

Разрушение межзвездной пыли сверхновыми в скоплениях

Е.О. Васильев
АКЦ

+ : 0.005 M_{\odot} /год
 для $\sim 0.1 M_{\odot}$ на 1 SN

Table 1. Injection of Gas and Stardust from Stellar Sources

gas (M_{\odot} /yr)	dust (M_{\odot} /yr)	Stellar Source
0.4	0.002	Planetary Nebulae (~ 0.3 /yr)
0.5	0.0025	Red Giant, Red Supergiant, C star winds
0.06	<0.0001?	OB, WR, other warm/hot star winds
0.25	0.0002?	SNe (1/100 yr, $\sim 10^{-2} M_{\odot}$ dust/SN?)
0.01	0.00001	Novae (100/yr, $10^{-7} M_{\odot}$ dust/nova?)
~ 1.2	~ 0.005	All stellar sources

Draine 2009

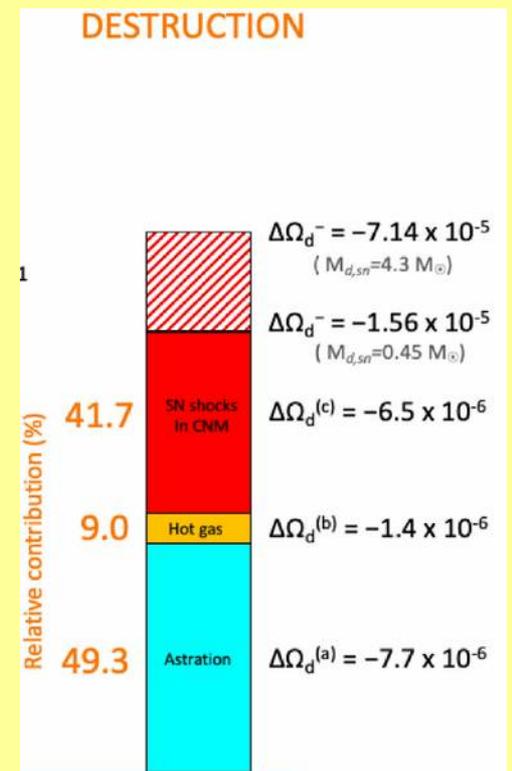
Table 1. Injection of Gas and Stardust from Stellar Sources

gas (M_{\odot}/yr)	dust (M_{\odot}/yr)	Stellar Source
0.4	0.002	Planetary Nebulae ($\sim 0.3/\text{yr}$)
0.5	0.0025	Red Giant, Red Supergiant, C star winds
0.06	<0.0001?	OB, WR, other warm/hot star winds
0.25	0.0002?	SNe (1/100 yr, $\sim 10^{-2} M_{\odot}$ dust/SN?)
0.01	0.00001	Novae (100/yr, $10^{-7} M_{\odot}$ dust/nova?)
~ 1.2	~ 0.005	All stellar sources

Draine 2009

+ : 0.005 Мсол/год
 для ~ 0.1 Мсол на 1 СН

- : 0.01-0.1 Мсол/год
 для $t_{sp} \sim 3e8$ лет (McKee 1989, Jones et al 1994)
 $\sim 3e9$ лет (Jones & Tielens 1994, Slavin et al 2015)



Ferrara & Peroux 2021

Table 1. Injection of Gas and Stardust from Stellar Sources

gas (M_{\odot}/yr)	dust (M_{\odot}/yr)	Stellar Source
0.4	0.002	Planetary Nebulae ($\sim 0.3/\text{yr}$)
0.5	0.0025	Red Giant, Red Supergiant, C star winds
0.06	$< 0.0001?$	OB, WR, other warm/hot star winds
0.25	$0.0002?$	SNe (1/100 yr, $\sim 10^{-2} M_{\odot}$ dust/SN?)
0.01	0.00001	Novae (100/yr, $10^{-7} M_{\odot}$ dust/nova?)
~ 1.2	~ 0.005	All stellar sources

Draine 2009

+ : **0.005 Мсол/год**

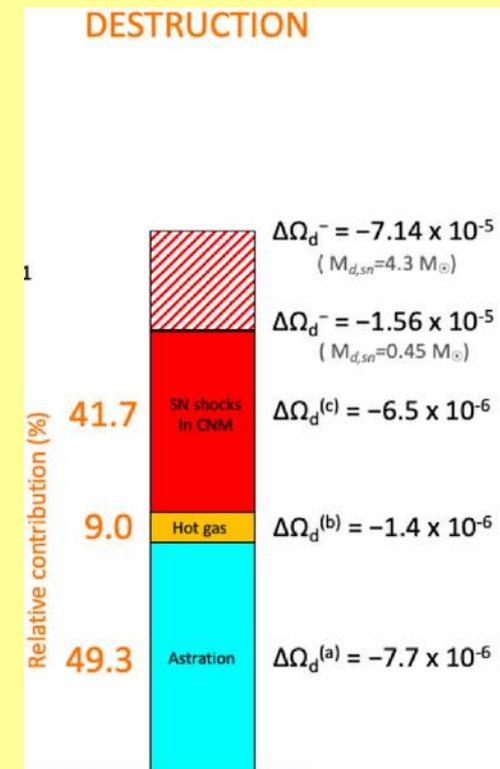
для ~ 0.1 Мсол на 1 СН

- : **0.01-0.1 Мсол/год**

для $t_{sp} \sim 3e8$ лет (McKee 1989, Jones et al 1994)

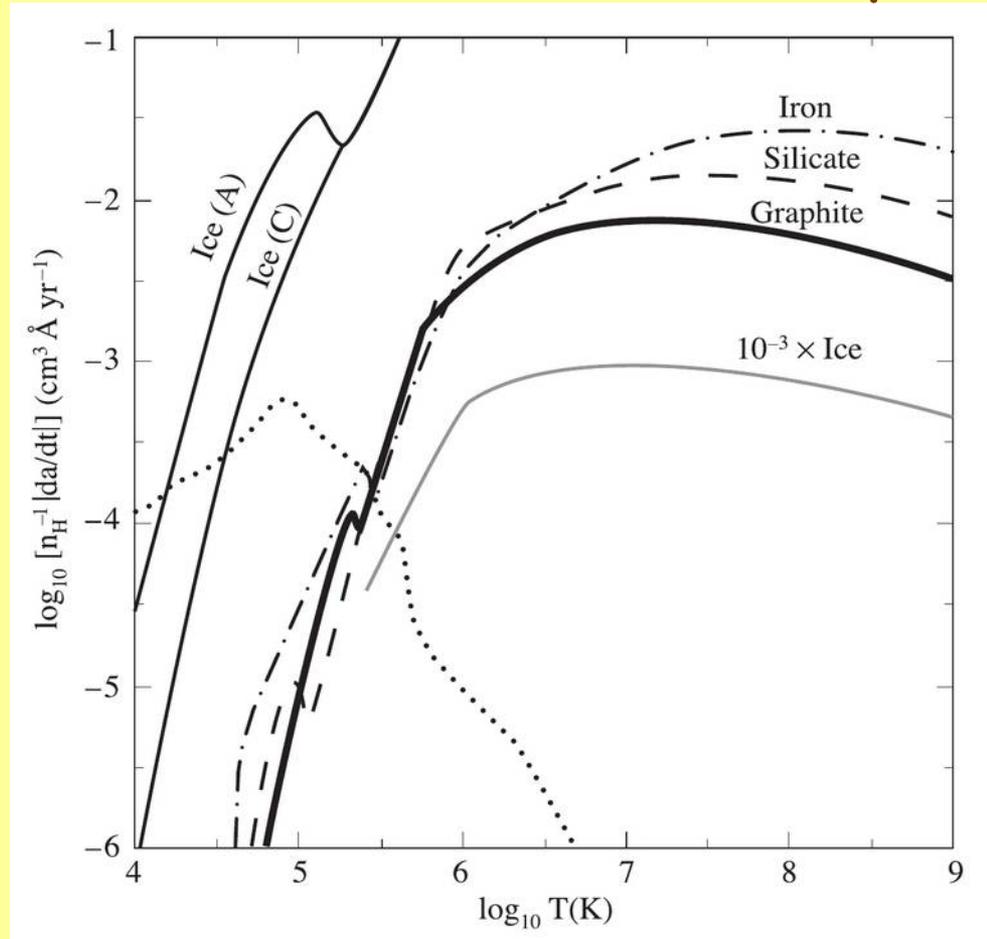
$\sim 3e9$ лет (Jones & Tielens 1994, Slavin et al 2015)

СНII — разрушение за фронтами
сильных УВ ($v > 200$ км/с)



Ferrara & Peroux 2021

СНII — разрушение за фронтами
сильных УВ ($v > 200$ км/с $\leftrightarrow T > 1e6$ K)
тепловое (и кинетическое) испарение



Draine & Salpeter 1979

1 СН, $1e51$ эрг

McKee 1989, Draine 2009

$$Mv_s^2 \approx E_0$$

фраза Седова, $v > 200$ км/с

1 СН, $1e51$ эрг

McKee 1989, Draine 2009

$$Mv_s^2 \approx E_0 \quad \text{фраза Седова, } v > 200 \text{ км/с}$$

$$M(v_s > 200 \text{ km s}^{-1}) \approx \frac{10^{51} \text{ erg}}{(200 \text{ km s}^{-1})^2} \approx 1260 M_{\odot}$$

$$\tau_d^{-1} \approx \frac{1260 M_{\odot} / 100 \text{ yr}}{5 \times 10^9 M_{\odot} \text{ (масса МЗС)}} \approx \frac{1}{4 \times 10^8 \text{ yr}}$$

- : **0.01-0.1 Мсол/год**для $t_{sp} \sim 3e8$ лет (McKee 1989, Jones et al 1994) $\sim 3e9$ лет (Jones & Tielens 1994, Slavin et al 2015)

1 СН, $1e51$ эрг

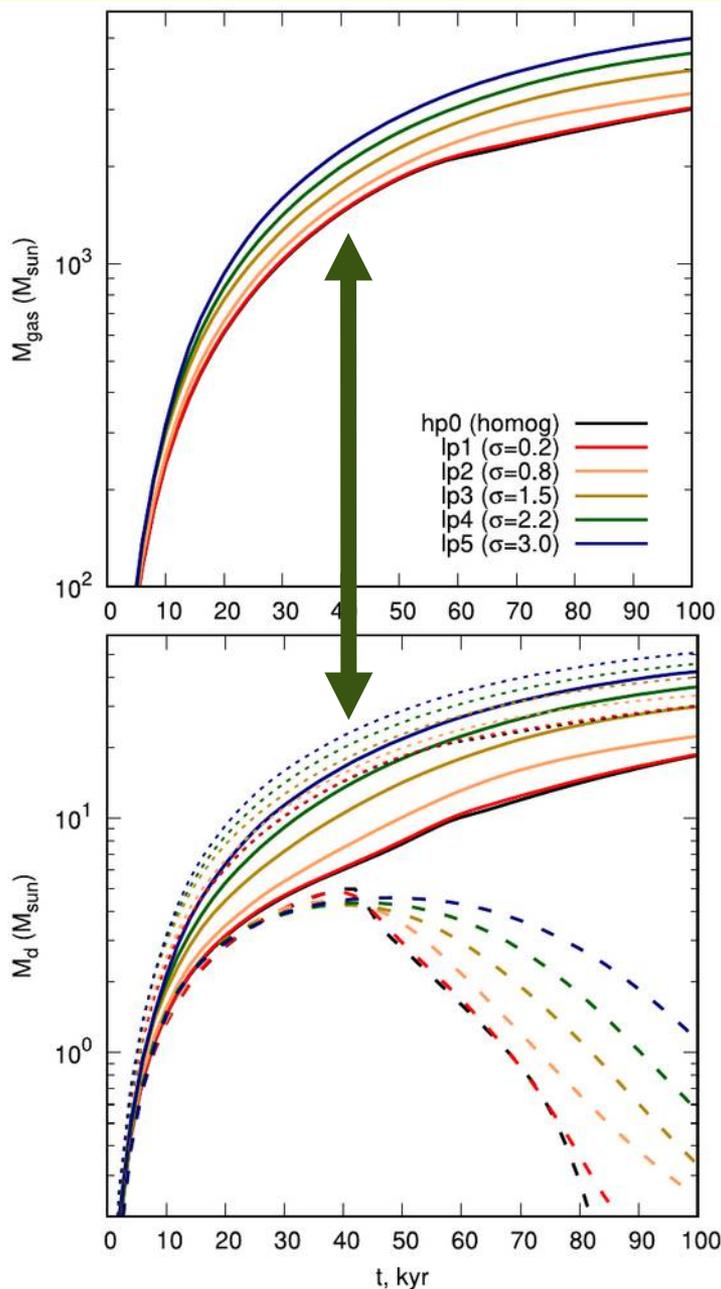
McKee 1989, Draine 2009

$$Mv_s^2 \approx E_0 \quad \text{фраза Седова, } v > 200 \text{ км/с}$$

$$M(v_s > 200 \text{ km s}^{-1}) \approx \frac{10^{51} \text{ erg}}{(200 \text{ km s}^{-1})^2} \approx 1260 M_{\odot}$$

$$\tau_d^{-1} \approx \frac{1260 M_{\odot} / 100 \text{ yr}}{5 \times 10^9 M_{\odot} \text{ (масса МЗС)}} \approx \frac{1}{4 \times 10^8 \text{ yr}}$$

- : **0.01-0.1 Мсол/год**для $t_{sp} \sim 3e8$ лет (McKee 1989, Jones et al 1994) $\sim 3e9$ лет (Jones & Tielens 1994, Slavin et al 2015)**1СН разрушает ~ 10 Мсол межзвездной пыли (DGR $\sim 1/100$)**



фаза Седова

начало охлаждения — торможение оболочки

$$\approx 1260 M_{\odot}$$

~10 Мсол

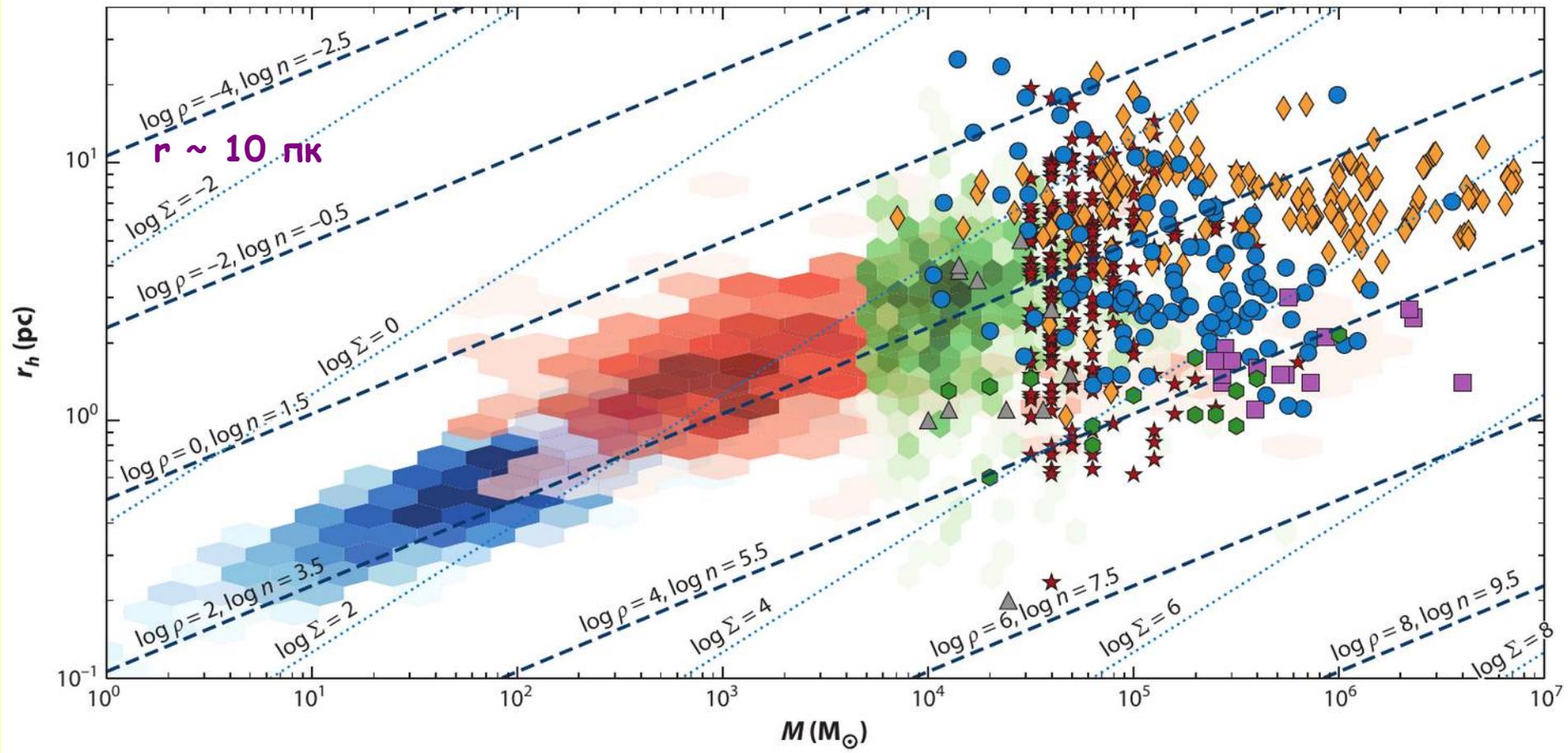
пунктирные — без разрушения

сплошные — с разрушением

штриховые — в горячем газе

функция масс скоплений: $dN/dM \sim M^{-a}$

$a = 1.25 - 2.25$, $M_{min} \sim 300 M_{sun}$, $M_{max} \sim 3 \times 10^7 M_{sun}$ (Krumholz et al 2019)



- | | | |
|---|--|--|
| ■ MW neighborhood (Kharchenko et al. 2013) | ★ M51 (Chandar et al. 2016) | ■ M82 SSCs (McCrady & Graham 2007) |
| ■ M31 (PHAT) | ◆ M31 GCs (Barmby et al. 2007) | ■ NGC 253 SSCs (Leroy et al. 2018) |
| ■ NGC 628, 1313, 5236 (Ryon et al. 2015, 2017) | ● MW GCs (Baumgardt & Hilker 2018) | ▲ MW YMCs |

функция масс скоплений: $dN/dM \sim M^{-a}$

$a = 1.25 - 2.25$, $M_{min} \sim 300 M_{sun}$, $M_{max} \sim 3 \times 10^7 M_{sun}$ (Krumholz et al 2019)

скопление массой M , 0.1 - 40 M_{sun} , НФМ Солпитера

ОВ-звезды: $N_{SN} \sim M/150 M_{sun}$

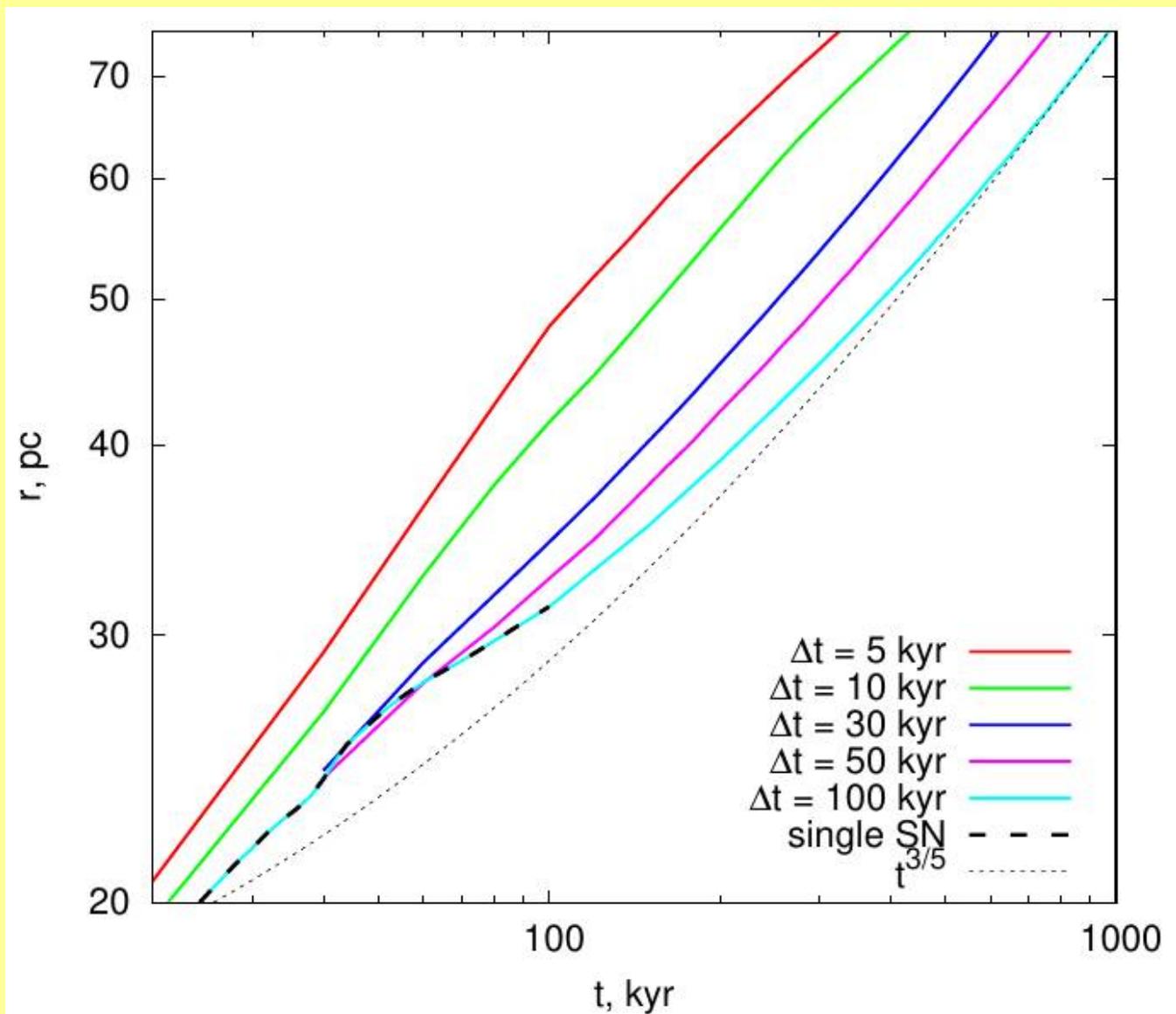
СН: 8-40 M_{sun}

период вспышек СН \sim время жизни звезды 8 M_{sun} :

$t_{max} \sim 24$ млн лет, $t \sim M^{-1.6}$ (Iben 2012)

среднее время между вспышками: $\Delta t \sim 24$ млн лет / N_{SN}

для скопления $M \sim 4e4 M_{sun}$ $N_{SN} \sim 250$, $\Delta t \sim 1e5$ лет



после нескольких СН ...
ветер, ветер ...

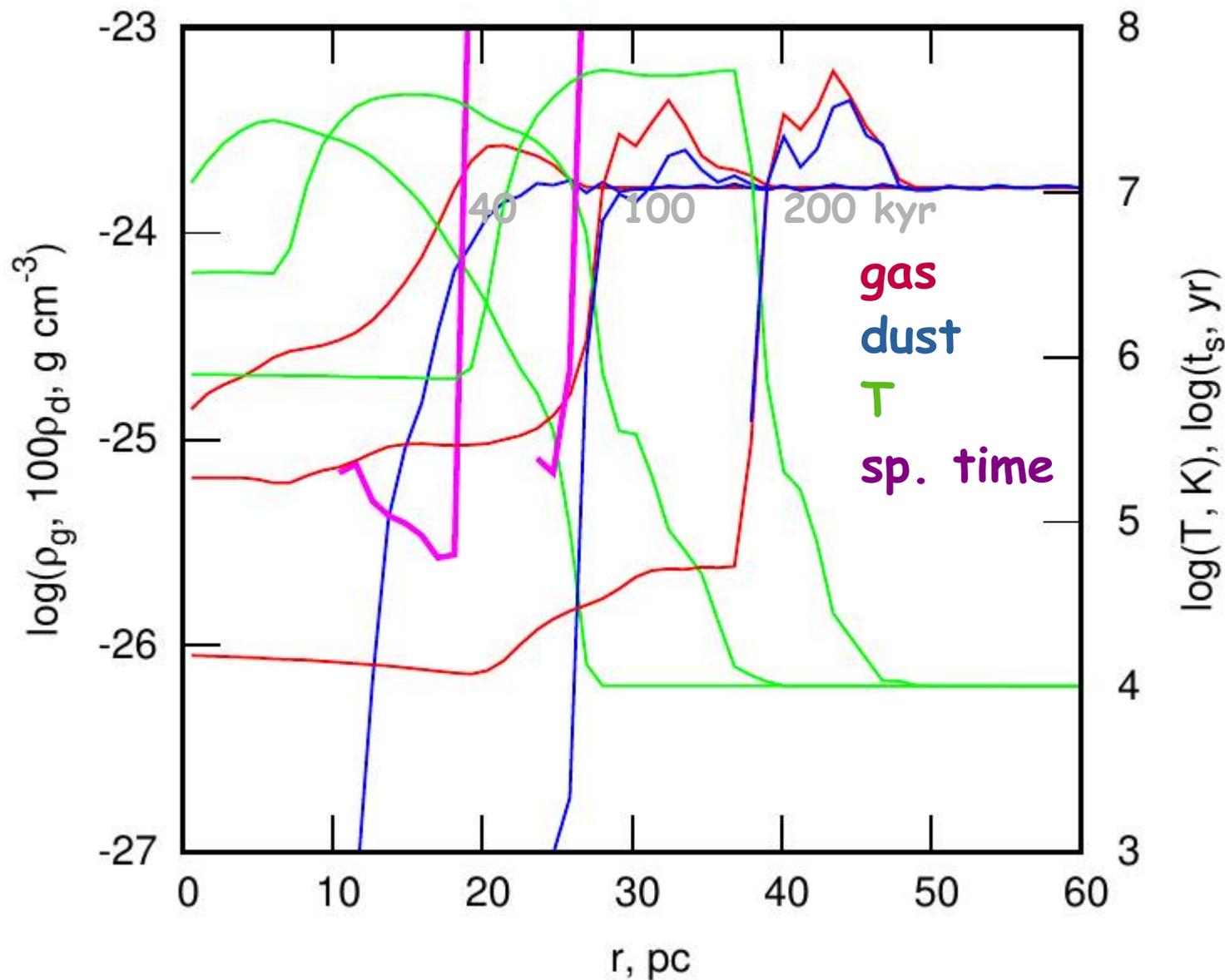
$$R \sim (L/n)^{1/5} t^{3/5}$$

Avedisova 1970
Castor et al 1975

EV et al 2017
EV et al in prep

средние радиальные профили

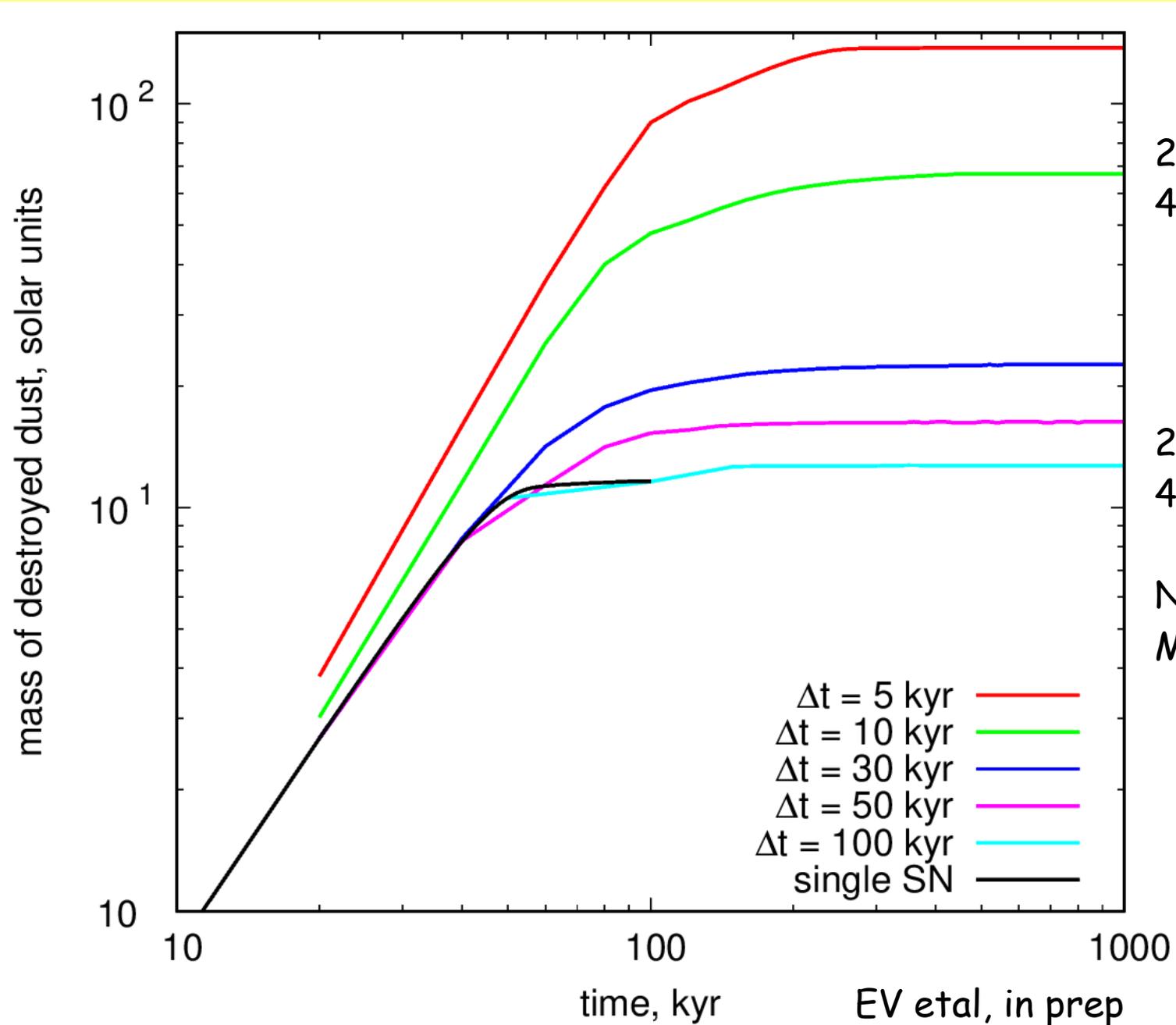
$r \sim 10$ пк,
 $\langle n \rangle \sim 1 \text{ cm}^{-3}$,
 $[Z/H] = 0$,
 $DGR = 1/100$,
 $Dt \sim 30 \text{ kyr}$

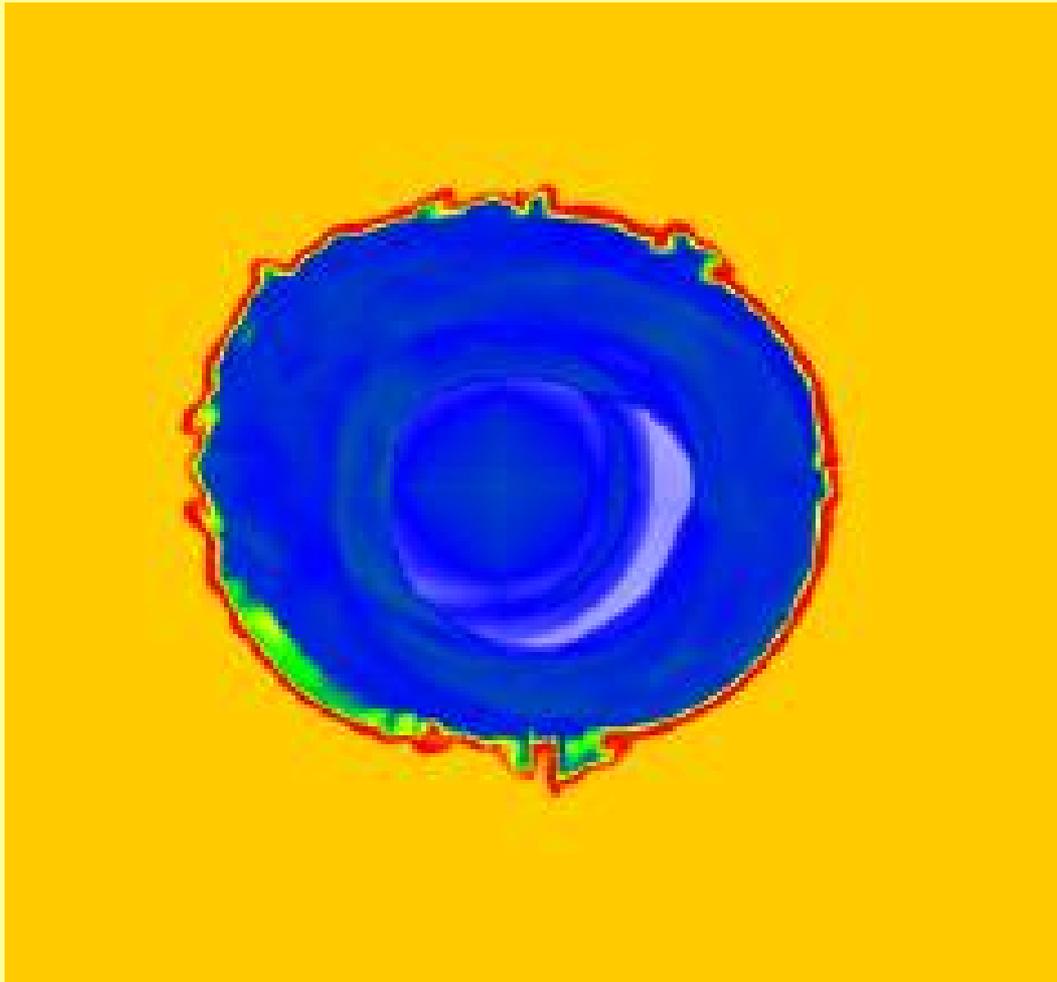


EV etal, in prep

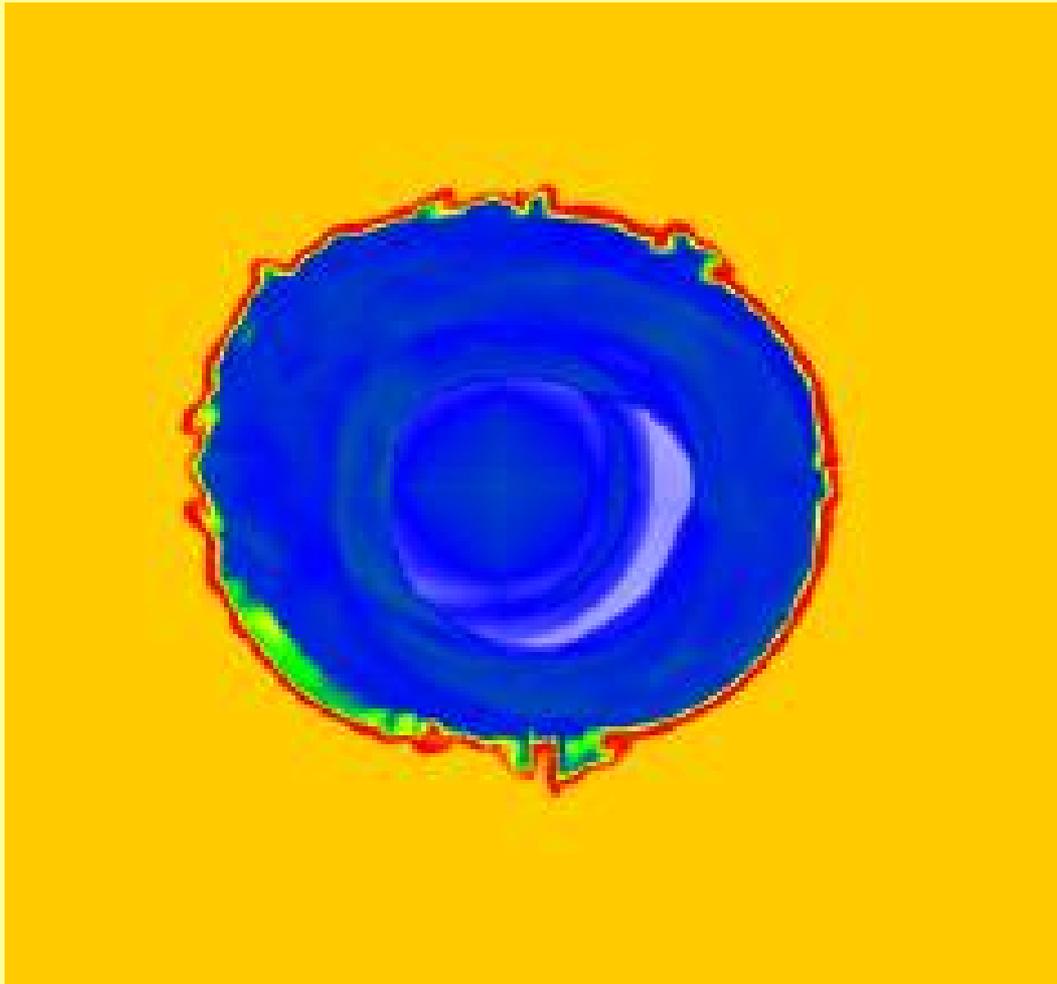
пыль при вспышках множественных СН

$r \sim 10$ пк,
 $\langle n \rangle \sim 1 \text{ см}^{-3}$,
 $[Z/H] = 0$,
 $DGR = 1/100$

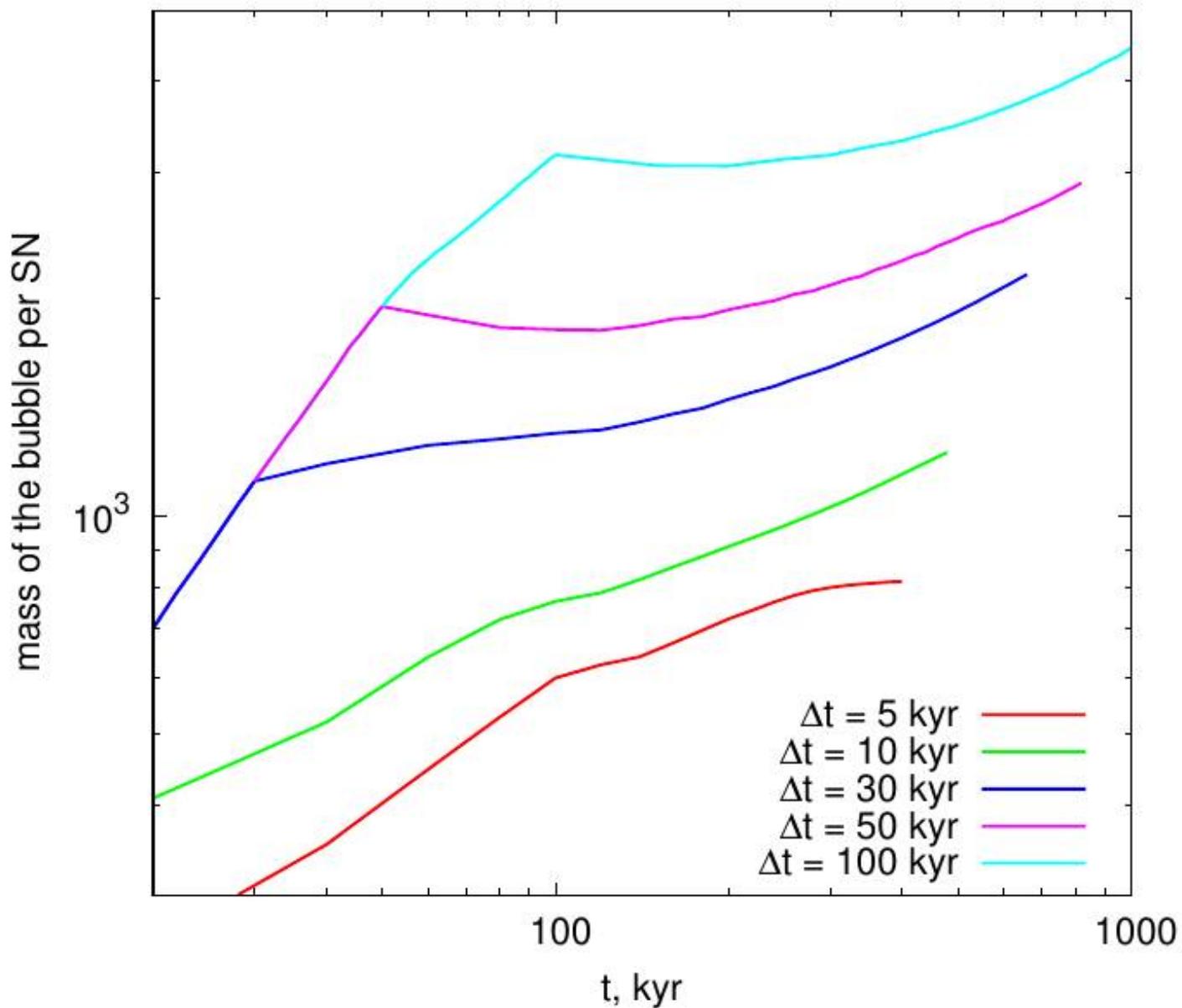




последующие вспышки происходят в горячем пузыре



последующие вспышки происходят в горячем пузыре,
(почти) не влияют на пыль в плотной оболочке

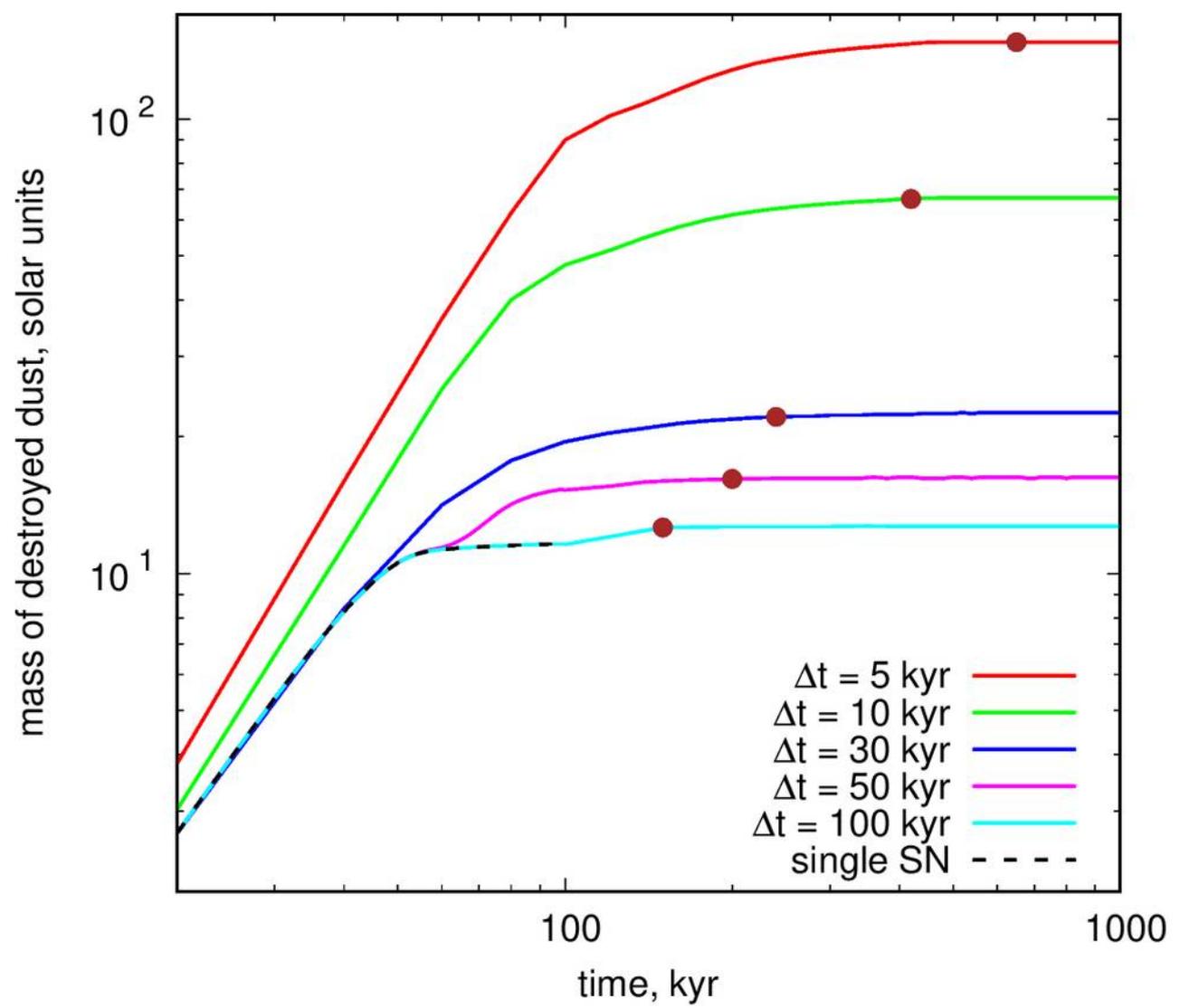


$$R \sim (L/n)^{1/5} t^{3/5}$$

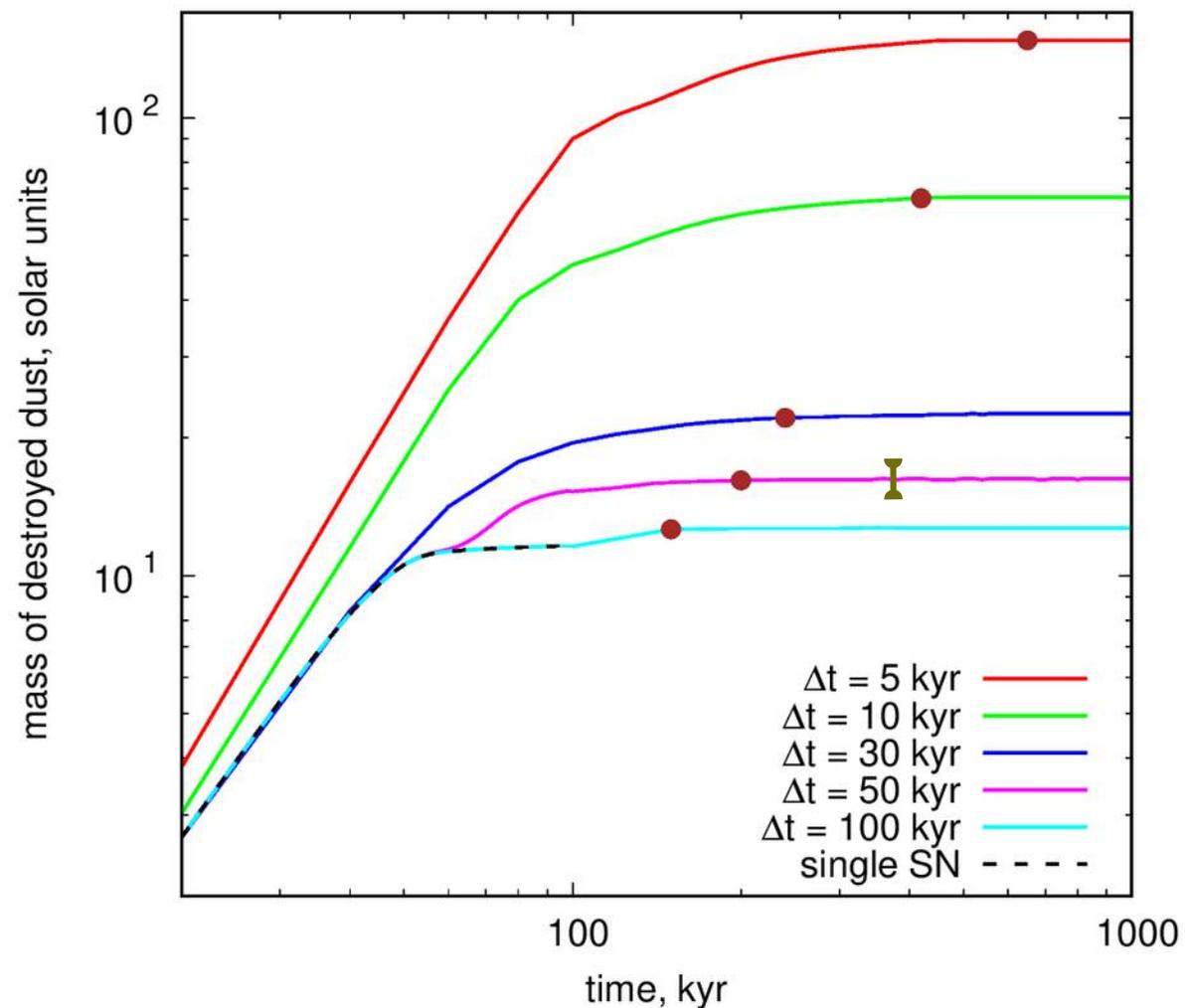
Avedisova 1970
Castor et al 1975

$$v_0 \sim 100 \text{ km s}^{-1}$$

$$t_{sat} \sim v_0^{-5/2} \left(\frac{\rho \Delta t}{E} \right)^{-1/2}$$



где больше?

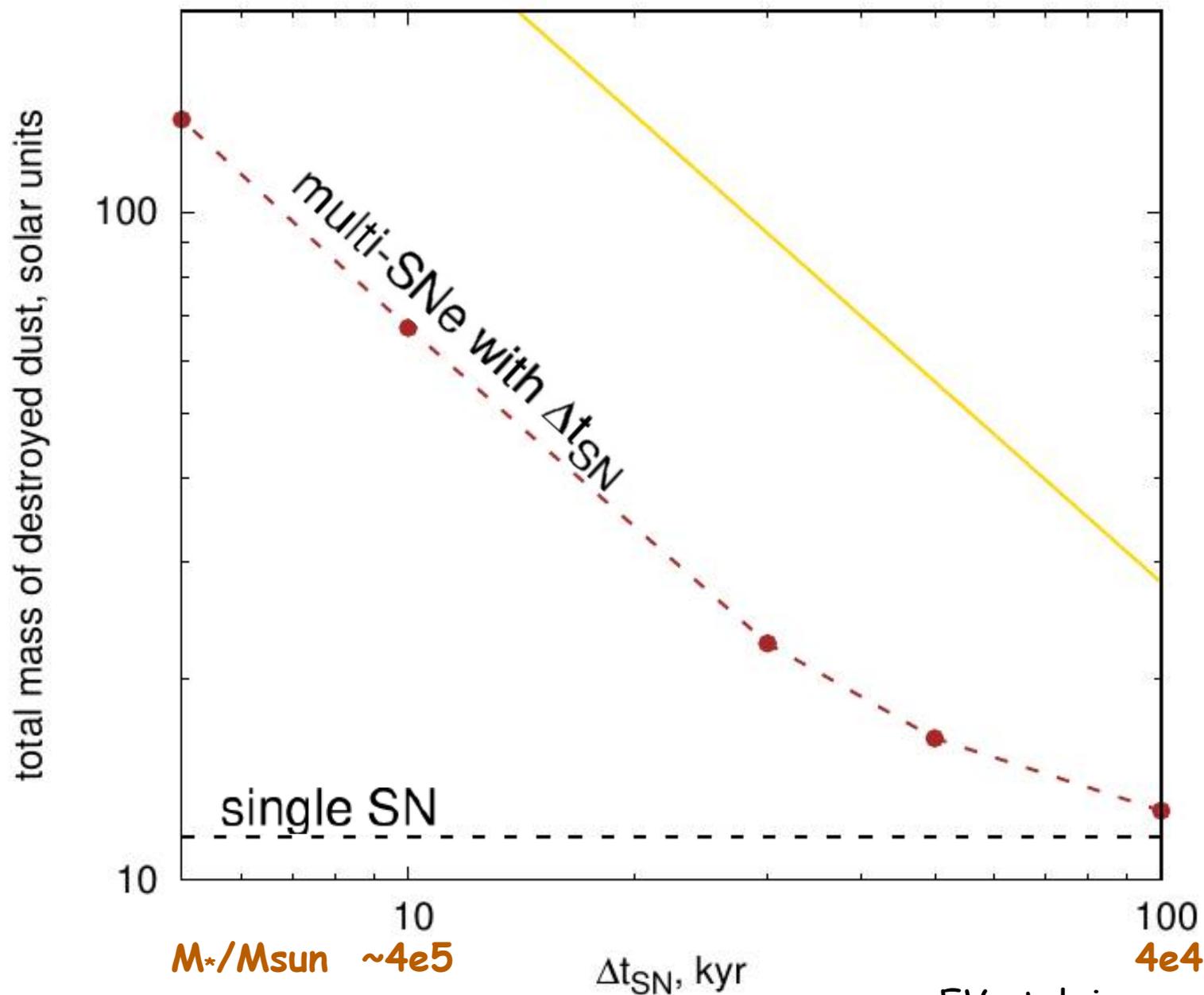


$M \sim 8e4 M_{\text{sun}}, \Delta t \sim 50$ kyr,

EV etal, in prep

$N_{\text{SN}} \sim 500$ разрушают по отдельности $\sim 5e3 M_{\text{sun}}$

в сколении $\sim 20 M_{\text{sun}}$

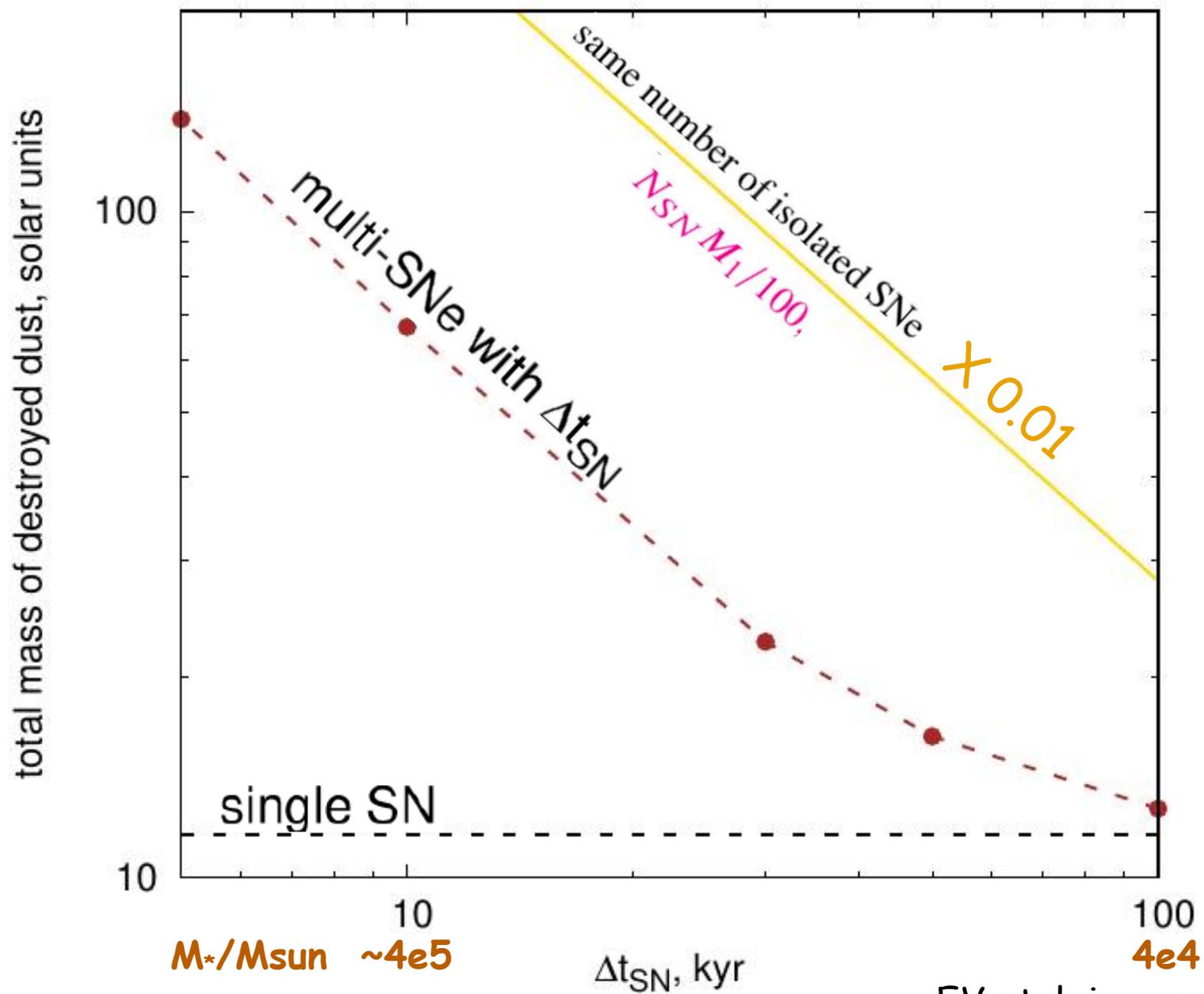


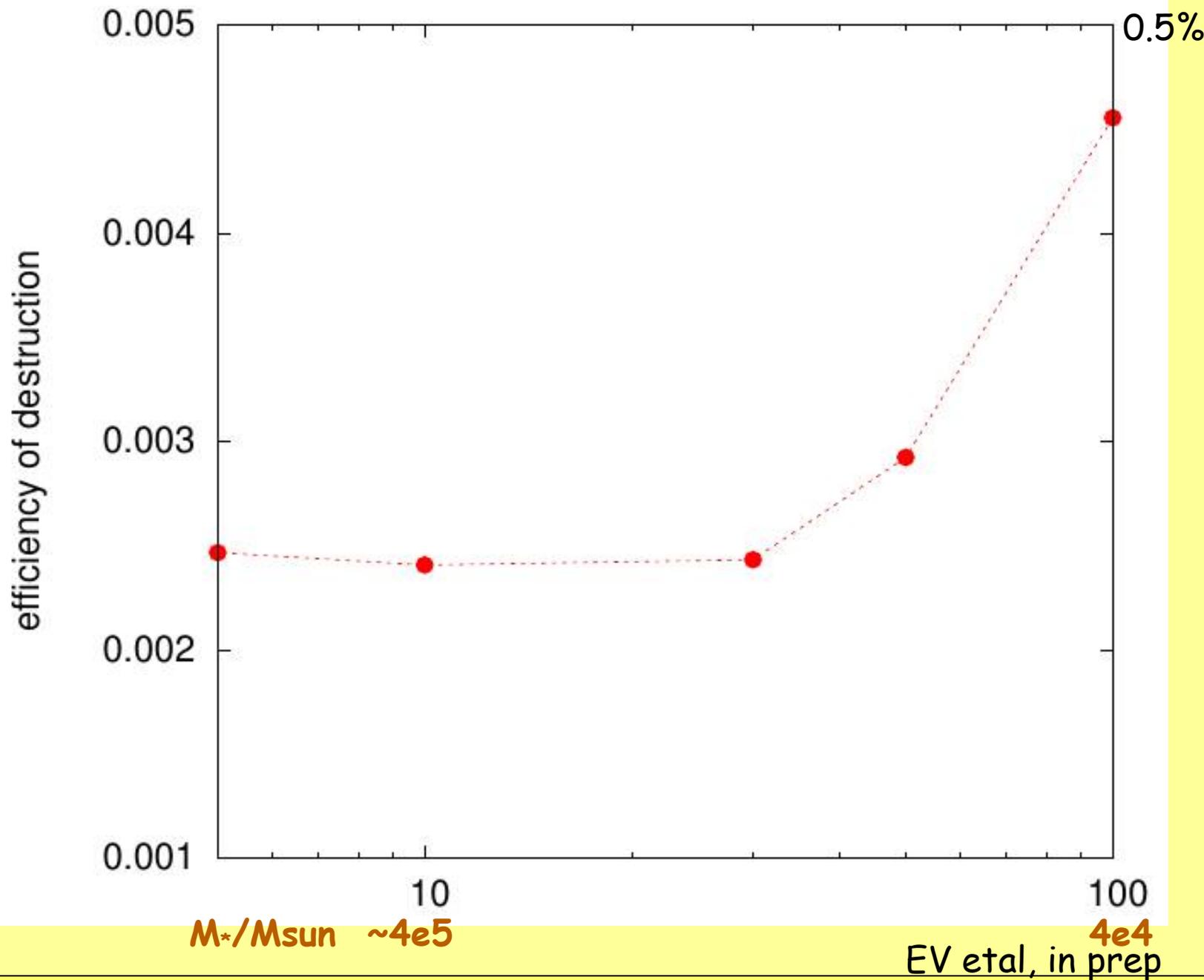
$M_*/M_{sun} \sim 4e5$

Δt_{SN} , kyr

$4e4$

EV et al, in prep

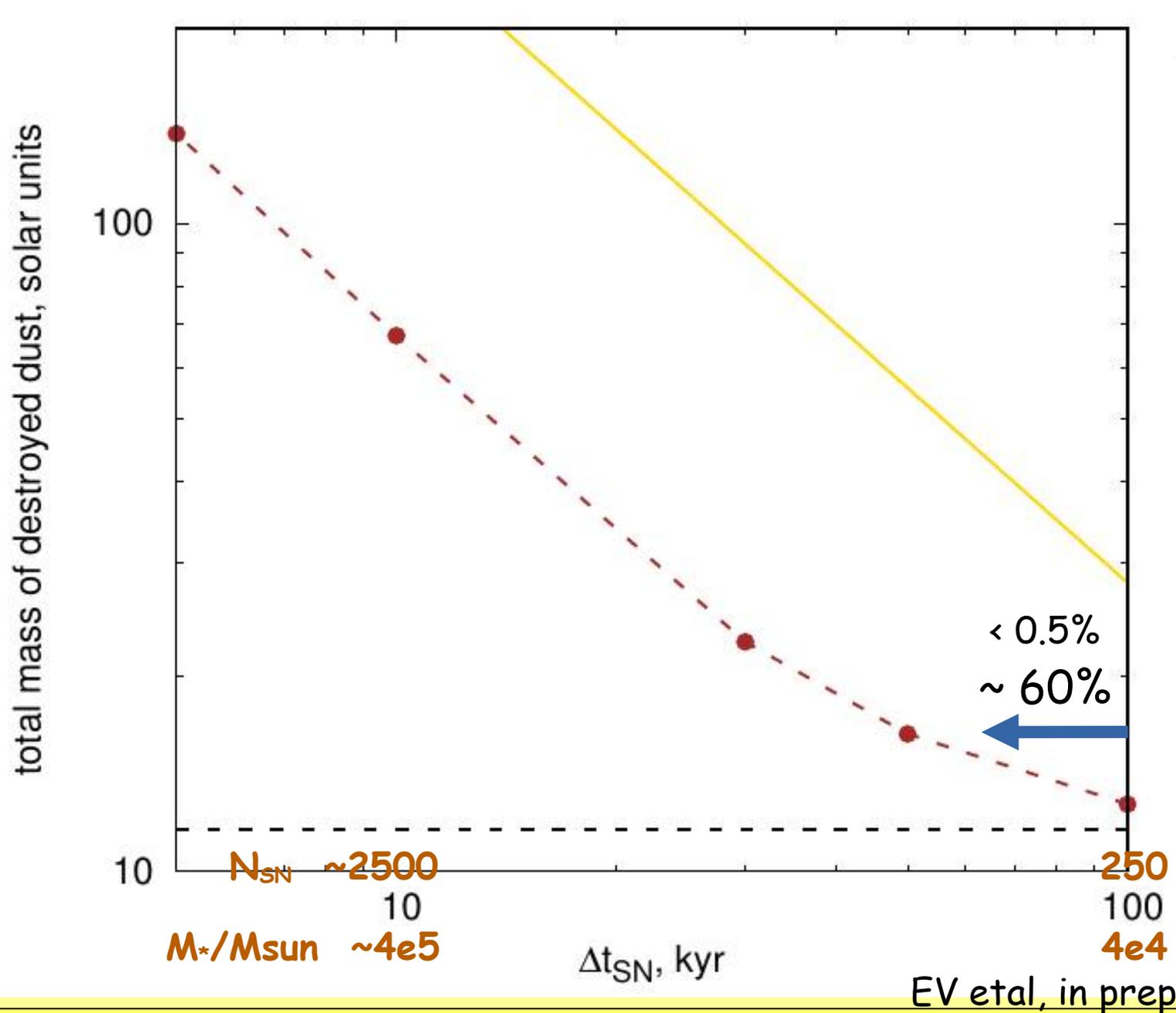




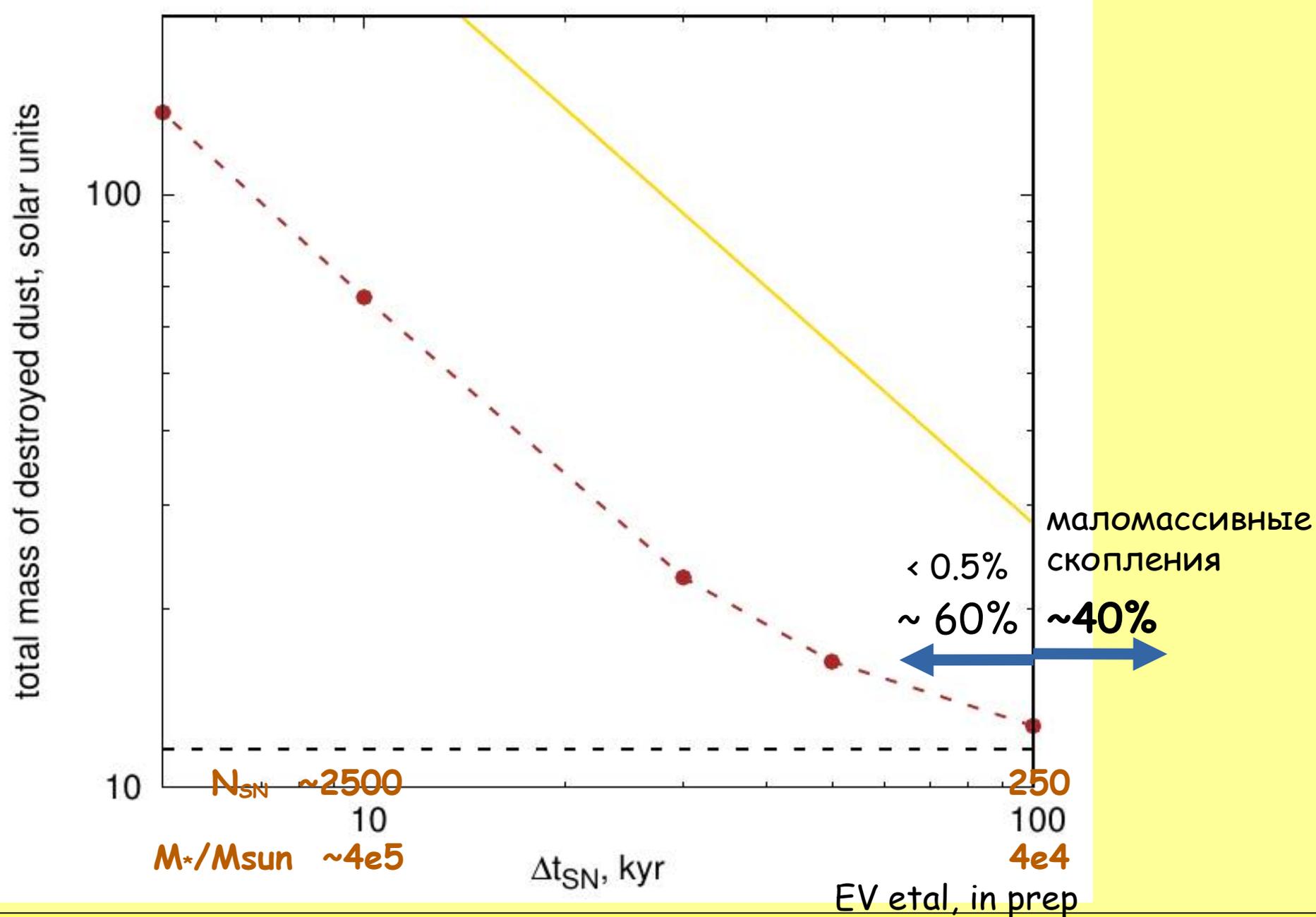
$M_*/M_{\text{sun}} \sim 4e5$

EV etal, in prep $4e4$

0.5%

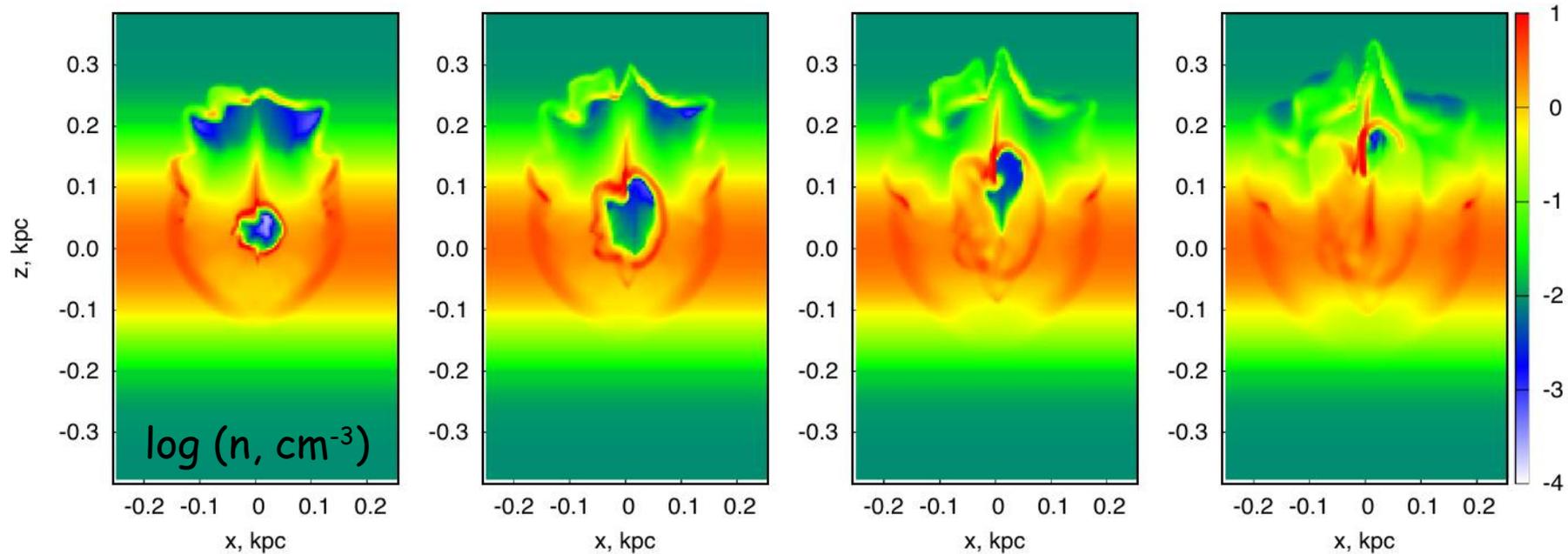


$$f_{SN} \sim \frac{\int_{M_*}^{M_{max}} M^{-\alpha} dM}{\int_{M_{min}}^{M_{max}} M^{-\alpha} dM}$$



$$t_{\text{fade}} \approx \left(\frac{(2/7) R_{\text{rad}} / t_{\text{rad}}}{c_s} \right)^{7/5} t_{\text{rad}}$$

$$\approx 1.87 \times 10^6 \text{ yr } E_{51}^{0.32} n_0^{-0.37} \left(\frac{c_s}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-7/5}$$



$$t_{\text{fade}} \approx \left(\frac{(2/7) R_{\text{rad}} / t_{\text{rad}}}{c_s} \right)^{7/5} t_{\text{rad}}$$

$$\approx 1.87 \times 10^6 \text{ yr } E_{51}^{0.32} n_0^{-0.37} \left(\frac{c_s}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-7/5}$$

1 SN per $0.5t_f \sim 0.5 \text{ Myr}$

$$M_* \sim 7 \times 10^3 M_{\odot}$$

эффективность разрушения межзвездной пыли
сверхоболочками, образованными множественными
вспышками СН в звездных скоплениях средней и высокой
массы $M > 4e4 M_{\text{sun}}$, **менее 0.5%** по сравнению с
ансамблем изолированных СН

разрушение межзвездной пыли определяется, по-видимому,
маломассивными скоплениями $M < 7e3 M_{\text{sun}}$

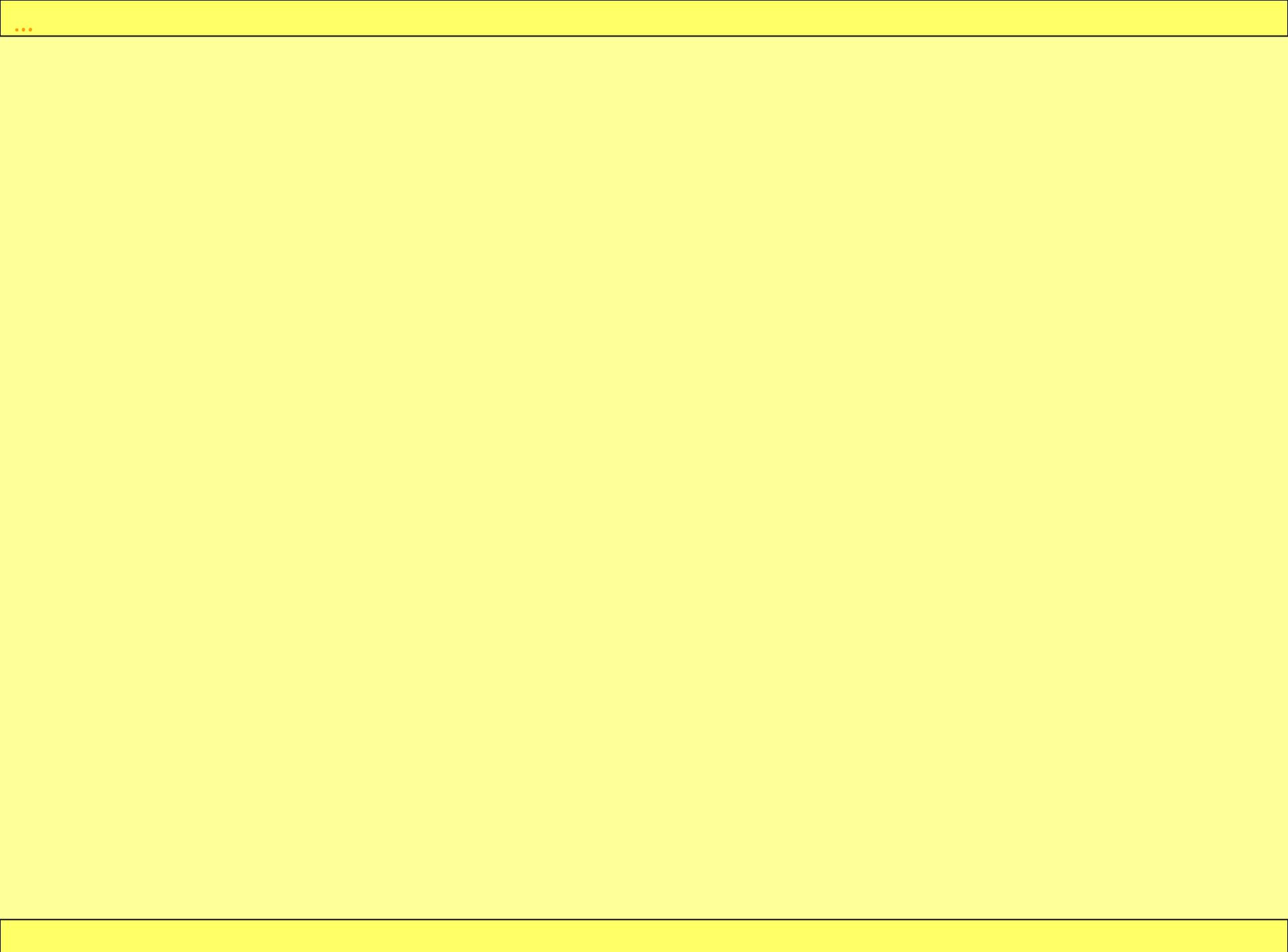
время жизни пыли оказывается **минимум в 3 раза длиннее**
при заданном темпе звездообразования

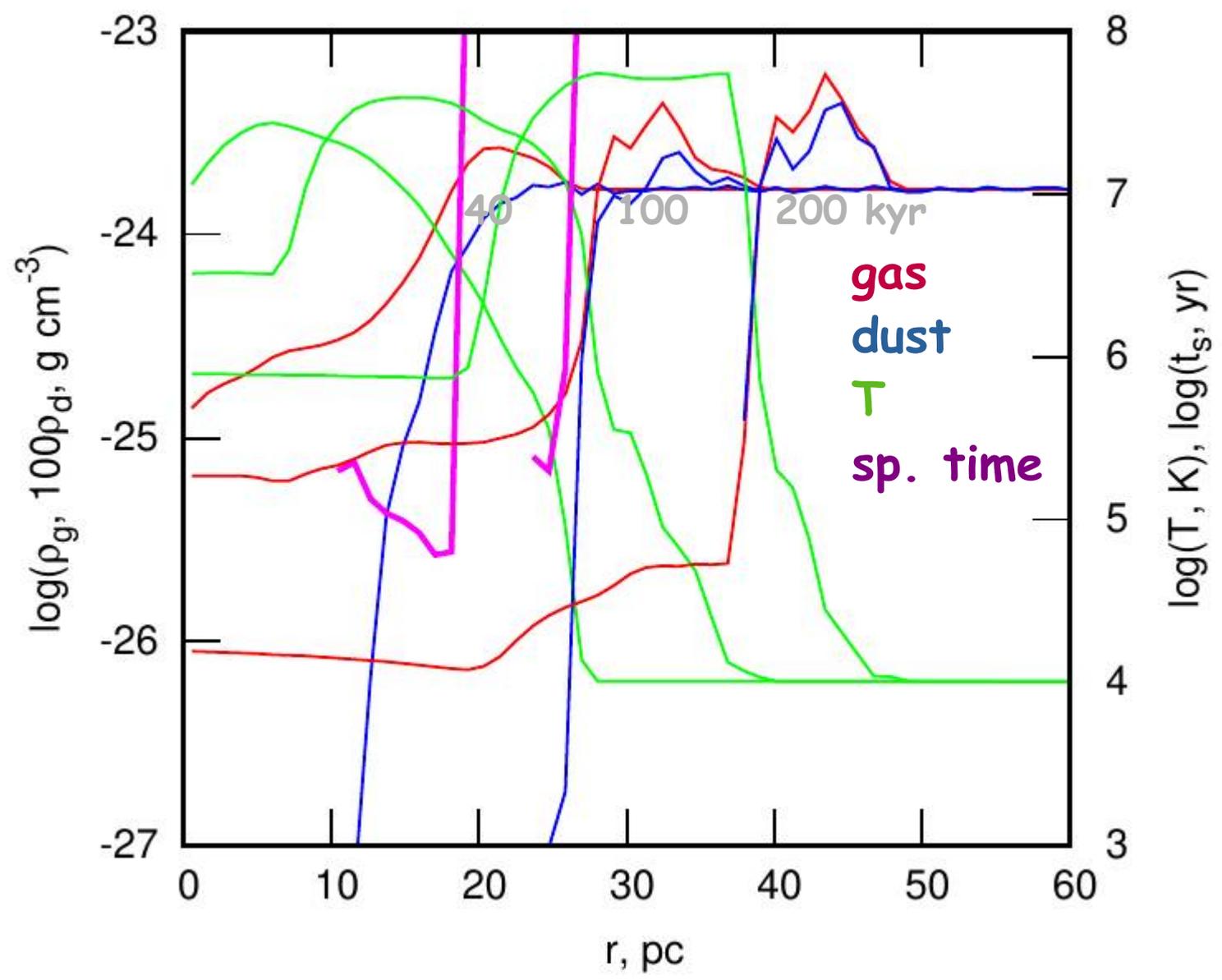
эффективность разрушения межзвездной пыли
сверхоболочками, образованными множественными
вспышками СН в звездных скоплениях средней и высокой
массы $M > 4e4 M_{\text{sun}}$, **менее 0.5%** по сравнению с
ансамблем изолированных СН

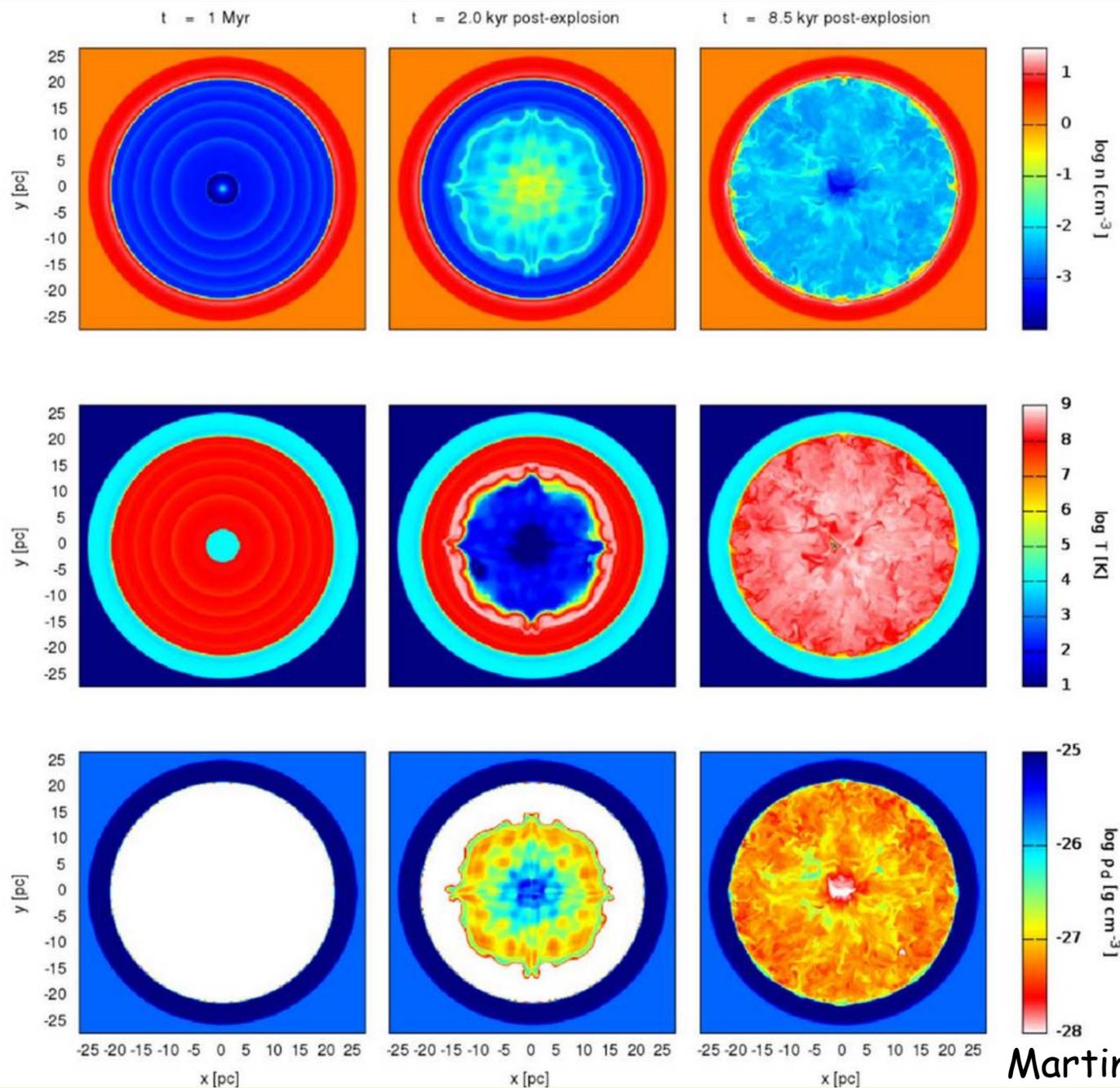
разрушение межзвездной пыли определяется, по-видимому,
маломассивными скоплениями $M < 7e3 M_{\text{sun}}$

время жизни пыли оказывается **минимум в 3 раза длиннее**
при заданном темпе звездообразования

Спасибо!!!







вспышка
 в разреженном
 газе НІІ области

функция масс скоплений: $dN/dM \sim M^{-a}$

$a = 1.25 - 2.25$, $M_{min} \sim 300 M_{sun}$, $M_{max} \sim 3 \times 10^7 M_{sun}$ (Krumholz et al 2019)

скопление массой M , 0.1 - 40 M_{sun} , НФМ Солпитера

ОВ-звезды: $N_{SN} \sim M/150 M_{sun}$

СН: 8-40 M_{sun}

период вспышек СН \sim время жизни звезды 8 M_{sun} :

$t_{max} \sim 24$ млн лет, $t \sim M^{-1.6}$ (Iben 2012)

среднее время между вспышками: $\Delta t \sim 24$ млн лет / N_{sn}

для скопления $M \sim 4e4 M_{sun}$ $N_{SN} \sim 250$, $\Delta t \sim 1e5$ лет

$\Delta t \sim 3e4 - 1e5$ лет, $M \sim (4-12)e4 M_{sun}$, $\sim 10\%$ ($a \sim 2$)

3D TVD code (EV etal 2015...)

MUSCL-Hancock

HLLC

динамика пыли (EV & Shchekinov 2024)

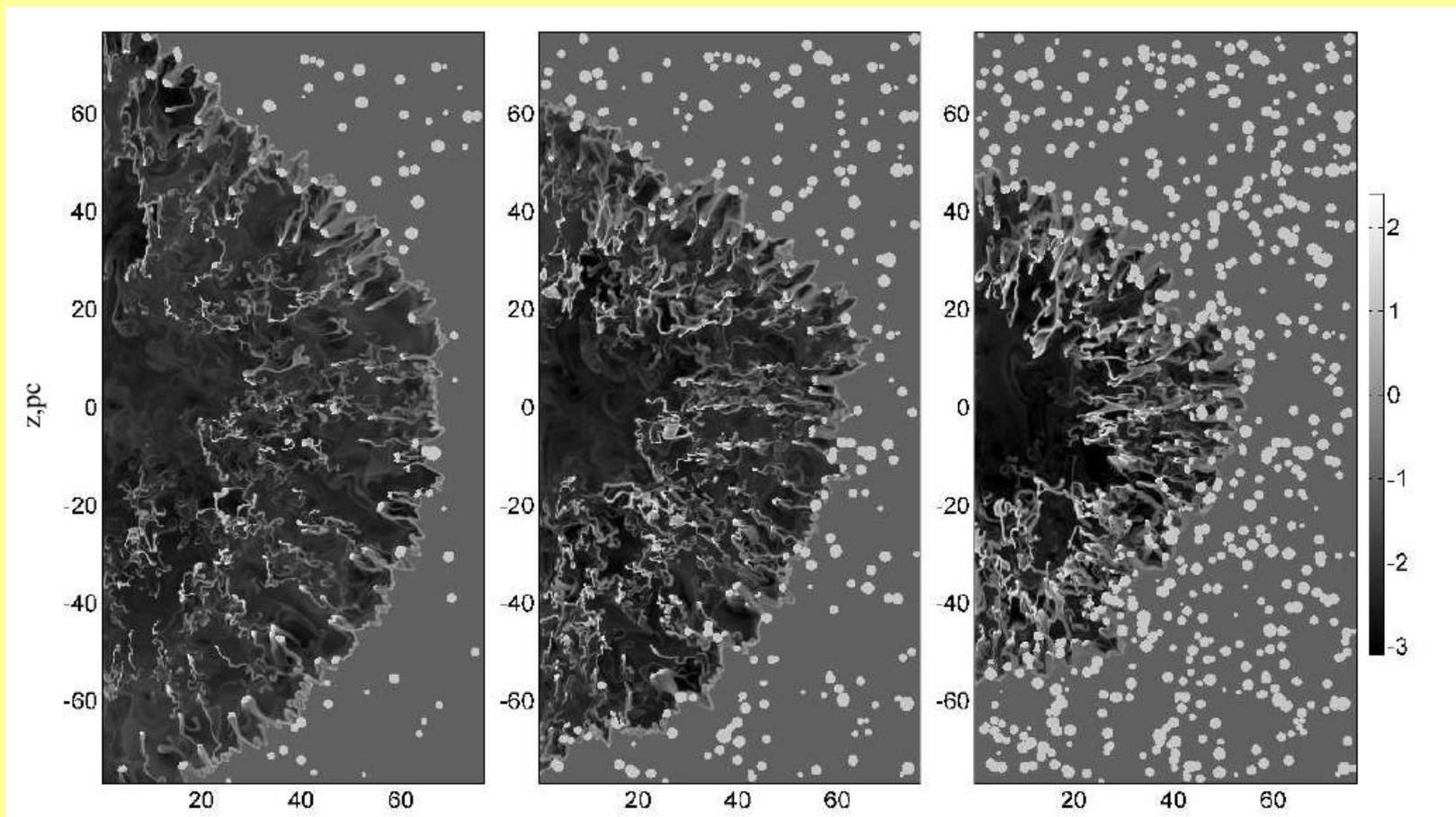
макрочастицы (Youdin & Johansen 2007)

тепловое и кинетическое испарение (Draine & Salpeter 1979)

охлаждение (EV 2011)

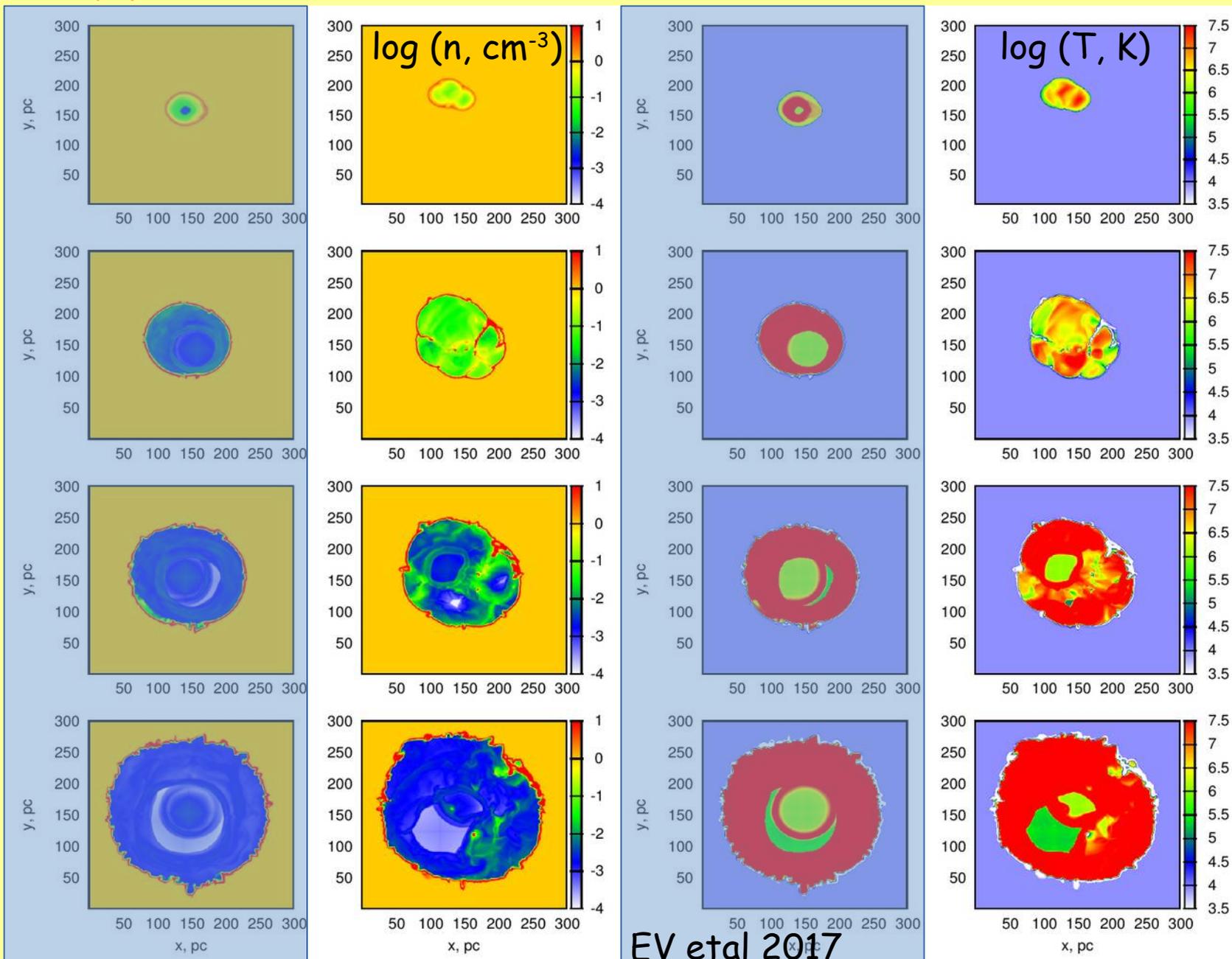
NEQ изохорическое

10-1e8 K



Korolev et al 2015

Влияние внутренних УВ



EV et al 2017