

Космические лучи из остатков сверхновых и производимое ими излучение

Е.Г. Бережко

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН
Якутск

В какой мере результаты недавних экспериментов подтверждают, что остатки сверхновых являются **основным источником галактических космических лучей?**

Эксперименты:

Измерения энергетических спектров КЛ (PAMELA, Fermi, AMS ...)

Измерения спектров нетеплового излучения ОЧН (Fermi, HESS, VERITAS ...)

Остатки сверхновых (ОСН) – потенциальные источники КЛ

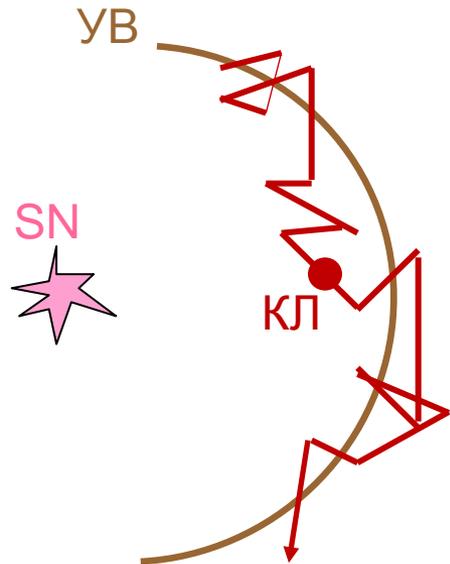
Темп энергосвечения в МЗС от вспышек сверхновых

$$P_{SN} = \nu_{SN} E_{SN} = 10^{42} \text{ эрг/с}$$

достаточен для обеспечения светимости Галактики в КЛ

$$P_{CR} = e_{CR} V_G / \tau_{esc} = 10^{41} \text{ эрг/с}$$

Процесс регулярного ускорения (diffusive shock acceleration) способен трансформировать ~ 10% энергии ОСН частицам КЛ



Krymsky (1976, 1977), Bell (1978) ...

$$N_{CR} \propto p^{-\gamma} \quad \gamma = 2$$

Нелинейные эффекты, обусловленные обратным воздействием ускоренных КЛ на среду

- Модификация ударной волны



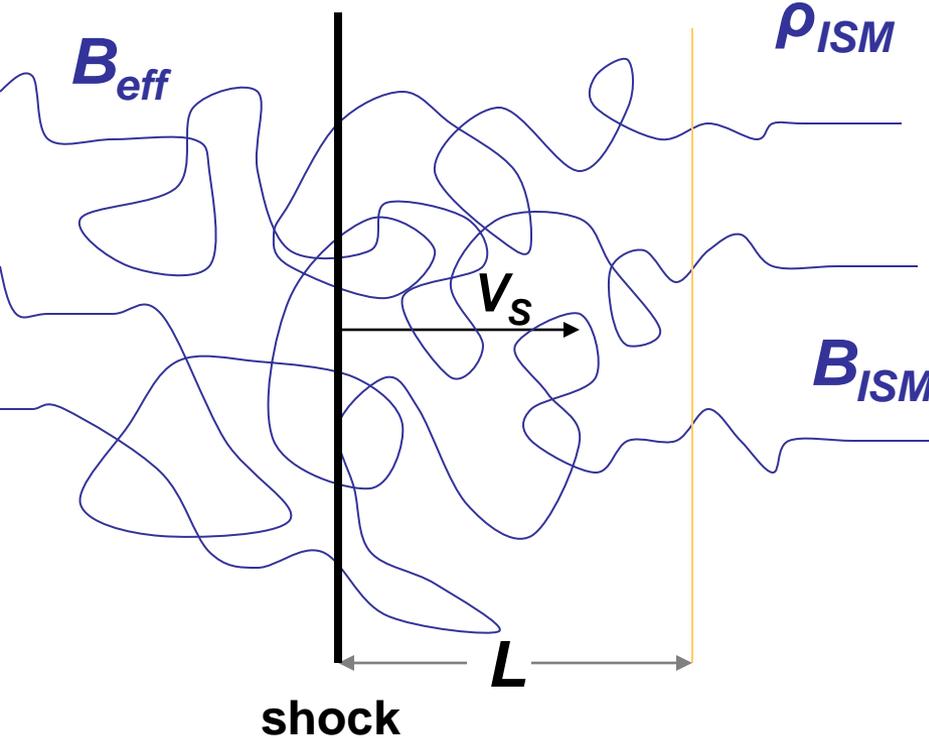
Нестепенной (вогнутый) спектр КЛ

- Усиление магнитного поля



Увеличение максимальной энергии КЛ ε_{\max}

Усиление магнитного поля



$$B_{\text{eff}}^2 / 8\pi \approx 10^{-2} \rho_{\text{ISM}} V_s^2$$

$$B_{\text{eff}} \gg B_{\text{ISM}}$$

Результаты моделирования
(Lucek & Bell, 2000; Caprioli & Spitkovsky 2014)
& теория (Bell 1978,2004;
Drury 1984; Pelletier et al. 2006;
Zirakashvili et al. 2007; Bykov et al. 2009;) +

Свойства спектра синхротронного
Излучения ОСН +

Тонкая структура нетеплового
рентгеновского излучения

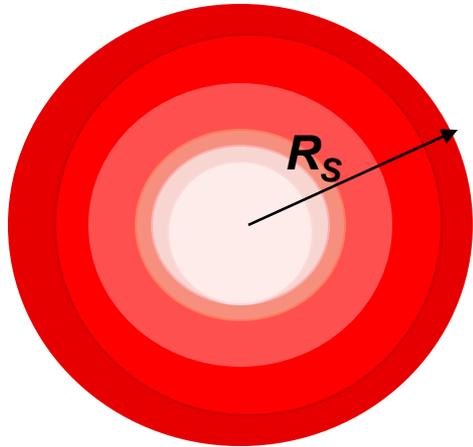


Магнитное поле ОСН значительно
усилено



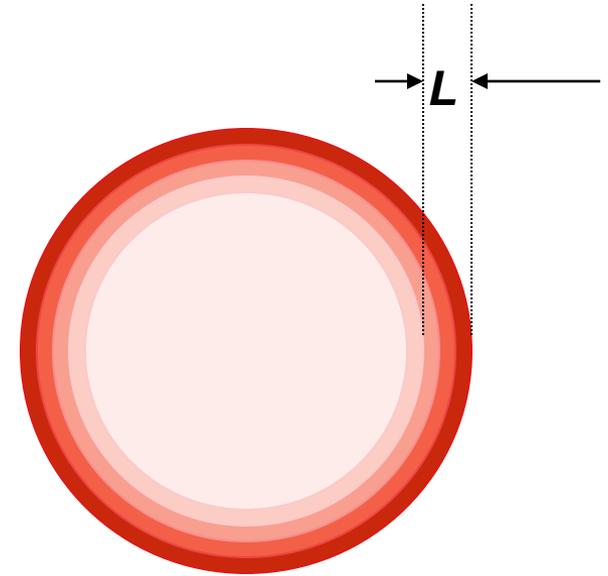
Увеличение максимальной энергии КЛ
 $\epsilon_{\text{max}} \sim B$

Тонкая структура нетеплового рентгеновского излучения ОСН



$$B \approx B_{ISM} \approx 5 \mu\text{G} \quad L \sim 0.1 R_s$$

Адиабатическое (медленное) замедление ускоренных частиц



$$B \gg B_{ISM} \quad L \ll 0.1 R_s$$

Сильные синхротронные потери энергии ускоренных электронов

$$L \sim B^{-3/2}$$

(Vink & Laming 2003; EB, Ksenofontov & Völk 2003; Zirakashvili & Aharonian 2007)

Возможность оценивать величину магнитного поля ОСН

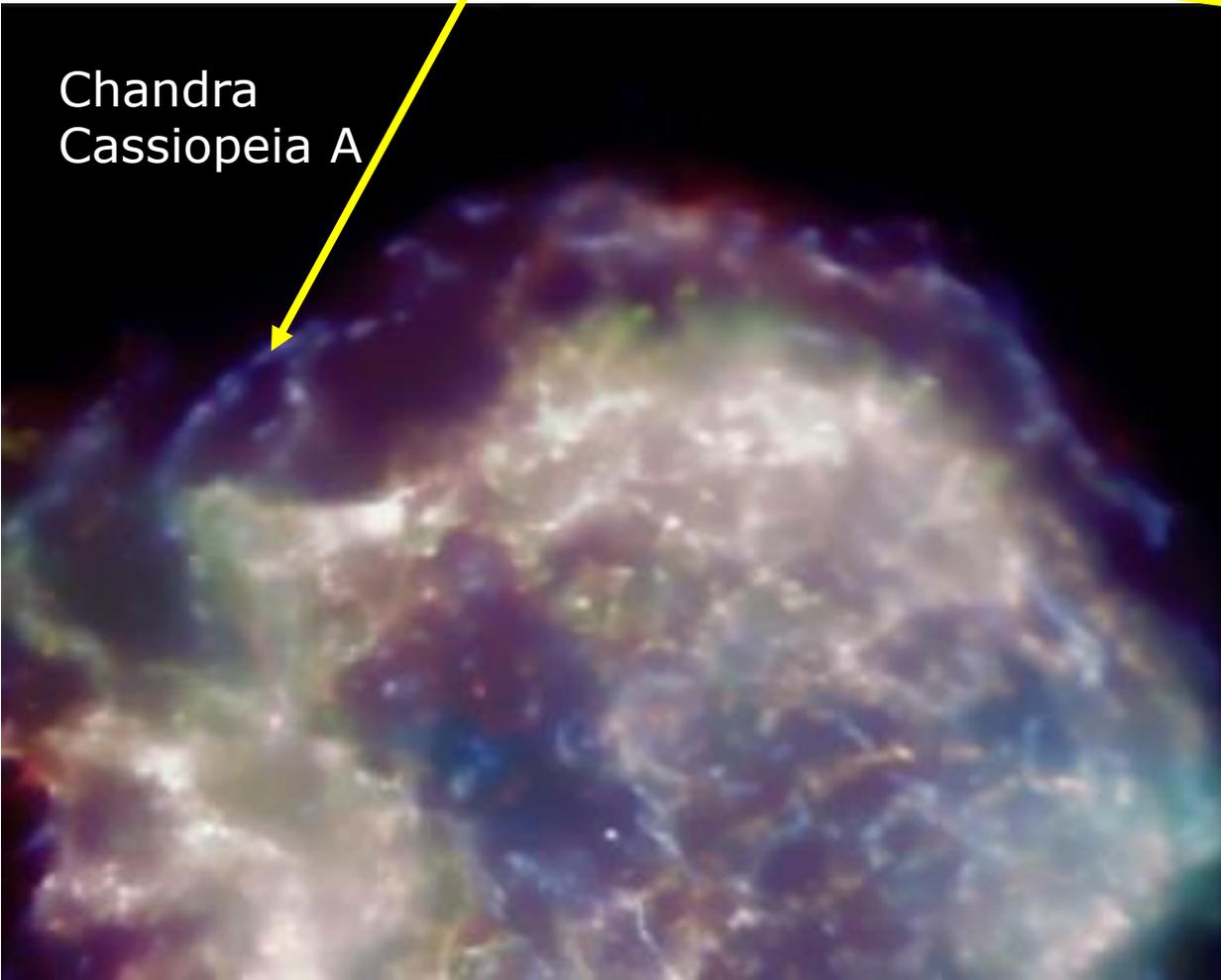
Во всех молодых ОСН магнитное поле значительно

усилено $B \sim 100 B_{ISM}$

Нитевидная структура области рентгеновского излучения молодых ОСН

следствие значительно усиленного магнитного поля,
обуславливающего сильные синхротронные потери

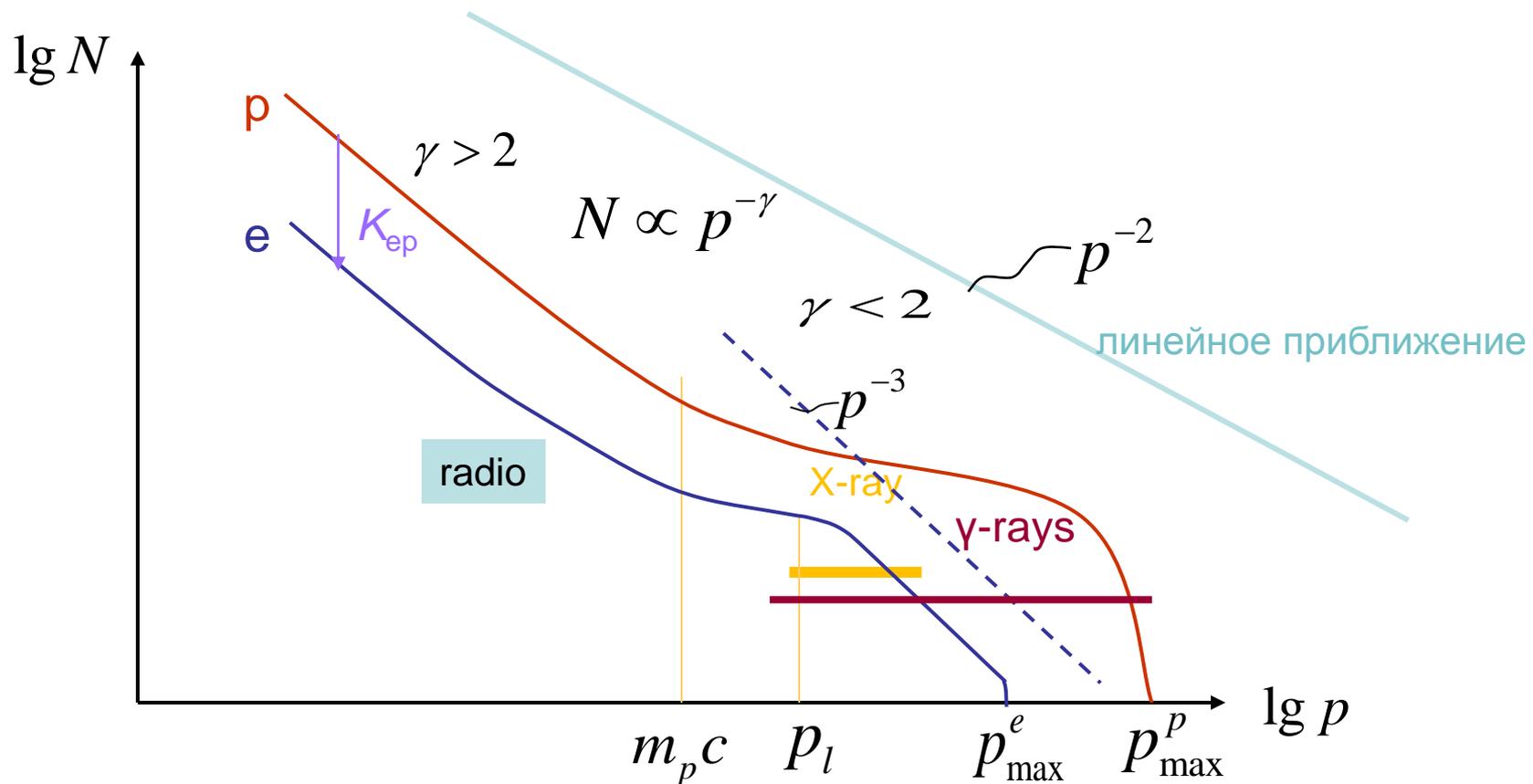
Chandra
Cassiopeia A



Chandra
SN 1006

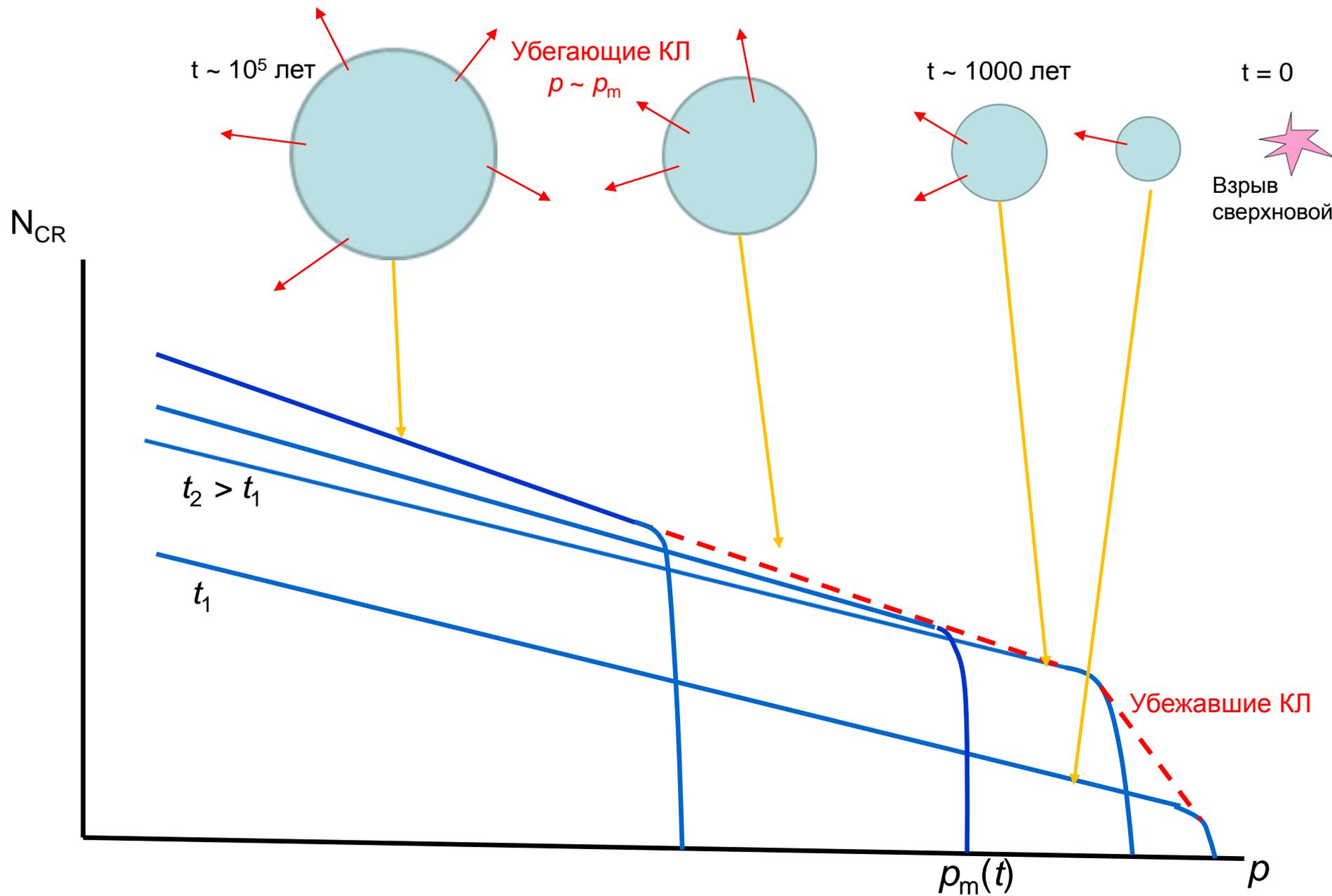


Особенности спектра КЛ в остатках сверхновых

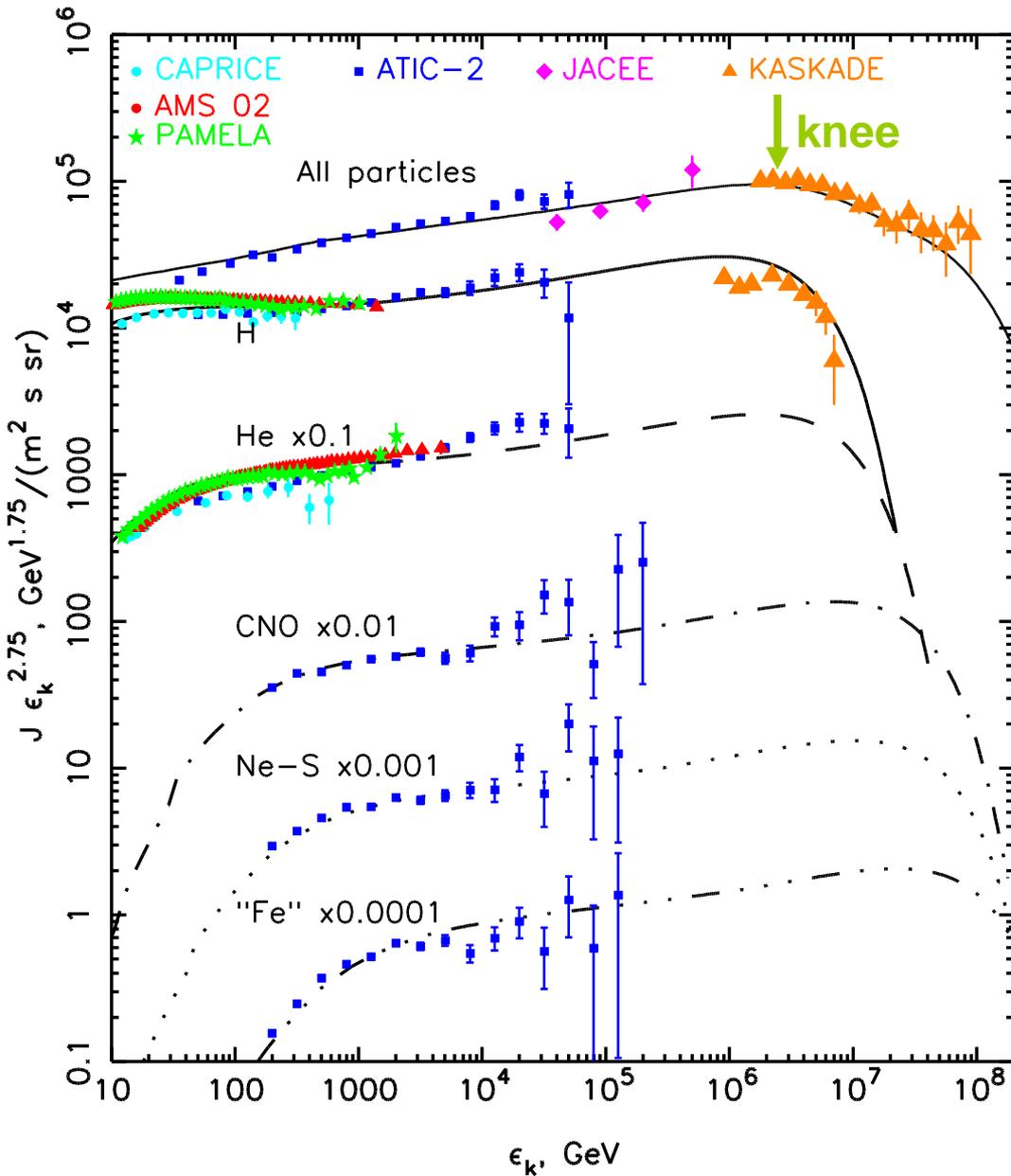


- Вогнутый спектр КЛ
- Мягкий спектр синхротронного излучения в радио и рентгеновском диапазонах
- Жесткий спектр гамма-излучения

$$p_{\max}^p \sim 10^{15} \text{ эВ} \quad p_{\max}^e \ll p_{\max}^p$$



Энергетические спектры ядер в составе КЛ



Теория: *EB & Völk (2007)*
 (см. также *Ptuskin, Zirakashvili, Seo 2010*)

Усиленное магнитное поле $B(t)$
 (несамосогласованное)

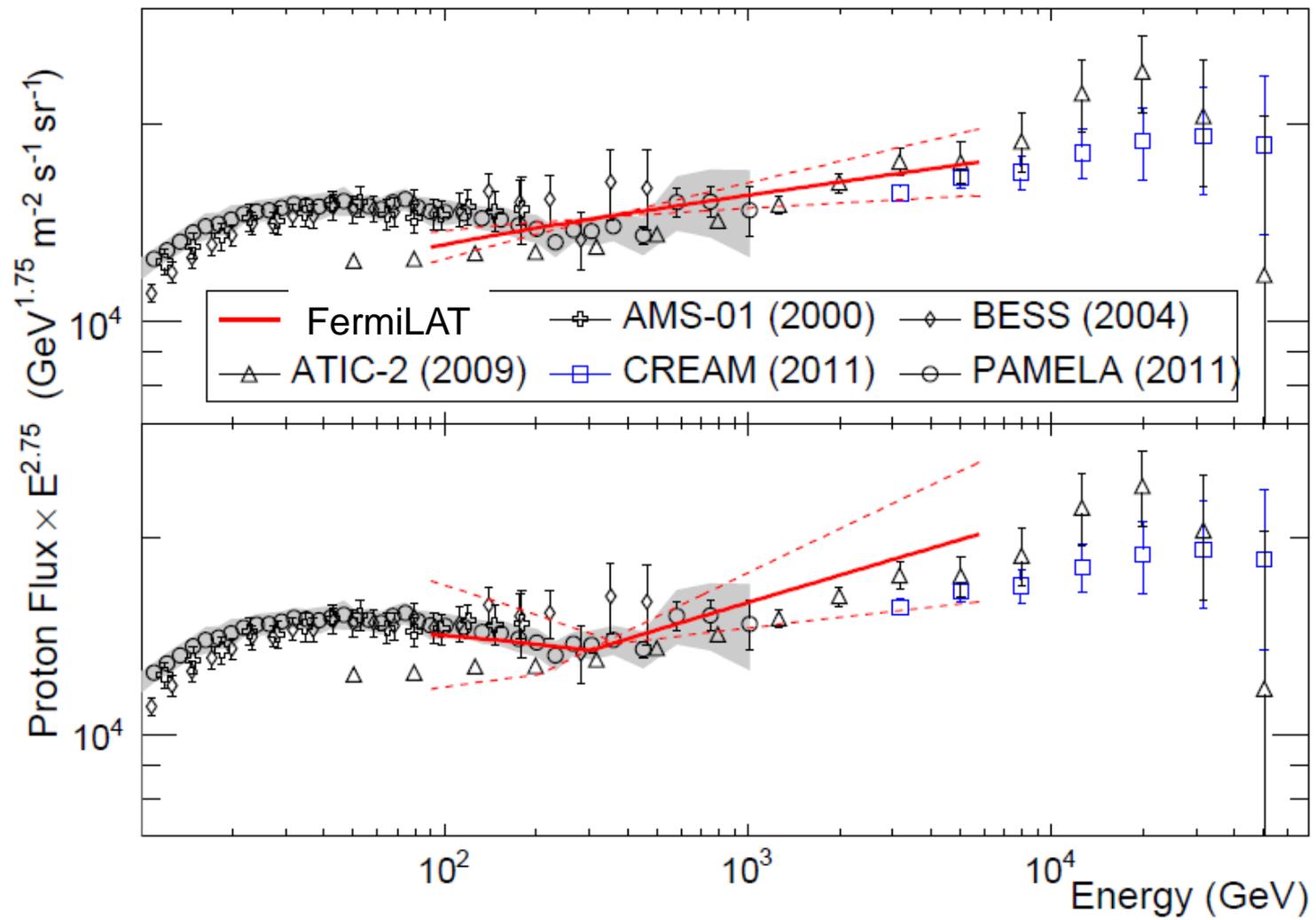
$$\epsilon_{max} \sim Z$$

$$J \propto \tau_{esc} N$$

$$\tau_{esc} \propto (\epsilon/Z)^{-0.7}$$

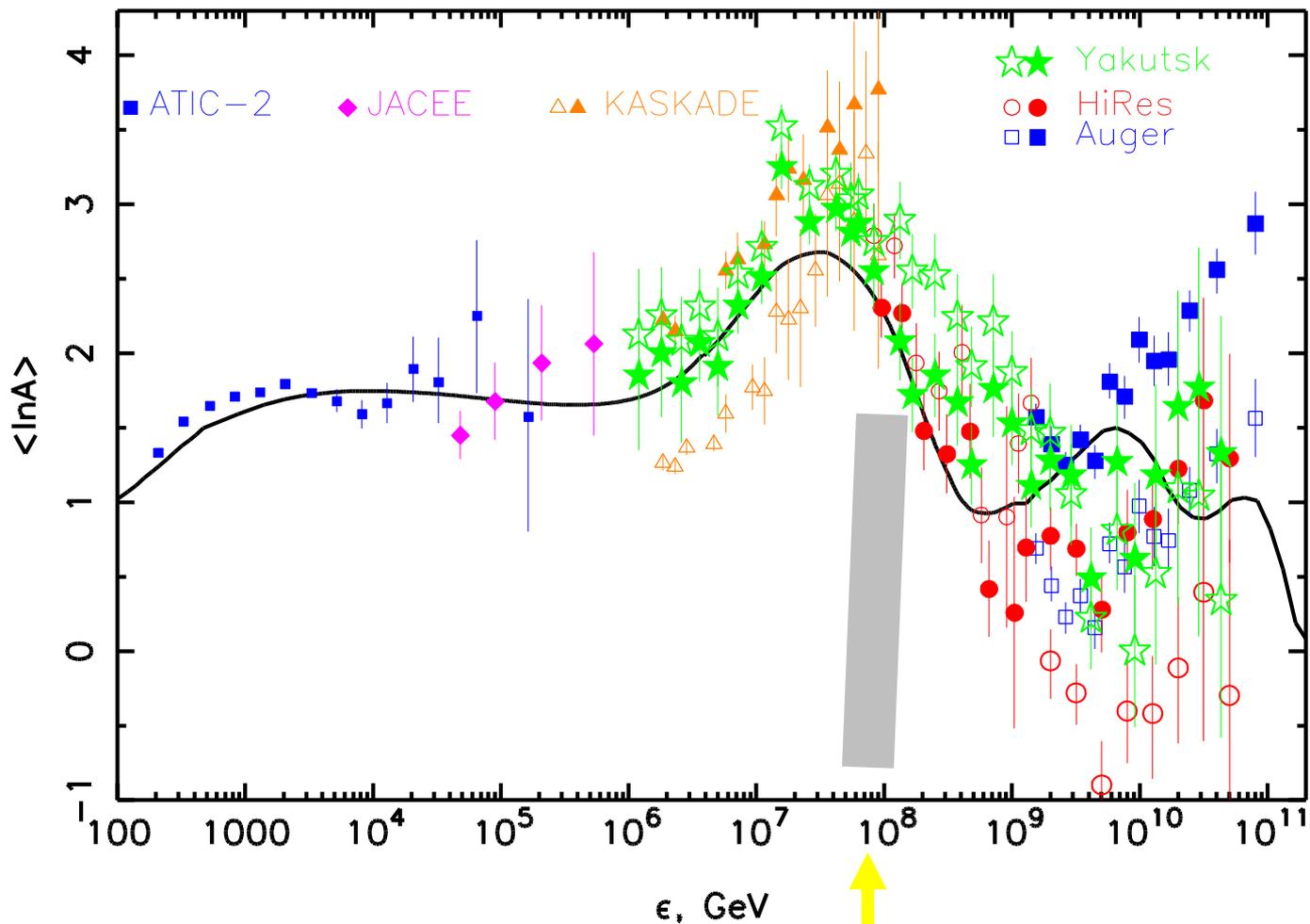
- Вогнутый спектр протонов
- Вогнутый спектр гелия (?)
- Тяжелый массовый состав при $\epsilon \sim 10^{17}$ эВ ?

Энергетический спектр протонов: Скорее вогнутый



Средний логарифм массового числа КЛ

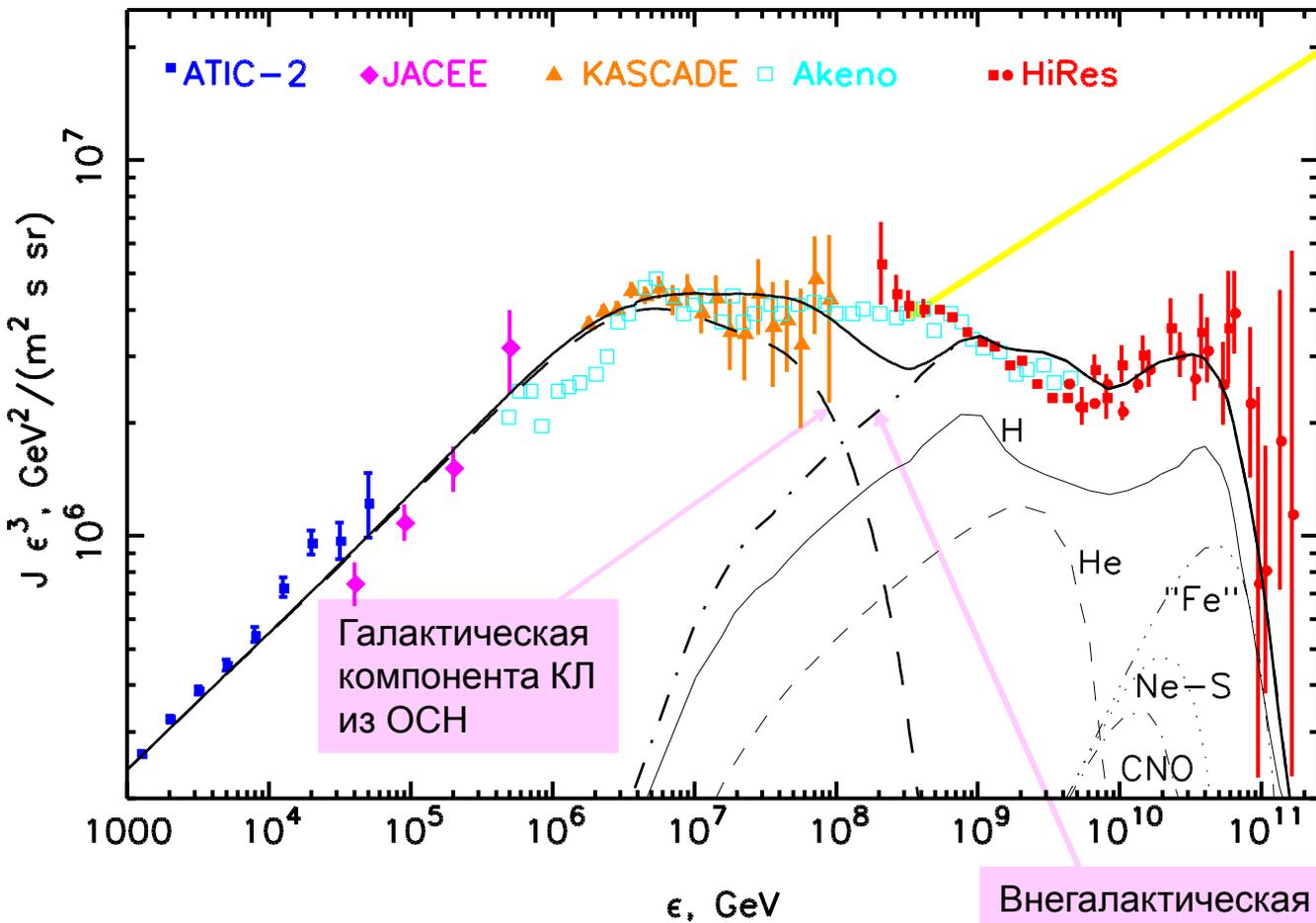
EB, Knurenko, Ksenofontov (2012)



Данные согласуются с наличием перехода от галактической к внегалактической компоненте КЛ в области $\epsilon = 10^{17} - 10^{18} \text{eV}$

Энергетический спектр КЛ

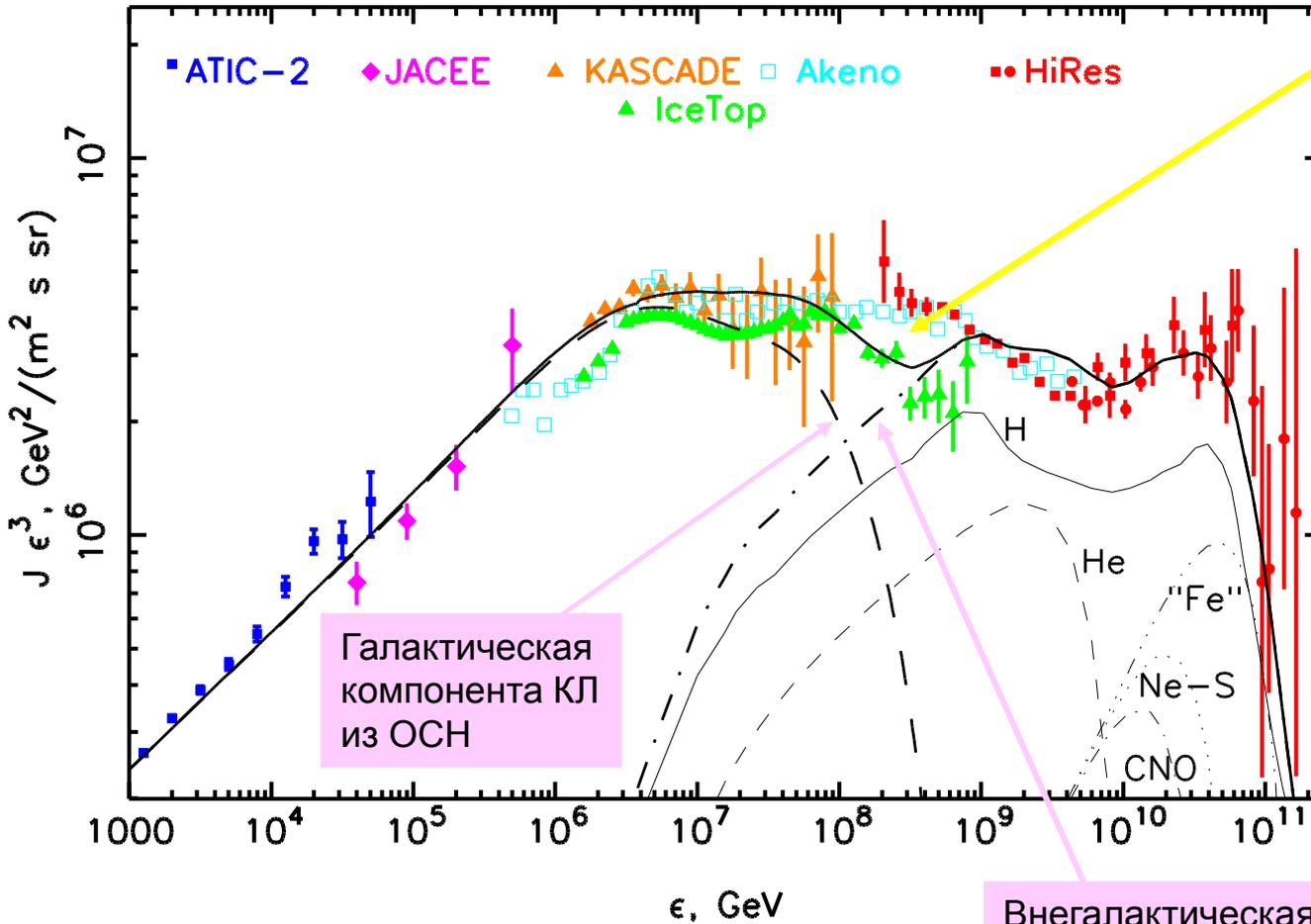
EB 2009



Существование особенности в спектре КЛ неизбежно в области перехода между Галактической и Внегалактической компонентами КЛ если он имеет место при 10^{17} - 10^{18} эВ

Энергетический спектр КЛ

EB 2009



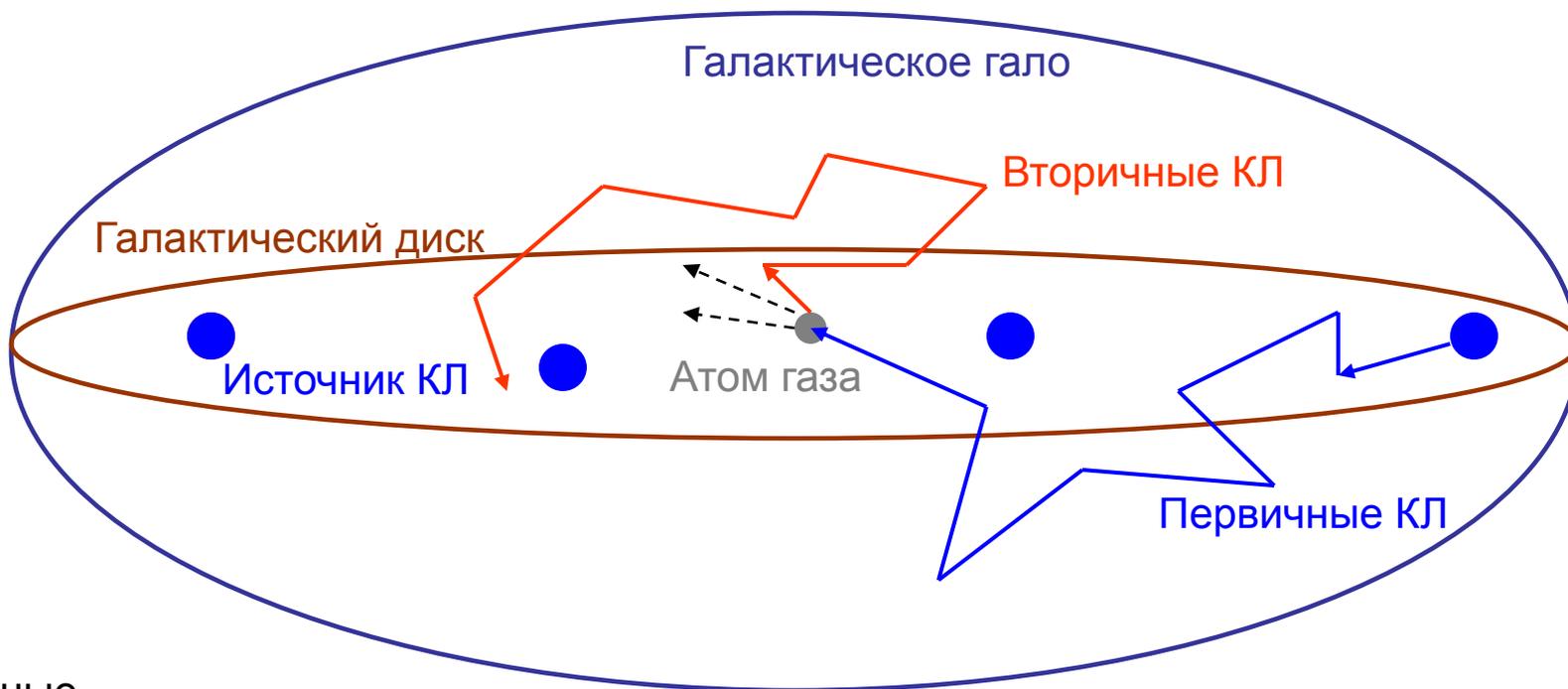
IceTop (а также Tunka-133, KASCADE Grande & Yakutsk) указывает на существование особенности (второе колено + дип) в спектре КЛ при 10^{17} - 10^{18} эВ.

Переходная область?

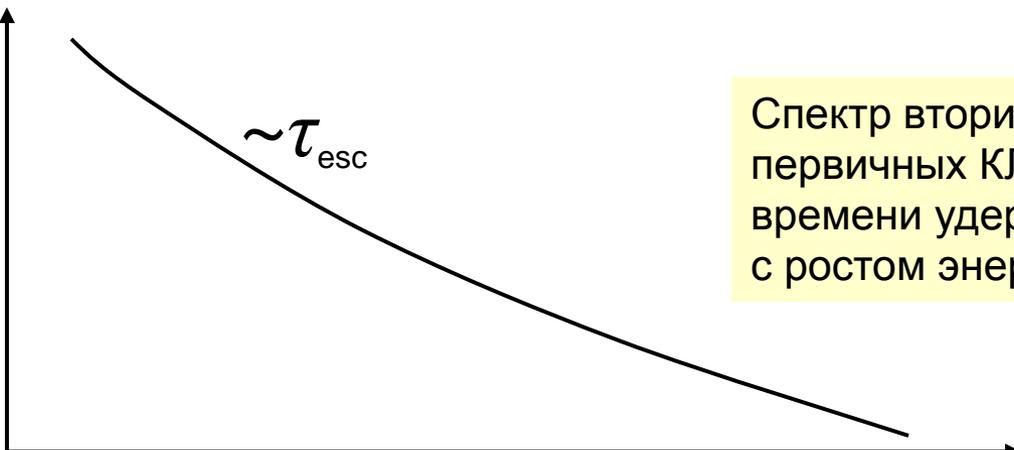
Дополнительную аргументацию в пользу такого сценария (dip scenario) см. Aloisio, Berezhinsky, Gazizov 2012

Внегалактическая компонента КЛ из Активных Ядер Галактик

Стандартная картина генерации вторичных КЛ (Li, Be, B, e⁺, p⁻)



Вторичные
Первичные

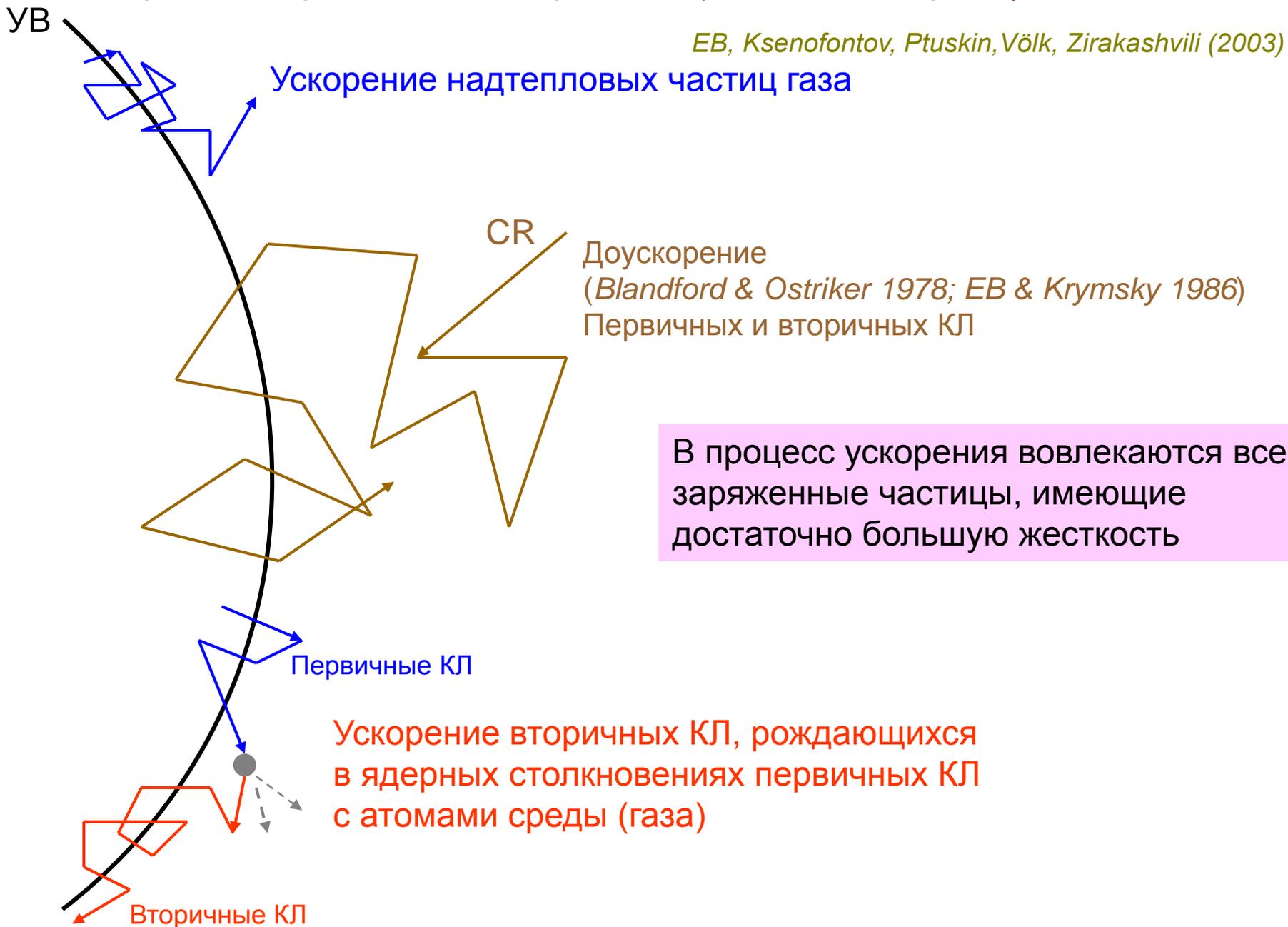


Спектр вторичных КЛ мягче чем спектр первичных КЛ вследствие убывания времени удержания КЛ в Галактике с ростом энергии

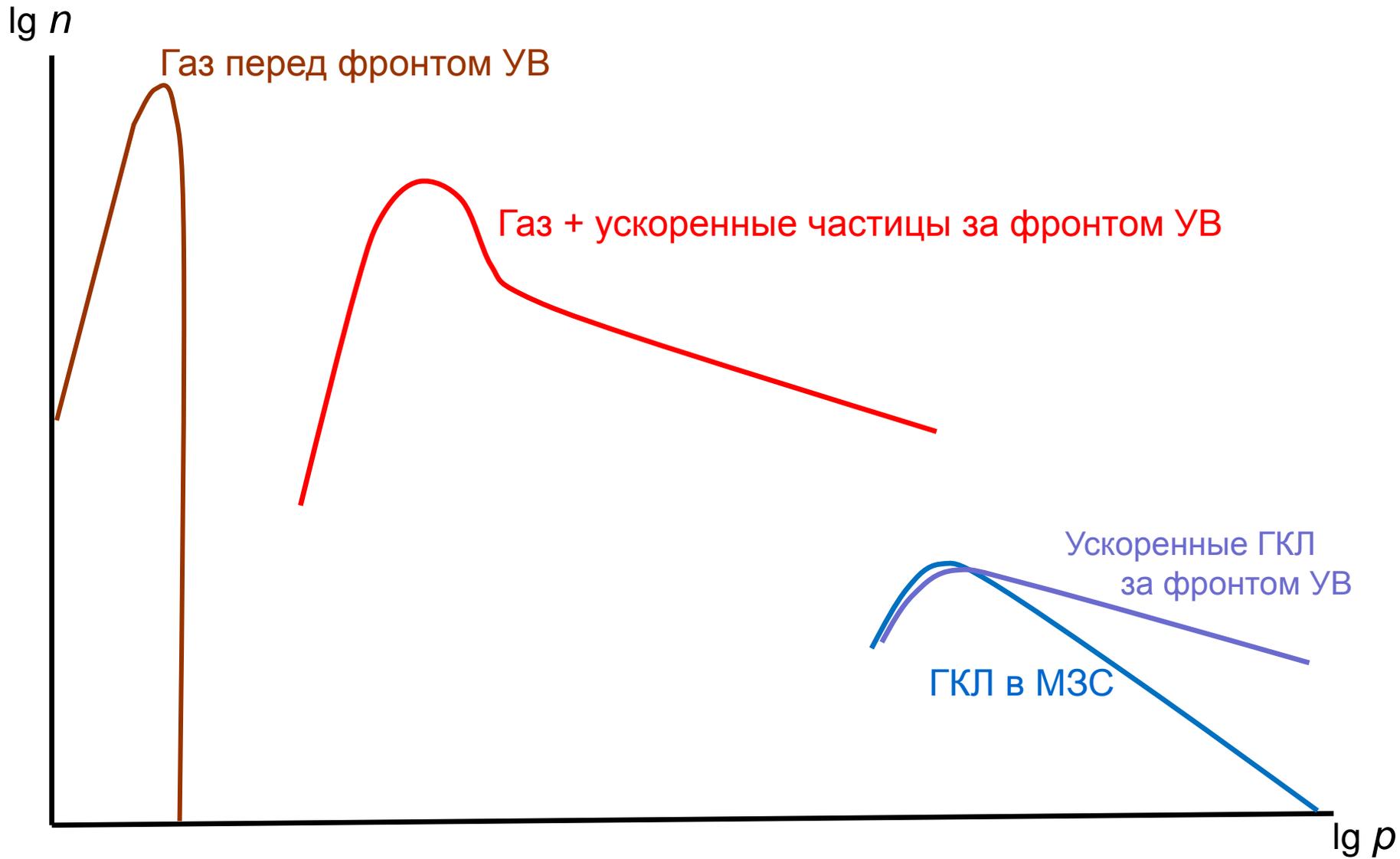
Энергия

Ускорение первичных и вторичных (Li, Be, B, e⁺, p⁻, ...) КЛ в ОСН

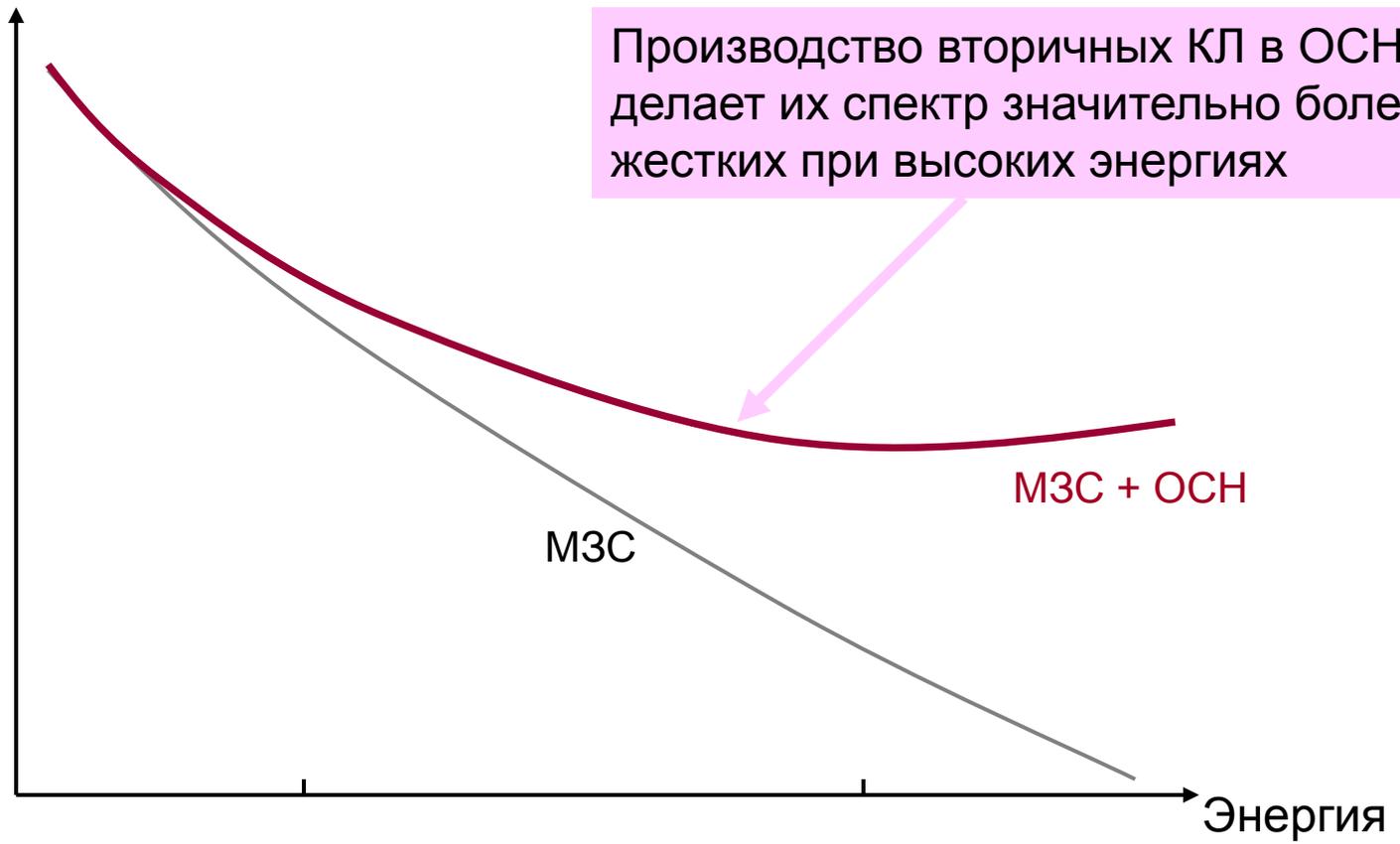
EB, Ksenofontov, Ptuskin, Völk, Zirakashvili (2003)



Спектры частиц вблизи фронта ударной волны (УВ)



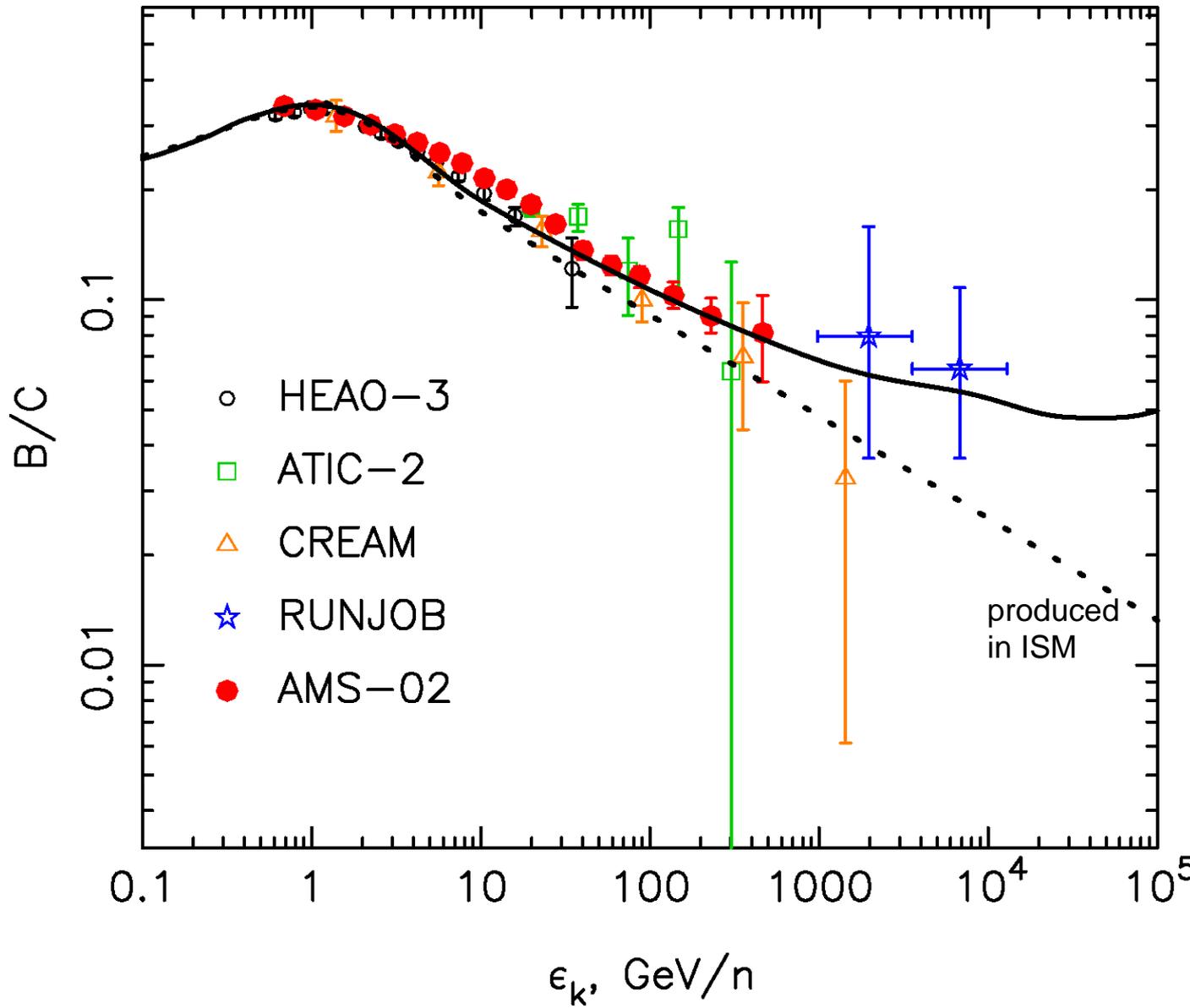
Вторичные
Первичные



Производство вторичных КЛ в ОСН
делает их спектр значительно более
жестких при высоких энергиях

Интенсивность ядер В/Интенсивность ядер С

EB, Ksenofontov (2014)

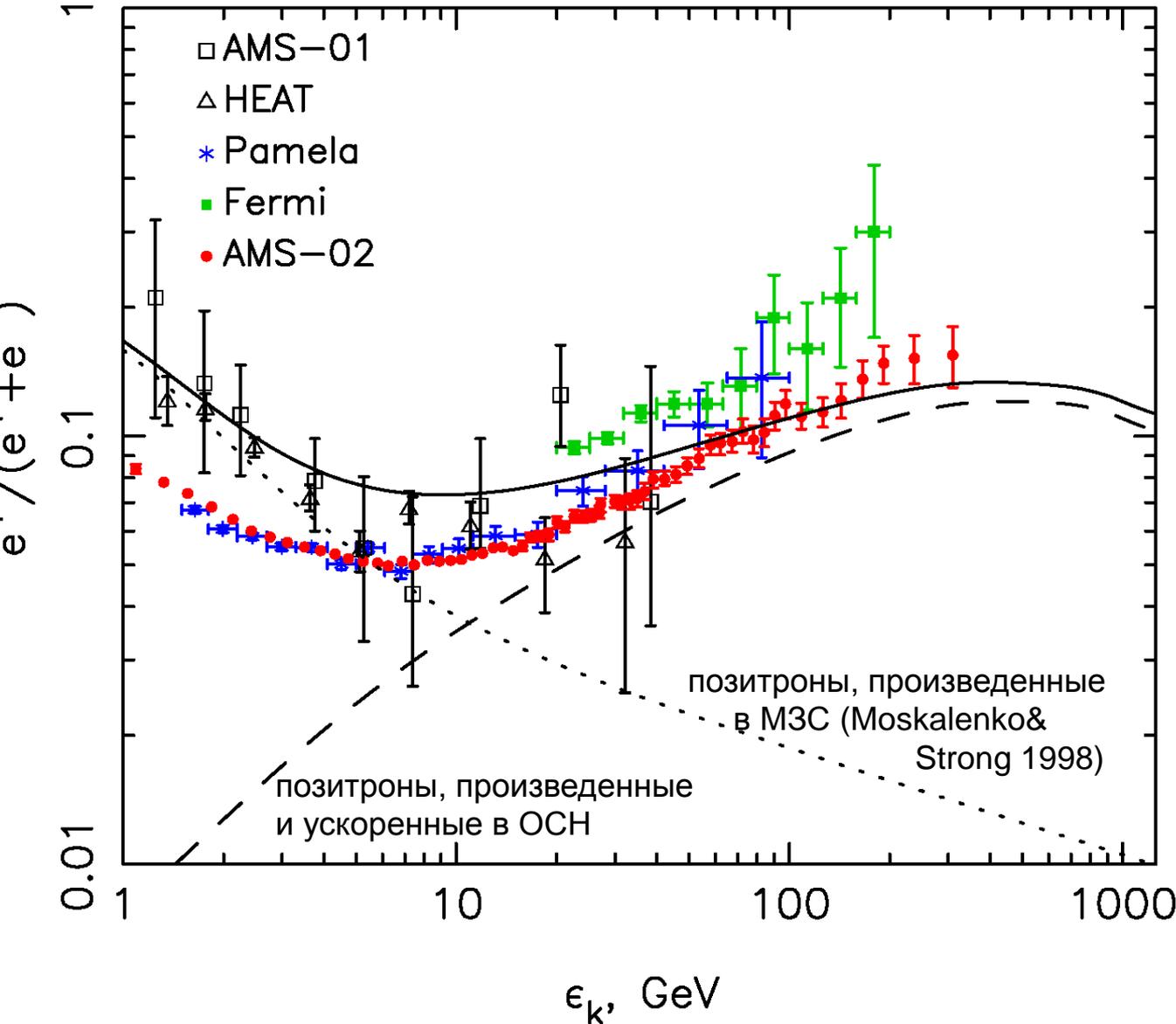


Плотность МЗС
 $N_H = 1.5 \text{ cm}^{-3}$

RUNJOB и AMS-02
дают указание на
уполаживание
отношения B/C ,
ожидаемое за счет
вклада ОСН

Интенсивность e^- / Интенсивность $e^- + e^+$

EB & Ksenofontov (2012)

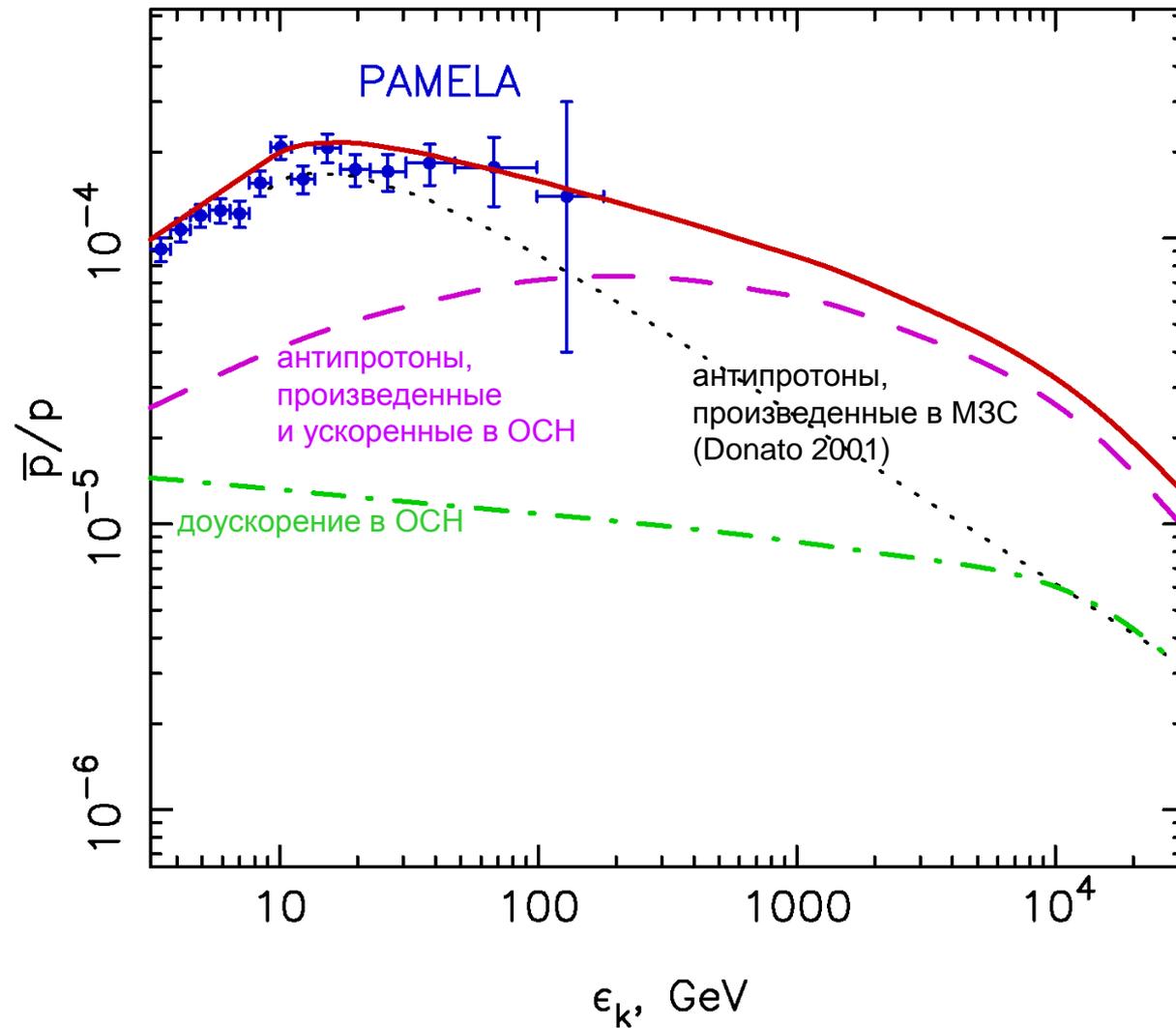


Плотность МЗС
 $N_H = 1.5 \text{ см}^{-3}$

Данные AMS-02
дают свидетельство
значительного вклада
ОСН в наблюдаемый
спектр позитронов
при $\epsilon > 10 \text{ ГэВ}$

Интенсивность антипротонов/ Интенсивность протонов

EB & Ksenofontov (2014)



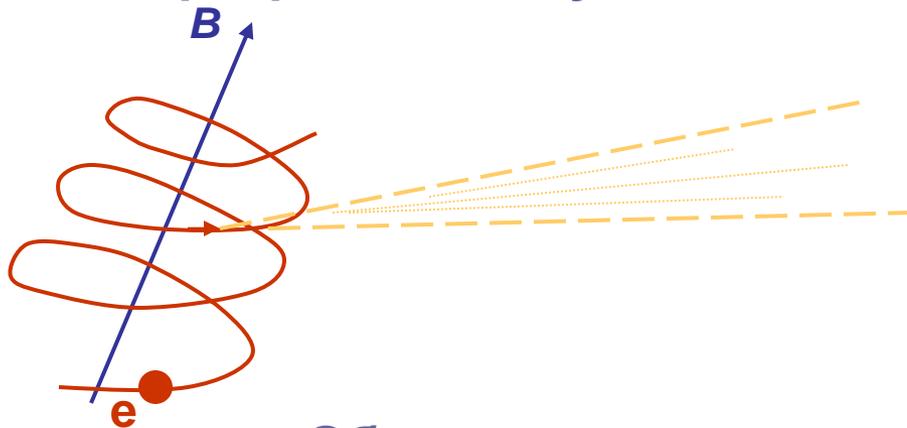
Плотность МЗС
 $N_H = 1.5 \text{ cm}^{-3}$

Данные PAMELA дают указание на значительный вклад ОСН в наблюдаемый спектр антипротонов

Нетепловое излучение, производимое частицами КЛ

(как можно «увидеть» источники КЛ)

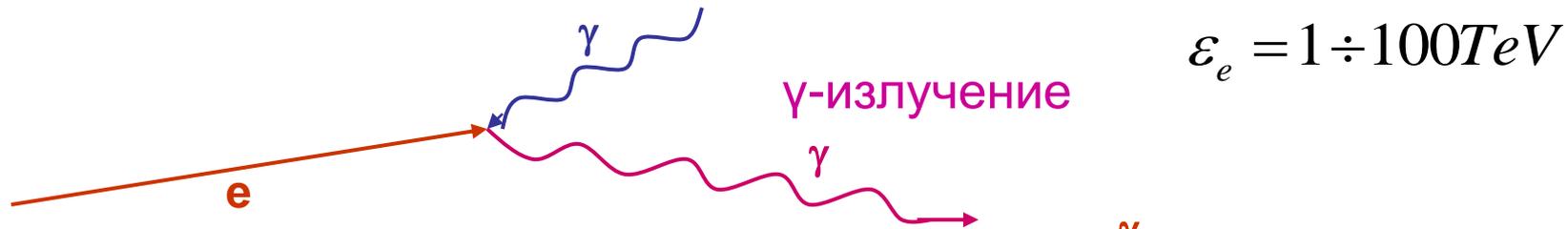
• Синхротронное излучение



радио $\varepsilon_e = 0.01 \div 1 GeV$

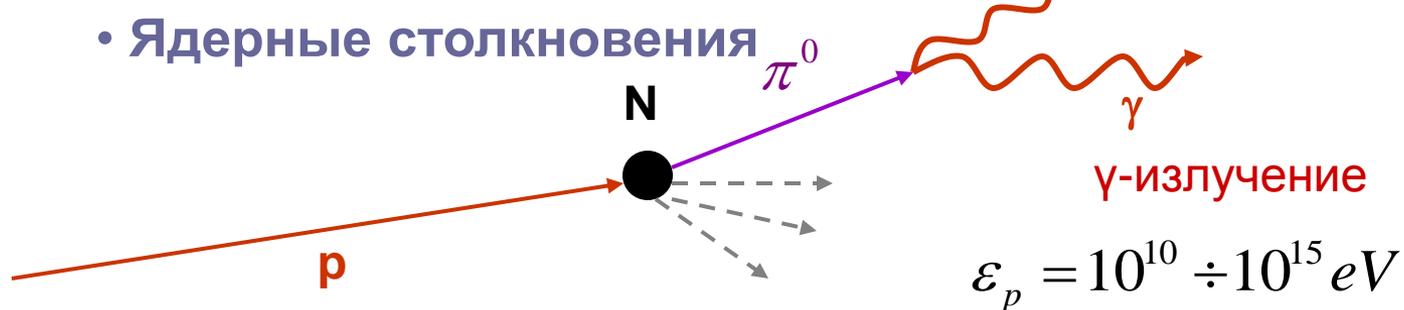
рентген $\varepsilon_e = 1 \div 100 TeV$

• Обратное комптоновское рассеяние



$\varepsilon_e = 1 \div 100 TeV$

• Ядерные столкновения



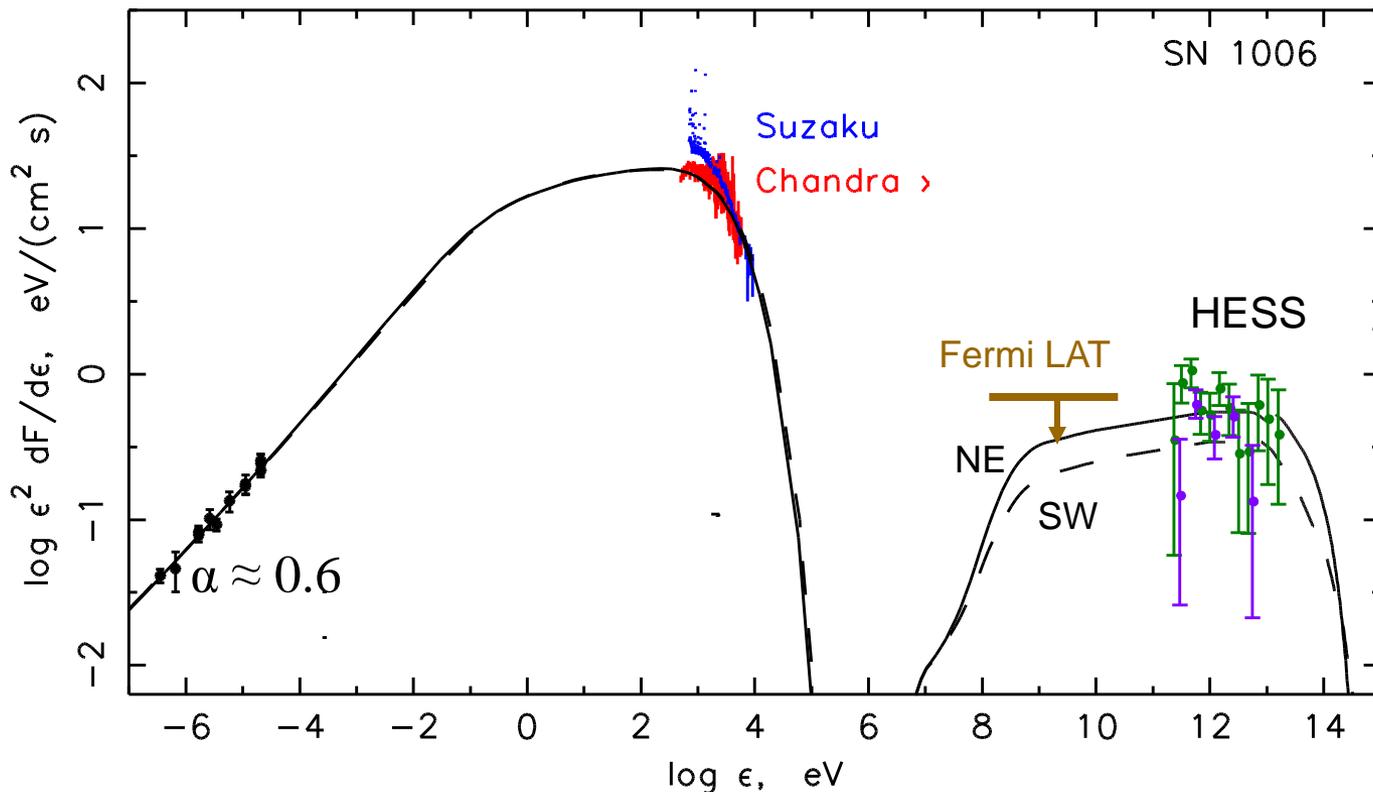
γ-излучение

$\varepsilon_p = 10^{10} \div 10^{15} eV$

Плотность потока энергии излучения остатка сверхновой SN 1006 как функция энергии фотона

EB, Ksenofontov, Völk (2009, 2012)

SN Ia возраст $t_{SN} = 1006$ yr расстояние $d = 2.2$ kpc плотность МЗС $N_H \approx 0.06$ cm⁻³



Усиленное магнитное поле $B_d \approx 100$ μ G (Völk et al. 2005; Ballet 2006; Morlino et al. 2010; Petruk et al. 2011)

Вогнутый энергетический спектр электронов КЛ ($\alpha > 0.5$)

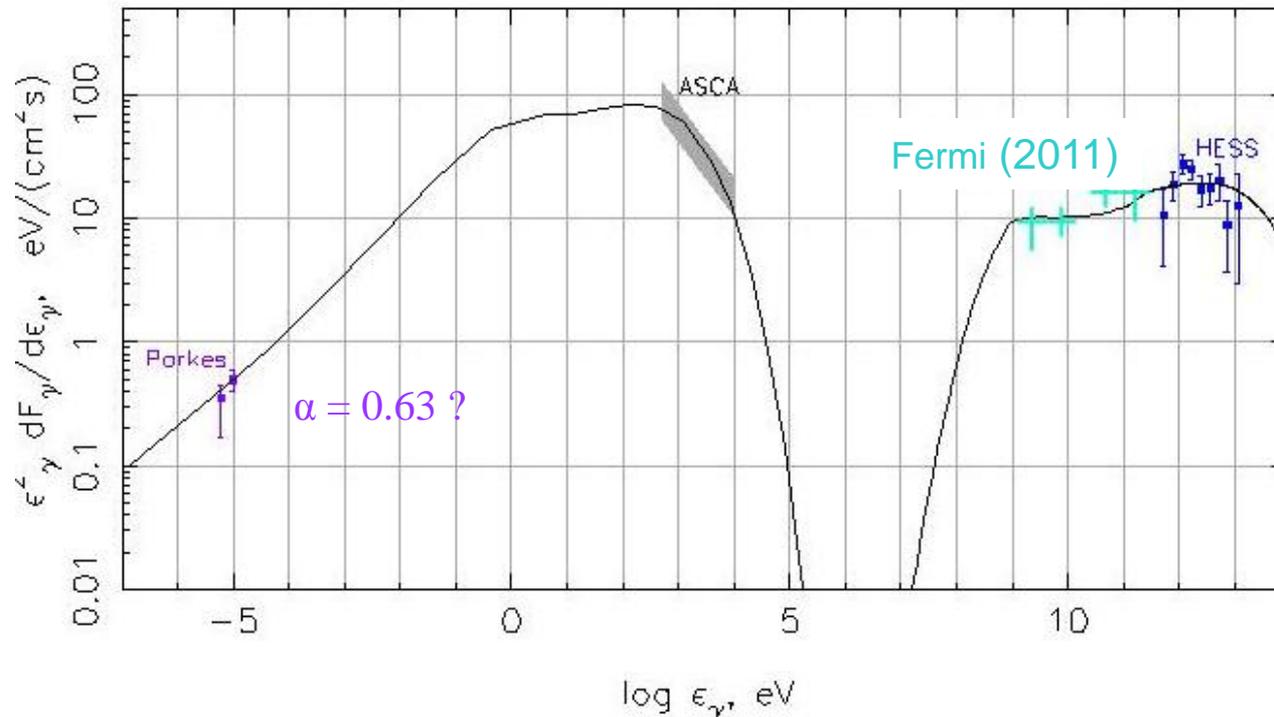
Согласие результатов измерений с теорией

→ Кандидат типичного источника КЛ с максимальной энергией протонов $\epsilon_{max} \sim 10^{15}$ eV

Плотность потока энергии излучения остатка сверхновой RX J10852.0-4622 как функция энергии фотона

EB, Pühlhofer, Völk (2009)

SN II/lb возраст $t_{SN} \approx 2000$ yr расстояние $d \approx 1$ kpc $B_d \approx 100 \mu\text{G}$ $N_g \approx 0.2 \text{ cm}^{-3}$



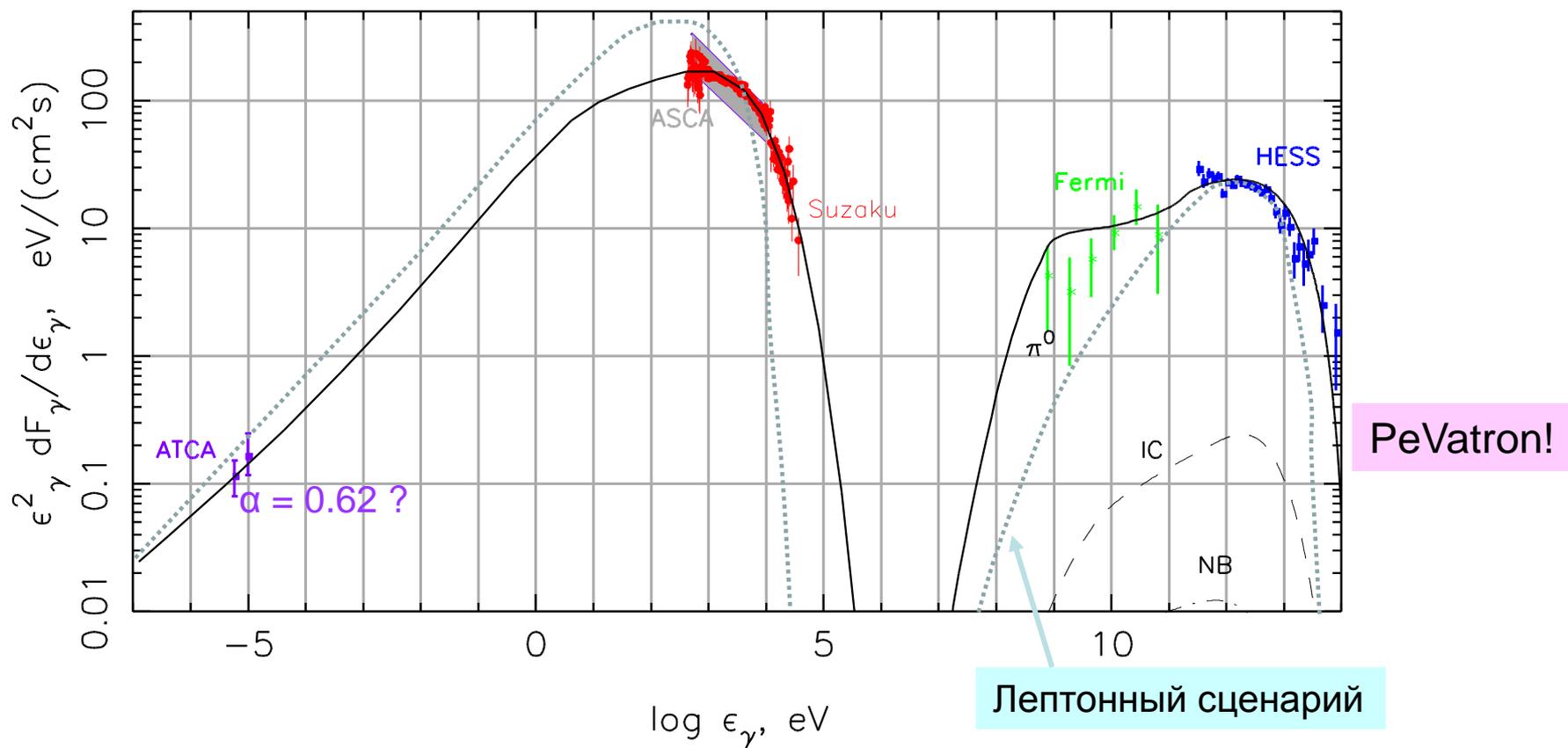
Усиленное магнитное поле $B_d \approx 100 \mu\text{G}$
Согласие результатов измерений с теорией

→ **Кандидат типичного источника КЛ с максимальной энергией протонов $\epsilon_{\text{max}} \sim 10^{15} \text{ eV}$**

Отсутствие теплового рентгеновского излучения → $N_g \ll 0.2 \text{ cm}^{-3}$ →
Лептонный сценарий (*Lee, Slane, Ellison, Nagataki, Patnaude 2013*)

Плотность потока энергии излучения остатка сверхновой RX J1713.7-3946 как функция энергии фотона

SN II/Ib возраст $t_{SN} \approx 1600$ yr (?) расстояние $d \approx 1$ кpc $B_d \approx 100 \mu\text{G}$ $N_g \approx 0.7 \text{ cm}^{-3}$



Данные согласуются с эффективным производством КЛ
(EB & Völk 2006; Zirakashvili & Aharonian 2010)
Лептонный сценарий *(Ellison et al. 2012)*

Плотность потока энергии излучения остатка сверхновой Тихо как функция энергии фотона

SN Ia

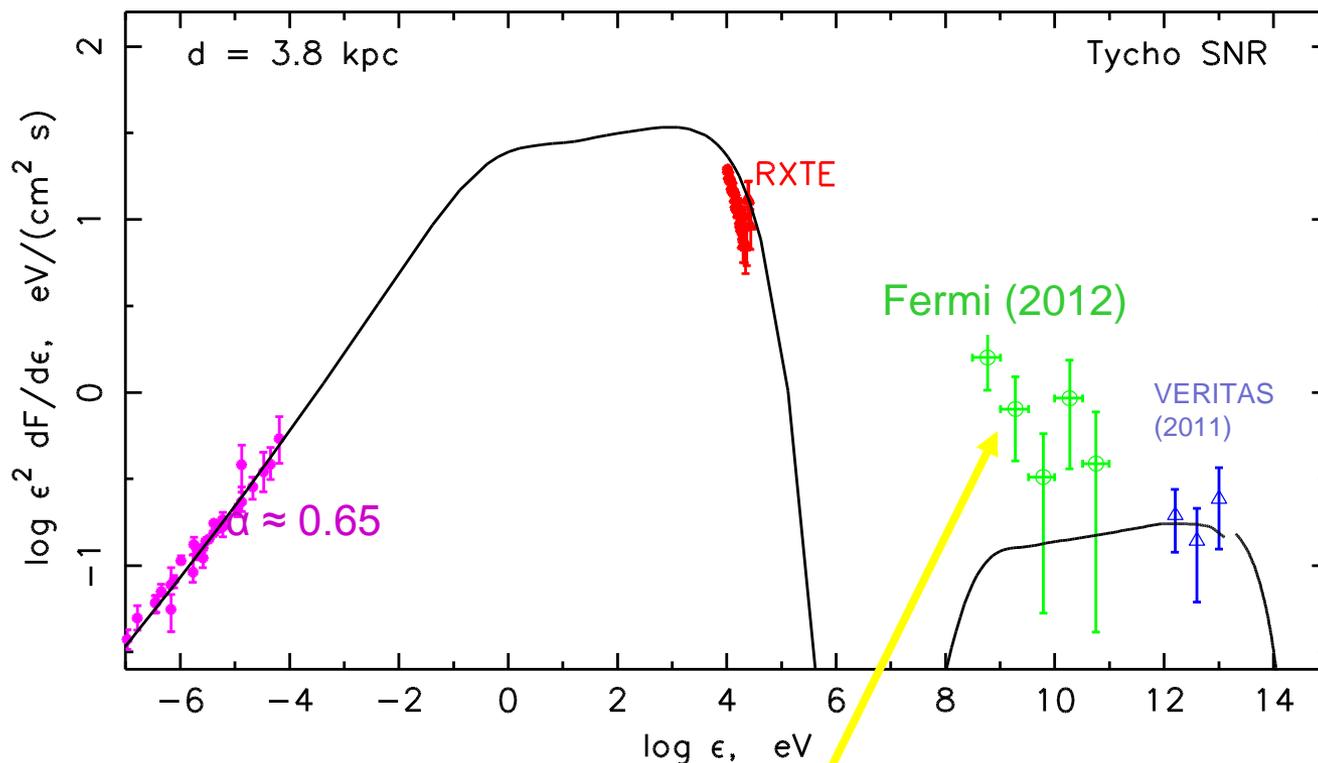
$t_{SN} \approx 440$ yr

$d = 3.8$ kpc

$N_g \approx 0.3$ cm⁻³

$B_d \approx 300$ μG

Theory: Völk et al. (2007)



Проблема: превышение ГэВ-излучения (Giordano et al. 2012) над ожидаемым

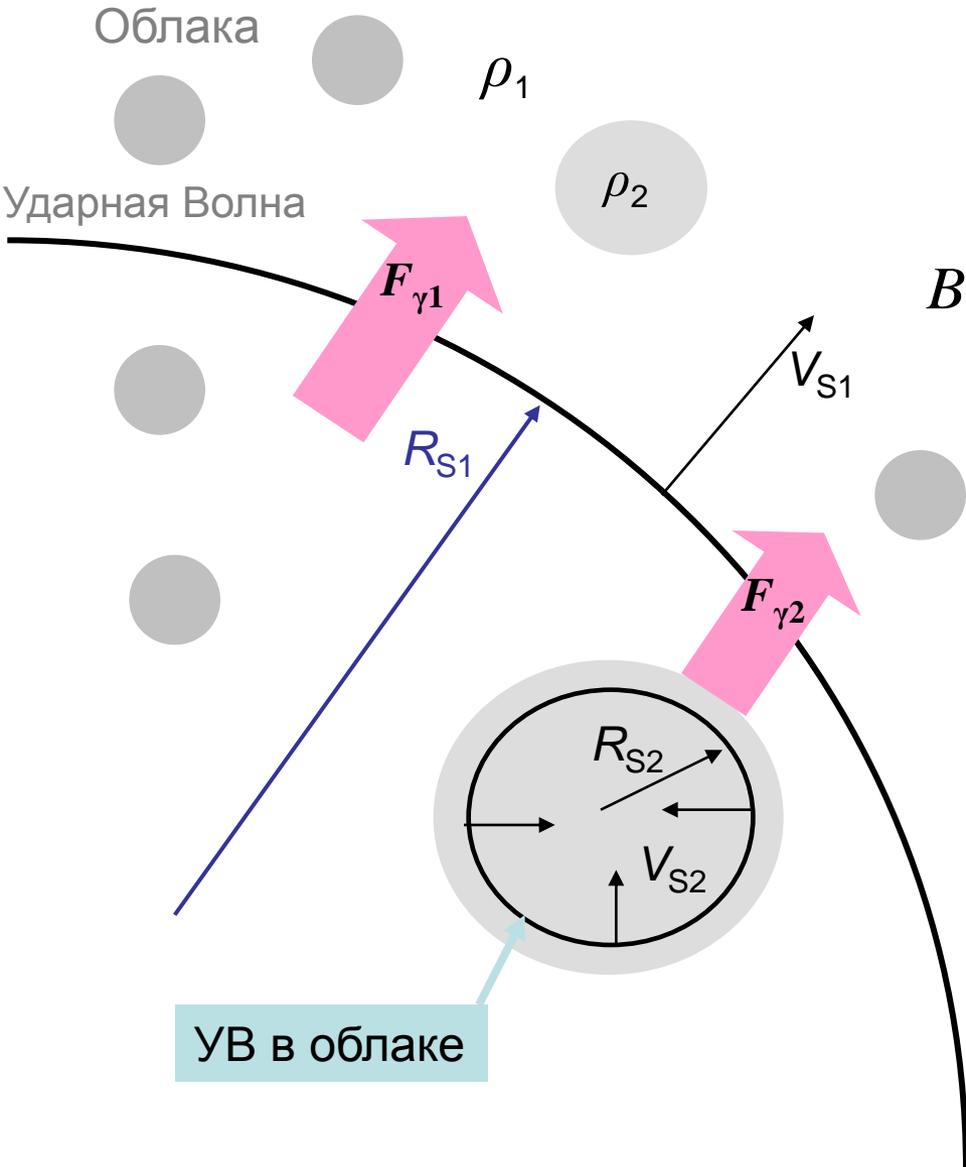
Возможное решение:

- i) Мягкий спектр ускоренных КЛ (Morlino & Caprioli, 2012) (внутренне противоречиво)
- ii) Облачная МЗС (ЕВ, Ksenofontov & Völk 2013)
- iii) Эффект учета фонового излучения

ОСН в облачной межзвездной среде

Ожидается, что МЗС состоит из двух компонент:
разреженный теплый газ + холодные плотные облака

*Field et al. (1969),
McKee & Ostriker(1977),
Wolfire et al.(2003)*



$$n_{CR} \propto \rho$$

концентрация КЛ

$$\varepsilon_{max} \propto BR_S V_S$$

максимальная энергия КЛ

$$B \propto \rho V_S^2 \approx const$$

магнитное поле

$$q_\gamma \propto n_{CR} \rho$$

излучательная способность

$$F_\gamma \propto f q_\gamma$$

поток гамма-излучения

↑ фактор заполнения

$$R_{S2} = 10^{-2} R_{S1} \quad \rho_2 = 25 \rho_1$$

$$f_2 = 0.005$$

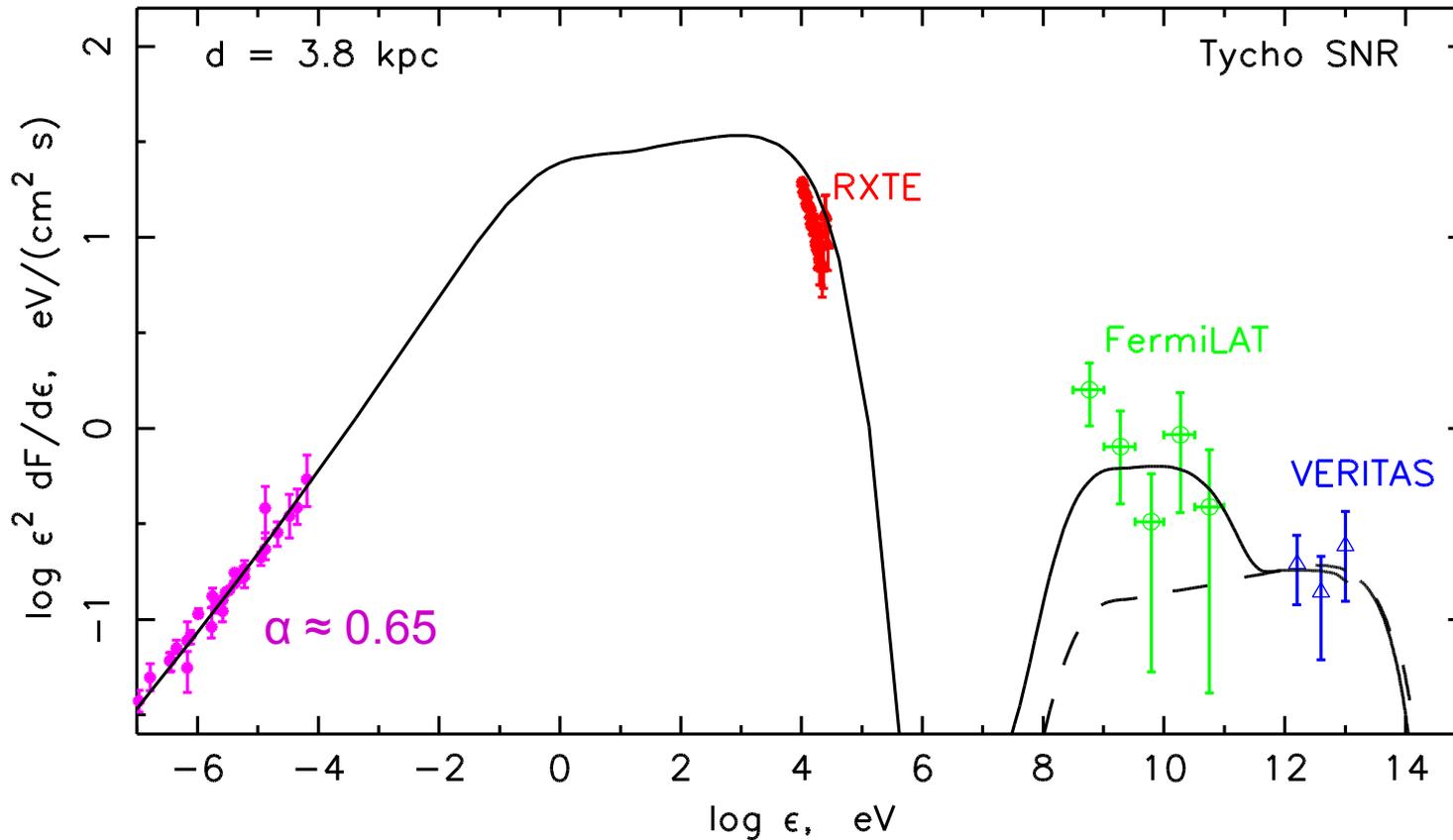
*Audit & Hennebelle (2008),
Inoue et al. (2012)*



$$F_{\gamma 2} = 4 F_{\gamma 1} \exp\left(-\frac{\varepsilon_\gamma}{100 \text{ GeV}}\right)$$

Плотность потока энергии излучения остатка сверхновой Тихо как функция энергии фотона (облачная МЗС)

EB, Ksenofontov, Völk (2012)

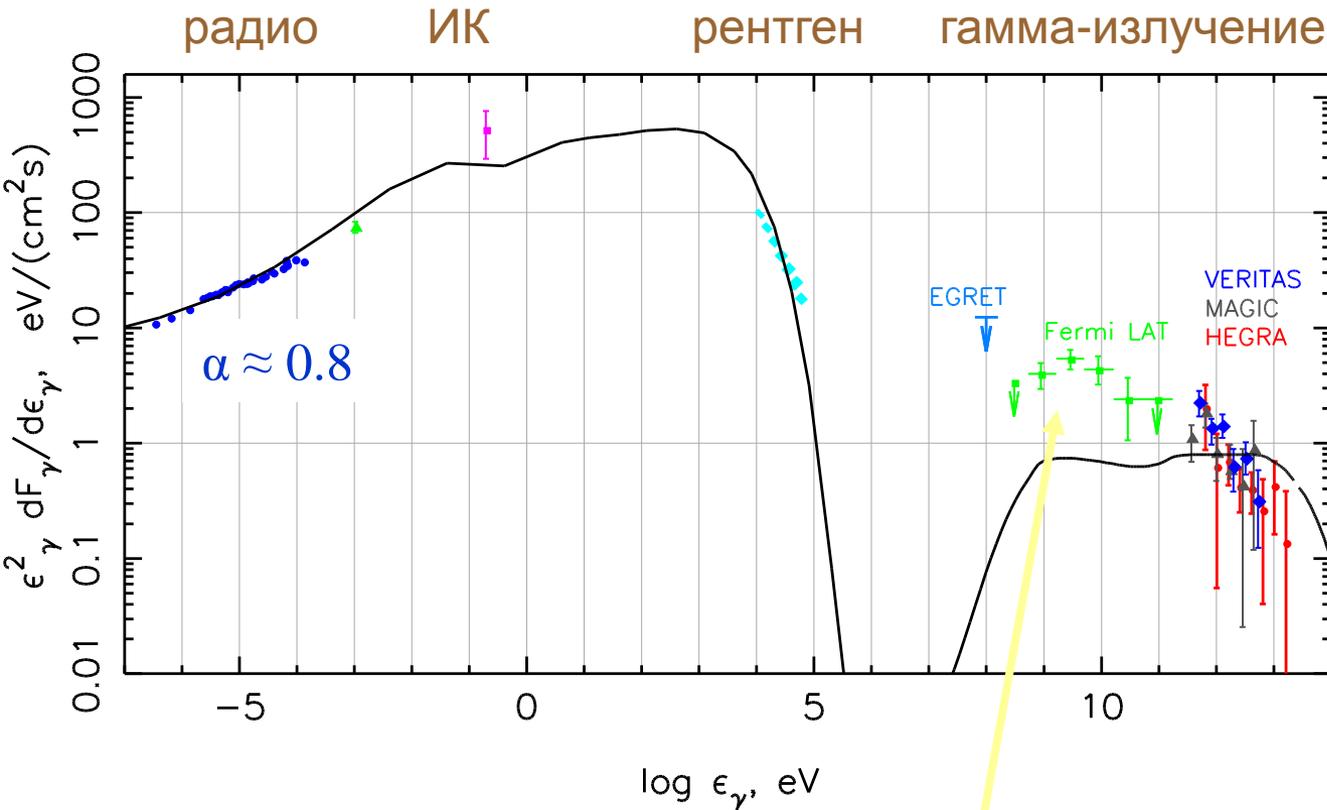


Требуется подтверждение облачности МЗС

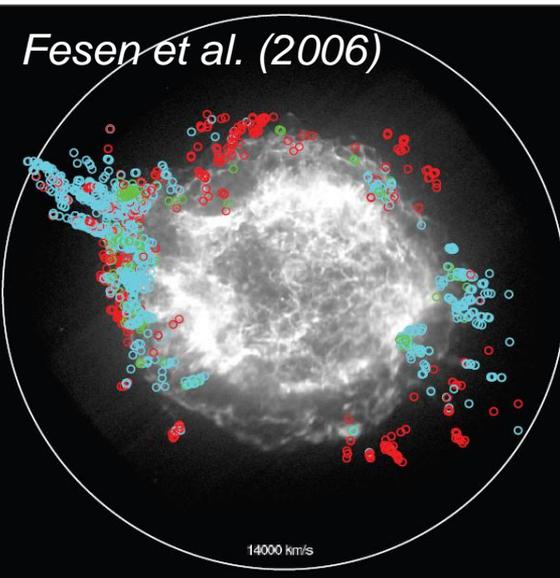
Спектр излучения остатка сверхновой Кассиопея А

Теория: *EB, Rowell, Völk (2003)*

SN Ib $t_{SN} \approx 350$ yr $d = 3.4$ kpc



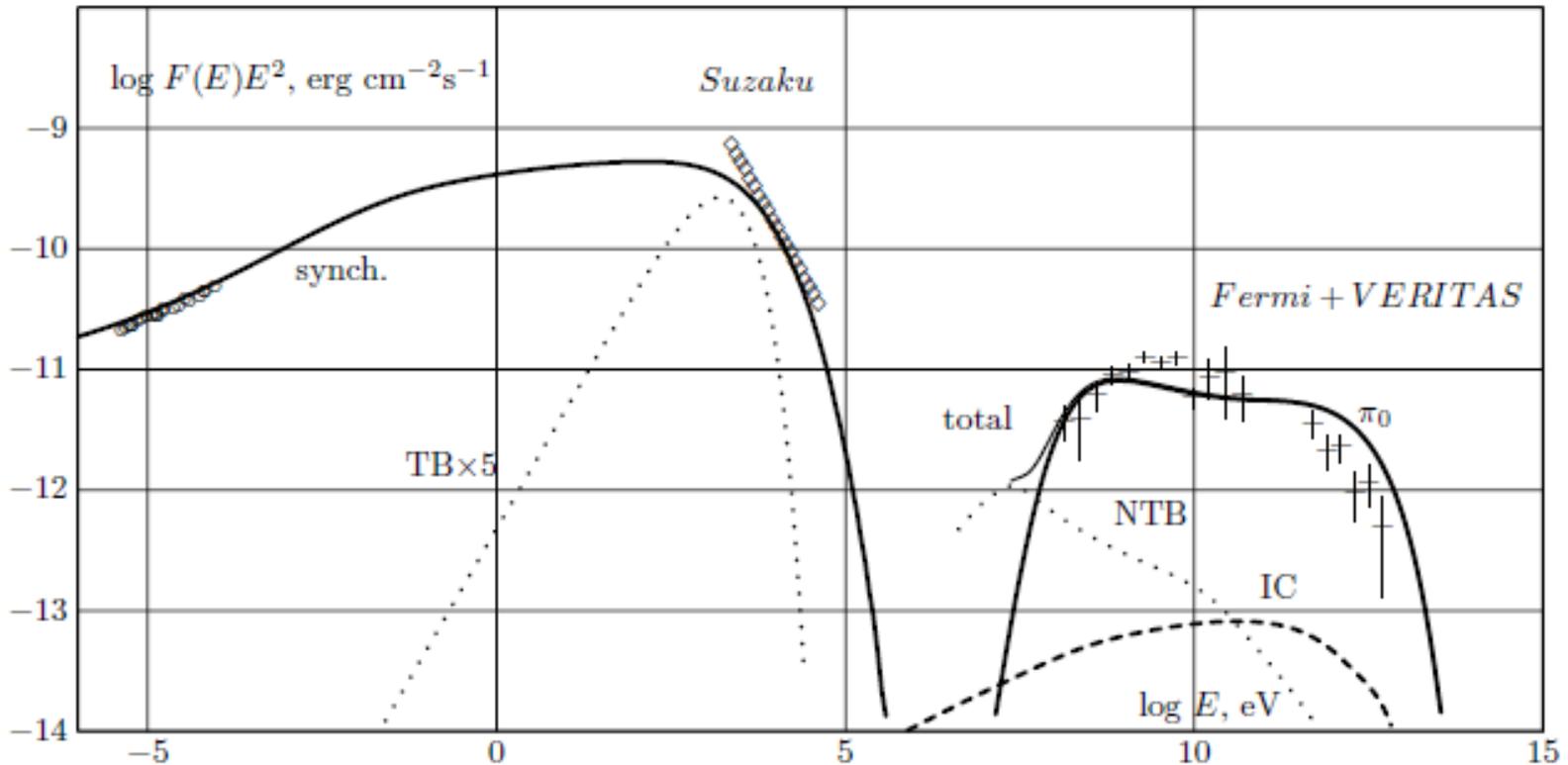
Cas A outer knots



Превышение наблюдаемого потока ГэВ-го излучения над ожидаемым возможно обусловлено вкладом быстрых сгустков (knots)

Спектр излучения остатка сверхновой Кассиопея А

Теория: Зиракашвили и др. (2014)

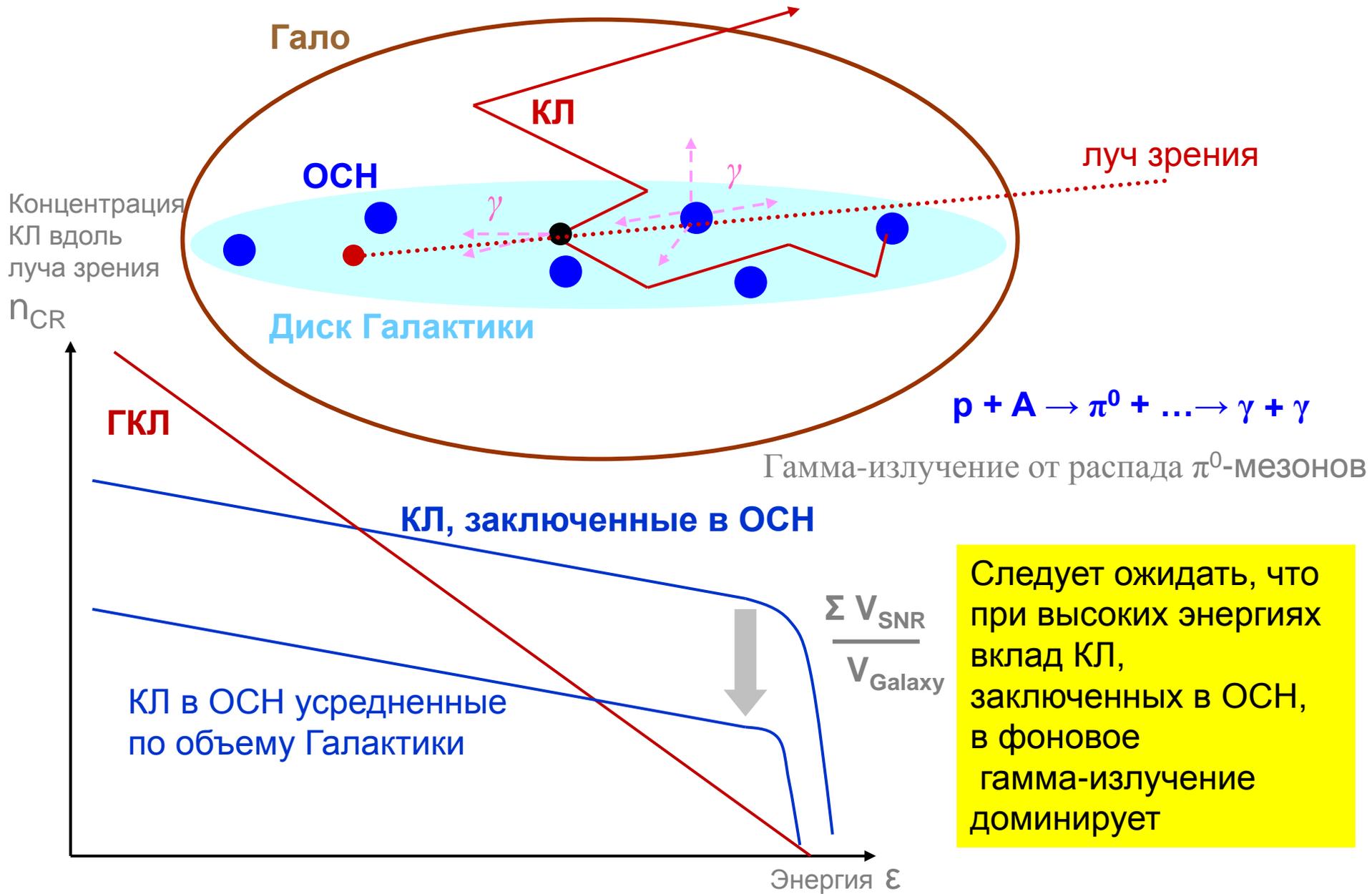


Большая величина магнитного поля →

Малая величина числа Маха →

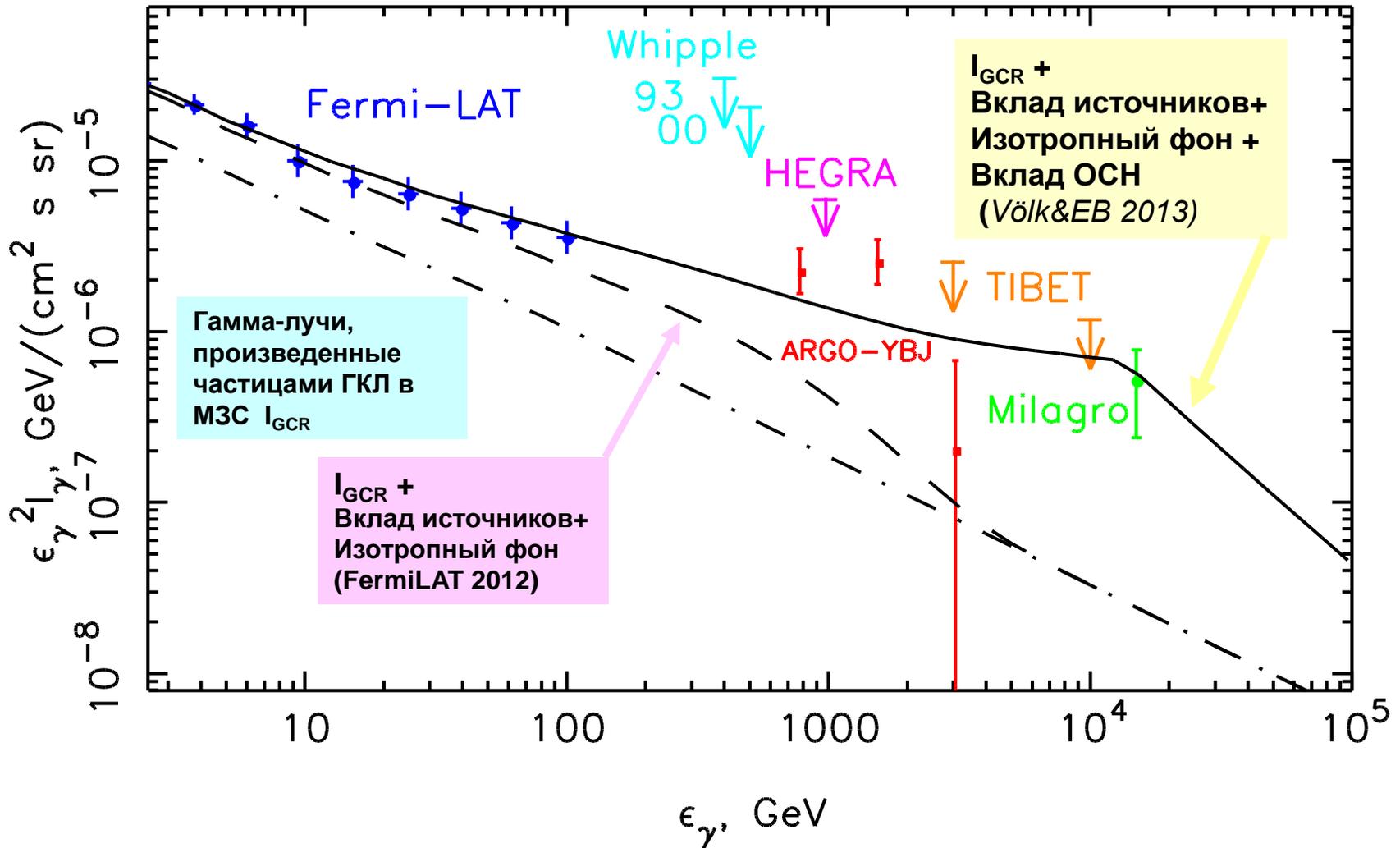
Мягкий спектр ускоренных КЛ

Вклад ОСН в фоновое галактическое гамма-излучение



Следует ожидать, что при высоких энергиях вклад КЛ, заключенных в ОСН, в фоновое гамма-излучение доминирует

Диффузное гамма-излучение из области галактического центра

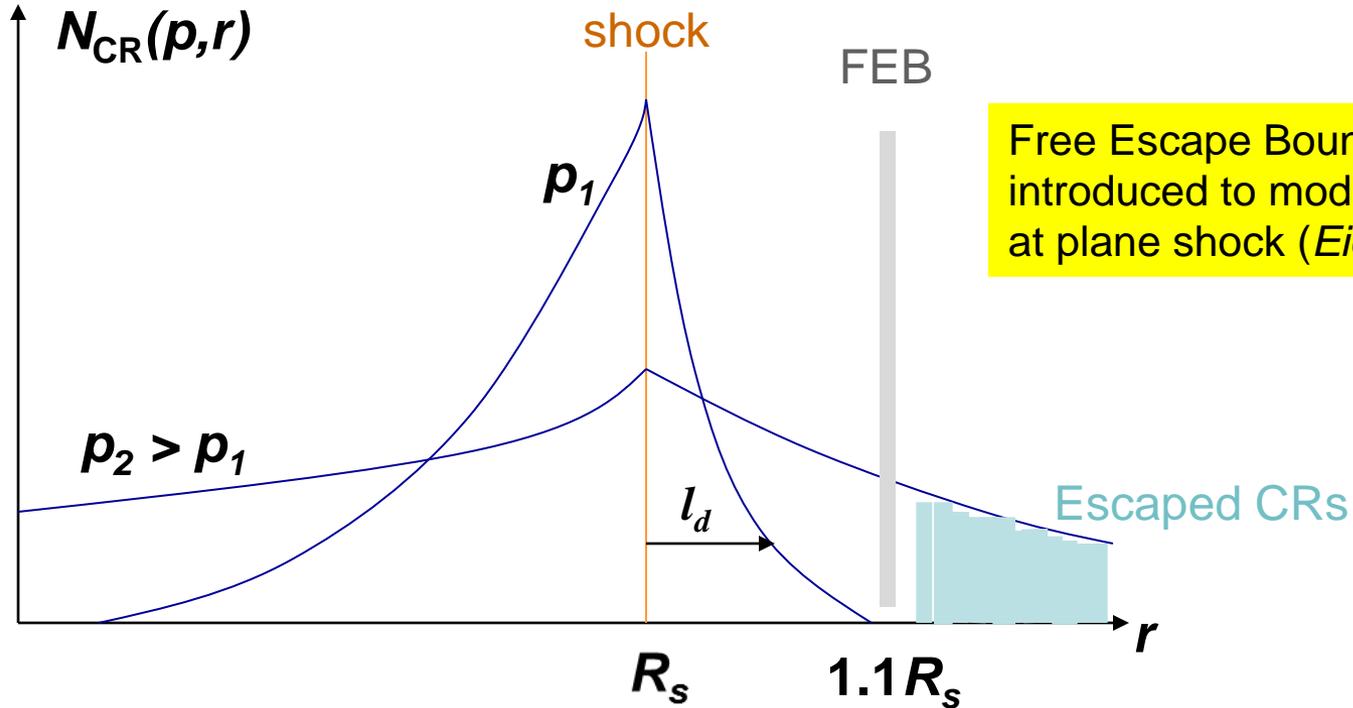


Имеющиеся результаты измерений указывают на существенный вклад ОЧН в фоновое гамма-излучение

Заключение

- Измерения энергетических спектров КЛ согласуются с тем, что ОСН являются главным источником КЛ с энергиями $\varepsilon < 10^{17}$ эВ
- Гамма-излучение, зарегистрированное из молодых ОСН, свидетельствует о том, что в ОСН производятся частицы с энергиями вплоть до $\varepsilon \sim 10^{15}$ эВ
- Дальнейшее, более детальное исследование требуется, чтобы понять все наблюдаемые особенности гамма-излучения остатков сверхновых
- Прогресс в разрешении проблемы происхождения КЛ будет достигнут на основе нового поколения наземных установок (гамма-телескопы, установки ШАЛ) и космических телескопов с улучшенными характеристиками

Spatial distribution of accelerated CRs



$$l_d = \kappa(p) / V_s$$

diffusive length

$$l_d(p) < R_s / A \quad (A \approx 10)$$

efficient acceleration condition

$$l_d(p_m) = R_s / A \quad \rightarrow \quad p_m \sim R_s V_s B$$

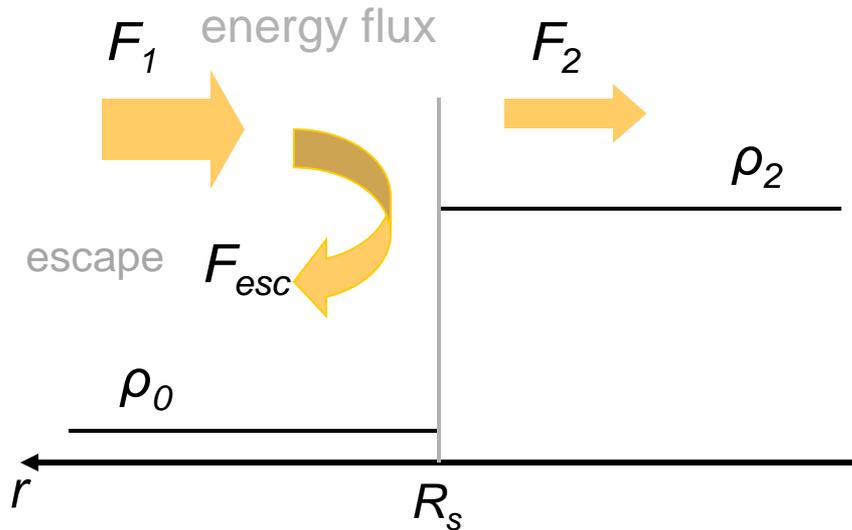
maximal CR momentum

$$p > p_m(t)$$

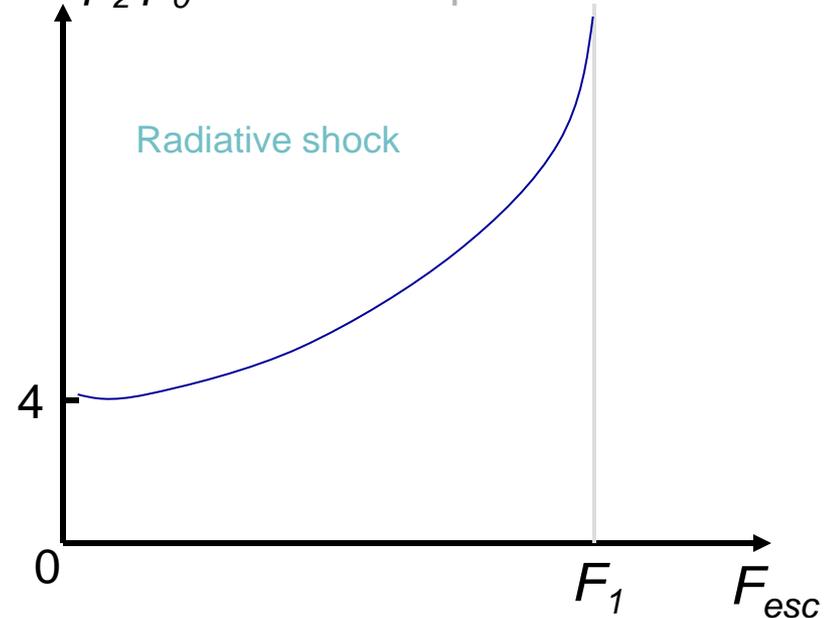
escaping CRs (EB & Krymsky 1988; Ptuskin & Zirakashvili 2005; Caprioli, Blasi & Amato 2009)

Dynamical role of escaping CRs

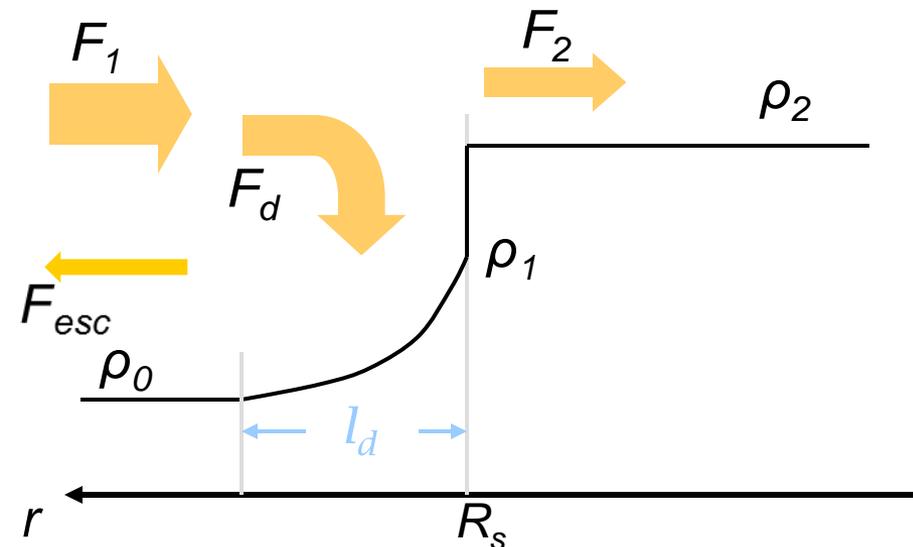
Plane shock



$\sigma = \rho_2/\rho_0$ Shock compression ratio



Actual expanding shock



$$F_{\text{esc}} \implies F_{\text{esc}} + \frac{d}{dt}(l_d E_{CR})$$

$$l_d = \kappa/V_s$$

$$\frac{d}{dt}(l_d E_{CR}) > 0 \implies \text{Energy dilution}$$

$$\implies \sigma \gg 4$$

Planar shock approach
considerably overestimates
CR escape