

«Эмиссионные характеристики внутренних областей галактик в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах»

С.А. Дроздов

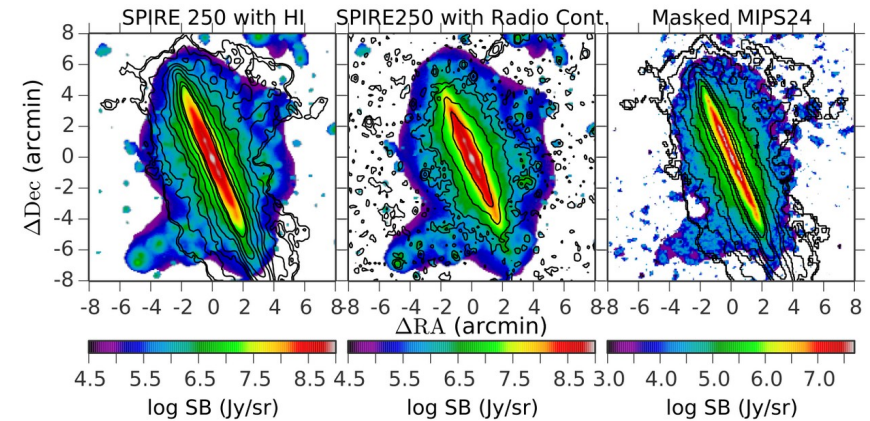
Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор Ю.А. Щекинов

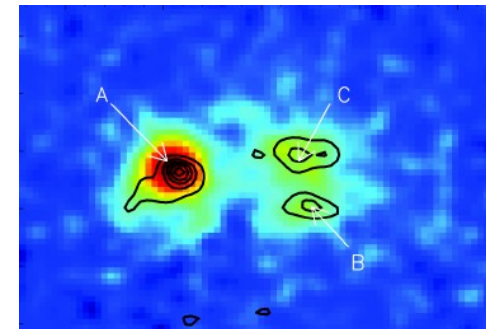
Глава 1. Введение.

Актуальность работы

- Центральная молекулярная зона
- Галактики со вспышками звездообразования
- Ультра-яркие инфракрасные галактики
- Северный полярный шпур
- Газ в скоплениях галактик



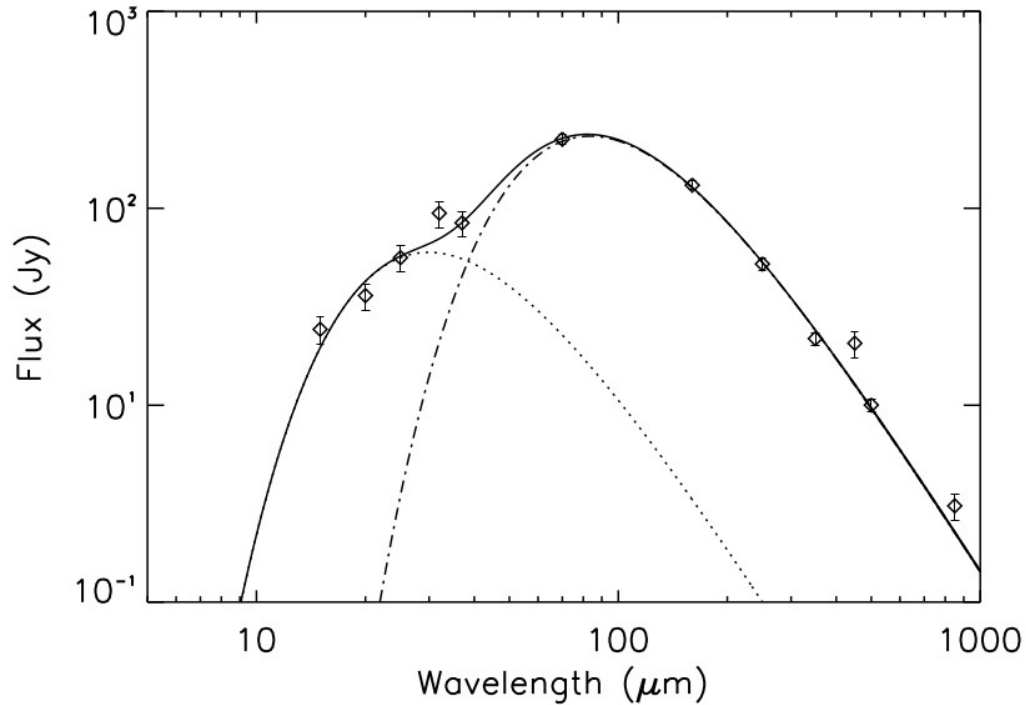
NGC 891, Yoon et al. 2021



Arp 299, Jiao, Zhu 2017

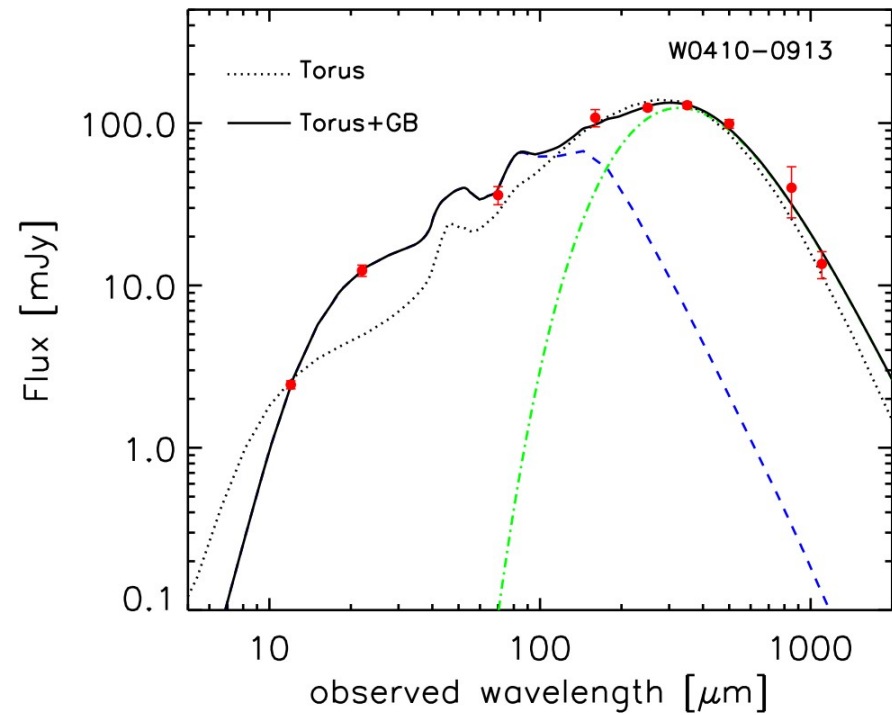
Актуальной задачей является корректная интерпретация спектров в областях звездообразования и за фронтами ударных волн

Примеры ИК спектров



Arp 299

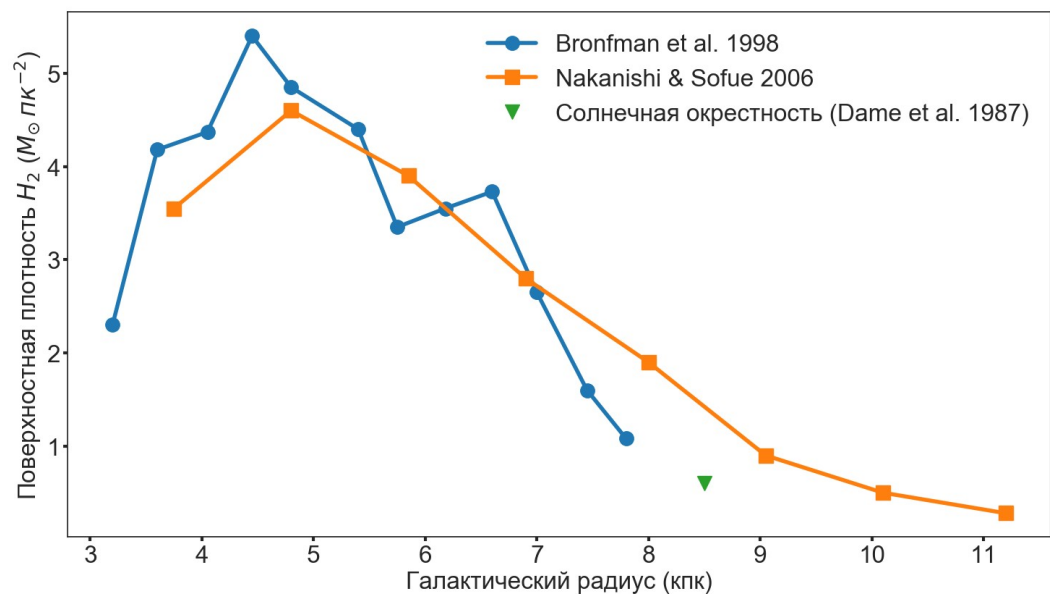
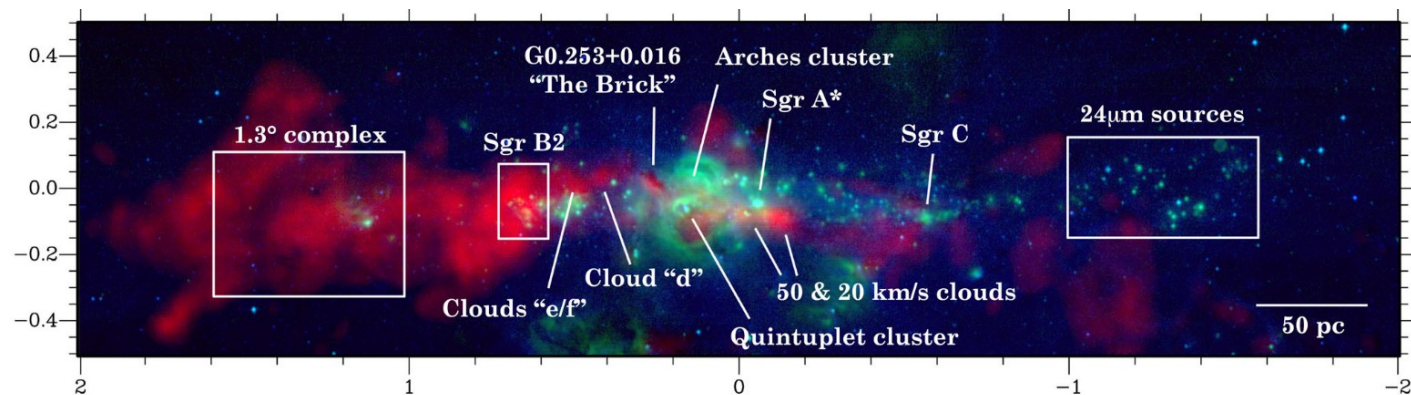
Jiao and Zhu 2017



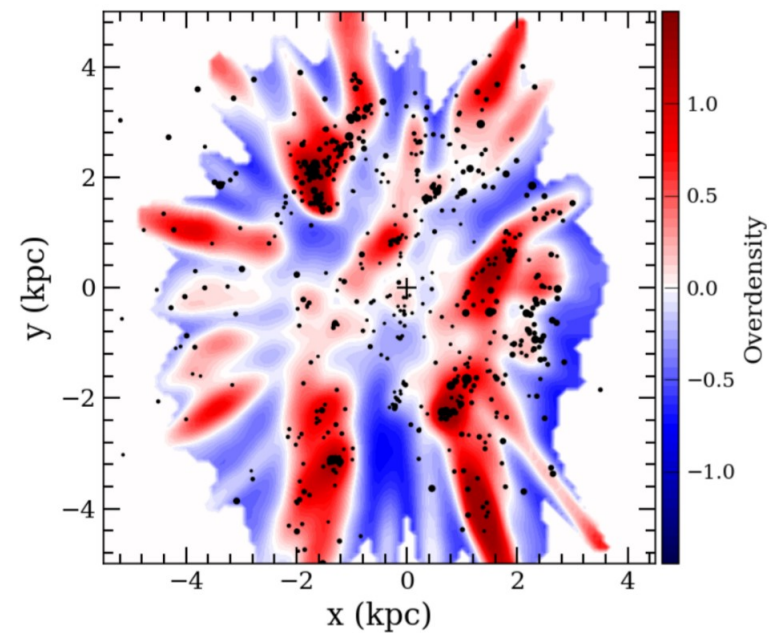
DOG W0410-0913

Fan et al. 2016

На луче зрения по направлению на ЦМЗ находится множество областей ЗО и звёздных скоплений малой массы, трудно выделяемых из фона.



Heyer&Dame 2015



GAIA, arxiv:2206.06207

Цель работы

Исследование эмиссионных свойств пыли в областях звёздообразования и галактических истечениях:

- 1) исследование излучательной способности пыли, нагреваемой в стохастическом режиме (Глава 2);
 - 2) исследование эволюционных особенностей спектрального распределения эмиссии пыли в остывающей плазме за фронтом ударной волны (Глава 3);
 - 3) исследование влияния процессов разрушения пыли в истечениях горячего газа из областей звёздообразования (Глава 4);
 - 4) исследование возможности обнаружения маломассивных ОВ-ассоциаций в направлении на Галактический центр по особенностям эмиссии в сверхоболочках над областями звёздообразования (Глава 5).
- Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, приложений, списка литературы – 143 наименований. Общий объём – 108 страниц.

Глава 2. Температура пыли в горячей плазме

- Drozdov S.A. Shchekinov Yu.A., «Temperature of Dust in Hot Plasmas», Astrophysics, 2019.

Пыль в разреженном и горячем газе испытывает сильные температурные флуктуации.

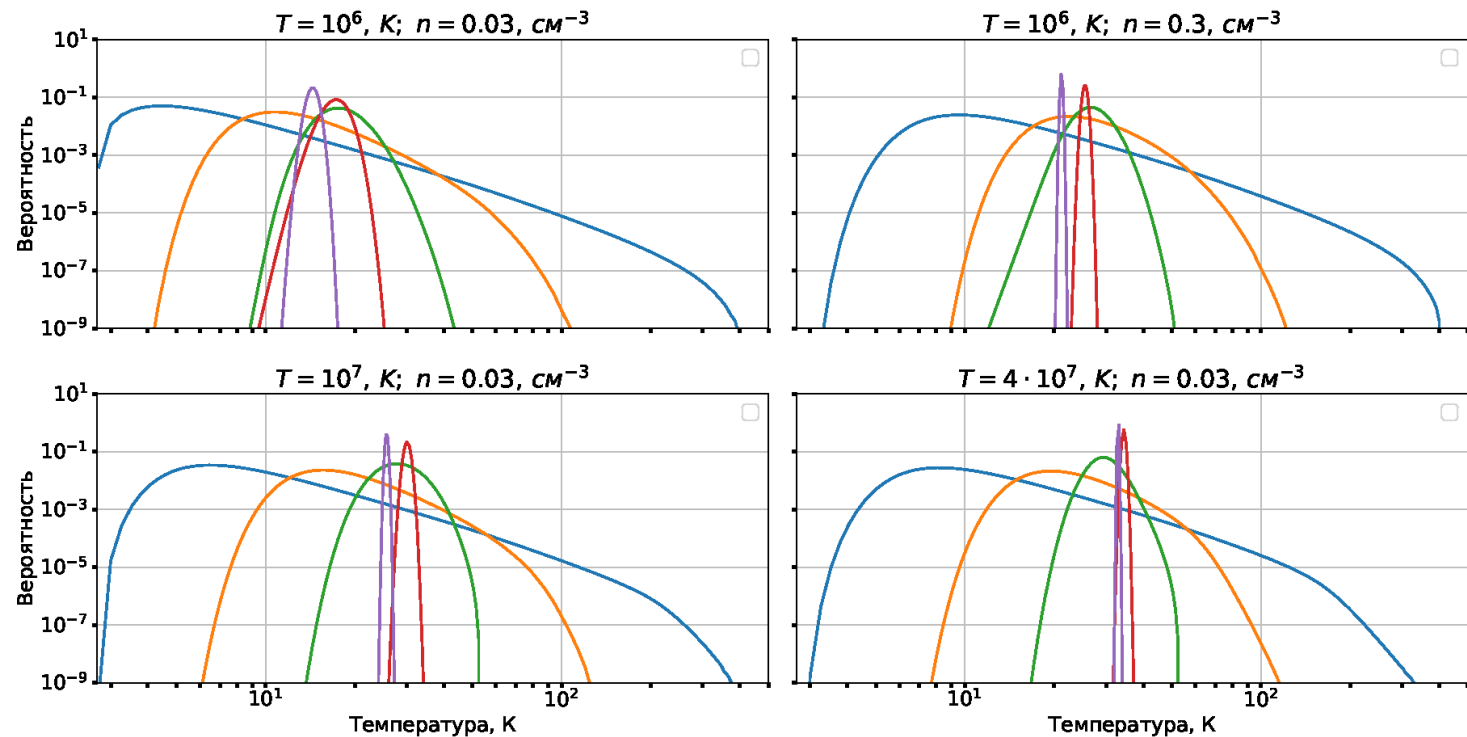
Северный полярный шпур, остатки сверхновых, «корональный» газ в гало галактик.

Значительные изменения спектра пыли.

Drozdov, Shchekinov
2019

Функции
распределения
температур пыли
(ФРТ)

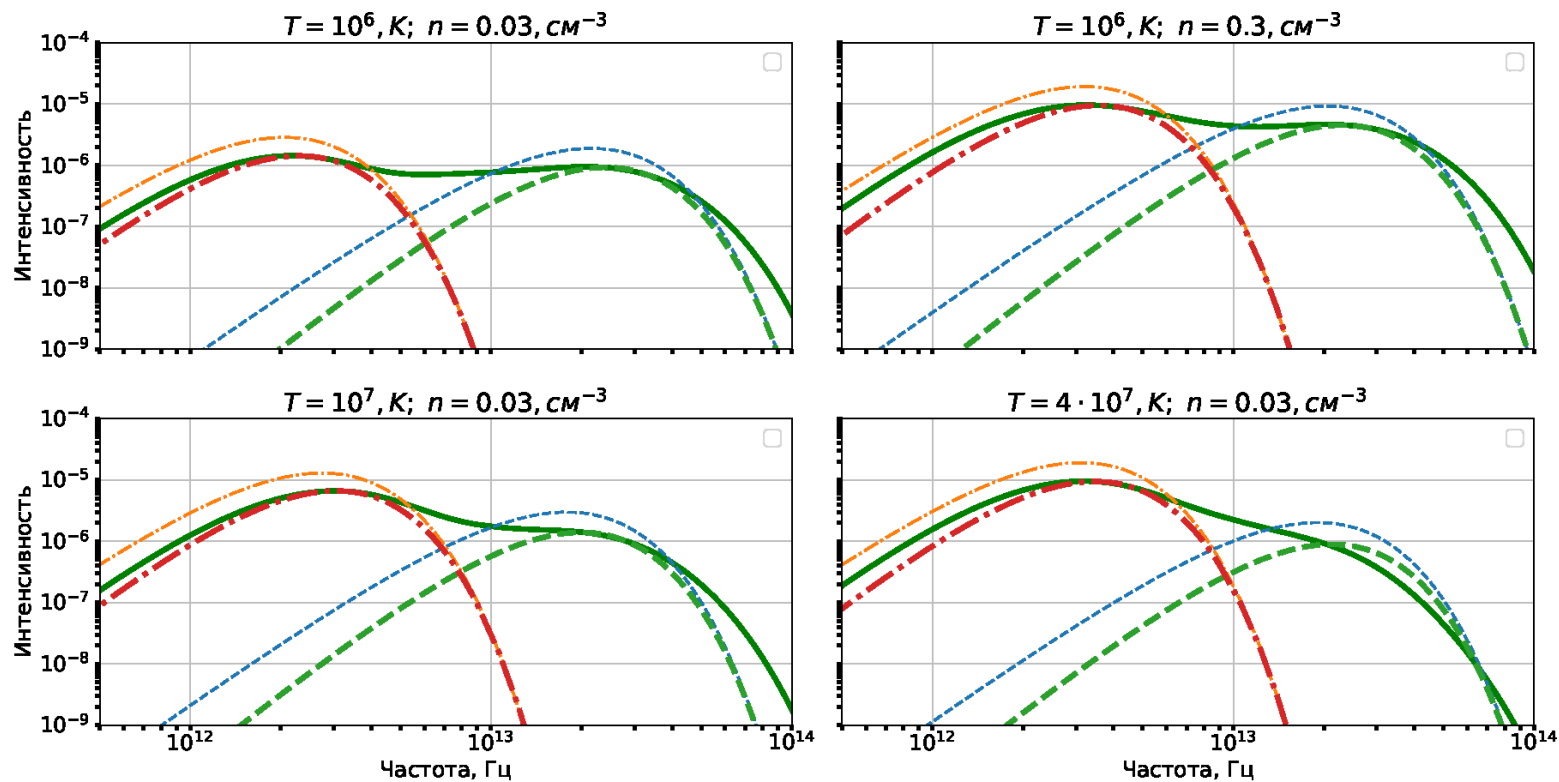
Цвет кривых обозначает
размеры пылинок



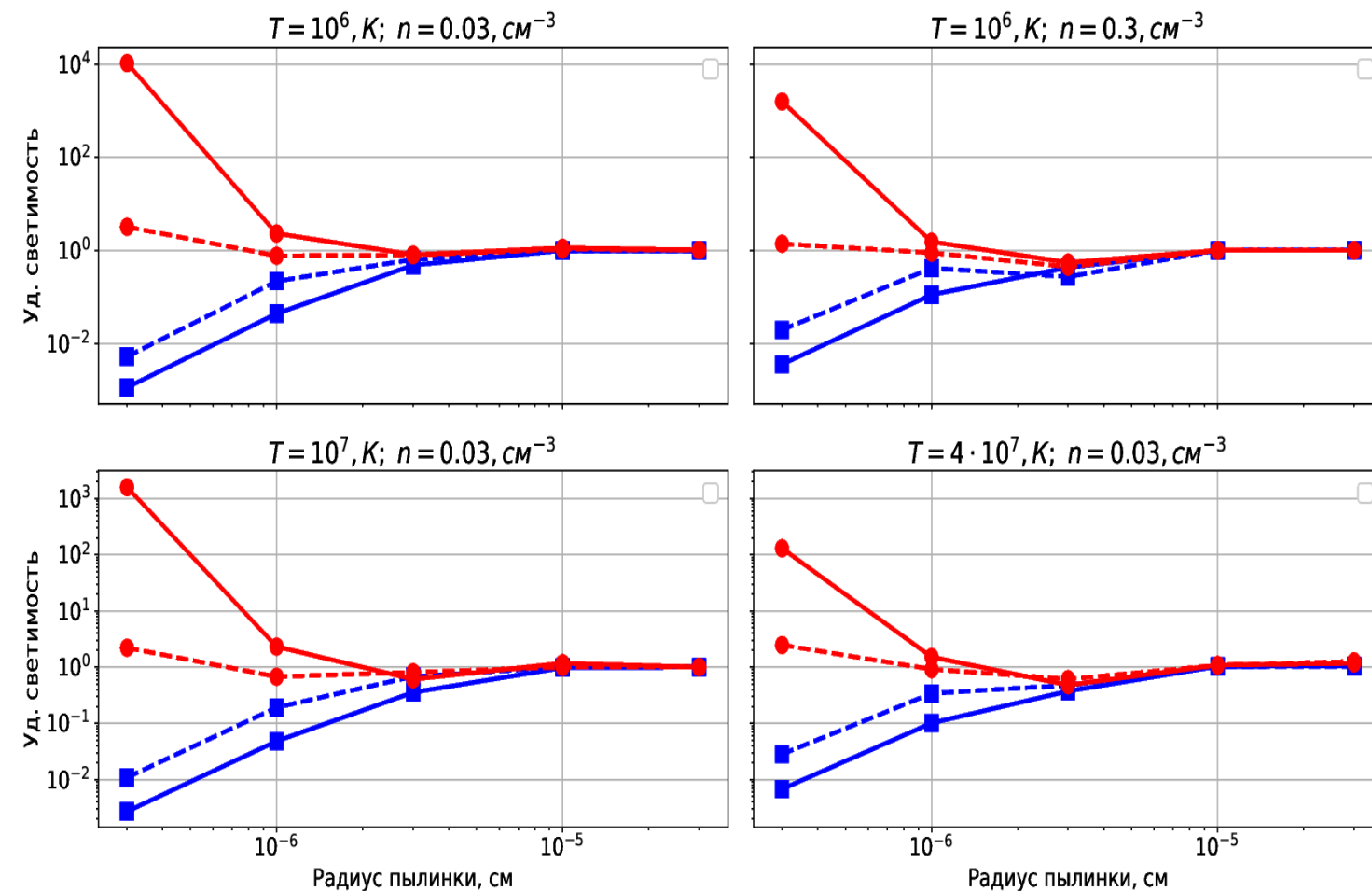
Спектр излучения пыли

- Пыль нагревается под действием столкновений с электронами горячей плазмы.
- Пылинки – графиты и силикаты.
- Размеры пылинок от 30 А до 3000 А.

Drozdov, Shchekinov 2019



Удельные светимости пыли



из средней температуры,
определённой по
модифицированному
планковскому спектру
(сплошная линия)

из средней температуры по ФРТ
(штриховая линия)

графитовые пылинки
силикатные пылинки

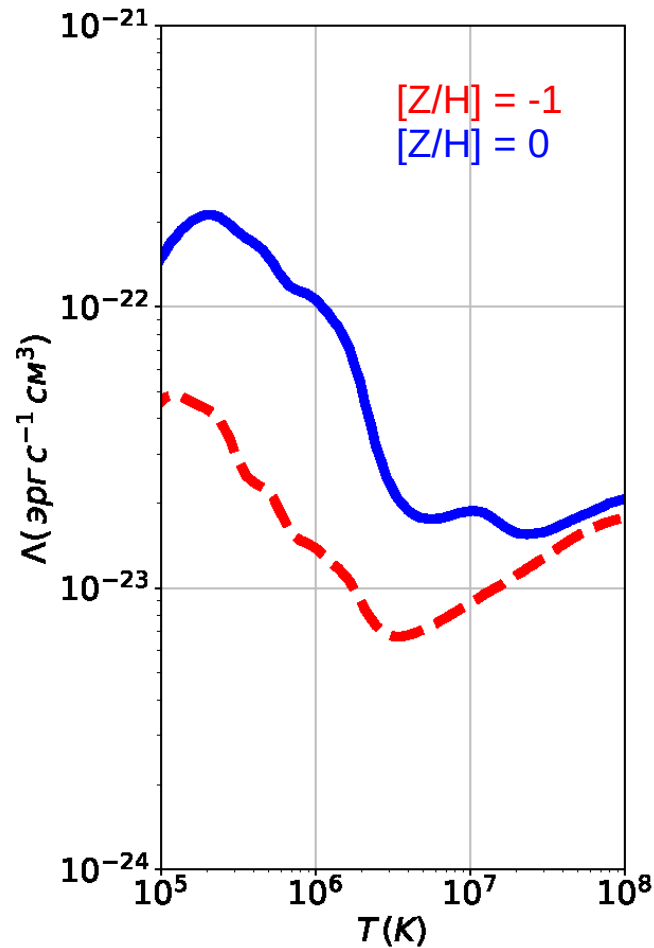
Выводы к Главе 2

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, что наблюдательно проявляется в бимодальности эмиссионного спектра пыли с пиками на коротких (30 мкм) и длинных (300 мкм) волнах и в цветовых характеристиках виновской части спектра.

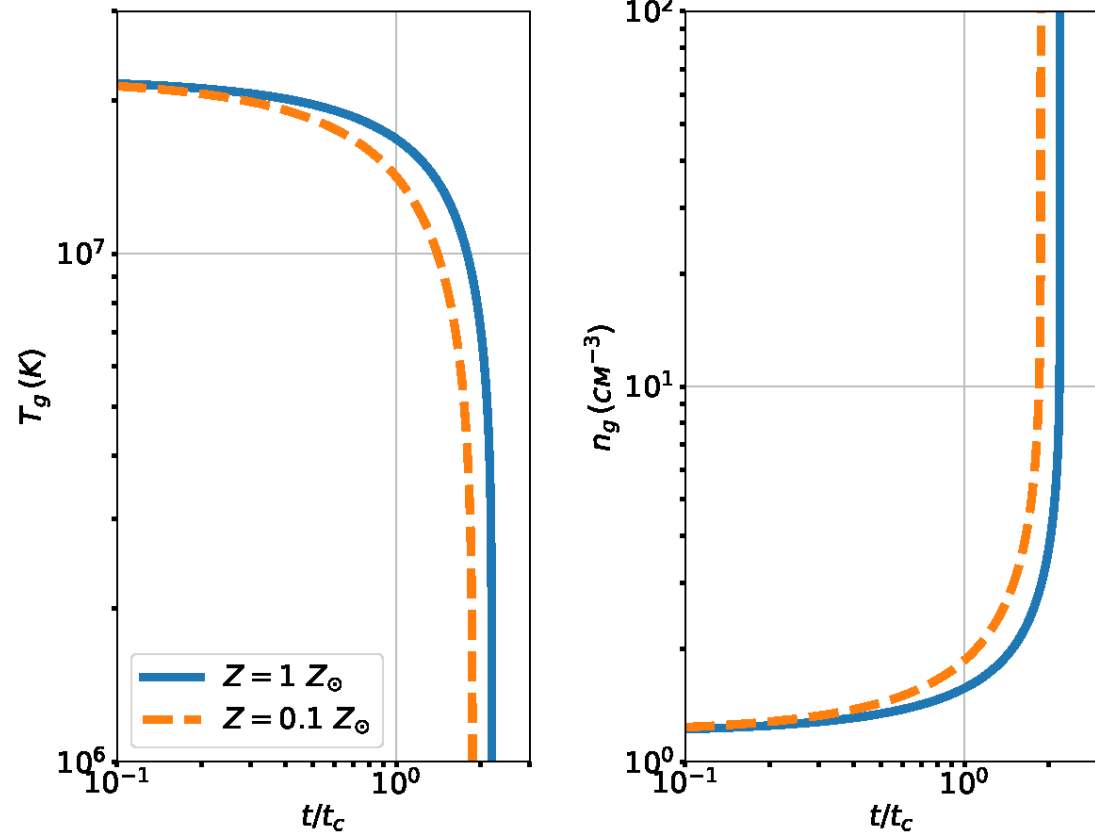
Глава 3. Спектр эмиссии пыли в остывающем газе

- Drozdov S.A., «Emission Spectrum of Dust in a Cooling Gas», Astrophysics, 2021.

Эволюция газа за фронтом ударной волны (УВ)

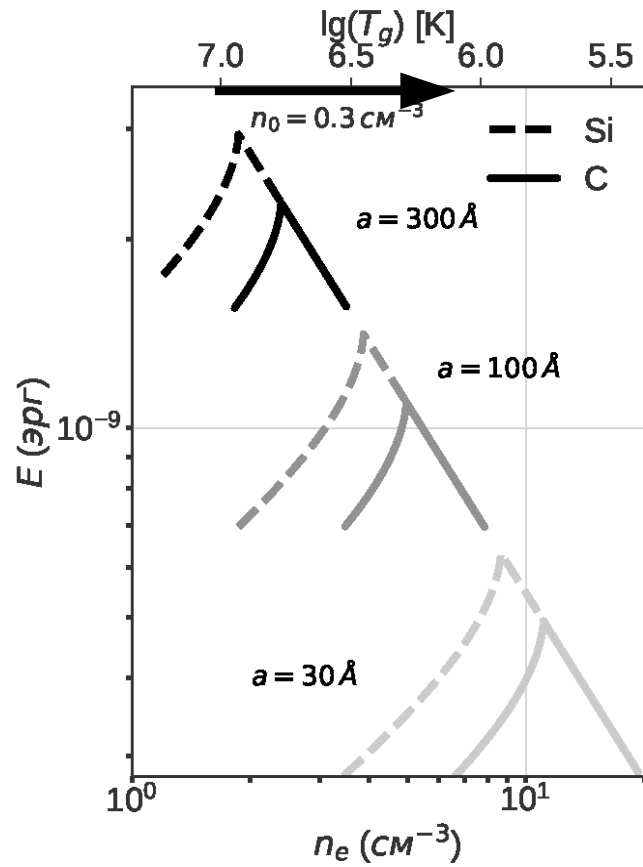


Функция охлаждения газа
(Vasiliev E. 2013)

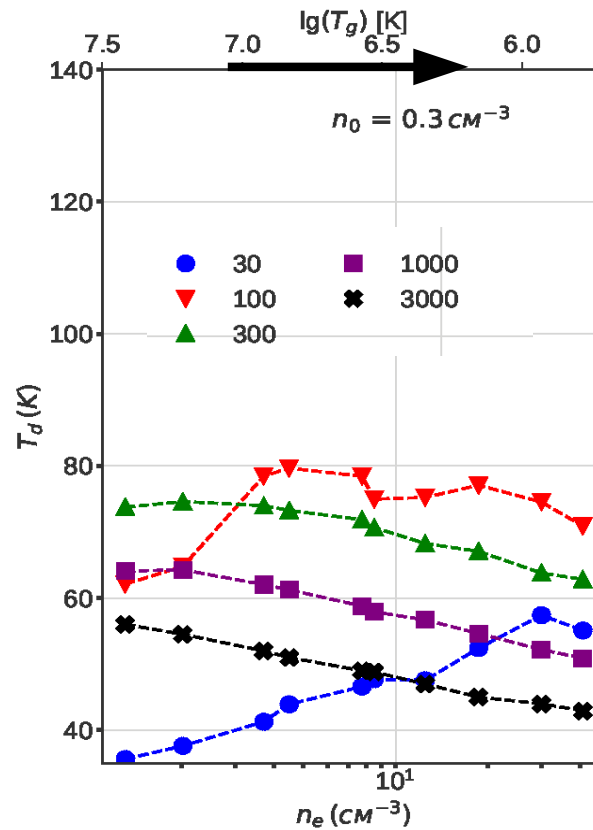


Эволюция температуры и плотности газа. Время нормировано на промежуток времени, за который температура газа упадёт в два раза от начальной. Начальные плотность и температура: $n = 0.3 \text{ cm}^{-3}$ $T = 2.2 \times 10^7 \text{ K}$
(Drozdov 2021)

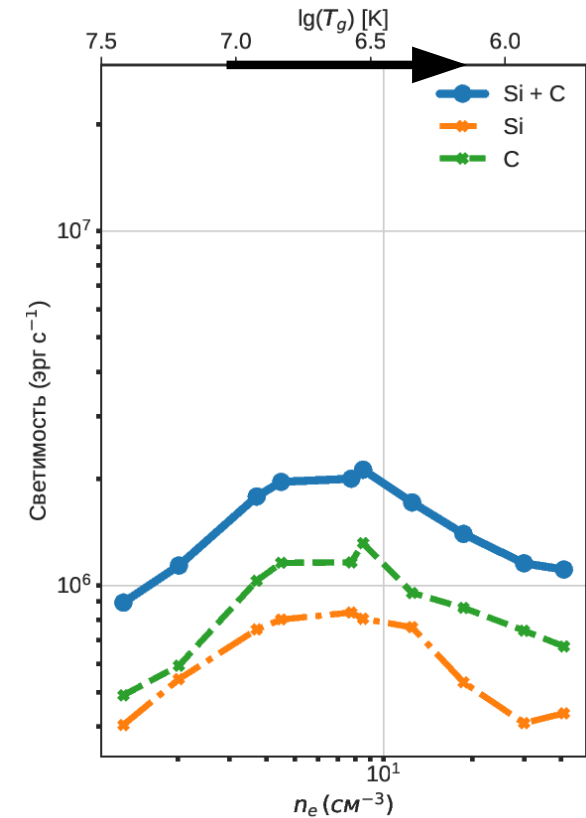
Эволюция в остывающем газе



Эффективность
нагрева в
остывающем газе



Эволюция средней по
ФРТ температуры
пыли



Эволюция светимости
пыли (на один грамм)

Стрелками показано направление эволюции газа

Drozdov 2021

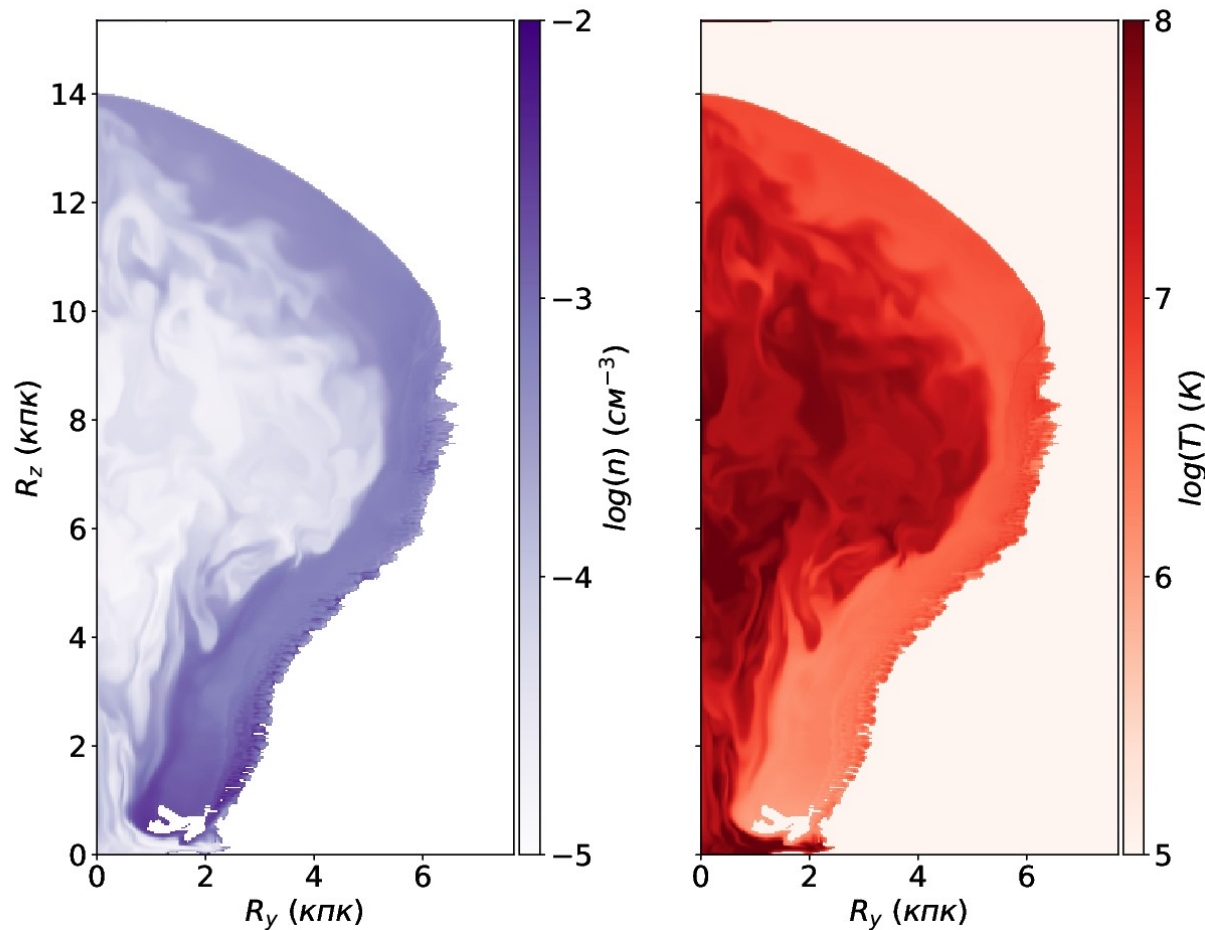
Выводы к Главе 3

- Исследованы тепловые свойства пыли за фронтами сильных ударных волн.
- Показано, что тепловые режимы мелкой ($a < 300 \text{ \AA}$) и более крупной пыли различаются: мелкие пылинки на начальном этапе эволюции (~ 3 млн. лет) продолжают нагреваться, пока окружающая плазма не остынет до температуры $\sim 3 \cdot 10^6 \text{ K}$.
- Это свойство мелкой пыли оказывает влияние на суммарный эмиссионный спектр, который отличается от квазипланковского спектра равновесной пыли, и может служить способом диагностики окружающей плазмы.

Глава 4. Разрушение пыли в горячих газодинамических течениях.

- Drozdov S.A., Vasiliev E.O., «Dust Destruction in Hot Gas Dynamic Flows», Bulletin of the LPI, 2021.

Распределение плотности и температуры газа в горячем ветре над областью звёздообразования



Drozdov, Vasiliev 2021

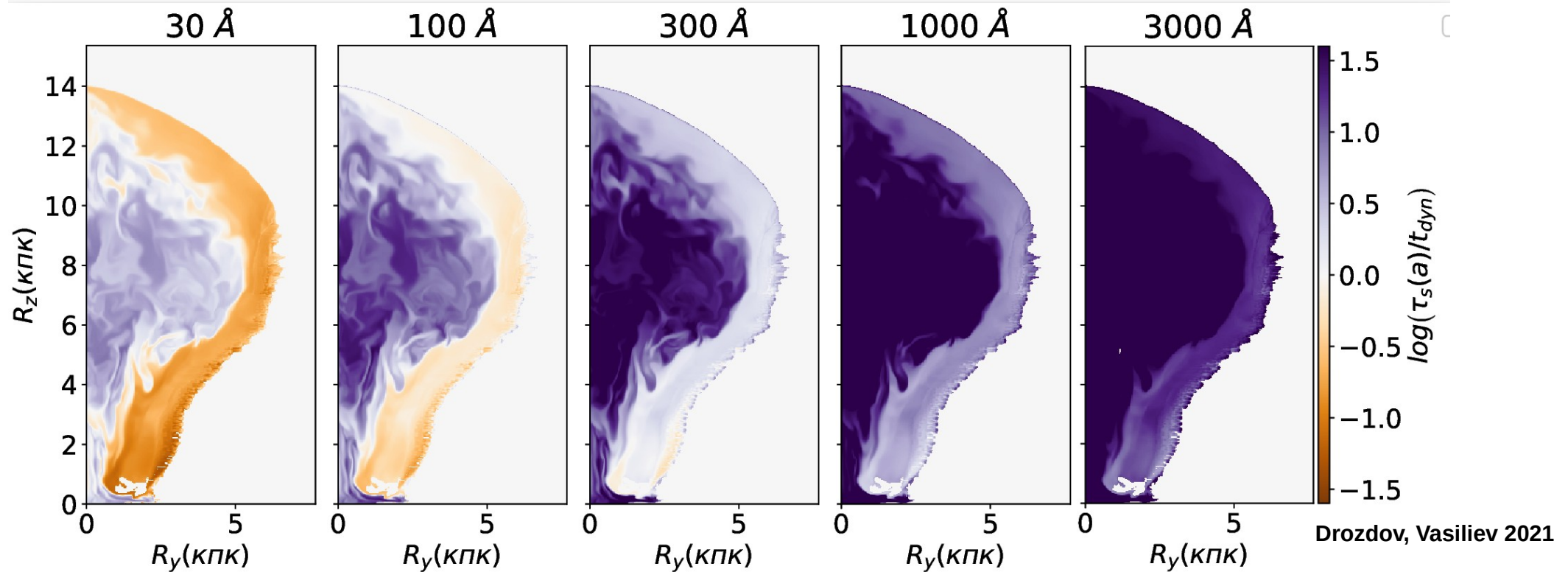
SFR = 0.1 $M_{\text{сол.}}$ в год

t_{dyn} = 25 млн. лет

Метод для оценки влияния
разрушения пыли на ИК
светимость пыли в
моделировании
газодинамических течений.

- Время разрушения пыли
- Время охлаждения газа
- Динамическое время

Отношение времени жизни пылинок к динамическому

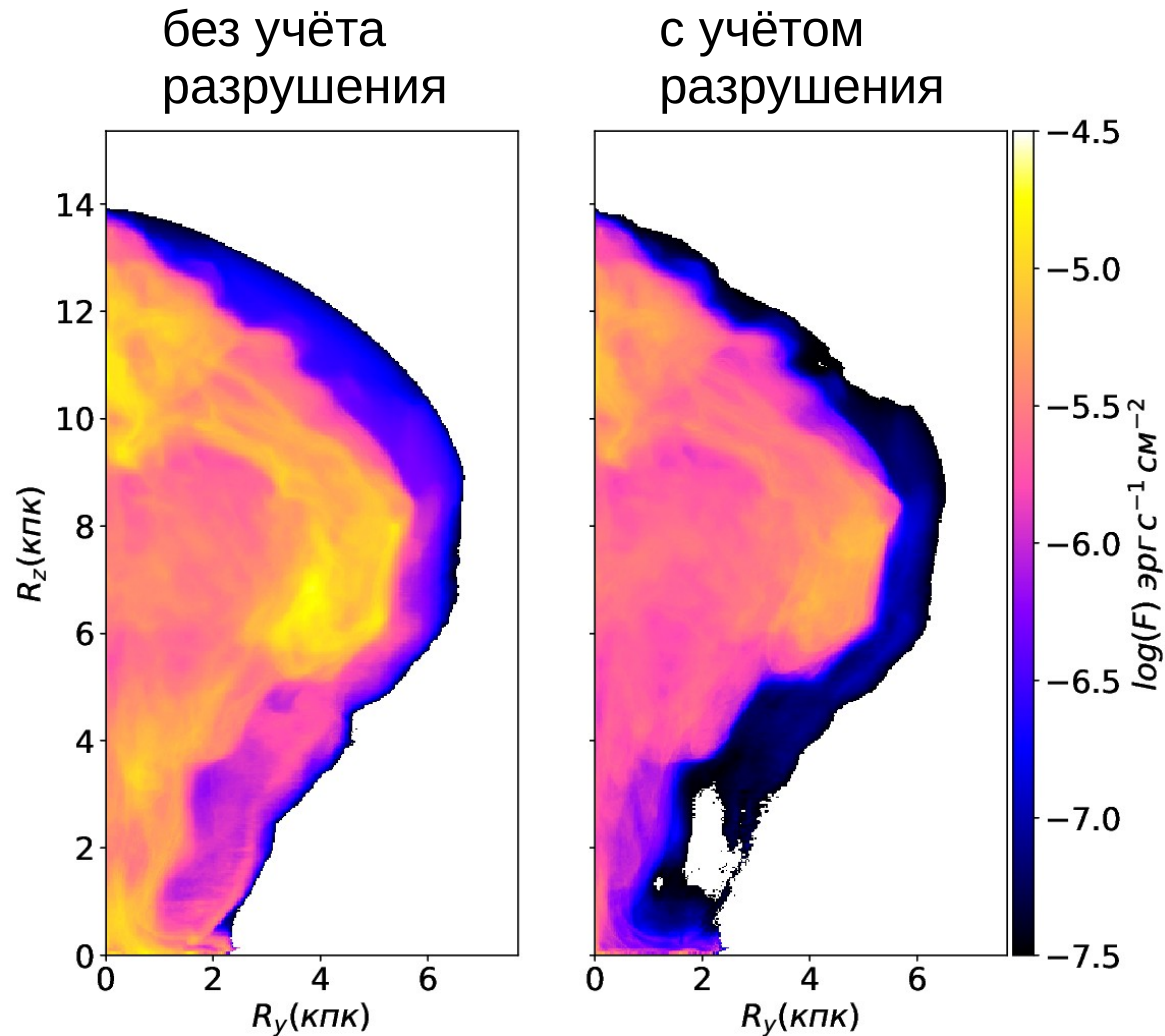


Время жизни пыли

$$\tau = \frac{a}{|da/dt|} \approx 1 \times 10^5 \left[1 + T_6^{-3} \right] \frac{(a/0.1 \mu\text{m})}{(n_H/\text{cm}^{-3})} \text{ yr}$$

Draine 2011

Влияние разрушения пыли на ИК эмиссию



- Поверхностная яркость в диапазоне от 3 мкм до 3 мм.

Выводы к Главе 4

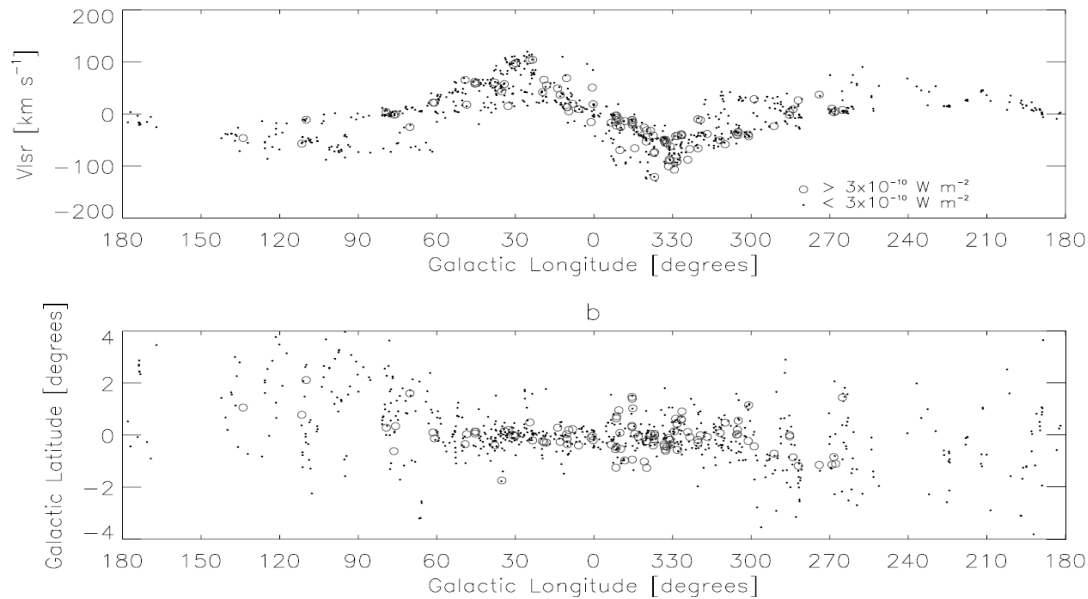
- Описан метод оценки влияния разрушения пылевых частиц нескольких размеров в горячем газе на эмиссионные свойства в ИК диапазоне.
- Рассчитаны эмиссионные характеристики пыли с учётом и без учёта разрушения пылинок в горячем газе галактического ветра

Глава 5. Горячие ветры над областями звёздообразования.

- Drozdov S.A. et al. «Bubbles and OB associations», Open Astronomy, 2022.

Постановка задачи

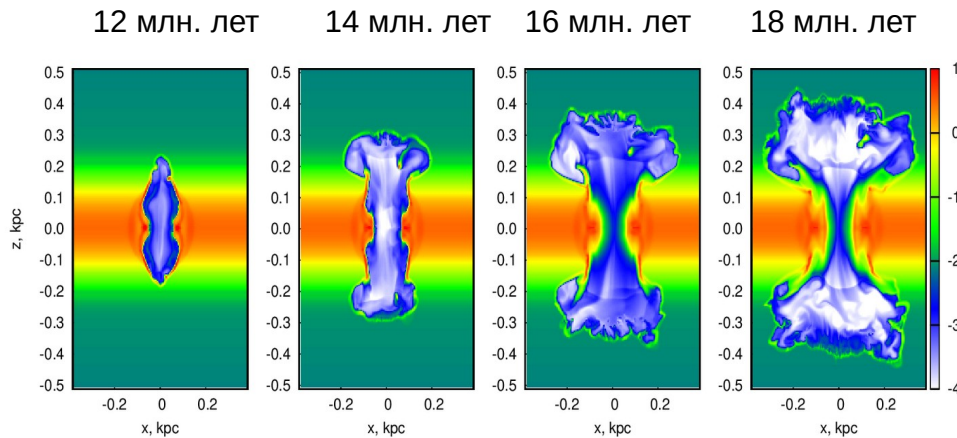
- Маломассивных скоплений много, но они трудно различимы, особенно по направлению на центр Галактики. (Krumholz, McKee 2019 ARAA)
- Часть скоплений может находиться не в плоскости диска (Bronfman et al. 2000)



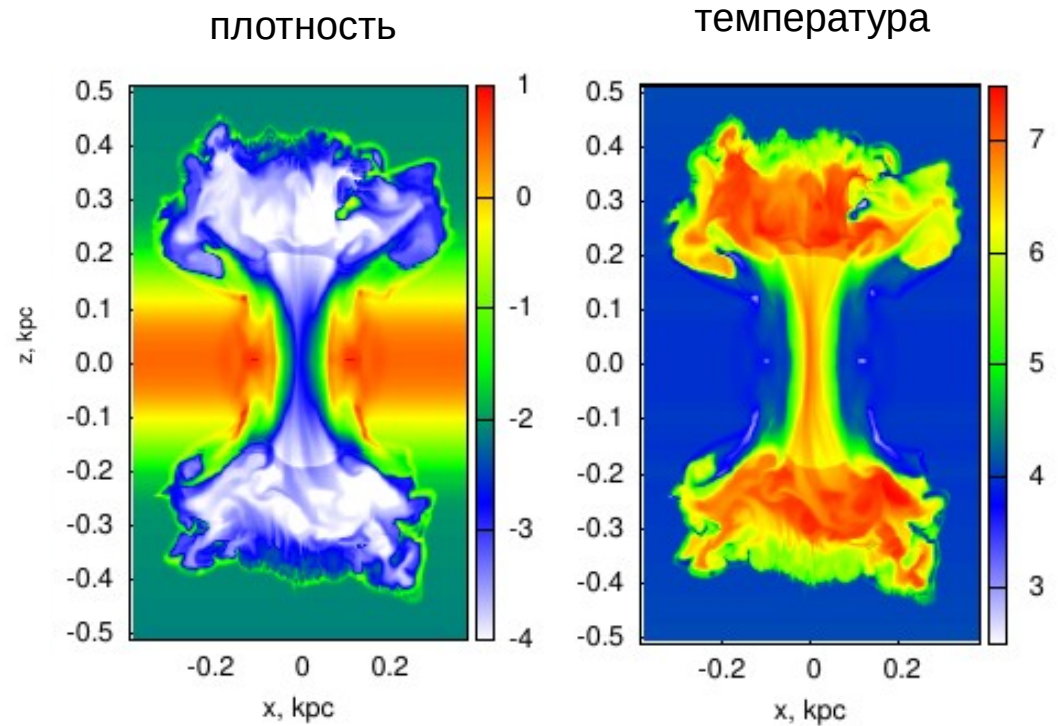
Bronfman et al. 2000

Сверхновые в маломассивных скоплениях могут формировать сверхоболочки, пыль в горячем газе которых может быть различима в ИК спектре

Результаты 3D моделирования истечения газа из области звёздообразования

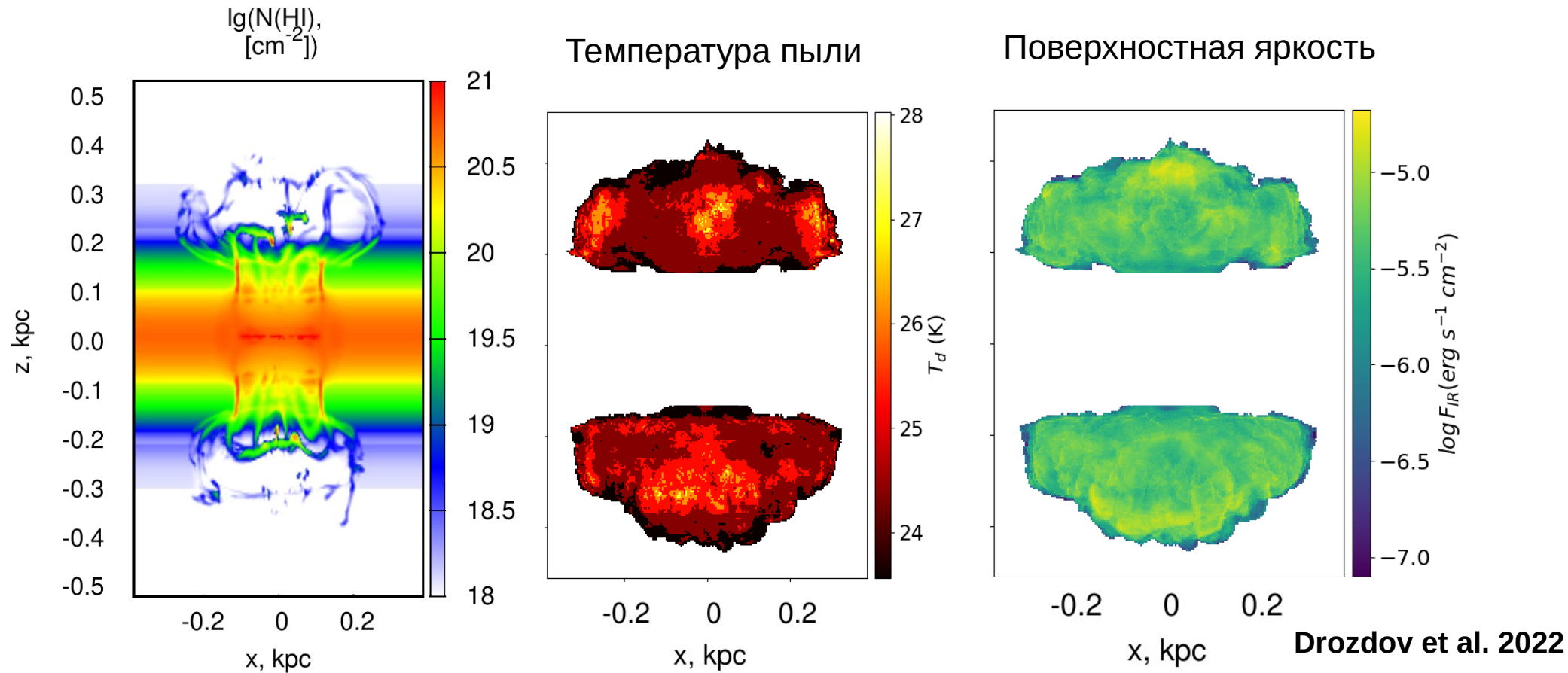


- 20 сверхновых
- 8 — 40 $M_{\text{сол}}$
- в плоскости диска галактики
- 4 пк — разрешение
- Галактоцентрическое расстояние — 3 кпк



Drozdov et al. 2022

Эмиссионные свойства



Температура пыли в диске < 20 K (эмиссия пыли в диске не показана)

3 мкм — 3 мм

Выводы к Главе 5

Проведены 3D газодинамические расчёты эволюции ветра над ОВ-ассоциацией с массой $\sim 10^3 - 10^4$ масс Солнца в диске галактики.

Построены карты излучения в ИК диапазоне для горячих пузырей над областями звёздообразования.

Показано, что по наблюдаемым эмиссионным характеристикам в ИК диапазоне такие пузыри могут быть выделены на фоне пыли, которая нагревается только диффузным межзвёздным УФ полем.

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 ($\sim 30 \text{ мкм}$) и длинных ($\sim 300 \text{ мкм}$) волнах и в цветовых характеристиках виновской части спектра.
- 2) В остывающем газе тепловой режим мелкой ($a < 300 \text{ \AA}$) и более крупной пыли различаются: мелкие пылинки на начальном этапе эволюции (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 ОВ-ассоциаций большая часть пыли сохраняется, благодаря большому различию динамического времени сверхоболочек и времени разрушения пылинок. Пузыри от коллективных вспышек сверхновых в ОВ-ассоциациях малой массы ($\sim 10^3 - 10^4$ солнечных масс) за пределами одной шкалы высоты их распределения $z_0 \sim 100 \text{ пк}$, могут достигать высоты $\sim 400 \text{ пк}$ над плоскостью Галактического диска. Их эмиссионные характеристики, в том числе неравновесной пыли, могут служить для идентификации маломассивных звездных скоплений, особенно в направлении центра Галактики ($-30^\circ < l < 30^\circ$ и $-5^\circ < b < 5^\circ$).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 работах в журналах из списка ВАК:

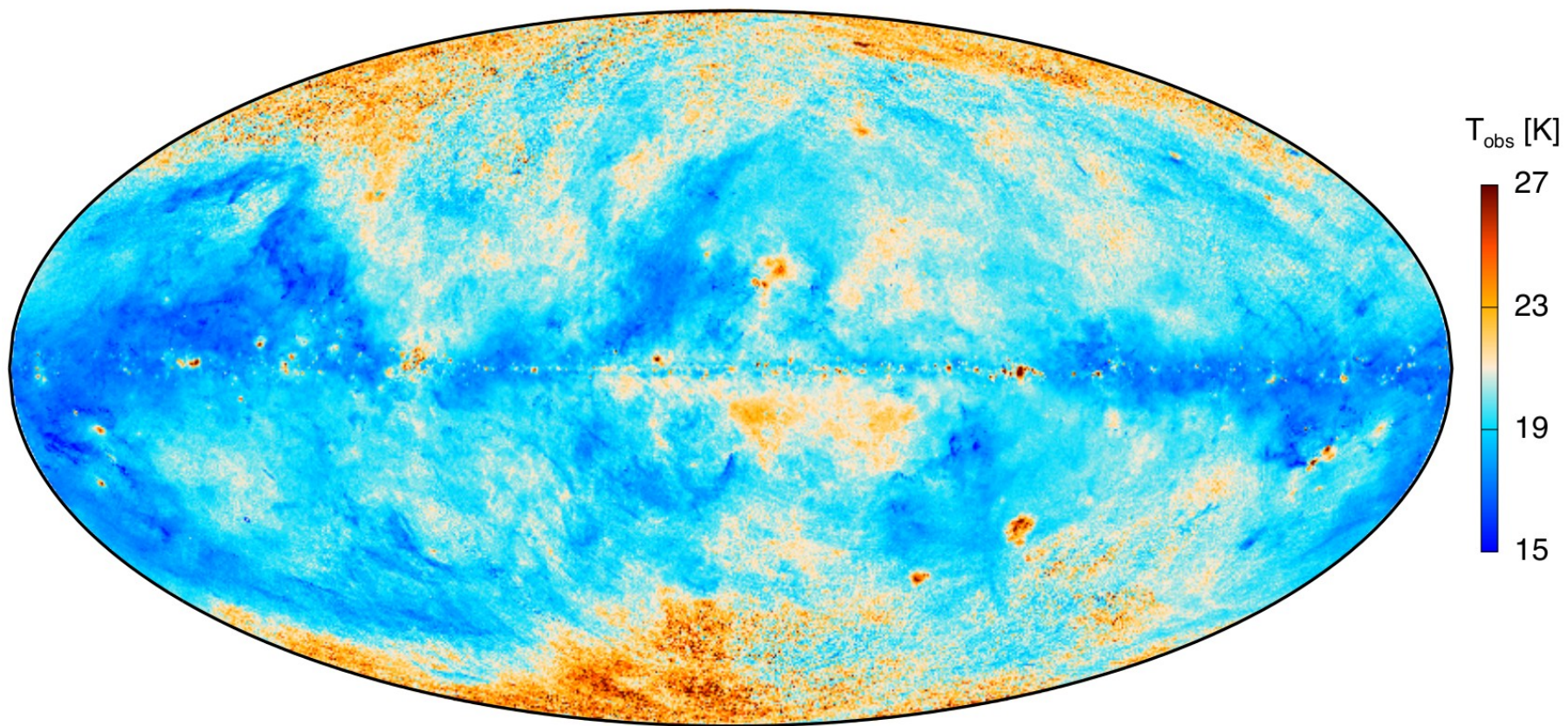
- Drozdov S.A. Shchekinov Yu.A., «Temperature of Dust in Hot Plasmas», Astrophysics, 2019.
- Drozdov S.A., «Emission Spectrum of Dust in a Cooling Gas», Astrophysics, 2021.
- Drozdov S.A., Vasiliev E.O., «Dust Destruction in Hot Gas Dynamic Flows», Bulletin of the LPI, 2021.
- Drozdov S.A., Vasiliev E.O., Ryabova M.V., Shchekinov Yu.A., Nath B.B. «Bubbles and OB associations», Open Astronomy, 2022.

Апробация

Результаты представлены на 14 конференциях из которых 3 международных

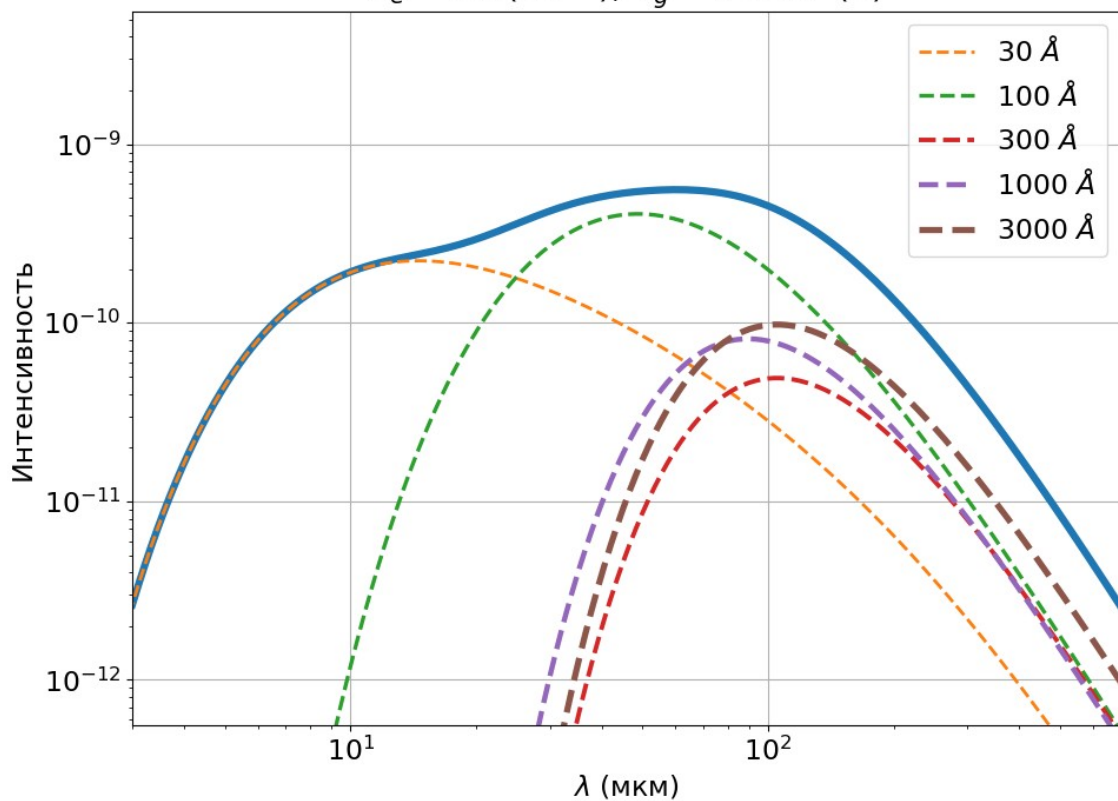
- Актуальные проблемы внегалактической астрономии. ПРАО АКЦ, г. Пущино, 18-21.04 2017, «Эмиссионный спектр остатка сверхновой в области субмиллиметрового минимума» **(устный доклад)**.
- Актуальные проблемы внегалактической астрономии. ПРАО АКЦ, г. Пущино, 24-27.04 2018, «Спектральные особенности тепловой эмиссии многотемпературной пыли в центральной молекулярной зоне Галактики» **(устный доклад)**.
- 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).
- Актуальные проблемы внегалактической астрономии. ПРАО АКЦ, г. Пущино, 24-26.04 2019, «Особенности эмиссии пыли в горячей плазме» **(устный доклад)**.
- 21 Gamow International Conference, Odessa, Ukraine, 15-21.08 2019. «Dust temperature in hot plasma» (постер).
- Diversity of the local Universe. SAO RAS, 30.09-4.10 2019, «Emission characteristics of dust in cooling plasma» (постер)
- Современная звёздная астрономия. САО РАН, п. Нижний Архыз 7-11.10 2019. «Моделирование спектра в субмиллиметровой и ИК области молодого звёздного скопления» **(устный доклад)**.
- Планетообразование и звёздообразование. АКЦ ФИАН, г. Москва, 12-13.11. 2019. «Модель стохастического нагрева пыли за фронтами ударных волн» **(устный доклад)**.
- Планетообразование и звёздообразование. АКЦ ФИАН, г. Москва, 10-11.11. 2020. «Диагностика этапов жизни звёздных скоплений в ИК диапазоне» **(устный доклад)**.
- Конференция «Идеи С.Б. Пикельнера и С.А. Каплана и современная астрофизика». 8-12.02 2021. г. Москва, ГАИШ МГУ. «Слабый галактический ветер в спокойных галактиках» **(устный доклад)**.
- 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)**.
- Всероссийская астрономическая конференция. 23-28.08 2021. ГАИШ МГУ, г. Москва. «Эмиссия пыли в областях звёздообразования» **(устный доклад)**.
- Планетообразование и звёздообразование. АКЦ ФИАН, г. Москва, 23-24.11. 2021. «Эмиссия пыли в областях звёздообразования» **(устный доклад)**.
- 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 ОБ-ассоциаций» **(устный доклад)**.

Спасибо!

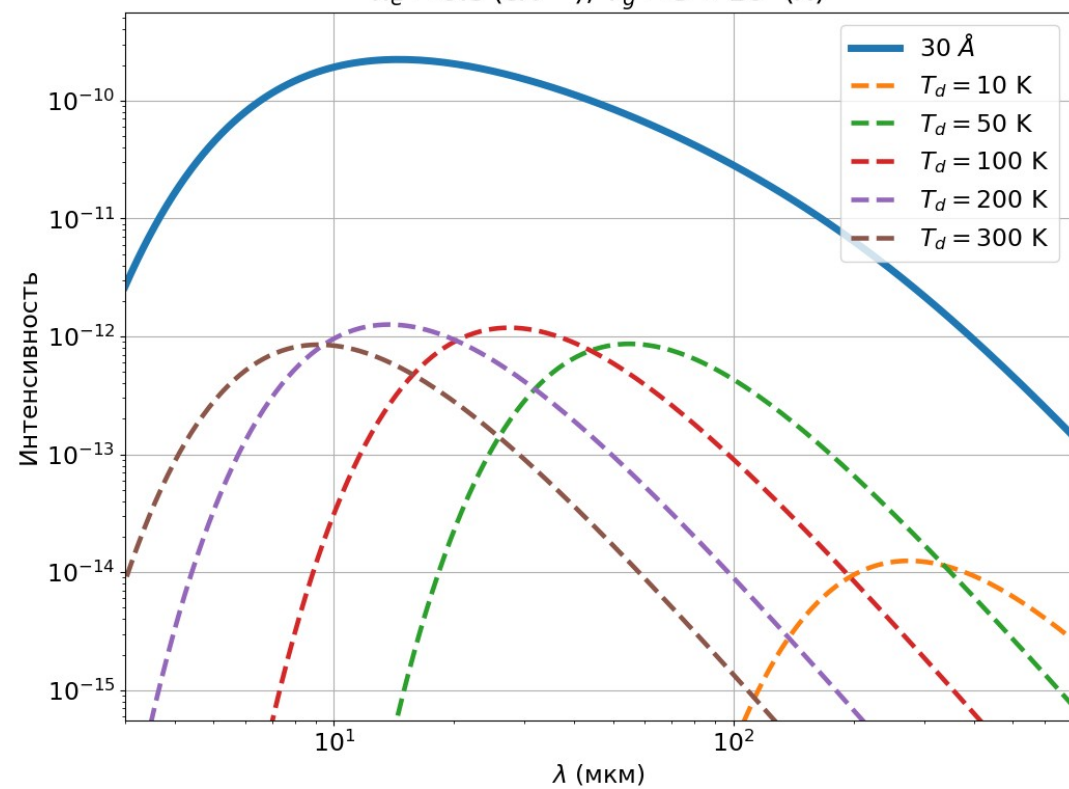


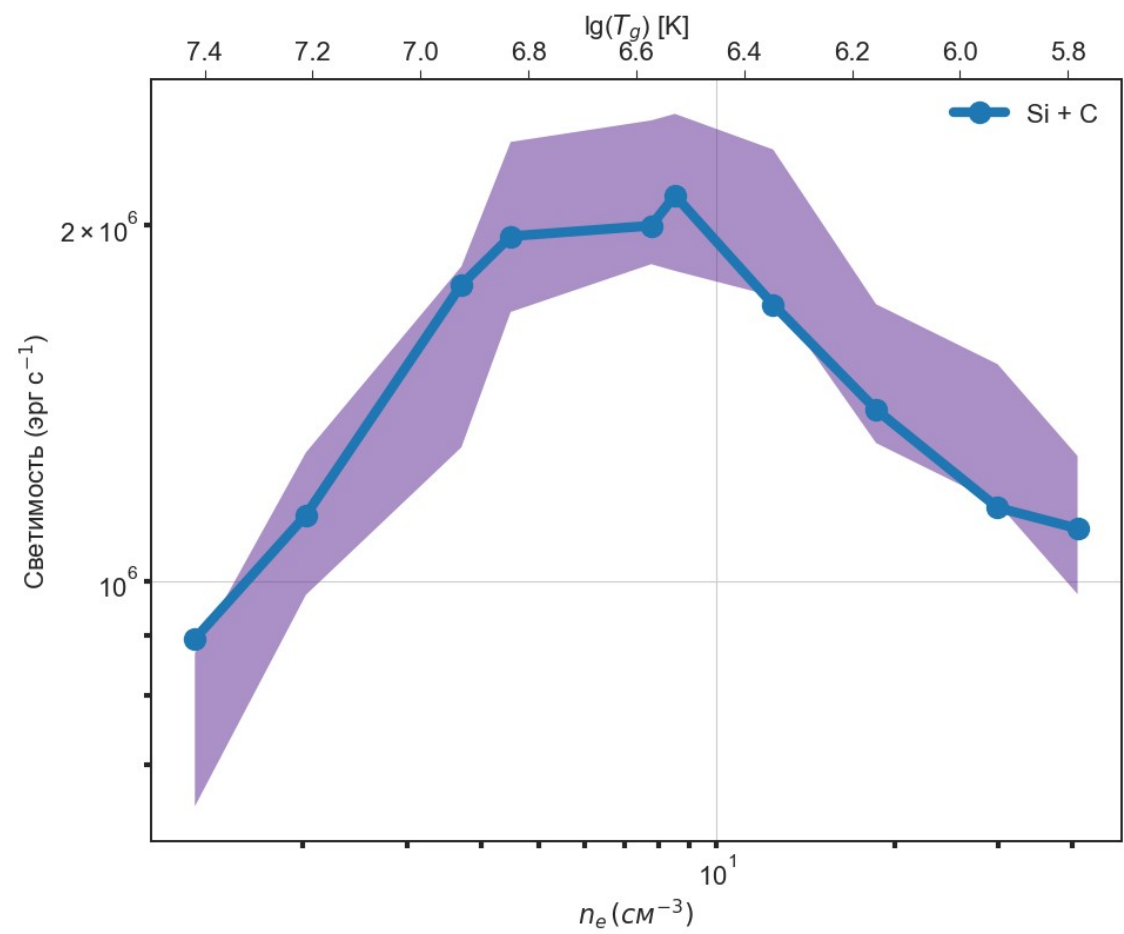
Planck Collaboration
2014

$n_e = 0.3 \text{ (cm}^{-3}\text{)}; T_g = 3 \times 10^6 \text{ (K)}$



$n_e = 0.3 \text{ (cm}^{-3}\text{)}; T_g = 3 \times 10^6 \text{ (K)}$





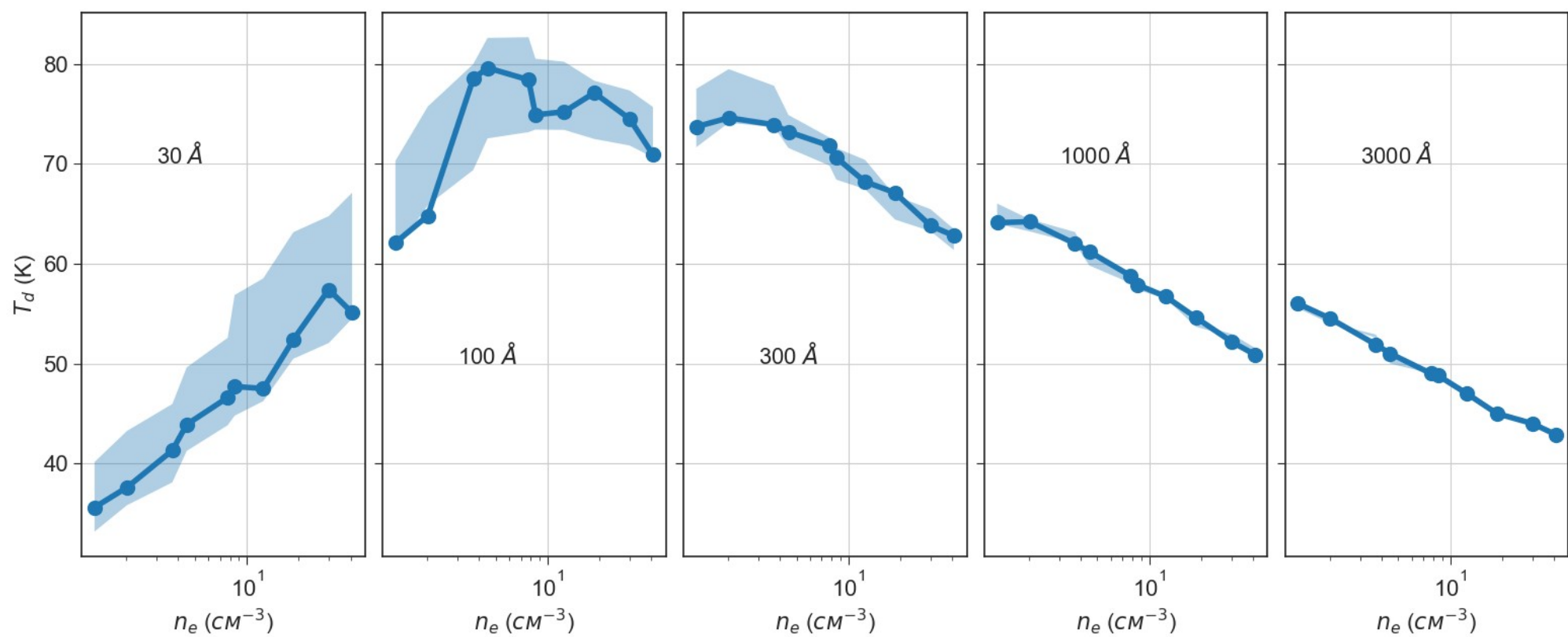
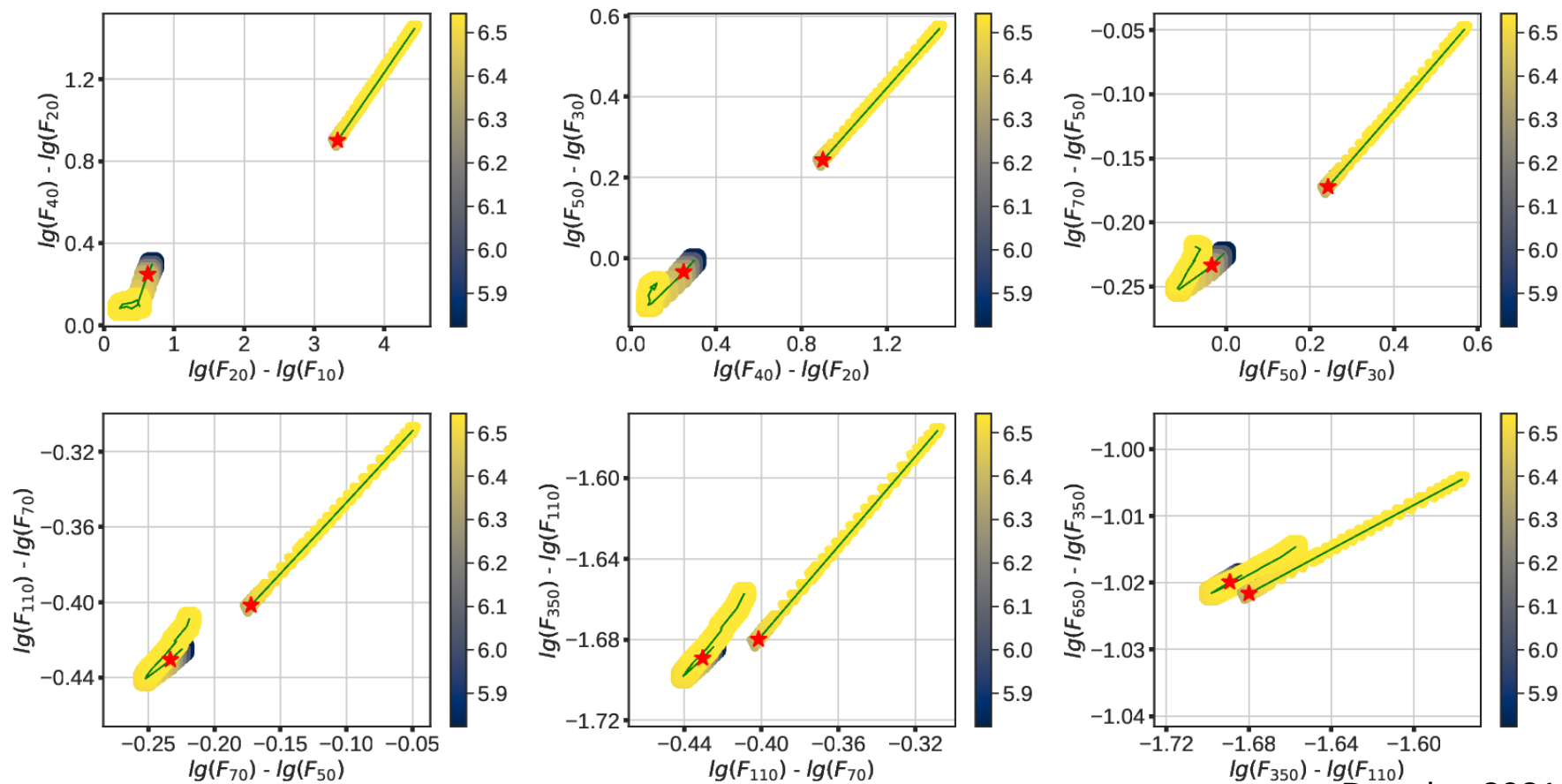


Диаграмма «цвет-цвет» для остывающего газа

жирная жёлтая линия – пыль, нагреваемая стохастически

тонкая жёлтая линия – «равновесная»



Drozдов 2021