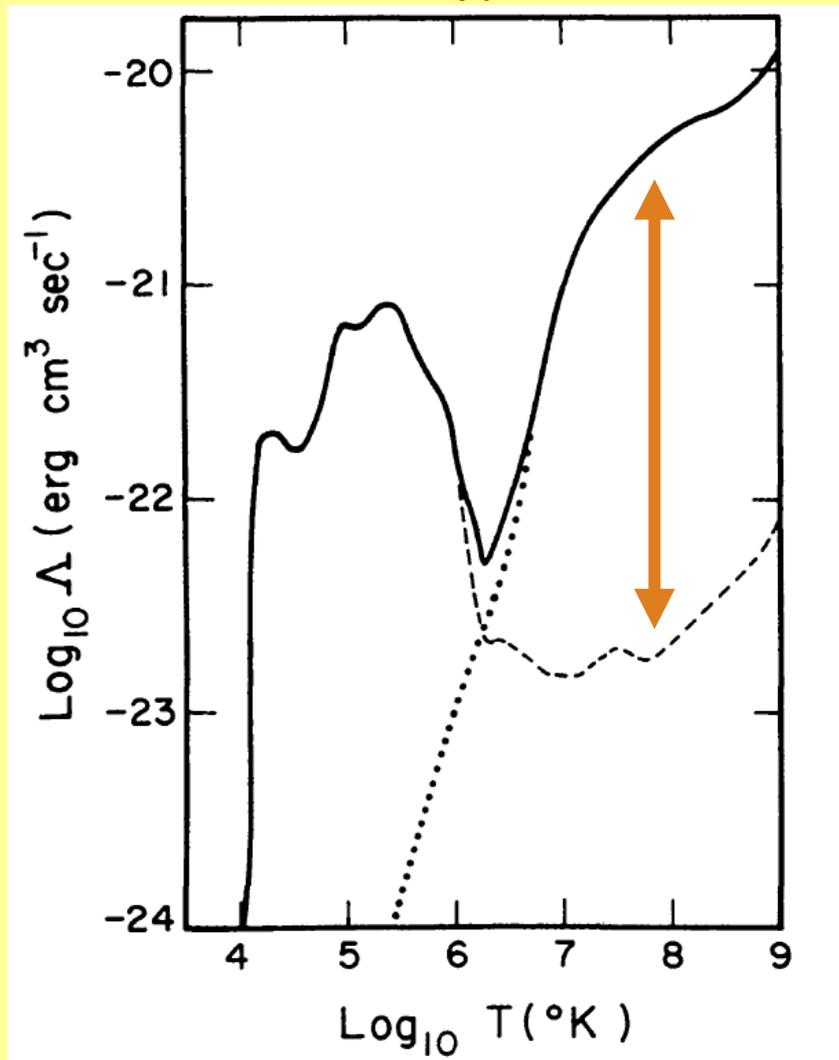


Инфракрасное и рентгеновское излучение остатка сверхновой в неоднородной среде

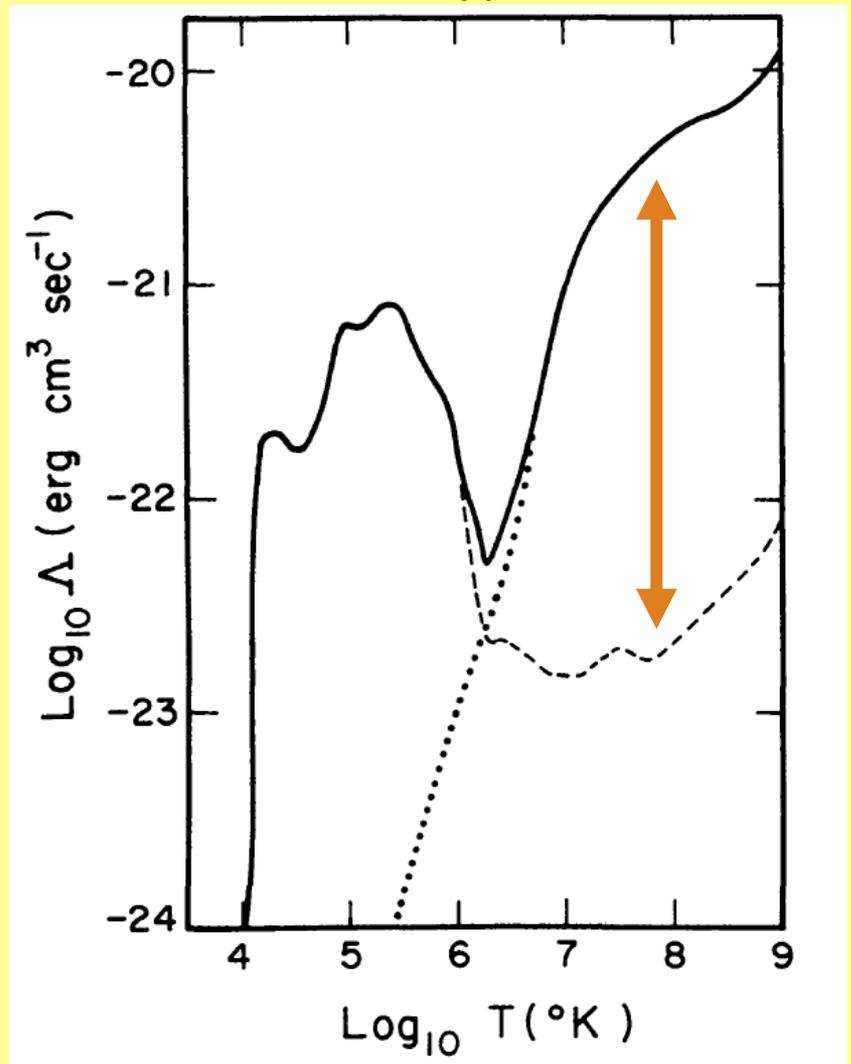
Е.О. Васильев, С.Ю. Дедиков
АКЦ

охлаждение



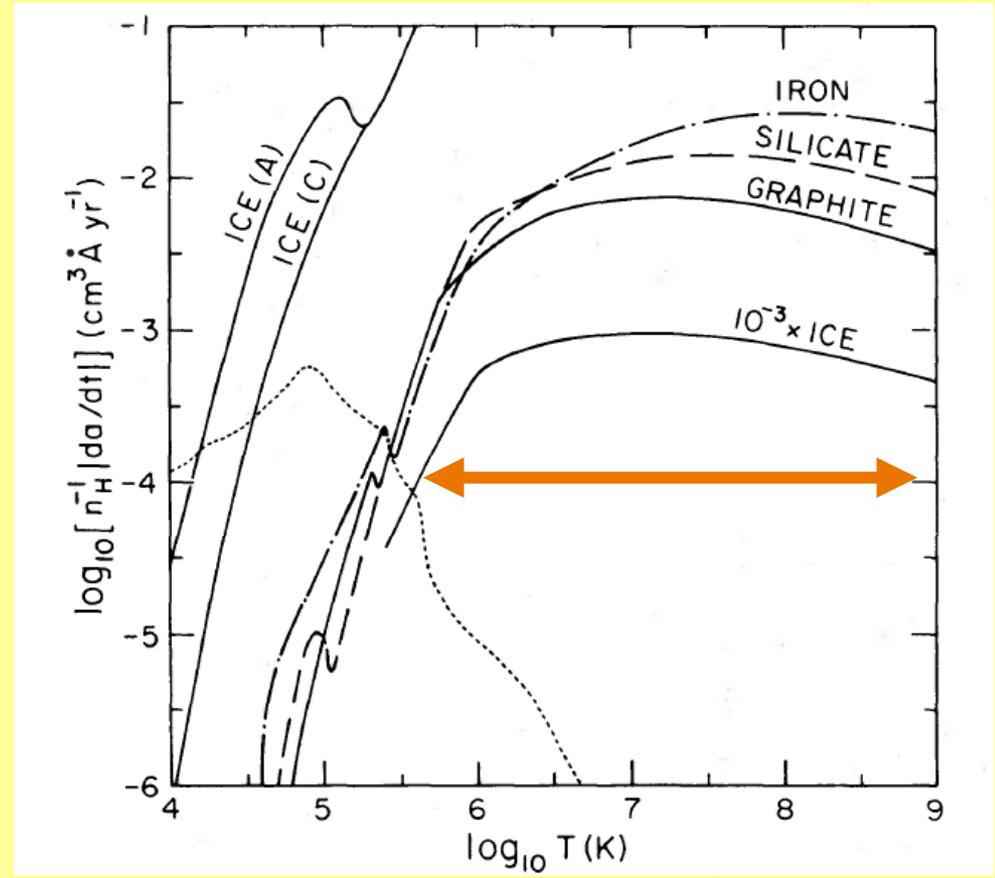
Ostriker & Silk 1973

охлаждение



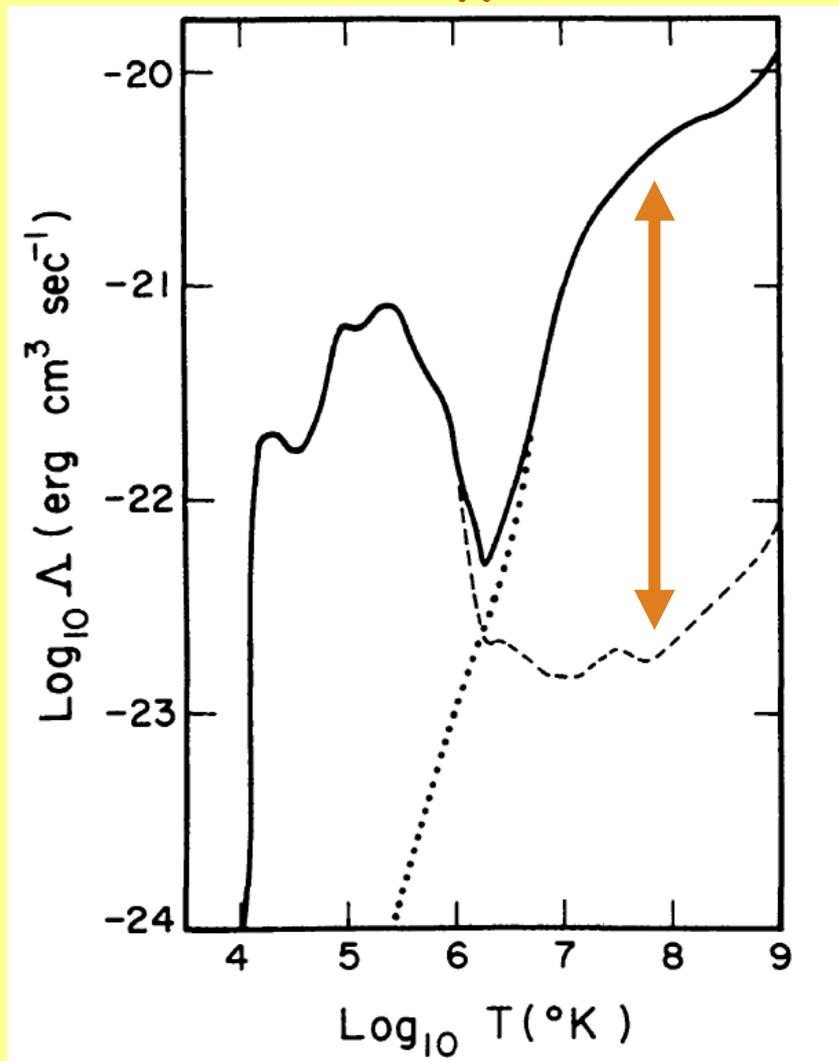
Ostriker & Silk 1973

разрушение при $T > 10^6$ K
(тепловое испарение)



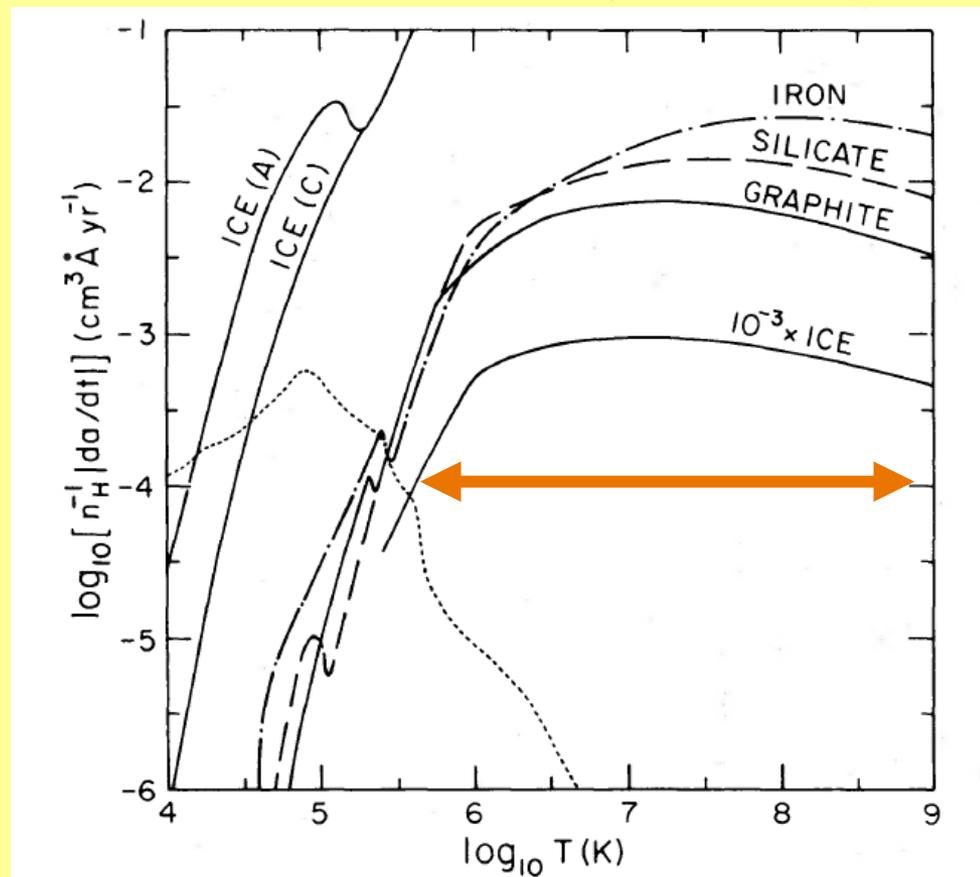
Draine & Salpeter 1979

охлаждение



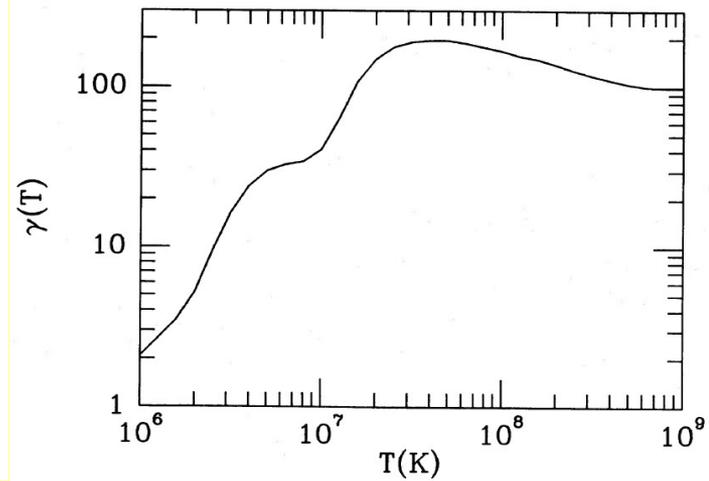
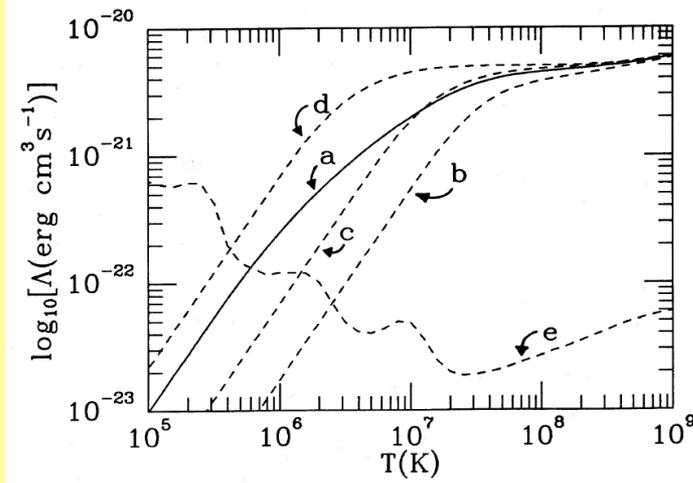
Ostriker & Silk 1973

разрушение при $T > 1 \text{e6 K}$
(тепловое испарение)



Draine & Salpeter 1979

соотношение между излучением горячей плазмы и пыли



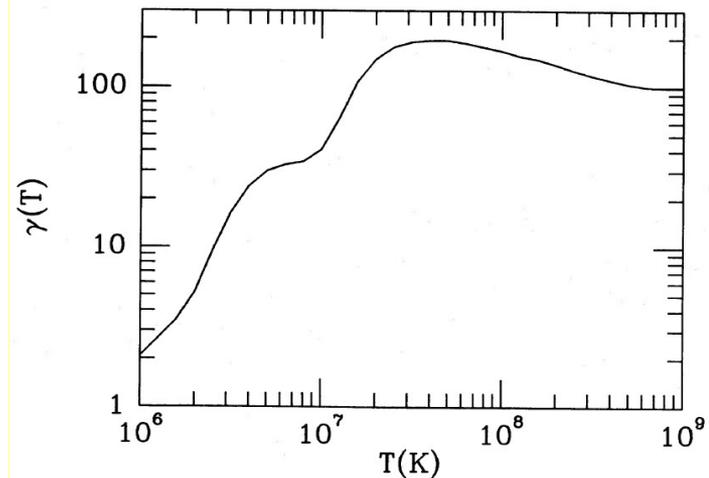
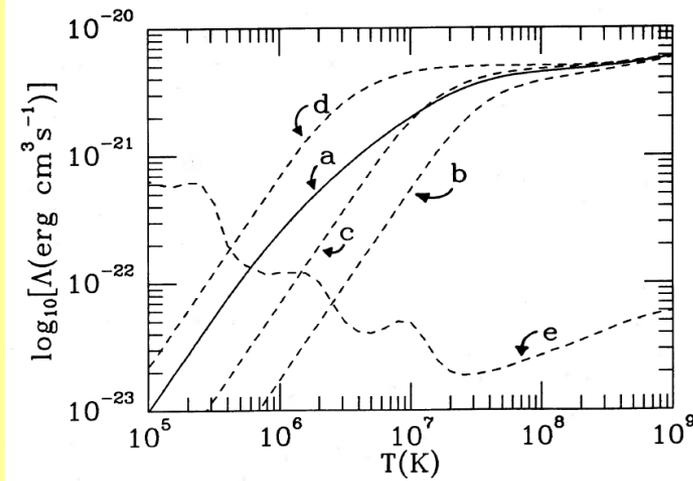
Dwek 1987

соотношение между излучением пыли и горячей плазмы

$$\gamma(T) = \Lambda_d(T)/\Lambda(T) .$$

Dwek 1987

InfraRed X-ray ratio = IRX



Dwek 1987

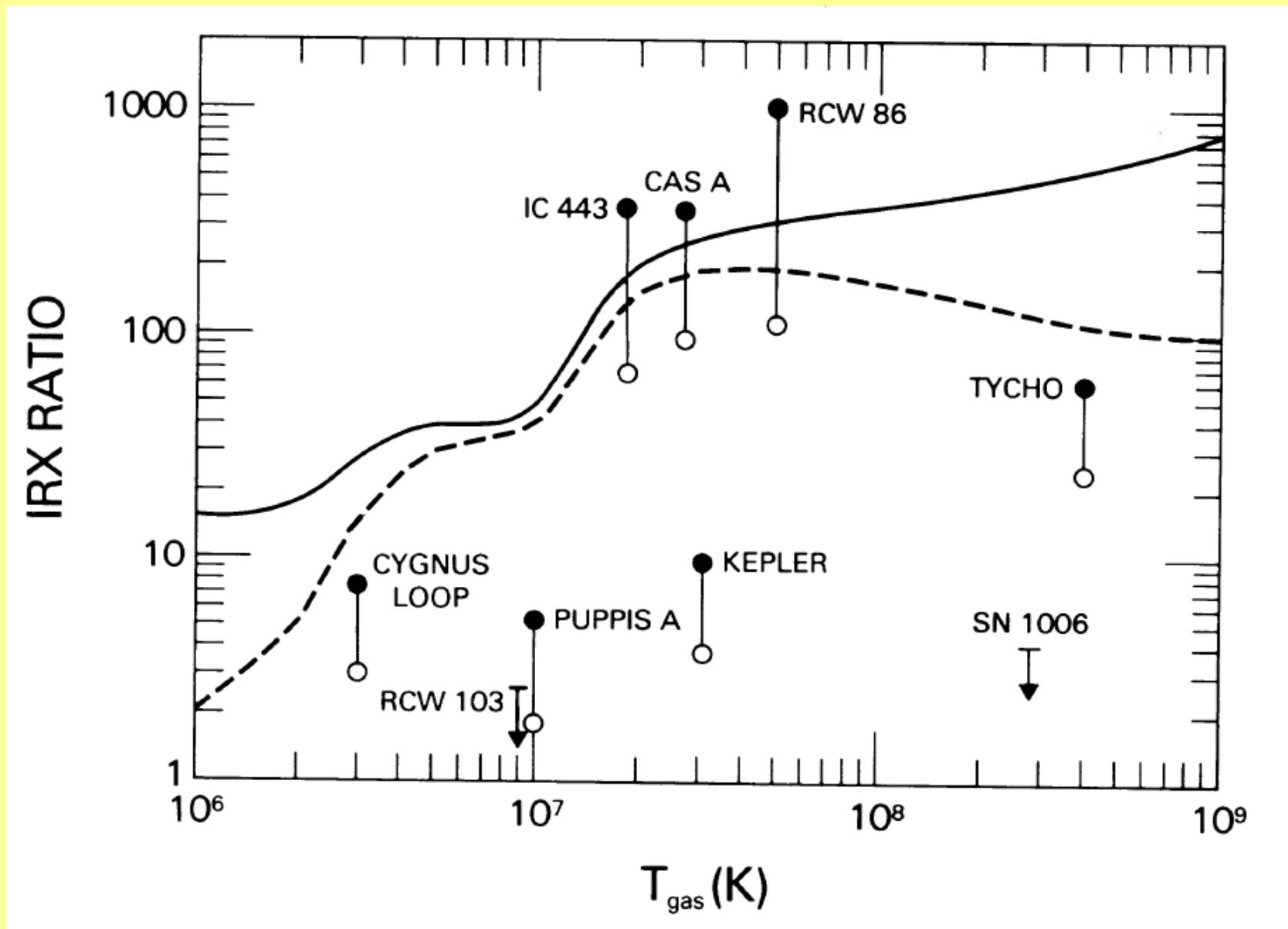
соотношение между излучением горячей плазмы и пыли

$$\gamma(T) = \Lambda_d(T)/\Lambda(T) .$$

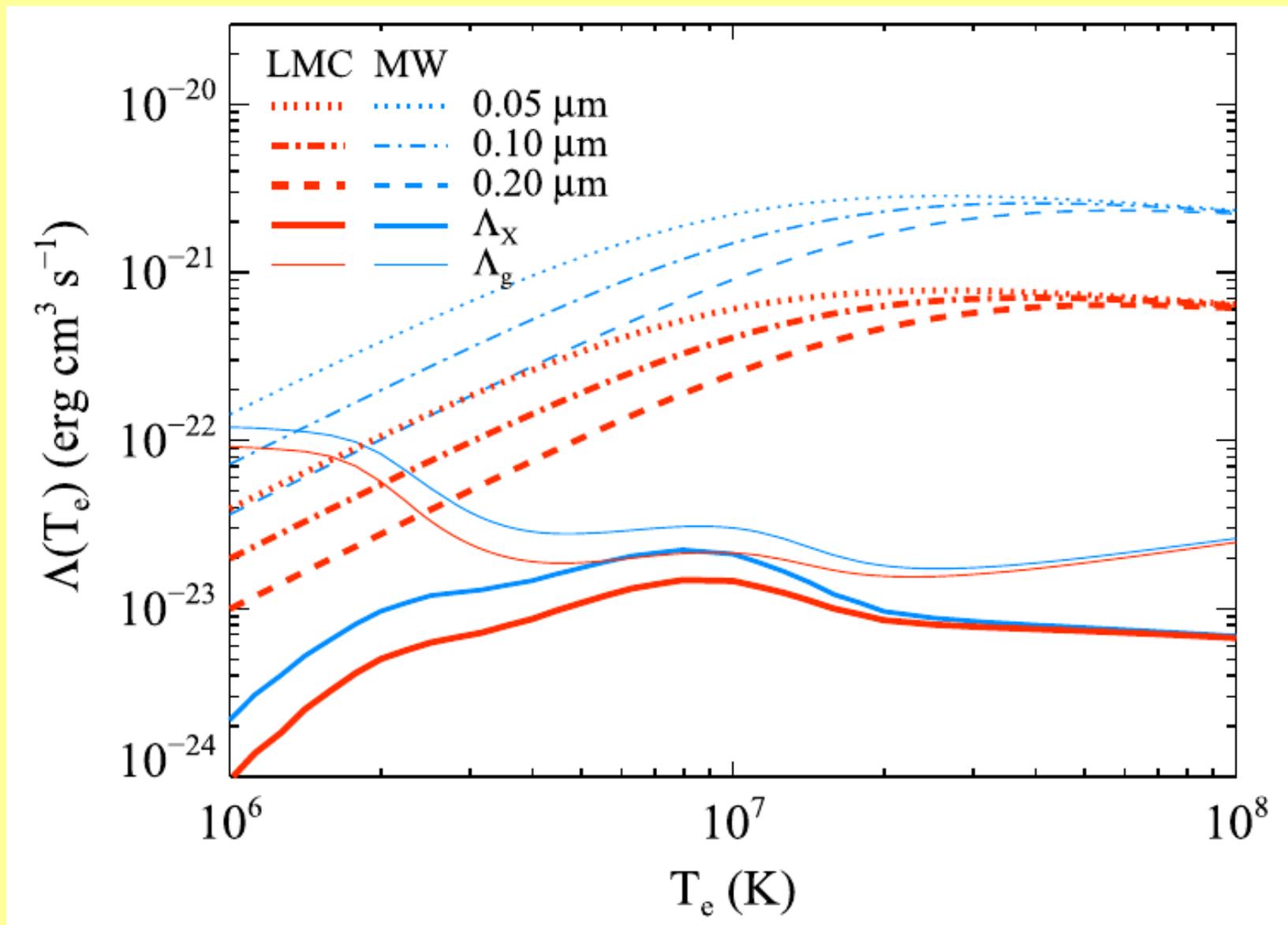
Dwek 1987

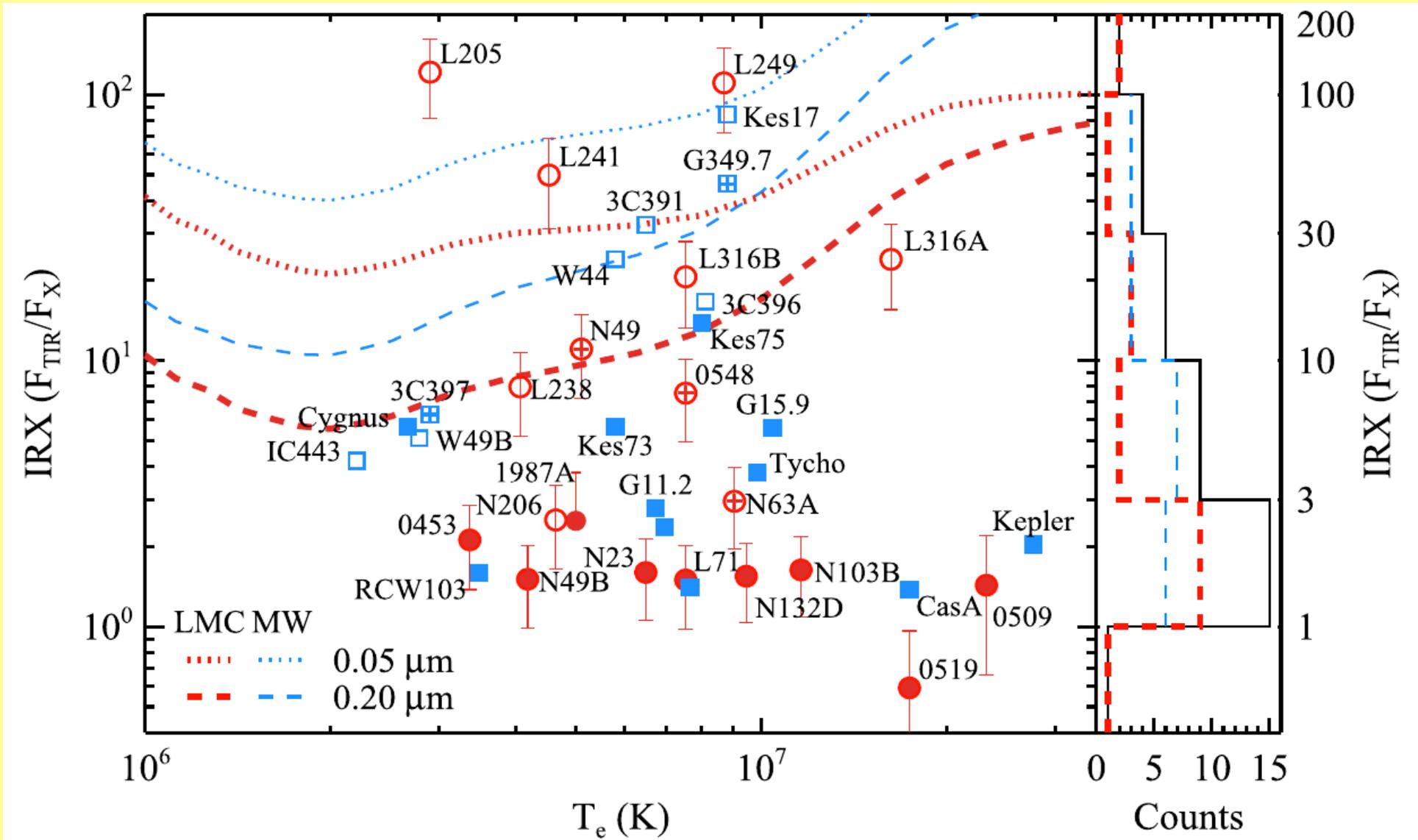
InfraRed X-ray ratio = IRX

сверхновые

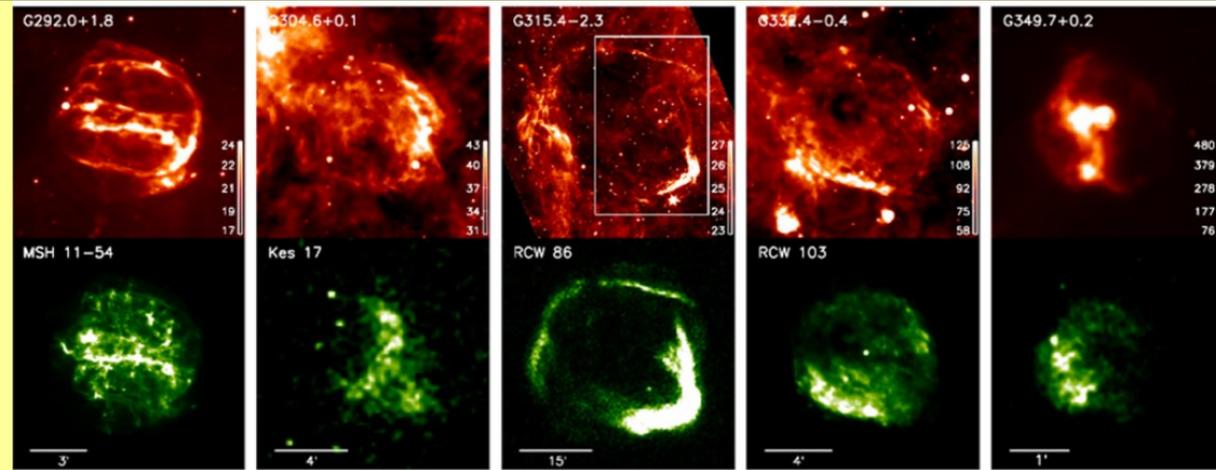


Dwek et al 1987



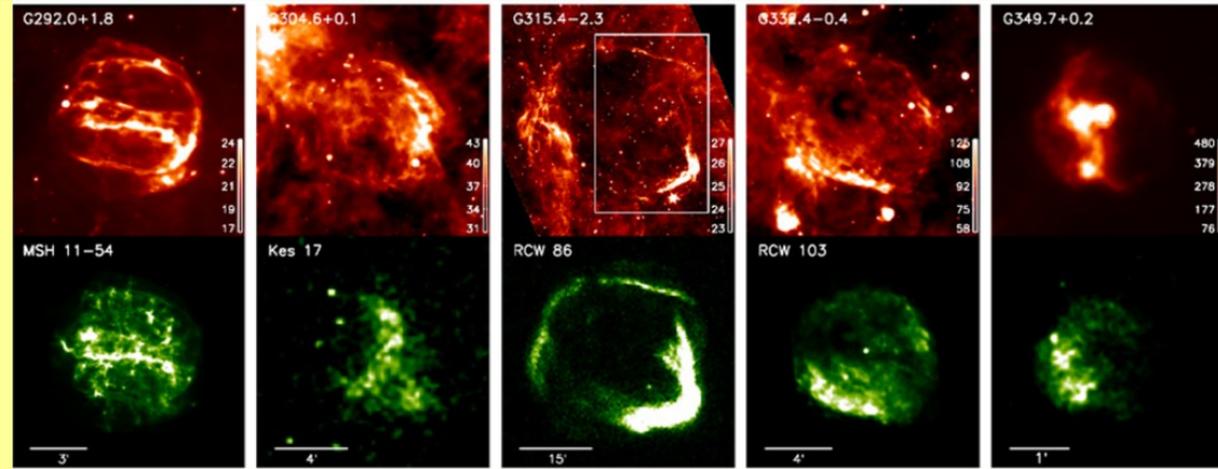


пространственное
разрешение — внутренняя
структура



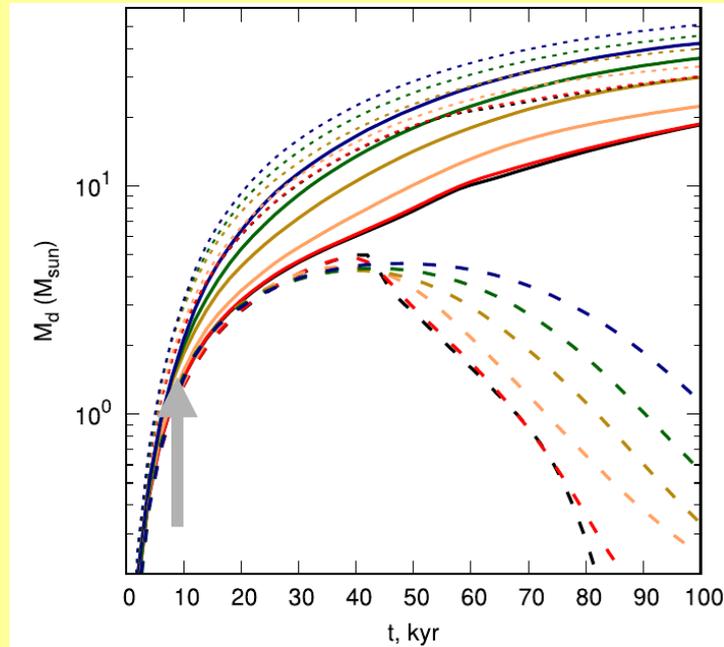
Koo et al 2016

пространственное разрешение — внутренняя структура



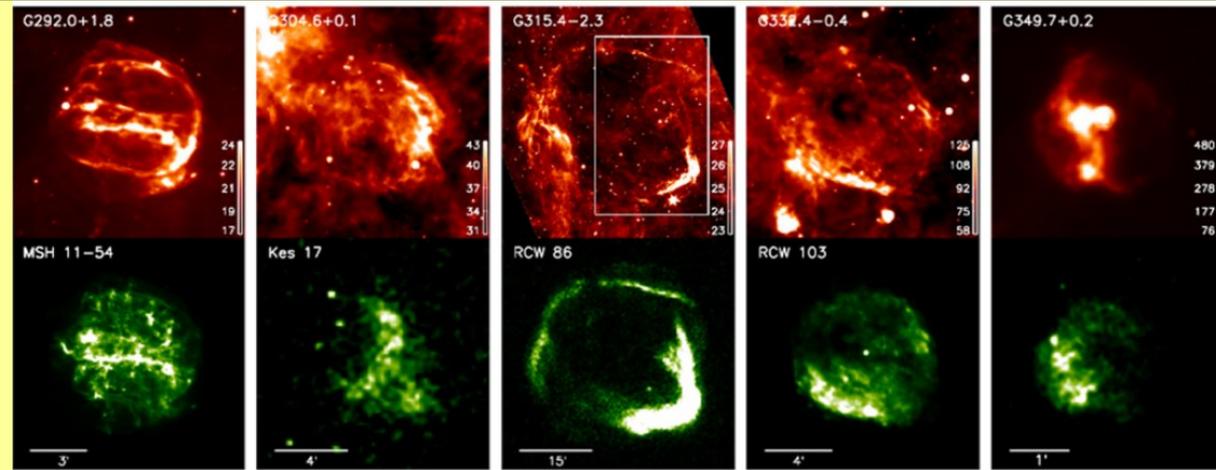
молодые остатки (<1e4 лет) — излучение инжектированной пыли Koo et al 2016

масса межзвездной пыли к 1e4 лет ~ 2 солн. масс ($\langle n \rangle \sim 1 \text{ cm}^{-3}$, $[Z/H]=0$)



Dedikov & EV 2025a

пространственное
разрешение — внутренняя
структура



молодые остатки ($<1e4$ лет) — излучение инжектированной пыли Koo et al 2016

масса межзвездной пыли к $1e4$ лет ~ 2 солн. масс ($\langle n \rangle \sim 1 \text{ cm}^{-3}$, $[Z/H]=0$)

IRX — T_x

от прицельного параметра
(расстояния от центра)

газ: логнормальное распределение, дисперсия $\sigma = 0.2$ и 2.2
колмогоровский спектр (5/3)

межзвездная пыль:

полидисперсная, MRN 0.003-0.3 мкм, **11 размеров** ($t=0$)

начальные условия:

$\langle n \rangle = 1 \text{ см}^{-3}$, отношение пыли к газу = $1e-2$

СН: $1e51$ эрг

Dedikov & EV 2025a

сетка: $(96 \text{ пк})^3$, разрешение 0.375 пк, число частиц до 200 млн.

3D TVD code (EV et al 2015...)

MUSCL-Hancock

HLLC

динамика пыли (EV & Shchekinov 2024)

макрочастицы (Youdin & Johansen 2007)

тепловое и кинетическое испарение (Draine & Salpeter 1979)

охлаждение (EV 2011)

NEQ изохорическое

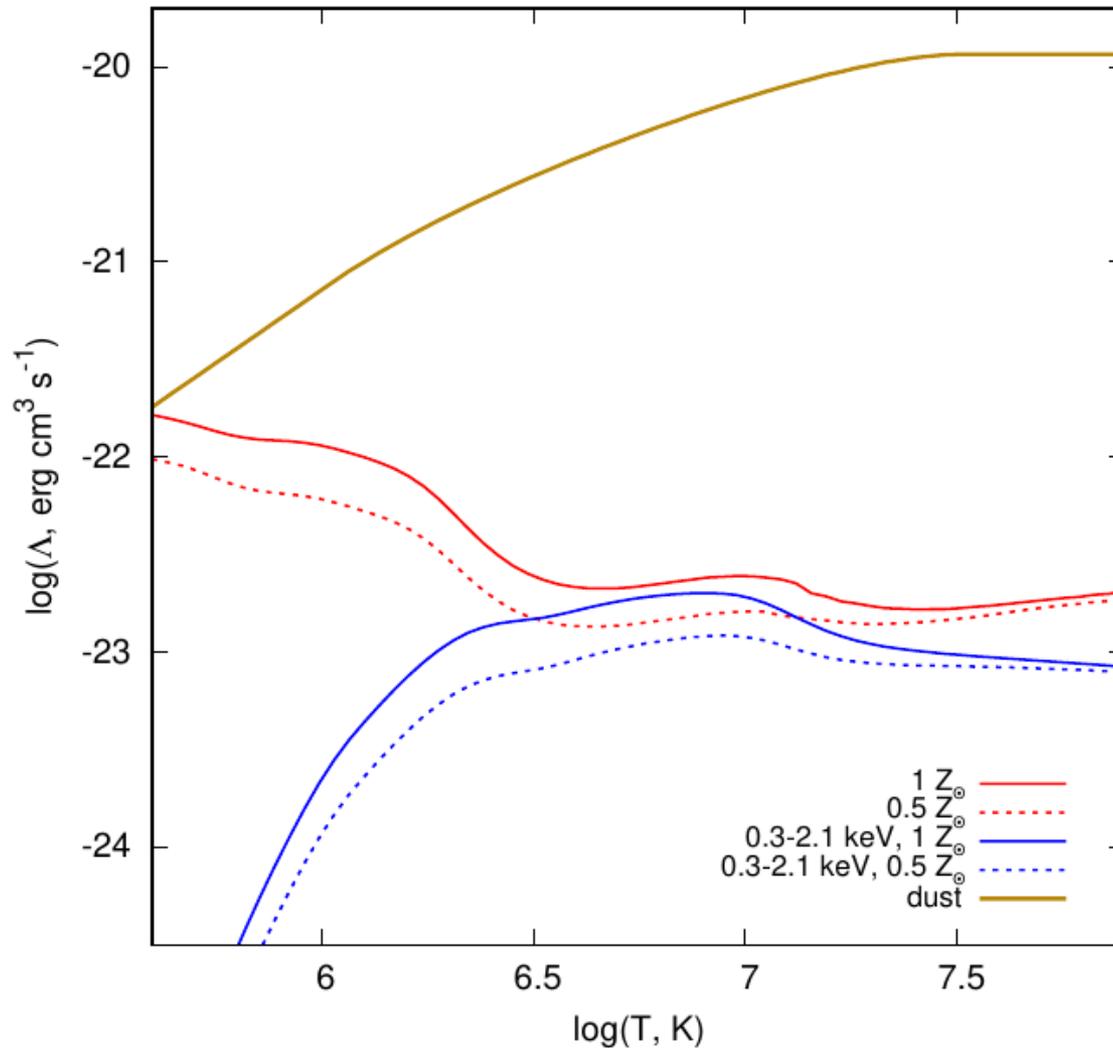
10- $1e8$ К

ПЫЛЬ

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

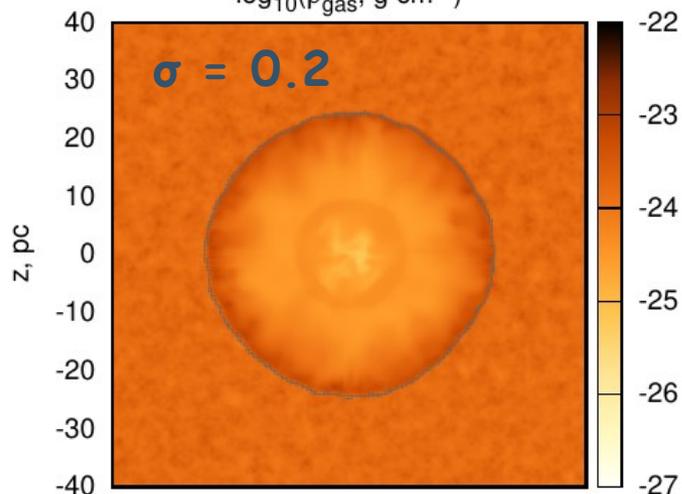
$$L_{d,IR}(a, T_{eq}) = H_{coll}(a, T_g, n_e) n_d(a)$$

Dwek & Arendt 1992



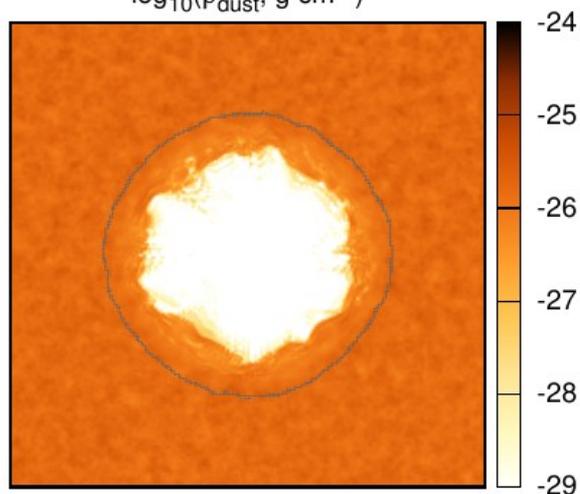
плотность газа

$\log_{10}(\rho_{\text{gas}}, \text{g cm}^{-3})$



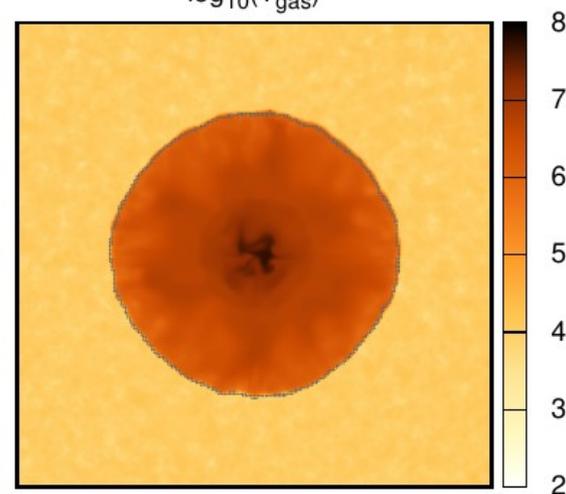
плотность пыли

$\log_{10}(\rho_{\text{dust}}, \text{g cm}^{-3})$

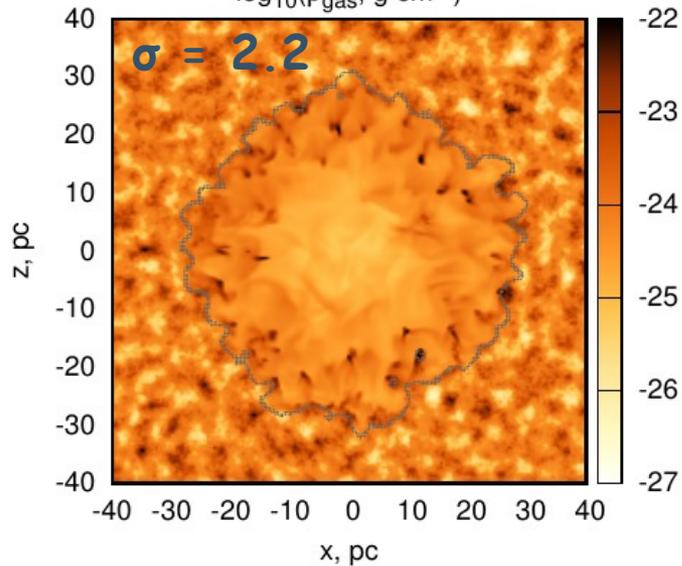


температура газа

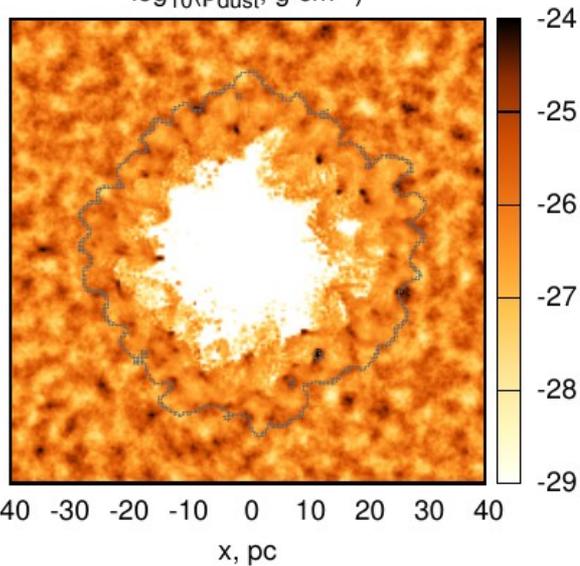
$\log_{10}(T_{\text{gas}})$



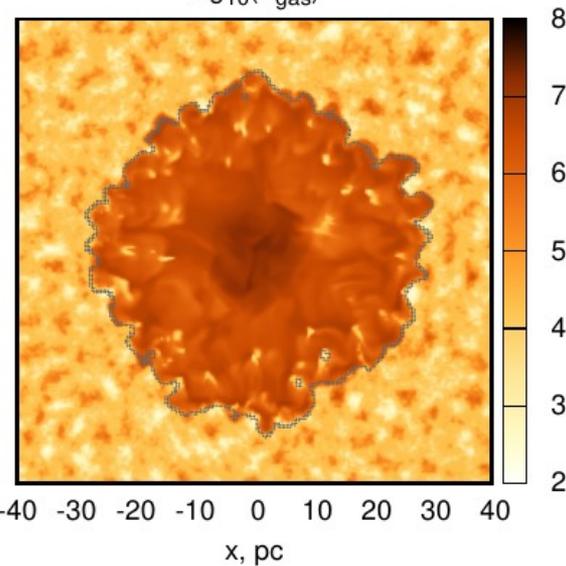
$\log_{10}(\rho_{\text{gas}}, \text{g cm}^{-3})$

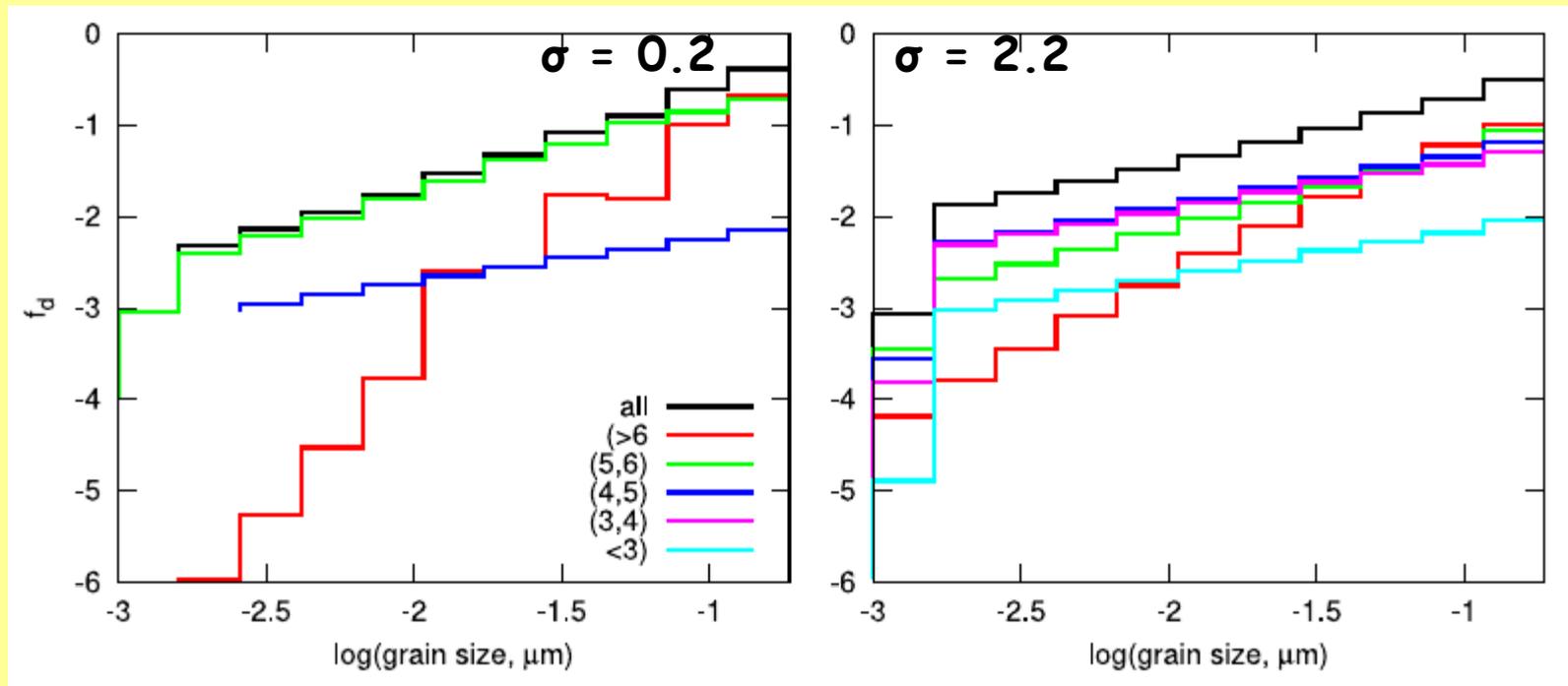


$\log_{10}(\rho_{\text{dust}}, \text{g cm}^{-3})$



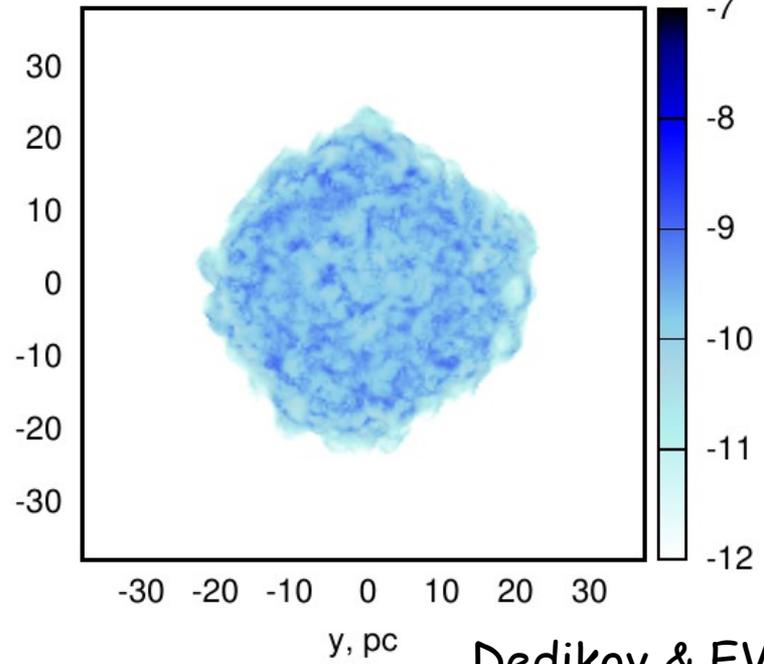
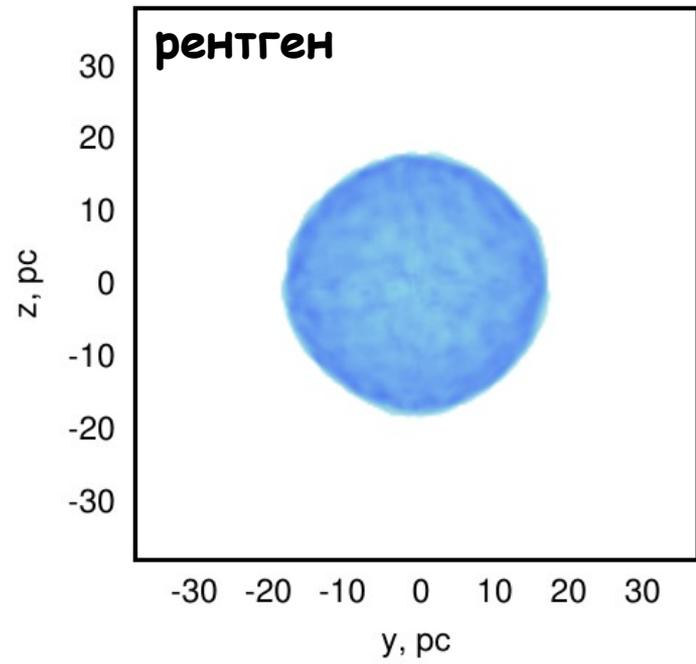
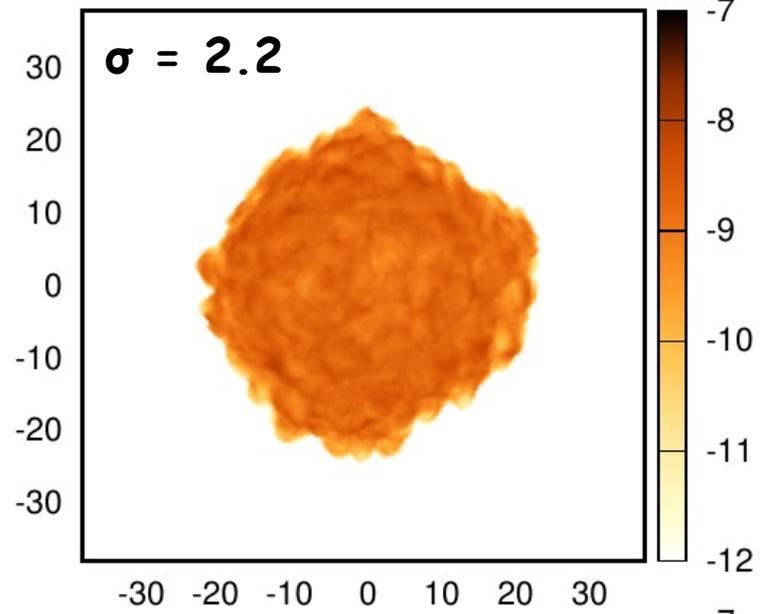
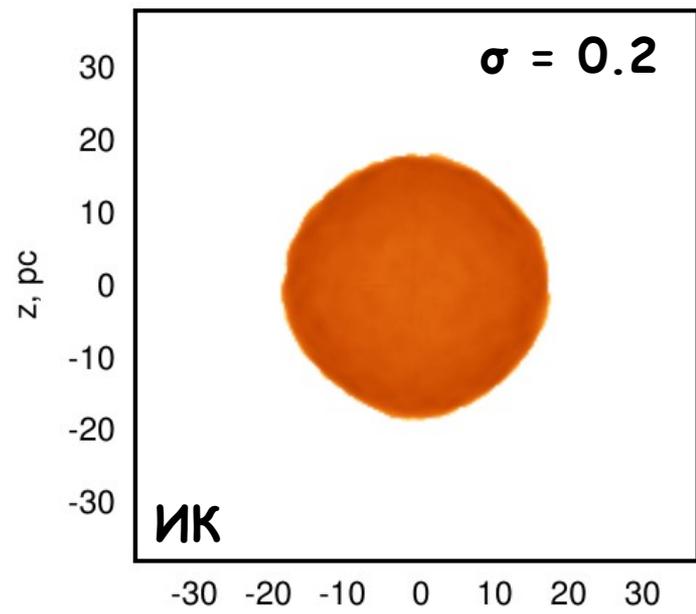
$\log_{10}(T_{\text{gas}})$





в газе с $T > 1e6$ K

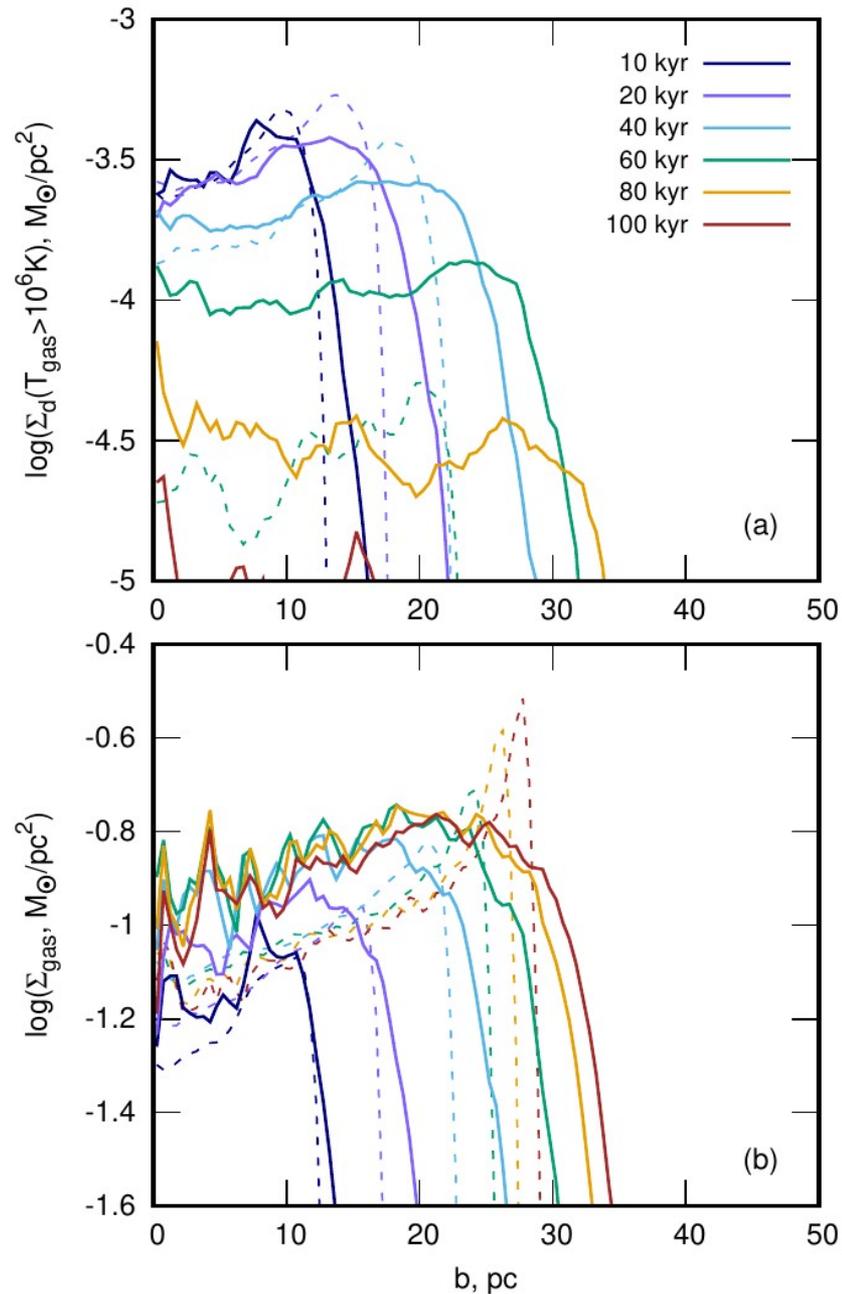
Dedikov & EV 2025



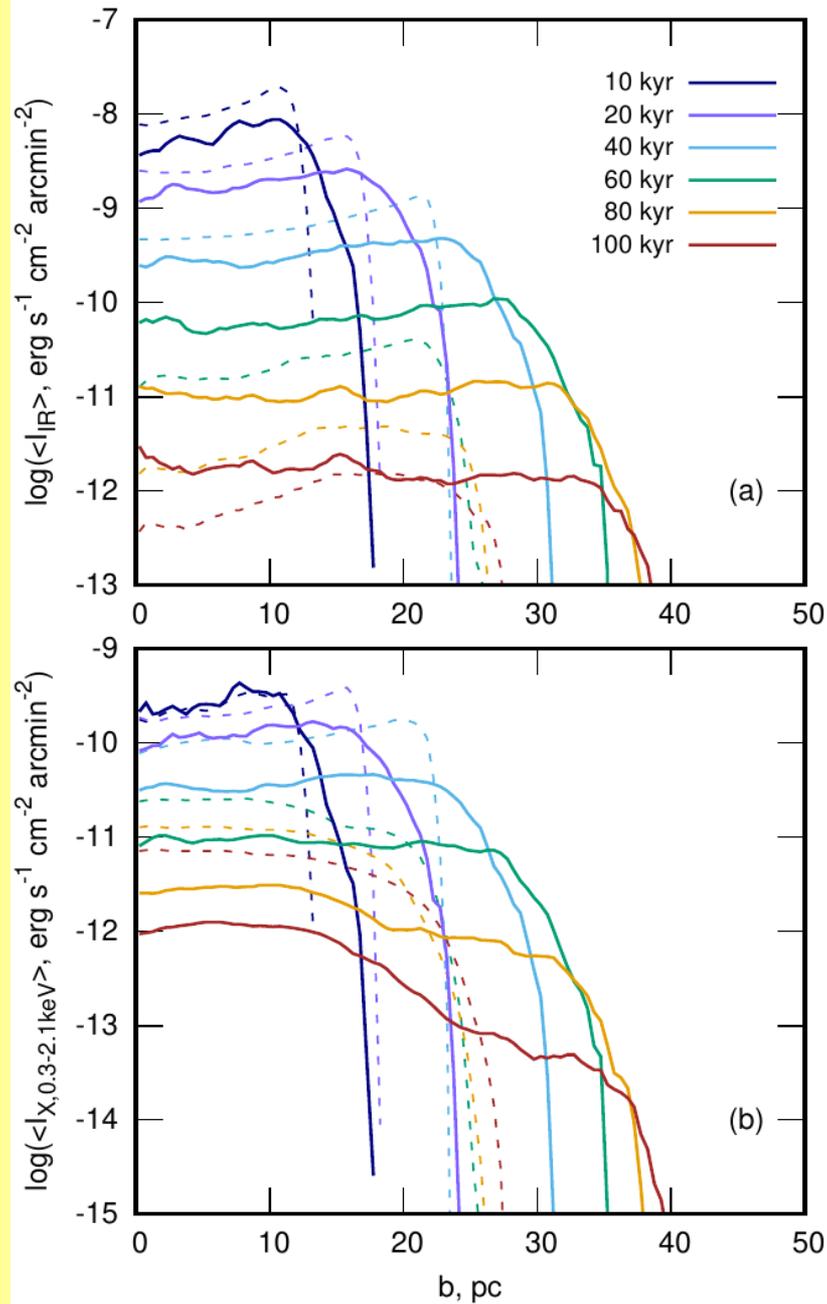
Эволюция поверхностной плотности

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

$\sigma = 0.2$ - штриховые
 $\sigma = 2.2$ - сплошные

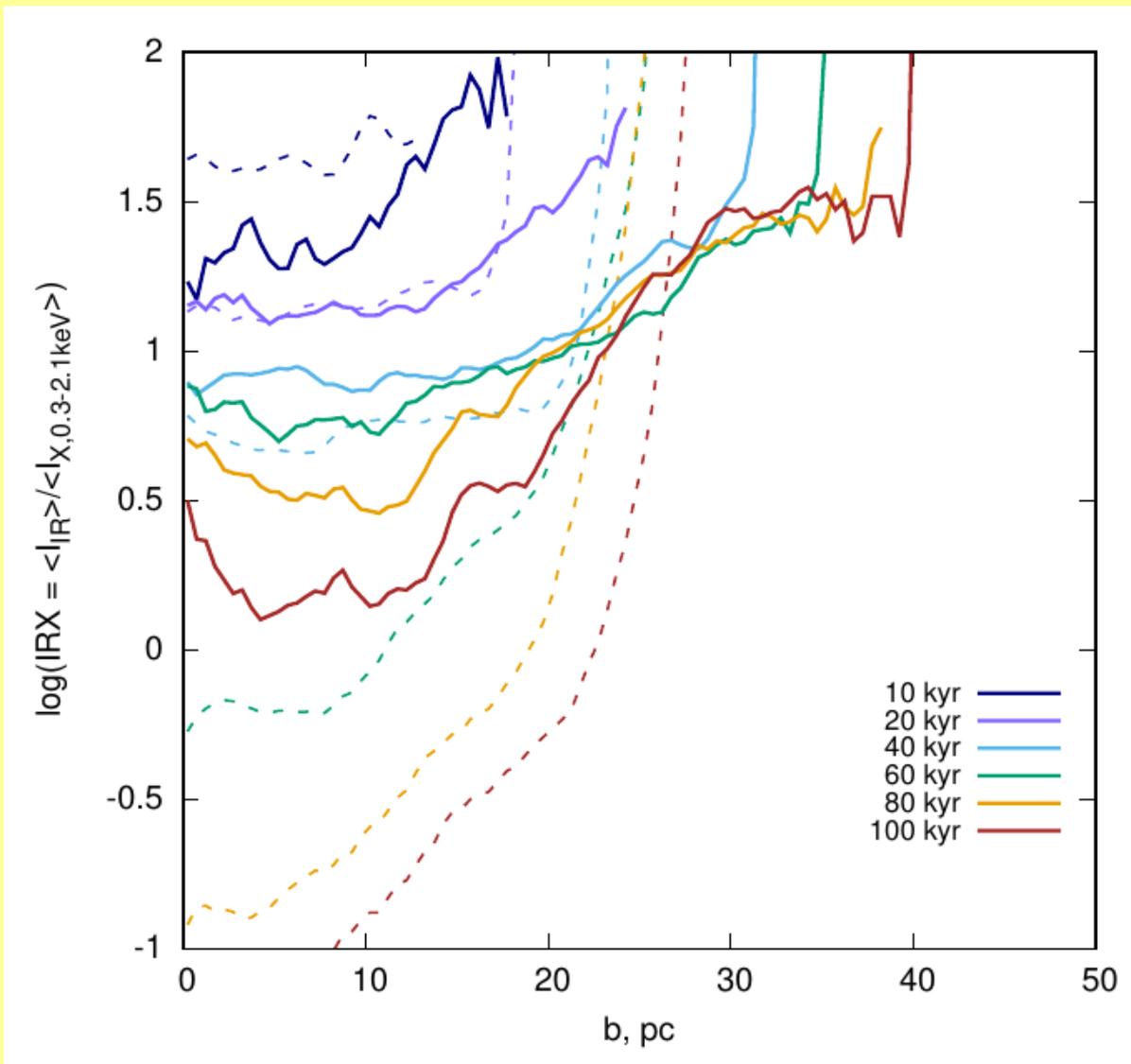


Эволюция поверхностной яркости



$\sigma = 0.2$ - штриховые
 $\sigma = 2.2$ - сплошные

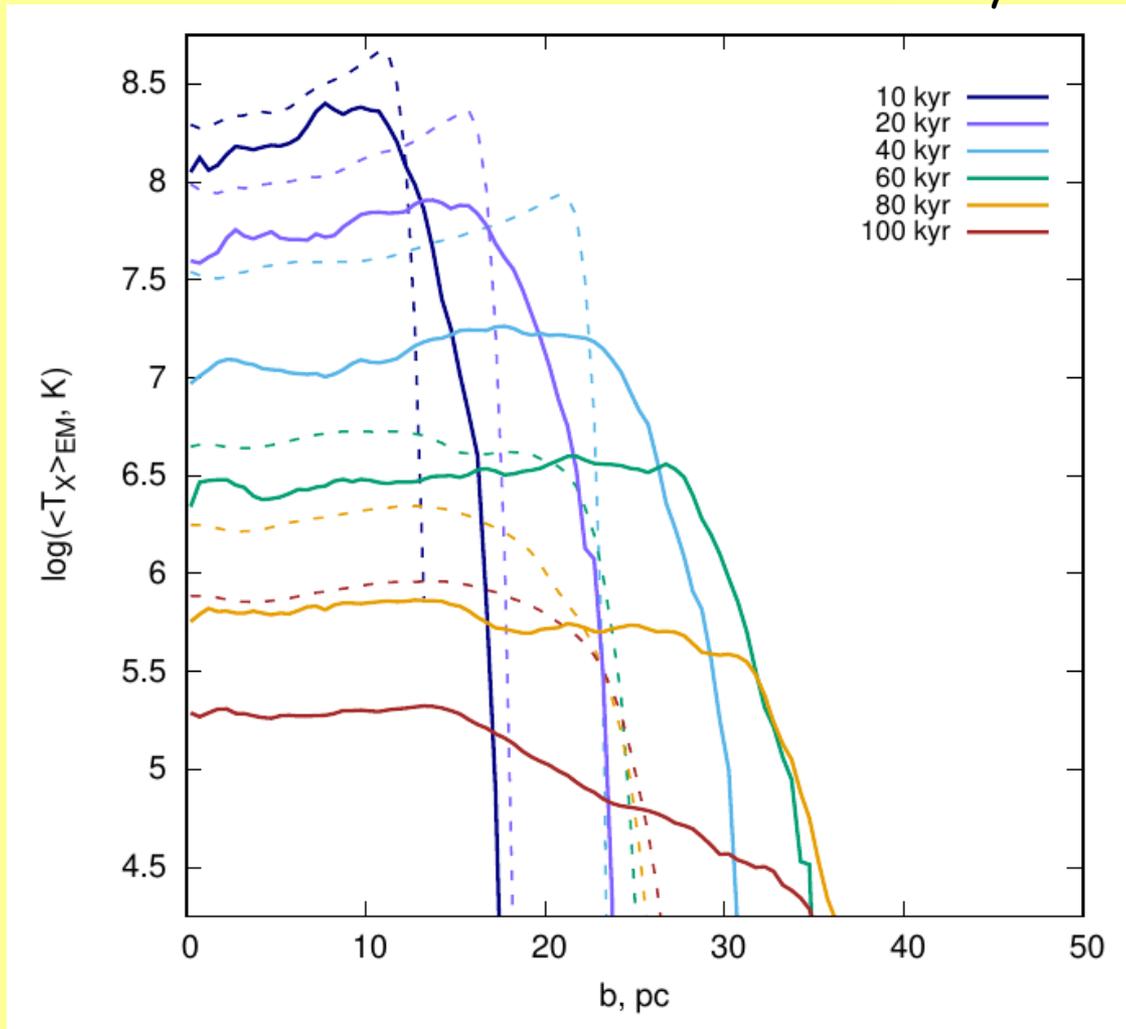
$$\text{IRX} = \langle I_{\text{IR}} \rangle / \langle I_{\text{X}, 0.3-2.1 \text{keV}} \rangle$$



$\sigma = 0.2$ - штриховые
 $\sigma = 2.2$ - сплошные

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

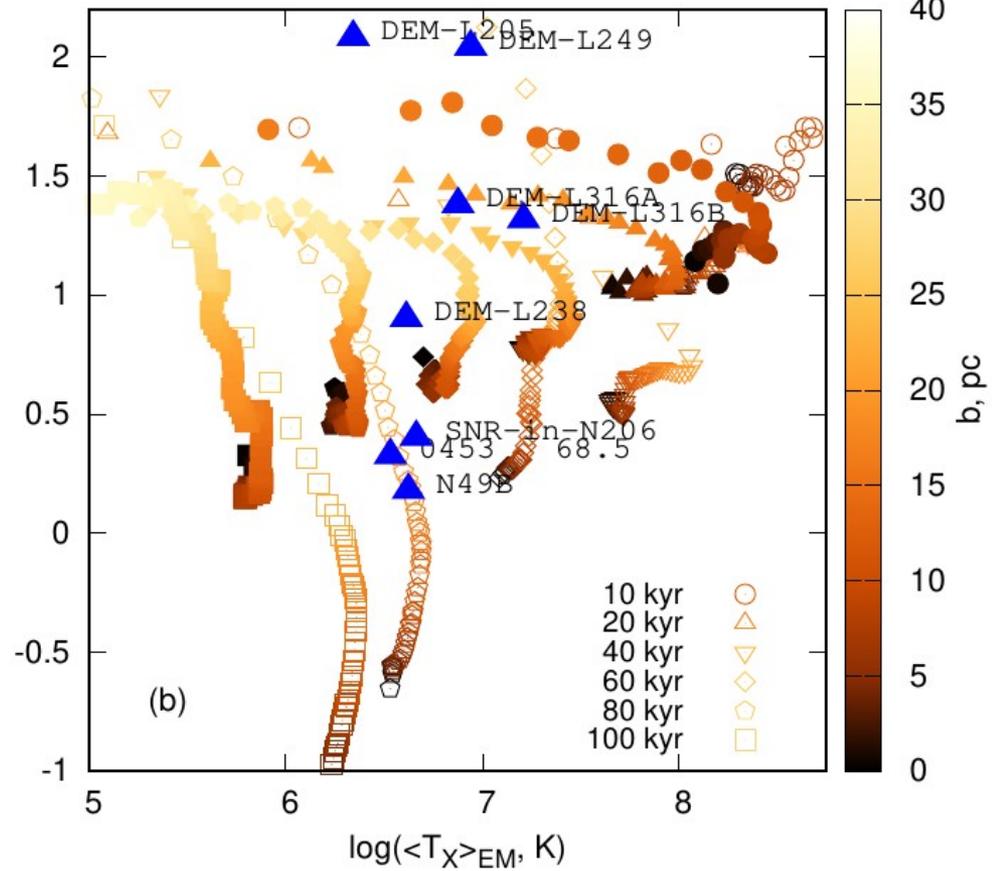
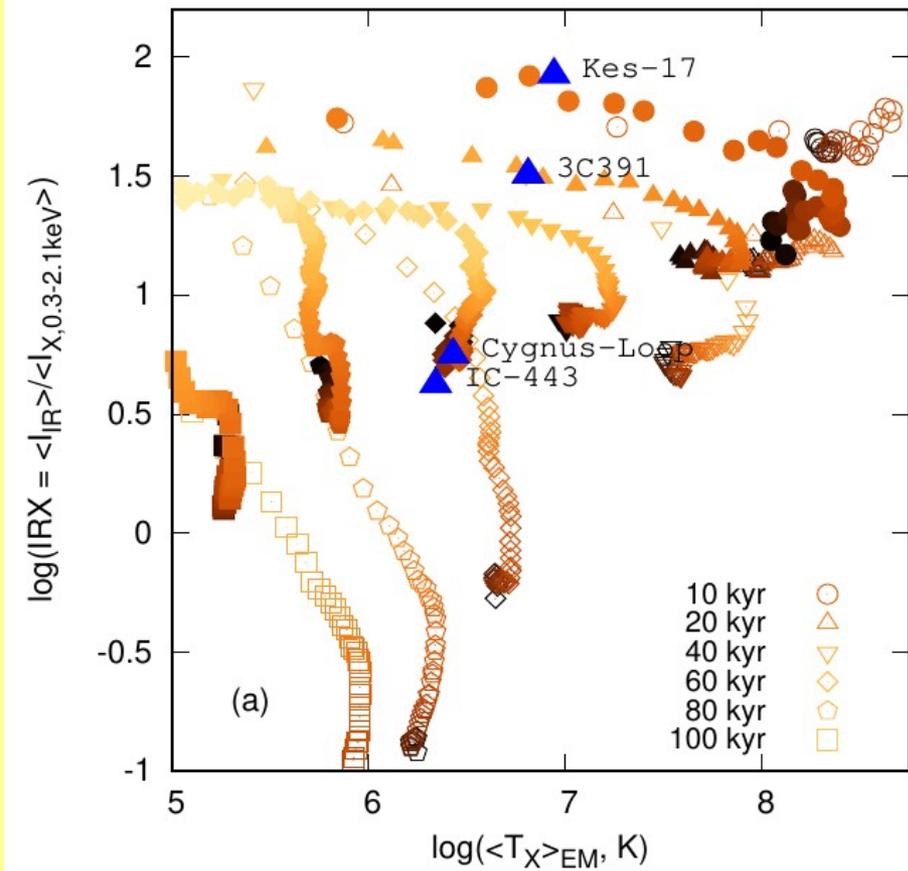
Leahy etal 2019



$\sigma = 0.2$ - штриховые
 $\sigma = 2.2$ - сплошные

$[Z/H] = 0$

$[Z/H] = -0.3$



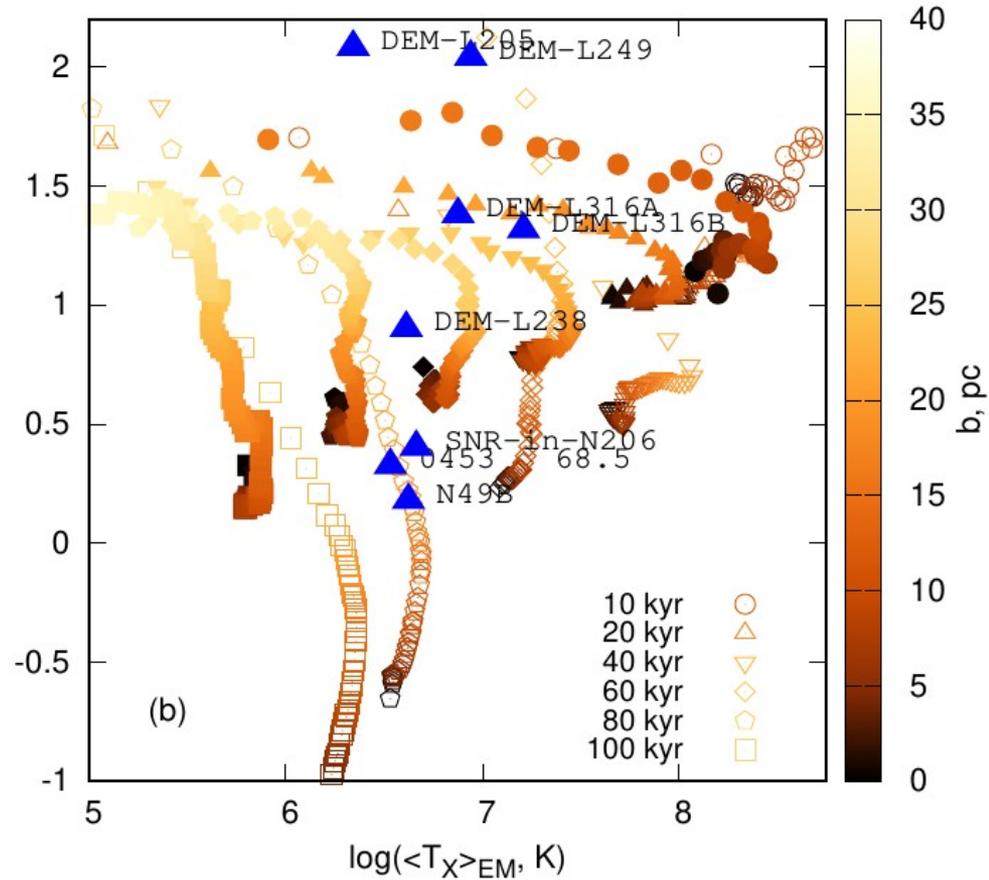
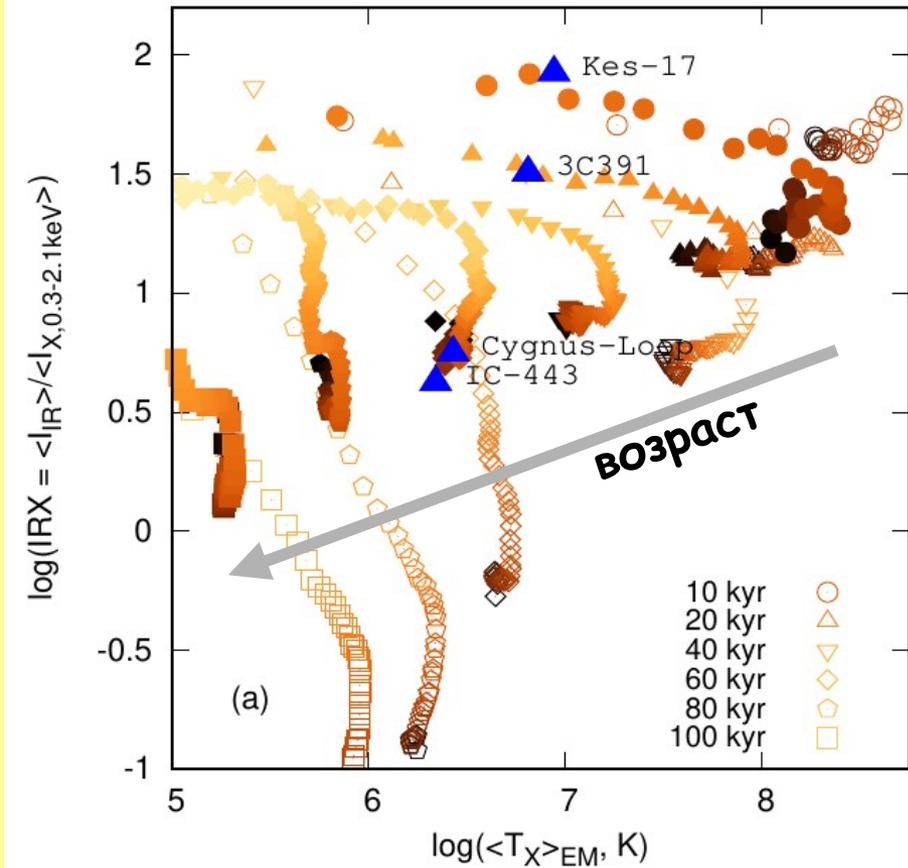
Dedikov & EV 2025

$\sigma = 0.2$ - пустые

$\sigma = 2.2$ - заполненные

$[Z/H] = 0$

$[Z/H] = -0.3$



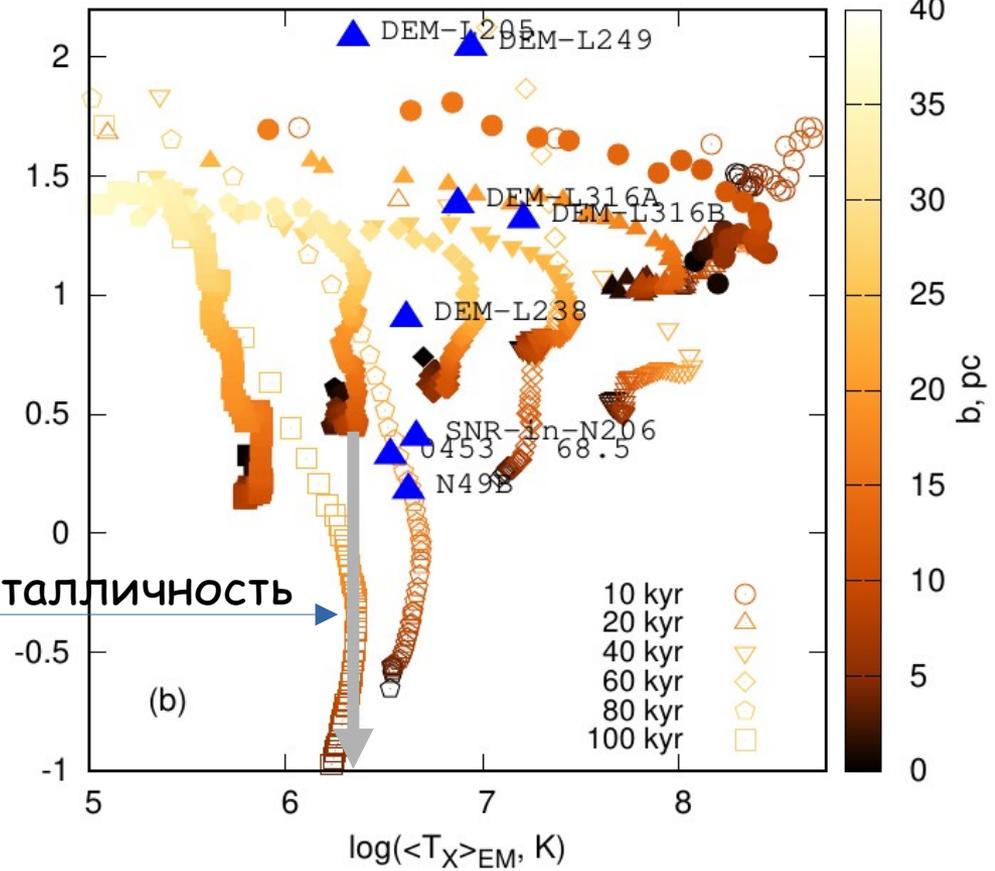
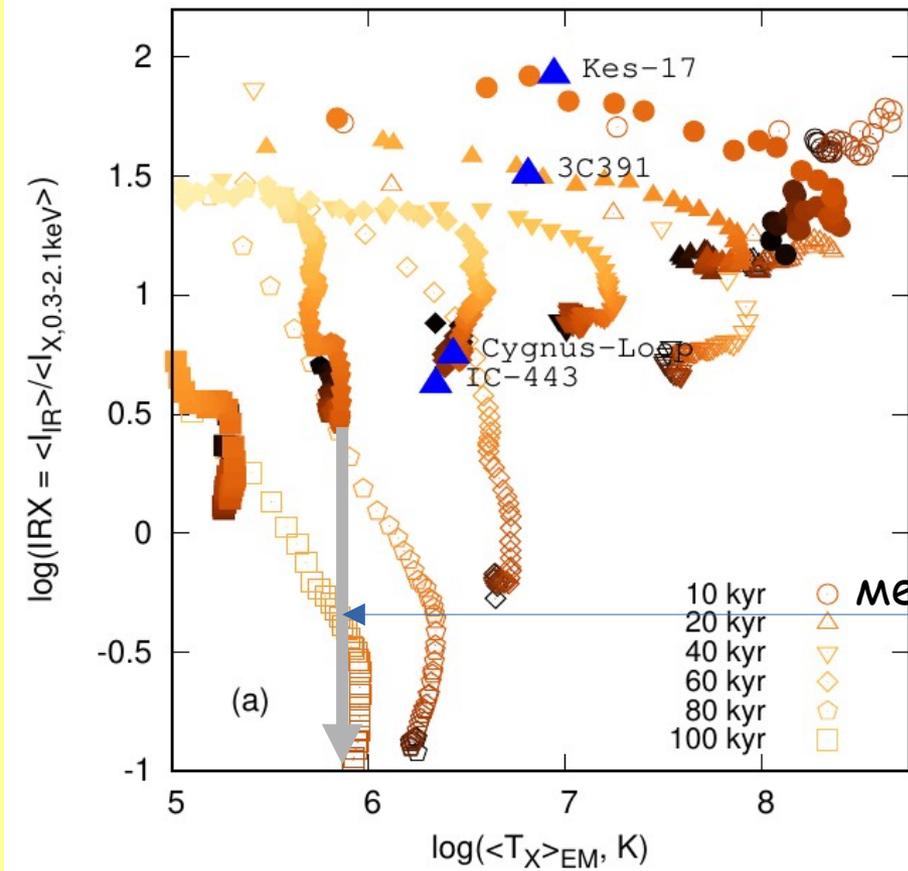
Dedikov & EV 2025

$\sigma = 0.2$ - пустые

$\sigma = 2.2$ - заполненные

$[Z/H] = 0$

$[Z/H] = -0.3$



Dedikov & EV 2025

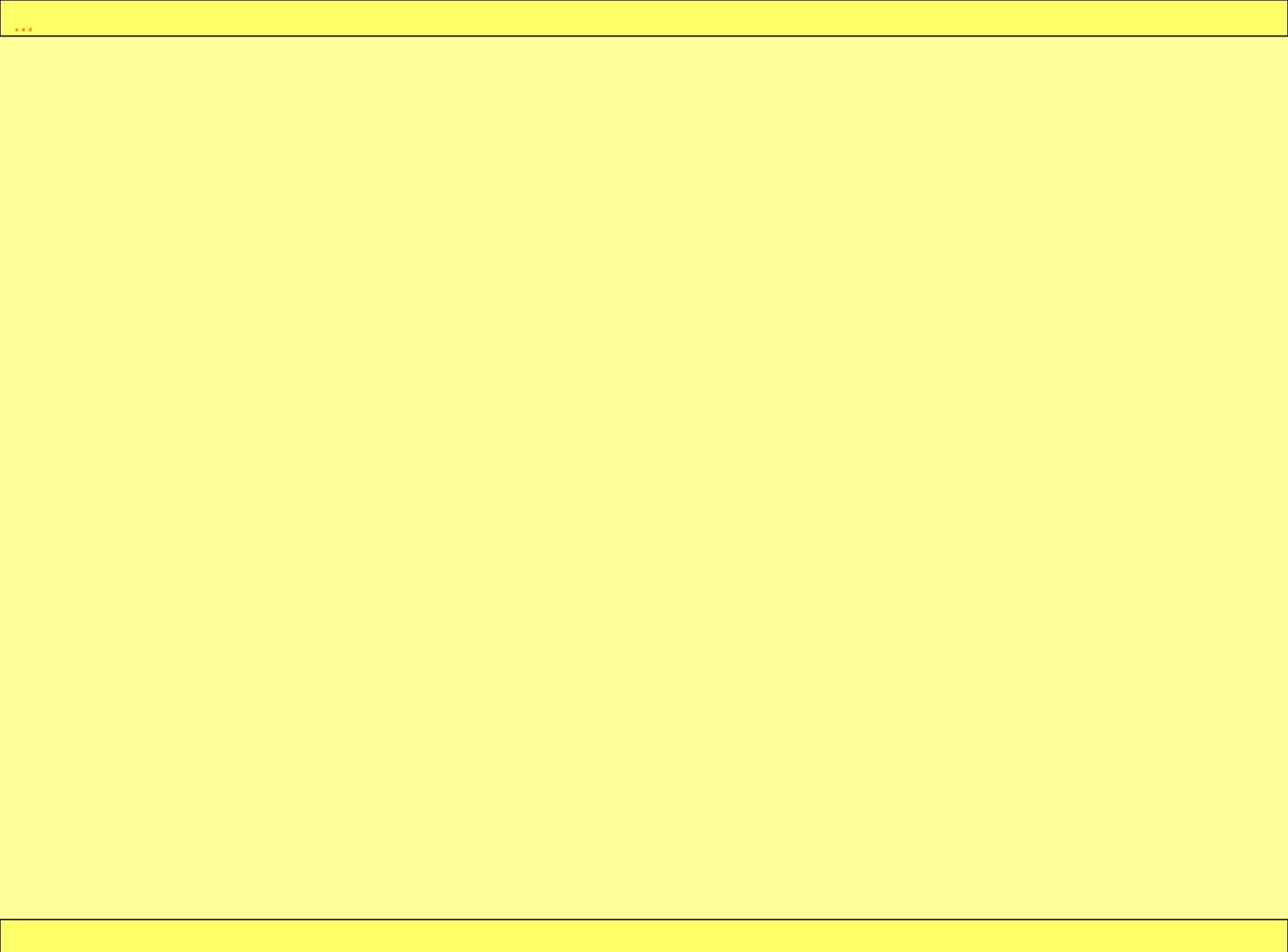
$\sigma = 0.2$ - пустые

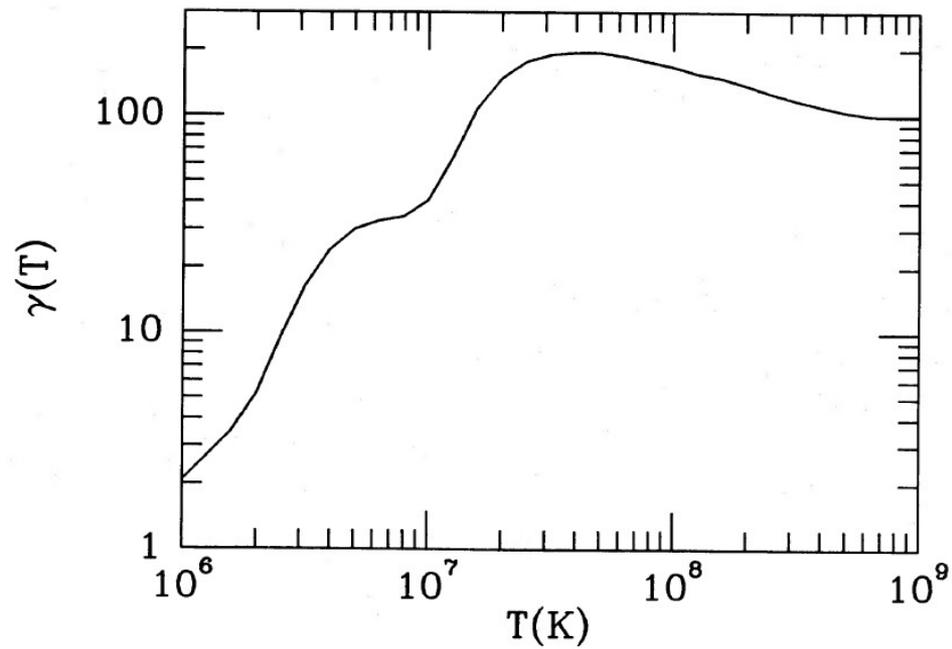
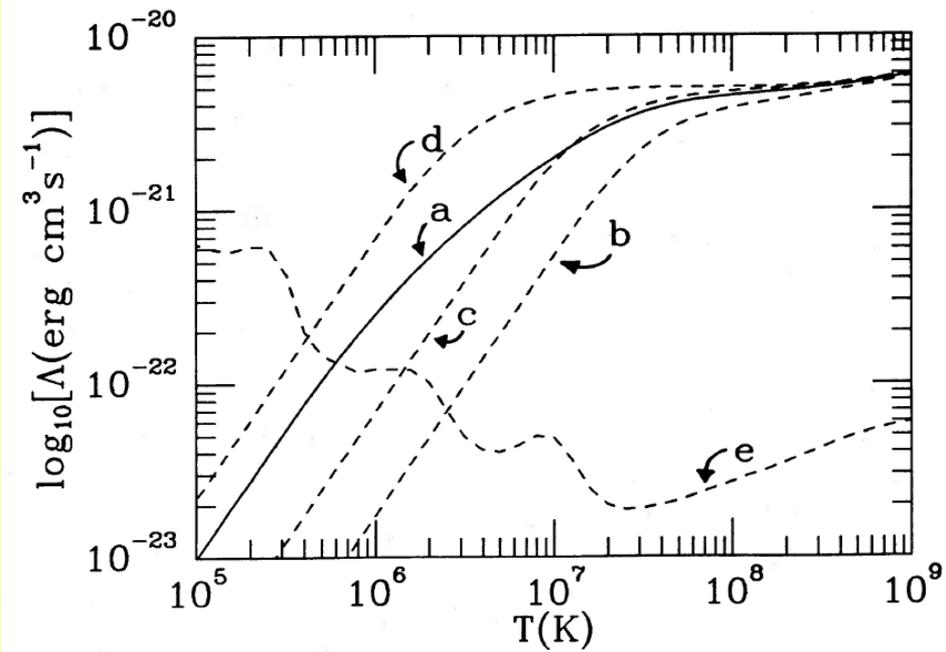
$\sigma = 2.2$ - заполненные

- ✓ величина IRX значительно ($\sim 3 - 30$ раз) изменяется в зависимости от прицельного расстояния в остатке СН и его возраста
- ✓ эволюция области значений для остатка СН на диаграмме $T_x - IRX$ определяется началом радиационной фазы
- ✓ в сильно неоднородной среде высокие значения IRX на радиационной фазе поддерживается благодаря пополнению пыли в горячем газе из слабо разрушенных фрагментов, находящихся за фронтом УВ
- ✓ уменьшение металличности/плотности газа приводит к сохранению высоких значений температуры и IRX

- ✓ величина IRX значительно ($\sim 3 - 30$ раз) изменяется в зависимости от прицельного расстояния в остатке СН и его возраста
- ✓ эволюция области значений для остатка СН на диаграмме $T_x - IRX$ определяется началом радиационной фазы
- ✓ в сильно неоднородной среде высокие значения IRX на радиационной фазе поддерживается благодаря пополнению пыли в горячем газе из слабо разрушенных фрагментов, находящихся за фронтом УВ
- ✓ уменьшение металличности/плотности газа приводит к сохранению высоких значений температуры и IRX

Спасибо!!!





Dwek 1987