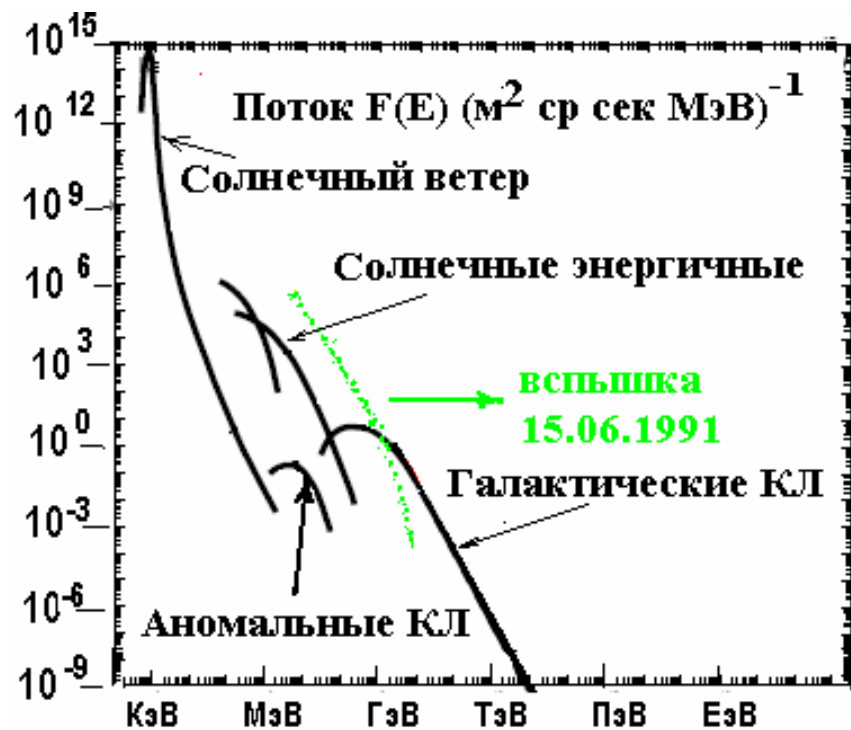


Широкие атмосферные ливни космических лучей

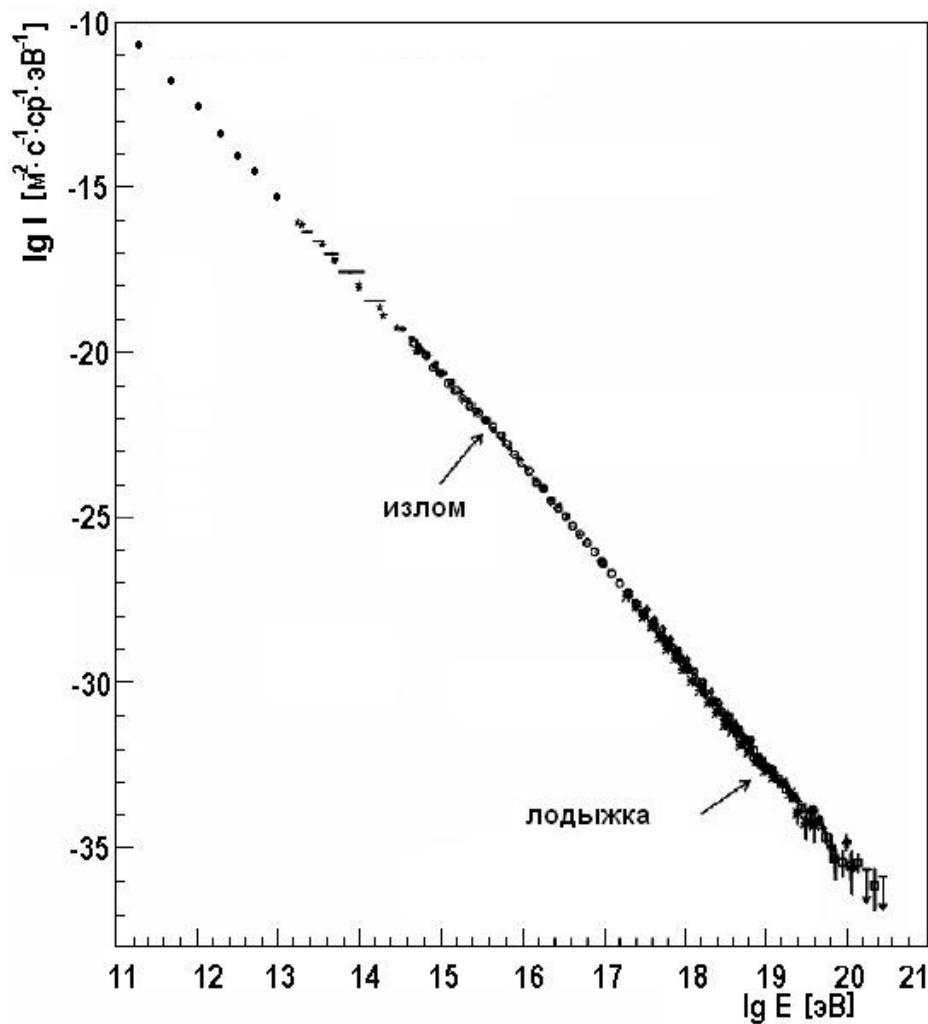
Н.Н. Калмыков (НИИЯФ МГУ)

17-апреля 2007 г.



ГКЛ начинают доминировать примерно с энергии 1 ГэВ.

При энергии более 10 ГэВ модуляция отсутствует



Поток частиц с энергией выше энергии излома ($3 \cdot 10^{15} \text{эВ}$) составляет $\sim 10 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$.

Показатель спектра γ меняется с -2.7 на 3.1.

Поток частиц с энергией выше 10^{19}эВ составляет $\sim 1 \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$.

КАК ИЗУЧАЮТ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

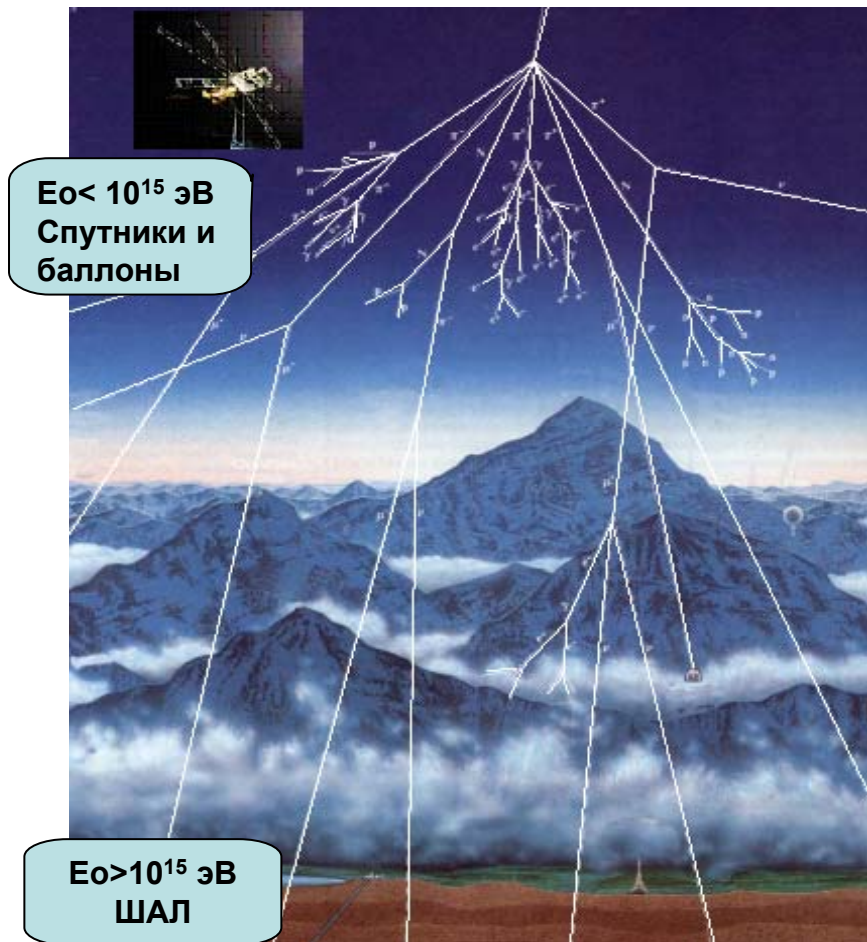
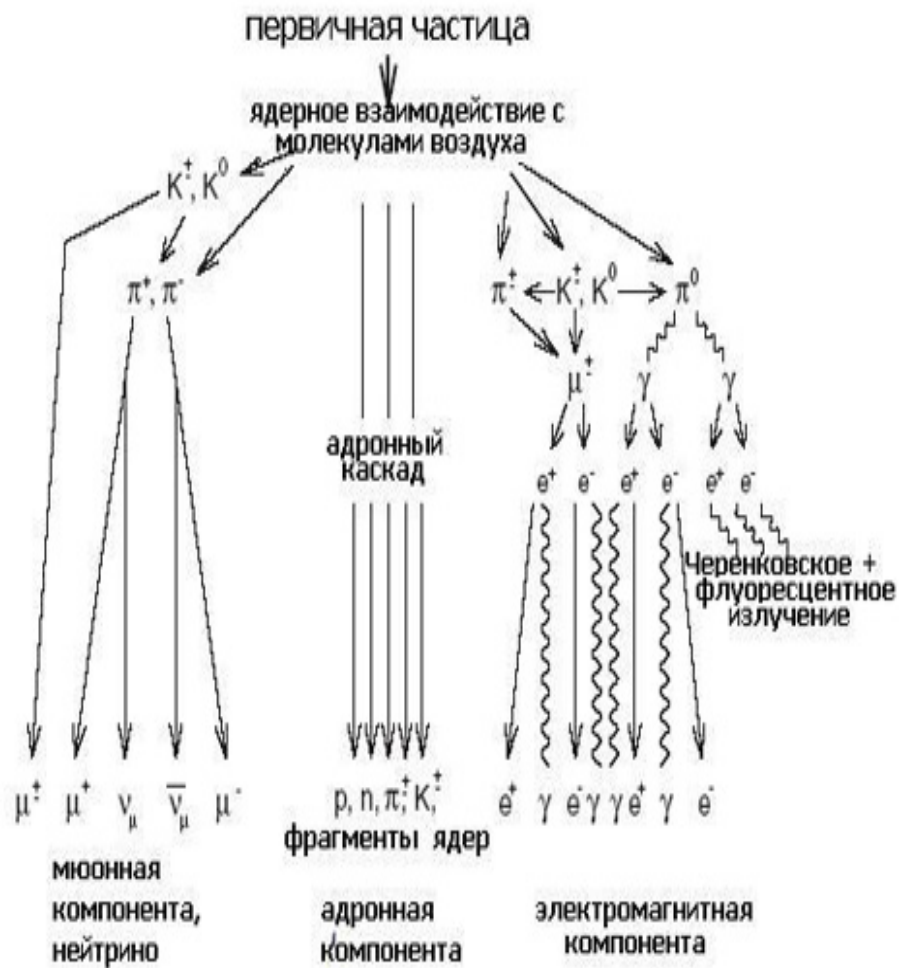
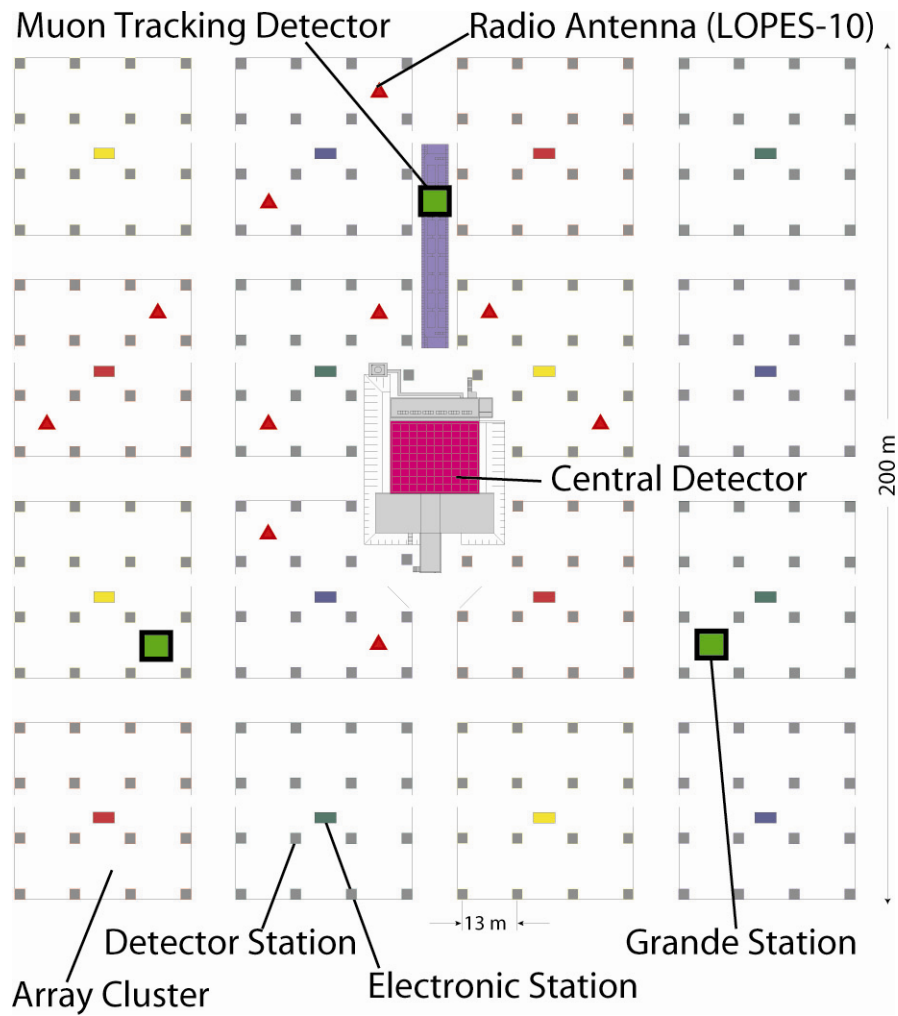
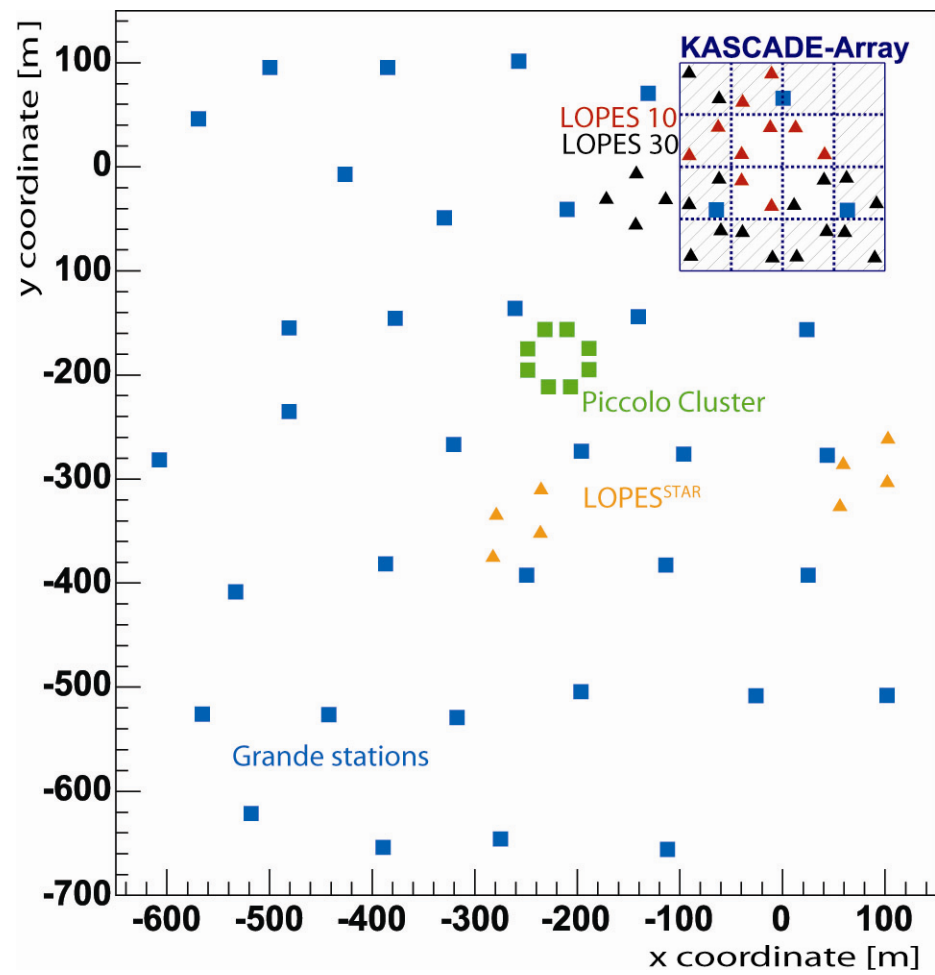
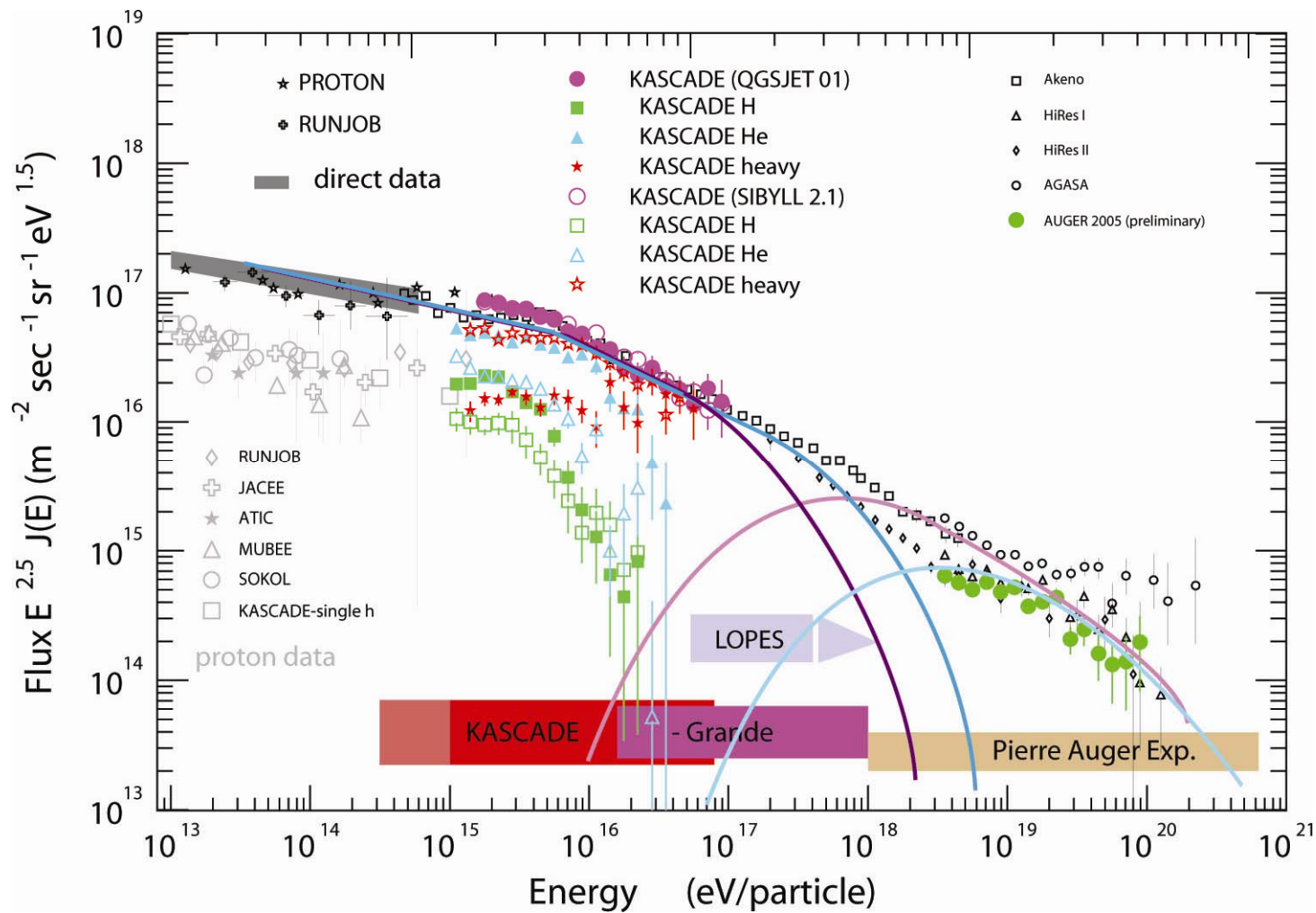


Схема развития широкого атмосферного
ливня (ШАЛ) от КЛ





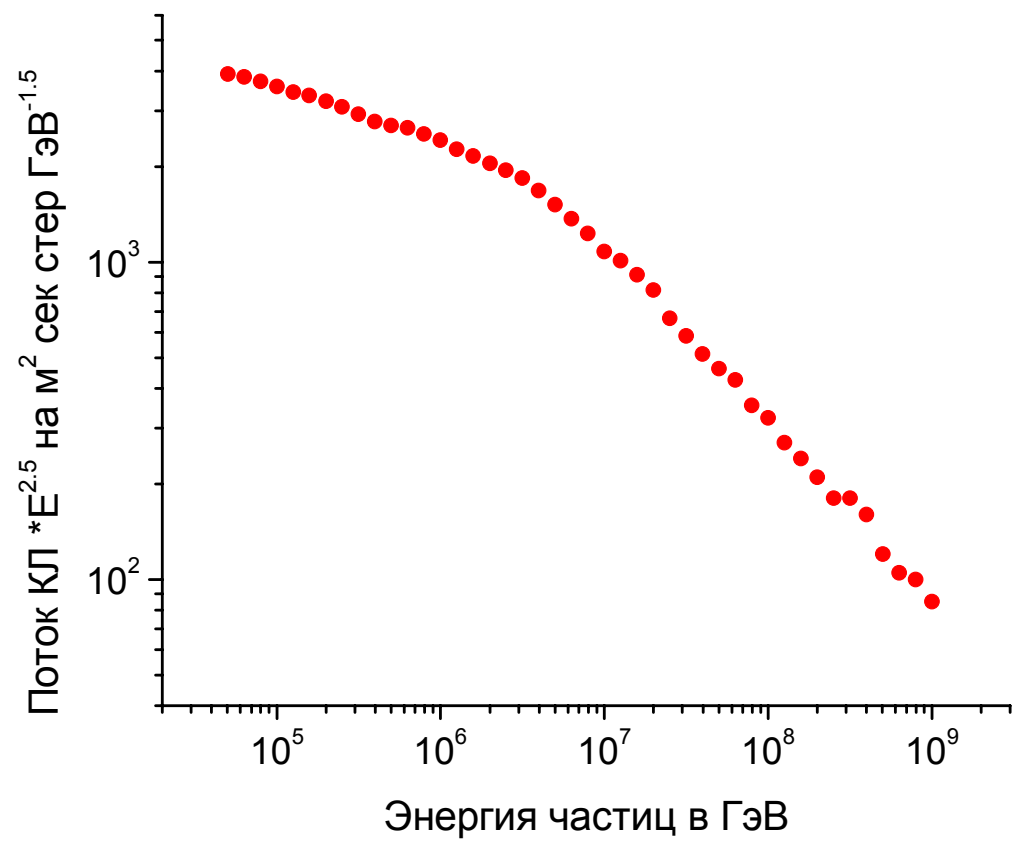




- Метод деконволюции применяется для решения интегрального уравнения Фредгольма 1 рода, которое может быть записано следующим образом:

$$F(N_{e(\mu)}) = \sum_i \int I_i(E) W(E|N_{e(\mu)}) dE,$$

- где $F(N_{e(\mu)})$ – экспериментально измеренный установкой спектр электронов (или мюонов), $I_i(E)$ – энергетический спектр первичных частиц, относящихся к группе i (протоны, ядра гелия, ядра группы **CNO** и т. д. вплоть до ядер железа), – вероятность того, что первичная частица с энергией E и массовым числом, соответствующим группе ядер i создаст ливень с требуемым числом электронов или мюонов.





Излом – следствие распространения КЛ в Галактике или процессов в источниках.

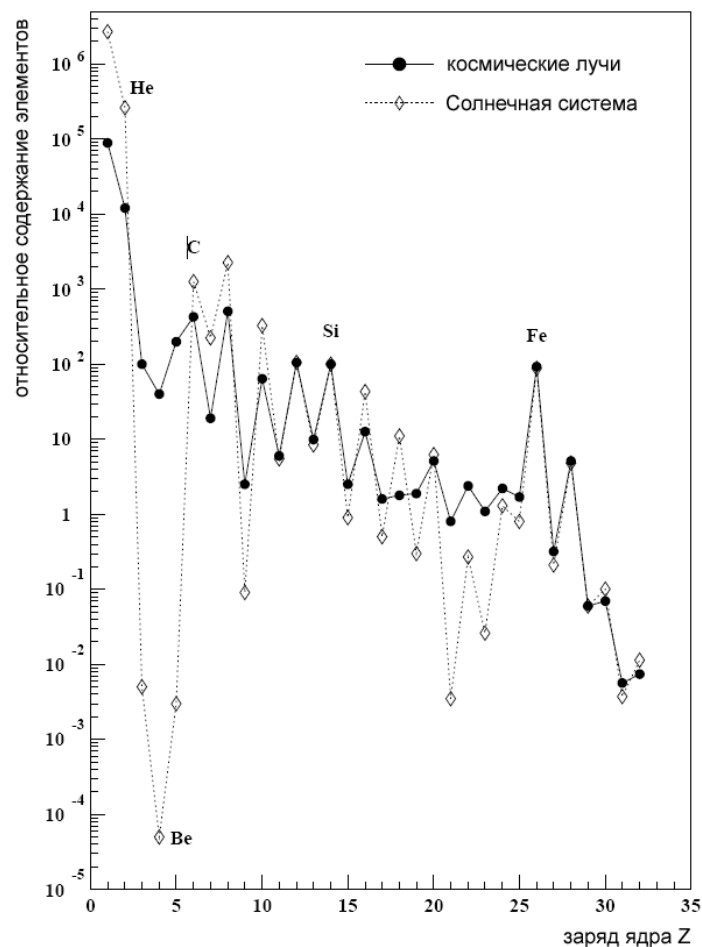
Необходимость диффузии КЛ

Соотношение потоков легких и средних ядер
(различия 10^6 раз: КЛ - звезды)

легкие ядра образуются в процессе распространения

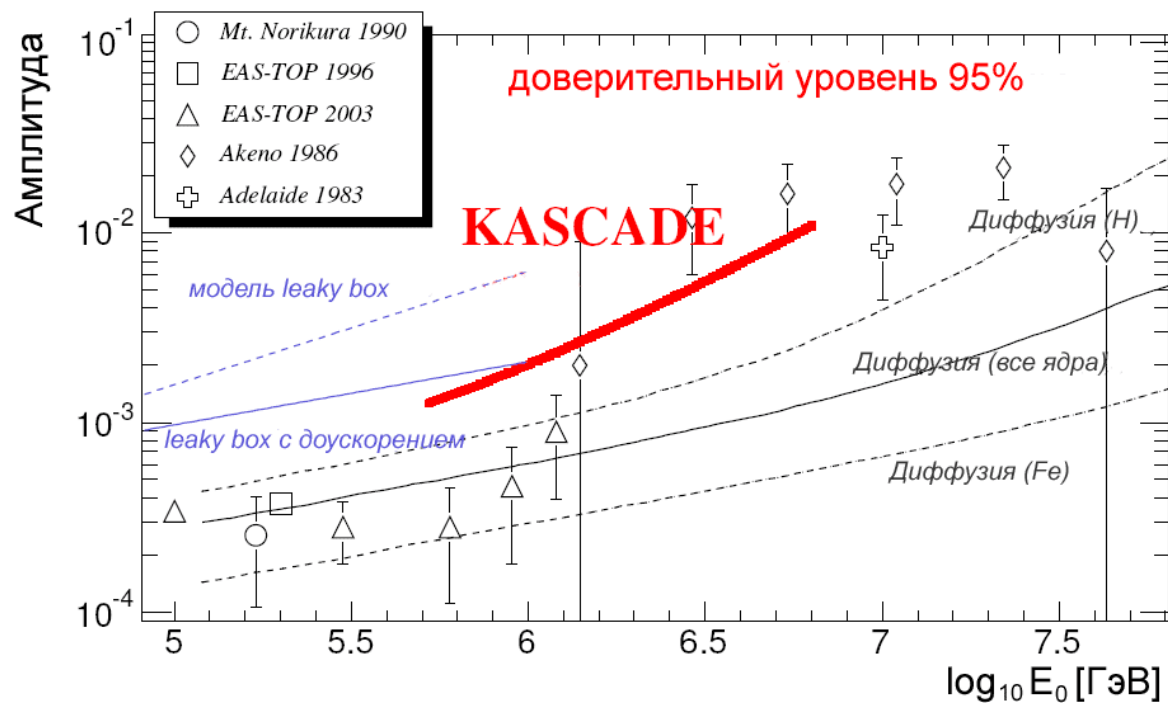
Должны проходить: $X_g \approx 10 \text{ г/см}^2$

Путь от центра Галактики до Солнца по прямой: $X_{\text{ог}} = 8 \text{ кпк} \cdot 1 \text{ протон/см}^3 \approx 0,04 \text{ г/см}^2$



Указания на диффузию КЛ

- Малая анизотропия потока КЛ



Диффузионная модель

Уравнение диффузии:

$$-\nabla_i D_{ij}(r) \nabla_j N(r) = Q(r)$$

простейший случай: $D(E, r) = D(E)$, $Q(E, r) = Q(E) \delta(\vec{r})$

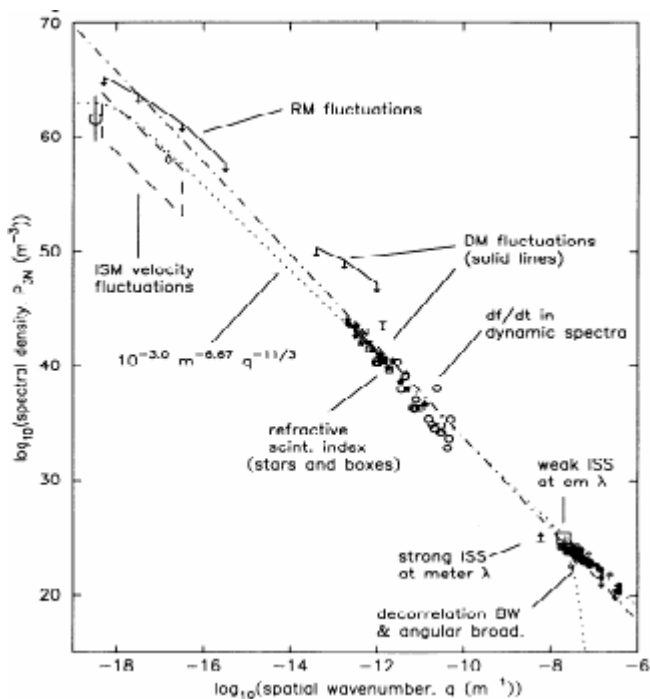
Решение уравнения диффузии:

$$N(E, r) = \frac{Q(E)}{4\pi D(E)} \cdot (1 - r/R_{\text{гал}})$$

$$Q(E) \sim E^{-\gamma_s} \quad D(E) \sim E^{\gamma_D} \quad \Rightarrow \quad N(E, r) \sim E^{-(\gamma_s + \gamma_D)}$$

Изменение в парциальных спектрах КЛ при E_κ : $\Delta\gamma = 1 - m$

$m=0,2 \Rightarrow$ парциальные спектры $\Delta\gamma = 0,8$
спектр всех частиц $\Delta\gamma \cong 0,4$



Спектр Колмогорова был предложен (А.В.Колмогоров, 1941) для описания спектра турбулентностей по размерам, возникающих в турбулентном потоке. Из очень простых посылок, что самая большая энергия сосредоточена в самой большой структуре, а затем она трансформируется во все более мелкие структуры, так, что сохраняется динамическое равновесие, и, используя простые соотношения между размером структуры, скоростью и переданной энергией, Колмогоров получил спектр плотностей энергии, содержащейся в волне с волновым числом q :

$$P(q) \sim q^{-5/3} \quad (q \sim 1/\lambda)$$

$$m = 1/3$$

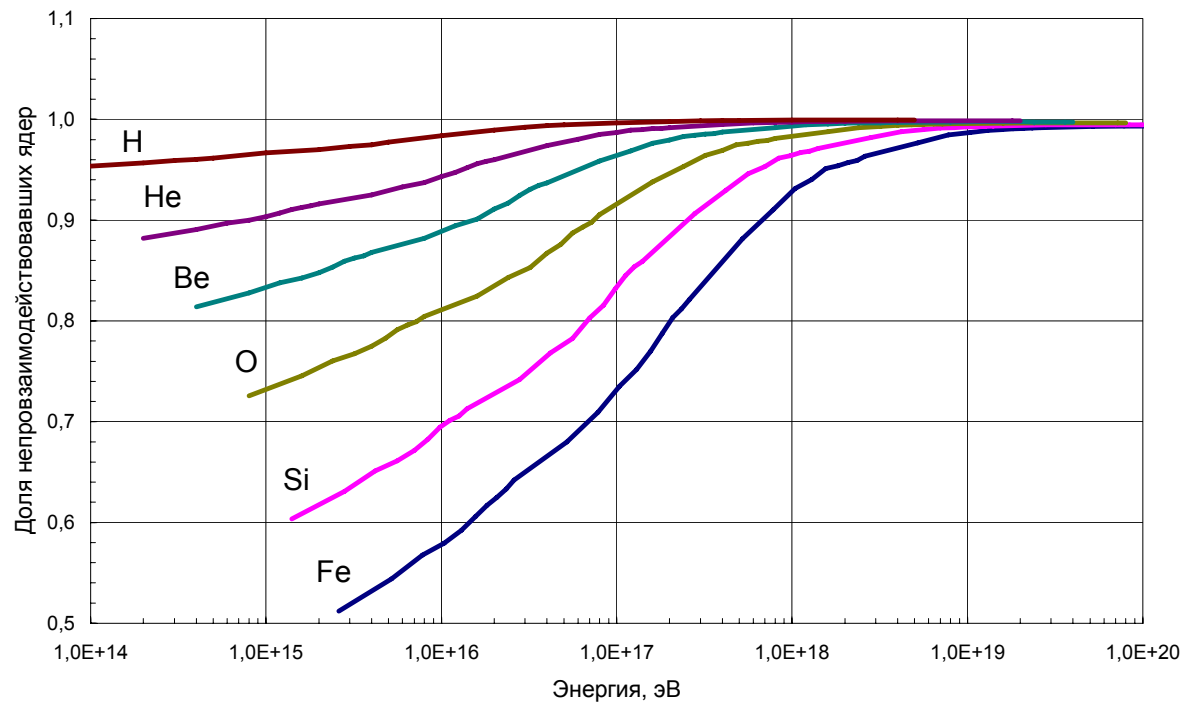
(Armstrong, Rickett & Spangler 1995)

$P(q)$ - плотность энергии волны, содержащаяся в волне с волновым числом q .

Убыль ядер КЛ вследствие взаимодействия

$X(E, Z) = X\left(\frac{E}{Z}\right)$ - расчетные зависимости

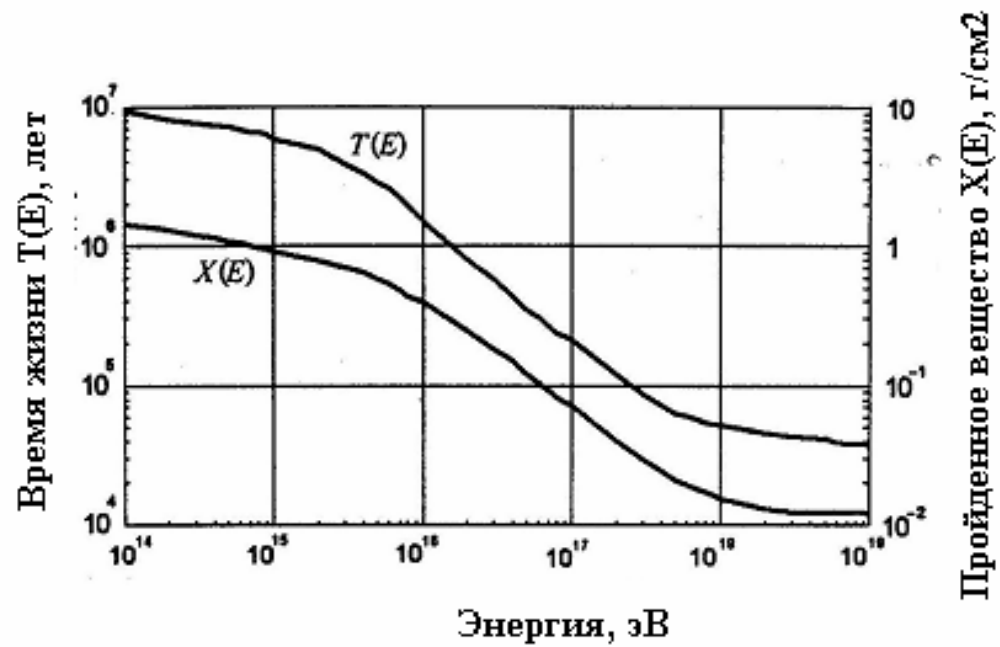
$\sigma(E)$ - модель QGSJET

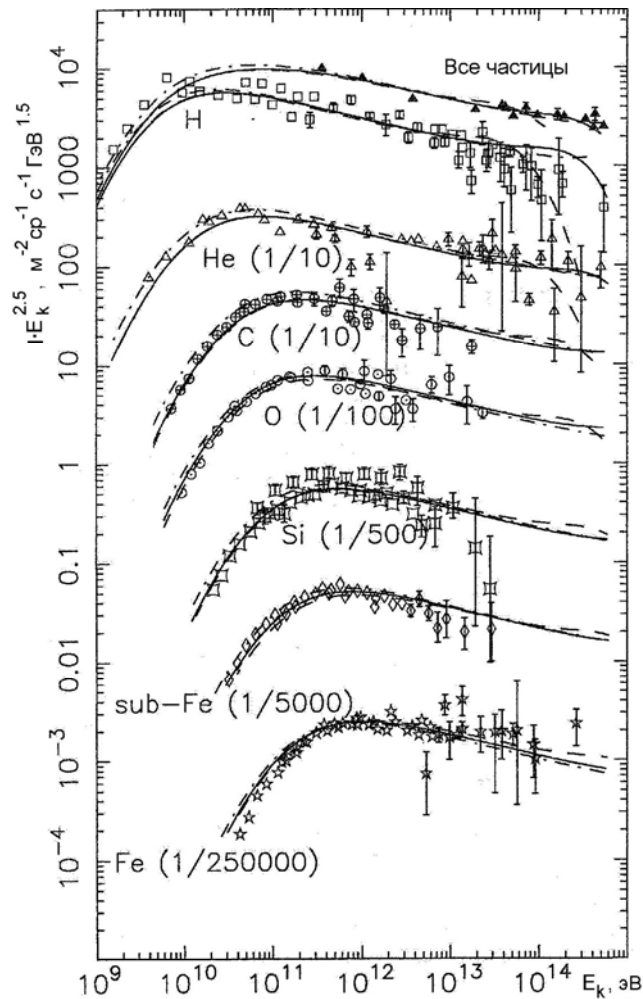


парциальные спектры
ядер КЛ становятся
жестче

Для Fe:

$$\Delta\gamma = 0.10 \div 0.15$$





Источники КЛ – взрывы сверхновых $\Delta E/E = \xi$ (на каждый оборот вокруг фронта)

Время ускорения несколько тысяч лет.

Энергетический спектр ($E < E_{max}$) $\sim E^{-2}$

Для согласования со спектром у Земли требуется чтобы $D(E) \sim E^{0.7}$.

В работе (Бережко и Ксенофонов, 1999) приводится следующая оценка для максимально достижимой энергии

$$E_{\max} [\text{эВ}] = 5 \cdot 10^{14} Z \left(\frac{E_{SN}}{10^{51} \text{ эрг}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{ej}}{1.4 M_0} \right)^{-1/6} \left(\frac{N_H}{3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}} \right)^{1/3} \frac{B_0}{3 \text{ мкГс}},$$

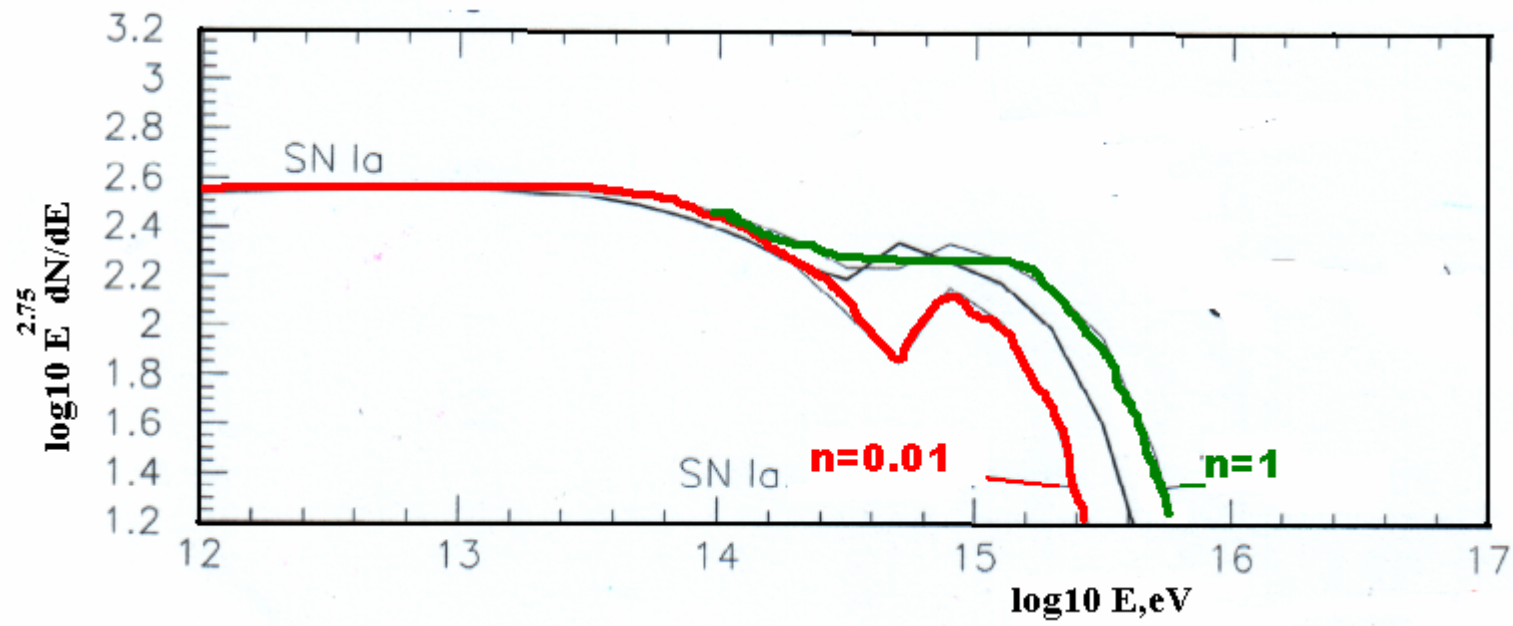
где Z – заряд ускоряемой частицы,

E_{SN} – энергия вспышки,

M_{ej} – масса сброшенной оболочки,

N_H – концентрация водорода,

B_0 – напряжённость магнитного поля.

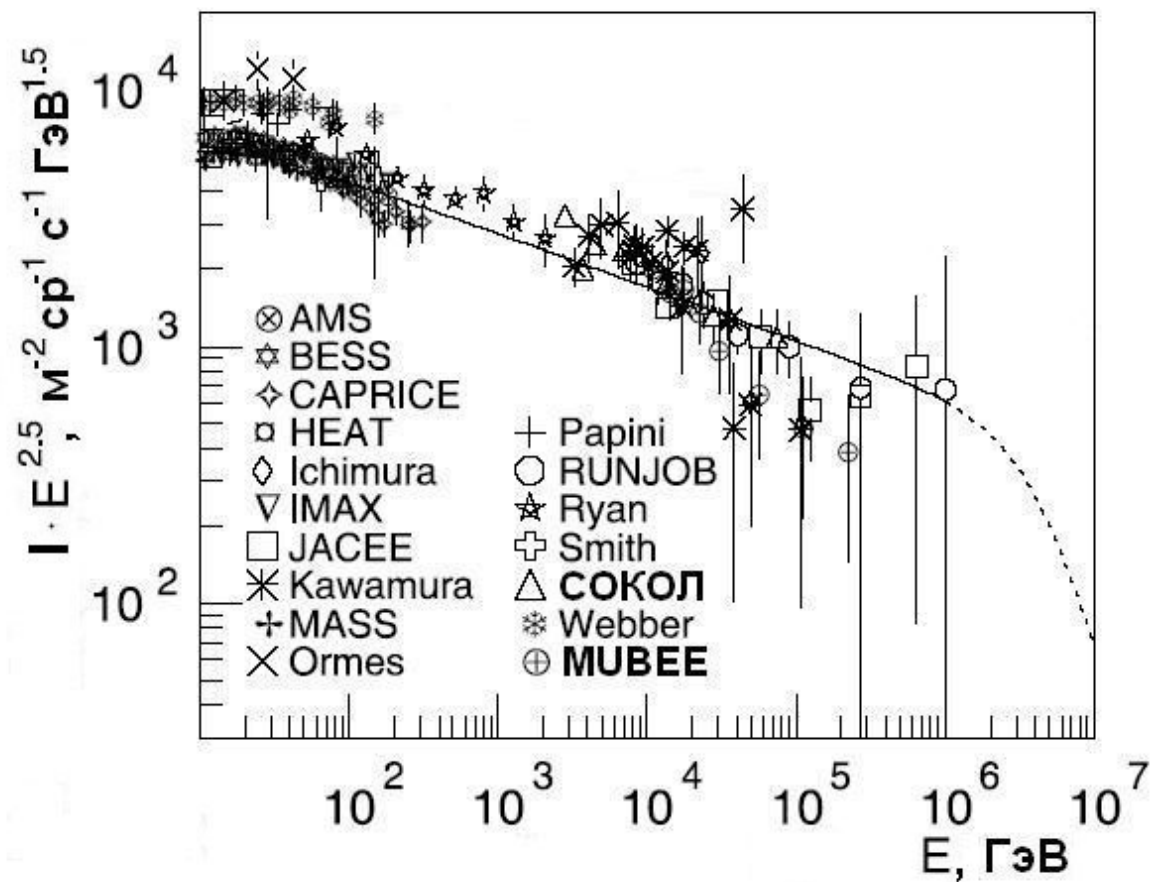


Модель *Poly-gonato*:

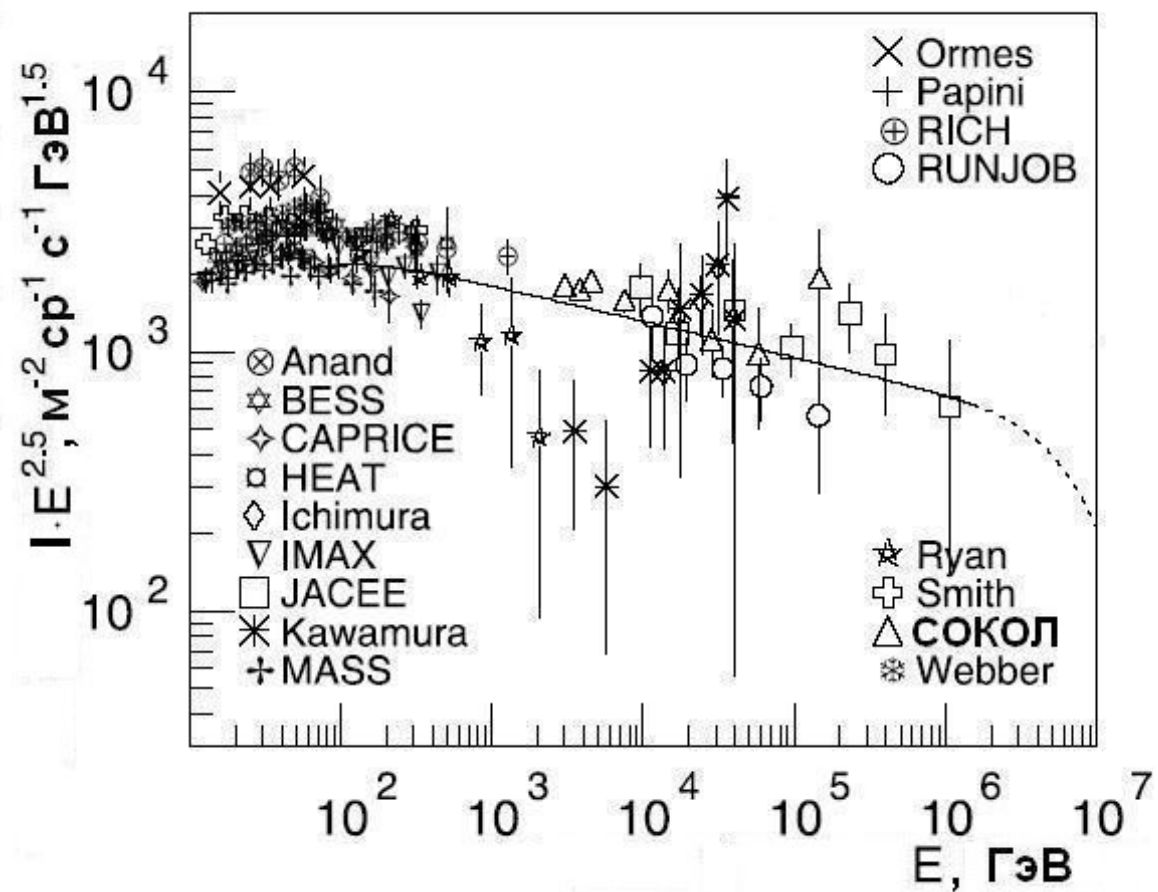
$$I_Z(E) = I_0(Z) E^{-\gamma_Z} \cdot \left(1 + \left(\frac{E}{E_{cr}(Z)} \right)^\zeta \right)^{-\frac{\Delta\gamma}{\zeta}}$$

Z – заряд ядра, γ_Z – показатель спектра до излома
 $E_{cr}(Z) = Z \cdot E_{cr}(Z=1)$ – энергия, соответствующая излому

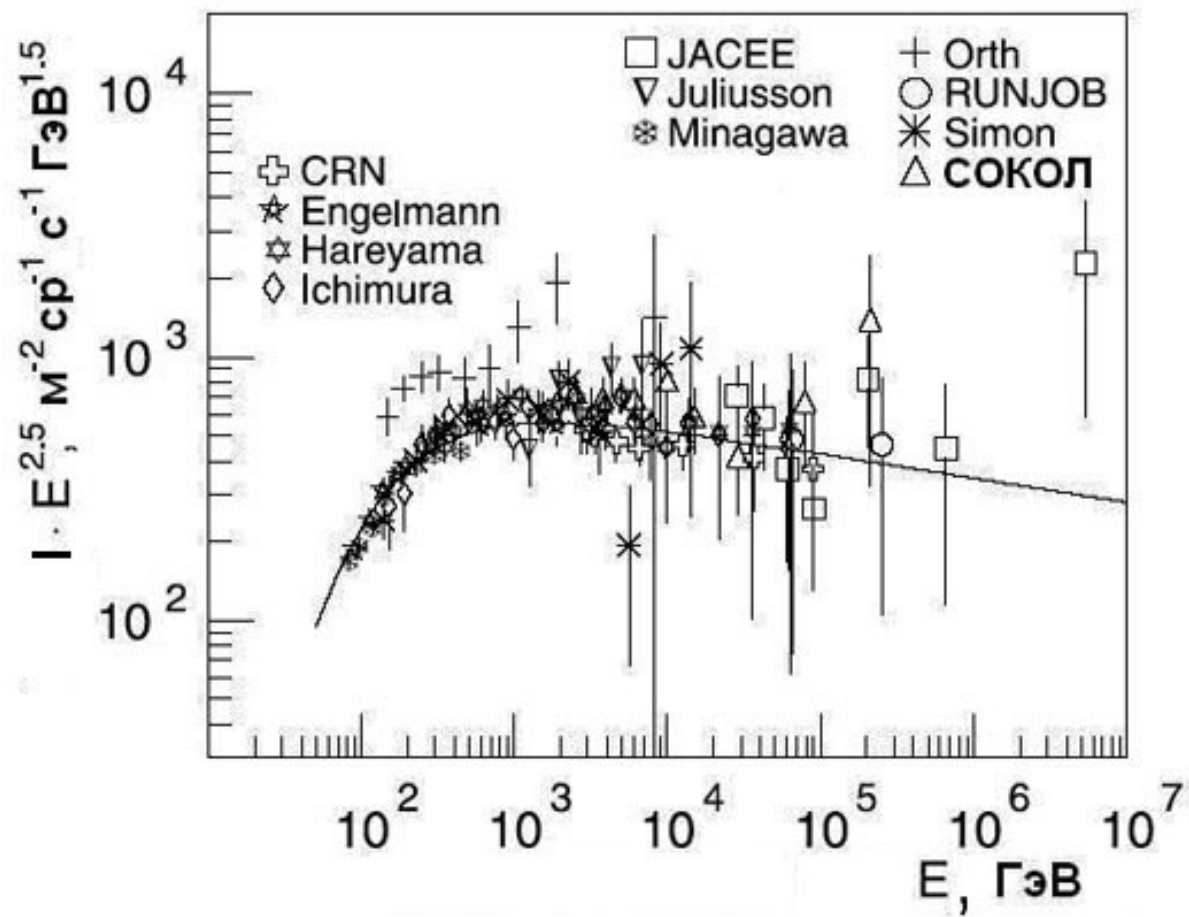
$$\zeta \approx 2, \quad \Delta\gamma = 2,1$$



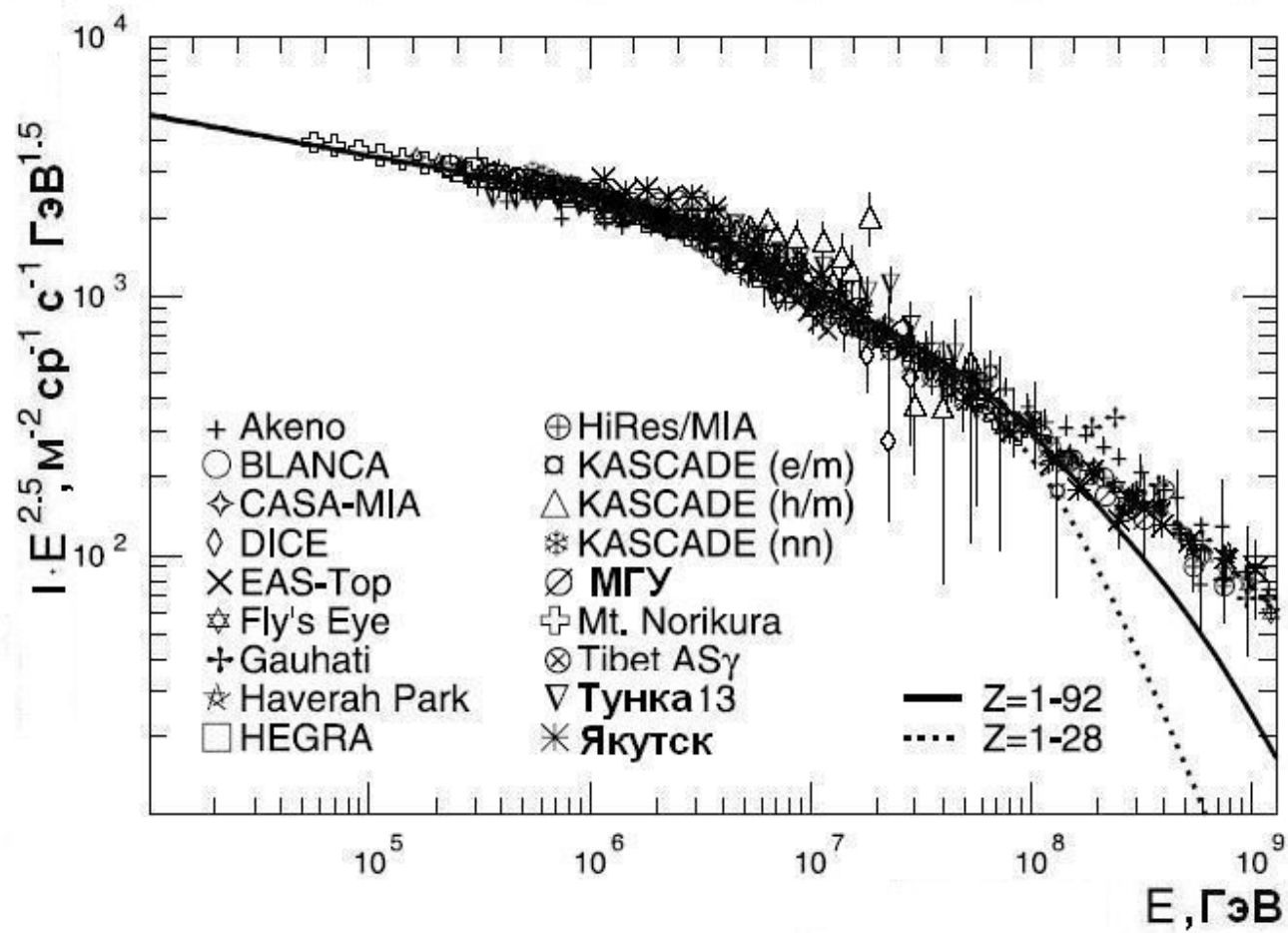
Спектр протонов



Спектр гелия

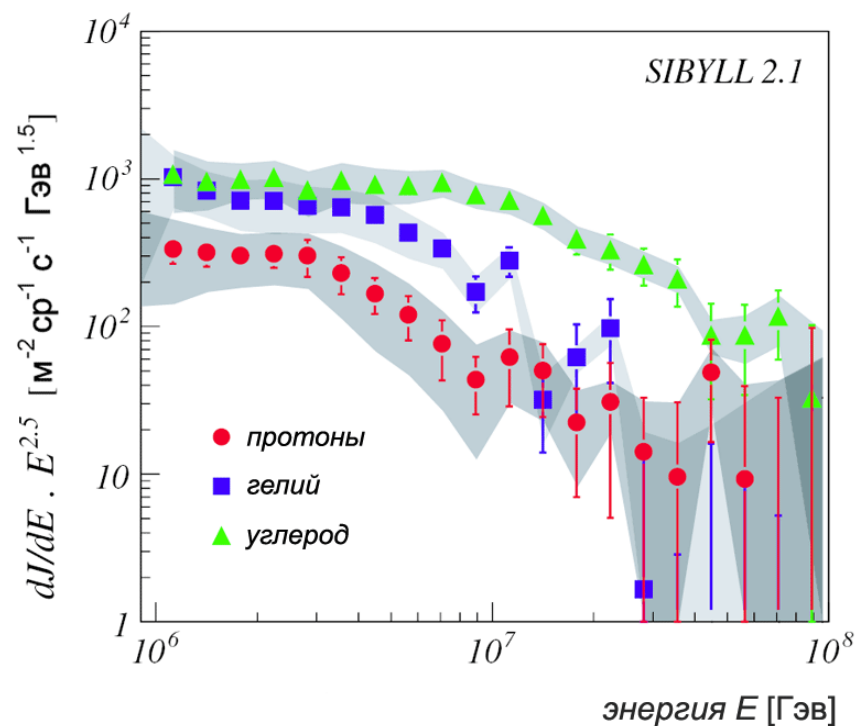
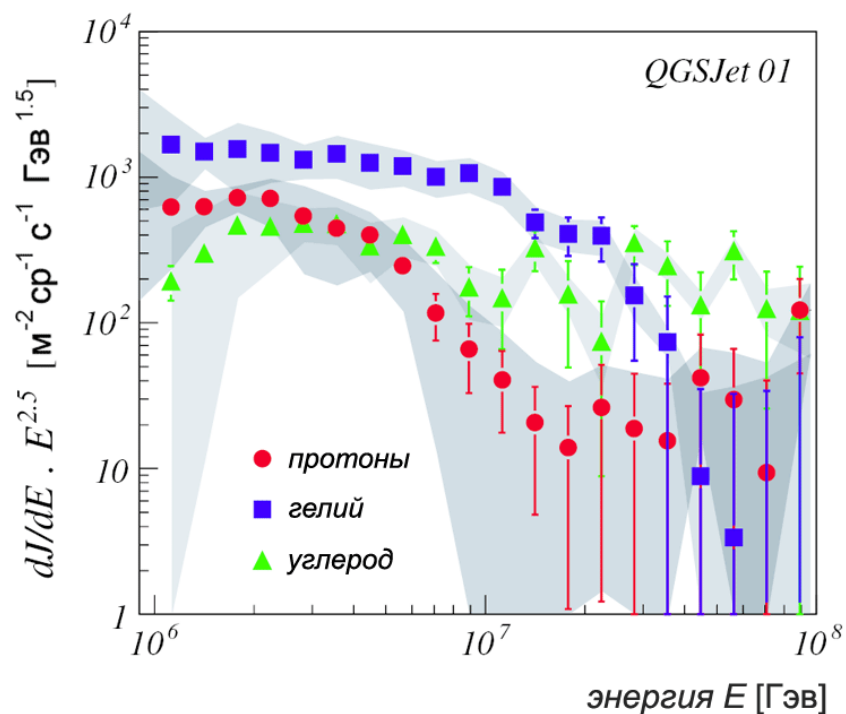


Спектр железа

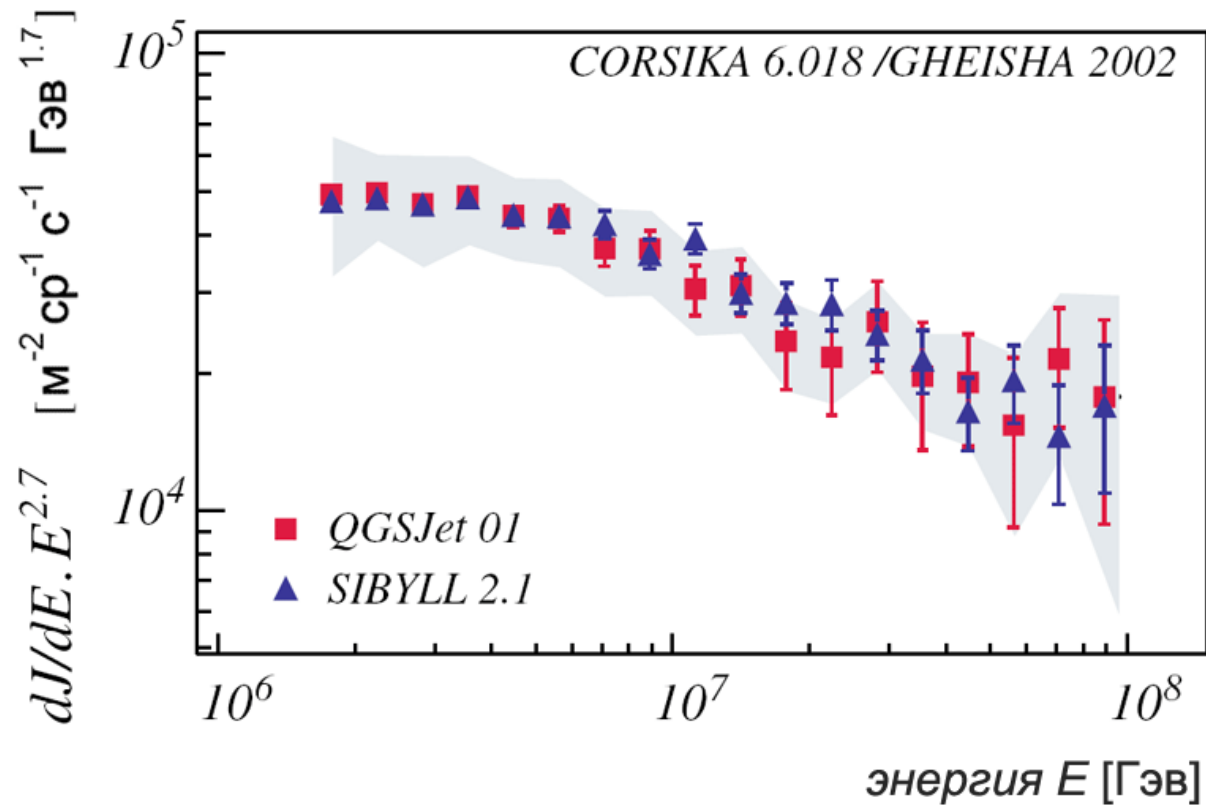


Суммарный
спектр

Модельная зависимость восстановленного состава

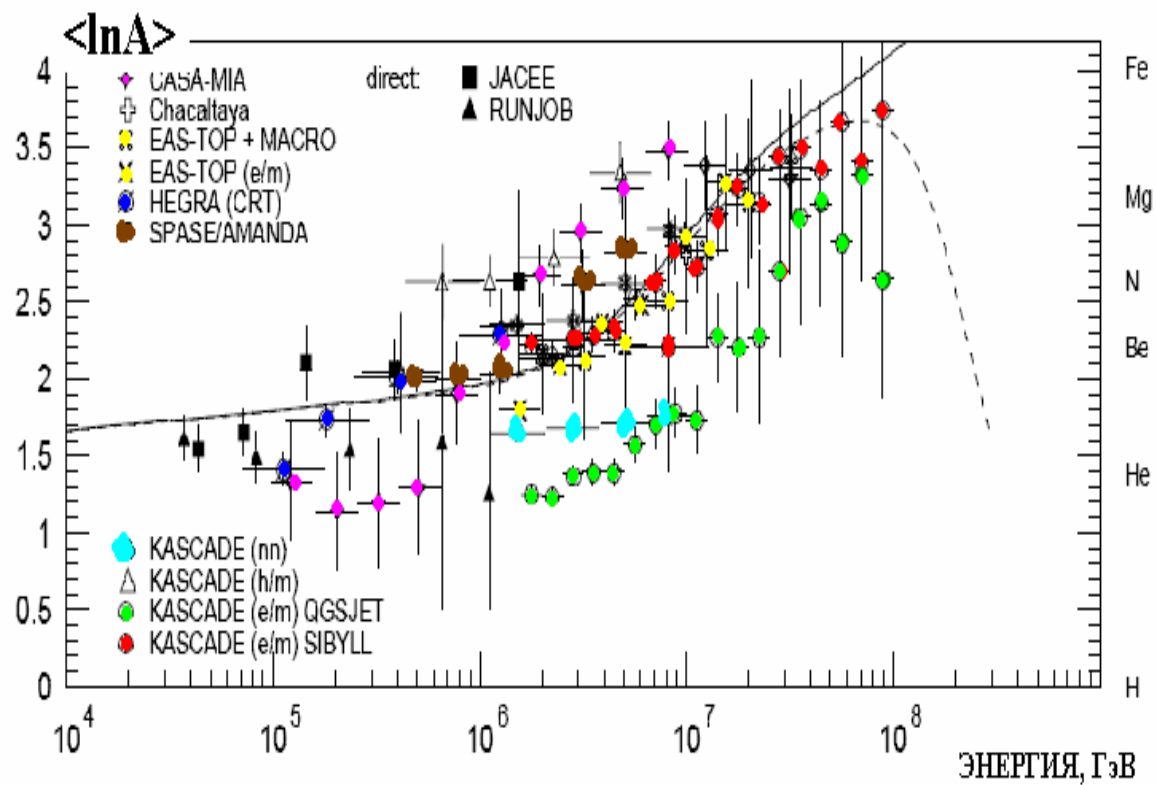


Antoni et al, 2005

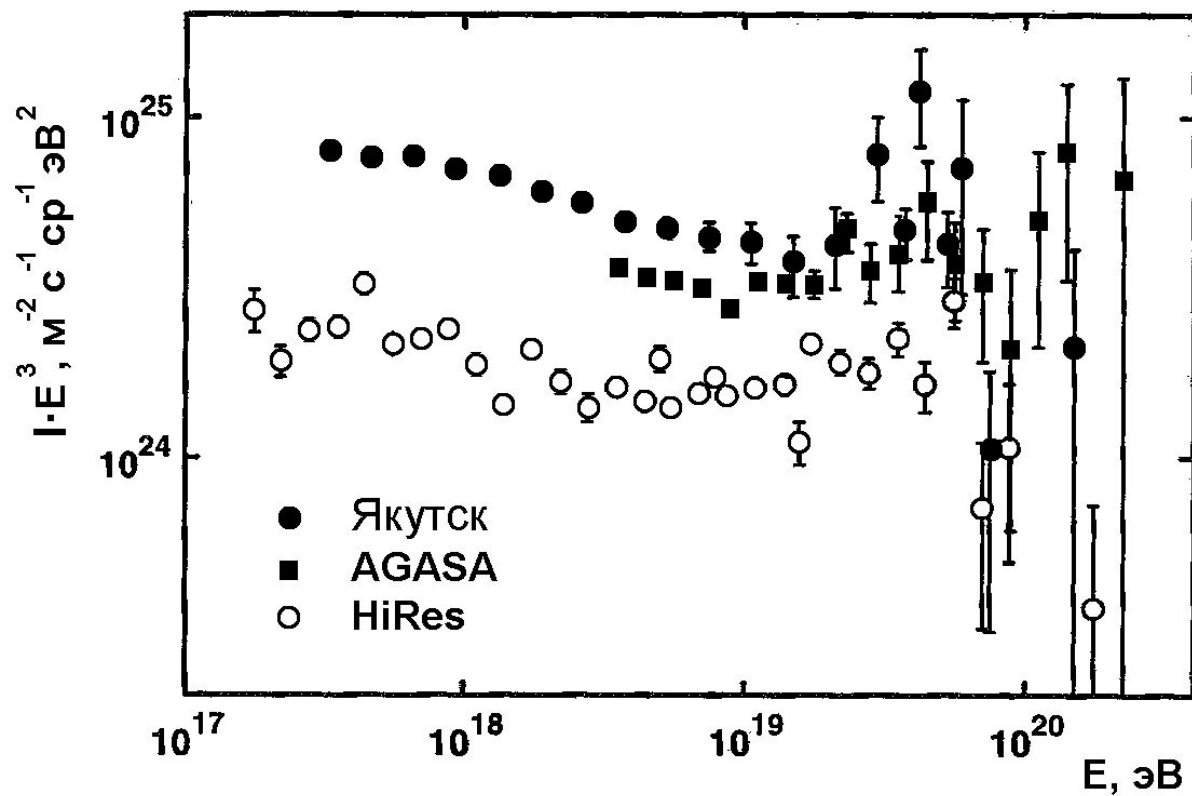


Спектр всех частиц KASCADE

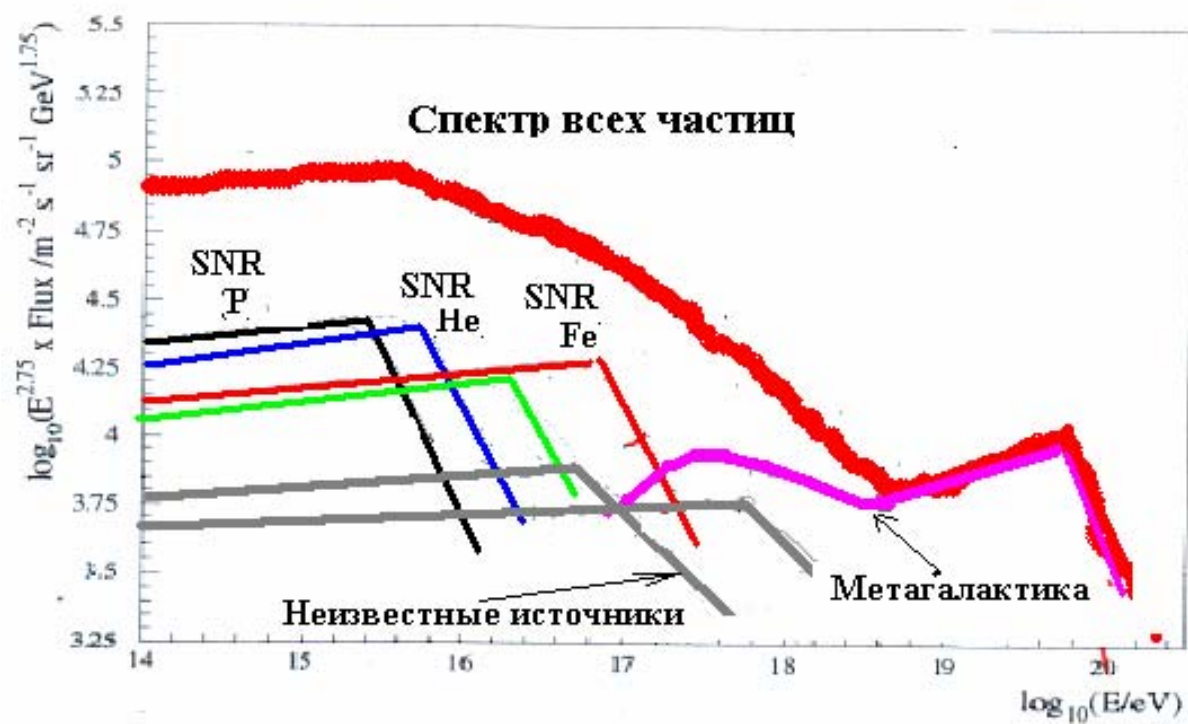
Antoni et al, 2005



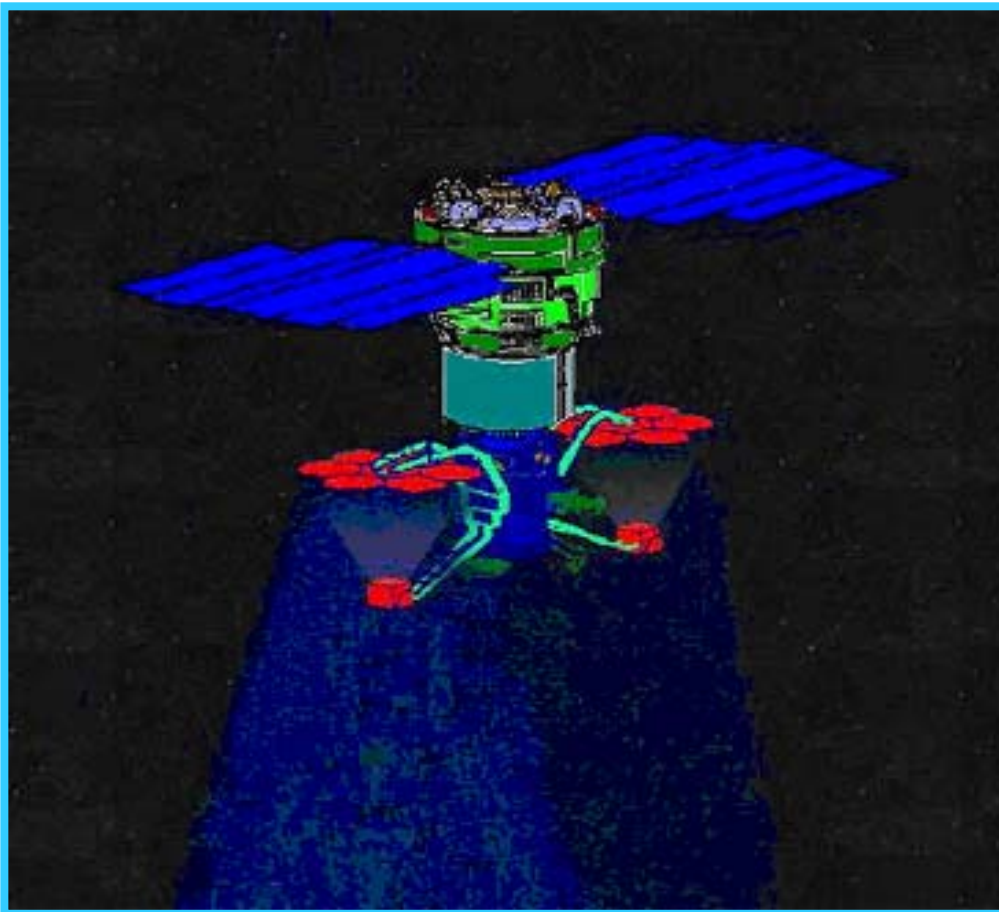
Данные о
массовом составе
первичных КЛ



Данные установок ШАЛ вблизи порога ГЗК-обрезания



Общий вид спектра КЛ



Проект наблюдения
флуоресценции ШАЛ с
установки космического
базирования (ТУС -
КЛПВЭ)

$$S_{\text{эфф}} = 450\,000 \text{ км}^2$$

(Auger – 3000 км².)

