

Ускорение космических лучей в
остатках сверхновых с
неоднородным
распределением плотности

В.Н.Зиракашвили, В.С.Птускин
(ИЗМИРАН)

Ускорение КЛ ударными волнами

Замечательная особенность -
 степенной спектр ускоренных
 частиц $\gamma = (\sigma + 2) / (\sigma - 1)$, где σ степень
 сжатия ударной волны, для
 сильных ударных волн $\sigma = 4$ and $\gamma = 2$

Крымский 1977;
 Bell 1978

Максимальная энергия E_{\max} : $D(E_{\max}) \sim 0.1 u_{\text{sh}} R_{\text{sh}}$

Для молодых ОСН : $u_{\text{sh}} R_{\text{sh}} \sim 10^{28} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$

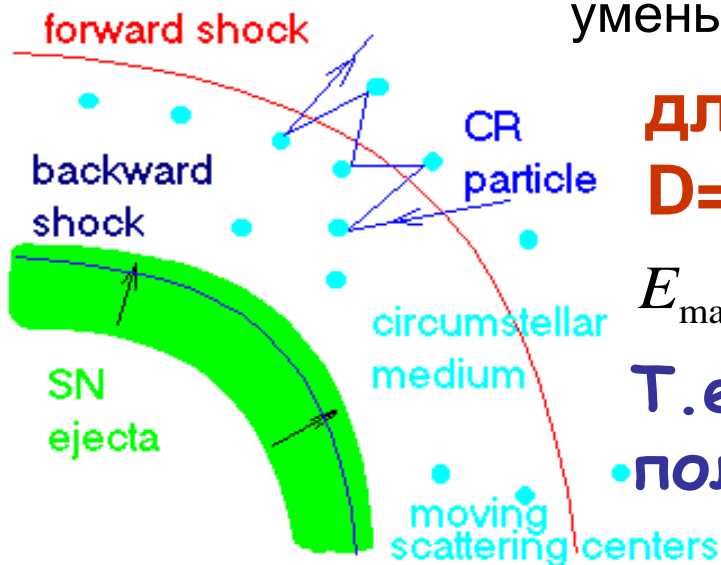
а в Галактике $D \sim 10^{28} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ при $E \sim 10$ ГэВ, т.е.
 коэффициент диффузии КЛ должен быть сильно
 уменьшен вблизи фронта УВ

для Бомовской диффузии

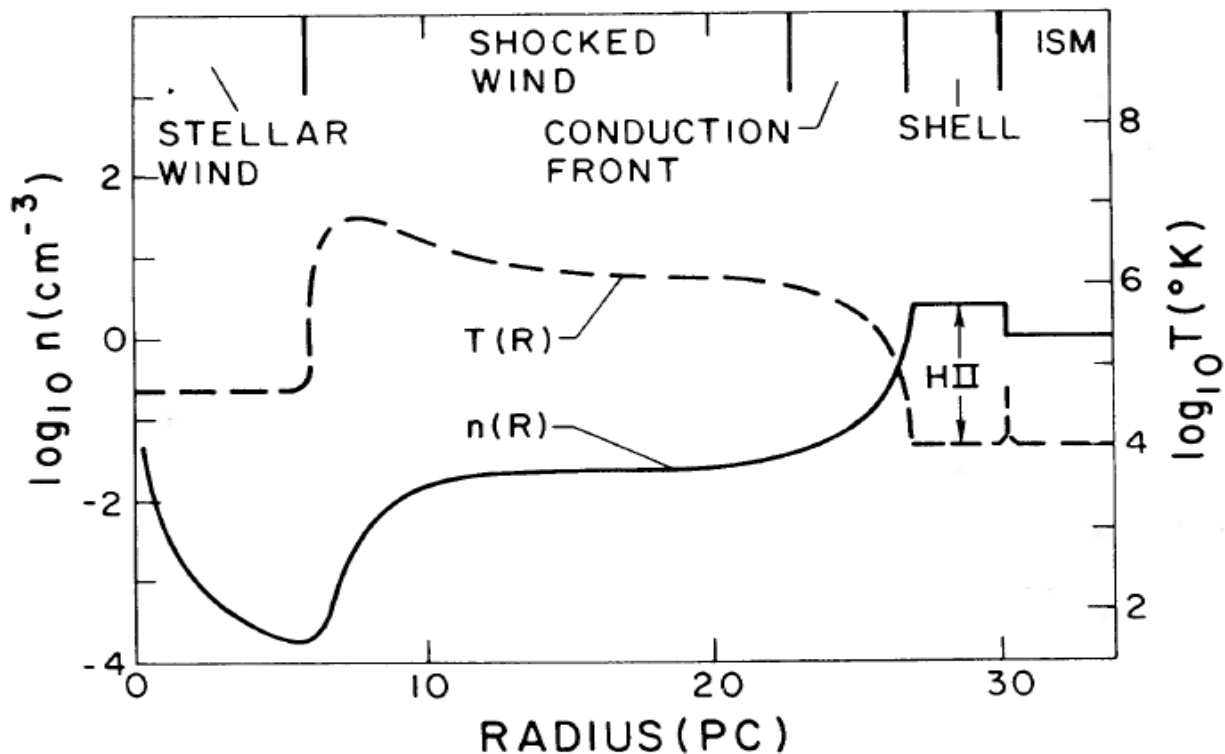
$$D = D_B = c r_g / 3$$

$$E_{\max} = Z \cdot 10^{14} \text{ eV} \left(\frac{B}{10 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{R_{\text{sh}}}{3 \text{ pc}} \right) \left(\frac{u_{\text{sh}}}{3000 \text{ km s}^{-1}} \right)$$

Т.е. необходимо усиление магнитного
 поля для ускорения до 10^{15} эВ



Ускорение на УВ, распространяющейся в каверне, произведенной ветром предсверхновой



Среда в
каверне
подготовлена
для
эффективного
ускорения
частиц.

FIG. 3.—The large-scale features of the temperature and density structure of an interstellar bubble for which $L_w = 1.27 \times 10^{36} \text{ ergs s}^{-1}$, $n_0 = 1 \text{ cm}^{-3}$, and $t = 10^6 \text{ yr}$. ISM means ambient interstellar medium. For a typical O7 I star, the H II region would extend to $\sim 3 R_2$.

Weaver et al. 1977

Около половины сверхновых
взрываются в такую среду IIP, Ib/c

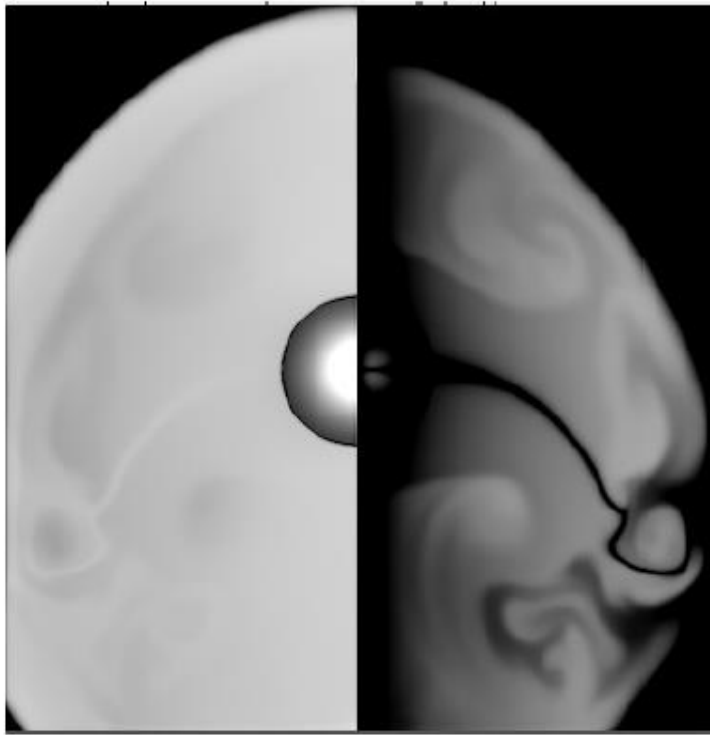


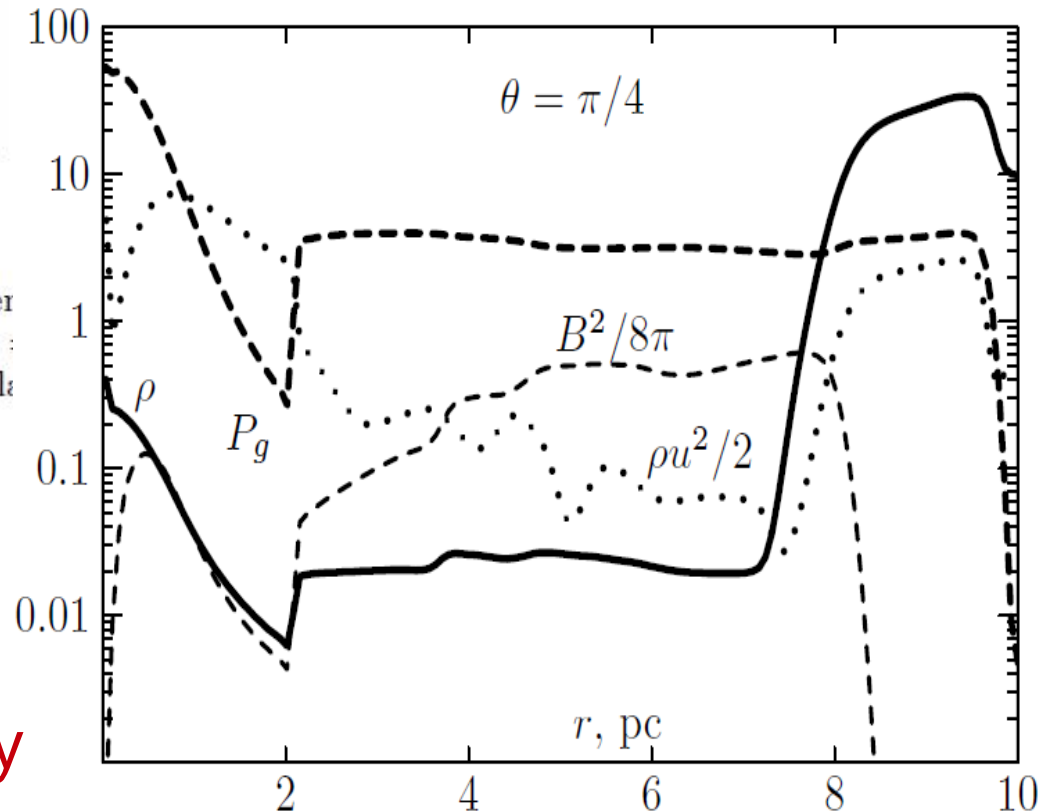
Figure 1: Gas pressure P_g (left panel) and magnetic energy density (right panel) distribution in the domain 10×20 pc at $t = 300$ kyr. The logarithmic scaling is from $2.3 \cdot 10^{-12}$ erg cm^{-3} (black) to $2.3 \cdot 10^{-10}$ erg cm^{-3} (white color).

2D MHD modeling of WR bubble

$$\dot{M} = 10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$$

$$u_w = 1000 \text{ km/s}, M_w = 20, t = 300 \text{ kyr}$$

$$n_0 = 10 \text{ cm}^{-3}$$



Zirakashvili & Ptuskin 2018

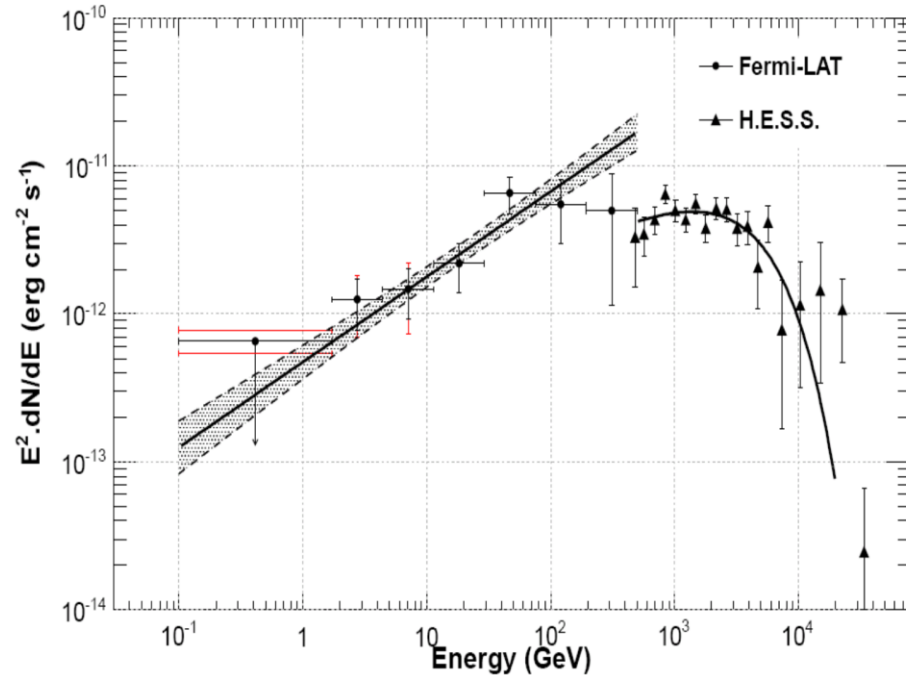
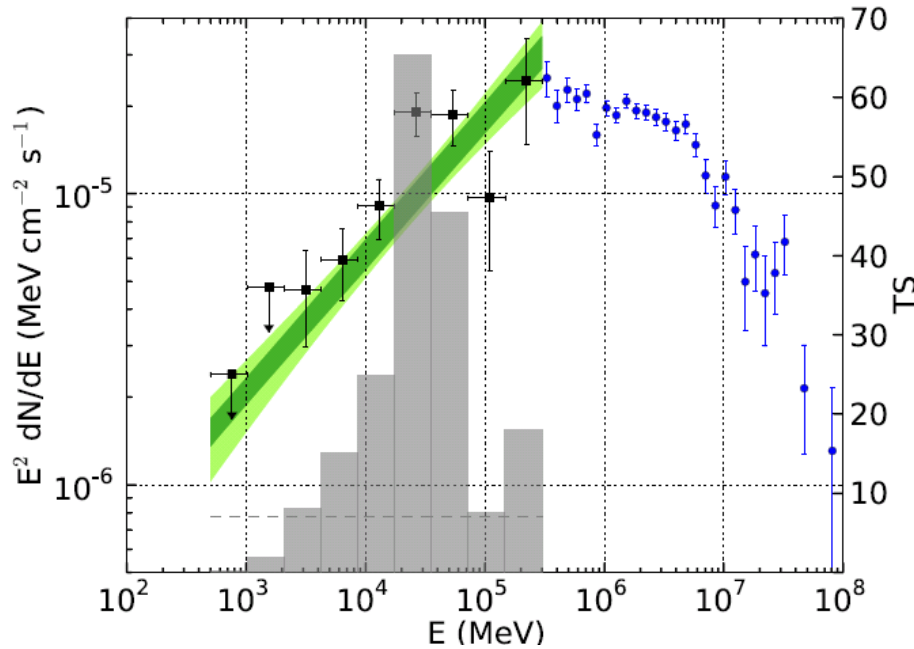
$B \sim 20 \mu\text{G}$ at the periphery

Young SNRs in low density medium – in bubbles produced by stellar winds of SN progenitors

RX J1713.7-3946

$n_H \leq 0.1 \text{ cm}^{-3}$

RCW86



Federici et al. 2015

Ajello et al. 2016

$T \sim 1600 \text{ yr}$

$T \sim 2000 \text{ yr}$

Probably the **leptonic** origin of gamma emission, however **hadronic** gamma rays from strongly modified shock are not excluded. In both cases protons are accelerated up to energies $\geq 100 \text{ TeV}$.

Численная модель нелинейного ускорения на ударных волнах в ОСН (Zirakashvili & Ptuskin 2012) (естественное развитие существующих моделей Berezhko et al. (1994-2006), Kang & Jones 2006)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 u \rho \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P_g}{\partial r} + \frac{\partial P_c}{\partial r} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_g}{\partial t} = -u \frac{\partial P_g}{\partial r} - \frac{\gamma_g P_g}{r^2} \frac{\partial r^2 u}{\partial r} - (\gamma_g - 1)(w - u) \frac{\partial P_c}{\partial r} \quad (3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 D(p, r, t) \frac{\partial N}{\partial r} - w \frac{\partial N}{\partial r} + \frac{\partial N}{\partial p} \frac{p}{3r^2} \frac{\partial r^2 w}{\partial r}$$

$$+ \frac{\eta_f \delta(p - p_f)}{4\pi p_f^2 m} \rho(R_f + 0, t) (\dot{R}_f - u(R + 0, t)) \delta(r - R_f(t))$$

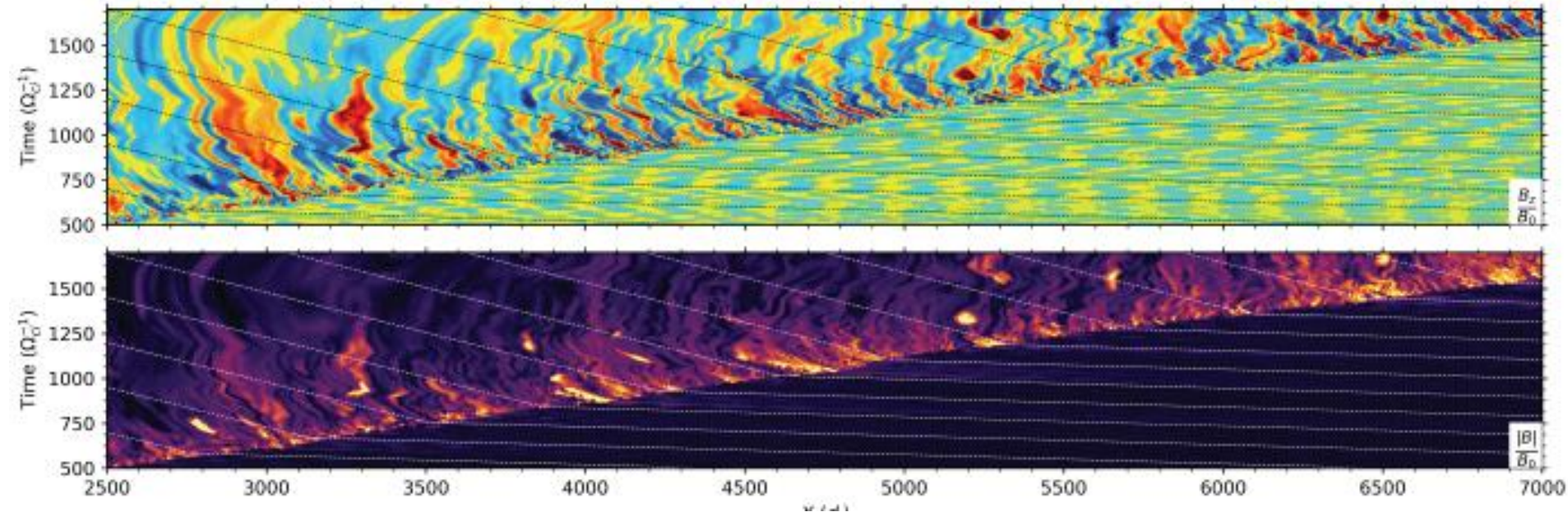
$$+ \frac{\eta_b \delta(p - p_b)}{4\pi p_b^2 m} \rho(R_b - 0, t) (u(R_b - 0, t) - \dot{R}_b) \delta(r - R_b(t))$$

Сферически симметричные уравнения гидродинамики + уравнение переноса космических лучей

Ускорение на внешней и обратной ударных волнах

(4)

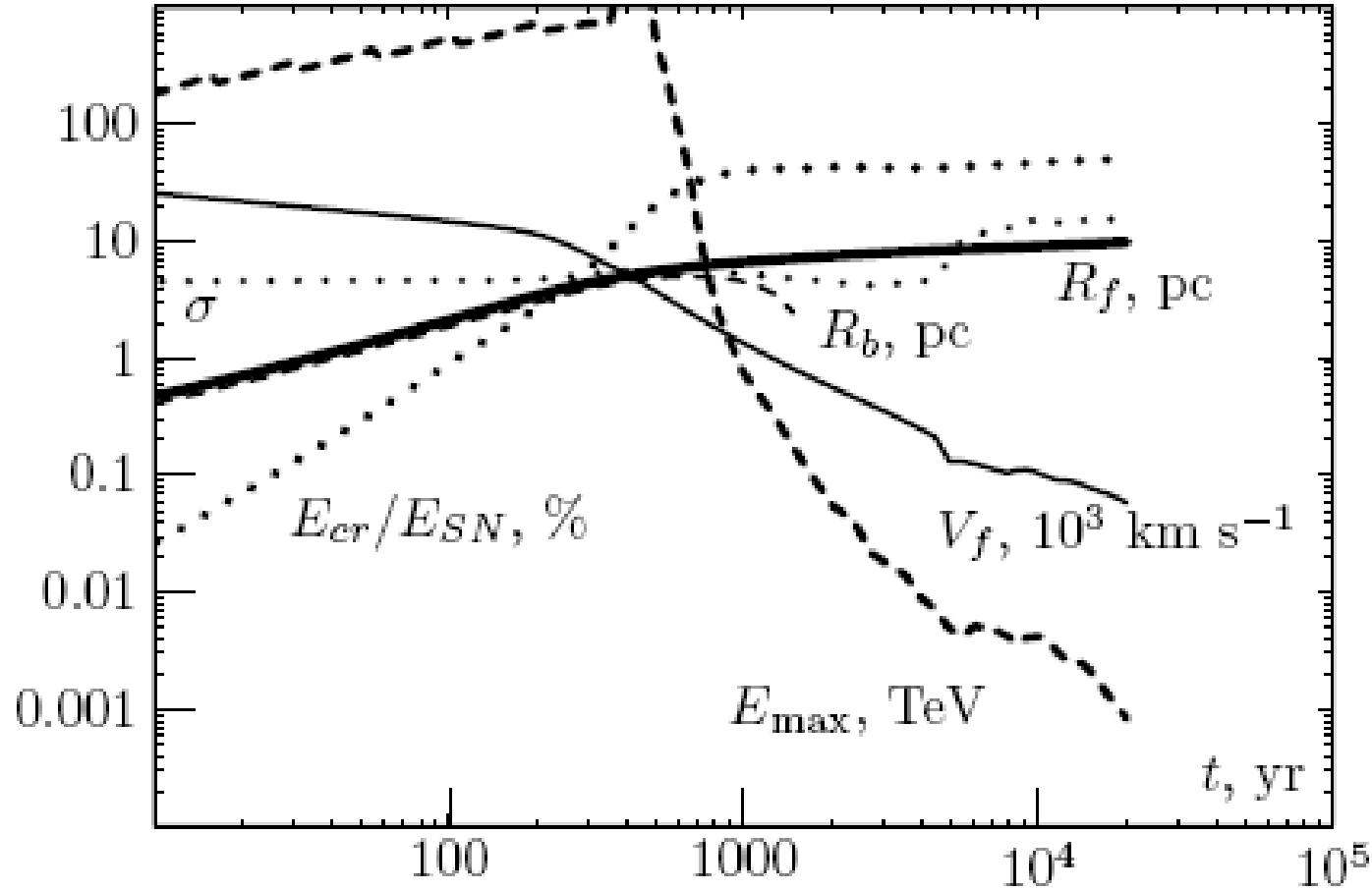
Альвеновский дрейф за фронтом ударной волны в гибридном моделировании (Haggerty & Caprioli 2020)



Магнитные структуры и энергичные частицы переносятся с альвеновской скоростью за фронтом. Более мягкие спектры ускоренных частиц.

Zirakashvili & Ptuskin 2008, Ptuskin et al. 2010, 2013

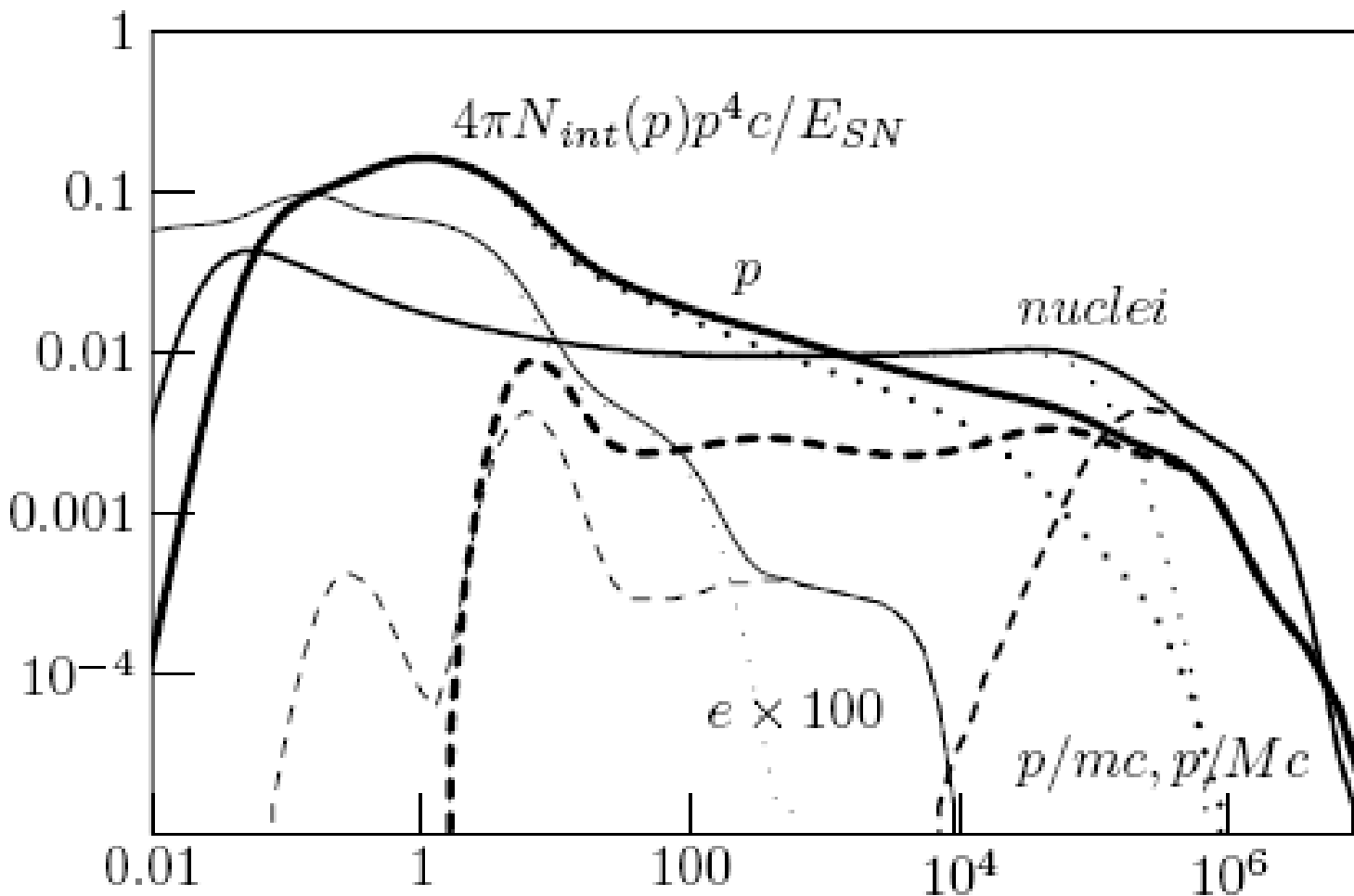
Эволюция остатка СН типа Ibс



$$E_{\text{SN}} = 1.2 \cdot 10^{51} \text{ erg}, M_{\text{ej}} = 1.2 M_{\text{sol}}, t = 20 \text{ kyr}, n_{\text{H}} = 70.0 \text{ cm}^{-3}, n_{\text{b}} = 0.01 \text{ cm}^{-3}$$

$B_{\text{b}} = 10^{-5} \text{ G}$, $n = n_{\text{b}} + n_{\text{H}}(r/10 \text{ pc})^{10}$, альфвеновский дрейф за фронтом ударной волны

Спектры протонов и электронов, произведенных в остатке СН типа Ib/c



30 % энергии взрыва перешло в протоны на внешней ударной волне, 20 % в ядра на обратной ударной волне

Выводы

- 1) Каверны, произведенные предсверхновыми класса O (IIР) или Вольфа Райе (Ib/c), содержат усиленное турбулентное магнитное поле и, следовательно, подготовлены для эффективного ускорения частиц на ударной волне сверхновой до Пэв-ных энергий.
- 2) Значительная доля энергии взрыва передается обратной ударной волне и в ускоренные на ней частицы.
- 3) Более жесткие спектры частиц, ускоренных на обратной ударной волне.