

**33-я Всероссийская конференция по  
космическим лучам**



**Галактические ПэВатроны:  
моделирование новых источников космических  
лучей**

***Осипов С.М.<sup>1</sup>, Гладиллин П.Е.<sup>1</sup>, Быков А.М.<sup>1,2</sup>***

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>СПбГПУ

[osm2004@mail.ru](mailto:osm2004@mail.ru)

[peter.gladilin@gmail.com](mailto:peter.gladilin@gmail.com)

[byk@astro.ioffe.ru](mailto:byk@astro.ioffe.ru)

14 августа 2014

Дубна

План:

1. Спектр ГКЛ: наблюдения и особенности;
2. Анализ данных Тунка-25, Тунка-133, KASKADE-Grande, Gamma12, Tibet;
3. Свойства систем со сходящимися МГД потоками;
4. Спектры и сравнение с наблюдательными данными;

# Спектр Галактических космических лучей

Тонкая структура спектра КЛ:

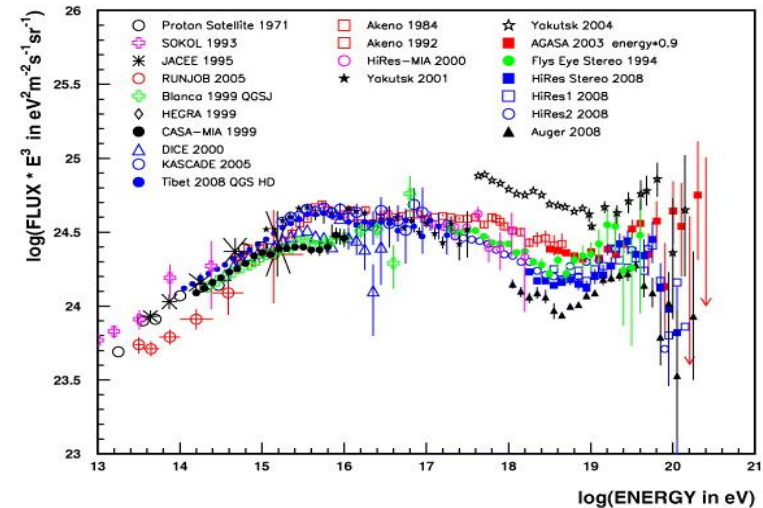
1. «Перегиб» на энергиях 200 GeV/nucleon, небольшое «укручение» спектра с  $\Delta\gamma \approx 0.1$
2. Непосредственно, «колени» на  $3 \cdot 10^{15}$  eV с переходом от  $\gamma \approx 2.7$  к  $\gamma \approx 3.1$ .

*Основным ускорителем до энергий  $10^{15}$  считаются остатки сверхновых;*

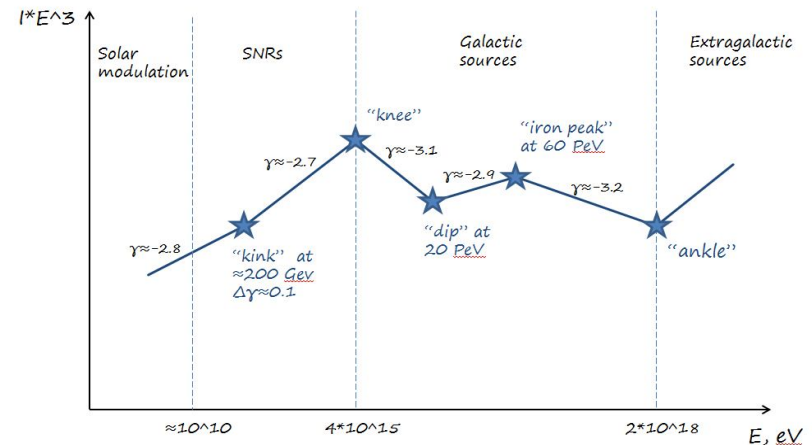
2. «Железный пик» на 60 PeV, или «второе колено».

*Отмечается увеличение ядерной компоненты в составе КЛ от 20-30 PeV до 70-80 PeV, после чего состав снова становится более лёгким.*

4. «Лодыжка» на энергии  $4 \cdot 10^{18}$  eV, которая в основном ассоциируется с переходом от галактических к внегалактическим ускорителям.

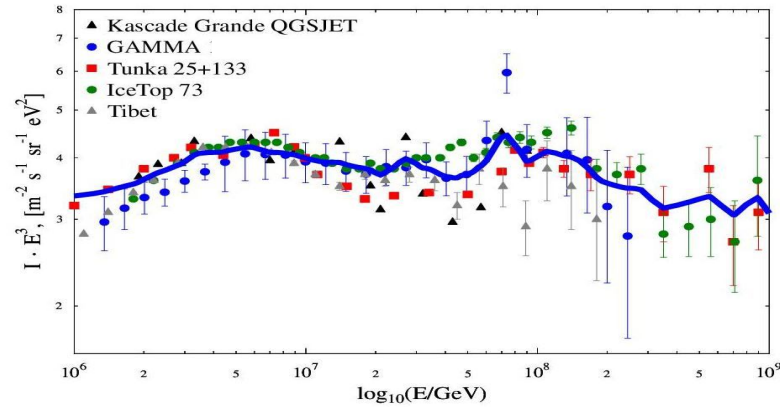
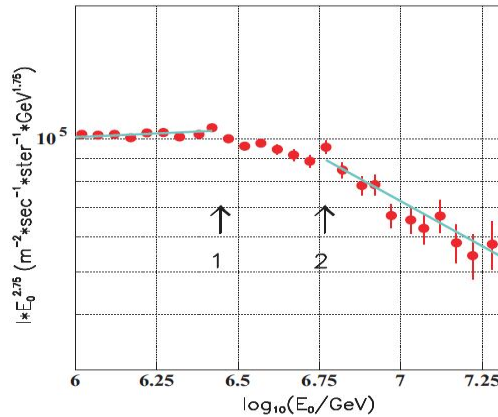


CR spectrum fine structure



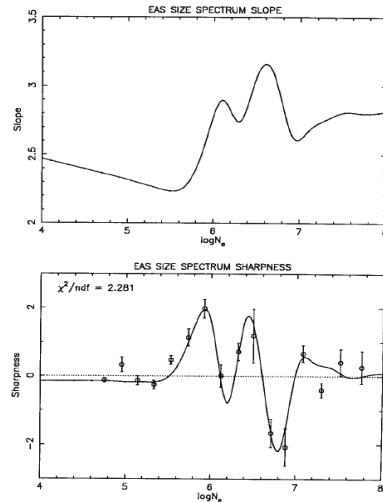
# Тонкая структура спектра: данные последних лет. «Резкость» и «наклон»

Тонкая структура «колена» космических лучей: два острых пика на  $3 \cdot 10^{15}$  eV и  $6 \cdot 10^{15}$  eV. [N.Budnev et al., 2013]

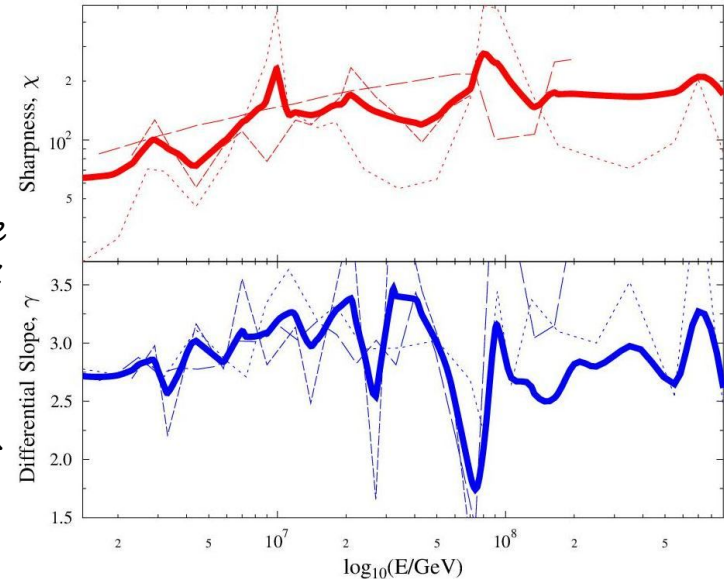


Суммарный поток КЛ на основе последних данных KASCADE-Grande, Tunka-25, Tunka-133, Tibet-III, GAMMA and IceTop

«Резкость» и наклон спектра в области «колена» согласно анализу [Erlykin and Wolfendale, 1997]



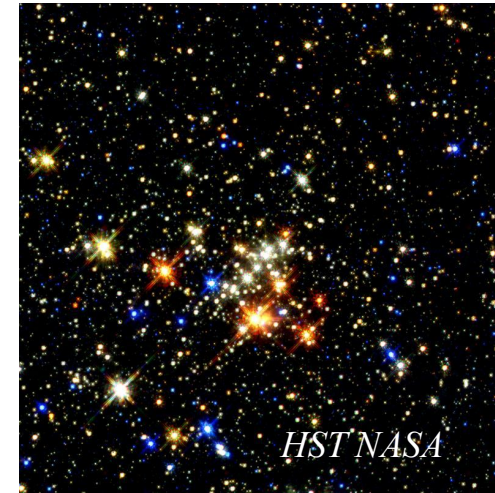
«Резкость» и наклон спектра в области энергий  $10^{15}$  -  $10^{17}$  эВ на основе последних данных KASCADE-Grande, Tunka-25, Tunka-133, Tibet-III, GAMMA and IceTop



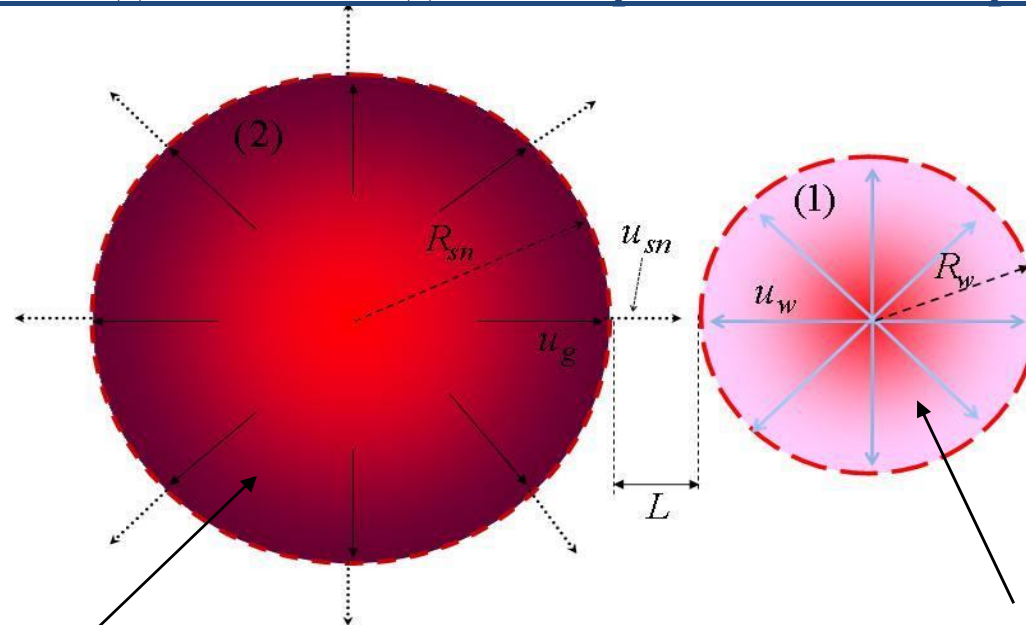
# Системы сходящихся ударных волн

[А.Вукон et.al. 2011,2013]

- системы остаток сверхновой – звёздный ветер;
- тесные двойные системы;
- «убегающие звёзды»
- процессы в звёздных атмосферах (звёздные вспышки)



## Взаимодействие звёздного ветра с остатком сверхновой (упрощённая схема)



Расширяющийся остаток сверхновой

Область звёздного ветра от молодой массивной звезды O-B класса

### Параметры:

$R_{sn}$   $R_{sw}$  – радиусы ОСН и звёздного ветра

$u_{sw}$   $u_{sn}$  - скорости УВ ОСН и звёздного ветра

$L$  – расстояние между фронтами УВ

$D_{sn}$ ,  $D_{sw}$  и  $D_{ism}$  – коэффициенты диффузии в области звёздного ветра, ОСН и в межзвёздной среде

$n_0$  - концентрация

# Линейная модель ускорения частиц (“test-particle”)

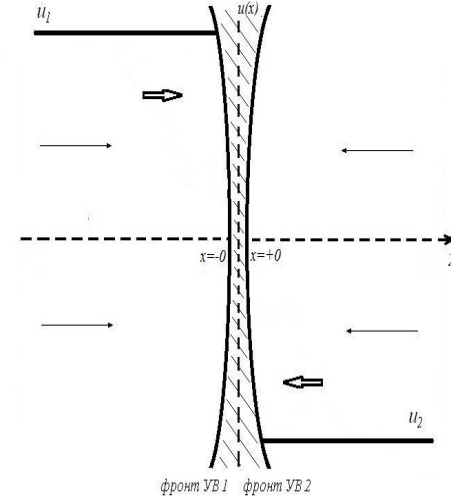
□ Расчёт модели в пределе “тестовых частиц”  
(Bykov A., Gladilin P., Osipov S. 2011)

Bykov A., Gladilin P.,  
Osipov S., Mem.S.A.It.,  
2011

ДКУ 
$$\frac{\partial f_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D_i(x, p) \frac{\partial f_i}{\partial x} - u_i \frac{\partial f_i}{\partial x} + \frac{p}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x} \frac{\partial f_i}{\partial p} + Q_0 \delta(x) \delta(p - p_0) H(p)$$

Профиль скорости 
$$u_i = \begin{cases} u_1, & x < 0 \\ -u_2, & x > 0 \end{cases}$$

Граничные условия 
$$f_1 = f_2,$$
  
$$D_1 \frac{\partial f_1}{\partial x} + \frac{u_1}{3} p \frac{\partial f_1}{\partial p} = D_2 \frac{\partial f_2}{\partial x} - \frac{u_2}{3} p \frac{\partial f_2}{\partial p} + Q_0 \delta(p - p_0) H(t).$$



Решение 
$$f_i(x, p, t) = \frac{3Q_0 p_0^3}{(u_1 + u_2) p^3} H(p - p_0) H(t - \tau_a) \times \exp\left(-\frac{u_i}{D_i} |x|\right) \propto \frac{1}{p^3}$$

Параметр	Одиночная волна	Две волны
Время ускорения	$\tau_{a1} = \int_{p_0}^p \frac{3}{(u_1 - u_2)} \left( \frac{D_1 + D_2}{u_1 + u_2} \right) \frac{dp}{p}$	$\tau_{a2} = \int_{p_0}^p \frac{3}{(u_1 + u_2)} \left( \frac{D_1 + D_2}{u_1 + u_2} \right) \frac{dp}{p}$
Вид спектра	$\frac{dN}{dp} \propto p^2 f \propto \frac{1}{p^2}$	$\frac{dN}{dp} \propto p^2 f \propto \frac{1}{p}$
Показатель спектра $\gamma$	$\approx 2.0$	$\approx 1.0$
Степенной индекс $q = \gamma + 2$	$\approx 4.0$	$\approx 3.0$

## Спектр ускоренных частиц

$$f_0 \propto 1/p^3$$

# Временная эволюция спектров ускоренных протонов и электронов

Выков А., Gladilin P., Osipov S.,  
MNRAS, v. 429, p. 2755–2762, 2013

☐ Слева:

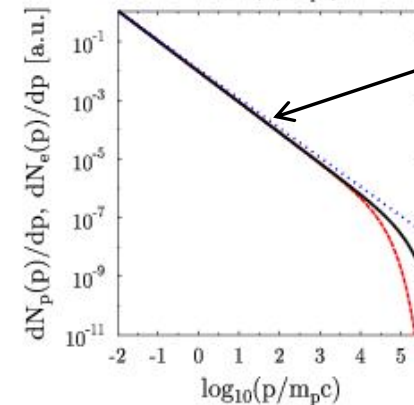
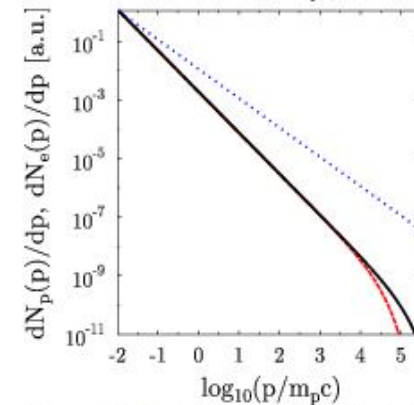
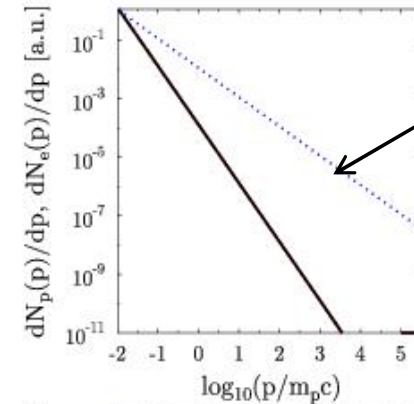
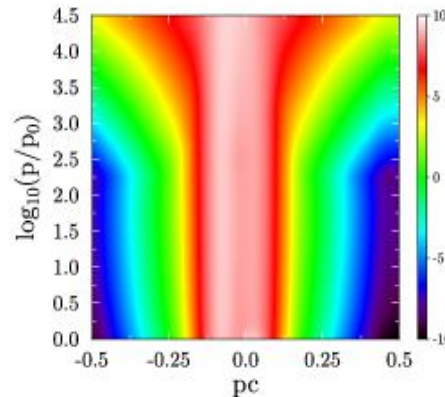
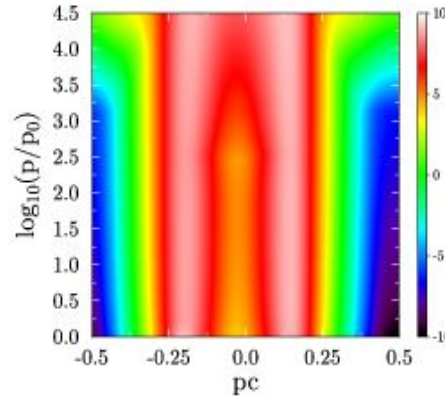
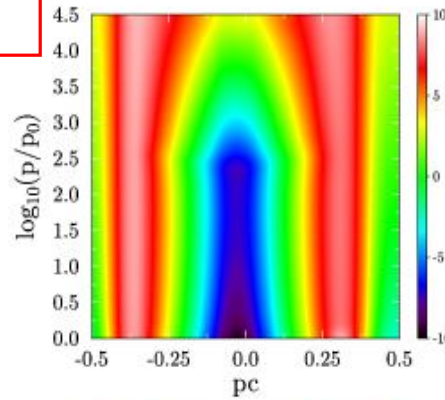
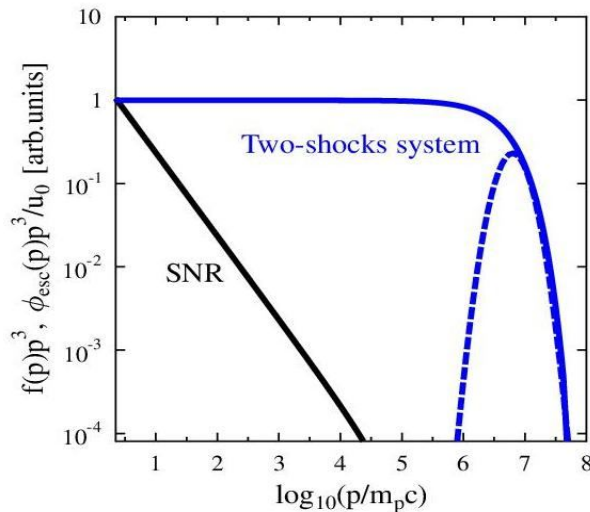
функция распределения протонов  
 $f(x,p) * p^3$

3 позиции:

0.6 пк, 0,3 пк, 0.1 пк.

☐ Справа:

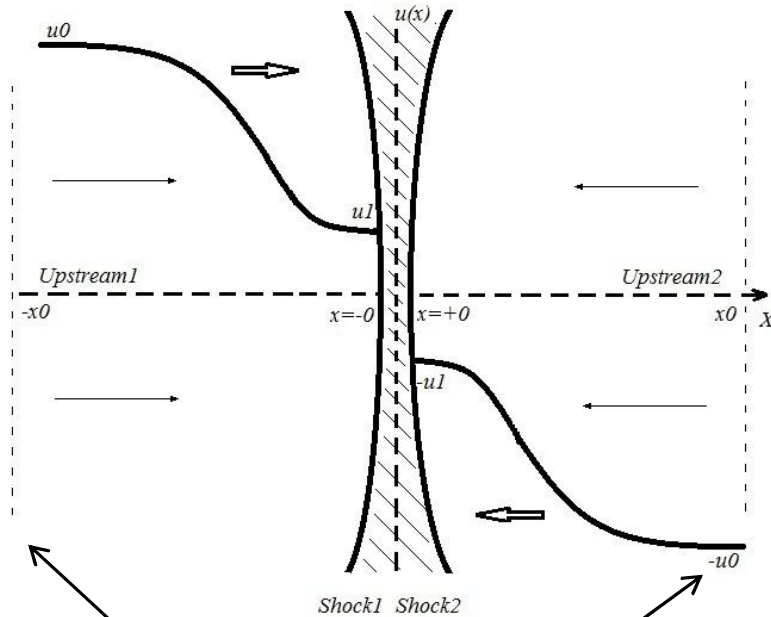
спектры протонов и электронов  
на движущемся фронте левой  
УВ в моменты времени,  
соответствующие левым  
панелям.



# Нелинейная модель ускорения с границей свободного ухода

Bykov A., Gladilin P., Osipov S.,  
MNRAS, v. 429, p. 2755–2762, 2013

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ D(x, p) \frac{\partial f(x, p)}{\partial x} \right] - u \frac{\partial f(x, p)}{\partial x} + \frac{1}{3} \left( \frac{du}{dx} \right) p \frac{\partial f(x, p)}{\partial p} + Q(x, p) \delta(x) = 0,$$



Положение границы  
области  $f_0(\pm x_0) = 0$

$$U(x) + P_c(x) + P_w(x) + P_g(x) = 1 + \frac{1}{\gamma M_0^2}$$

$$f(x=0, p) \equiv f_0(p)$$

$$\phi_{esc}(p) = - \left( D(x, p) \frac{\partial f}{\partial x} \right)_{\pm x_0}$$

$$u_p = u_1 - \frac{1}{f_0(p)} \int_{-x_0}^0 dx (du/dx) f(x, p)$$

$$U_p \equiv u_p / u_0$$

$$f_0(p) = \frac{3\eta\rho_0}{8\pi m_p U_p(p)} \frac{1}{p^3} - \frac{3}{U_p(p)p^3} \int_{p_0}^p \phi_{esc} p'^2 dp',$$

захваченные частицы

уходящие частицы



# Максимальные энергии ССУВ

$L_{FEB}, \text{pc}$	$u_0, \text{km/s}$	$B_0, \mu\text{G}$	$E_{max}, \text{eV}$	$B_{turb}, \mu\text{G}$	$E_{max}, \text{eV}$
3	3000	3	$4.0 \cdot 10^{13}$	228	$2.5 \cdot 10^{15}$
		100	$1.3 \cdot 10^{15}$		
	5000	3	$6.2 \cdot 10^{13}$	275	$5.0 \cdot 10^{15}$
5	3000	100	$1.9 \cdot 10^{15}$	305	$1.3 \cdot 10^{16}$
		3	$2.0 \cdot 10^{14}$		
	10000	3	$6.3 \cdot 10^{15}$	239	$1.6 \cdot 10^{16}$
10	3000	100	$2.1 \cdot 10^{14}$	281	$2.5 \cdot 10^{16}$
		3	$3.2 \cdot 10^{14}$		
	5000	3	$1.3 \cdot 10^{16}$	310	$8.0 \cdot 10^{16}$
10	3000	100	$2.6 \cdot 10^{16}$	265	$4.0 \cdot 10^{16}$
		3	$4.0 \cdot 10^{14}$		
	5000	3	$5.1 \cdot 10^{14}$	296	$6.3 \cdot 10^{16}$
10	5000	100	$2.1 \cdot 10^{16}$	334	$1.6 \cdot 10^{17}$
		3	$1.3 \cdot 10^{15}$		
10	10000	100	$4.1 \cdot 10^{16}$		
		3	$4.1 \cdot 10^{16}$		

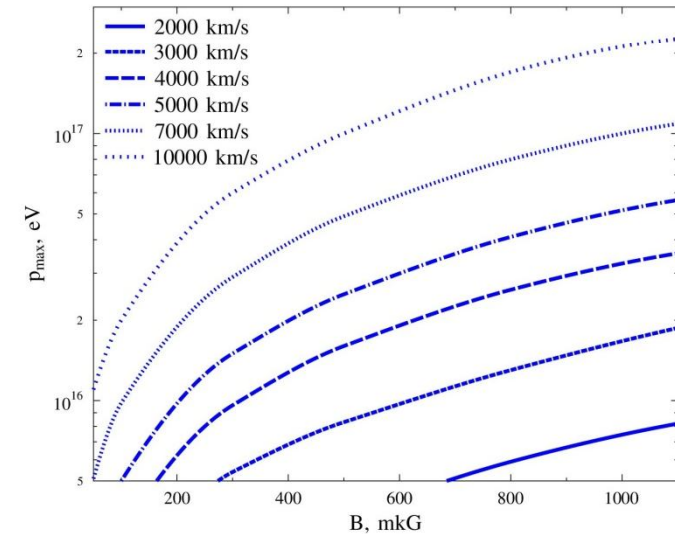
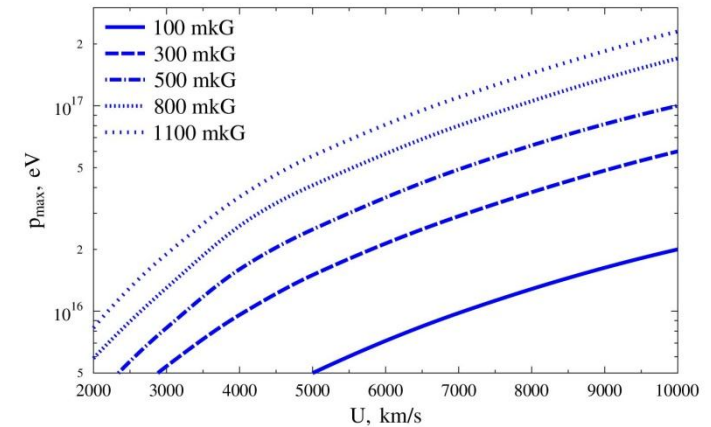
Максимальная энергия протонов  $E_{max}$  для различных модельных параметров:

$L_{FEB}$  – расстояние от фронта УВ до границы свободного ухода;

$u_0$  – скорости ударных волн,

$B_0$  – величина магнитного поля вблизи фронта УВ;

$B_{turb}$  – величина усиленного магнитного поля;

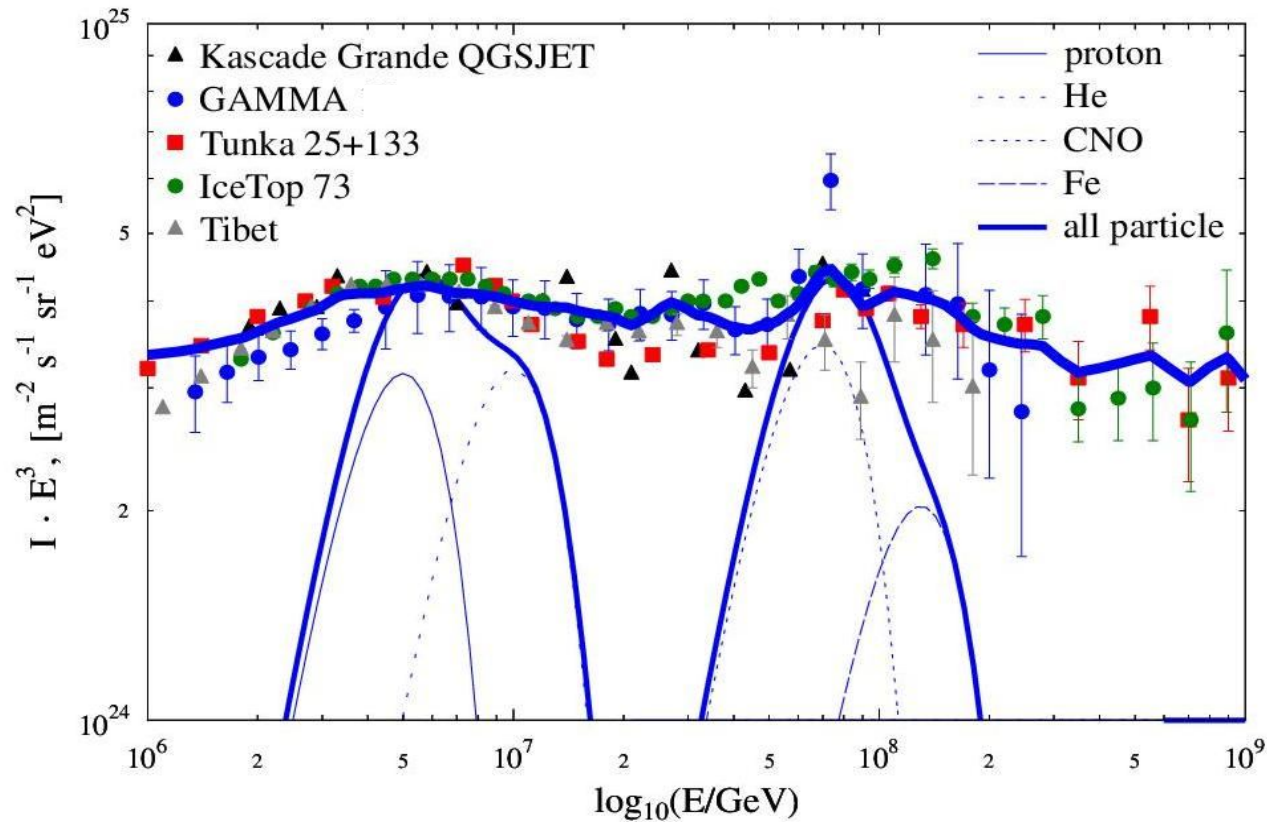


Зависимость максимальной энергии протонов от скорости УВ (вверху) и от величины усиленного магнитного поля (внизу).

# Системы сходящихся ударных волн как источник космических лучей

- На основе нелинейной модели ускорения частиц в сходящихся ударных волнах (А. Вуков et. al. 2013) были рассчитаны спектры ускоренных протонов и тяжёлых ядер. Частицы были разделены на 4 элементные группы: **H, He, CNO** и **Fe**.
- Поток космических лучей на Земле был рассчитан, используя приближение точечного источника.
- Коэффициент диффузии:  
$$D(E)=3.3 \cdot 10^{28} \cdot E^{0.33} \text{ (GeV) [cm}^2\text{/s]}$$
- Предполагалась линейная зависимость максимальной энергии ускоренных частиц от их заряда  $E_z = Z \cdot E_p$  (*rigidity dependence*).
- Суммарная энергия ускоренных в системе сходящихся ударных волн ОСН и звёздного ветра может достигать  $2 \cdot 10^{49}$  erg. Такая мощность позволяет источнику находиться в **1-2** кпк от Земли.
- В сравнении с одиночными остатками сверхновых системы сходящихся ударных волн позволяют ускорять частицы до больших максимальных энергий (см. предыдущий слайд).
- Типичное время жизни системы порядка 300 лет, так что источник можно считать время-переменным. Если источники такого типа вносят вклад в общий поток КЛ на высоких энергиях, то, можно ожидать, что тонкая структура спектра будет меняться со временем.

# Результаты моделирования



*Спектр космических лучей в диапазоне энергий  $10^{15}$ - $10^{18}$  эВ на основе последних данных Tunka 25 and Tunka 133, KASCADE-Grande, GAMMA, IceTop 73 и Tibet-III.*

*Тонкой сплошной линией показаны спектры ядер, ускоренных в системе сходящихся ударных волн.*

*Расстояние до источника  $d=1.5$  кпк. Два пика соответствуют «легкой» (H, He) и «тяжёлой» (CNO, Fe) составляющим элементного состава.*

*H – 55%, He – 20%, CNO – 18%, Fe – 7%.*

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!!**

$$f(x, p) = f_0 \exp \left[ - \int_x^0 dx' \frac{u(x')}{D(x', p)} \right] \left[ 1 - \frac{W(x, p)}{W_0(p)} \right]$$

$$f_0(p) = \frac{3\eta\rho_0}{8\pi m_p U_p(p)} \frac{1}{p^3} - \frac{3}{U_p(p)p^3} \int_{p_0}^p \phi_{\text{esc}} p'^2 dp'$$

$$\phi_{\text{esc}}(p) = -\frac{u_0 f_0}{W_0(p)} \quad u_p = u_1 - \frac{1}{f_0(p)} \int_{-x_0}^0 dx (du/dx) f(x, p) \quad U_p \equiv u_p/u_0$$

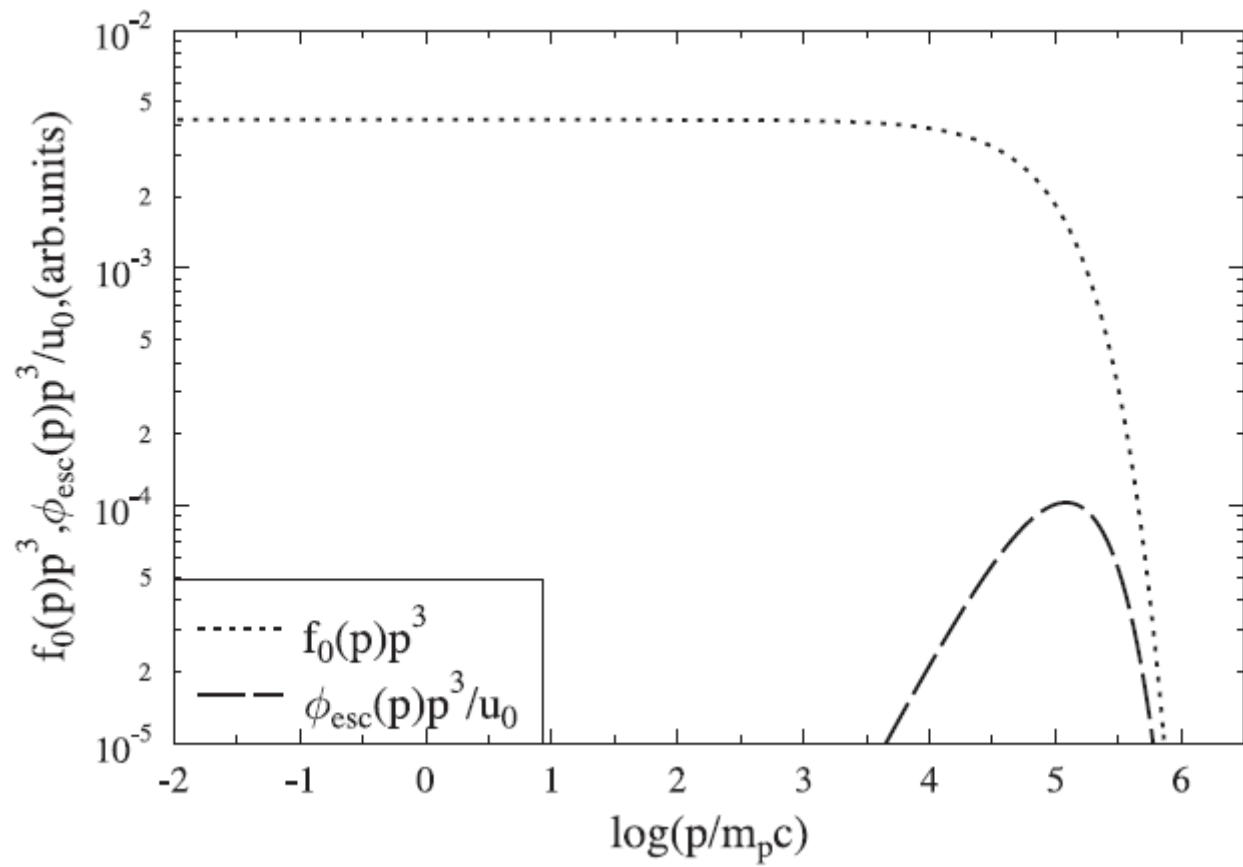
$$W(x, p) = u_0 \int_x^0 dx' \frac{\exp[-\psi(x', p)]}{D(x', p)} \quad W_0(p) = W(x_0, p)$$

$$\psi(x, p) = - \int_x^0 dx' \frac{u(x')}{D(x', p)}$$

$$Q(x, p) = \frac{\eta n_{\text{gas},1} u_1}{4\pi p_{\text{inj}}^2} \delta(p - p_{\text{inj}}) \delta(x)$$

$$U(x) + P_c(x) + P_w(x) + P_g(x) = 1 + \frac{1}{\gamma M_0^2} \quad P_c(x) = \frac{4\pi}{3\rho_0 u_0^2} \int_{p_{\text{inj}}}^{\infty} dp p^3 v(p) f(x, p)$$

$$P_g(x) = \frac{U^{-\gamma}(x)}{\gamma M_0^2} \quad P_w(x) = \frac{v_A}{4u_0} \frac{1 - U^2(x)}{U^{3/2}(x)}$$



$$\begin{aligned} \tau(p) \frac{\partial^2 g_p}{\partial t^2} + \frac{\partial g_p}{\partial t} + u(x) \frac{\partial g_p}{\partial x} - \frac{1}{3} \frac{\partial u(x)}{\partial x} \left( \frac{\partial g_p}{\partial y} - 4g_p \right) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(x, p) \frac{\partial g_p}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau(p) \frac{\partial^2 g_e}{\partial t^2} + \frac{\partial g_e}{\partial t} + u(x) \frac{\partial g_e}{\partial x} - \frac{1}{3} \frac{\partial u(x)}{\partial x} \left( \frac{\partial g_e}{\partial y} - 4g_e \right) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(x, p) \frac{\partial g_e}{\partial x} \right) + \exp(y) \frac{\partial}{\partial y} [b \exp(-2y) g_e] \end{aligned}$$

$$g_p = p^4 f_p, g_e = p^4 f_e, y = \ln(p)$$

$$b(p) = -dp/dt$$

$$\tau(p) = \Lambda(p)/v$$