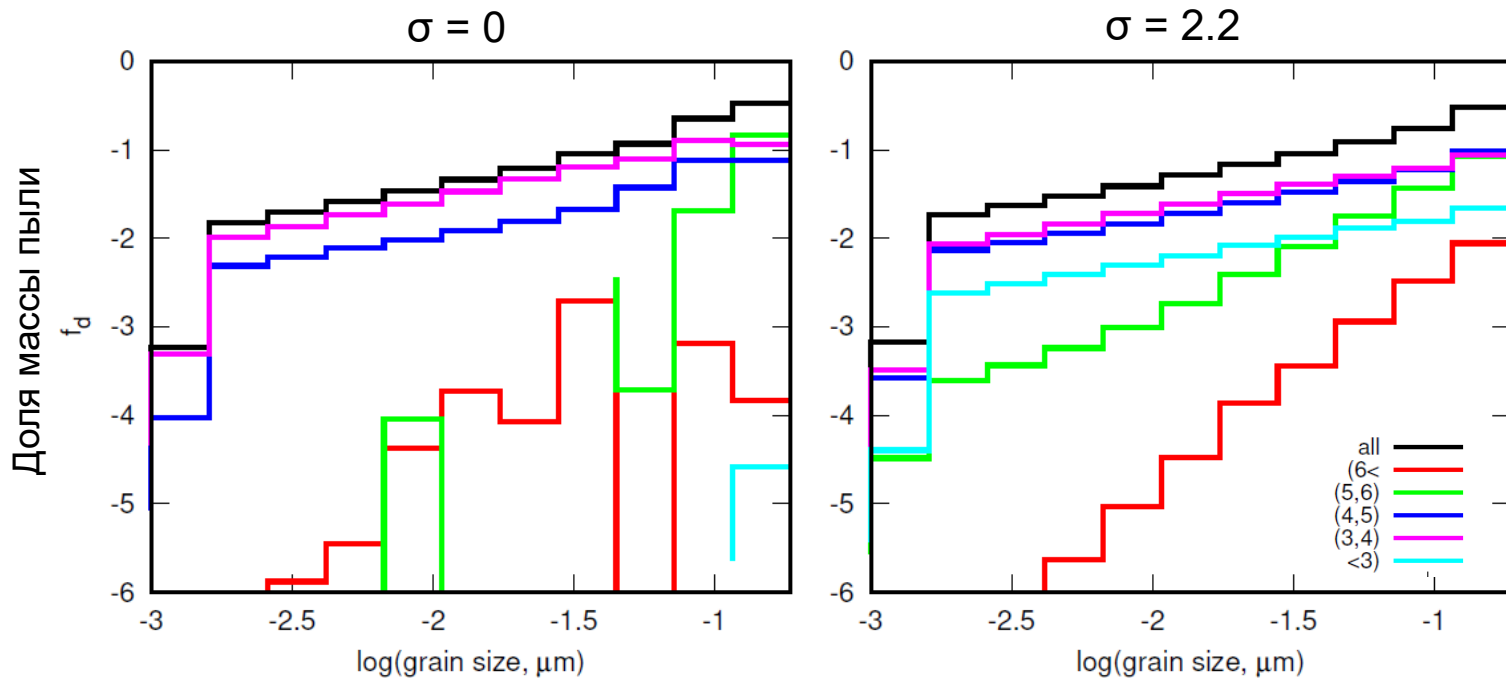
Газ и пыль в тепловых фазах



Dedikov & Vasiliev 2025 (NewA)

Распределение пыли по размерам

100 тыс. лет



Dedikov & Vasiliev 2025 (NewA)

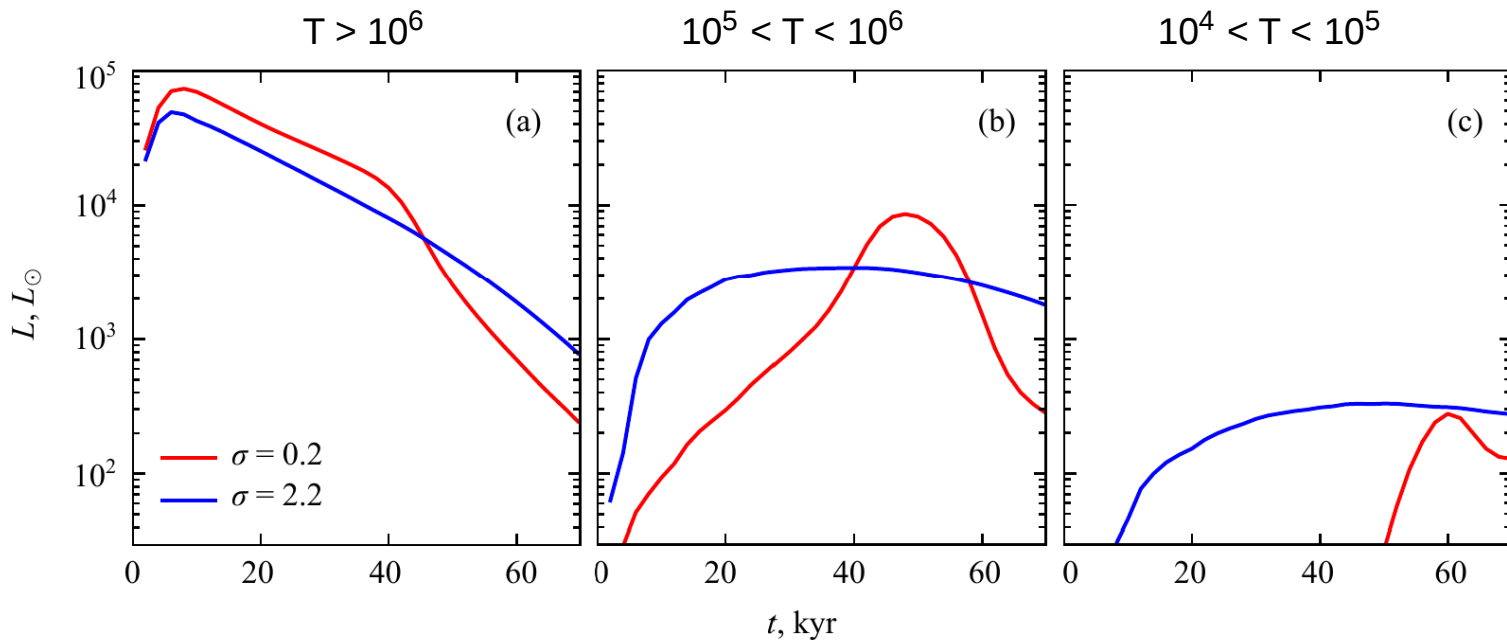
Светимость пыли в тепловых фазах

Методы расчета светимости:

равновесный для крупной пыли (*Dwek & Arendt 1992*)

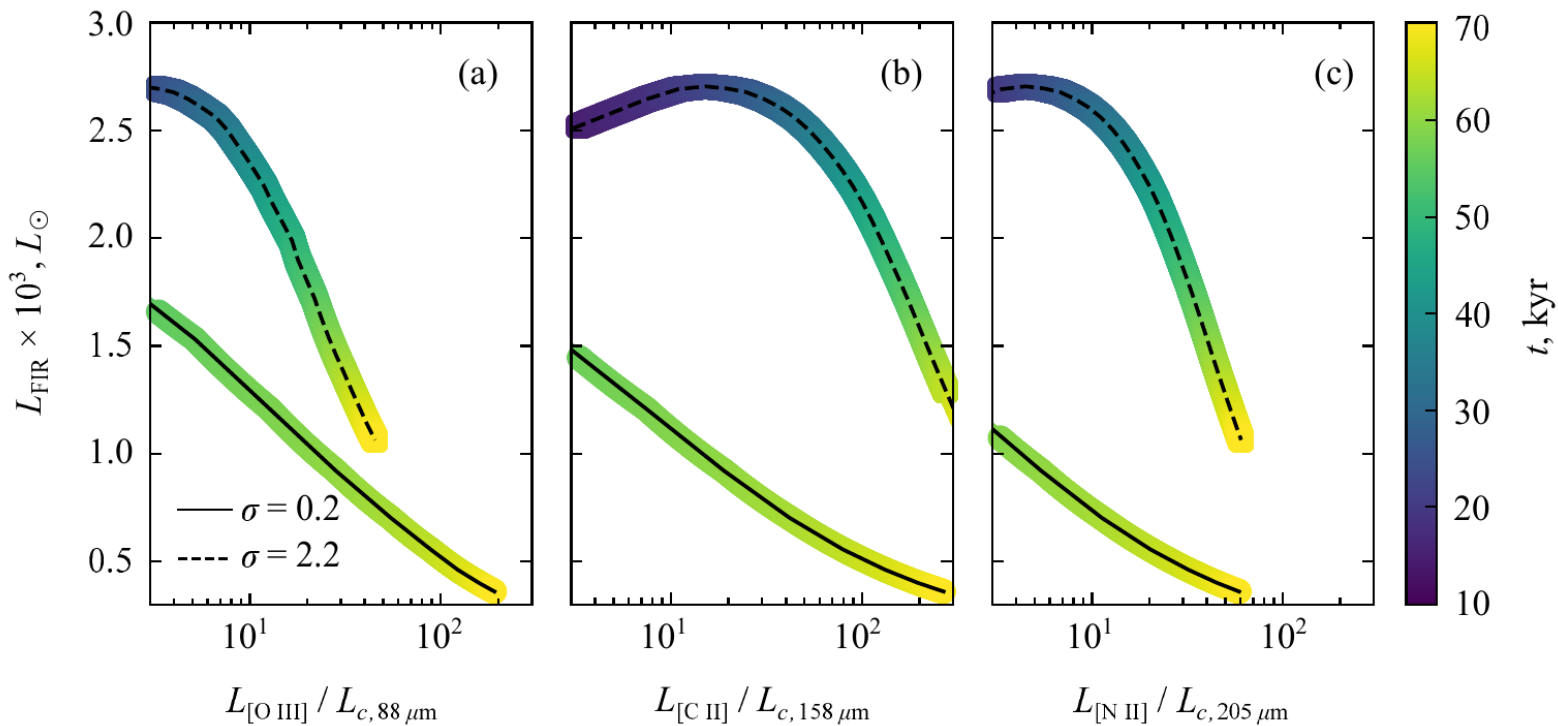
стохастический для мелких частиц (*Draine & Anderson 1985, Drozdov 2021*)

диапазон 1–1000 мкм



Drozdov, Dedikov & Vasiliev 2025 (AstBul)

Соотношение светимостей в линиях металлов и пыли в дальнем ИК диапазоне



Drozdov, Dedikov & Vasiliev 2025 (AstBul)

L_{c} - светимость пыли под линией в полосе шириной 8 ГГц

Выводы

(глава 2)

1. При эволюции остатка сверхновой в однородной среде пыль эффективно разрушается в горячем газе 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.
1. В неоднородной среде в горячей фазе присутствует небольшая доля крупных пылинок за счет продолжающегося поступления из более холодных и плотных фрагментов разрушенных облаков.
1. Светимость остатка сверхновой в инфракрасных линиях низкоионизованных тяжелых элементов [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 $\sim 10\text{--}300$ раз.

S.Yu. Dedikov, E.O. Vasiliev, Inhibited destruction of dust by supernova in a clumpy medium // *New Astronomy*. - 2025. - V.114. - id.102293.

S.A. Drozdov, **S.Yu. Dedikov**, E.O. Vasiliev, Far-Infrared Emission from a Late Supernova Remnant in an Inhomogeneous Medium // *Astrophysical Bulletin* - 2025 - Vol. 80 - No. 1 - pp. 22–37

Глава 3

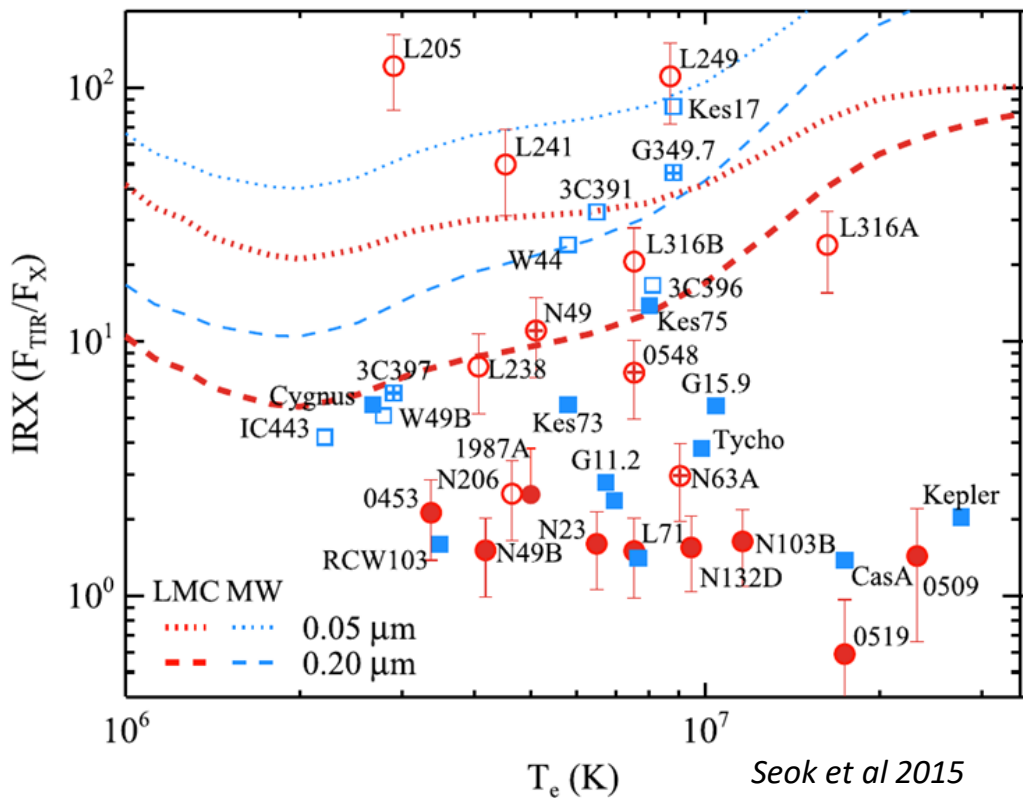
Инфракрасное и рентгеновское излучение остатка
сверхновой в неоднородной среде

Охлаждение на пыли

Spitzer 1968, Ostriker & Silk 1973 ...

соотношение между излучением пыли и газа в горячей плазме (*Dwek 1987*):

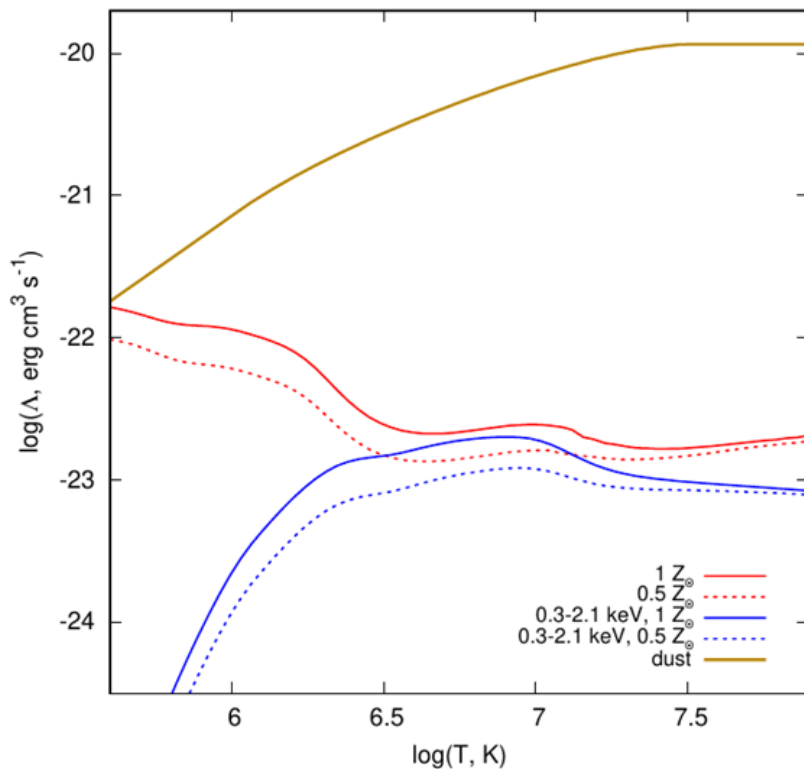
$$\gamma(T) = \Lambda_d(T)/\Lambda(T) \text{ — InfraRed / X-ray ratio} = \text{IRX}$$



Охлаждение на пыли

Dedikov & Vasiliev 2025 (ARep)

Функция охлаждения



Расчет светимостей, поверхностных яркостей остатка в ИК и рентгеновском диапазонах

3D самосогласованная эволюция газа и пыли в остатке SN

$$\frac{\partial E_{gas}}{\partial t} + \dots = \dots - L_{d,IR}$$

в уравнение для энергии добавляем охлаждение на пыли

$$L_{d,IR}(a, T_{eq}) = H_{coll}(a, T_g, n_e) n_d(a)$$

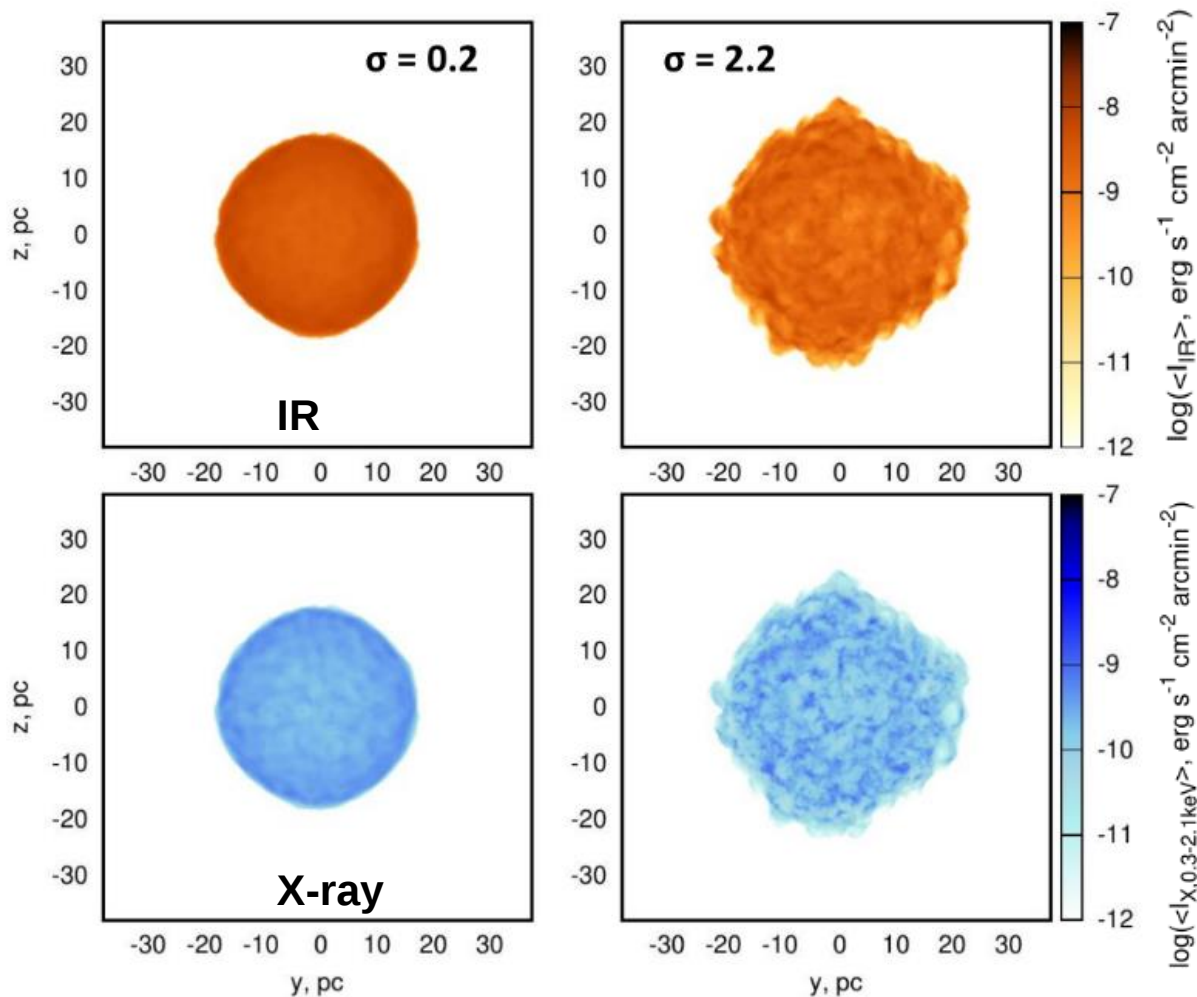
равновесное охлаждение

$$H(a, T_g, n_e) =$$

столкновительный нагрев

$$= 5.38 \times 10^{-18} n_e a_{\mu m} T_g^{3/2} h(a, T_g)$$

(Dwek & Arendt 1992)



Эмиссия остатка

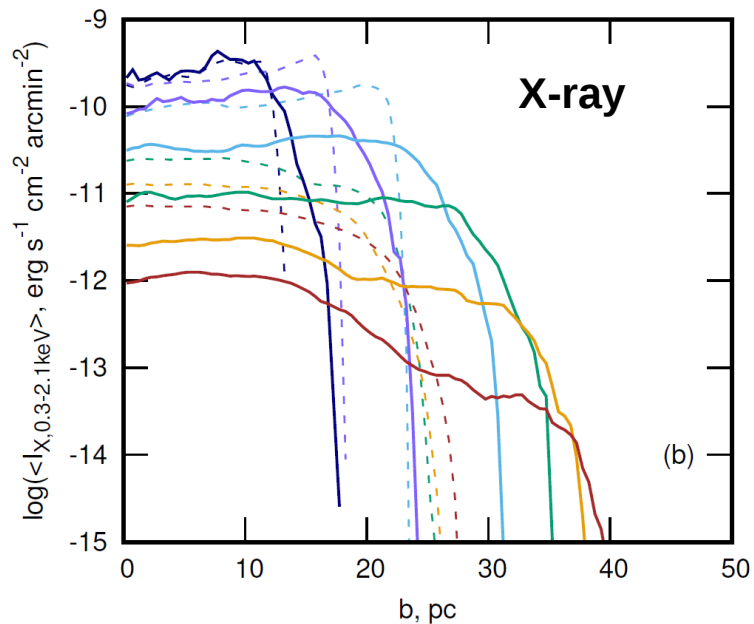
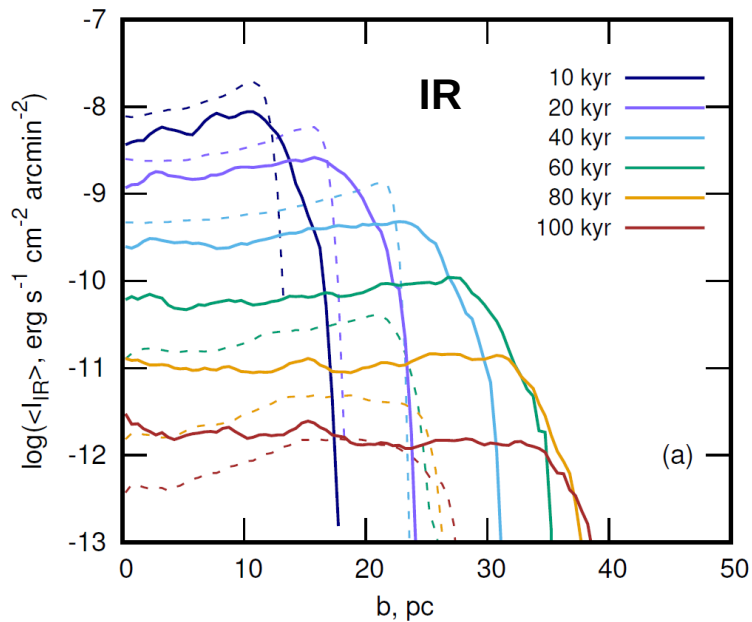
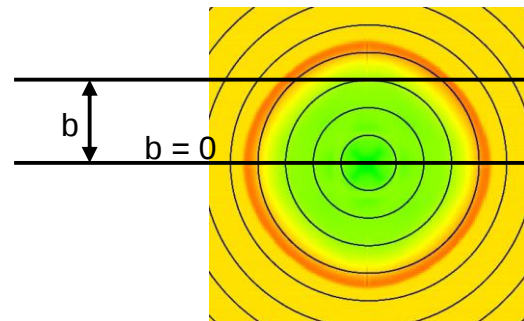
Карта A (y,z)

Усреднение по кольцам с прицельным параметром b:

$$\langle A(b) \rangle = \frac{\sum A(y, z) \Delta S(b)}{\sum \Delta S(b)}$$

$$b^2 = (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2, (y_0, z_0) \equiv (0, 0)$$

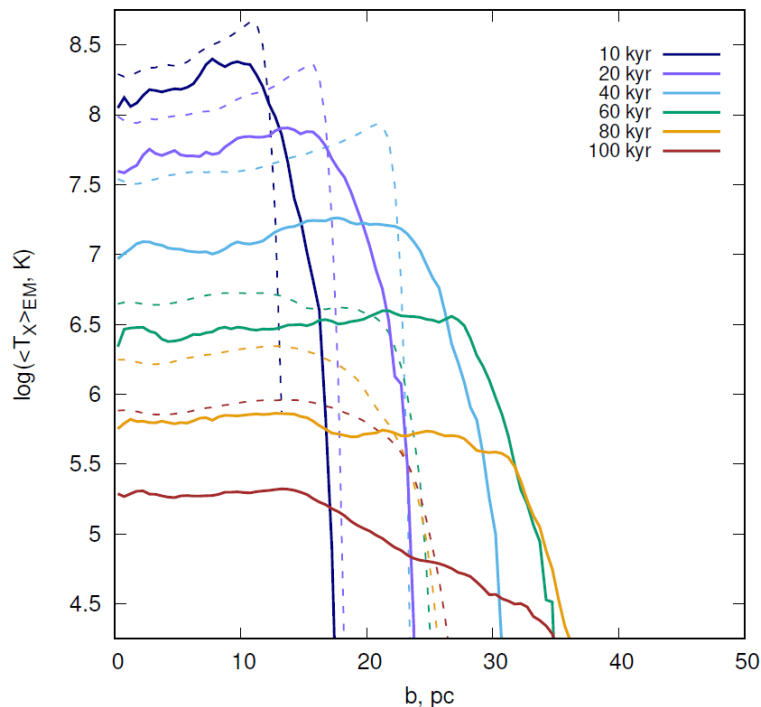
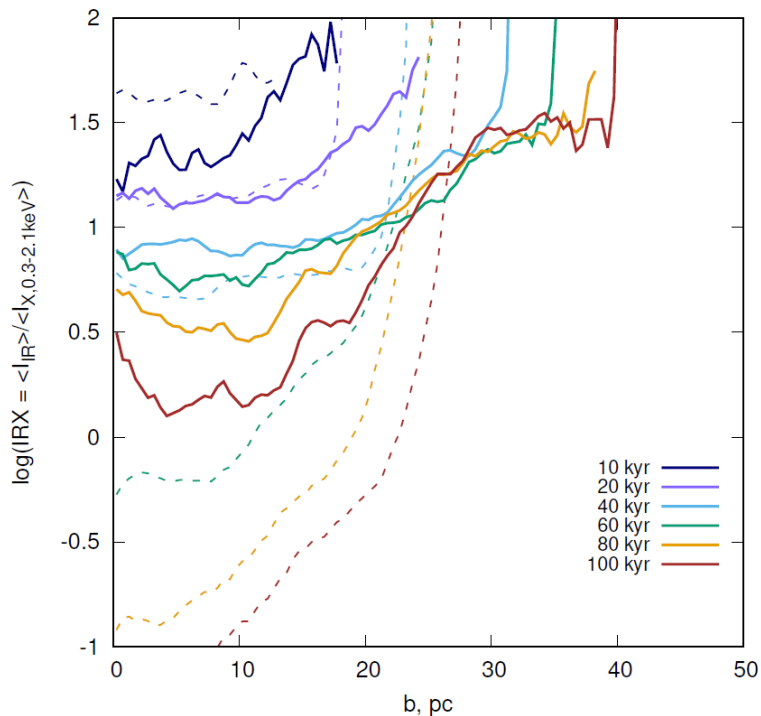
$\Delta S(b)$ — площадь кольца



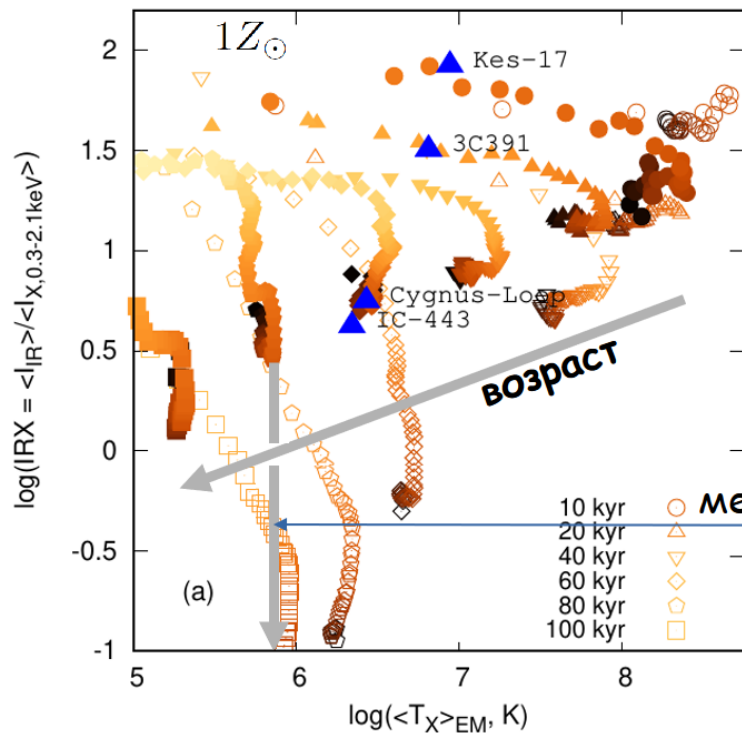
Температура рентгеновского газа:

$$\text{IRX} \equiv L_{\text{IR}}/L_X$$

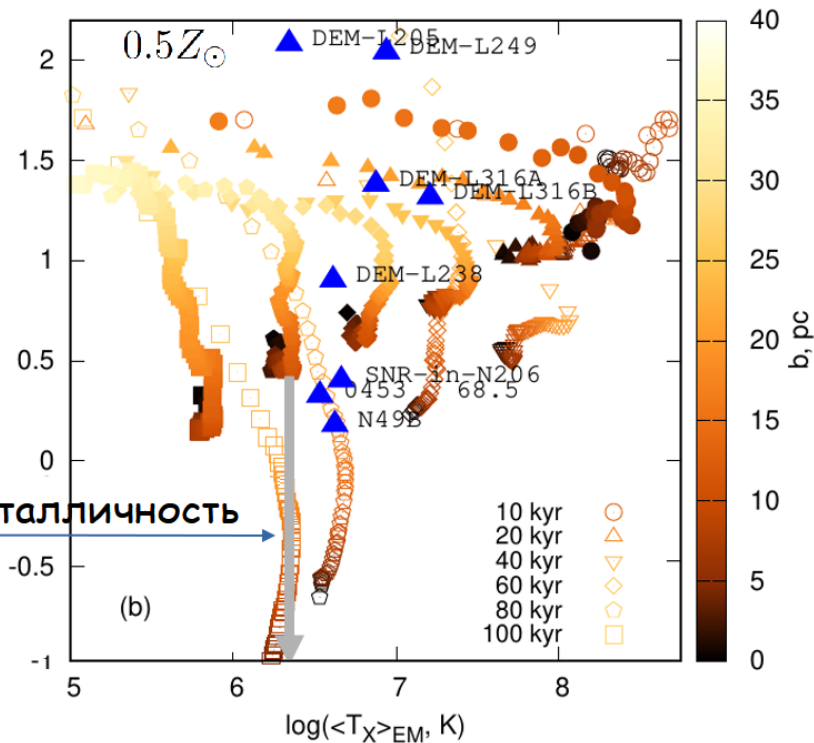
$$\langle T_X(y, z) \rangle_{EM} = \frac{\sum_x T_{gas}(x, y, z) \Delta EM(x, y, z)}{\sum_x \Delta EM(x, y, z)}$$



Соотношение T_X – IRX



Dedikov & Vasiliev 2025 (ARep)



Данные наблюдений из работ:
Seok et al. 2013
Seok et al. 2015
Ranasinghe and Leahy 2023

заполненные символы — для неоднородной,
 незаполненные — для однородной среды

Выводы

(глава 3)

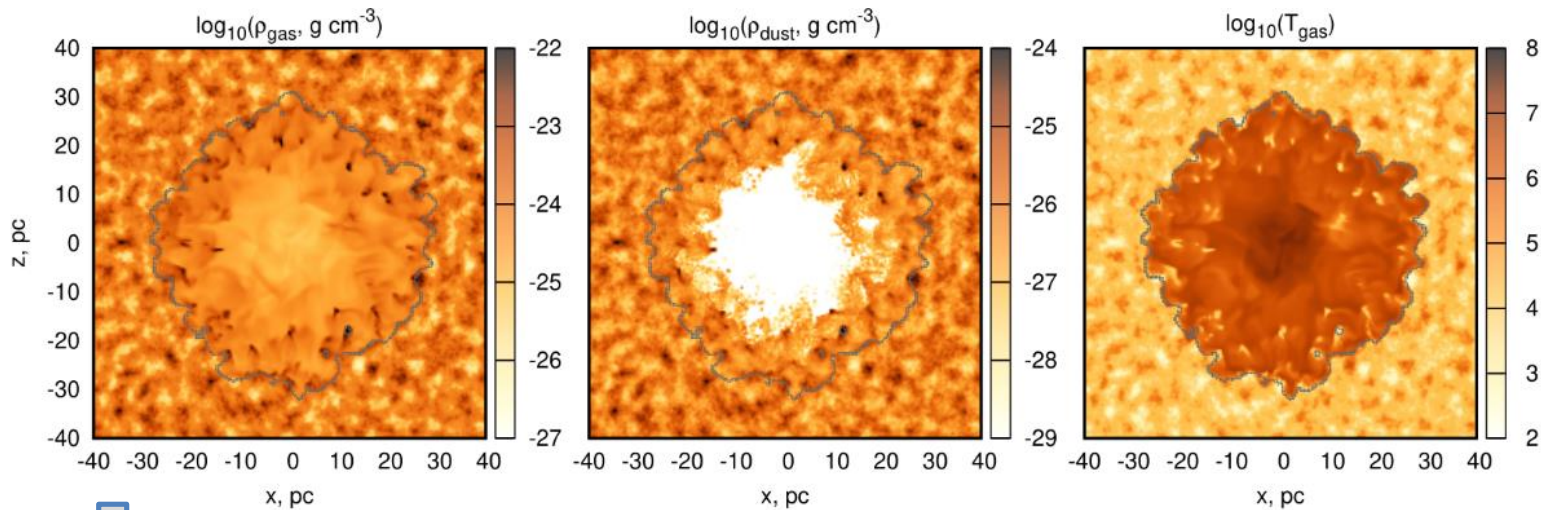
1. Величина IRX значительно ($\sim 3 - 30$ раз) изменяется в остатке сверхновой в зависимости от его возраста и прицельного параметра.
1. Эволюция области значений для остатка сверхновой на диаграмме $T_X - IRX$ определяется степенью неоднородности среды.
1. В сильно неоднородной среде высокие значения IRX поддерживаются благодаря менее эффективному разрушению пыли и большему падению рентгеновской эмиссии.
1. В газе с меньшими значениями металличности сохраняются высокие значения температуры и IRX.

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

Глава 4

Взаимодействие диффузных запыленных облаков с ударной волной

Взаимодействие ударной волны с облаком

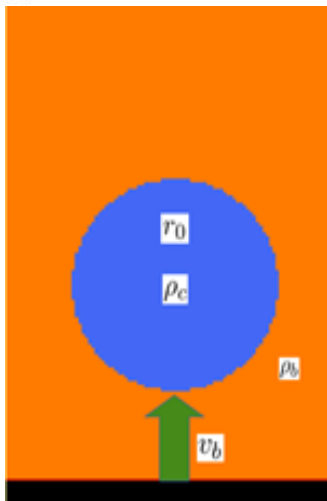


Drozdov, Dedikov & Vasiliev 2025 (AstBul)

адиабатическое (нерадиационное) облако разрушается в течение нескольких времен прохождения УВ по облаку за счет развития гидродинамических неустойчивостей

$$\chi = \rho_c / \rho_b$$

Klein et al. 1994



Sgro 1975, Woodward 1976 и другие

Взаимодействие ударной волны с облаком

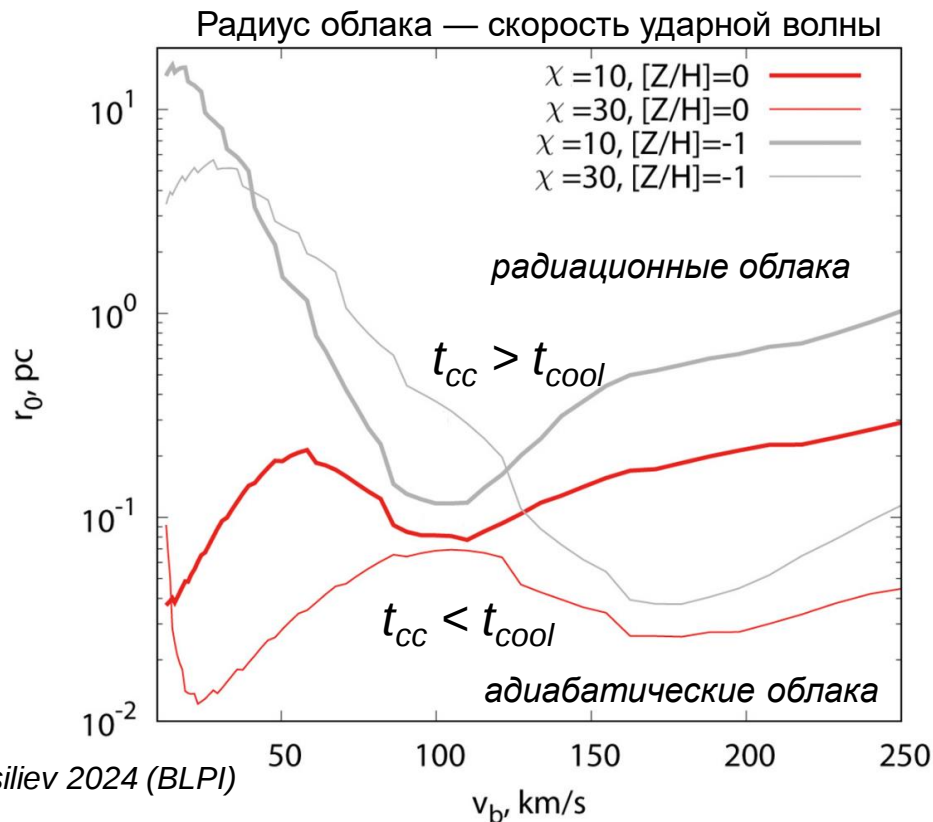
$$t_{cc} = \chi^{1/2} r_0 / v_b$$

время прохождения УВ по облаку
или время разрушения облака

$$t_{cool} \sim k_B T / n \Lambda$$

время охлаждения

$$t_{cc} = t_{cool}$$



Взаимодействие ударной волны с облаком: пыль

$$t_{cc} = \chi^{1/2} r_0 / v_b$$

время прохождения УВ по облаку
или время разрушения облака

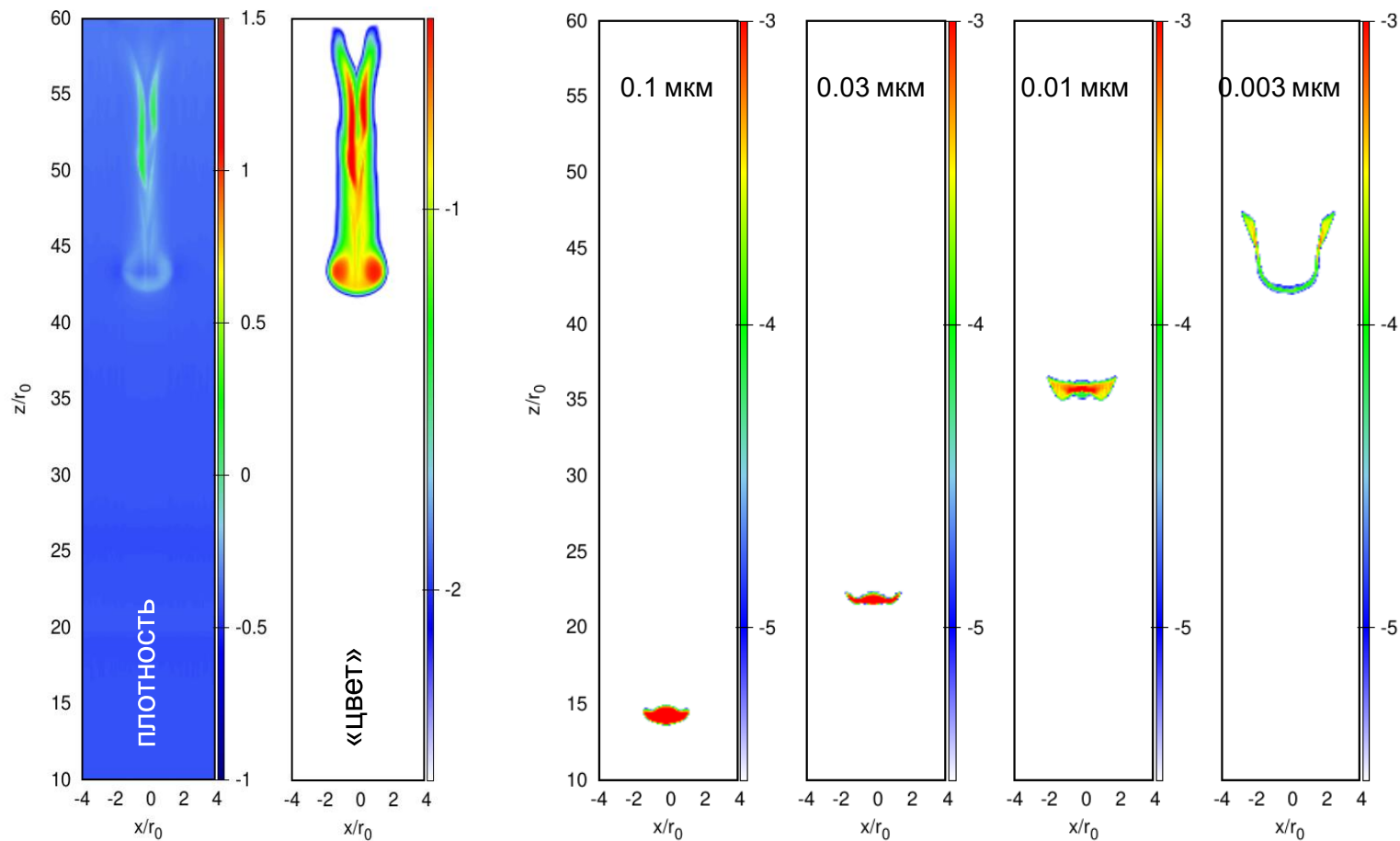
$$t_{cool} \sim k_B T / n \Lambda$$

время охлаждения

$$\tau \sim \rho_m a / \rho_g \sigma T$$

время ускорения (торможения)
частицы

Взаимодействие ударной волны с облаком: пыль



Dedikov & Vasiliev 2024 (BLPI)

Dedikov & Vasiliev 2024 (Univ)

Выводы

(глава 4)

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

S. Dedikov, E. Vasiliev, Tracking Dusty Cloud Crushed by a Hot Flow // *Universe* - 2024 - 10 - 155

S.Yu. Dedikov, E.O. Vasiliev, Dynamics of Gas and Dust during Interaction of Diffuse Clouds with a Shock Wave // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* - 2024 - 51 - pp. 493–499

Положения на защиту

1. Разрушение межзвездной пыли, нагребенной оболочкой сверхновой, оказывается менее эффективным при ее расширении в неоднородной (облачной) среде. После нескольких характерных времен охлаждения доля разрушенной пыли достигает предельного значения и слабо зависит от средней плотности газа при заданном уровне вариаций плотности.
1. 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.
1. Отношение светимостей в инфракрасном и рентгеновском диапазонах IRX значительно ($\sim 3 - 30$ раз) изменяется в зависимости от возраста остатка и прицельного параметра. Для остатков сверхновых, расширяющихся в среде с более высокими вариациями плотности, величина IRX оказывается выше благодаря менее эффективному разрушению пыли и большему падению рентгеновской эмиссии.
1. При взаимодействии радиационно охлаждающихся облаков с сильной ударной волной пылевые частицы сохраняются и переносятся с веществом родительского облака. В отсутствие радиационных потерь мелкие пылевые частицы увлекаются облаком; крупные пылевые частицы, для которых время торможения заметно длиннее времени прохождения ударной волны, отстают от ускоряющегося ударной волной облака и покидают его.

Публикации

- A1. **S.Yu. Dedikov**, E.O. Vasiliev, Inhibited destruction of dust by supernova in a clumpy medium // *New Astronomy*. - 2025. - V.114. - id.102293.
- A2. S.A. Drozdov, **S.Yu. Dedikov**, E.O. Vasiliev, Far-Infrared Emission from a Late Supernova Remnant in an Inhomogeneous Medium // *Astrophysical Bulletin* - 2025 - Vol. 80 - No. 1 - pp. 22–37
- A3. **S.Yu. Dedikov**, E.O. Vasiliev, Infrared and X-ray Emission of Supernova Remnant in a Clumpy Medium // *Astronomy Reports*. - 2025. - V.69. - Issue1. - pp. 1-13.
- A4. **S. Dedikov**, E. Vasiliev, Tracking Dusty Cloud Crushed by a Hot Flow // *Universe* - 2024 - V.10 - no.4:155
- A5. **S.Yu. Dedikov**, E.O. Vasiliev, Dynamics of Gas and Dust during Interaction of Diffuse Clouds with a Shock Wave // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* - 2024 - 51 - pp. 493–499

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.

Апробация

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)

Спасибо за внимание!

По существу работы:

1. В разделе 2.3.2 производился расчёт излучения в линиях от остатка сверхновой. Можно догадаться, что расчёт производился в оптически тонком случае. Было бы не лишним обсудить адекватность такого приближения для остатков сверхновых.

Ответ:

Действительно, расчет излучения в линиях производился для оптически тонкого случая. В рассматриваемых моделях такое приближение адекватно, поскольку для линий тонкой структуры значение оптической толщины составляет менее единицы. Например, для линии CII 158 мкм оптическая толщина достигает единицы при лучевой концентрации водорода $\sim 7 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ (Hollenbach & McKee 1989). В позднем остатке сверхновой радиусом 40 пк при средней плотности 1 см^3 лучевая концентрация будет составлять $\sim 10^{20} \text{ см}^{-2}$. Оптическая толщина может достигать единицы только в очень плотных фрагментах, поверхностный фактор заполнения областей с такой оптической толщиной составляет менее 2%.

По существу работы:

2. В Приложении Б обсуждается расчёт ионизационного состава при охлаждении вещества, используемый в Главе 2. Можно заметить, что помимо ионизованных элементов в расчётах также присутствует нейтральный углерод, C I. Однако, ионизационная структура C I может быть значительно сложнее в случае присутствия плотного газа с 10^2 см^{-3} (который может истекать или находится в плотных сгустках за фронтом УВ) и будет зависеть от других параметров МЗС, таких как плотность, скорость ионизации космическими лучами, и степень молекуляризации - определяющие степень ионизации нейтрального газа в сгустках, а следовательно обилие C I.

Ответ:

Населенность уровней C I при высоких плотностях ($n > 10^2 \text{ см}^{-3}$) может становиться равновесной.

В наших расчетах средняя концентрация газа $\langle n \rangle = 1 \text{ см}^{-3}$, и условия, при которых эти эффекты существенны, достигаются для малой доли газа: **масса газа с $n > 10^2 \text{ см}^{-3}$ составляет менее 1%** от общей массы остатка.

Молекуляризация может влиять на населенность уровней. Однако после прохождения ударной волны молекулы H_2 преимущественно разрушаются. При этом **время образования молекул H_2** в охладившихся фрагментах **на один-два порядка превышает время расчета.**

Космические лучи могут приводить к дополнительной ионизации газа и тем самым влиять на населенность уровней. Однако перенос космических лучей в неоднородной среде является довольно сложной задачей — это **тема отдельной работы.**

Поэтому используемый подход для расчета ионизационного состава представляется достаточным в рамках рассматриваемой задачи.

Замечания ведущей организации ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

По существу работы:

3. В приложении А, и на Рис. А.2 фактически получается, что при увеличении численного разрешения разница в расчётах растёт. То есть разница в расчётах при увеличении от x_2 до x_4 больше, чем от x_1 до x_2 . Таким образом, утверждение о сходимости численного расчёта остаётся непонятным: а что, если увеличить сетку ещё в два раза? Возможно, стоило обсудить физические ограничения на размер неоднородностей в МЗС.

Ответ:

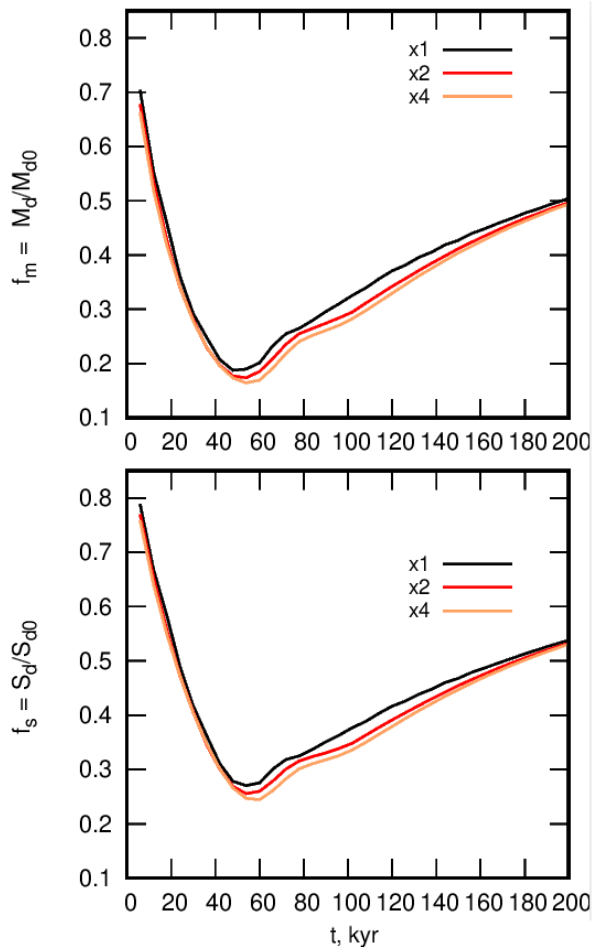
Возможно, термин «сходимость» употреблен не совсем удачно. Здесь утверждение о сходимости означает, что поведение величин при изменении разрешения близко и подобно. Начальное поле плотности является случайным, поэтому для разных пространственных разрешений оно разное. Таким образом, отличие величин на рис. А.2 в пределах 5% определяется разными начальными условиями.

Отличия могут быть связаны и с тем, что при распространении ударного фронта по неоднородной среде определяющим является взаимодействие ударных волн с радиационно охлаждающимися облаками, и для этого процесса известно, что численной сходимости при увеличении разрешения нет (Yirak et al, 2010). Сходимость может рассматриваться только с некоторой точностью.

Если рассмотреть распространение фронта по однородной среде, то разница между величинами при увеличении разрешения будет уменьшаться.

Замечания ведущей организации ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

Продолжение ответа:



Эволюция доли массы и поверхности «выжившей» пыли для однородного случая.

Видно, что разница между значениями величин для x2 и x4 меньше, чем разница между значениями для x2 и x1 — имеет место сходимость с увеличением пространственного разрешения.

Замечания ведущей организации ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

К оформлению:

1. На Рис 2.2, 2.3 и 2.4, а также тексте Главы 2 представлена функция распределения частиц пыли по массе, f_d , которая имеет отрицательные значения. Видимо речь идёт о логарифмах функции распределения (ф.р.). Также в этой Главе можно догадаться, что понятие наклон ф.р., широко используемое в тексте характеризует показатель степени ф.р.

Ответ: с замечанием согласен.

2. Непонятным остается необходимость написания слов "dusty" на стр. 58, а также "mass entrainment" на стр. 77.

Ответ: слова "dusty" и "mass entrainment" в соответствующих местах приведены в скобках для уточнения контекста используемых терминов «запыленная плазма» и «увлечение массы».

3. На Рис. 2.2, 2.3, 2.4 — хорошо бы было для сравнения привести функцию распределения для изначального MRN распределения пыли.

Ответ: с замечанием согласен. На Рис.2.2 приведена функция распределения для момента времени 20 тыс. лет – она почти совпадает с изначальной.

4. Формула 2.2 - не указаны единицы измерения величины (u для $T_1(a)$ ниже). Также пропущены единицы измерения величины T_{gas} на Рис. 2.5.

Ответ: с замечанием согласен. В формуле 2.2 темп нагрева пылинки приведен в единицах эрг/с. Температура в формулах и на рисунке 2.5 приведена в кельвинах.

Замечания ведущей организации ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

К оформлению:

5. Непонятным является использование поверхностной яркости в Главах 2 и 3 (на рис 2.6 и 3.4) в единицах, содержащих угловые секунды и минуты - так как расстояние до рассчитываемого остатка остаётся не озвученным в тексте. Было бы логично использовать единицы площади поверхности.

Ответ:

Поверхностную яркость, представленную на рисунках 2.6 и 3.4, легко перевести в наблюдаемые величины — она не зависит от расстояния. Угловые единицы соответствуют телесному углу. В указанных единицах величина позволяет легко оценить возможности наблюдений.

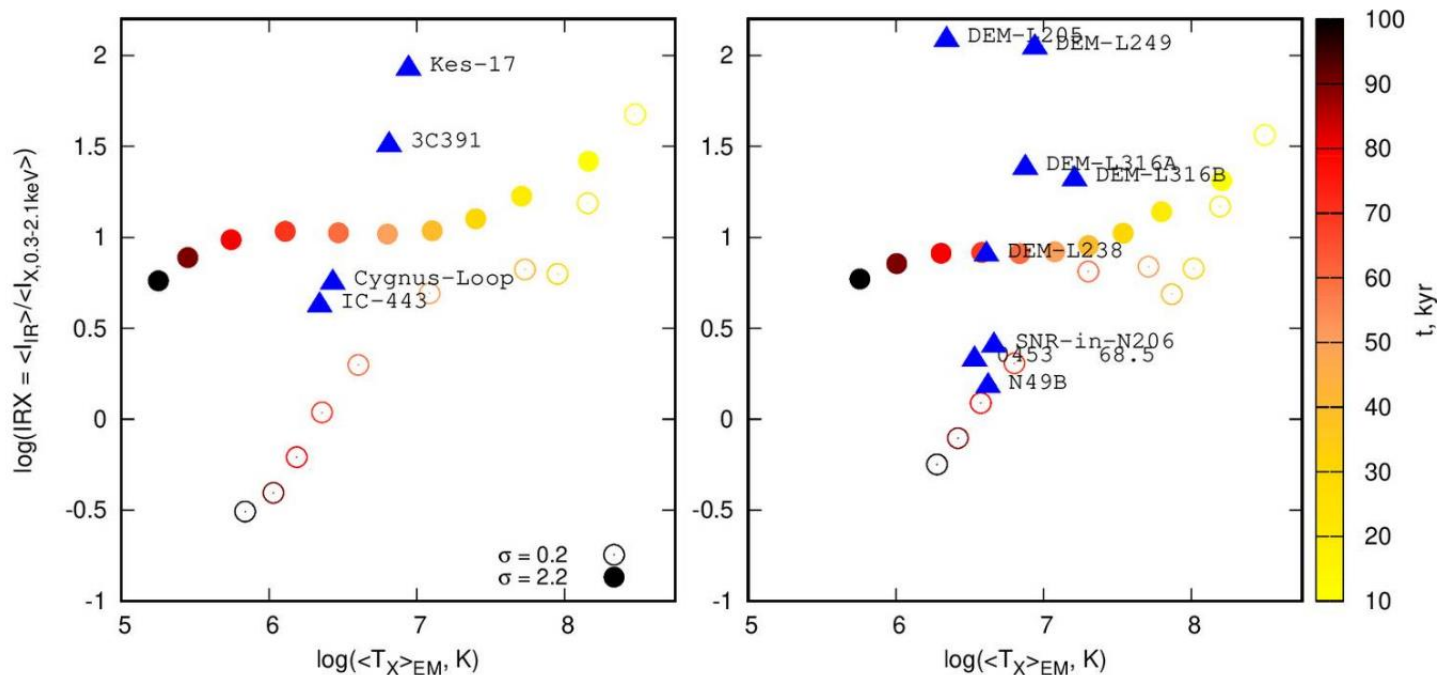
6. Было бы логически правильным в Разделе 3.6 (и Рис. 3.7) сравнивать усреднённые рассчитанные по остатку величины отношения яркости в ИК/рентгене с наблюдательными данными - так как последние являются как раз усреднёнными величинами, а также для наблюдательных данных имеется оценки возраста остатка.

Ответ: с замечанием согласен.

Рисунок 3.7 **иллюстрирует зависимость отношения IRX** от различных параметров, в частности, от прицельного расстояния, возраста остатка, степени неоднородности среды, металличности. При малом прицельном параметре значения IRX оказываются близки к усредненному значению по остатку. Усредненные по всему остатку значения IRX приведены на следующем рисунке:

Замечания ведущей организации ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

Продолжение ответа:



Диаграммы T_x — IRX с усредненной по остатку величиной IRX в зависимости от возраста остатка в сравнении с наблюдаемыми остатками (слева — наша Галактика, справа — Большое Магелланово облако).

Замечания оппонента И.И. Зинченко

1. Во введении при постановке задачи в качестве стимула для проведения данной работы отмечается сильное расхождение оценок скоростей образования и разрушения пыли в Галактике. Результаты работы показывают, что в неоднородной среде разрушение пыли менее эффективно. Однако вопрос о том, достаточно ли этого для преодоления указанного противоречия, в работе никак не обсуждается, лишь указывается, что результаты могут быть использованы для уточнения темпа разрушения пыли в галактиках.

Ответ:

Неоднородность среды, в которой расширяется одиночный остаток, приводит к менее эффективному разрушению пыли — до двух раз. Этот результат получен впервые. Его не достаточно для преодоления несоответствия около порядка величины между оценками скоростей образования и разрушения пыли в Галактике. При этом известно, что межзвездная среда в галактиках сильно неоднородна.

Отметим, что сверхновые в основном вспыхивают в скоплениях, и кумулятивный эффект, связанный с неоднородностью среды, при множественных вспышках может быть более существенным. Это является темой отдельного исследования.

Замечания оппонента И.И. Зинченко

2. В диссертационной работе получено много интересных теоретических результатов. При этом, сопоставление с наблюдениями, хотя и имеется (в разделе 3.6), очень ограничено. Работа выиграла бы от более широкого сопоставления полученных результатов с наблюдениями.

Ответ:

Важным результатом работы является обнаружение подавления разрушения пыли в неоднородных средах. Этот результат позволяет снизить оценки темпа разрушения пыли в Галактике, что может использоваться в интерпретации наблюдений (раздел 1.3.2).

Рассчитаны поверхностные яркости в ИК и рентгеновском диапазонах, ожидаемые потоки в линиях ионов от остатка сверхновой (разделы 2.3, 3.5, 3.6).

Для поздних остатков предсказаны эффекты общего характера, и их выделение в имеющихся данных наблюдений представляет отдельную задачу, которая, с одной стороны, требует моделирования эволюции конкретных объектов в конкретных условиях. С другой стороны, имеющиеся данные наблюдений остатков в Галактике и Магеллановых облаках в инфракрасном и рентгеновском диапазонах не всегда достаточны для однозначной интерпретации содержания и эволюции пыли. Для поздних остатков, как правило, доступны либо результаты наблюдений отдельных фрагментов, либо модельно-зависимые оценки усредненных величин по остатку. Поэтому в работе сопоставление с наблюдениями ограничено сравнением с имеющимися оценками отношения IRX , а также обсуждаются возможности одновременного наблюдения эмиссии пыли и ионов металлов в инфракрасном диапазоне.

Замечания оппонента И.И. Зинченко

3. В результатах главы 2 и в положениях, выносимых на защиту, говорится об отношении светимости в некоторых линиях к светимости пыли в «континууме под линией». Из текста диссертации становится понятно, что «континуум под линией» — это полоса шириной 8 ГГц (в результатах и в положениях, выносимых на защиту, эта величина не указана). Почему взята именно такая ширина полосы (она намного больше ширины линий) и каков вообще смысл этого отношения, - непонятно. Правильнее, наверное, сравнивать светимость в линиях и полную светимость пыли в континууме.

Ответ:

На рисунке 2.8 приведено сравнение не только со светимостью в континууме под линией, но и со светимостью пыли в континууме в дальнем ИК диапазоне L_{FIR}

В нашей работе рассматривается ширина полосы 8 ГГц, поскольку таковая планируется к реализации на спектрометре высокого разрешения космического телескопа «Миллиметрон».

Сравнение светимости в линиях к светимости пыли в «континууме под линией» широко используется в наблюдениях. Например, в работах Decarli et al (2018) и Venemans et al (2018) на ALMA наблюдаемая эмиссия в линии CII 158 мкм далеких квазаров ($z > 6$) сравнивалась с континуумом под линией (underlying continuum), который измерялся в двух близких полосах шириной 3.6 GHz каждая: непосредственно под линией (за вычетом самой линии) и на меньшей частоте (-16GHz). По измеренному континууму под линией восстанавливалась светимость в дальнем инфракрасном диапазоне L_{FIR} и делались оценки свойств пыли.

Отношение светимости в линии к светимости в континууме под линией позволяет сделать вывод, будет ли наблюдаться линия на фоне континуума в тех или иных условиях или нет.

Замечания оппонента И.И. Зинченко

4. Есть некоторые другие мелкие недочёты. Так, некоторые утверждения (например, о зависимости физических параметров от плотности для ударной волны) стоило бы подкрепить ссылками.

Ответ:

Возможно, в некоторых местах и стоило бы добавить ссылки, но поскольку не приведены конкретные примеры, сложно ответить на это замечание.

Замечания оппонента А.С. Гусева

1. При моделировании диссертант использует в качестве входного параметра лишь одно значение энергии взрыва сверхновой (10^{51} эрг), массы газа и тяжелых элементов. Однако диапазон энергии взрыва сверхновых II типа составляет пол-порядка величины – примерно от 5×10^{50} до 2×10^{51} эрг (см., например, Nadyozhin & Imshennik, 2005, Int. J. Mod. Phys. A, 20, 6597), достигая в предельных случаях и более высоких значений (как, например, в случае SN2006gy в NGC 1260). Стоило бы рассмотреть, как меняются темпы разрушения пыли в неоднородной среде в зависимости от энергии взрыва? Либо, в качестве альтернативы, – привести убедительные аргументы, почему данный параметр (энергия взрыва) не варьируется при моделировании?

Ответ:

Пыль разрушается в газе с температурой больше миллиона градусов, что соответствует скорости ударной волны выше 200 км/с. Эти условия реализуются в остатке, пока он находится на адиабатической стадии расширения, которая определяется отношением $(E/\rho)^{1/5}$. В наших расчетах варьировалась плотность ρ , поэтому необходимости в изменении значения энергии взрыва нет.

Замечания оппонента А.С. Гусева

2. В качестве базового значения параметра масштаба неоднородности среды используется величина 6.25 пк. В качестве аргумента приводятся ссылки на работы, где определяются типичные размеры молекулярных облаков. Данная аргументация не совсем корректна, поскольку размер неоднородности среды зависит не только от размеров сгустков, но и расстояний между ними. При этом автор игнорирует работу Henshaw et al., 2020, Nature Astron., 4, 1064, в которой было показано, что флуктуации плотности в центральной молекулярной зоне нашей Галактики имеют период (на интересующей в диссертации пространственной шкале) как раз искомые 6.0 ± 0.7 пк.

Ответ:

Распределение возмущений плотности в межзвездной среде определяется турбулентными течениями с колмогоровским спектром, что характерно в среднем для Галактики. Именно такое поле возмущений было использовано в расчетах в качестве начальных условий. Расстояние между возмущениями является свойством случайного поля, в противном случае случайное поле перестанет быть колмогоровским.

В качестве стандартного значения была использована величина максимального размера возмущения около 6 пк. Помимо этого были проведены расчеты динамики остатка в среде с максимальным размером от 5 до 25 пк (модели $lm6$ — $lm9$ в таблице 1.1 главы 1). Соответственно, в генерируемых случайных полях изменялись и расстояния между возмущениями. В результате анализа не было найдено существенных отличий от базовой модели в оценке доли массы выжившей пыли, о чем упомянуто на стр. 35 и показано на рис. 1.8.

Благодарю оппонента за ссылку на интересную работу.

Замечания оппонента А.С. Гусева

3. На стр. 26 диссертации автор утверждает, что «пространственный размер неоднородностей также не оказывает заметного влияния на глобальный приток пылевой массы через поверхность остатка». Стоило бы проиллюстрировать это на рисунке, чтобы в этом могли убедиться не только автор диссертации, но и ее читатели.

Ответ:

С замечанием согласен. Рисунок, иллюстрирующий зависимость от пространственного размера, не вошел в диссертацию, хотя этот вывод можно сделать из рис. 1.8 на стр. 35, где проиллюстрирована эволюция доли массы выжившей пыли в моделях с различным максимальным пространственным размером неоднородностей.

4. В главе 2.2 отсутствует формула для функции распределения масс пылинок f_d по размерам. Это затрудняет интерпретацию рис. 2.2 и 2.3.

Ответ:

В диссертации в большинстве расчетов, как и в разделе 2.2, используется начальное распределение пыли по размерам из работы Mathis et al 1977 — распределение MRN: $dN/da \sim a^{-3.5}$ (см. раздел 1.2.1)

На рисунках 2.2 и 2.3 представлена массовая функция распределения $f(a) \sim a^3 (dN/da) \Delta a$

Замечания оппонента А.С. Гусева

5) В разделе 2.3.2 автор рассматривает эволюцию светимостей остатка сверхновой в ИК-линиях [OIII] 88 мкм, [CII] 158 мкм и [NII] 205 мкм. Из текста неясно, проводились ли ранее подобные наблюдения? Если да, то почему не было проведено сравнение модельных результатов с данными наблюдений? В частности, почему не использовались результаты из работы Millard et al., 2021, ApJS, 257, id.36? Слишком молодые объекты?

Ответ:

В диссертации рассматривается эволюция поздних остатков с возрастом больше 20 тысяч лет, когда оболочка остывает, и в ней появляются соответствующие ионы. При взаимодействии с плотными неоднородностями эти ионы могут наблюдаться в более молодых остатках с возрастом менее нескольких тысяч лет, что и обнаружено в работе Millard et al., 2021. Моделирование этого процесса требует значительно более высокого пространственного разрешения и, в общем, является отдельным направлением исследований. Поскольку целью диссертации являлось изучение разрушения именно межзвездной пыли, моделирование проводилось до возрастов остатка несколько десятков тысяч лет. Эти остатки также излучают в ИК линиях и, по-видимому, для них пока нет наблюдательных данных. Однако потоки в этих линиях позволяют исследовать остатки с помощью космической обсерватории «Миллиметрон».

Замечания оппонента А.С. Гусева

6. Имеются немногочисленные замечания по оформлению:

- при ссылке на работы А1 и А4 в диссертации и автореферате стоило бы указать количество страниц;

Ответ: с замечанием согласен

- в формулах главы 1 для обозначения скорости пылевой частицы используется два разных индекса: v_n и v_p ;

Ответ: с замечанием согласен

- на рис. 2.3 на стр. 44 некоторые линии обрываются в пустоту (особо это касается зеленой гистограммы на нижнем левом графике);

Ответ: обрыв линий соответствует отсутствию значимой ($> 0.0001\%$) массы пылинок с такими значениями в функции распределения.

- в первом абзаце на стр. 66 пропущен предлог «в» перед словом «эжекте»;

Ответ: с замечанием согласен

- на стр. 76 в нумерованной формуле для радиационного охлаждения газа пропущены индексы «с» для температуры и концентрации газа;

Ответ: с замечанием согласен

- на стр. 95 в Приложении А ошибочно указано «0.18175 пк» вместо «0.1875 пк».

Ответ: с замечанием согласен

Дополнительные материалы

Процессы разрушения пыли

Дробление при столкновениях пылинок друг с другом (shattering):

$T < 10^5$ K, частицы малого размера, имеющие высокие относительные скорости $v > 30$ км/с
Jones et al 1996

Murga et al 2019

В наших расчетах дробление не учитывается.

Доля пыли в условиях с $T < 10^5$ K и $v > 30$ км/с составляет

< 0,2 в однородной,

~ 0,04 в облачной среде с дисперсией логнормального распределения 2,2

Dedikov & Vasiliev 2025 (NewA)

Характерные времена:

~ 1-5 млн. лет для теплой ионизованной среды (T, n) = (8×10^3 K, 0.1 см^{-3})

> 10 млн. лет для теплой нейтральной (6×10^3 K, 0.3 см^{-3})

> 10 млн. лет для холодной (10^2 K, 30 см^{-3})

Hirashita & Yan, 2009

~ 4-40 млн. лет для остатка CH (*Martínez-González et al., 2019*)

В наших моделях конечное время расчета равно 100 тыс. лет

Зависимость от разрешения

Плоская УВ в облачной среде: $\langle n \rangle = 1 \text{ см}^{-3}$ $\sigma = 2.2$ (логнормальное распределение)

Плотность энергии $3 \times 10^{-9} \text{ эрг / см}^3$ $\langle - \rangle$ внутри остатка СН радиусом 15 пк

$(Lx \times Ly \times Lz) = (24 \times 24 \times 72) \text{ пк}^3$

$\langle - \rangle$ разрешение 0.375 пк - x1

0.1875 пк - x2

0.09375 пк - x4

