

Роль среднего электрического поля при ускорении частиц ударными волнами

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 $\sigma = 4$ и $\gamma = 2$**

**Крымский
1977; Bell 1978**

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

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

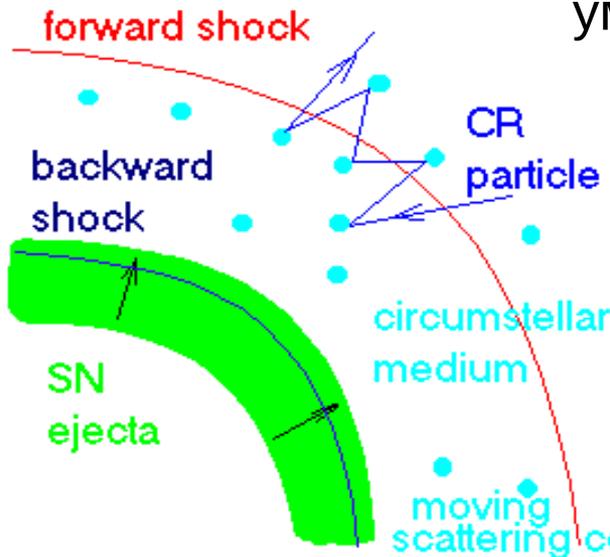
а в Галактике $D \sim 10^{28} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ при $E \sim 10$ ГэВ, т.е.
коэффициент диффузии КЛ должен быть сильно
уменьшен вблизи фронта УВ

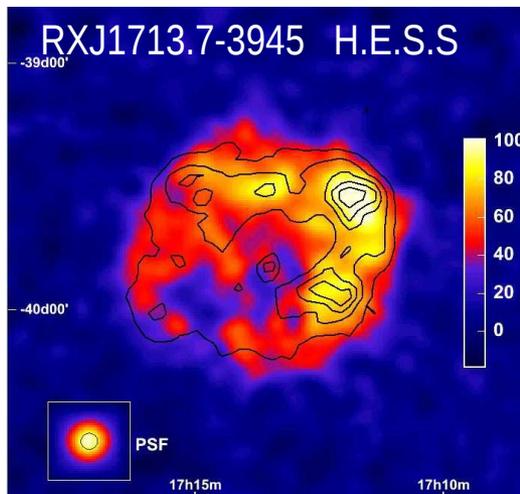
для Бомовской диффузии $D = D_B = cr_g / 3$

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

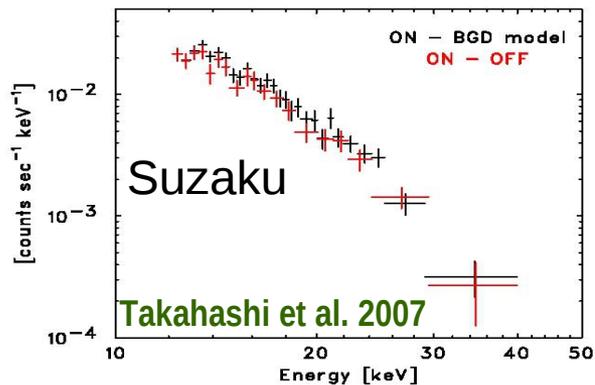
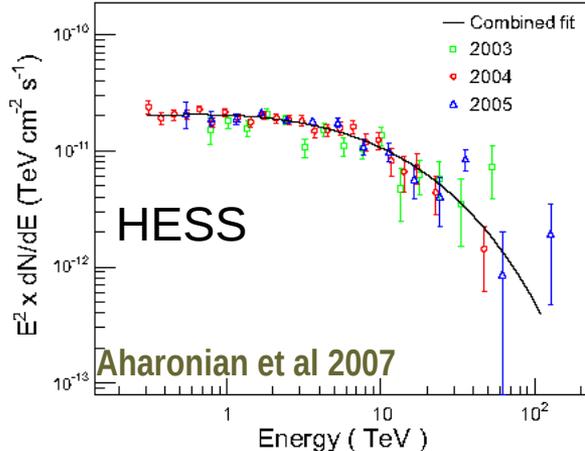
Т.е. необходимо усиление

**магнитного поля для ускорения до
 10^{15} эВ**



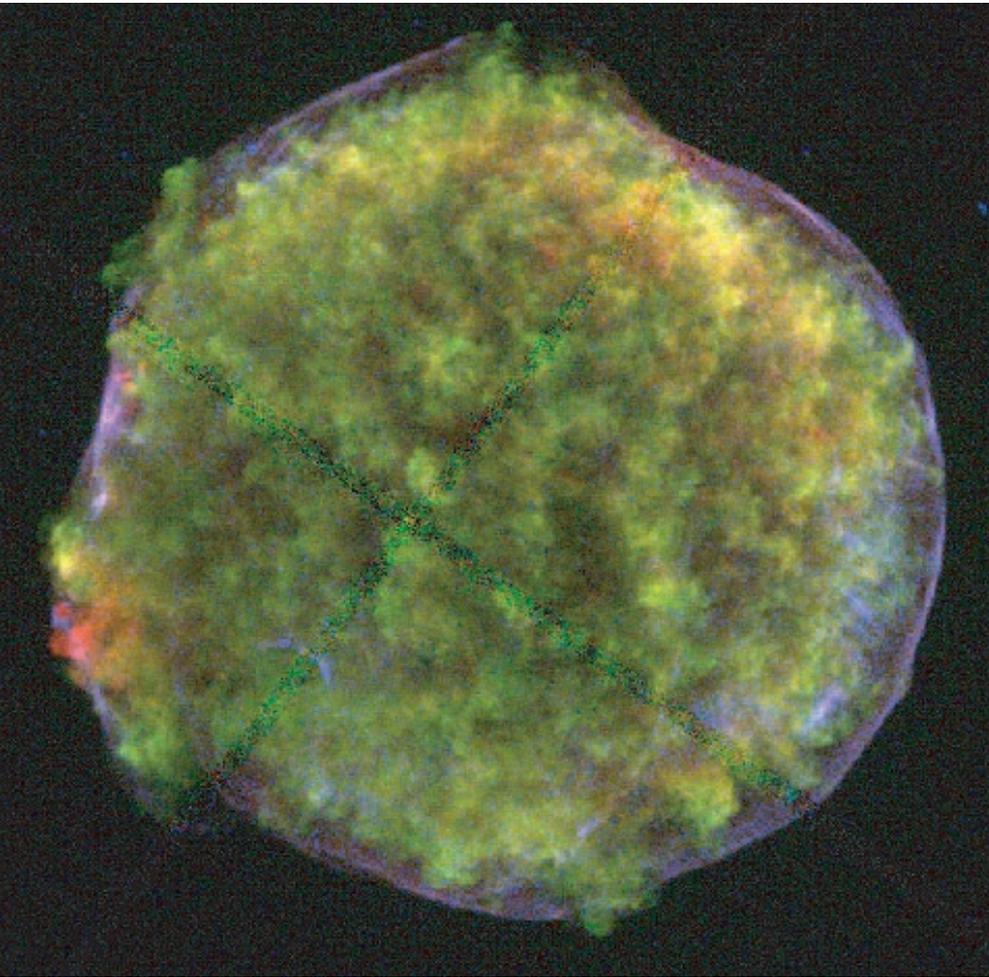


Гамма- и рентгеновские наблюдения остатков сверхновых

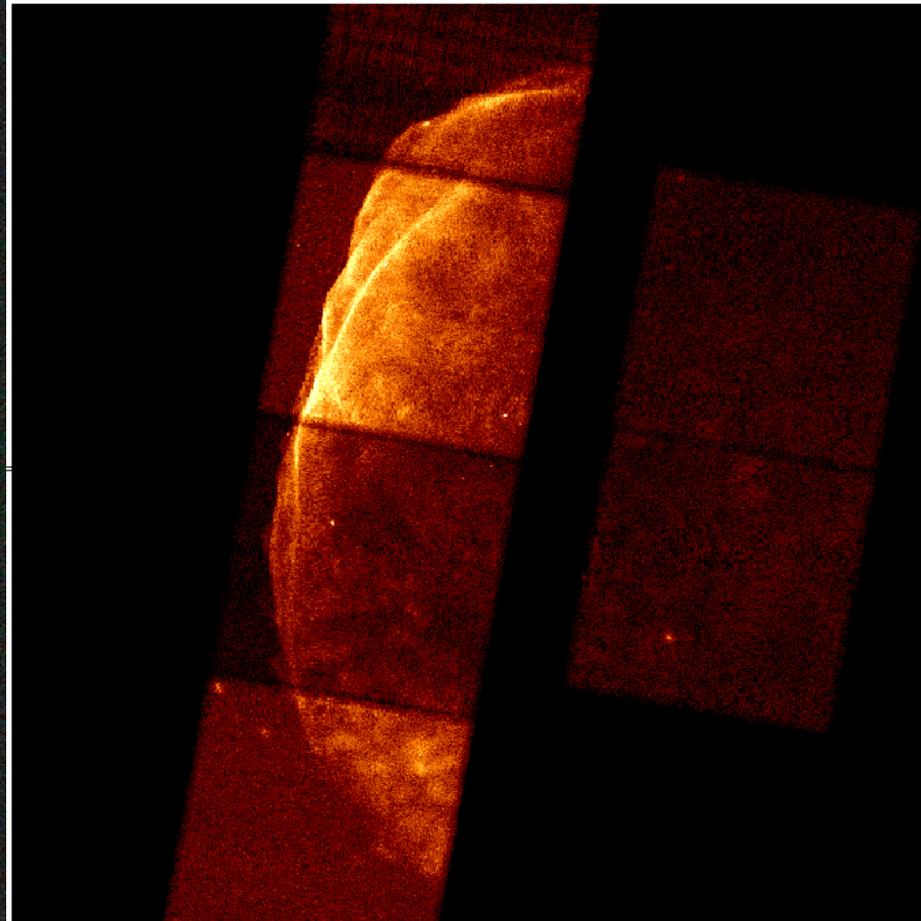


Независимо от интерпретации наблюдаемого гамма-излучения (обратный эффект Комптона или π^0), в этом остатке эффективно ускоряются частицы до 100 ТэВ.

Тонкие рентгеновские волокна на периферии остатка сверхновой объясняются синхротронными потерями ускоренных электронов в усиленном магнитном поле 100-500 $\mu\text{Гс}$. Это поле намного больше межзвездного 3-10 $\mu\text{Гс}$.



ОСН 1572 (Тихо Браге)



ОСН 1006

Механизм генерации МГД турбулентности - Потоковая неустойчивость КЛ

Lerche 1967, Wentzel

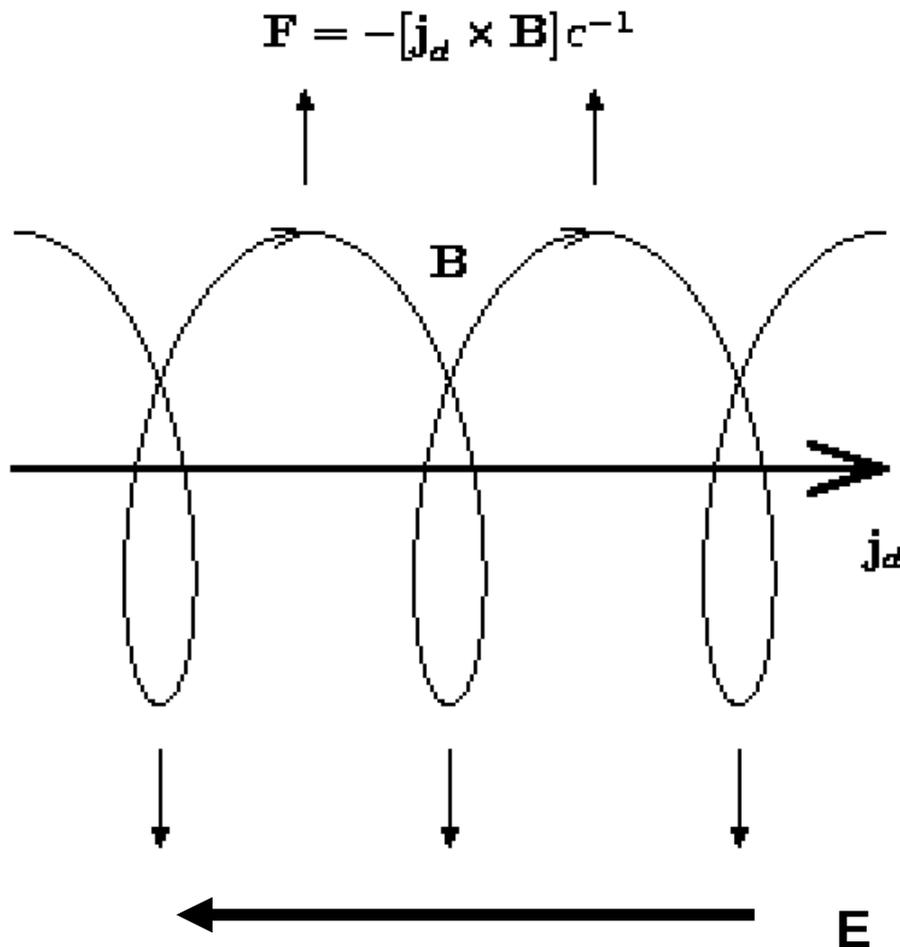
$$\omega - k v_L \pm \Omega,$$

циклотронный резонанс

$$\Gamma(k) \approx \Omega_i \frac{N_{CR} (r_g > k^{-1})}{n_{pl}} \left(\frac{u_{CR}}{V_a} - 1 \right)$$

Диффузионный ток КЛ в окрестности фронта
УВ приводит к возбуждению МГД волн.
Частицы КЛ рассеиваются на этих волнах (Bell,
1978).

Усиление магнитного поля за счет нерезонансной потоковой неустойчивости КЛ



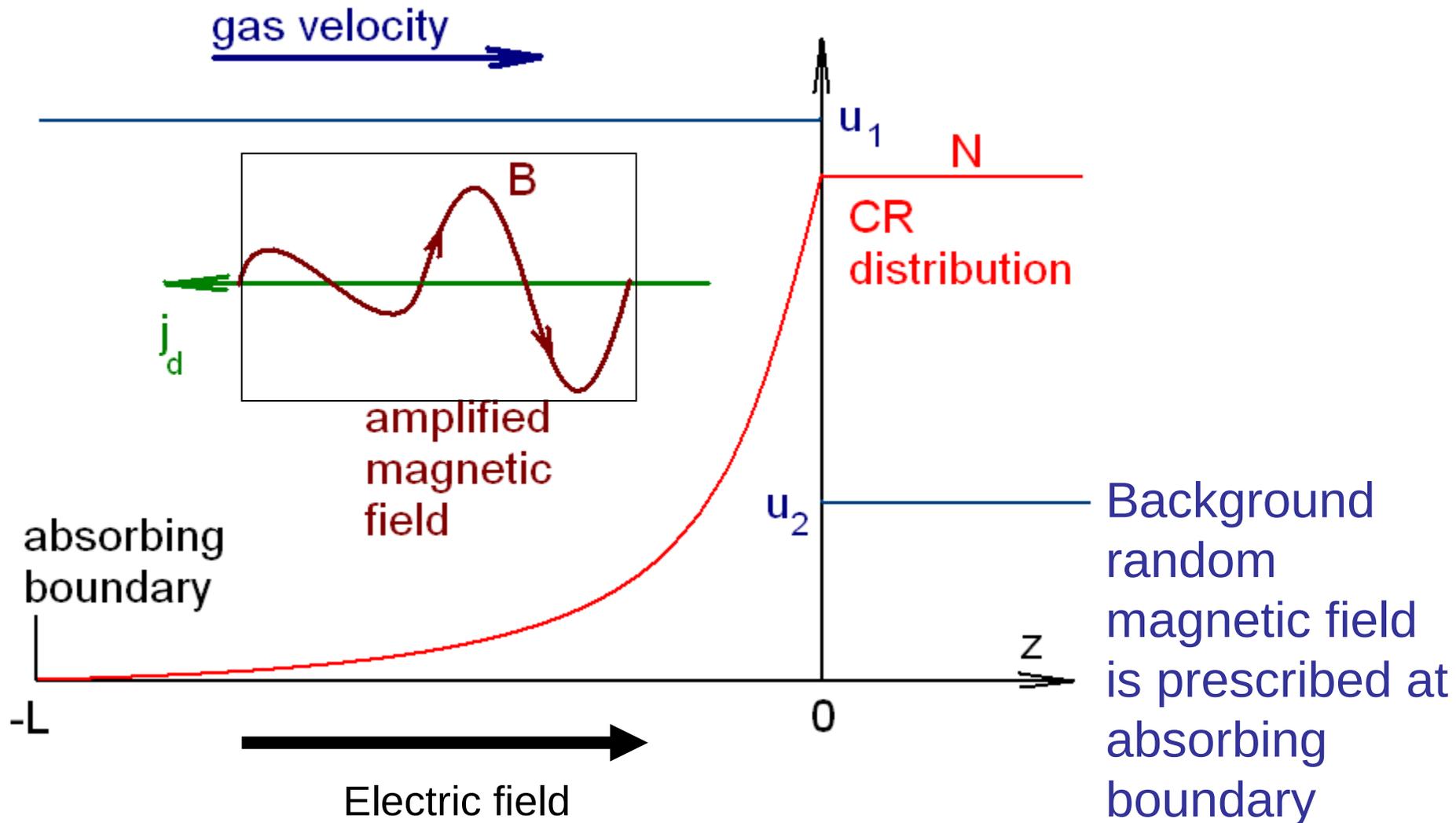
Bell 2004

$$\omega^2 = V_a^2 k^2 - j_d \frac{B_0 k}{c \rho_0}$$

$$k r_g \gg 1$$

Кроме экспоненциально нарастающего магнитного поля появляется крупномасштабное **электрическое поле** $\mathbf{E} = -[\mathbf{u} \times \mathbf{B}] / c$, направленное против тока частиц, производящих неустойчивость.

Ускорение КЛ с электрическим полем на плоской параллельной ударной волне



Уравнение переноса энергичных частиц в присутствии
электрического поля (Zirakashvilli et al. 2008)

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{p^2} \frac{\partial}{\partial p} p^2 \frac{qE}{v} \right) D \left(\frac{\partial N}{\partial z} + \frac{qE}{v} \frac{\partial N}{\partial p} \right) - u \frac{\partial N}{\partial z} + \frac{p}{3} \frac{\partial N}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial z}$$

Уравнение для спектра магнитного поля $W(k)$

$$\Gamma_B = \sqrt{\frac{j_d B_0 k}{c\rho} - V_A^2 k^2}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + u \frac{\partial W}{\partial z} = 2(\Gamma_B - \Gamma_{NL})W$$

$$\Gamma_{NL} = 0.2 V_A k \left(\frac{kW(k)}{B_0^2 / 4\pi} \right)^{1/2}$$

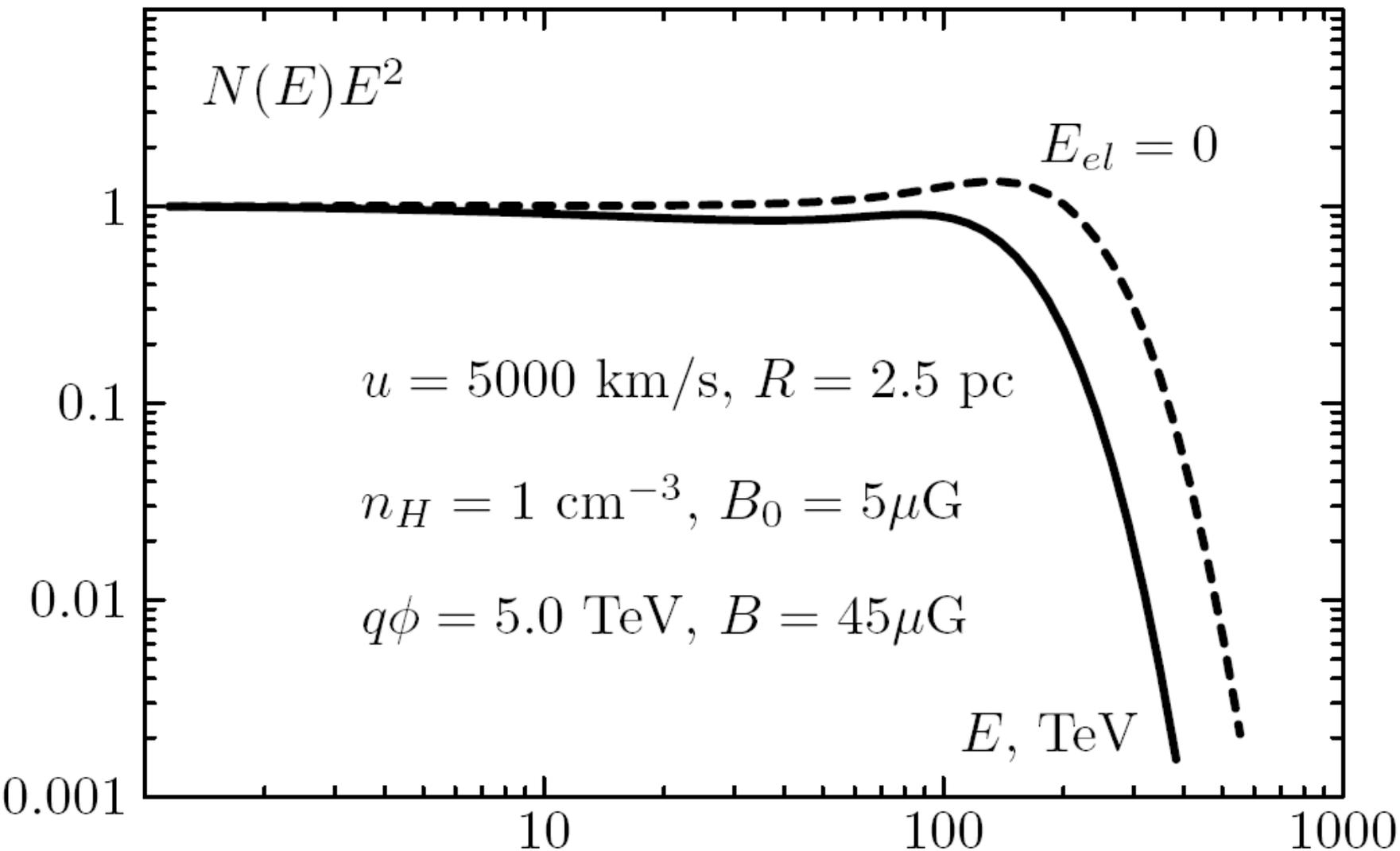
Коэффициент диффузии (рассеяние
мелкомасштабным полем, Долгинов и Топтыгин 1966)

$$D = \frac{vp^2 c^2}{12\pi q^2} \int W(k) dk / k$$

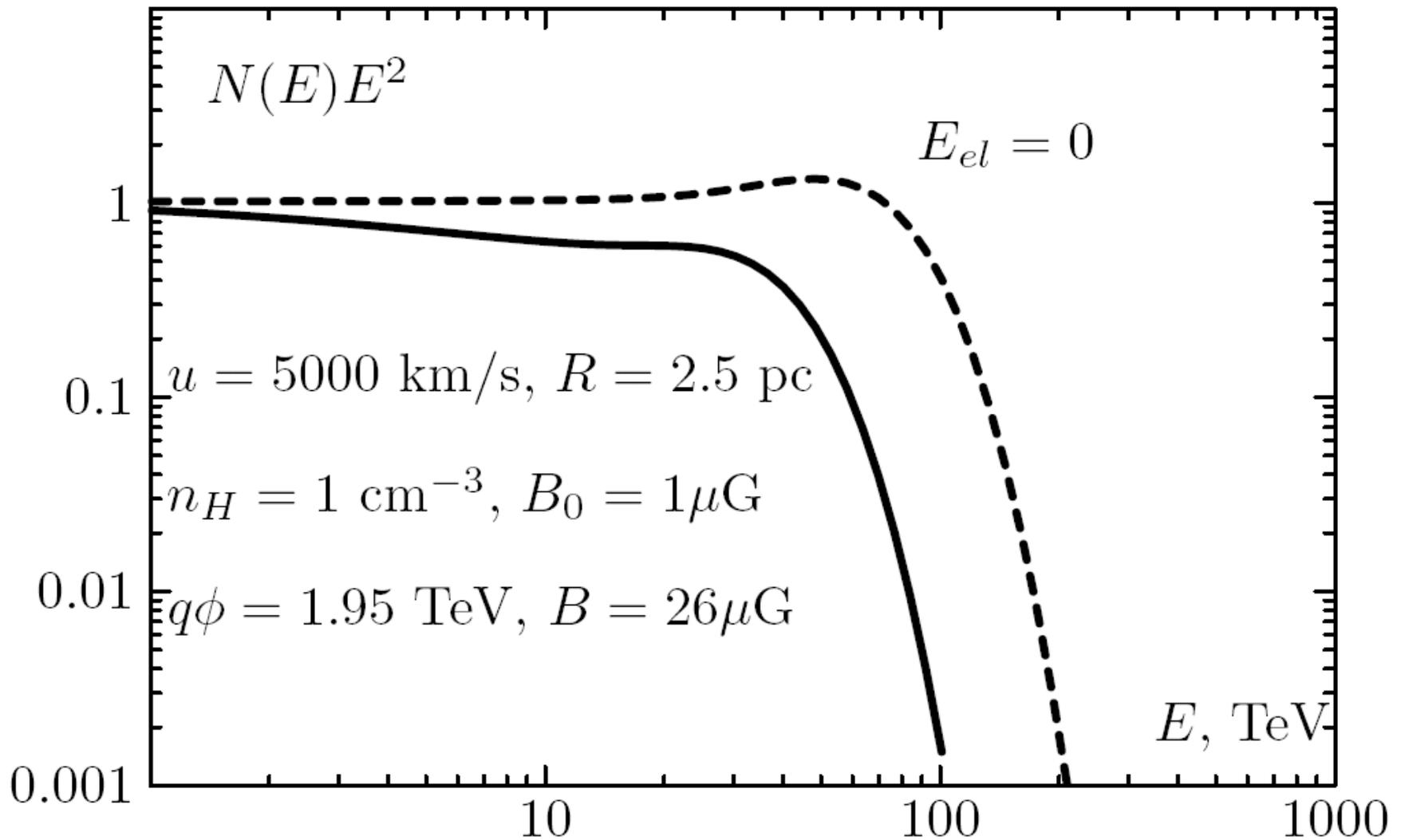
Электрическое поле

$$E = \frac{4\pi}{cB_0} \int dk (\Gamma_B - \Gamma_{NL}) W(k) / k$$

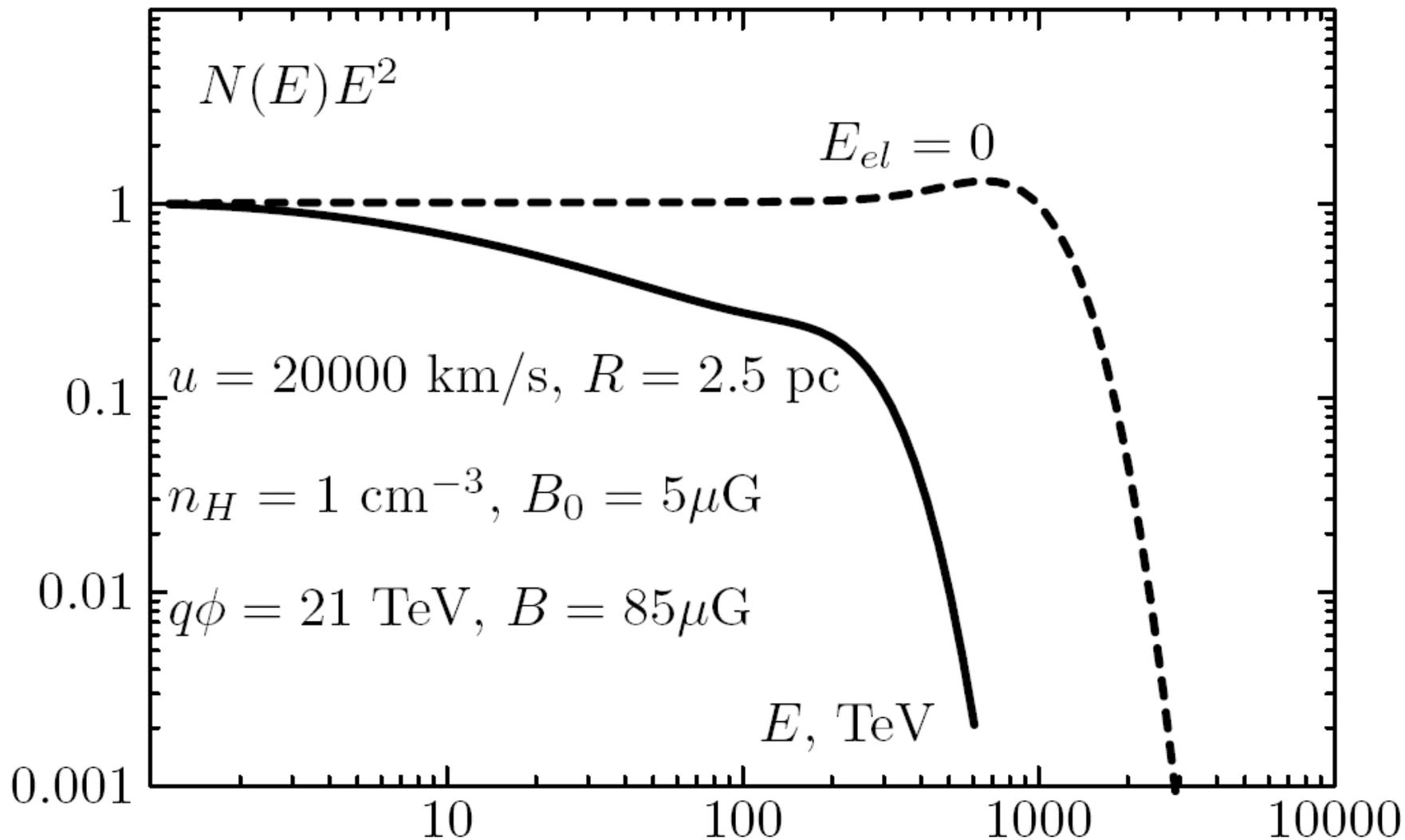
Спектры ускоренных протонов



Спектры ускоренных протонов



Спектры ускоренных протонов



Выводы

- Усиление магнитного поля в окрестности ударных волн сопровождается появлением крупномасштабного электрического поля.
- Это электрическое поле снижает эффективность ускорения частиц, производящих неустойчивость (протоны и ядра) и повышает эффективность ускорения частиц с противоположным зарядом (электроны).
- Данный эффект важен для ударных волн, распространяющихся со скоростью выше 10 тысяч км/с в межзвездной среде или для более медленных ударных волн, распространяющихся в среде со слабым магнитным полем.
- Ожидается, что учет модификации ударной волны ускоренными частицами может скомпенсировать эффекты электрического поля.