



Разрушение межзвездной пыли и ее эмиссионные свойства в остатках сверхновых

С.Ю. Дедиков, Е.О. Васильев

АКЦ ФИАН

Баланс между произведенной и разрушенной пылью в МЗС
(*Mattsson 2021; Kirchschlager et al. 2022*)

Разрушение

- за фронтами сильных ударных волн: $v > 150$ км/с (например, *Draine & Salpeter 1979*)
- тепловое и кинетическое разрушение

Темп разрушения $0.1-0.01 M_{\odot}/\text{год}$

Образование

- при вспышках СН и ветрах $0.001 M_{\odot}/\text{год}$ при скорости $30-50 M_{\odot}/\text{год}$ (*Draine 2009*)

Расхождение между темпами образования и разрушения

- на $z \sim 5$ (*Todini & Ferrara 2001*) производится SNII, СН – сильные УВ
- на $z \sim 1-5$ избыток пыли в ярких ИК-галактиках (*Michailowski et al 2010, Dunne et al 2011*)

Совместная динамика «газ+пыль»

газ: 3D TVD MUSCL Hancock

пыль: макрочастицы, взаимодействие с газом

Распределение газа:

однородное

неоднородное:

логнормальное распределение плотности

Колмогоровский спектр (5/3)

дисперсия σ , минимальный масштаб k_{\min}

Фоновая пыль:

полидисперсная, MRN 0.003-0.3 мкм, 11 размеров

Разрушение пыли:

тепловое и кинетическое испарение (Draine & Salpeter 1979, Nozawa et al 2007)

Начальные условия:

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

неравновесное охлаждение (Vasiliev 2013),

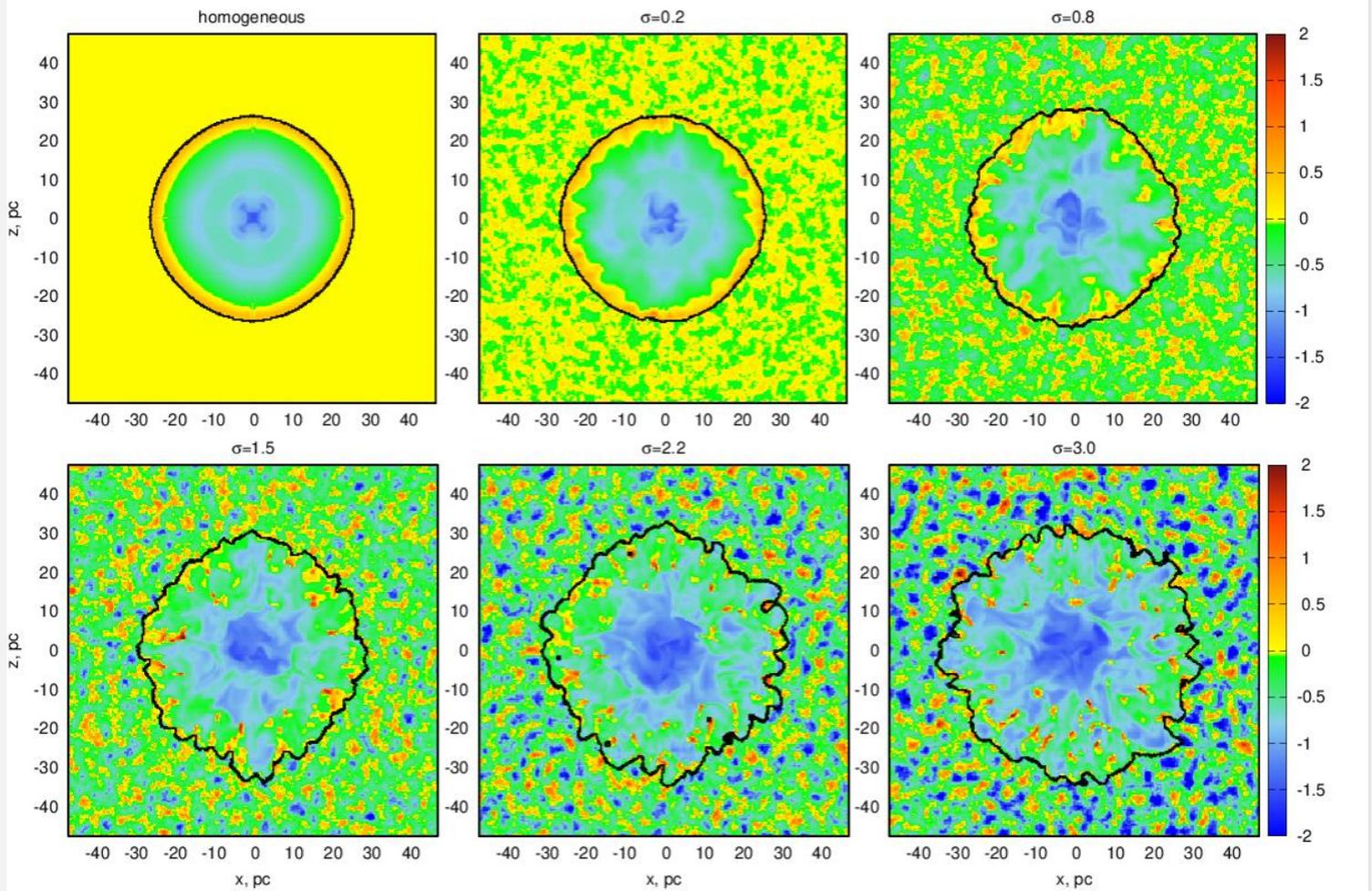
сетка (96 пк)³, разрешение 0.375 пк,

$M_{\text{dust}}/M_{\text{gas}} = 10^{-2}$,

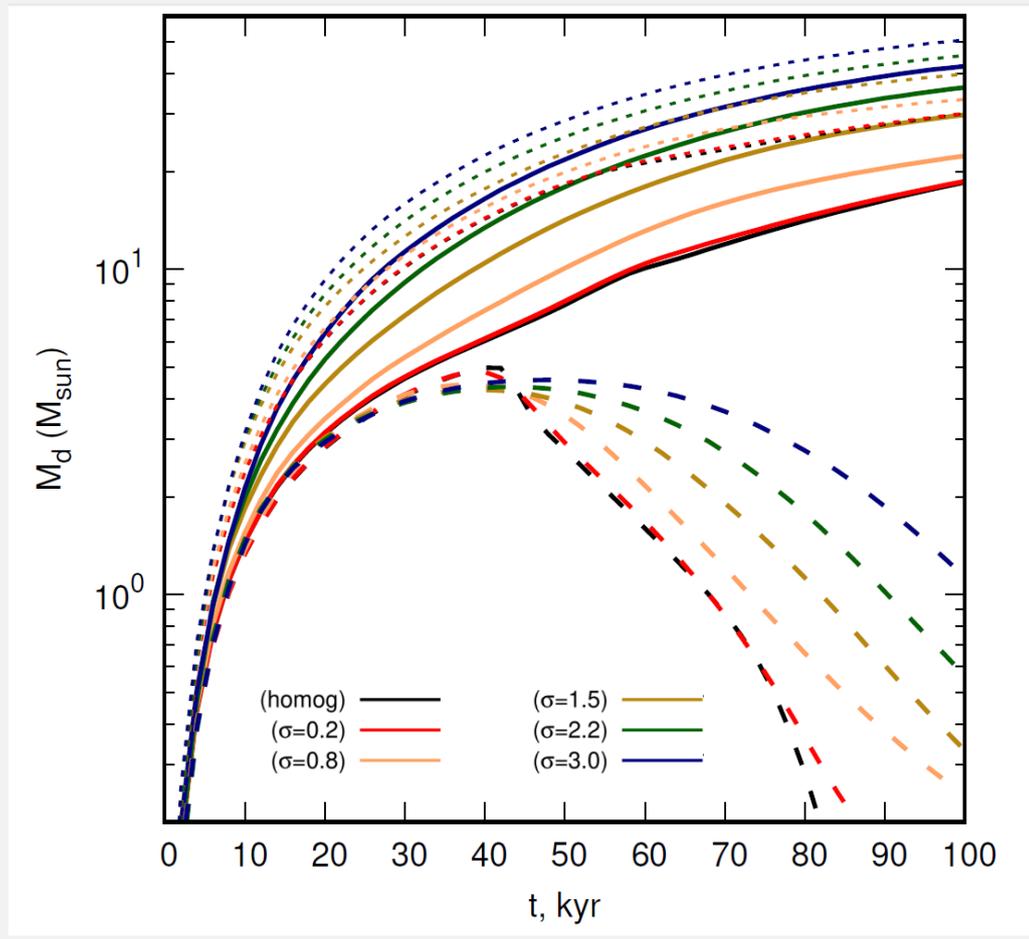
энергия СН 10^{51} эрг,

число частиц до 200 млн.

2D-срезы плотности

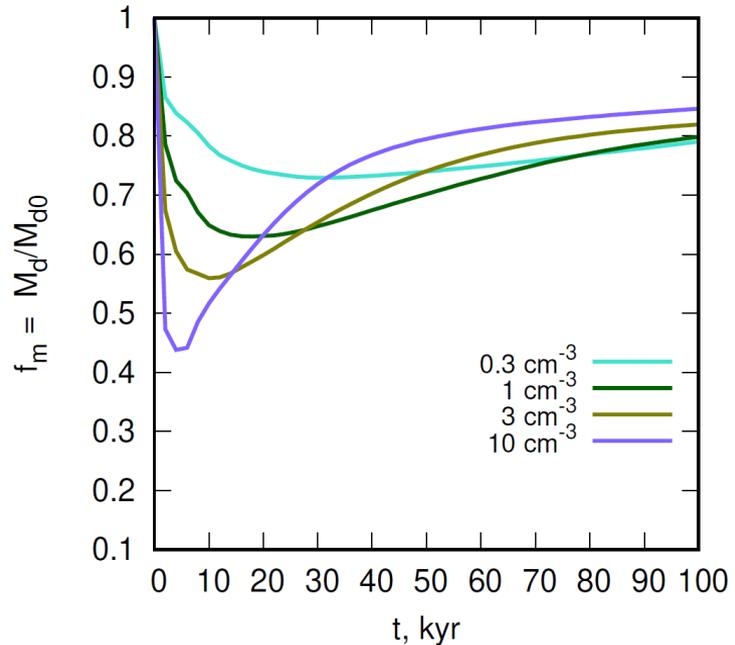
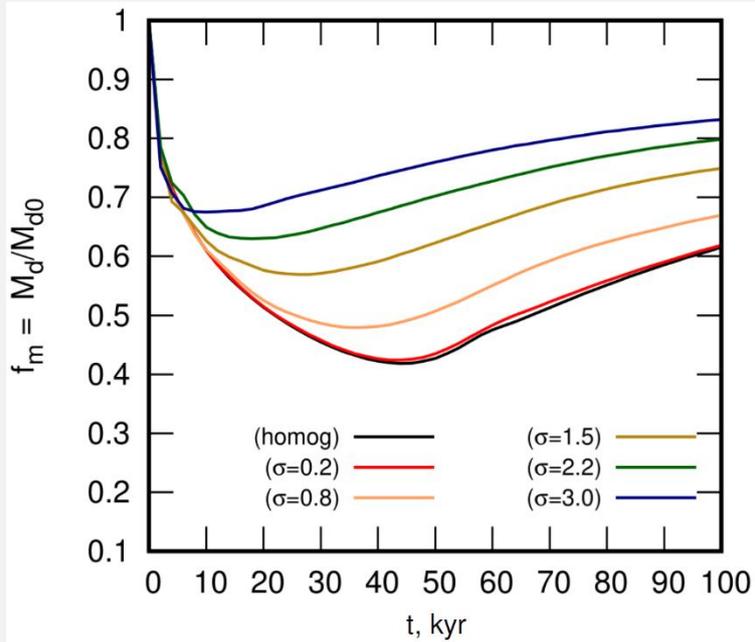


Эволюция массы пыли



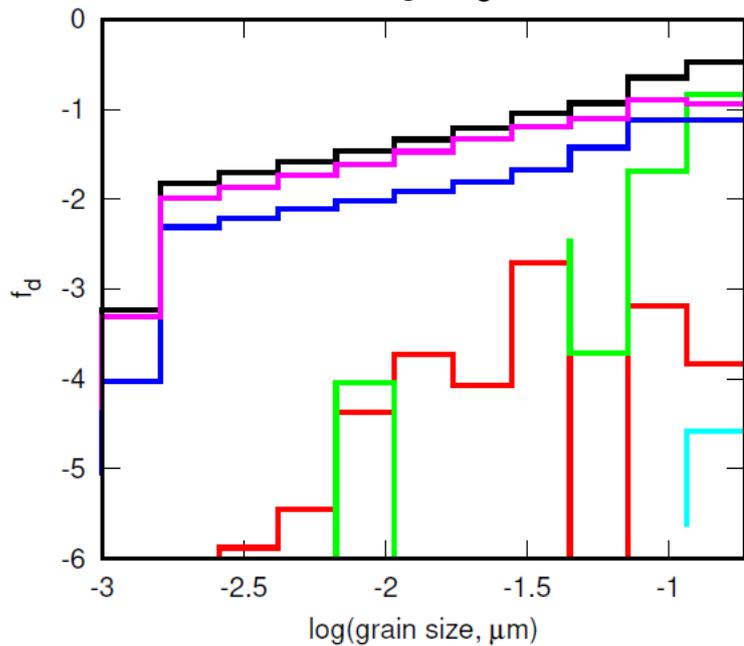
SD & EV 2025 (NewA)

Эволюция массы пыли

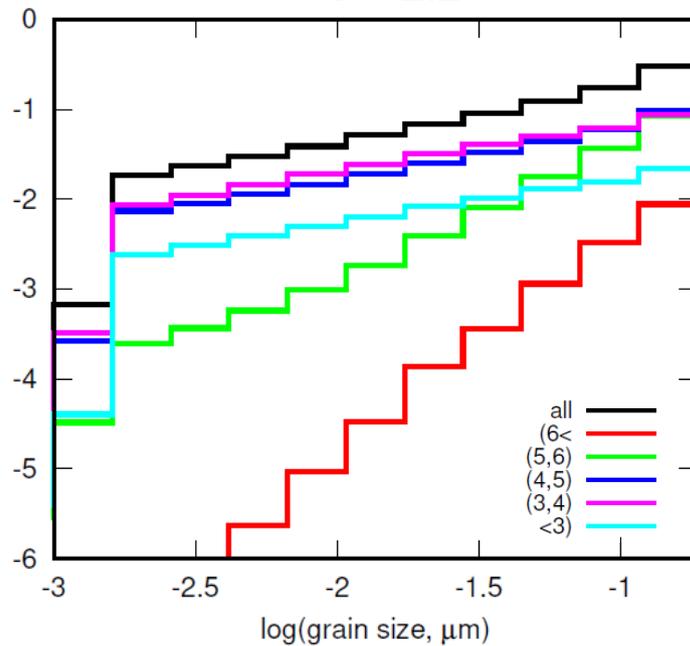


Распределение по размерам

$\sigma = 0$

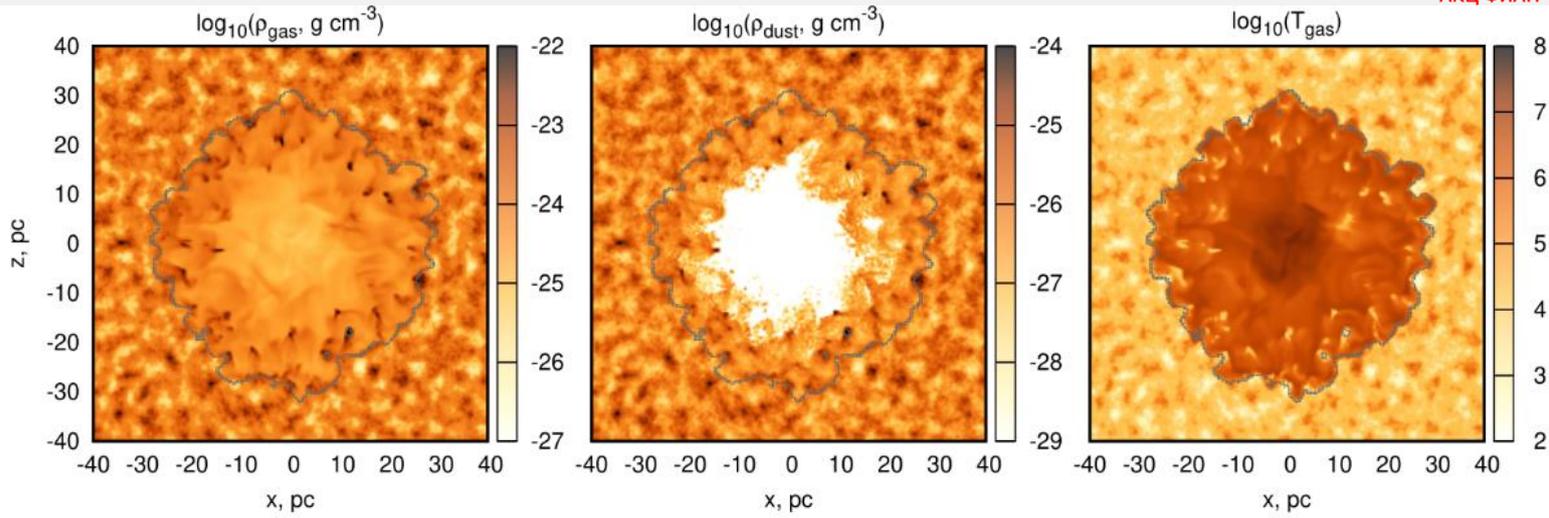


$\sigma = 2.2$

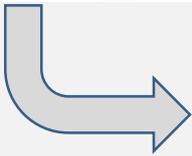


SD & EV 2025 (NewA)

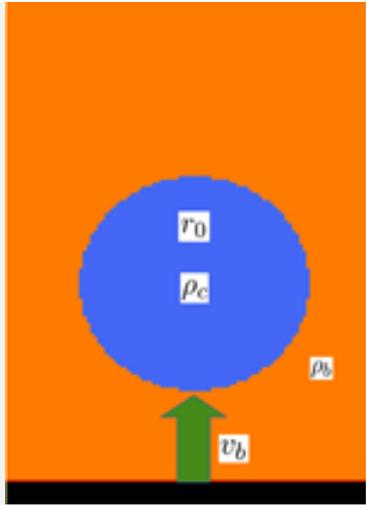
Пыль во фрагментах



Drozdov, SD & EV 2025 (ABull)



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



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

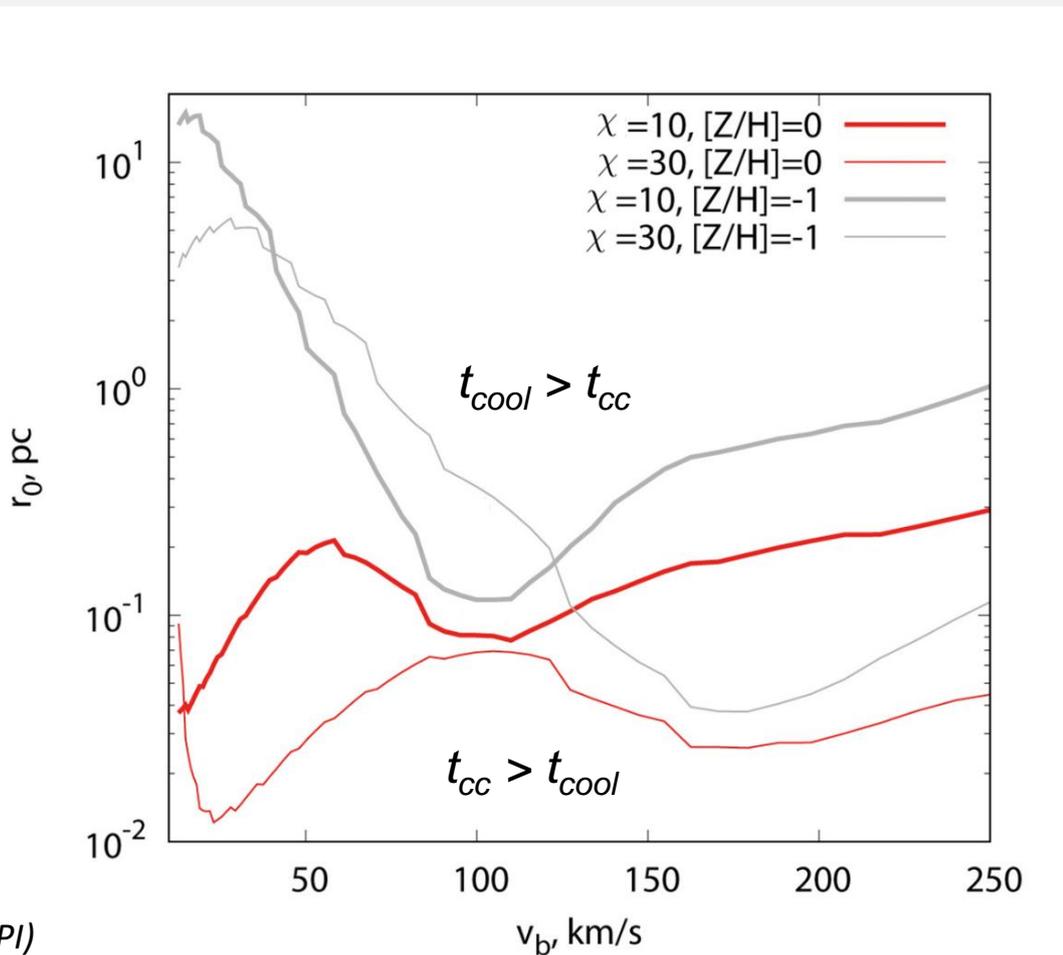
время прохождения УВ по облаку
или время разрушения облака

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

время охлаждения

Взаимодействие ударной волны с облаком

«радиус облака — скорость УВ»

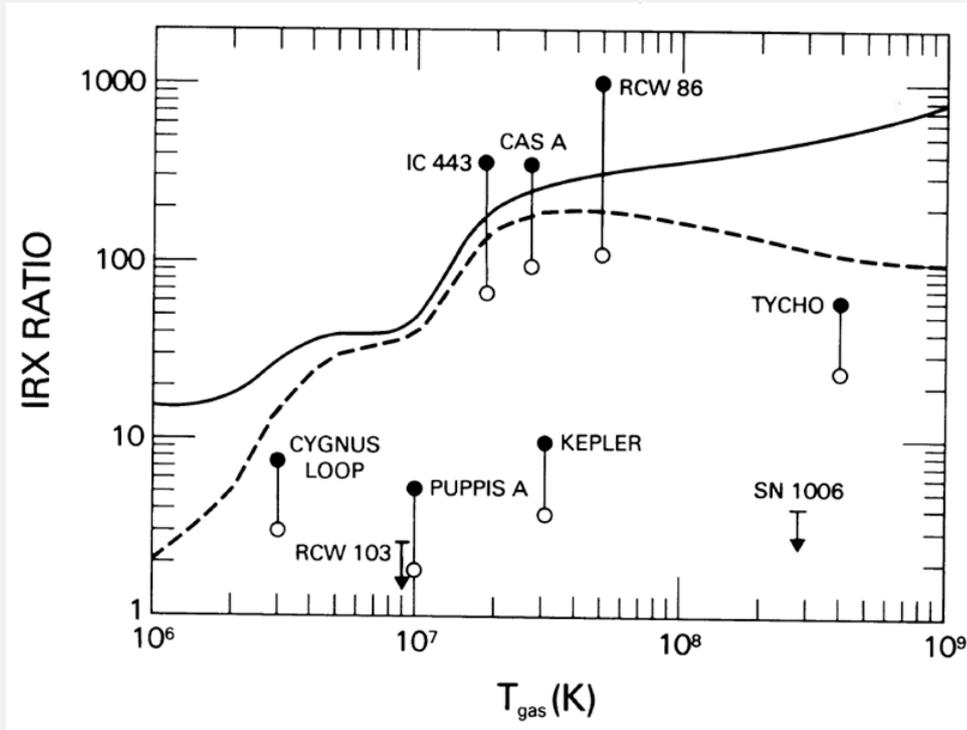


Охлаждение на пыли

соотношение между излучением пыли и горячей плазмы

$$\gamma(T) = \Lambda_d(T) / \Lambda(T) . \quad \text{Dwek 1987}$$

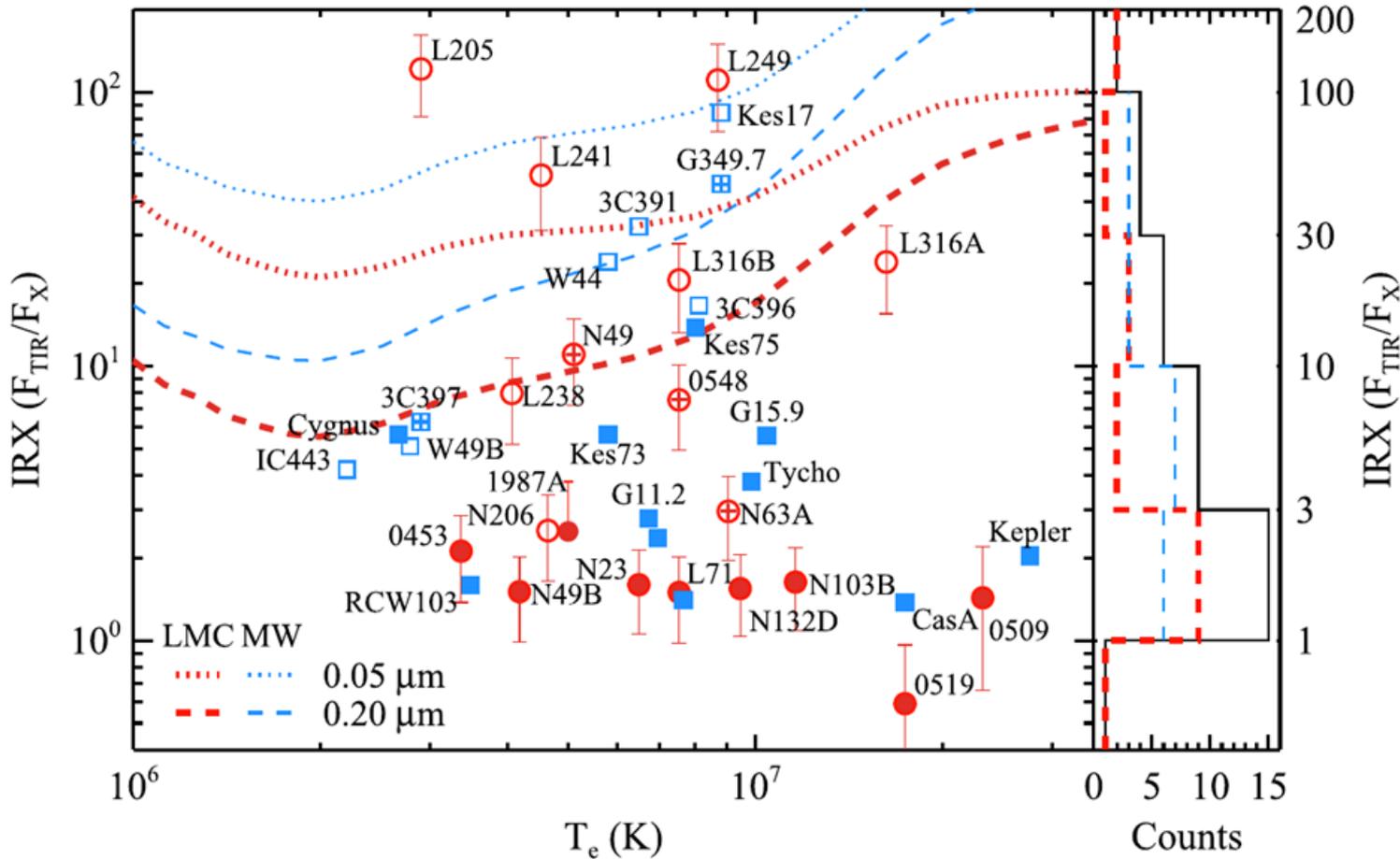
InfraRed / X-ray ratio = IRX



IRAS & Einstein

Dwek et al 1987

Охлаждение на пыли

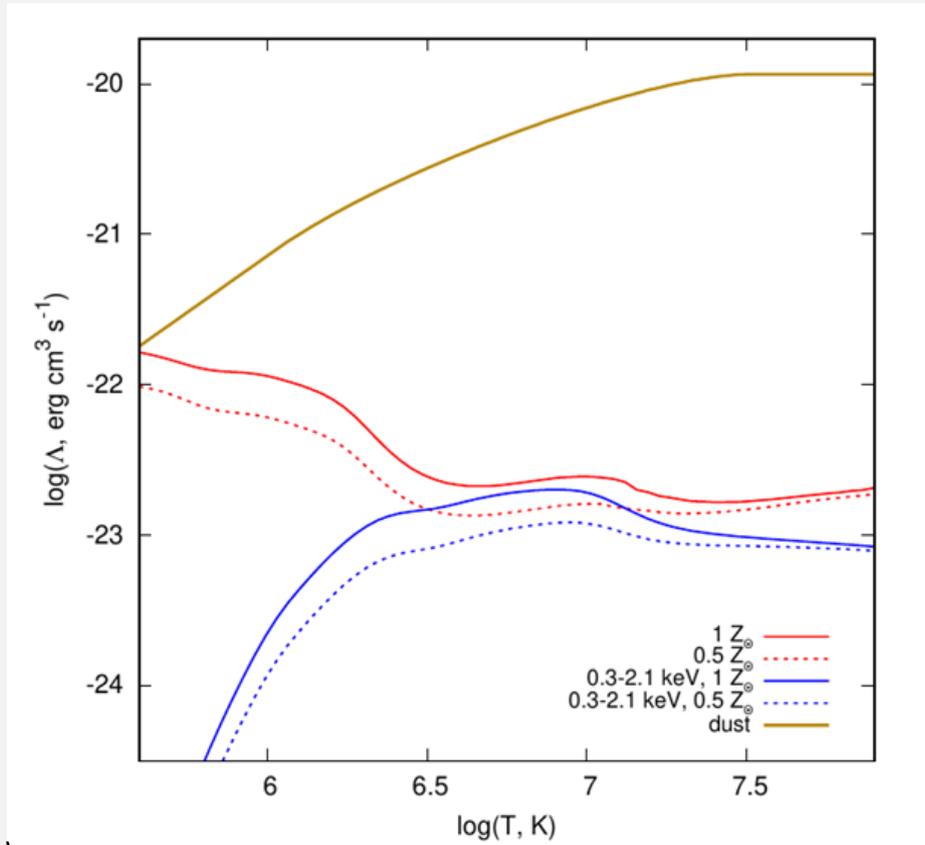


Охлаждение на пыли

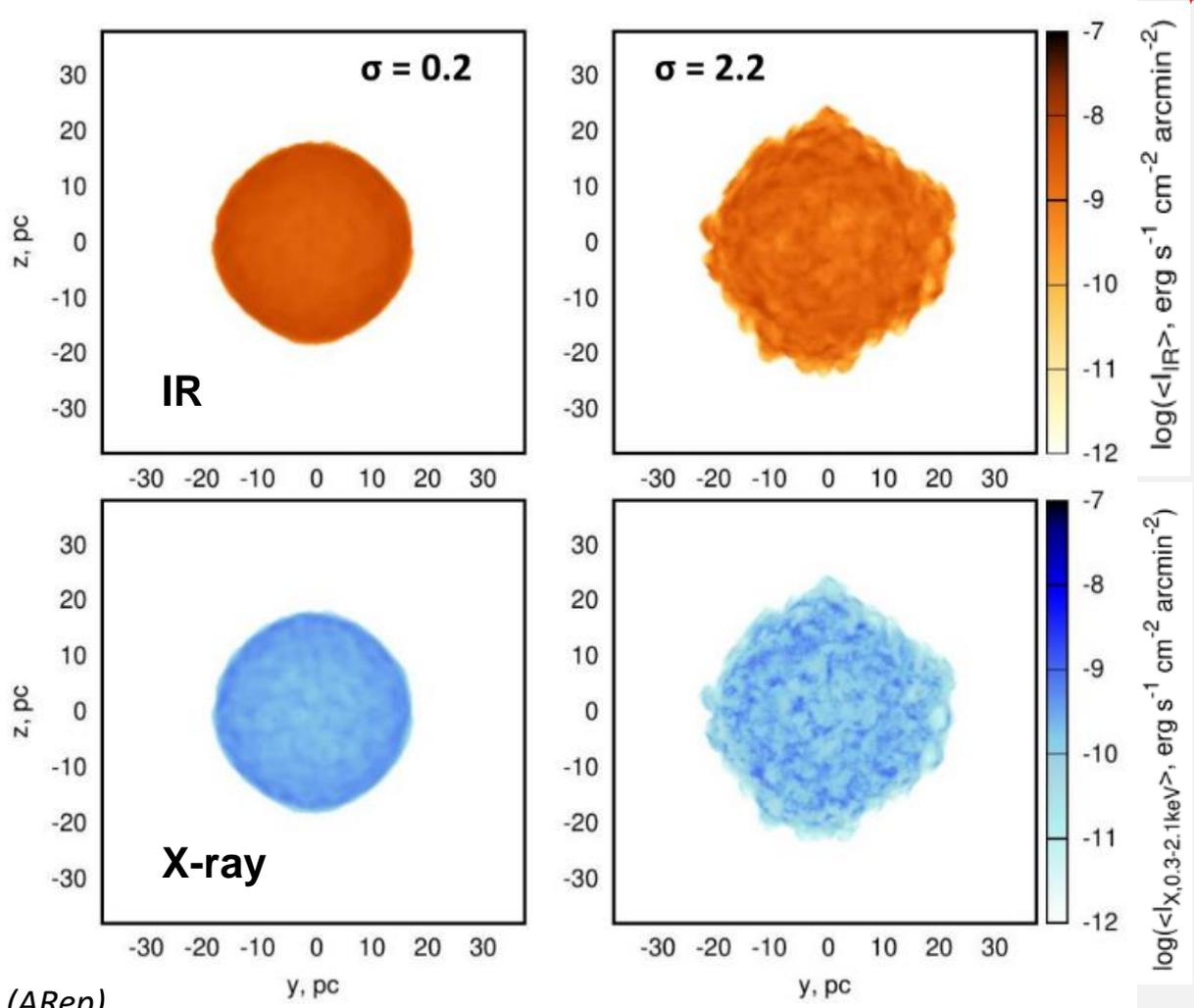
$$\frac{\partial E_{gas}}{\partial t} + \dots = \dots - L_{d,IR}$$

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

Dwek & Arendt 1992



Эмиссия остатка

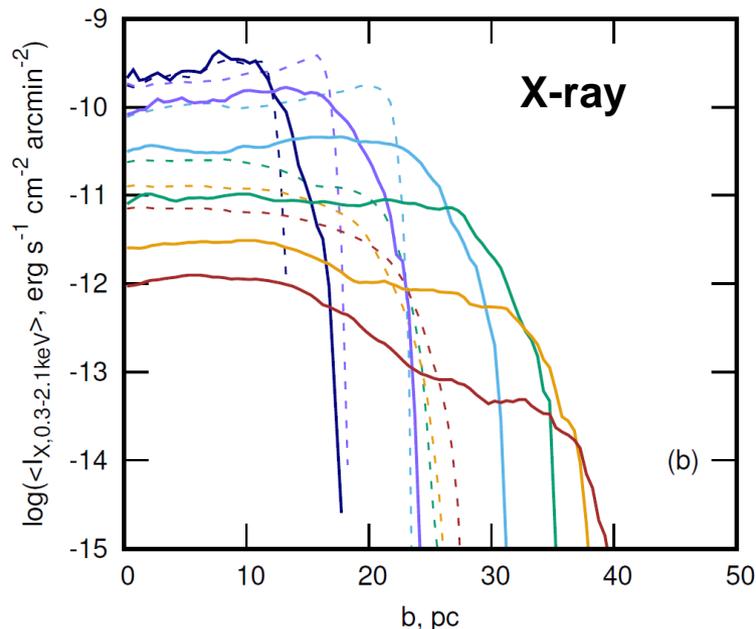
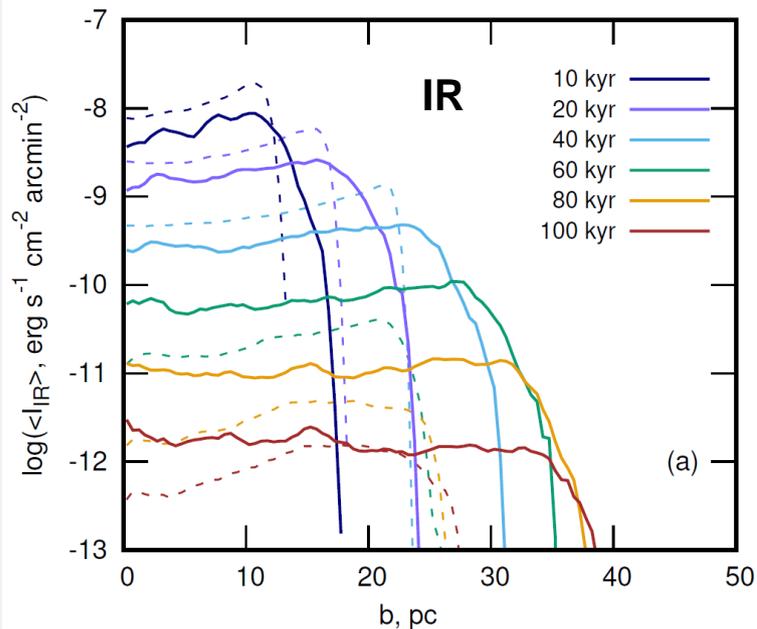


Эмиссия остатка

Рассмотрим распределения величин $A(y, z)$ вдоль луча зрения в направлении x , усредненных по кольцевым слоям с прицельным радиусом b :

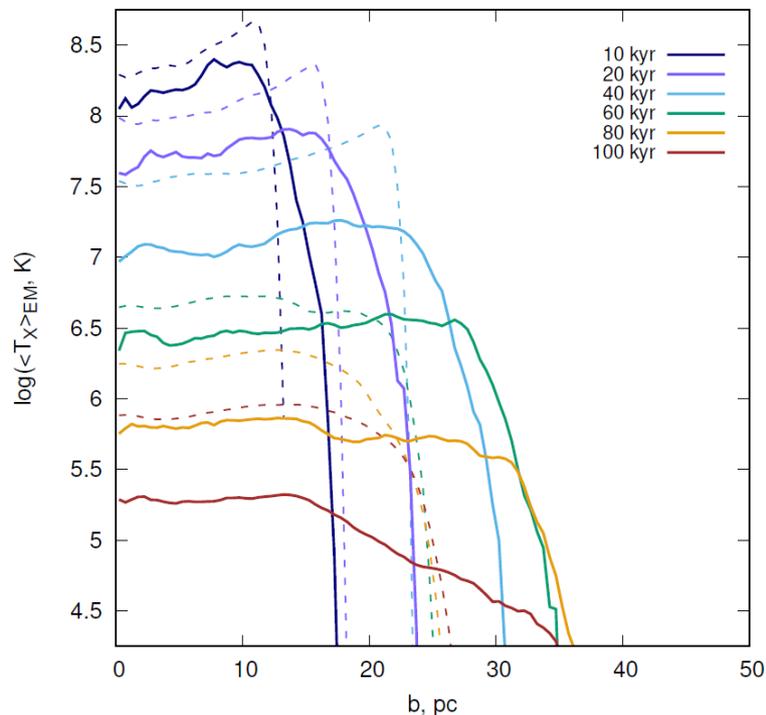
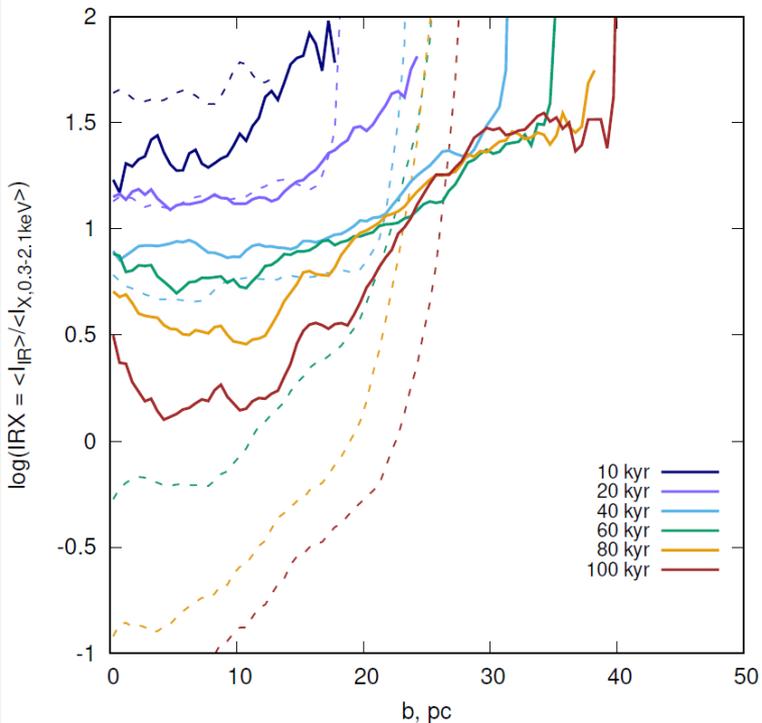
$$\langle A(b) \rangle = \frac{\sum A(y, z) \Delta S(b)}{\sum \Delta S(b)}$$

где $b^2 = (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2$, $(y_0, z_0) \equiv (0, 0)$ – координаты места взрыва СН, $\Delta S(b)$ – площадь кольца.

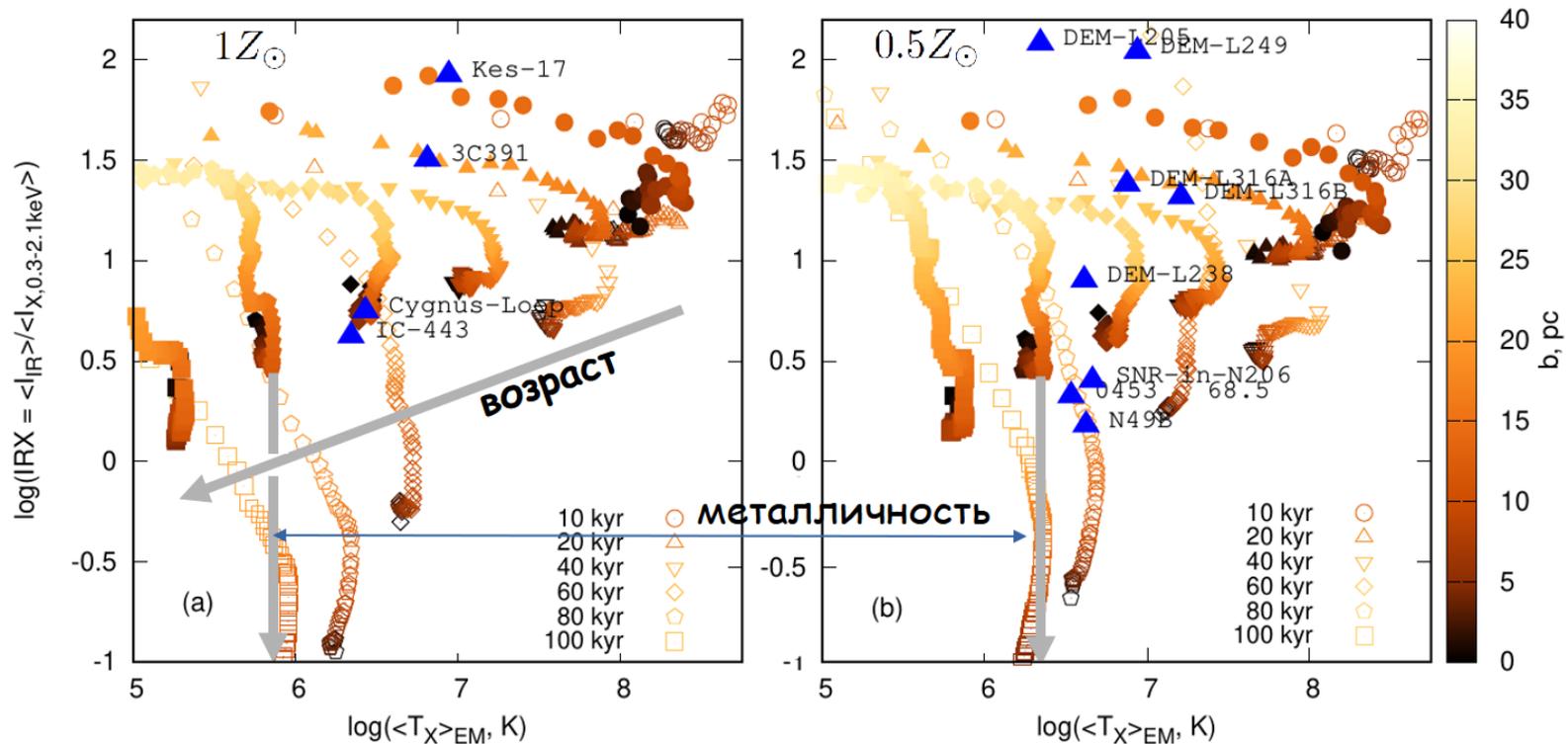


$$IRX \equiv L_{IR}/L_X$$

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



Соотношение T_X – IRX



Заключение

- Неоднородности среды способствуют сохранению (не разрушению) пылевых частиц в остатках сверхновых и, в целом, за фронтами ударных волн.
- Эффективность разрушения пыли в облаках зависит от того, является облако радиационным или адиабатическим
- Величина IRX в 3 – 30 раз изменяется в зависимости от прицельного параметра в остатке СН и его возраста
- Эволюция области значений для остатка СН на диаграмме $T_x - IRX$ определяется началом радиационной фазы

Спасибо за внимание!