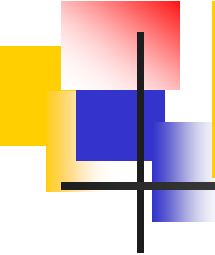


29 Всероссийская конференция по космическим лучам  
3-7 августа 2006, Москва

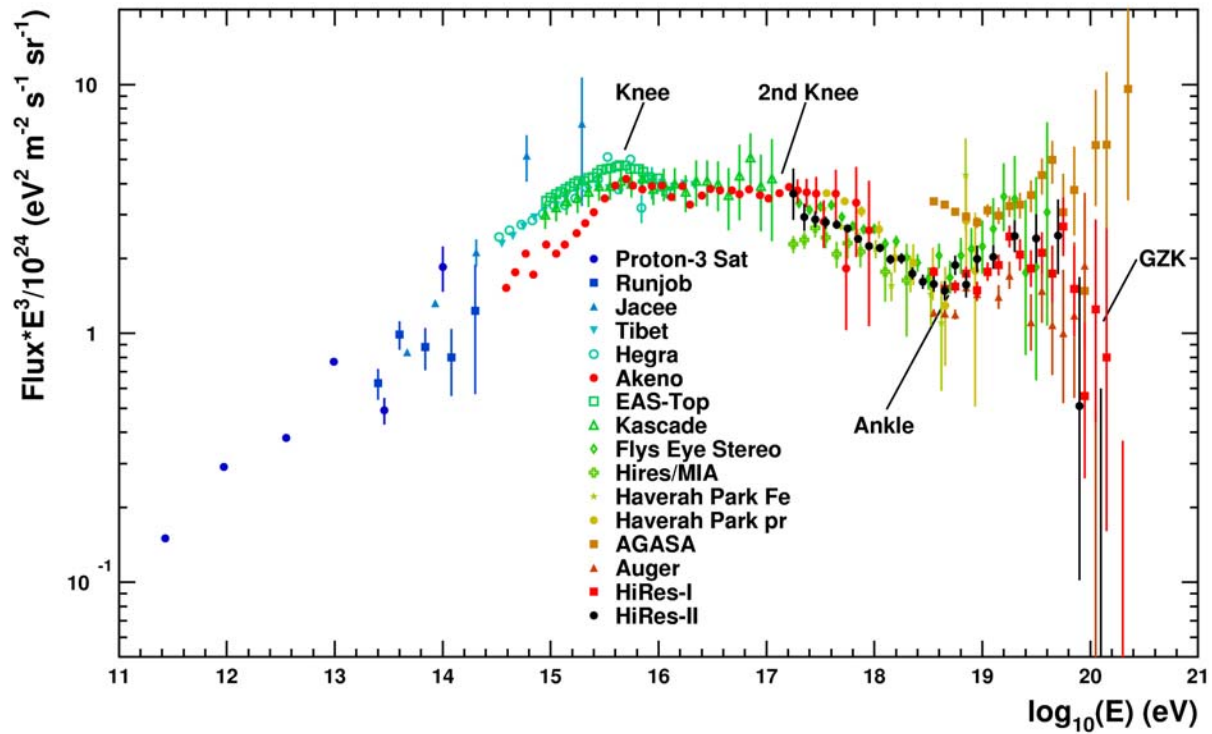
# СПЕКТР КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

С. И. ГРИГОРЬЕВА

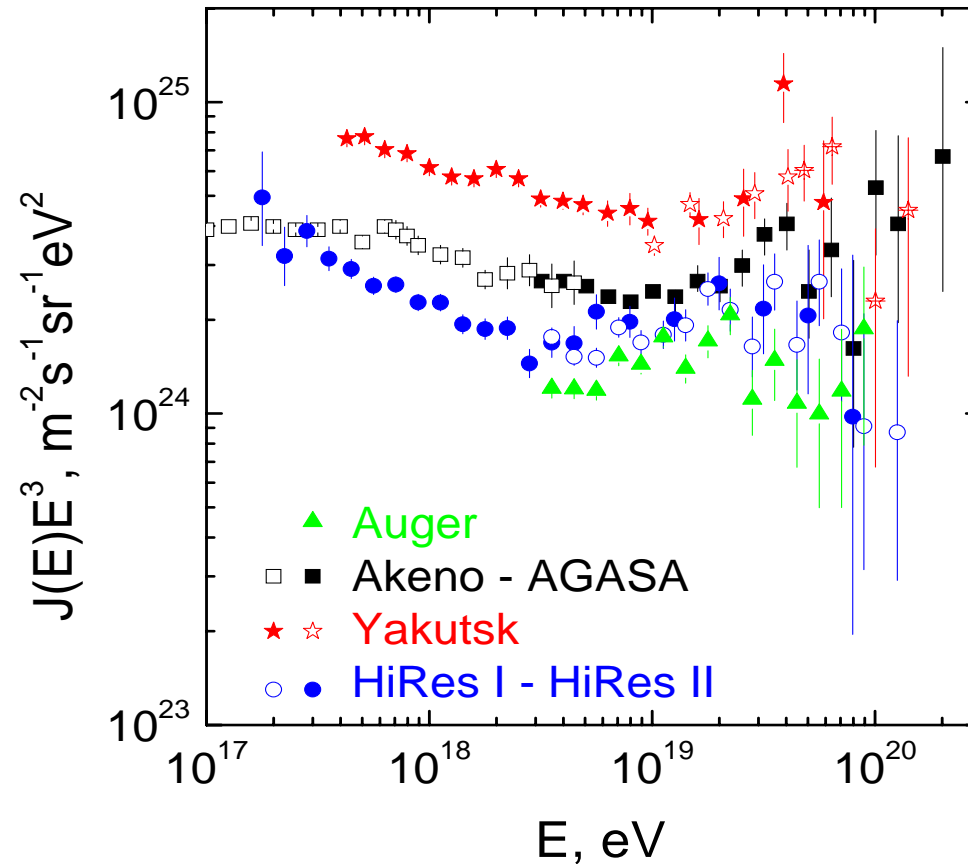
Институт ядерных исследований

- 
- Введение
  - Распространение КЛ
  - Спектры внегалактических протонов КЛ и их особенности
  - Сравнение с экспериментальными данными
  - Заключение

# Спектр космических лучей



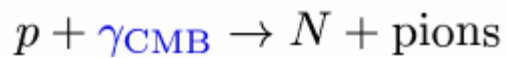
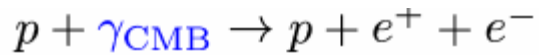
# AGASA, HiRes, Yakutsk, Auger



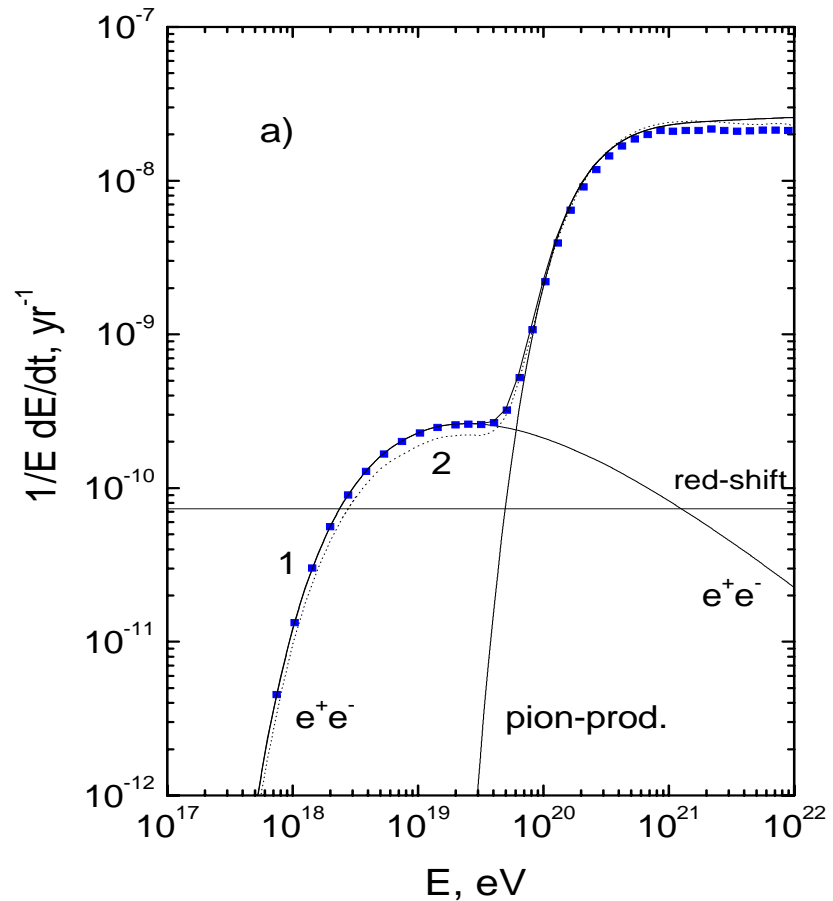
11 событий с  $E > 10^{20}$  эВ в эксперименте AGASA

# Распространение протонов КЛ в поле микроволнового фонового излучения

## Взаимодействия



Грейзен-Зацепин-Кузьмин  
обрезание (1966)

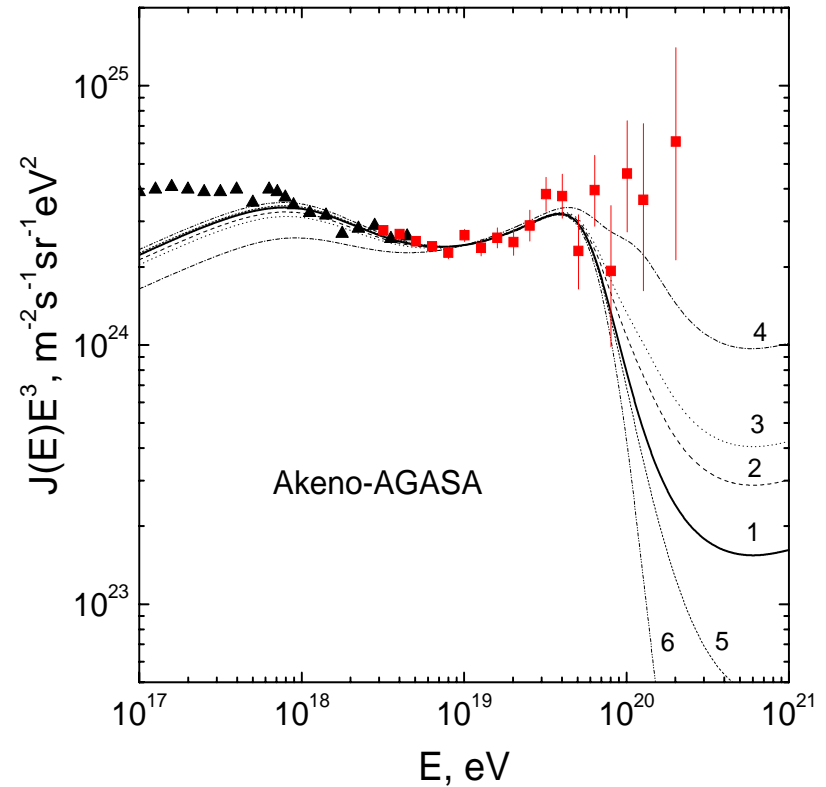
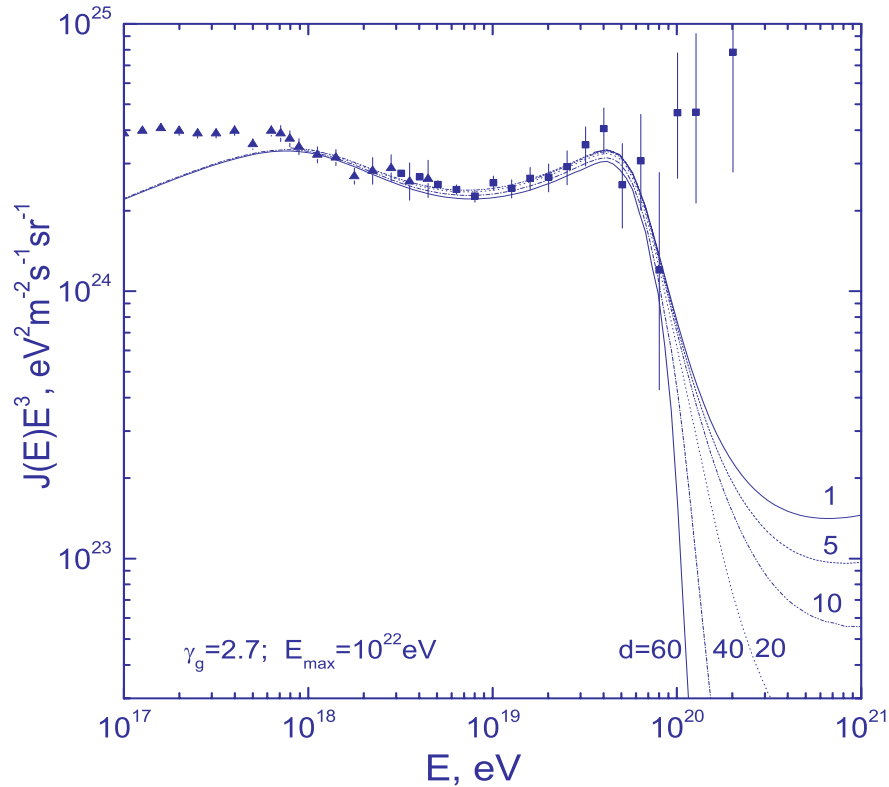




# Особенности спектра протонов

Взаимодействие протонов КЛСВЭ с микроволновым фоновым излучением оставляет характерный "автограф" в дифференциальном спектре в форме провала от рождения электрон-позитронных пар, горба, обусловленного фотопионным торможением, и заканчивающимся резким укрупнением спектра (ГЗК-обрезанием).

# ГЗК-обрезание



Влияние распределения источников КЛ , избытка или их дефицита



# Провал в спектре

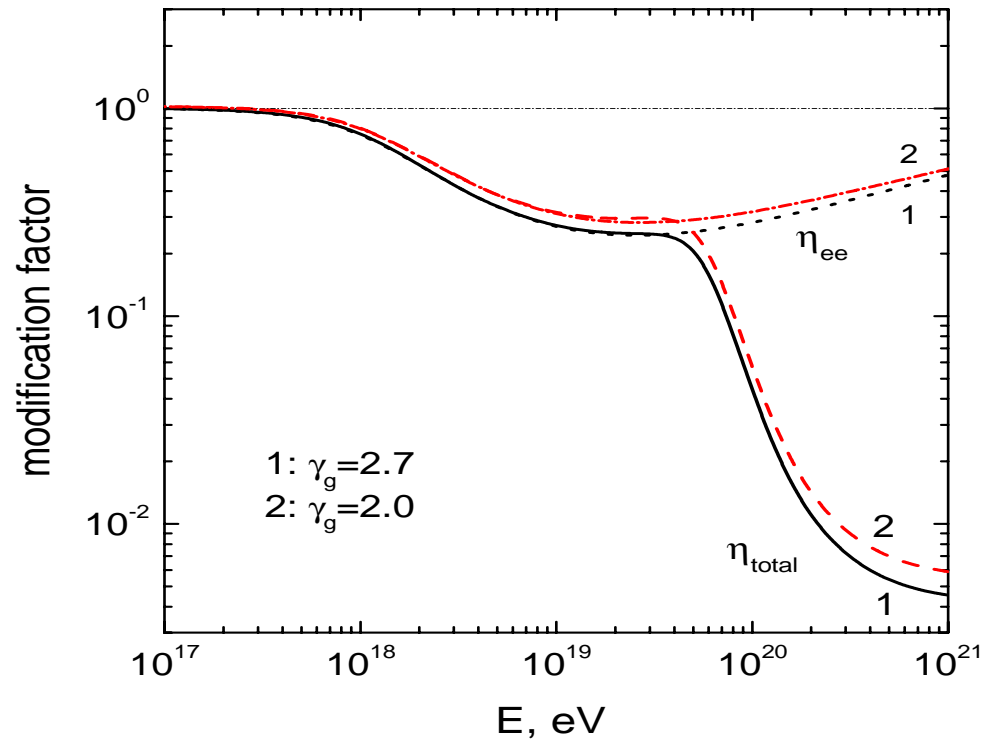
## Фактор модификации

$$\eta(E) = \frac{J_p(E)}{J_p^{unm}(E)} \quad (1)$$

Фактор модификации менее зависит от моделей, чем спектр. В частности,  $\eta(E)$  слабо зависит от показателя спектра генерации  $\gamma_g$  потому, что числитель и знаменатель в выражении (1) включают  $E^{-\gamma_g}$ .



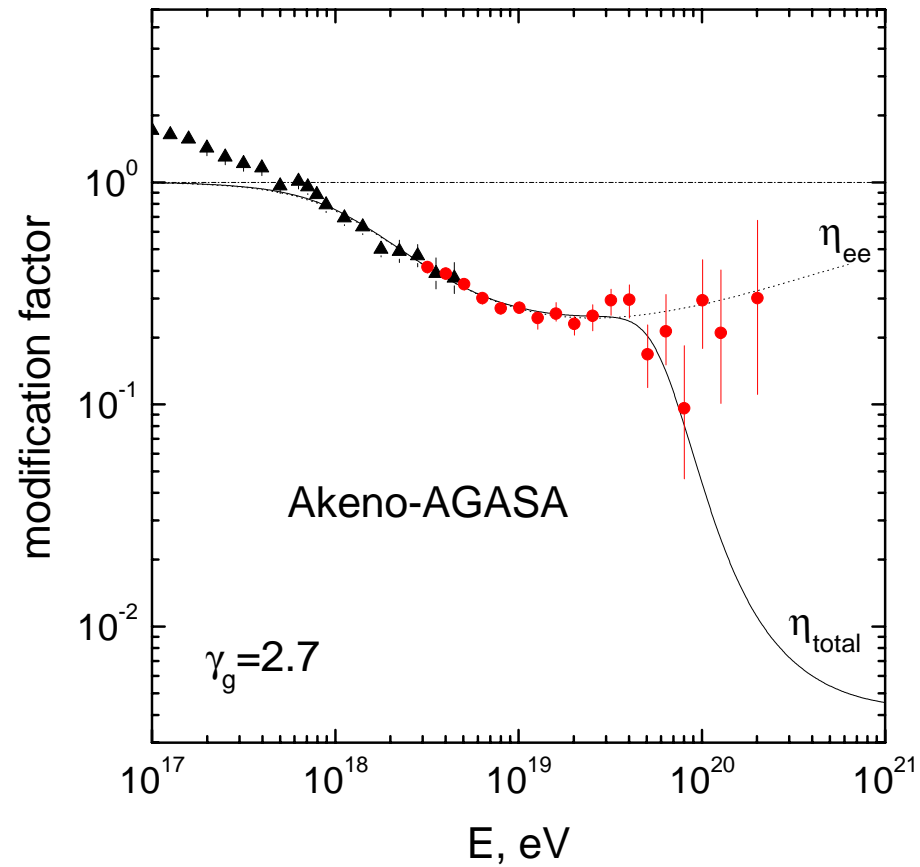
# Провал в спектре



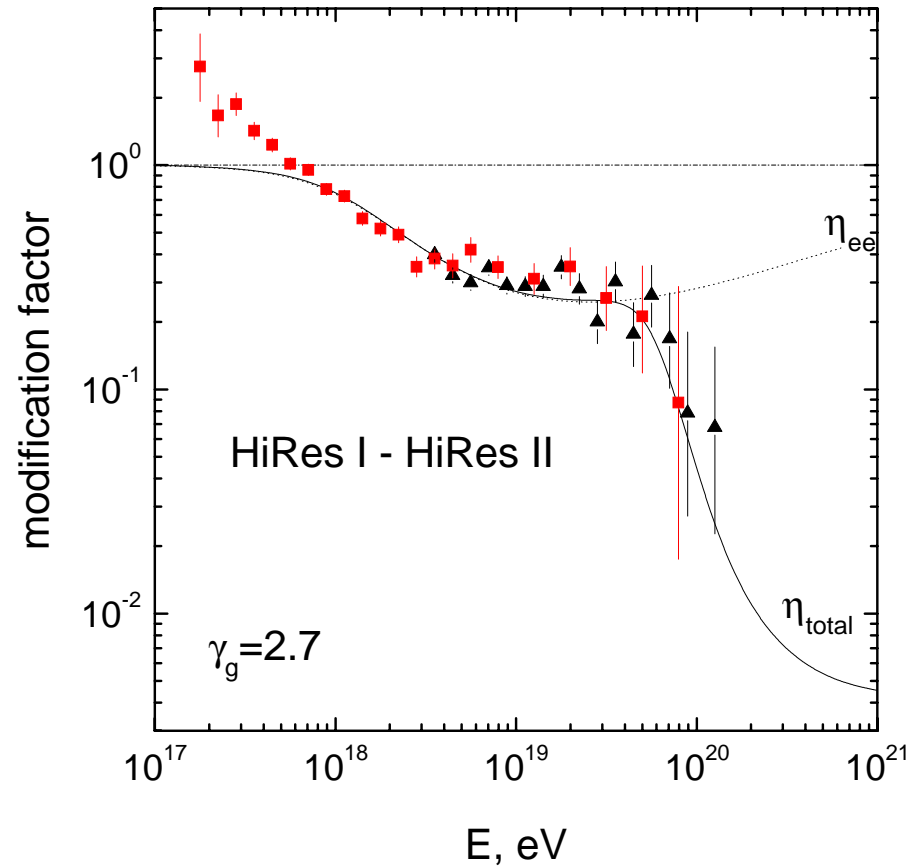
$\eta_{ee}$  - *потери на адиабатическое расширение и образование пар*

$\eta_{total}$  - *все потери*

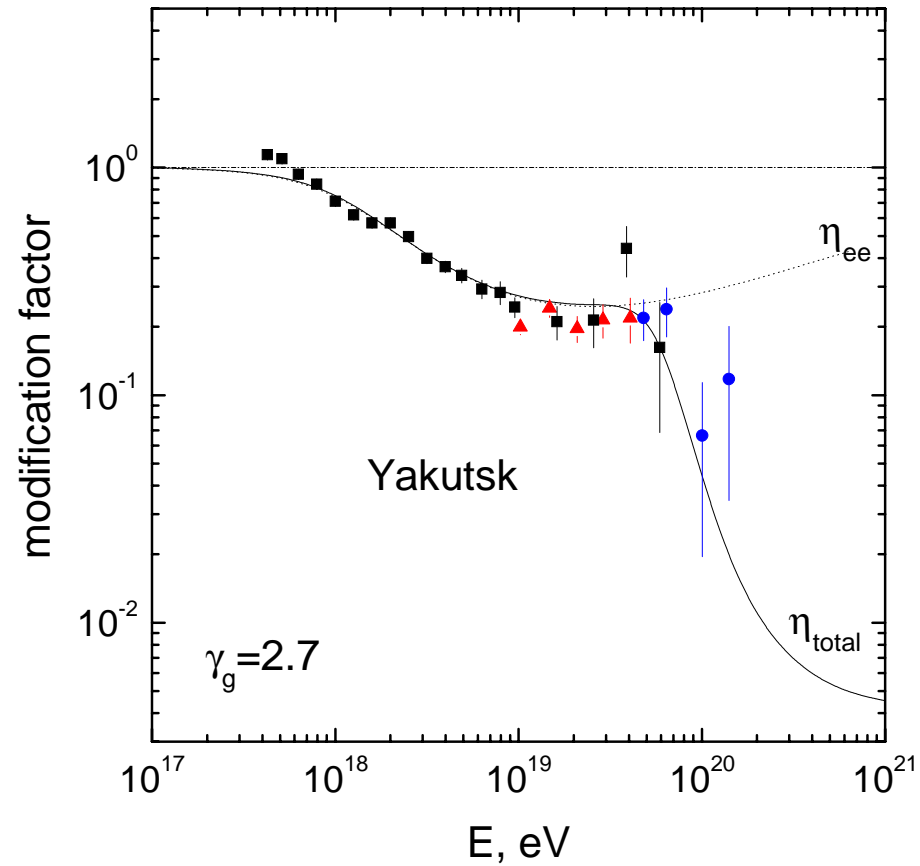
# Провал в спектре в сравнении с Akeno-AGASA



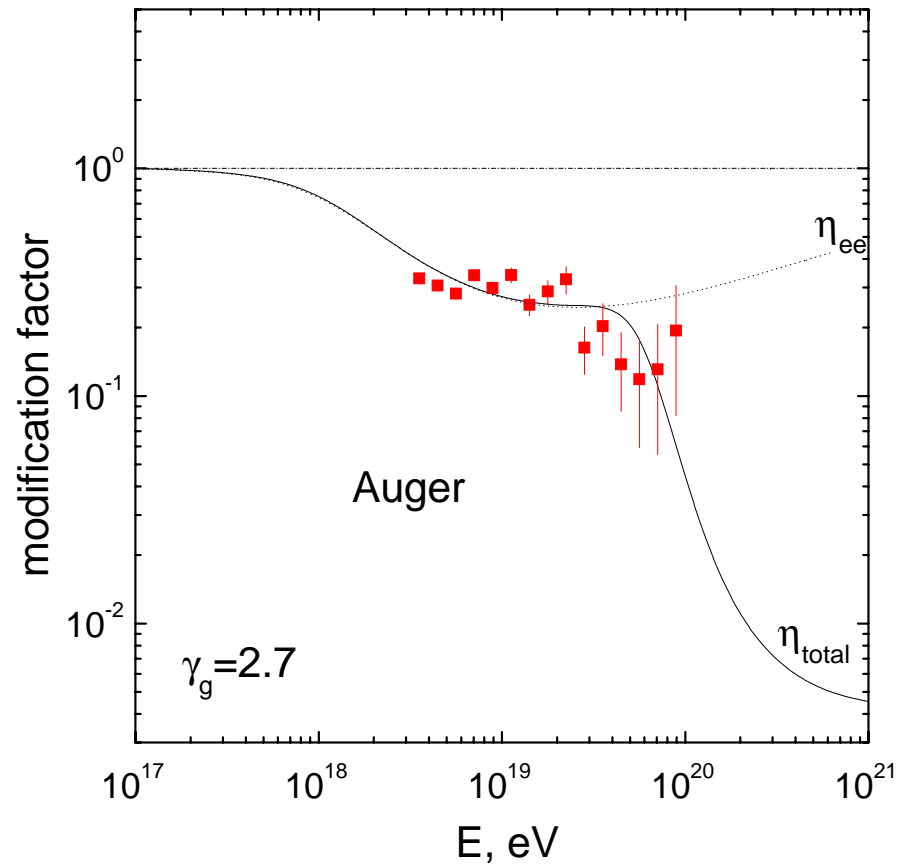
# Провал в спектре в сравнении с HiRes



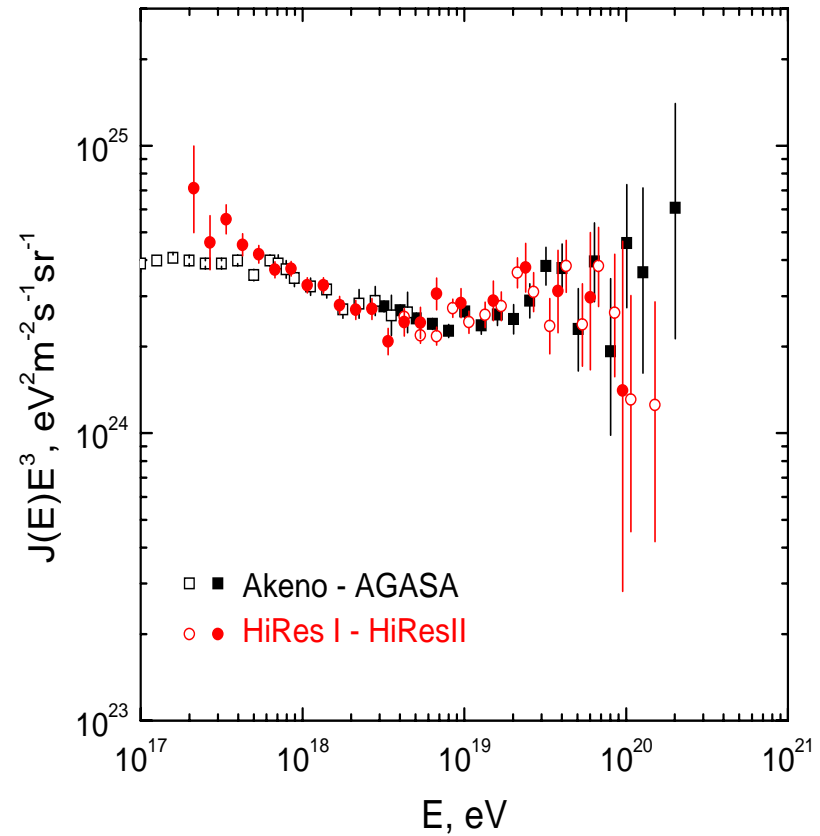
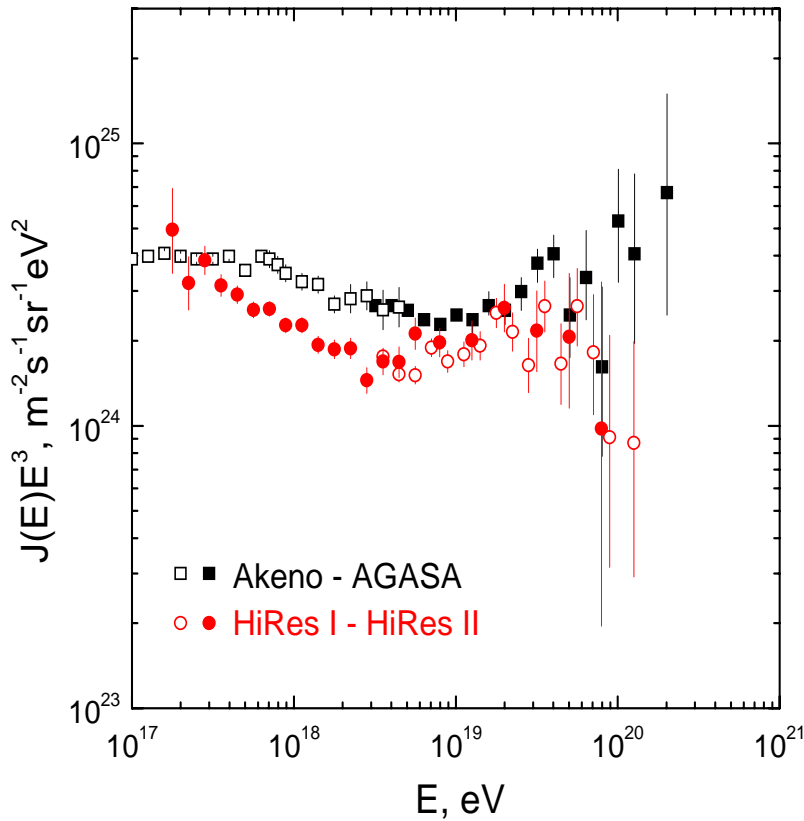
# Провал в спектре в сравнении с Yakutsk



# Провал в спектре в сравнении с Auger

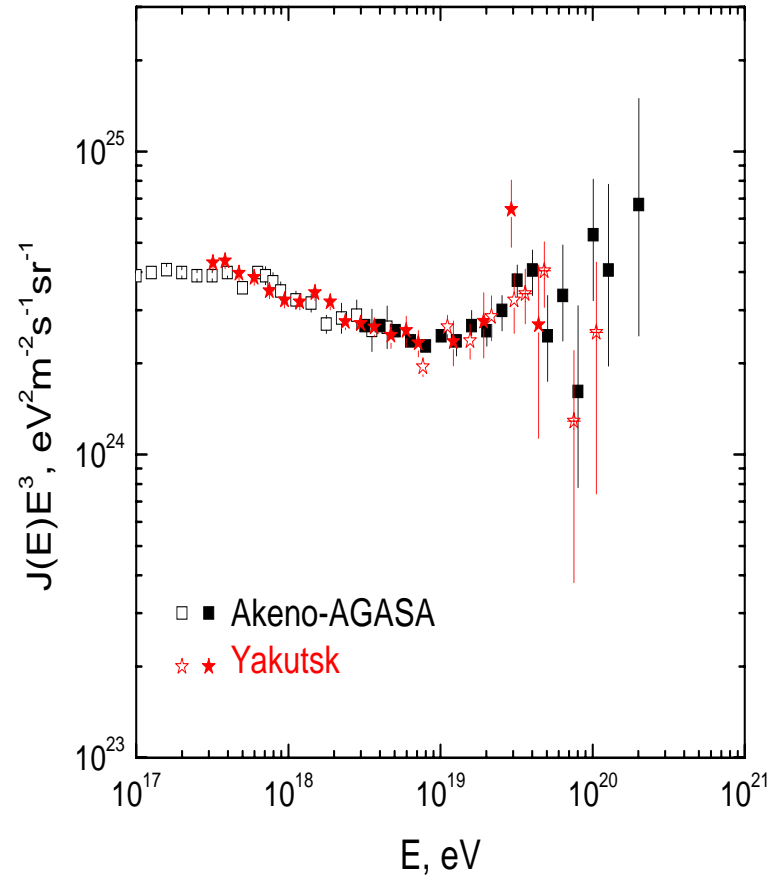
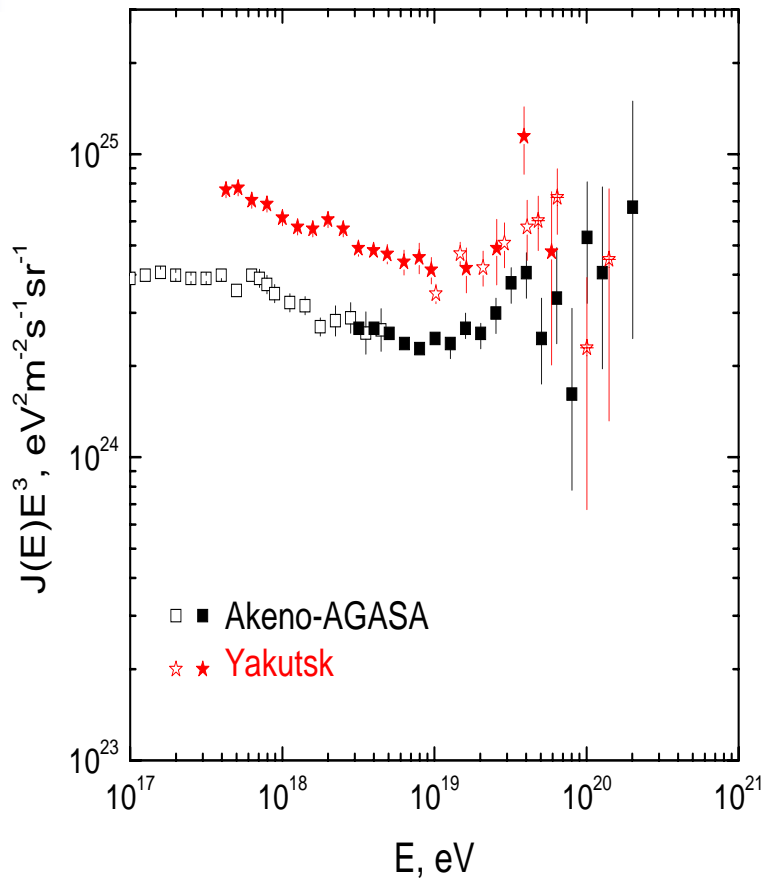


# AGASA – HiRes



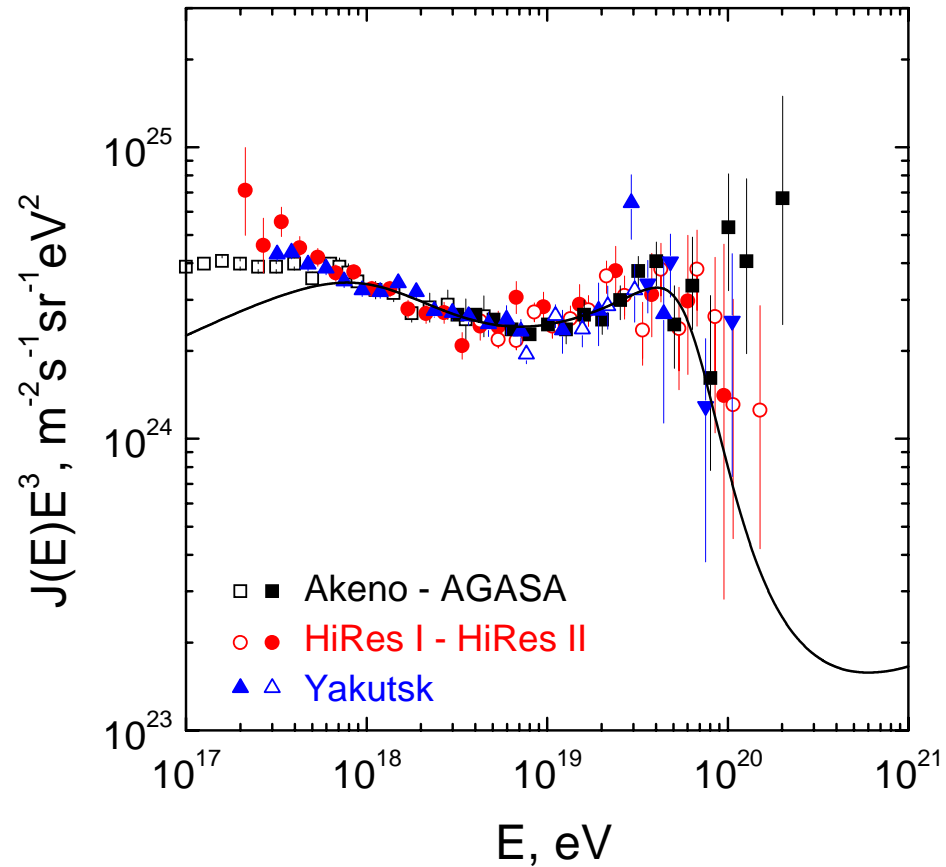
Для согласования данных необходим сдвиг по энергии:  $\lambda_{AGASA} = 0.9$  и  $\lambda_{HiRes} = 1.2$

# AGASA-Yakutsk



Для согласования данных необходим сдвиг по энергии:  $\lambda_{AGASA} = 0.9$  и  $\lambda_{Yakutsk} = 0.75$

# AGASA-HiRes-Yakutsk







# Заключение

- *Провал в дифференциальном спектре космических лучей сверхвысоких энергий, обусловленный рождением электронно-позитронных пар при взаимодействии первичных протонов с фотонами микроволнового фонового излучения, является наиболее устойчивой особенностью.*
- *Форма провала очень слабо зависит от того, учитываются ли такие факторы, как дискретность в распределении источников, модель распространения протонов КЛ (прямолинейное или диффузионное), локальный избыток или дефицит источников, флуктуации в распределении источников и флуктуации во взаимодействиях.*
- *Данные, полученные в экспериментах по регистрации частиц сверхвысоких энергий (AGASA, HiRes, Fly's Eye и Якутск), хорошо подтверждают наличие этой особенности в спектре первичных космических лучей.*



# Summary

(M. Teshima, ICHEP'06)

Super GZK particles exist

Preliminary study with recent CORSIKA

If we evaluate energies with the recent CORSIKA

Energy scale shift down by  $\sim 10\%$  at  $10^{19}\text{eV}$  and by  $\sim 15\%$  at  $10^{20}\text{eV}$

11 events above  $10^{20}\text{eV}$  / 1.3~2.6 expected

→ 5~6 events / 1.0~1.9 expected

The flux difference between AGASA and HiRes becomes less significant

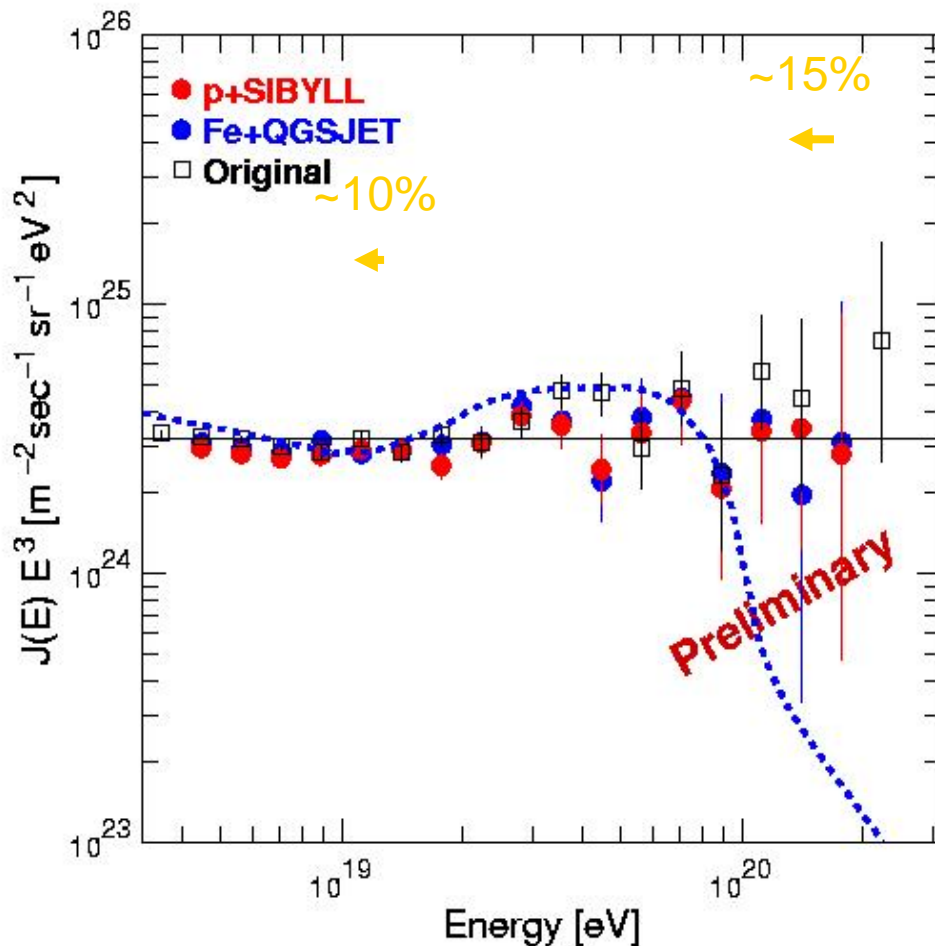
Small scale anisotropy of UHECR

The arrival direction of UHECRs is uniform in large scale

But AGASA data shows clusters, 1 triplets and 6 doublets → granularity

Source density  $\sim 10^{-5}/\text{Mpc}^3$   $\sim$  density of AGNs

# Preliminary spectra with recent Corsika (M.Teshima – ICHEP'06)



No difference in Models and Compositions

Energy shift to lower direction  
~10% at  $10^{19}$ eV  
~15% at  $10^{20}$ eV

Above  $10^{20}$ eV  
11 events  $\rightarrow$  5~6 events

Featureless spectrum  
very close to  $E^{-3}$

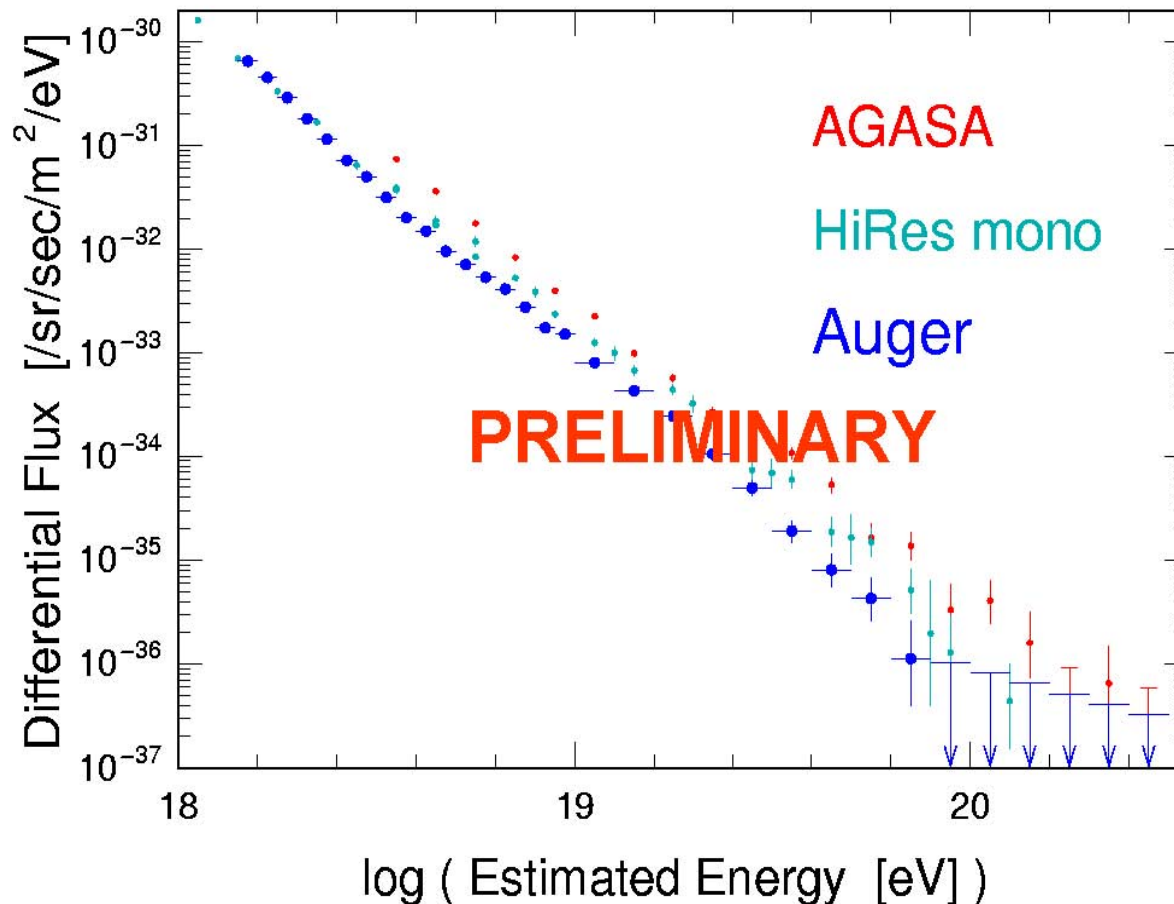
P-SIBYLL (above  $10^{19}$ eV)  
 $\gamma = 2.95 \pm 0.08$   
( $\chi^2 / \text{NDF} = 8.5/11$ )

Fe-QGSJET (above  $10^{19}$ eV)  
 $\gamma = 2.90 \pm 0.08$   
( $\chi^2 / \text{NDF} = 8.5/11$ )

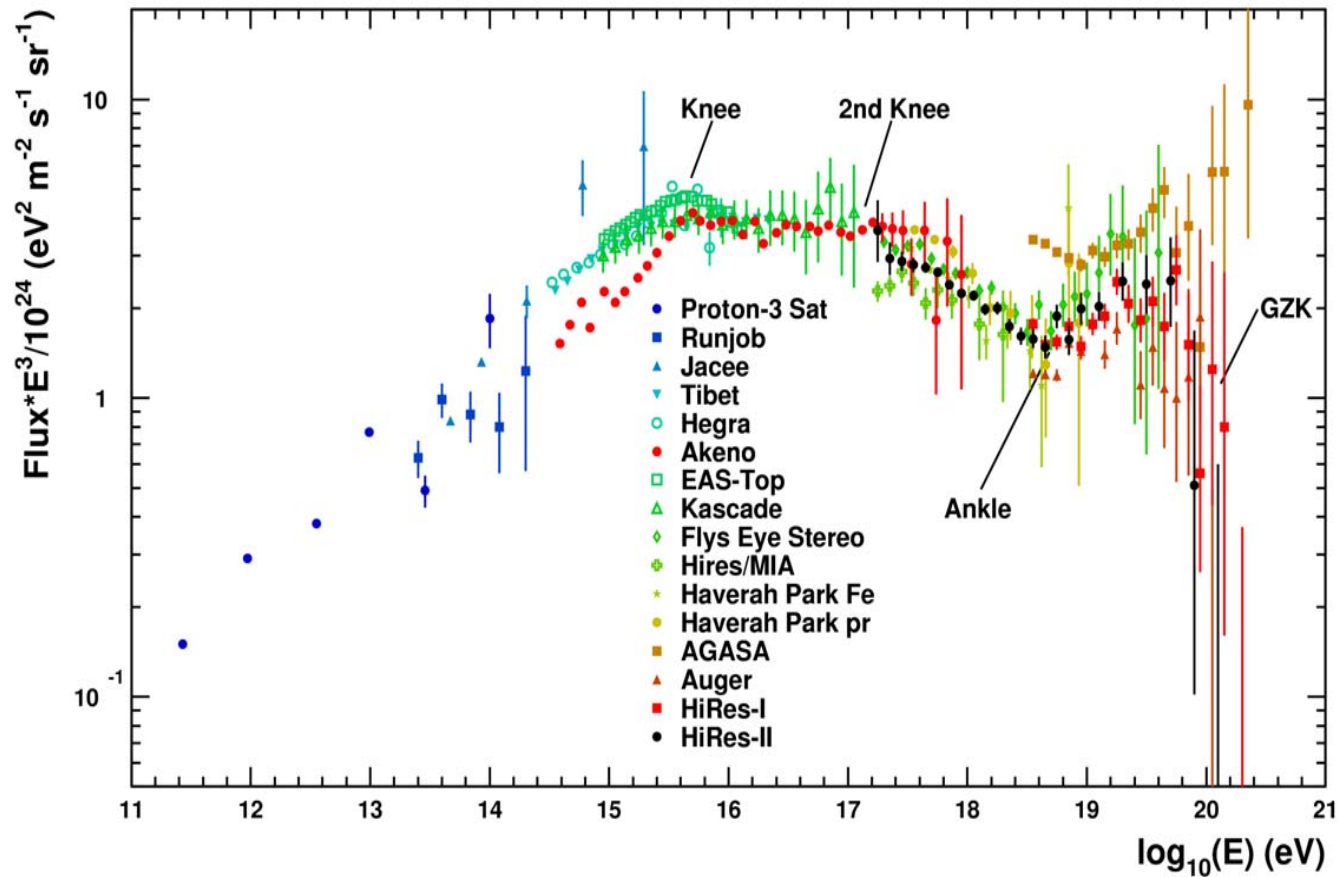
# Auger

*(G. Matthiae, ICHEP'06)*

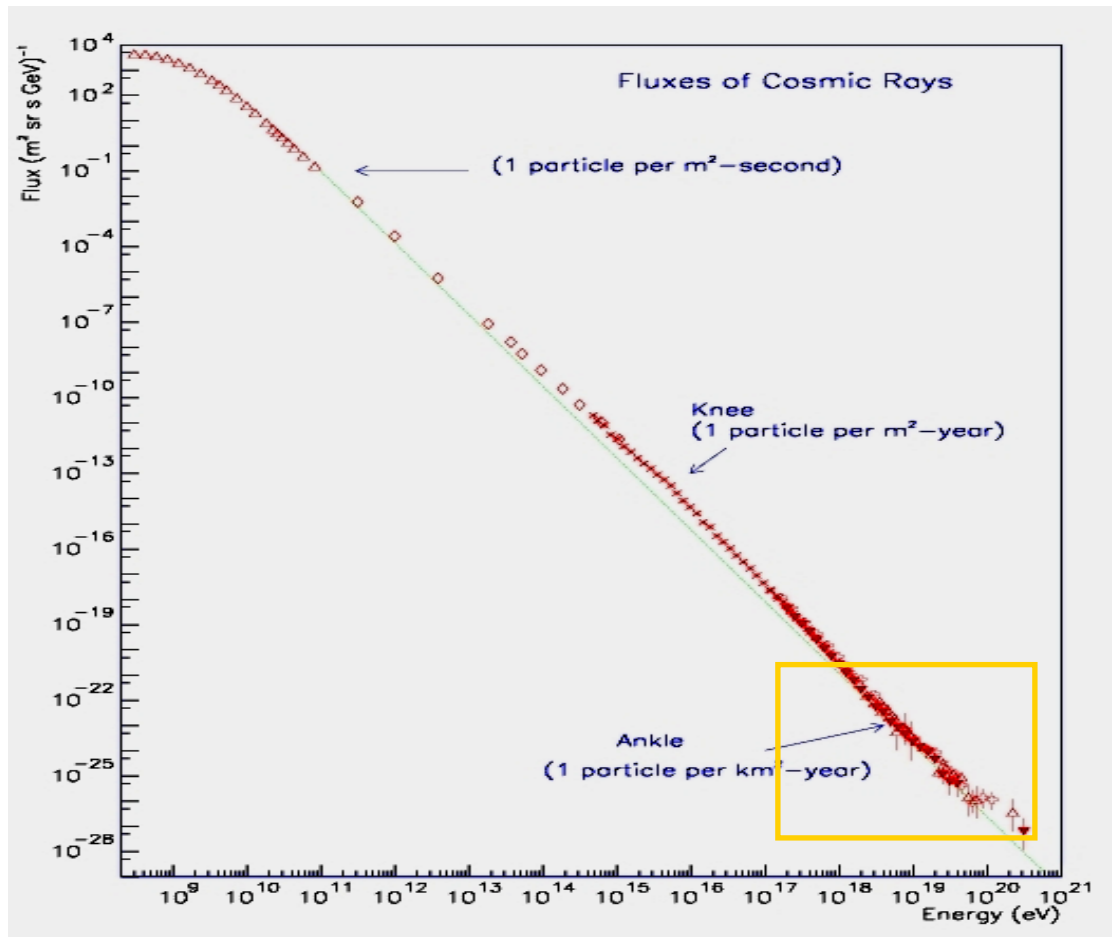
- ( $\sim 7000 \text{ km}^2 \text{ sr yr}$ ). Efficiency = 100% above 3 EeV.
- Statistics is now about  $\frac{1}{2}$  year of full Observatory



# Спектр космических лучей в широком диапазоне

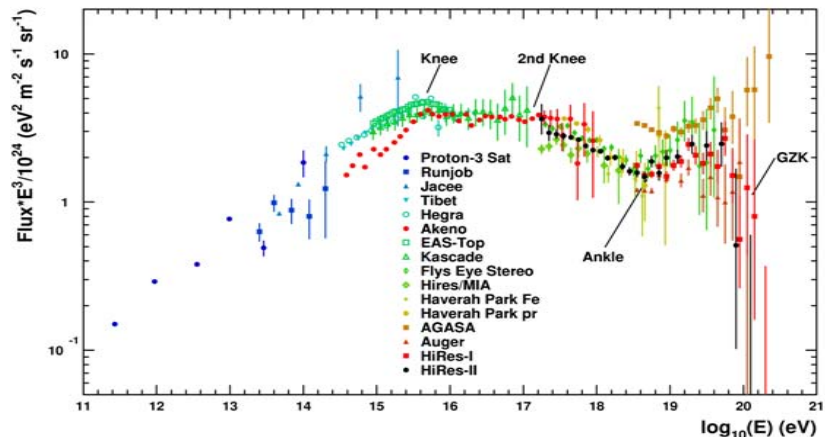
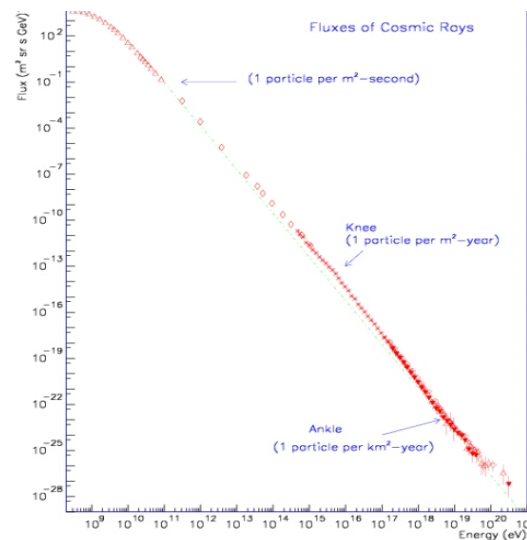


# Спектр космических лучей



# Спектр космических лучей в широком диапазоне

- At lower energies, spectrum of cosmic rays is almost featureless.
  - Only the "knee" at  $10^{15.5}$  eV.
  - Learn about galactic sources.
- Big change expected at higher energies ( $>10^{17}$  eV.):
  - Expect two spectral features due to interactions between CR protons and CMBR photons.
    - GZK cutoff due to pion production.
    - Dip in spectrum due to  $e+e-$  pair production (the ankle).
  - A third spectral feature: the "second knee".
  - Galactic/extragalactic transition.
- Learn about extragalactic sources; and propagation over cosmic distances.



# Integral Spectrum Test (G. Thomson, ICHEP'06)

Want to test  $E^{1/2}$  with integral spectra  
Use 2BP Fit with Extension for the  
comparison

$$\log_{10} E^{1/2} = 19.73 \pm 0.07$$

Berezinsky *et al.*:  $\log_{10} E^{1/2} = 19.72$ ,  
for wide range of conditions.

**Suppression is at the right energy  
for the GZK cutoff.**

