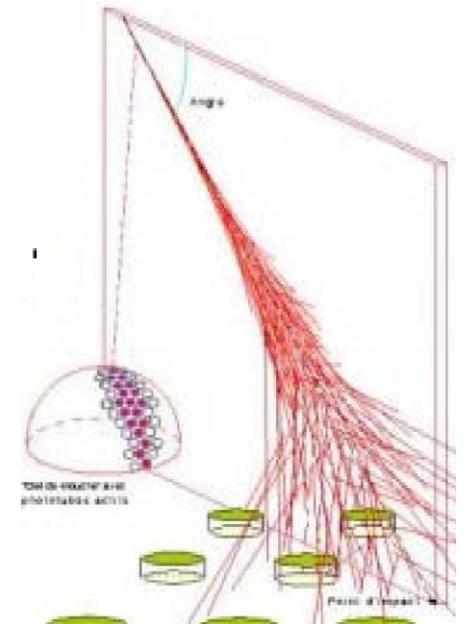
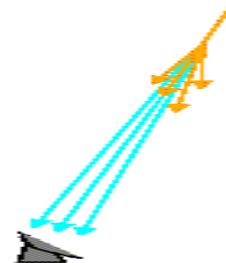
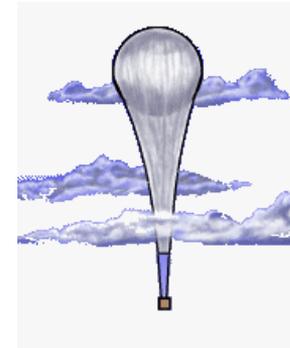
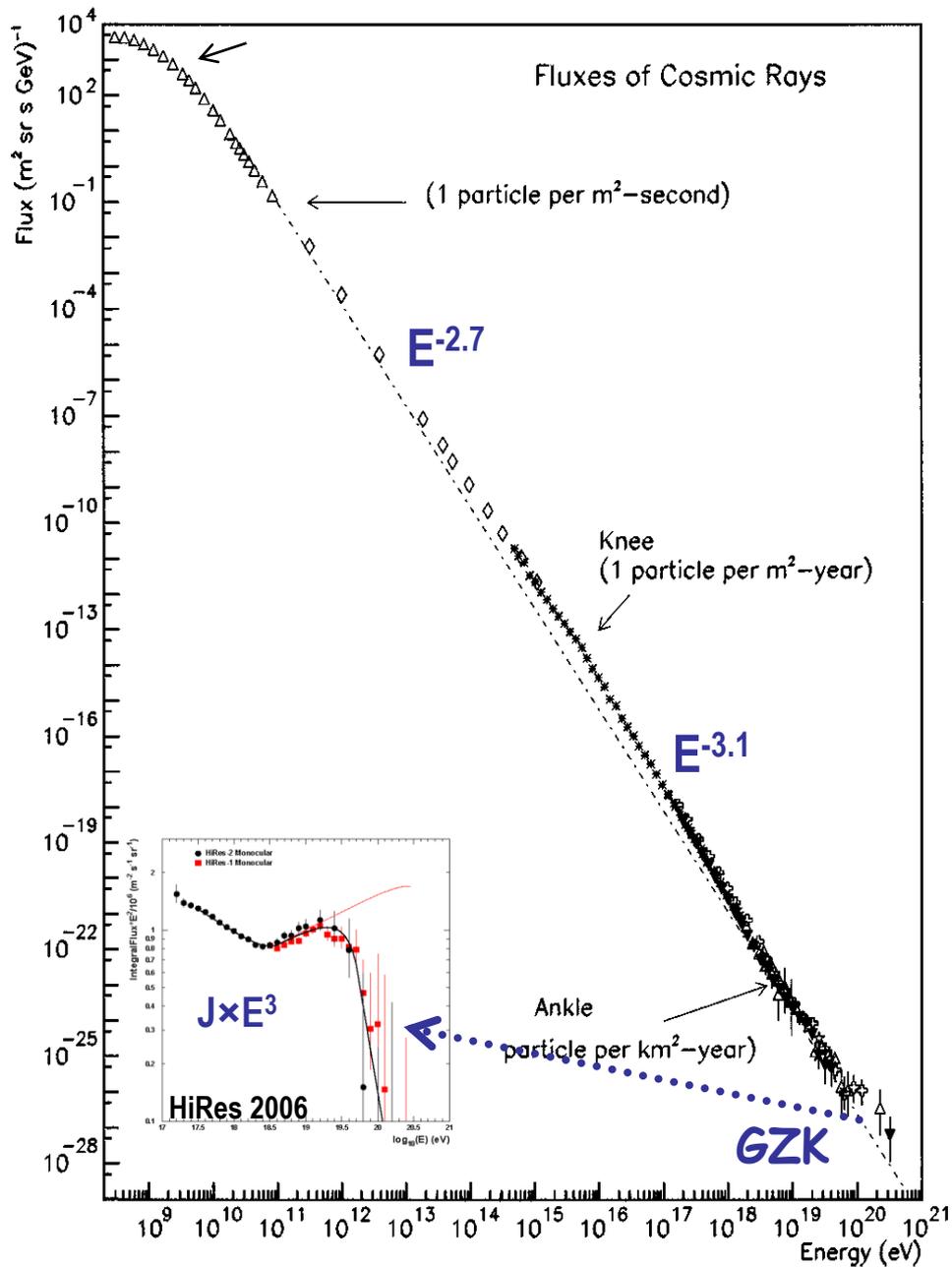


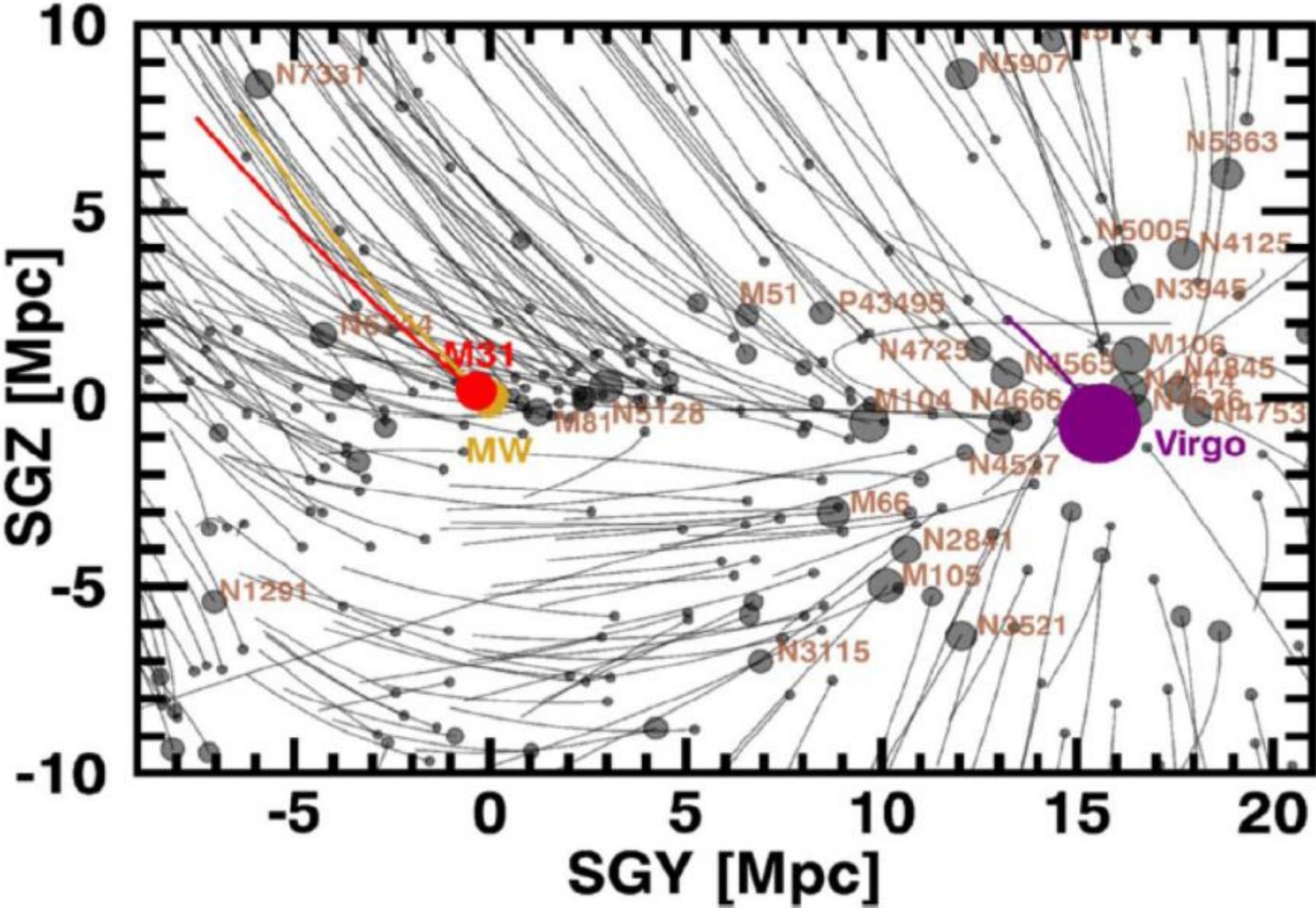
# Ускорение космических лучей при аккреции газа в скоплениях галактик

В.Н.Зиракашвили, В.С.Птускин

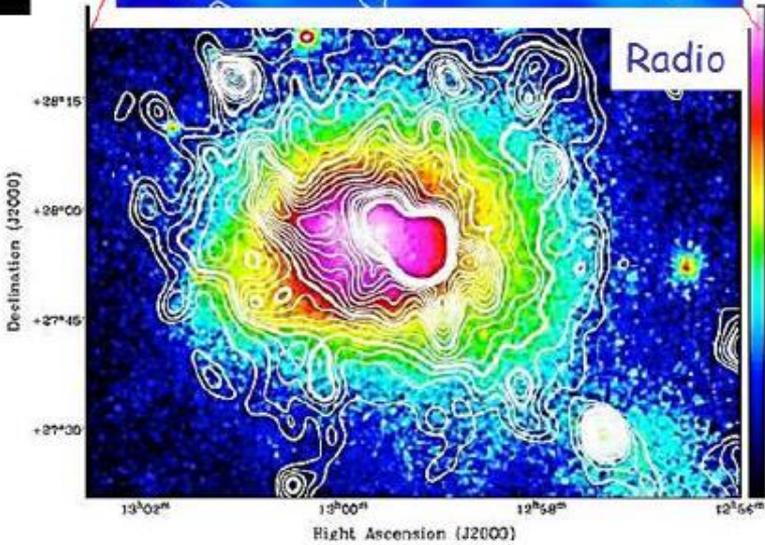
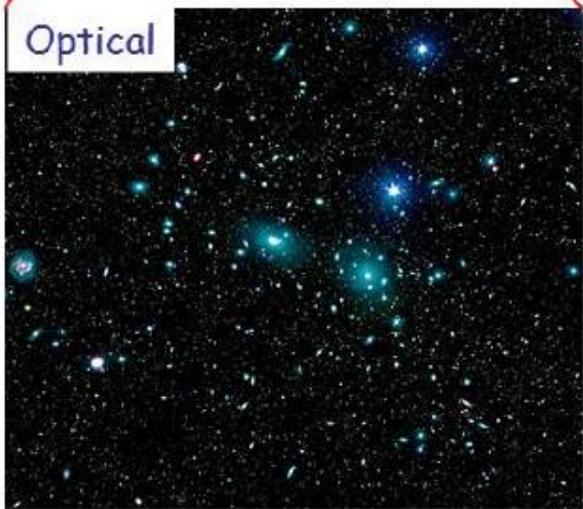
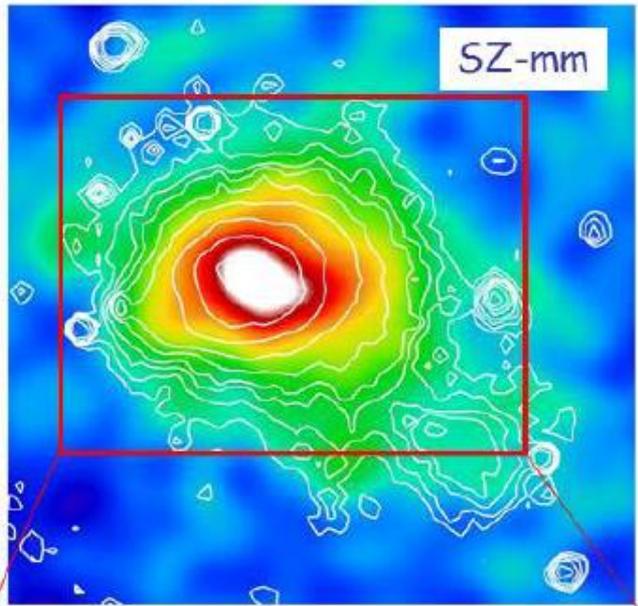
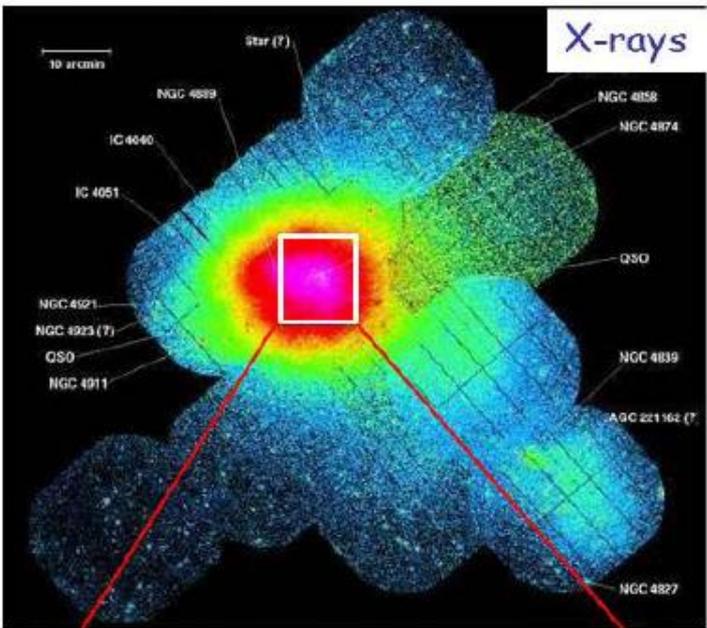
*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,  
108840 Москва Троицк*



# Падение галактик на скопление Дева (Shaya et al. 2017)



Coma cluster

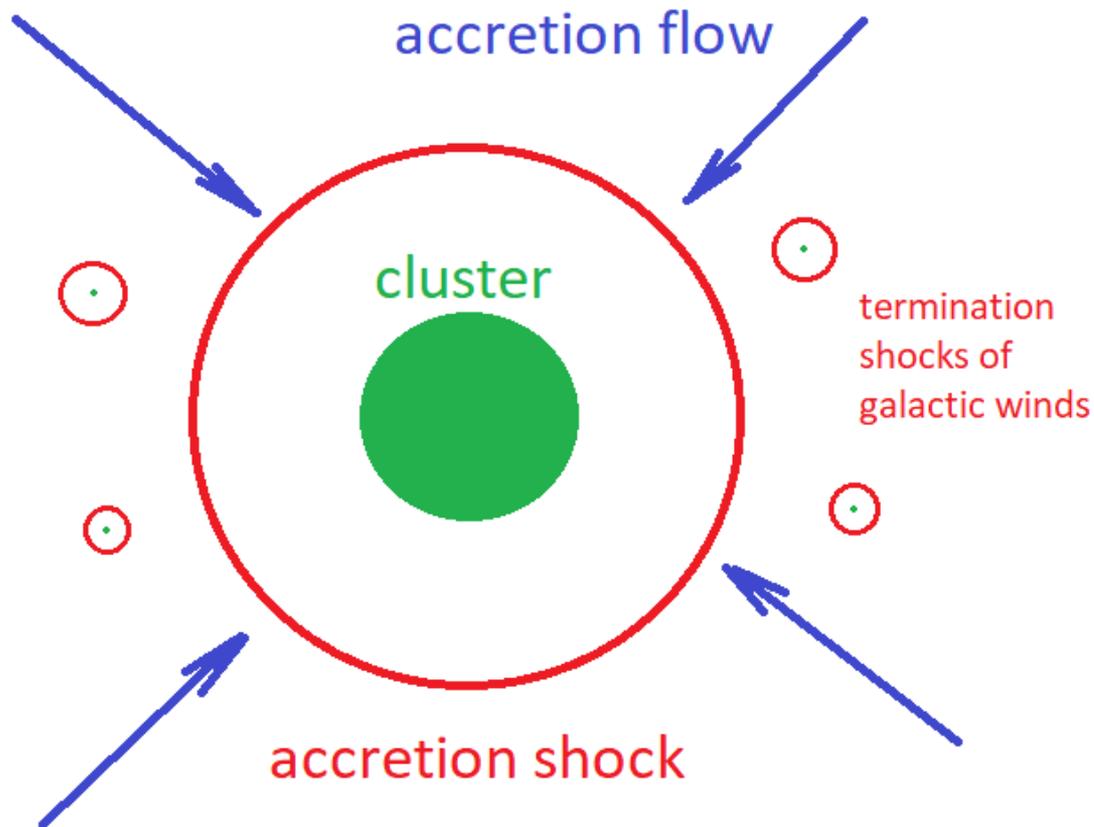


From Brunetti  
and Jones  
2014

# Ускорение частиц в скоплении галактик

Norman et al. 1995

Kang et al. 1996



Диффузионное  
ускорение  
ударными волнами

Krymsky 1977; Bell  
1978; Axford et  
al. 1977; Blandford  
& Ostriker 1978

Численная модель ускорения частиц в скоплении галактик (модификация модели ускорения в остатках сверхновых Zirakashvili & Ptuskin 2012)

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

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

$$\frac{\partial P_g}{\partial t} + u \frac{\partial P_g}{\partial r} + \frac{\gamma_g P_g}{r^2} \frac{\partial r^2 u}{\partial r} = -(\gamma_g - 1) \Lambda(T_e) n^2 \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_m}{\partial t} + u \frac{\partial P_m}{\partial r} + \frac{\gamma_m P_m}{r^2} \frac{\partial r^2 u}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 D(p, r, t) \frac{\partial N}{\partial r} - u \frac{\partial N}{\partial r} + \frac{\partial N}{\partial p} \frac{p}{3r^2} \frac{\partial r^2 u}{\partial r} + \frac{1}{p^2} \frac{\partial}{\partial p} p^2 b(p) N + 4\nu_{ph}(4) N_i(4) + \sum_{A=5}^{56} \nu_{ph}(A) N_i(A) \quad (5)$$

Уравнения  
для  
протонов и  
ядер КЛ

$$\frac{\partial N_i(A)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 D_i(p, r, t) \frac{\partial N_i(A)}{\partial r} - u \frac{\partial N_i(A)}{\partial r} + \frac{\partial N_i(A)}{\partial p} \frac{p}{3r^2} \frac{\partial r^2 u}{\partial r} + \frac{1}{p^2} \frac{\partial}{\partial p} p^2 b(p) N_i(A) - \nu_{ph}(A) N_i(A) + \nu_{ph}(A+1) N_i(A+1) \quad (6)$$

Фотоядерное  
расщепление  
и потери  
энергии  
на  
производство  
пар  
 $e^\pm$

$$\frac{\partial F}{\partial t} = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 w F - g(r) \frac{\partial F}{\partial w} \quad (7)$$

Уравнение  
для темной  
материи

$$g(r) = \Lambda r - \frac{4\pi G}{r^2} \int_0^r r_1^2 dr_1 (\rho(r_1) + \rho_{DM}(r_1)) \quad (8)$$

Гравитаци-  
онное  
ускорение

# Ускорение в скоплении галактик Дева

$$(M_{\text{tot}} \sim 10^{15} M_{\text{S}}, d=20 \text{ Мпк})$$

Космологические параметры:  $\rho_{\Lambda}=0.7$ ,  $\rho_m=0.3$ ,  $H=70 \text{ км/с/Мпк}$

Магнитное поле  $B_{\text{IG}}=2 \cdot 10^{-8} \text{ G}$

Горячий газ  $T_{\text{IG}}=10^6 \text{ K}$

Свойства среды определяются галактическим ветром  
индивидуальных галактик в прошлом  
(Völk et al. 1996, Völk and Atoyan 1999, 2000)

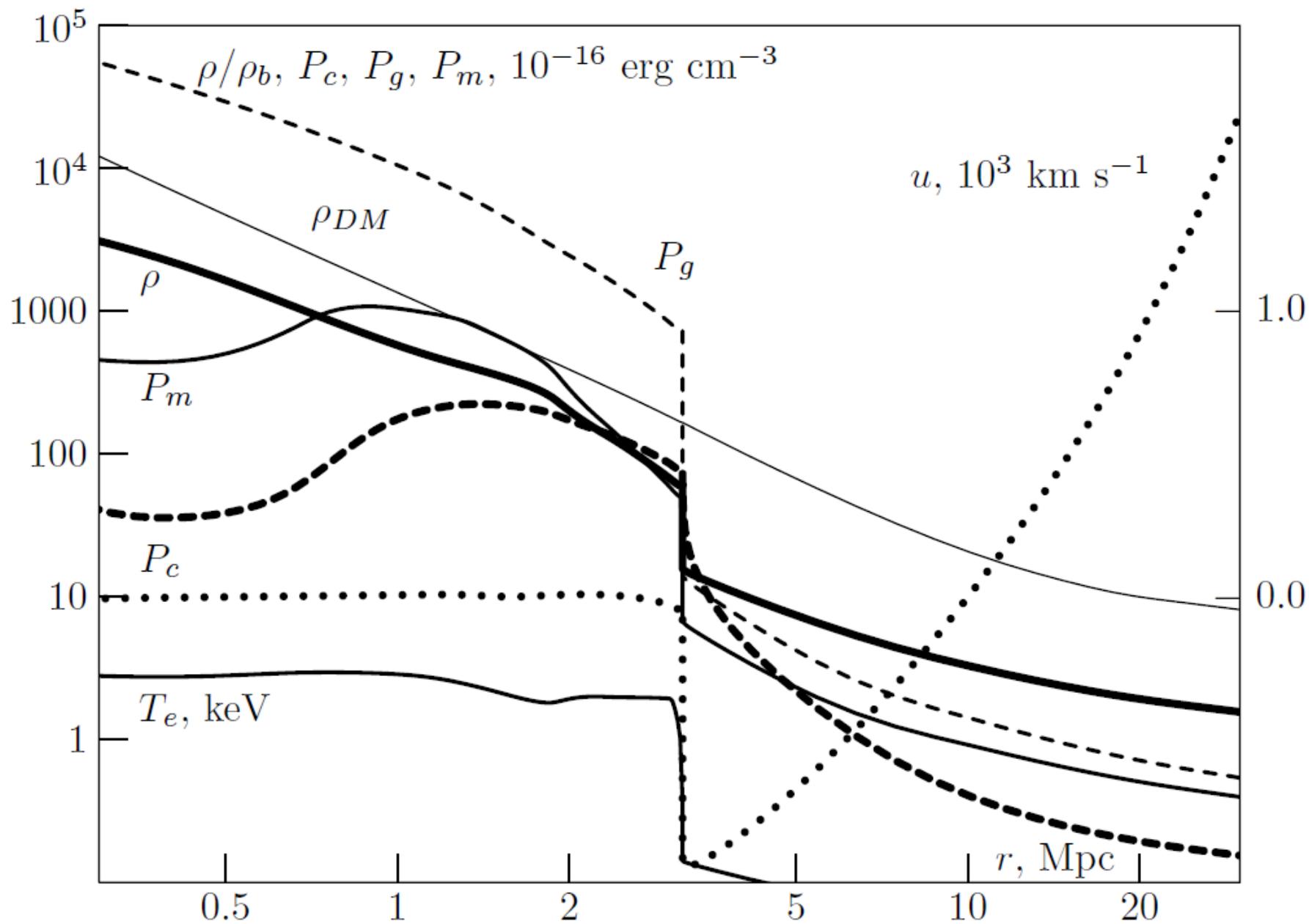
Доускорение КЛ, произведенных галактиками

$N_{\text{IG}} \sim E^{-1.8} \exp(-E/E_{\text{IG}})$ ,  $E_{\text{IG}} = 8 Z \text{ ПэВ}$ , для ядер  
обогащение проп. А как в Галактических КЛ

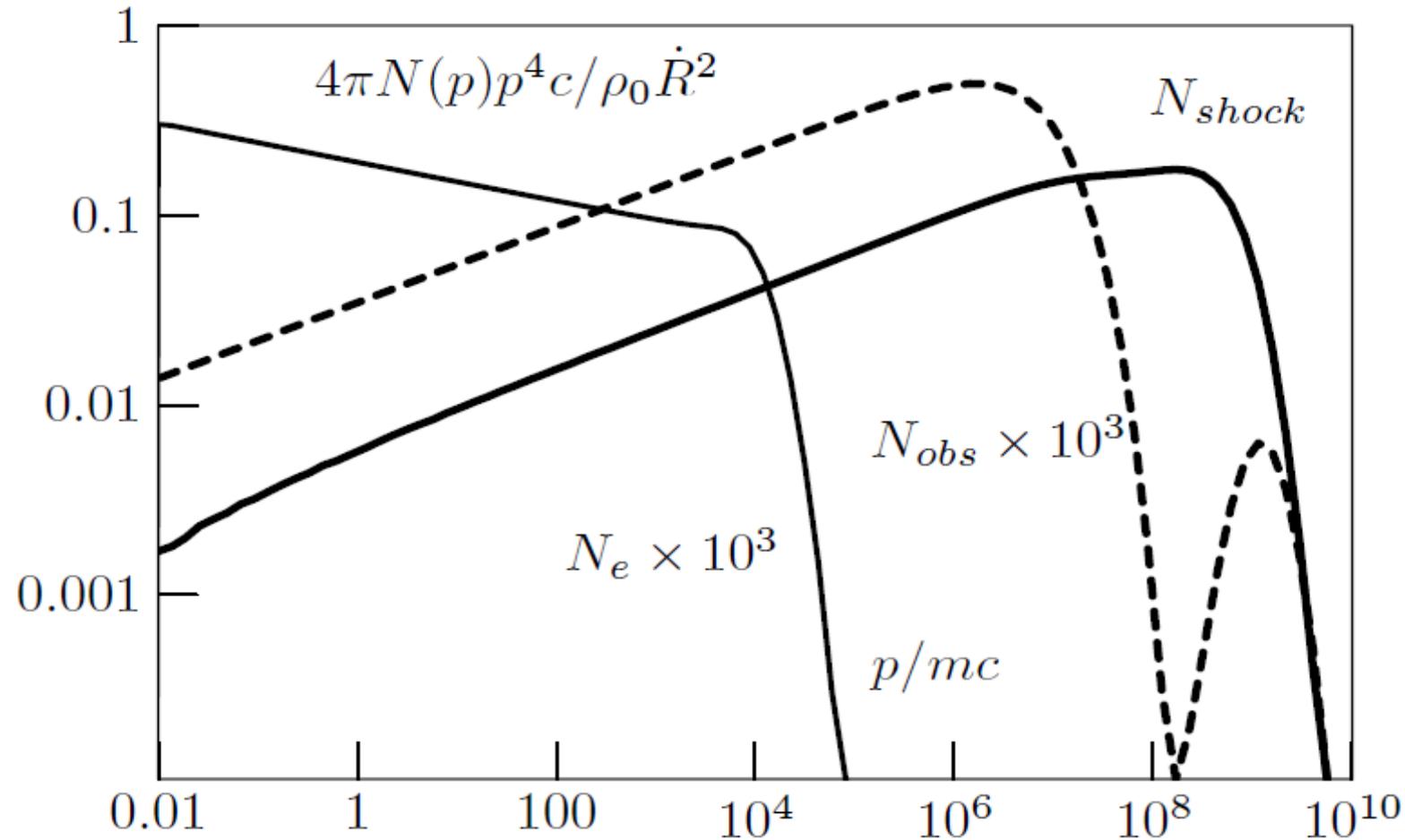
$D(E)=2D_{\text{B}}(E)$  Бомовская диффузия

$T_0=4 \text{ Gyr}$

# Численные результаты $T=13.5$ Gyr

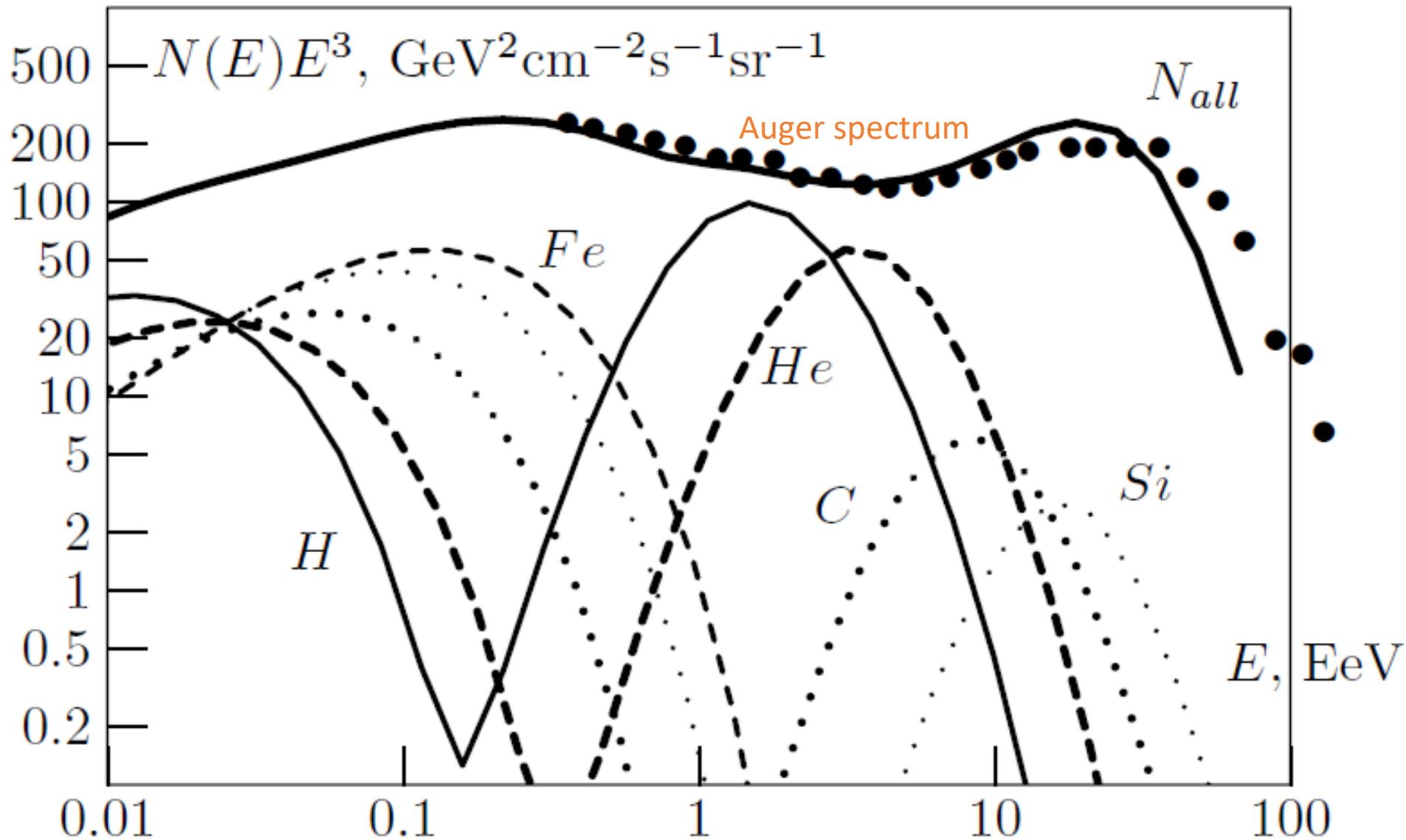


# Спектры ускоренных частиц

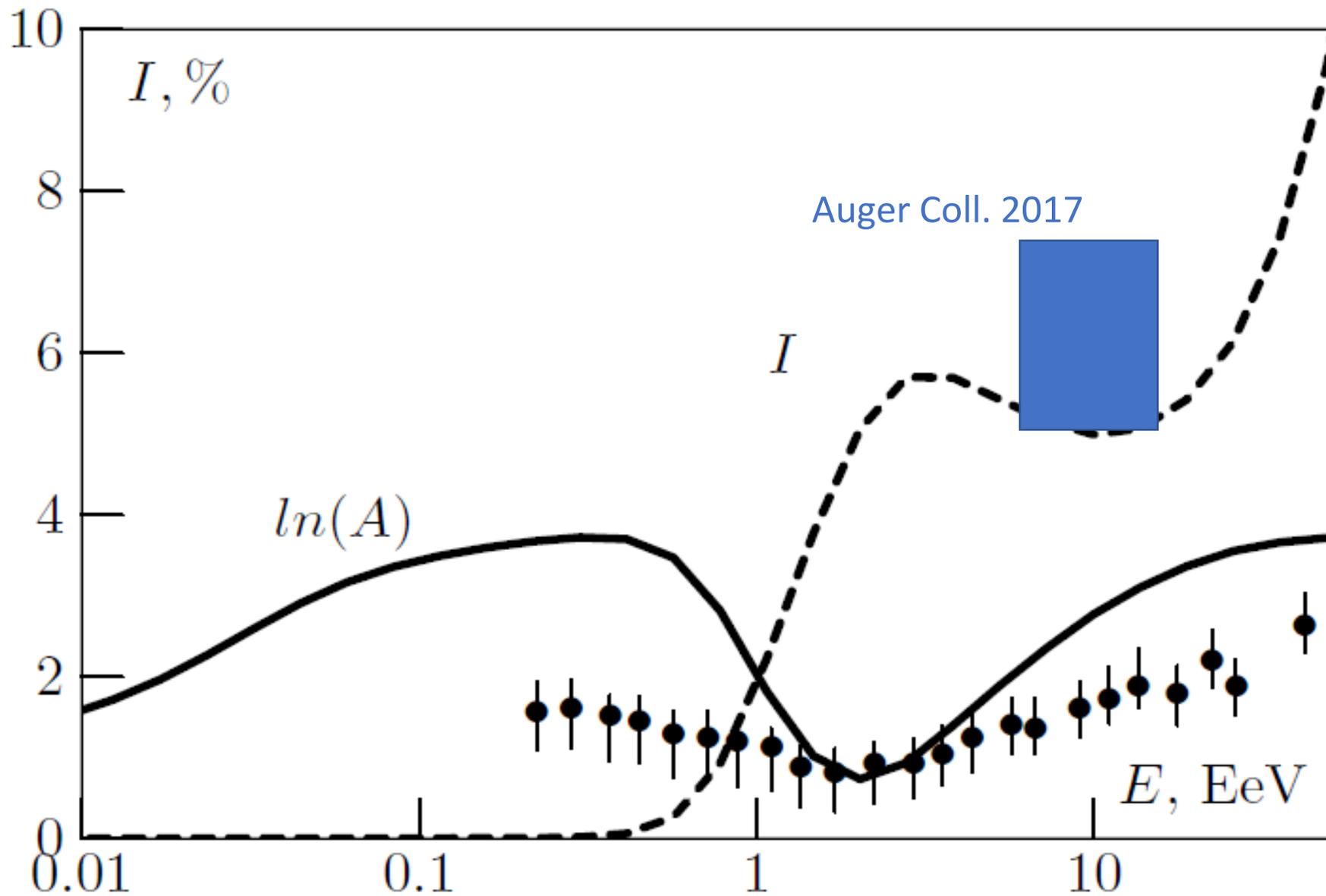


Только **экспоненциально малая** часть ( $10^{-4}$ ) частиц с самыми высокими энергиями достигает Земли — **Необычный** режим распространения, (см. Kang et al.1996)

# Спектр всех частиц

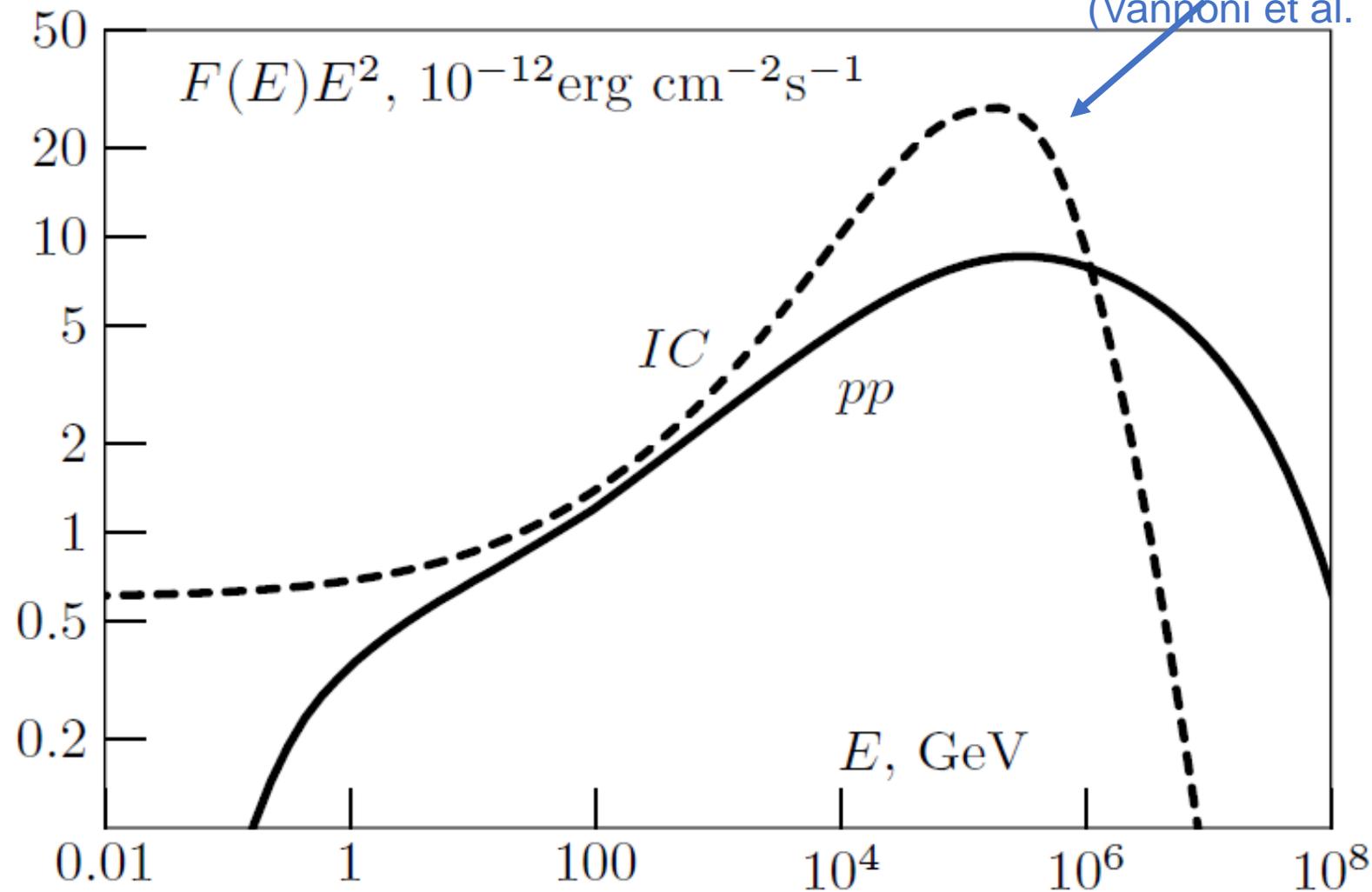


# Средний логарифм $A$ и анизотропия



# Спектры гамма излучения (без поглощения)

$e^\pm$  от p-гамма  
взаимодействия протонов с  
 $E > 10^{18}$  эВ – очень  
эффективный процесс в  
скоплениях галактик  
(Vannoni et al. 2011)



# Выводы

- Основная часть КЛ сверхвысоких энергий  $E > 10^{18}$  эВ может быть ускорена в ближайшем крупном скоплении Дева.
- Доускорение космических лучей со спектром  $E^{-1.8}$  в окрестности скопления галактик Дева может обеспечить непрерывность наблюдаемого спектра. Максимальная энергия этих КЛ около  $8 Z$  ПэВ почти однозначно фиксирована данными наблюдений.
- Необходима тонкая подстройка параметров модели .