

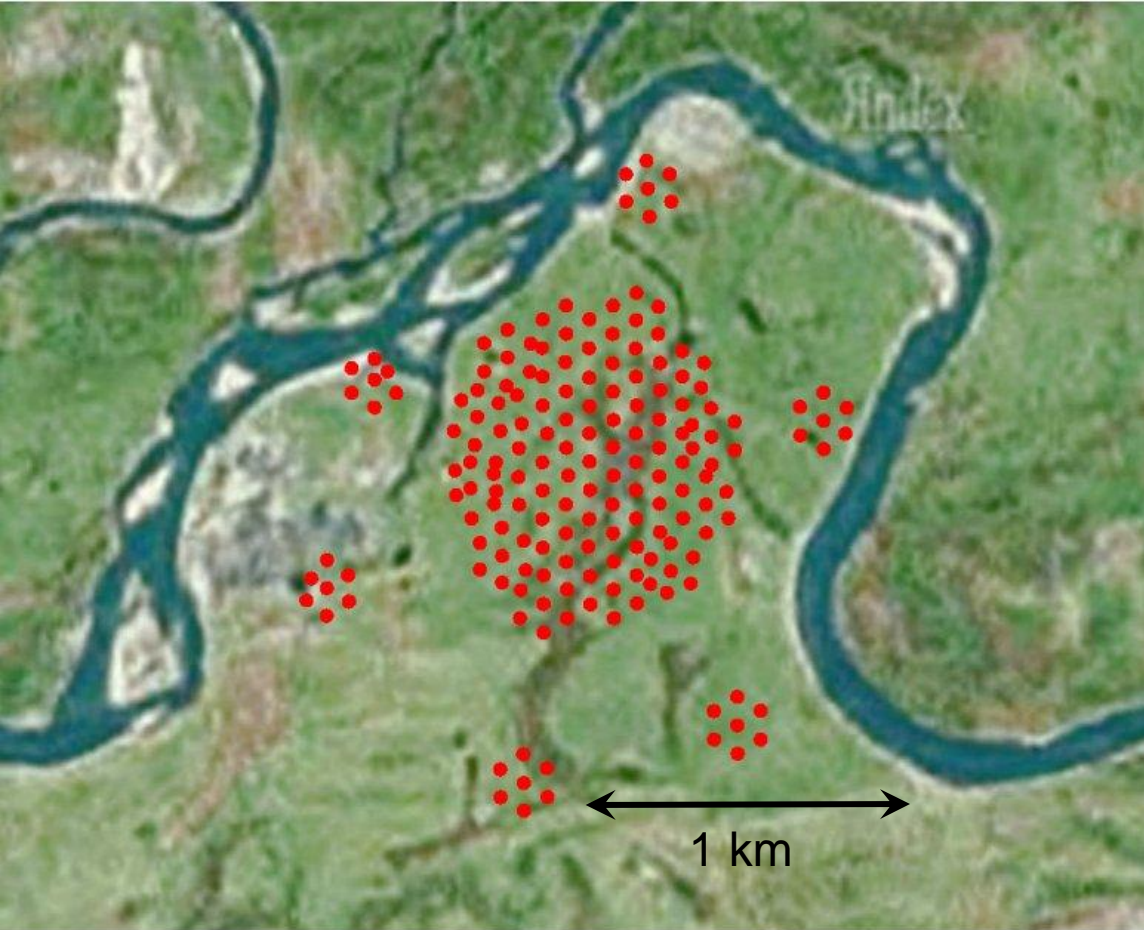
**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И МАССОВЫЙ  
СОСТАВ КОСМИЧЕСКИХ ЛЧЕЙ ПО ДАННЫМ  
УСТАНОВКИ ТУНКА-133**

**В.В. Просин (НИИЯФ МГУ)**

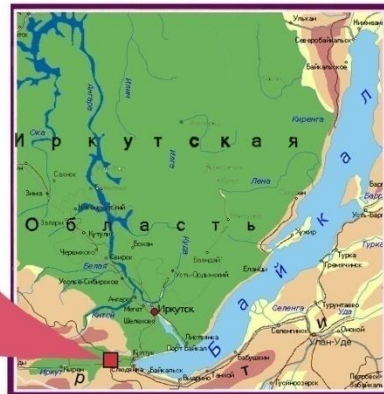
**От имени коллабораций Тунка и  
TAIGA**



ТУНКИНСКИЙ РАЙОН  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПАРК



51° 48' 35" N  
103° 04' 02" E  
675 m a.s.l.



175 оптических детекторов  
EMI 9350 и HAMAMATSU Ø 20 cm

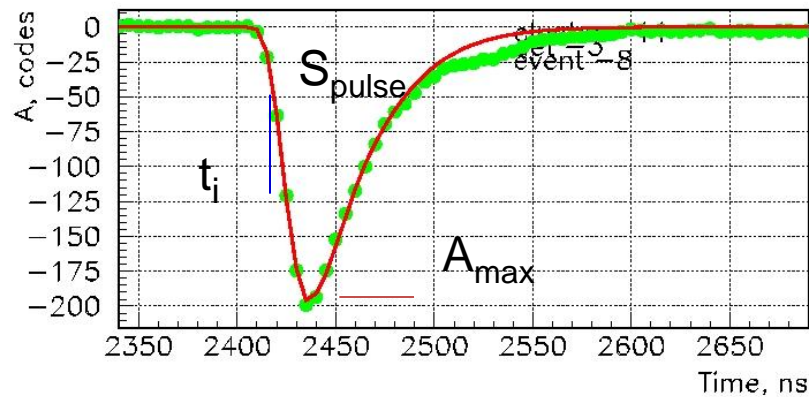


# Запись импульса (шаг = 5 нс):

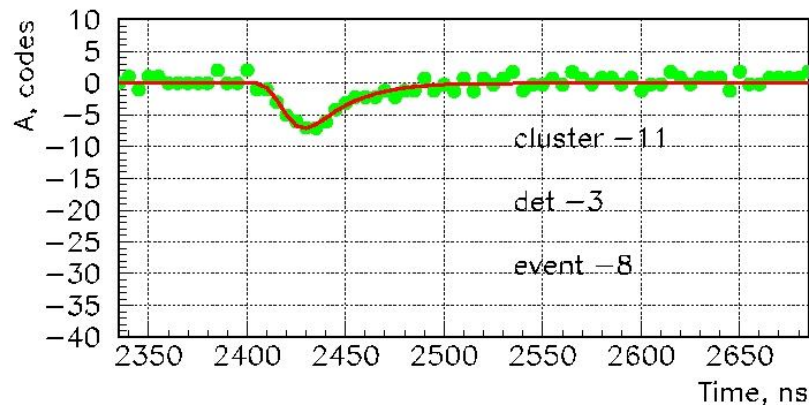
Фитирование специальной функцией и  
измерение параметров:

$$Q = c \cdot S_{\text{pulse}}, A_{\text{max}}, t_i, \tau_{\text{eff}} = S/A/1.24$$

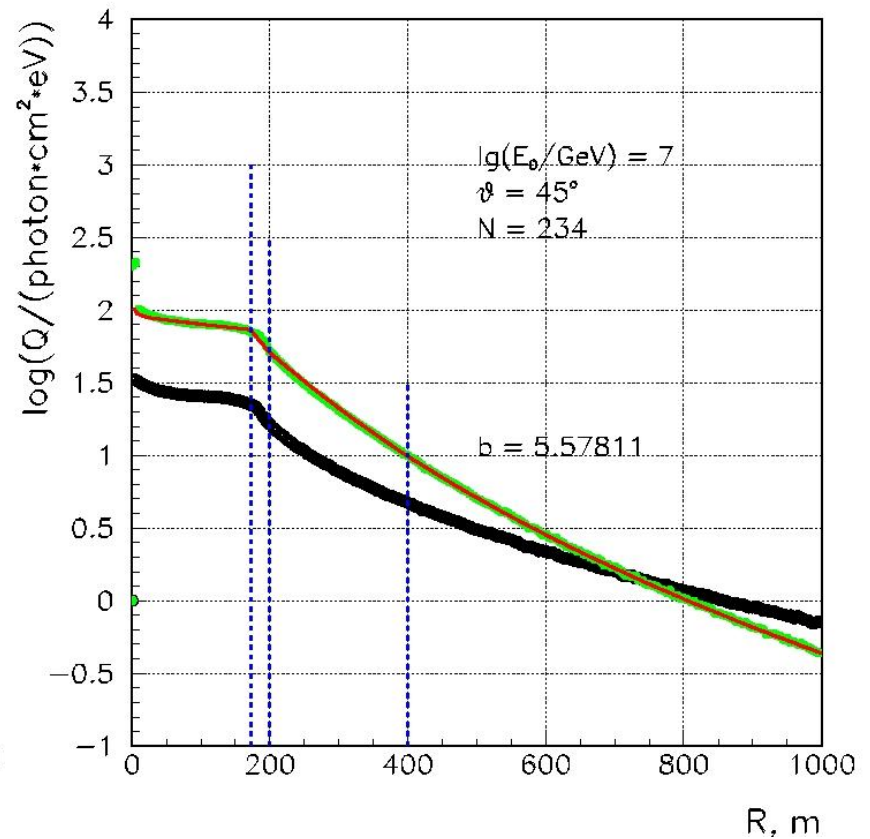
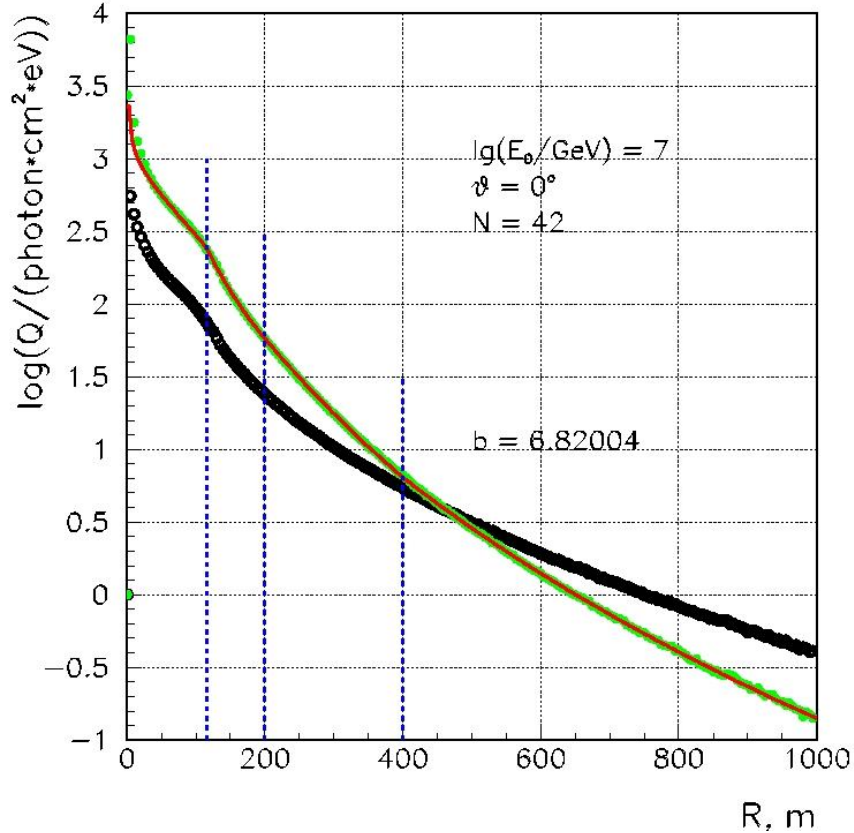
anode:



dinode:



# CORSIKA: Функции – ФПР и ФАР



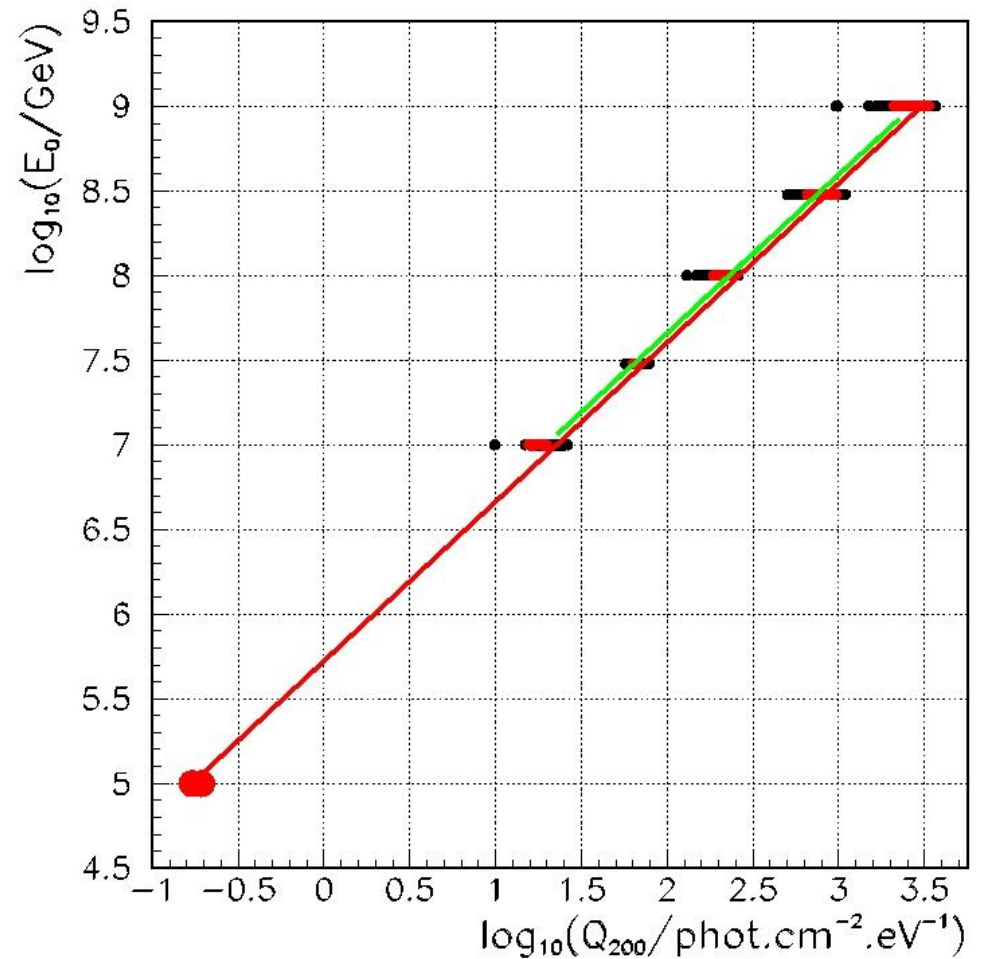
ФАР:  $A(R) = A(400) \cdot ((R/400 + 1)/2)^{-b_A}$  крутизна:  $b_A$

ФПР:  $Q(R) = Q(300) \cdot ((R/300 + 1)/2)^{-b_Q}$  крутизна:  $b_Q$

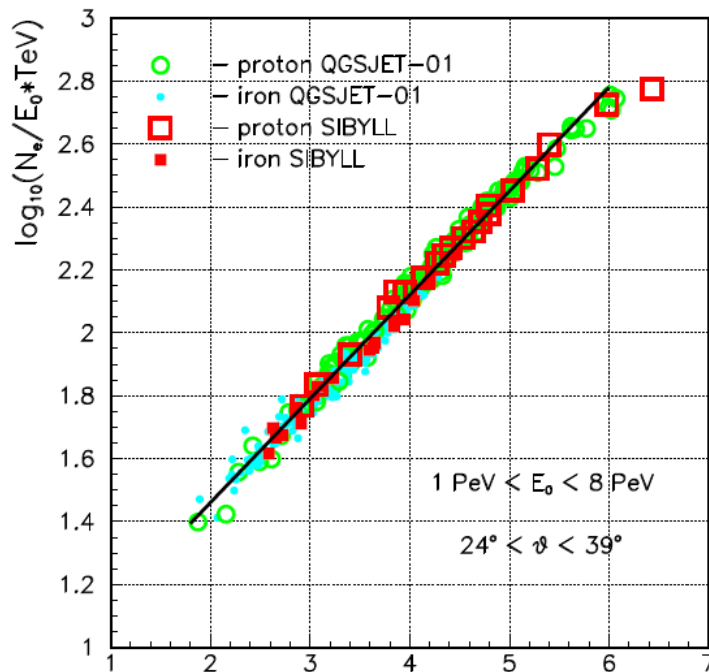
$$b_A > b_Q$$

# CORSIKA: Пересчет от $Q_{200}$ к $E_0$

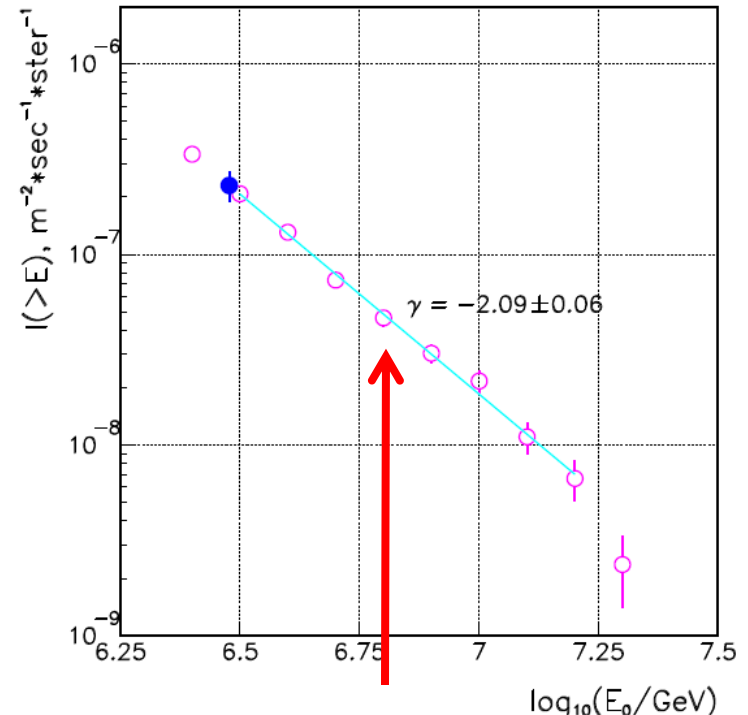
$$E_0 = C \cdot Q_{200}^{0.94}$$



# Абсолютная калибровка: нормировка интегрального энергетического спектра за каждую ночь на эталонный спектр, полученный в эксперименте QUEST (Черенковские детекторы на EAS-TOP)



$\rho$



$$E_0 [\text{eV}] = 1.59 \cdot 10^{11} N_e / \exp(0.76P)$$

$P$  – Крутизна ФПР (2000)

Точка нормировки для установки Тунка-133.  
Точность калибровки ~ 5%



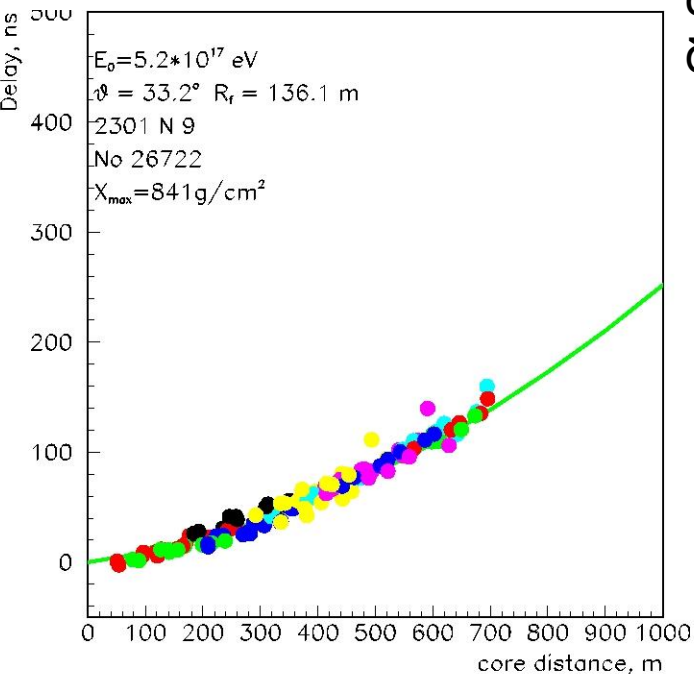
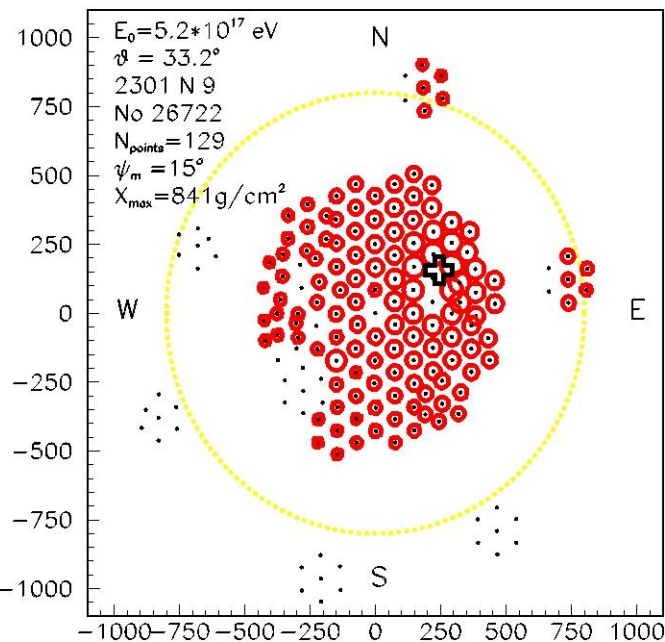
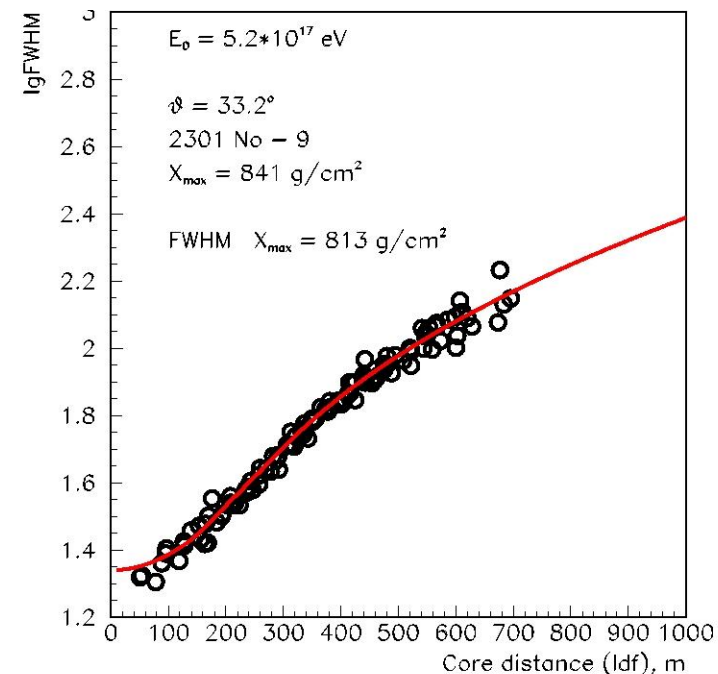
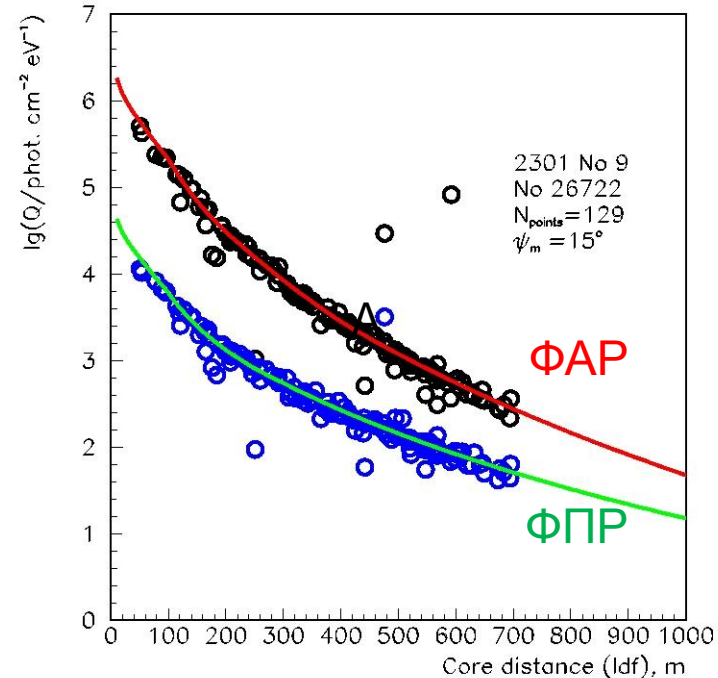
# Пример события

План

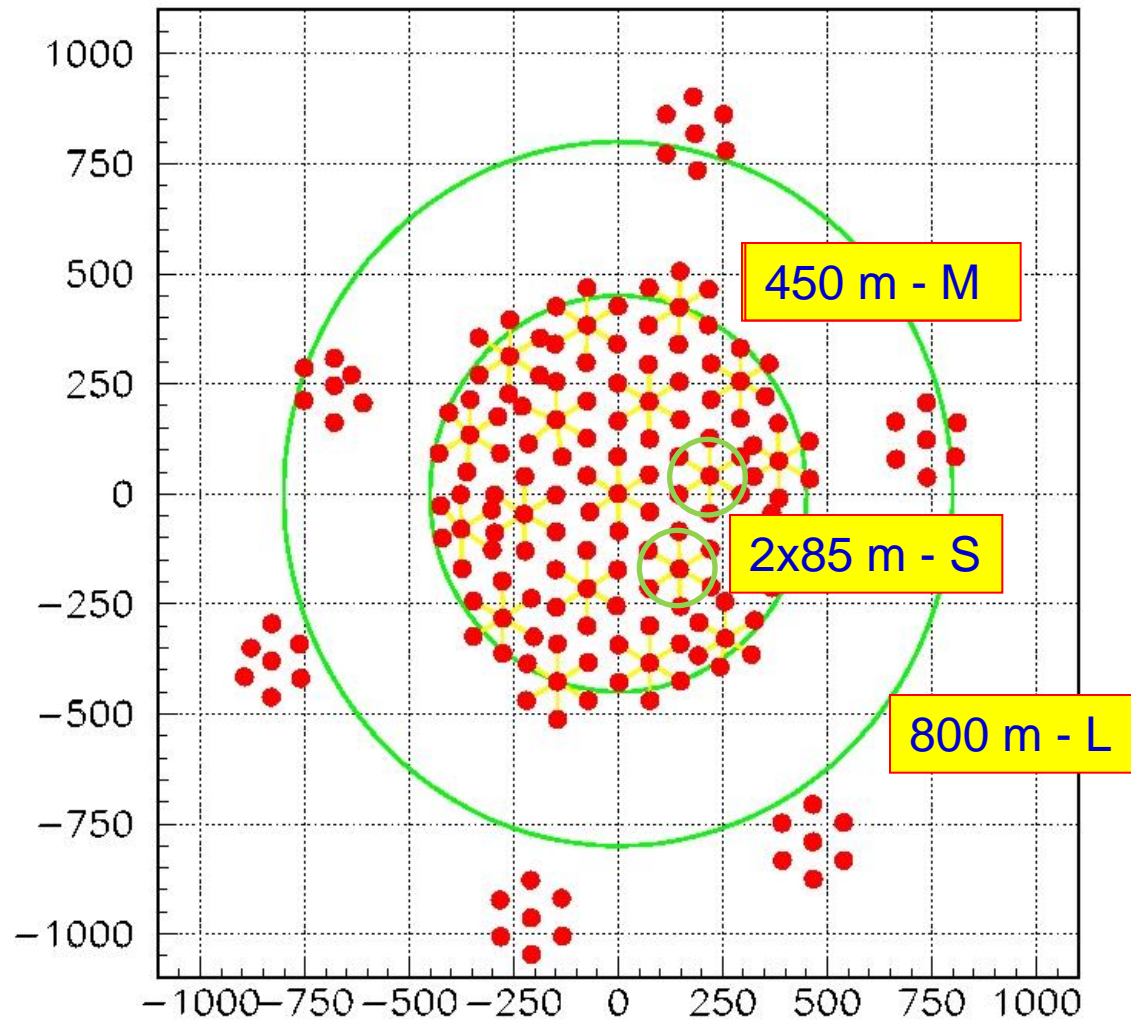
ФАР  
и  
ФПР

Учет кривизны фронта ШАЛ обеспечивает  $\delta\theta < 0.5^\circ$

Зависимость  $\tau_{\text{eff}}$  от расстояния



# Эффективные площади

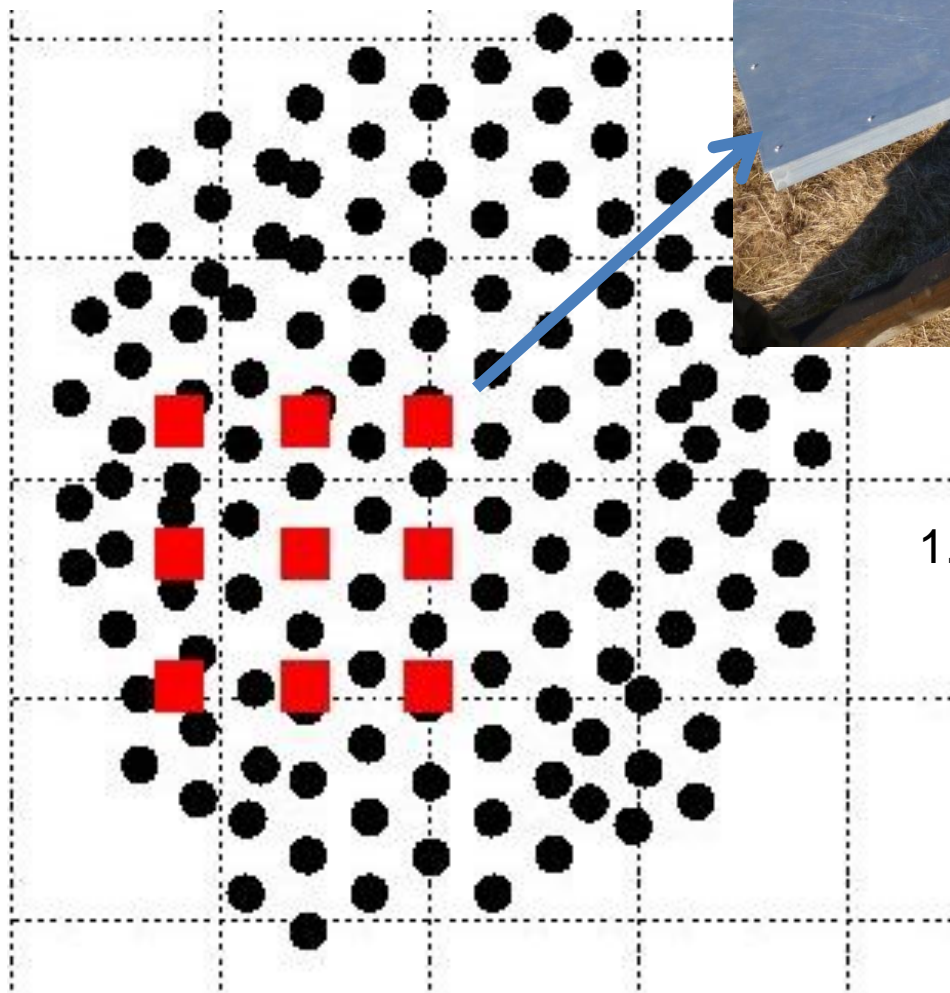


# Экспериментальные оценки точности основных параметров ШАЛ

Сравнение параметров одних и тех же  
ливней по измерениям различными  
установками.

# HiSCORE

9 оптических станций



1. Сравнение результатов установок Тунка-133 и HiSCORE.

для  $E_0 > 3 \cdot 10^{15}$  эВ:  
Разница направлений прихода  
 $\Delta\psi < 0.5^\circ$   
Разница координат оси ШАЛ  
 $\Delta X < 8$  м,  $\Delta Y < 8$  м

# Экспериментальные оценки точности основных параметров ШАЛ

## 2. Разделение установки Тунка-133 на 2 под-установки:

а) нечетные детекторы

б) четные детекторы -

сравнение результатов обработки двух под-установок:

M:	$E_0 > 10^{16}$ эВ:	Расстояние между осями ШАЛ	$\Delta R < 8$ м	
		Разница	$\Delta \lg E_0 < 0.033$	(8%)
	$E_0 > 3 \cdot 10^{16}$ эВ:	Расстояние между осями ШАЛ	$\Delta R < 6$ м	
		Разница	$\Delta \lg E_0 < 0.017$	(4%)
L:	$E_0 > 3 \cdot 10^{16}$ эВ	Расстояние между осями ШАЛ	$\Delta R < 13$ м	
		Разница	$\Delta \lg E_0 < 0.051$	(12%)

# Накопление данных.

5 зимних сезонов: 2009-2010 , 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013, 2013-2014

262 ясных безлунных ночи

~ 1540 часов наблюдений с частотой триггера ~ 2 Гц

~ 10 000 000 триггерных событий

Отбор событий:

$$\theta \leq 45^\circ$$

$$R_{\text{core}} < 450 \text{ м:}$$

~ 270 000 events with  $E_0 > 6 \cdot 10^{15} \text{ eV}$  – 100% efficiency

~ 99 000 events  $E_0 > 10^{16} \text{ eV}$

~ 4000 событий с  $E_0 > 5 \cdot 10^{16} \text{ eV}$

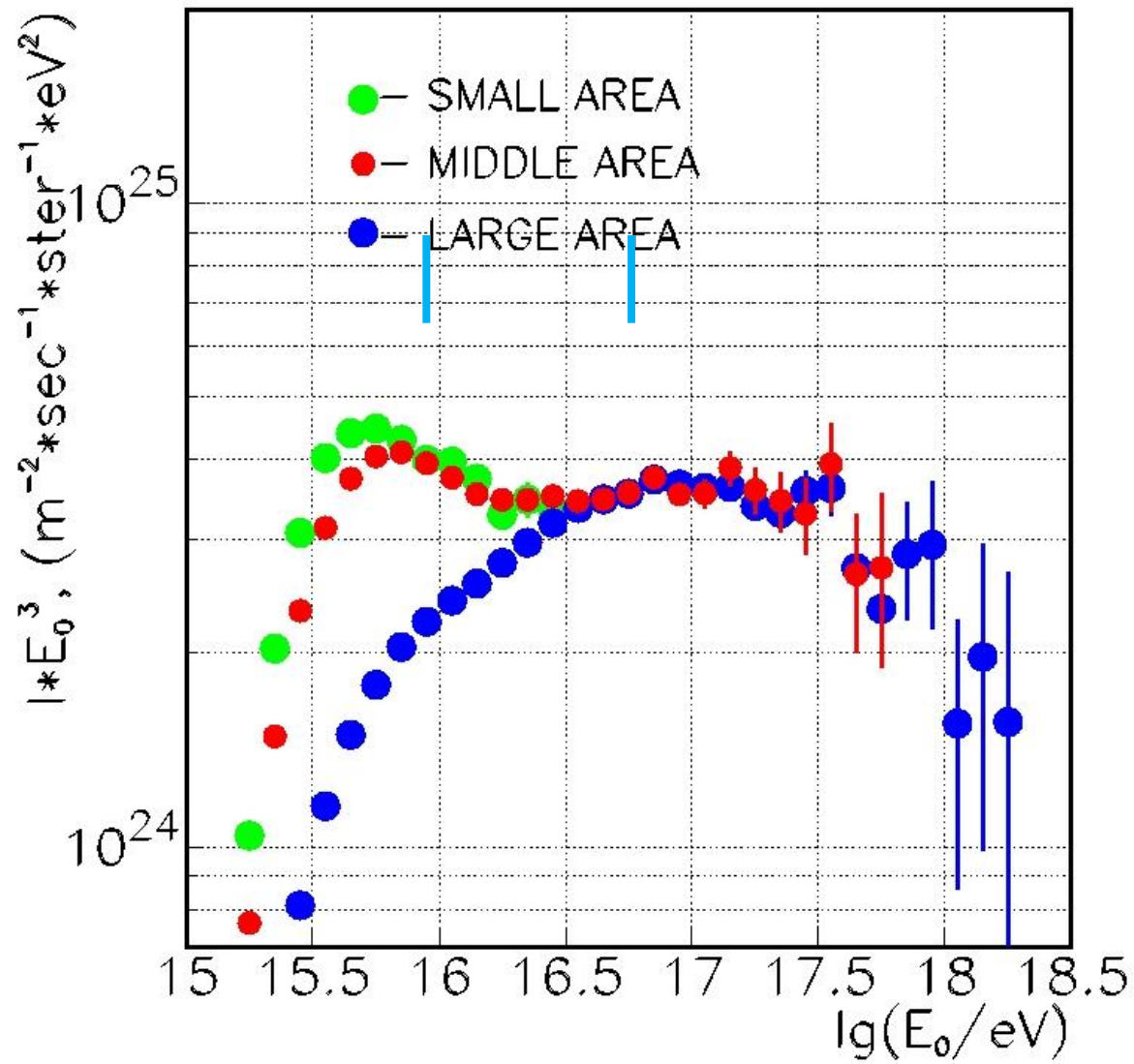
~ 983 events  $E_0 > 10^{17} \text{ eV}$

$$R_{\text{core}} < 800 \text{ м:}$$

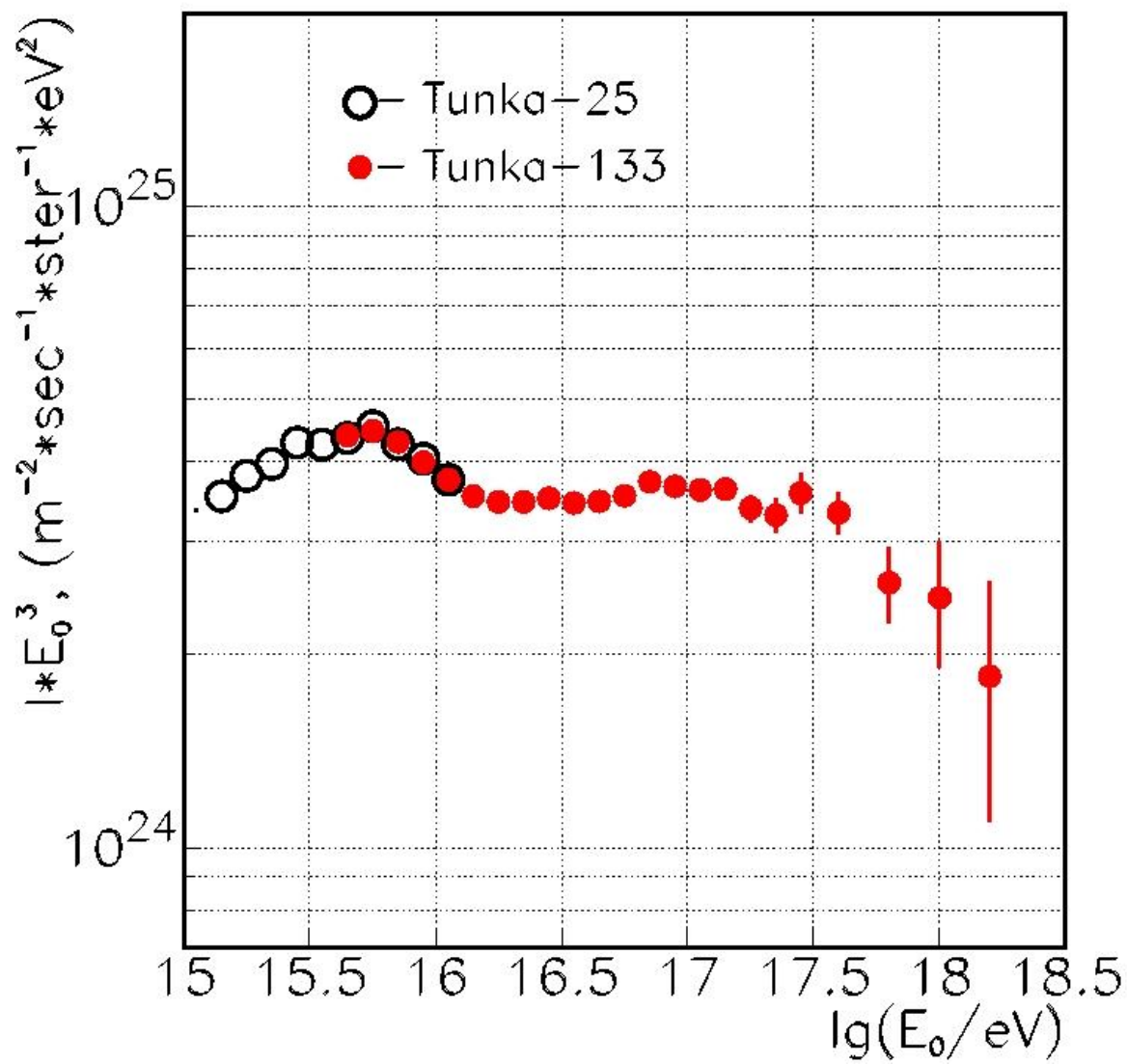
~ 12400 событий с  $E_0 > 5 \cdot 10^{16} \text{ eV}$

~ 3000 events  $E_0 > 10^{17} \text{ eV}$

# Построение комбинированного спектра

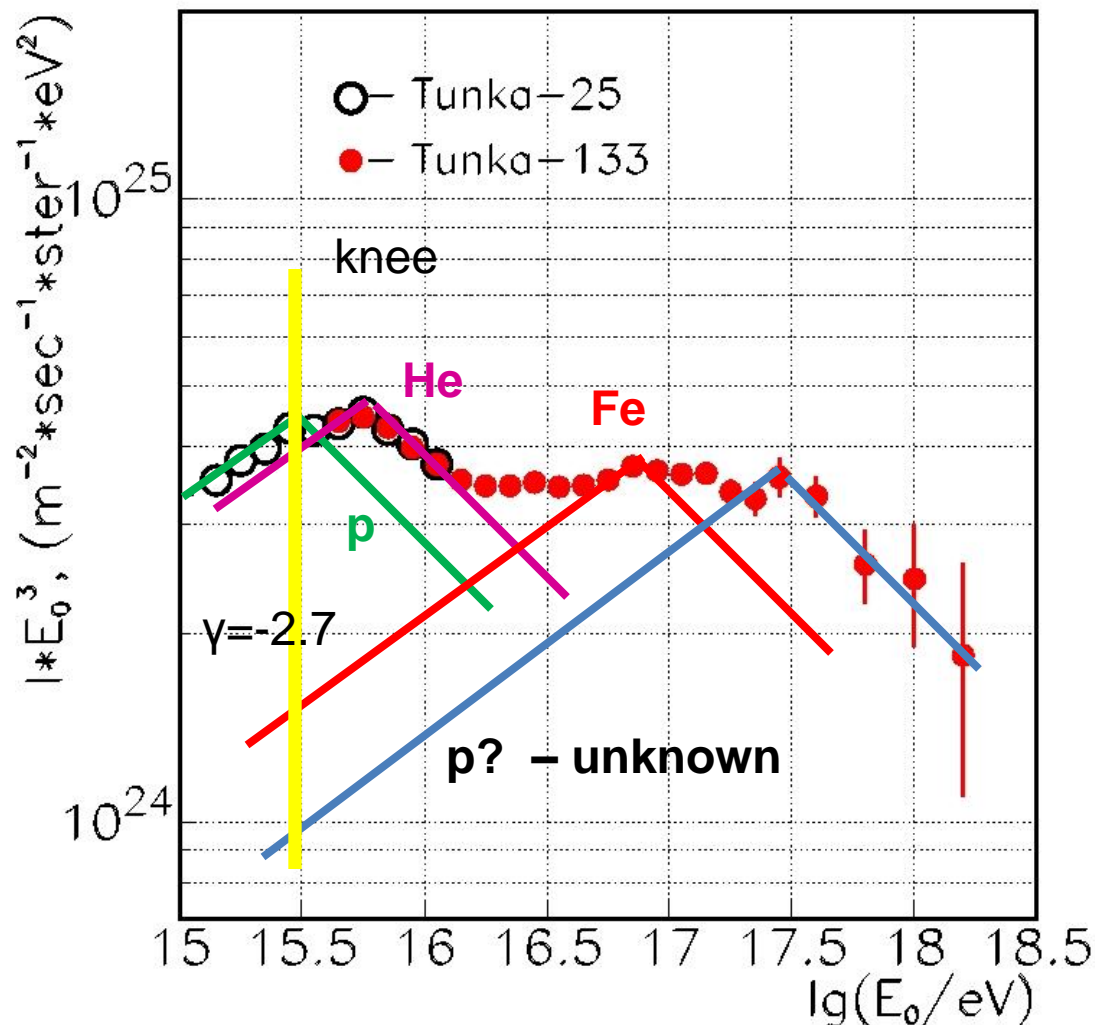


# Комбинированный дифференциальный первичный энергетический спектр





# Энергетический спектр: Упрощенная трактовка



Assuming the similar spectra of all the components terminated at the energy  $E_t = Z \cdot 3 \cdot 10^{15}$  eV one can estimate the composition at the knee energy:

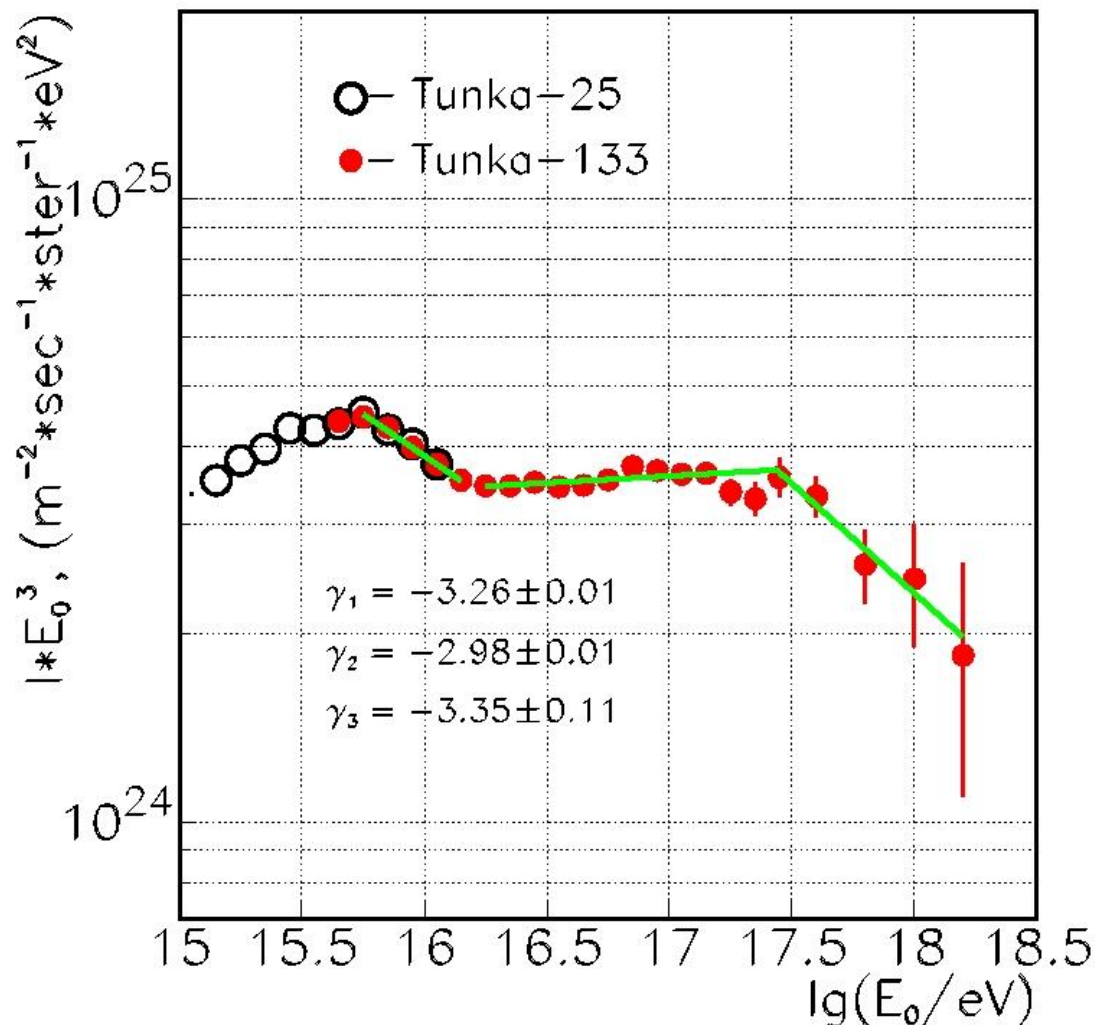
p – 14%  
 He – 41% ...  
 Fe – 12%

**Unknown – 21%**

## Conclusion:

1. **He** dominates in the knee.
2. Unknown component can not be extragalactic or it's spectrum is different.
3. **Fe** domination is not close to 100% at  $8 \cdot 10^{16}$  eV.

# Энергетический спектр: фитирование степенными функциями

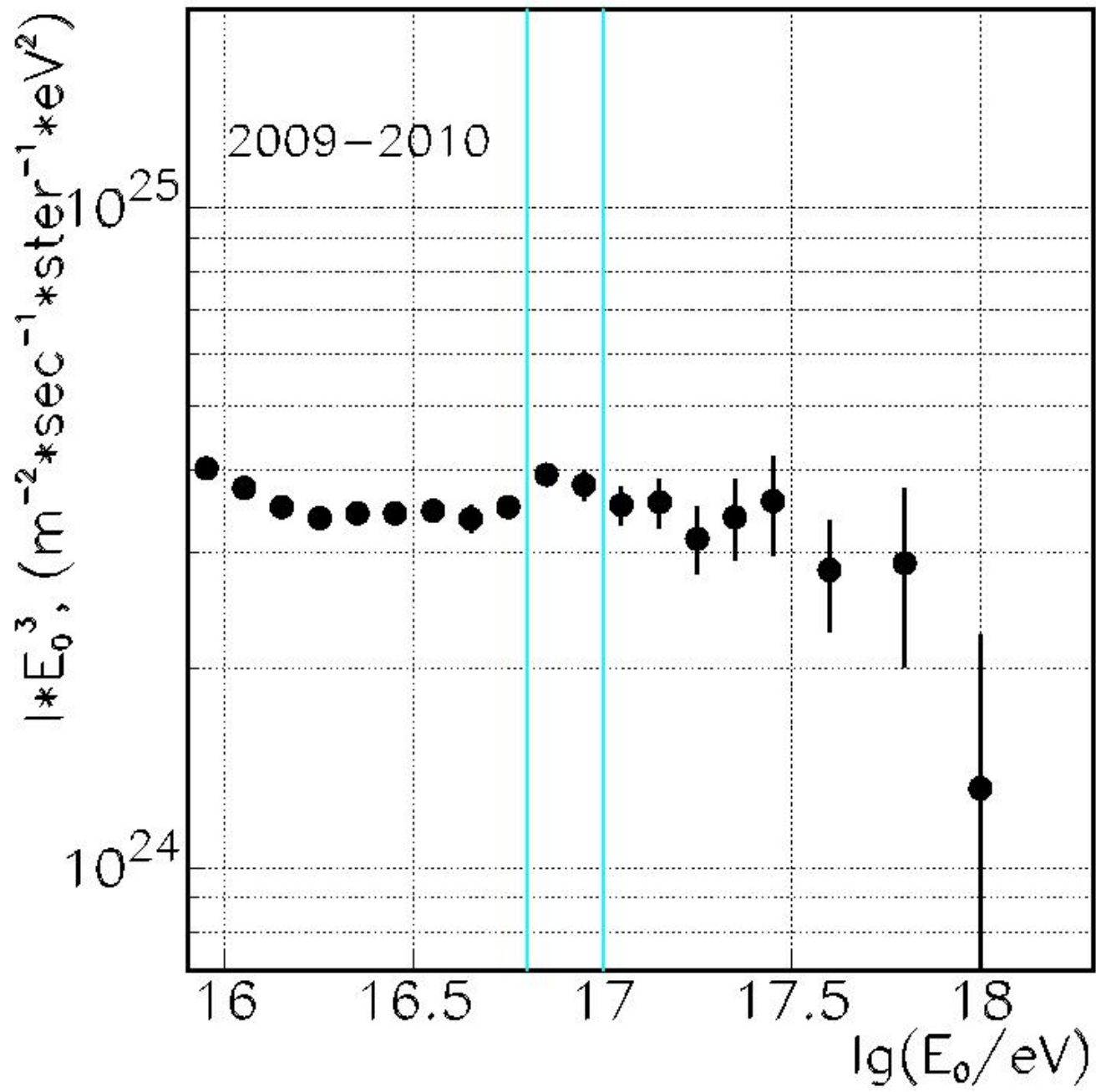


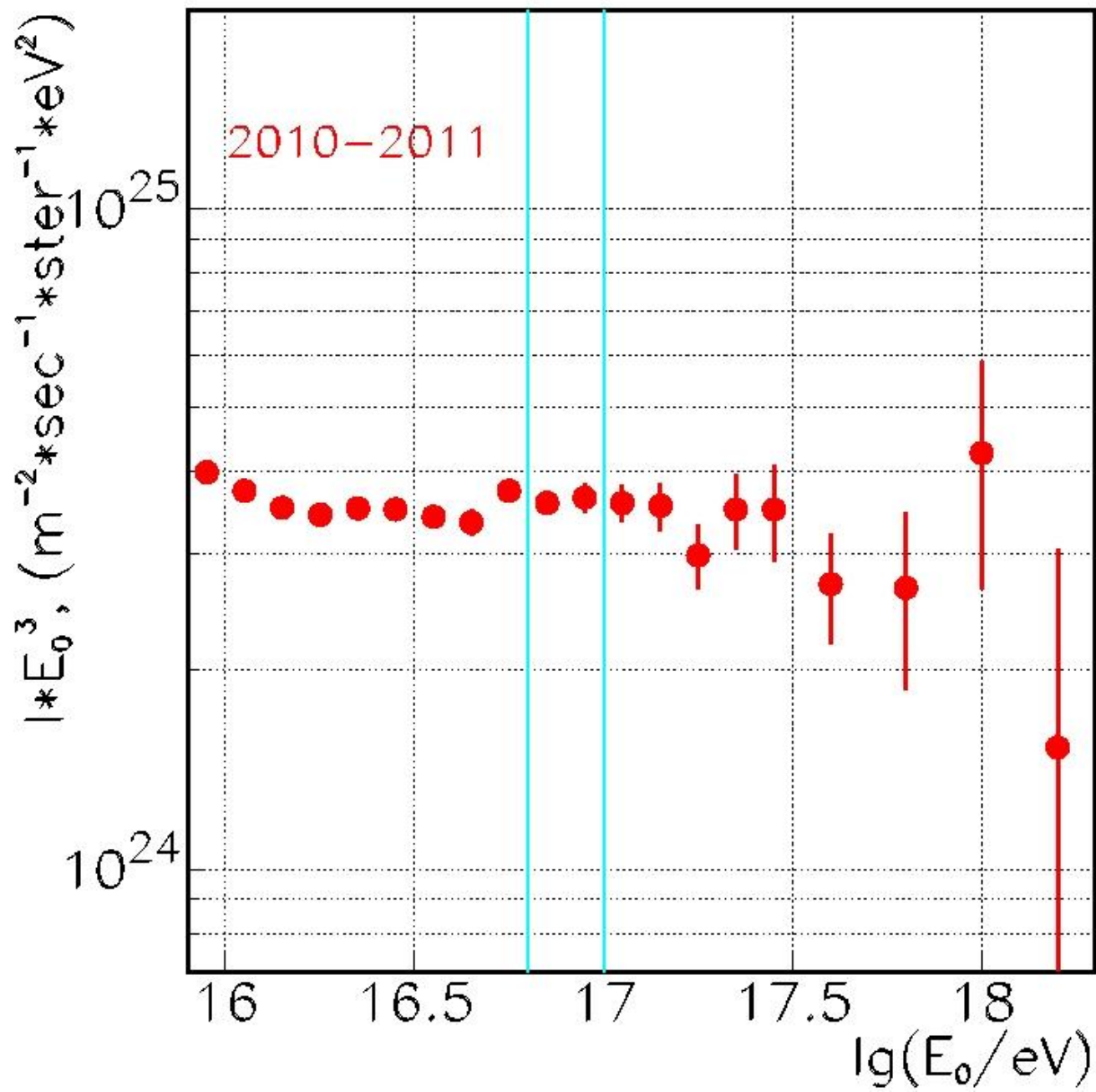
One can see two sharp features at the energies:

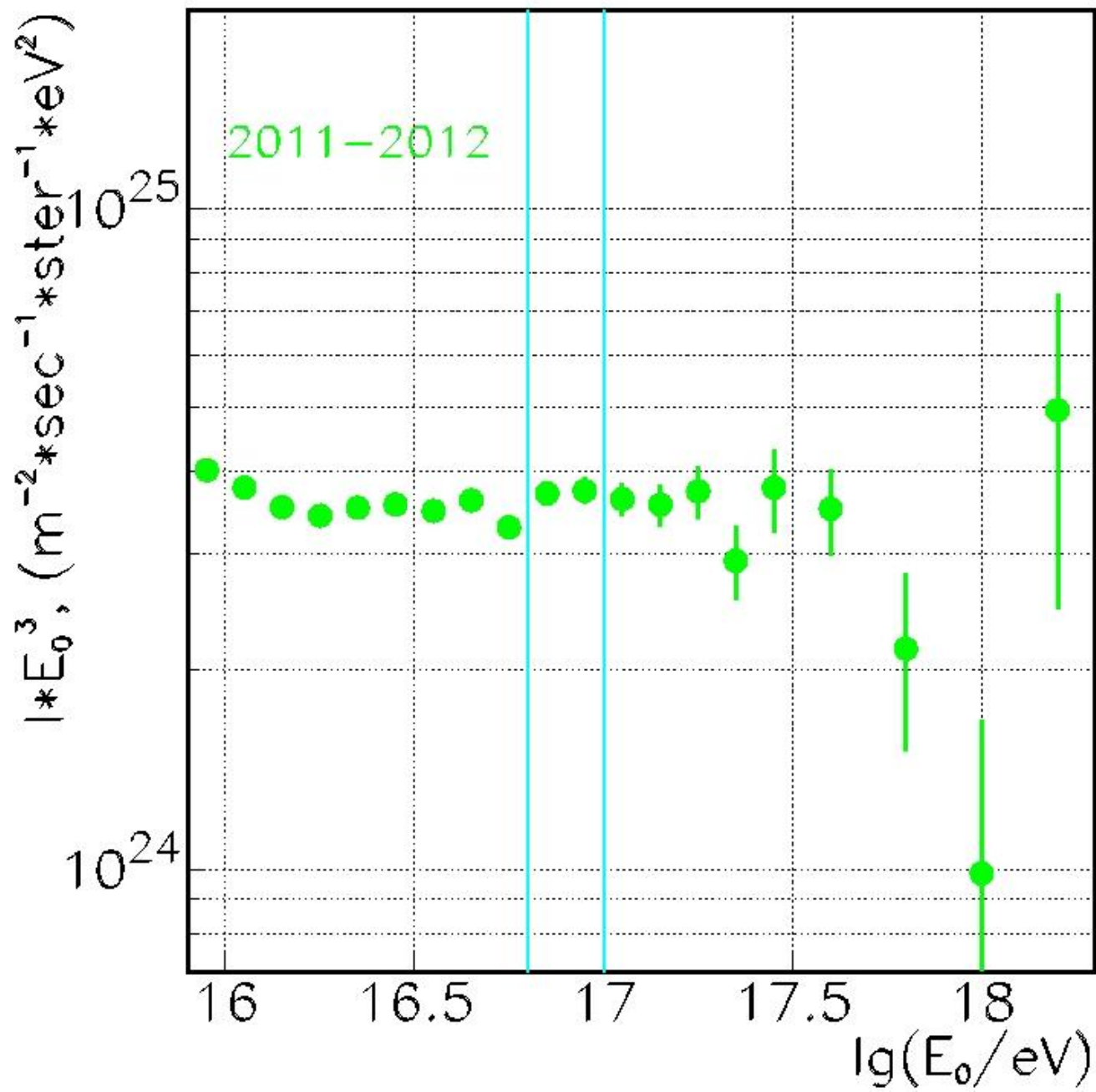
$\sim 2 \cdot 10^{16}$  (first announced by KASCADE-Grande in 2010)

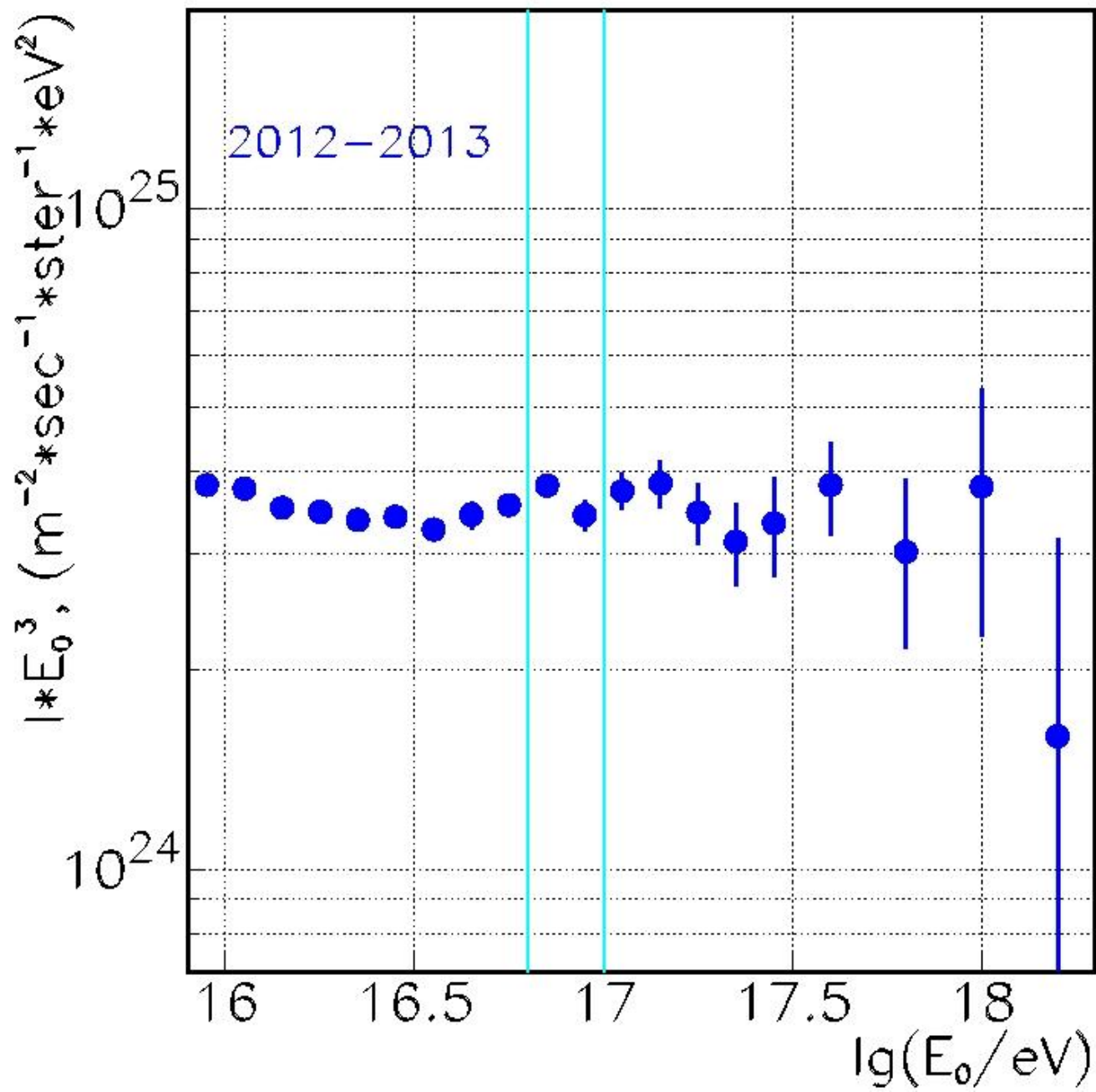
and  $\sim 3 \cdot 10^{17}$  (similar to that, announced by Yakutsk and Fly's Eye in 90<sup>th</sup>)

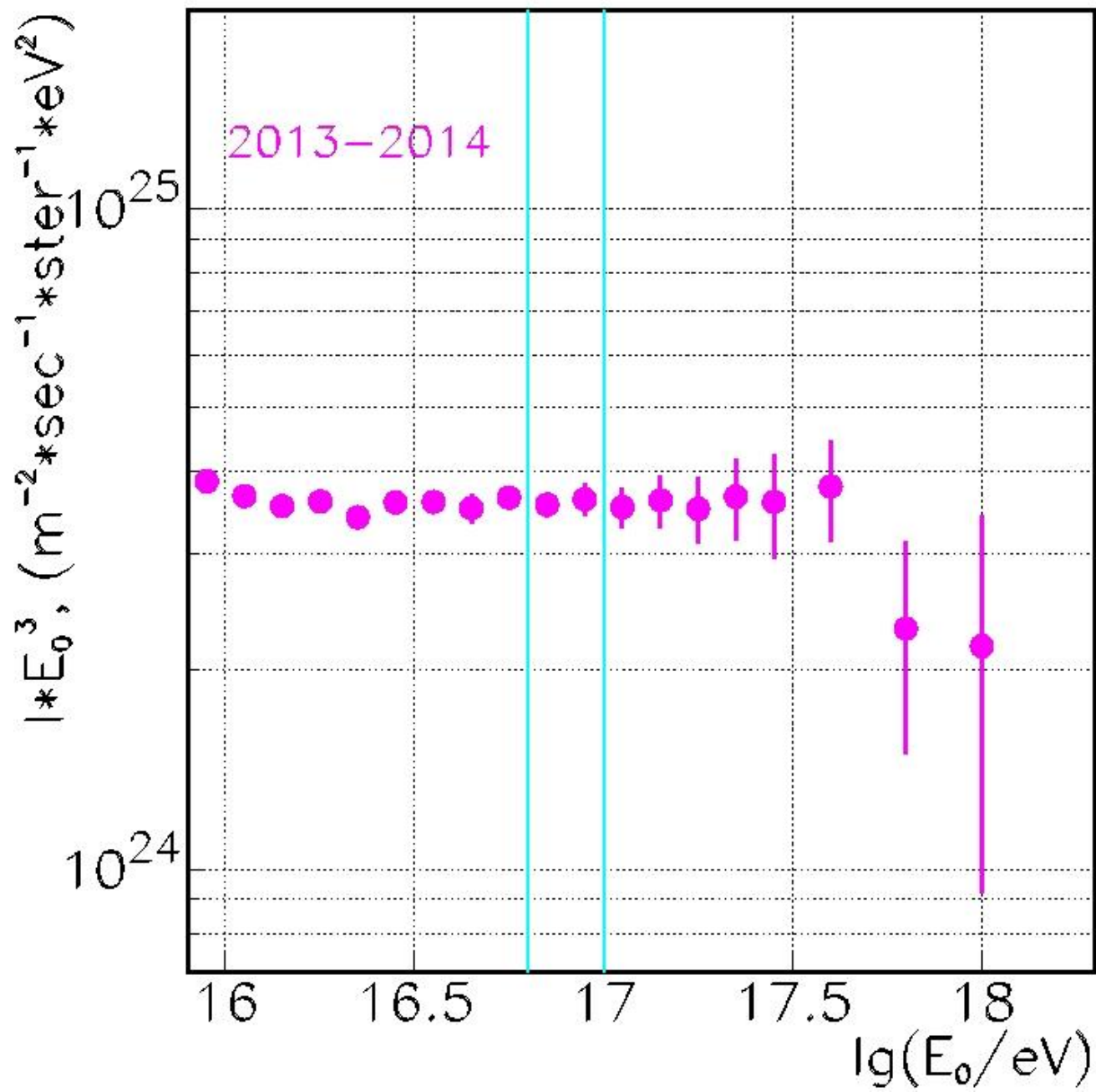
**The power law index at  $E_0 > 10^{17}$  is similar to that obtained by the Giant Experiments: TA, HiRes, Auger.**

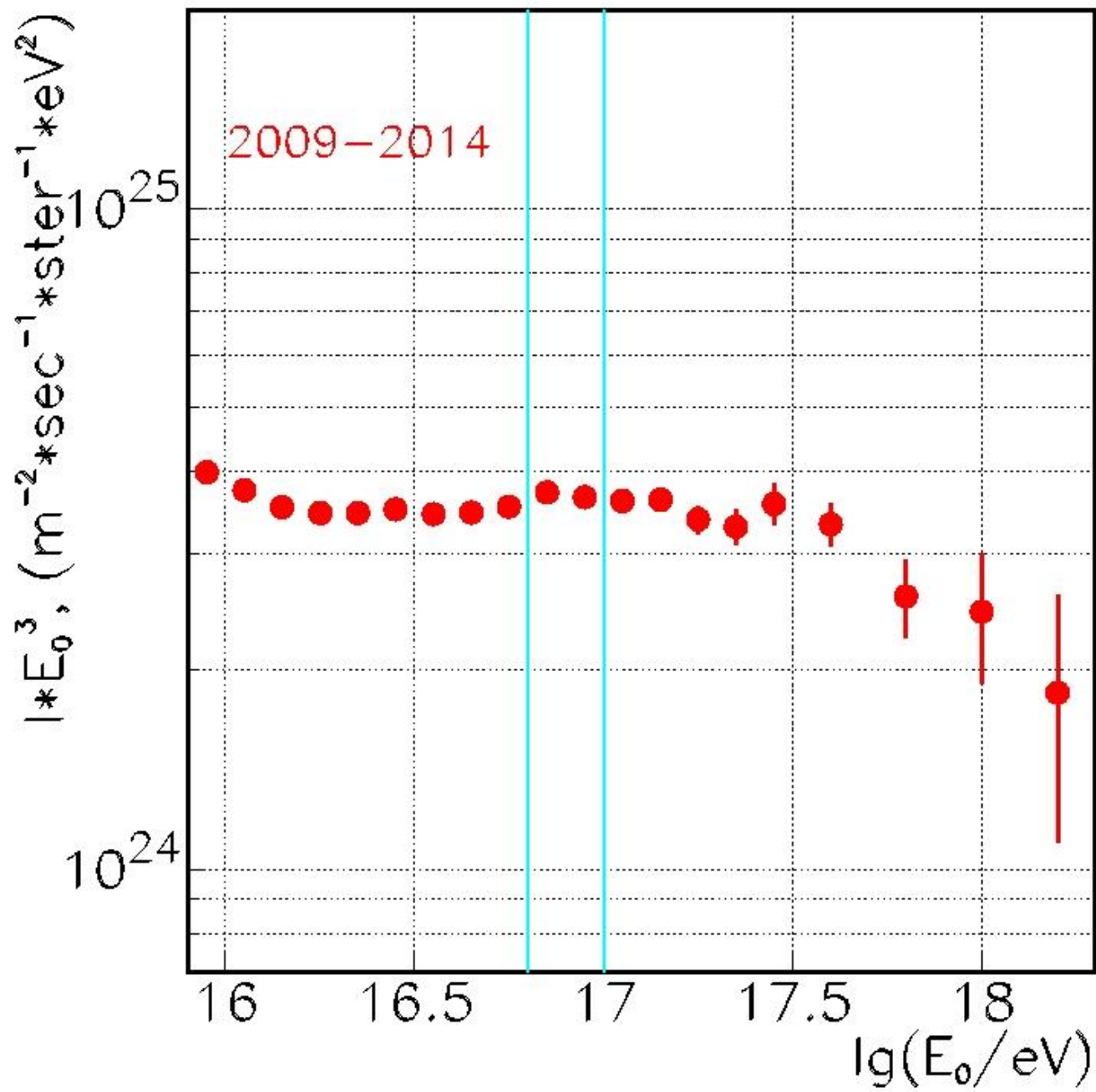






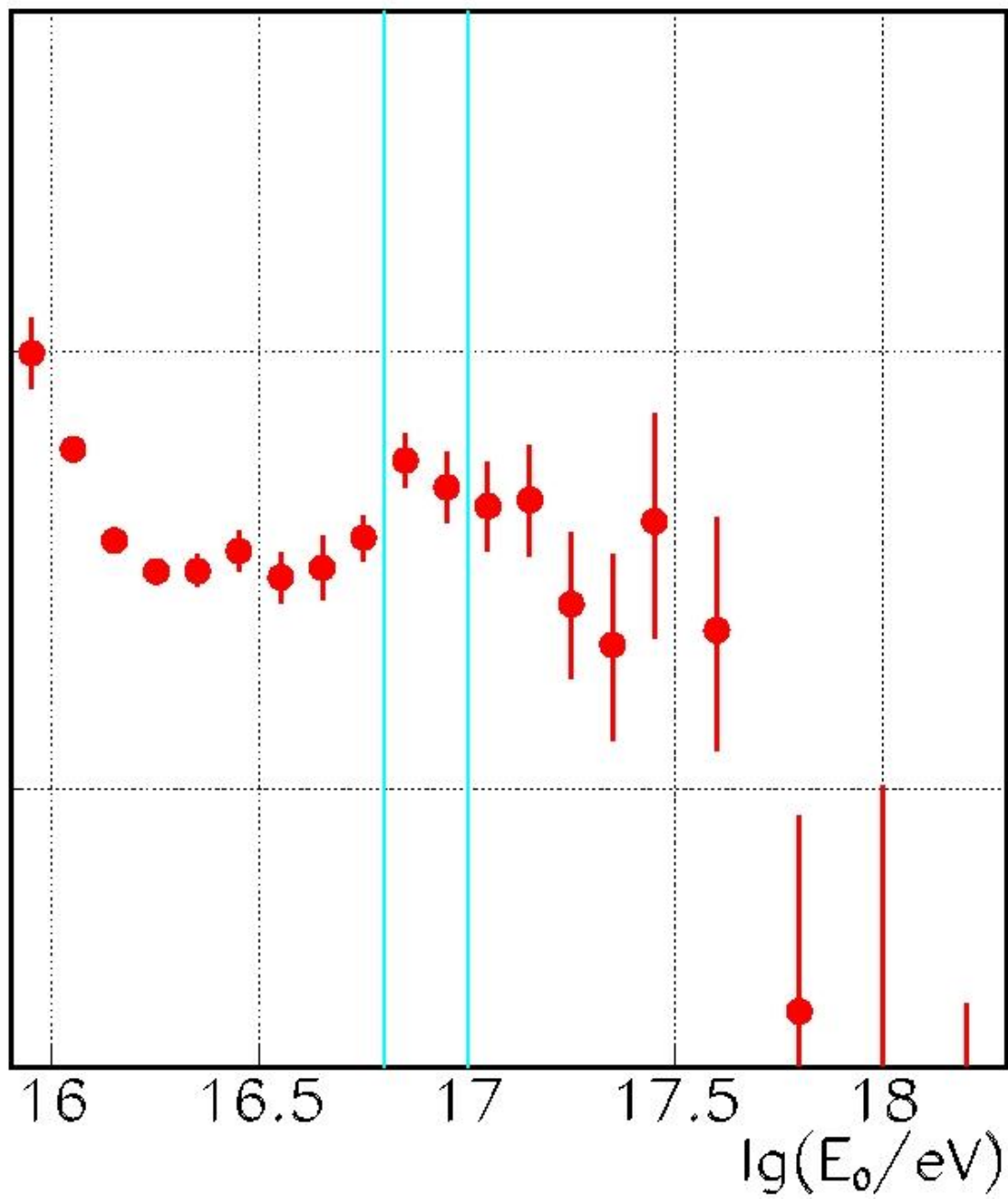




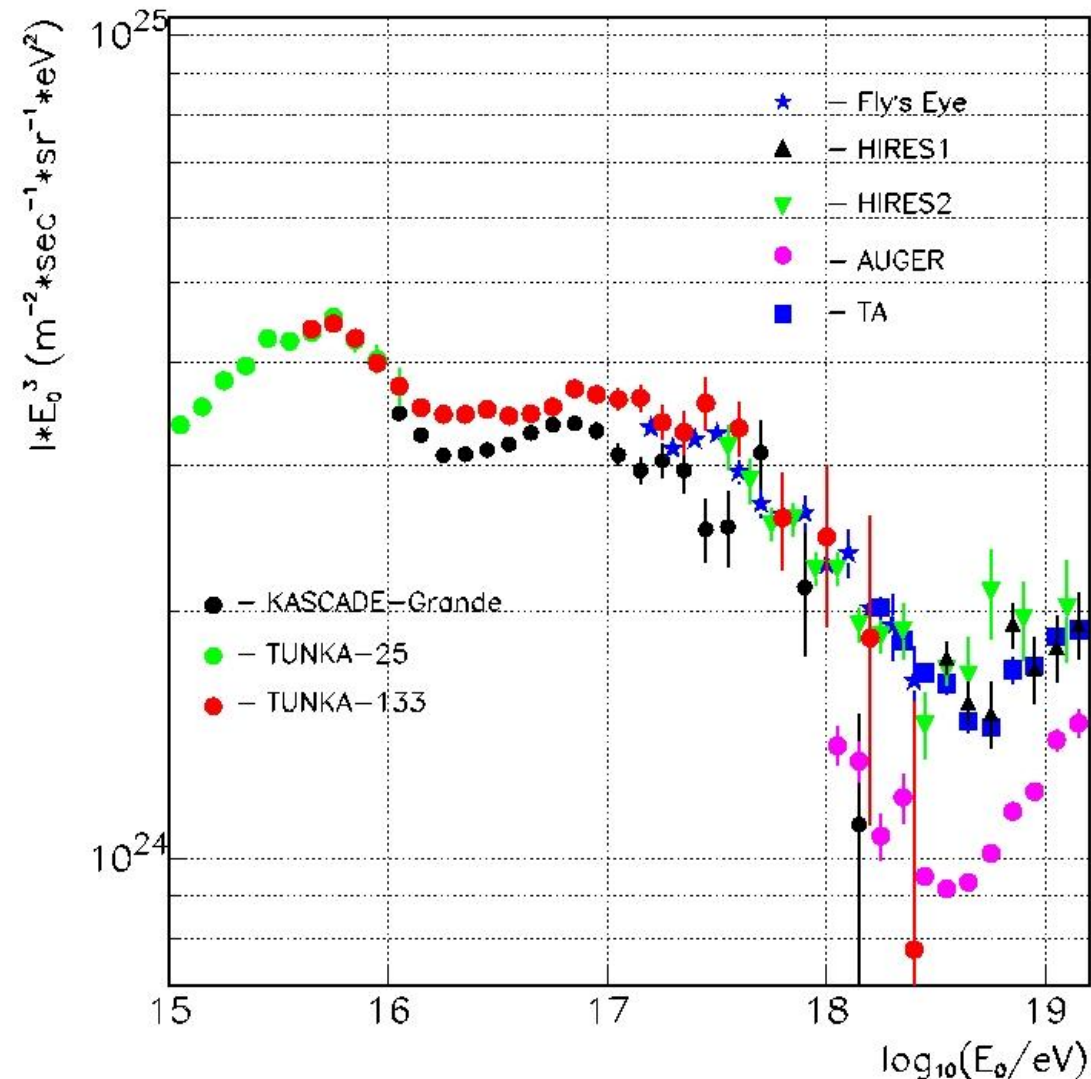




$I * E_0^3, (m^{-2} * sec^{-1} * ster^{-1} * eV^2)$



# Энергетический спектр: сравнение с другими работами



Согласие с  
KASCADE-Grande  
Согласие со старой работой  
Fly's Eye и HiRes и TA .

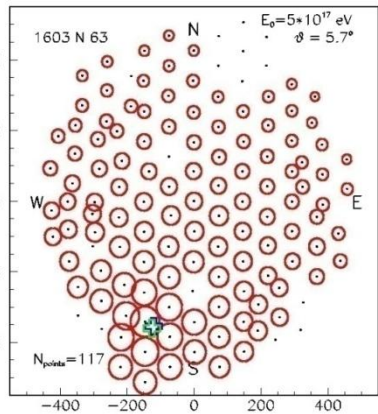
В этой же области:  
GAMMA  
Ice-TOP  
TA по черенковскому свету

# Массовый состав:

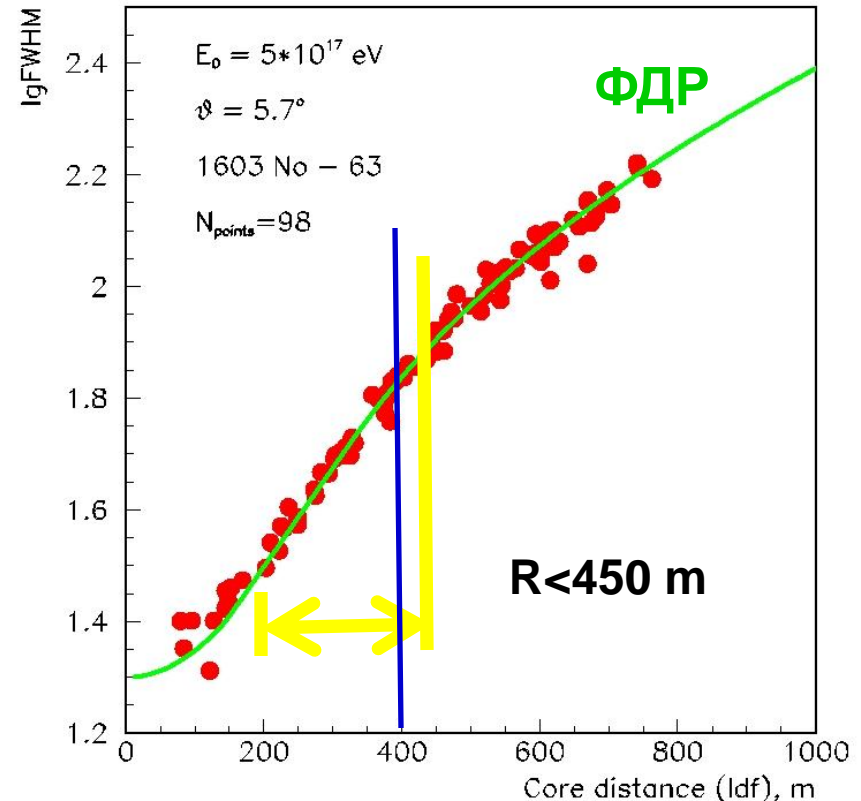
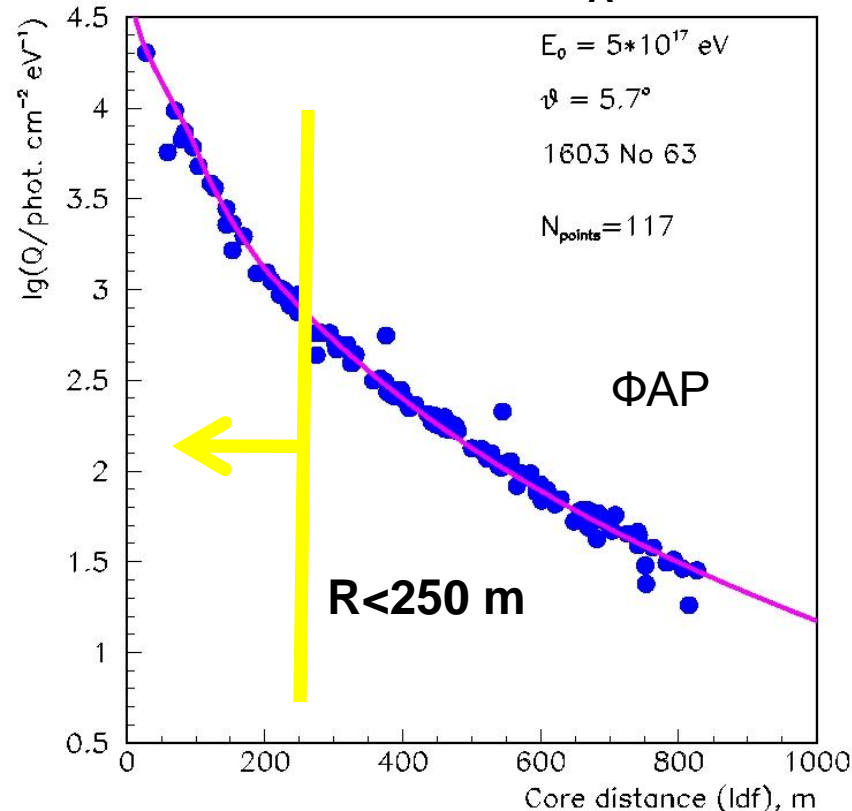
## Два метода определения $X_{\max}$ :

При обработке – требование разницы в  $X_{\max}$   
по двум методам  $\leq 25 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$

Длительность импульсов на расстоянии  
400 м от оси ШАЛ:  $\tau_{\text{eff}}(400)$



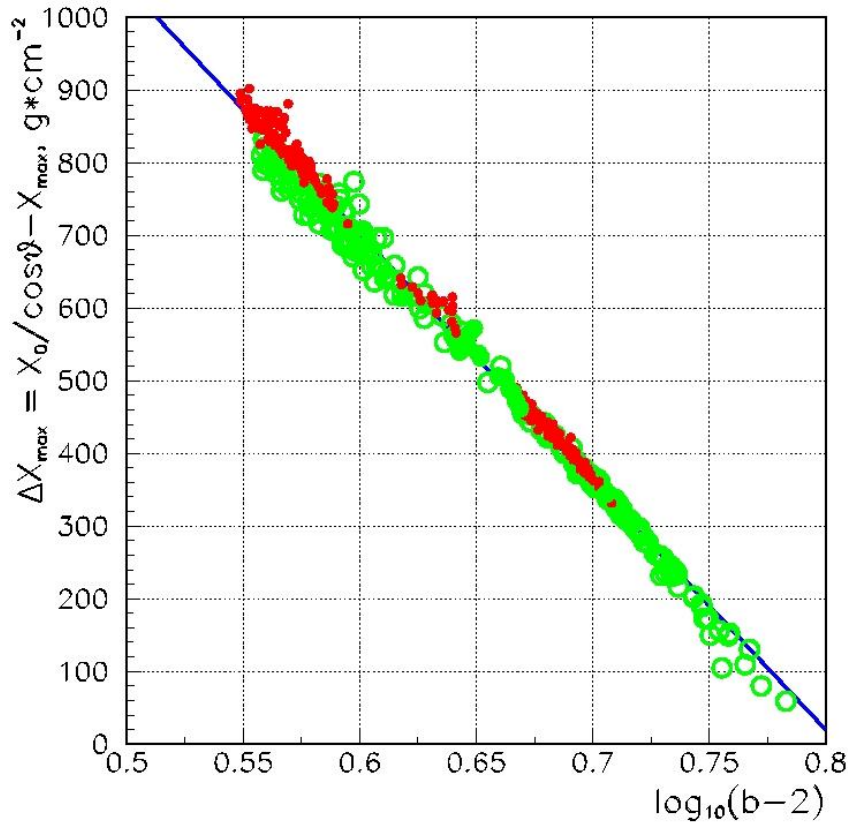
### Крутизна ФАР: $b_A$



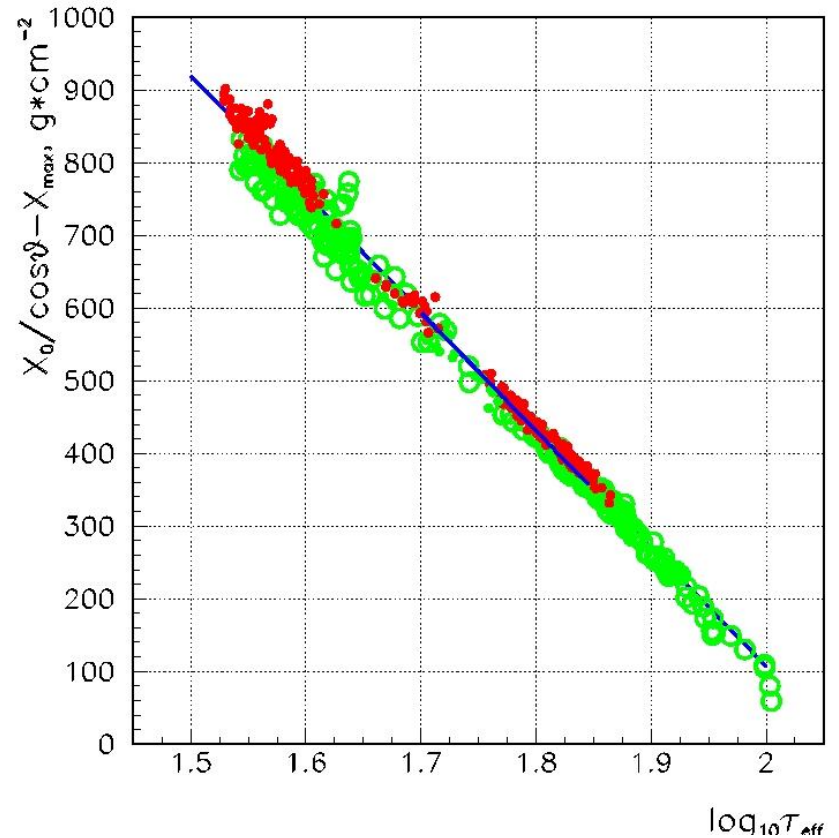
# CORSIKA

(Корреляции не зависят ни от модели, ни от энергии, ни от зенитного угла)

$\Delta X_{\max}$  ОТ  $b_A$



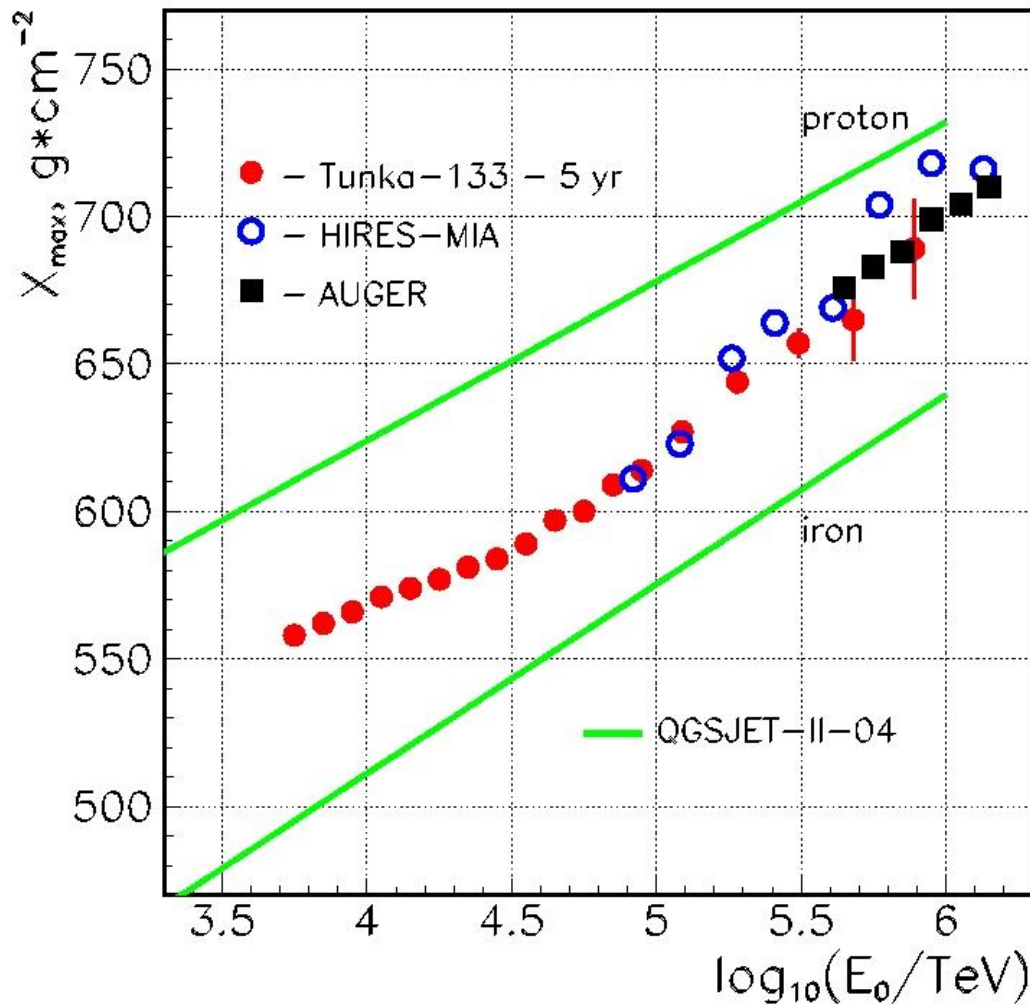
$\Delta X_{\max}$  ОТ  $T_{\text{eff}}(400)$

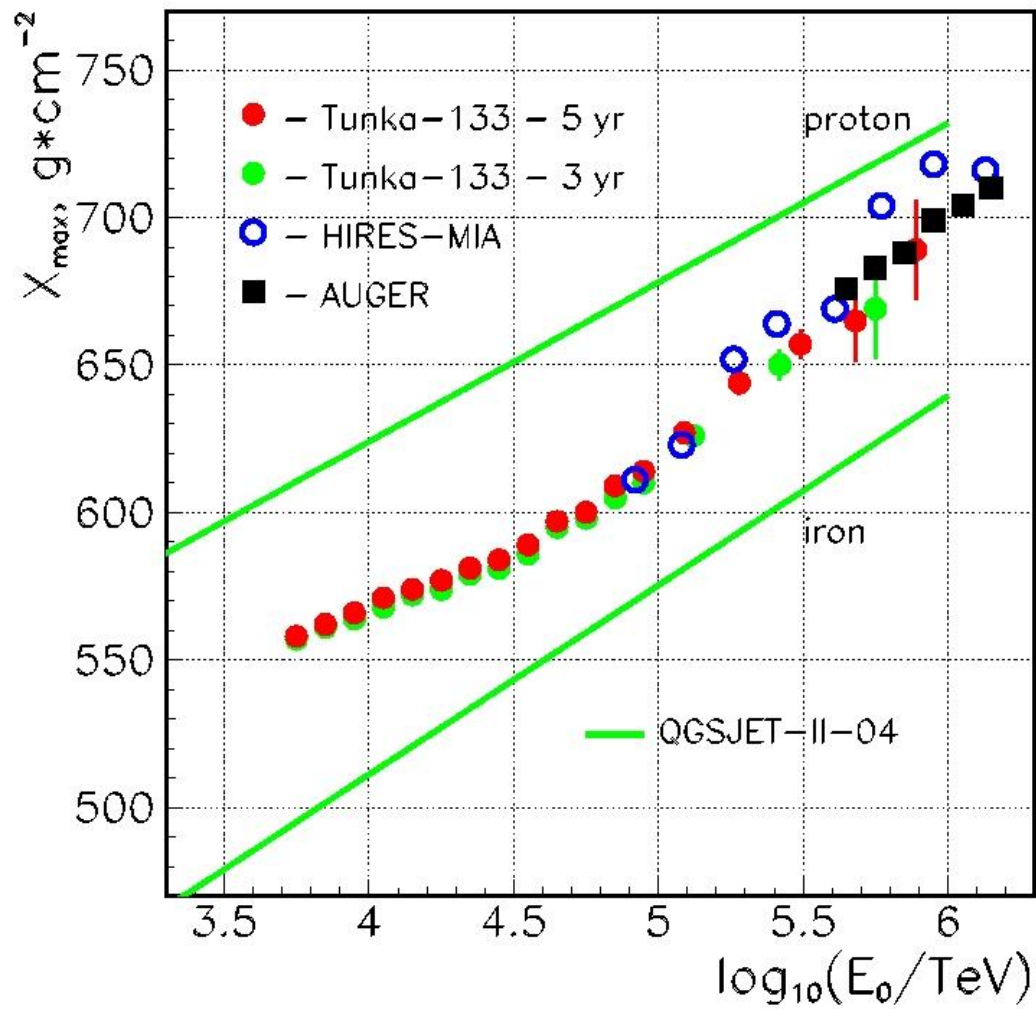


~ 500 событий –  $10^7 \text{ GeV} < E_0 < 10^8 \text{ GeV}$ ,  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$   
Зеленые точки – p, красные – Fe

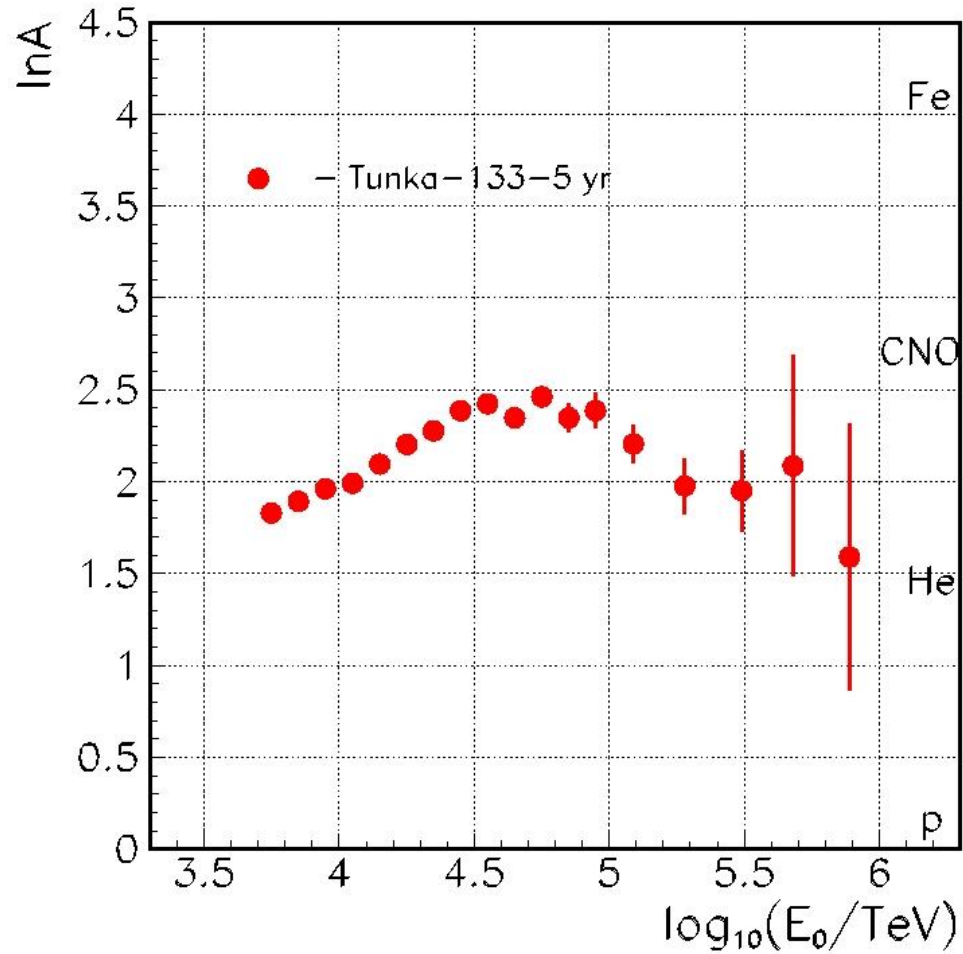
# $\langle X_{\max} \rangle$ vs. $E_0$

Agreement with HiRes-MIA and Auger results at  $10^{17} - 10^{18}$  eV

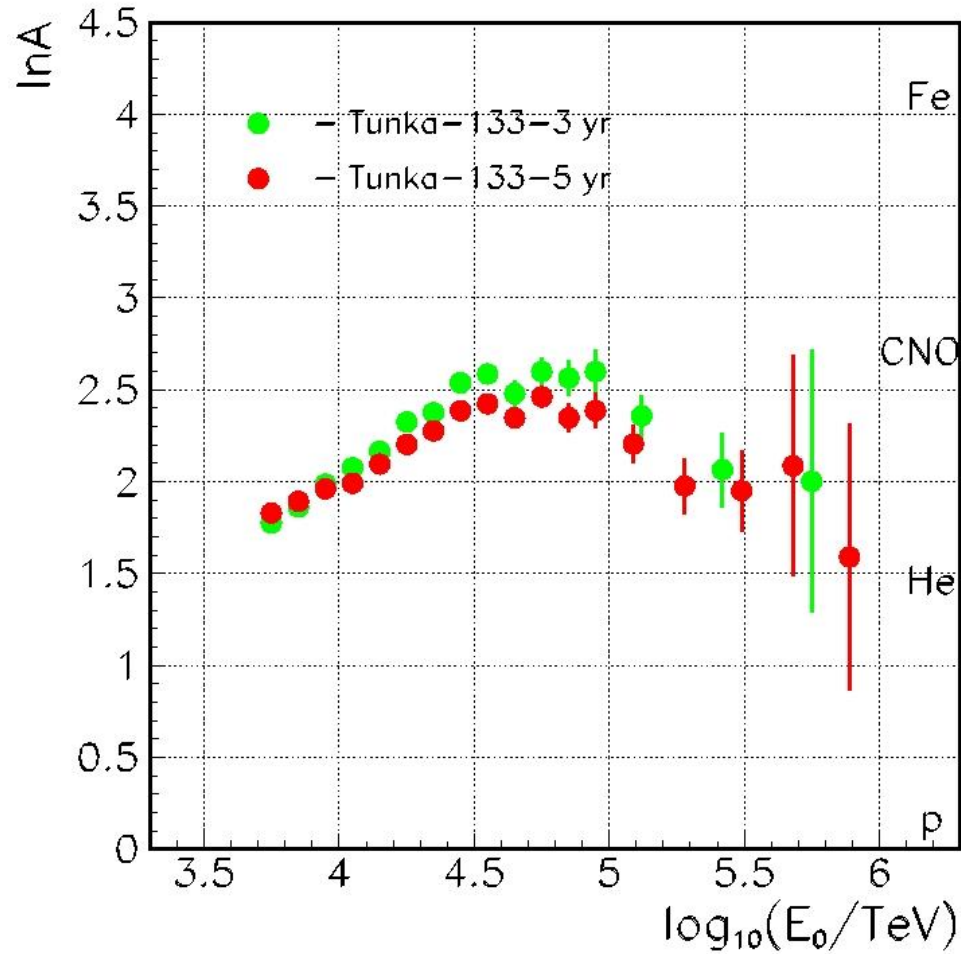




# EXPERIMENT: MEAN $\langle \ln A \rangle$ vs. $E_0$

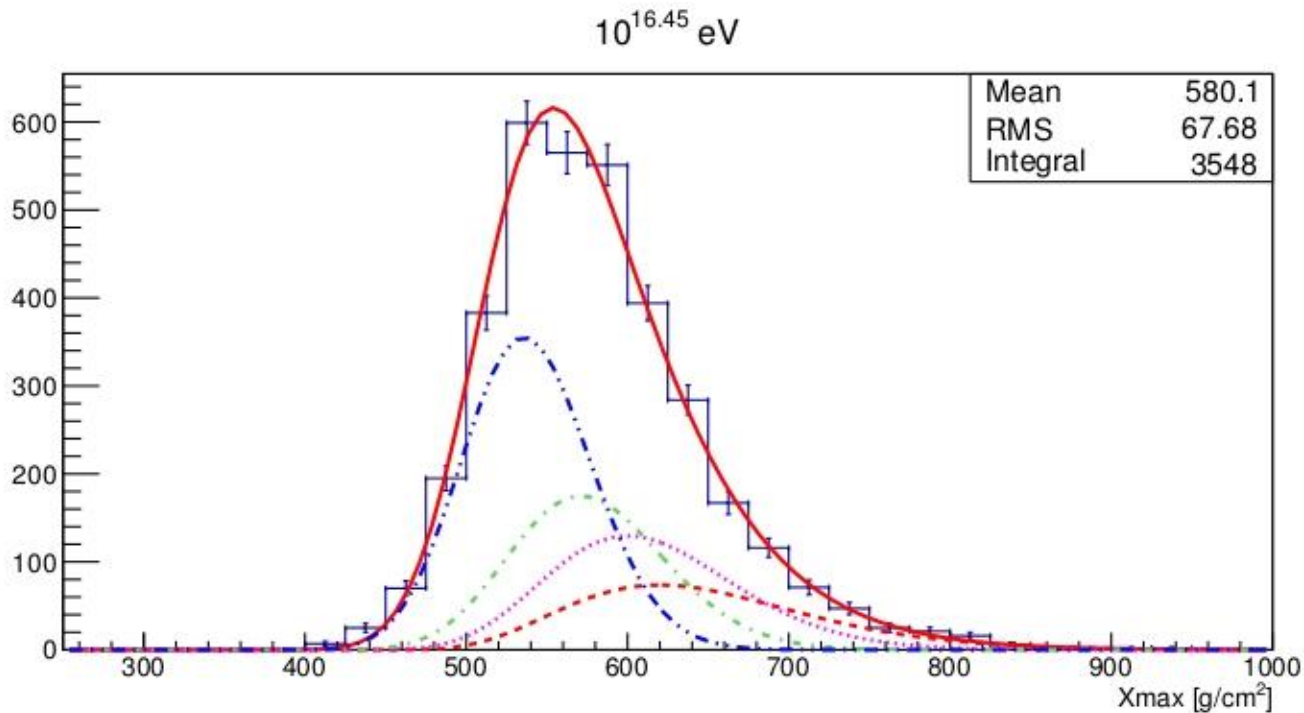


# EXPERIMENT: MEAN $\langle \ln A \rangle$ vs. $E_0$



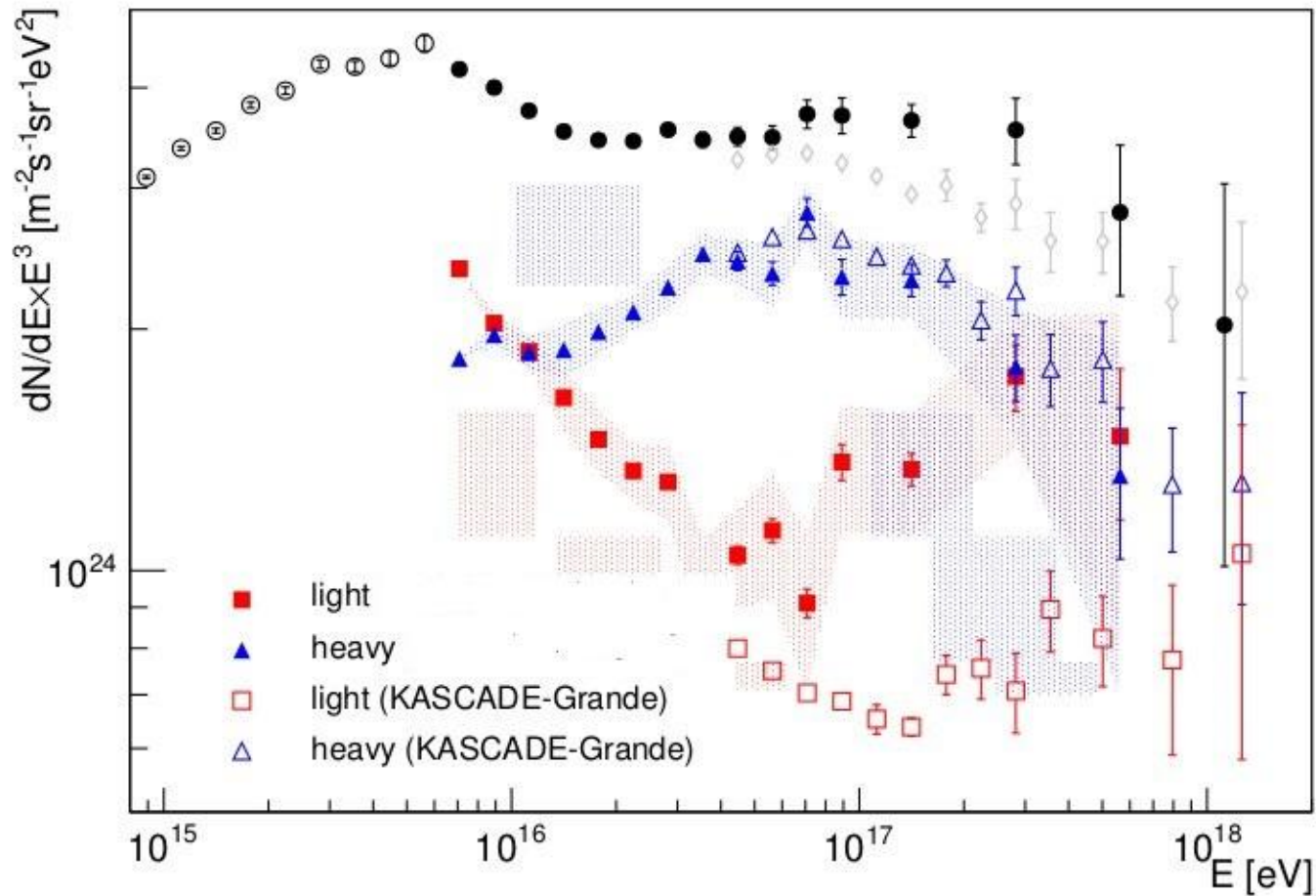


# ANALYSIS of $X_{\max}$ DISTRIBUTIONS (2013) PRELIMINARY



Fit with weighted sum of 4 group MC simulated distributions: Fe, CNO, He, p

# Спектры легкой (p+He) и тяжелой (все остальные) компонент КЛ (2013)



# ВЫВОДЫ

1. Спектр в диапазоне  $5 \cdot 10^{15}$  to  $10^{18}$  эВ не описывается единым степенным законом:

$$\gamma = 3.26 \pm 0.01$$

$$\gamma = 2.98 \pm 0.01$$

$$\gamma = 3.35 \pm 0.11$$

$$5 \cdot 10^{15} < E_0 < 2 \cdot 10^{16} \text{ эВ.}$$

$$2 \cdot 10^{16} < E_0 < 3 \cdot 10^{17} \text{ эВ.}$$

$$E_0 > 3 \cdot 10^{17} \text{ эВ.}$$

2. Согласие с KASCADE-Grande.

3. На предельно больших энергиях наилучшее согласие со спектрами Fly's Eye, HiRes и TA.

4. Глубина максимума  $X_{\max}$  не противоречит результатам, полученным по флюоресцентному свету: HiRes-MIA и Auger.

5. Состав утяжеляется от  $10^{16}$  до  $3 \cdot 10^{16}$  эВ и вновь облегчается в диапазоне  $10^{17} - 10^{18}$  эВ.

Thank you!

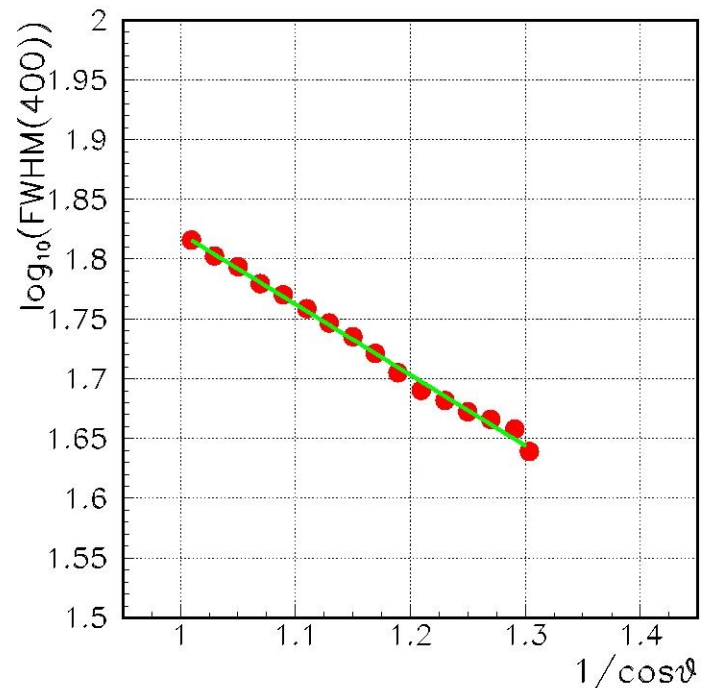
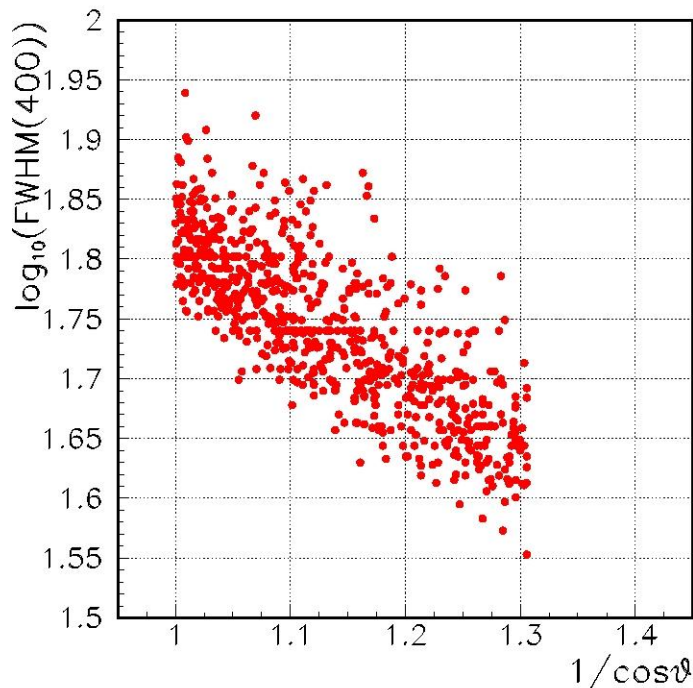


# PHENOMENOLOGICAL APPROACH:

$\tau_{\text{eff}}(400)$  vs. inverse zenith angle

$$E_0 = 3 \cdot 10^{16} \text{ eV}$$

~3600 events:  $16.4 < \log_{10}(E_0/\text{eV}) < 16.5$

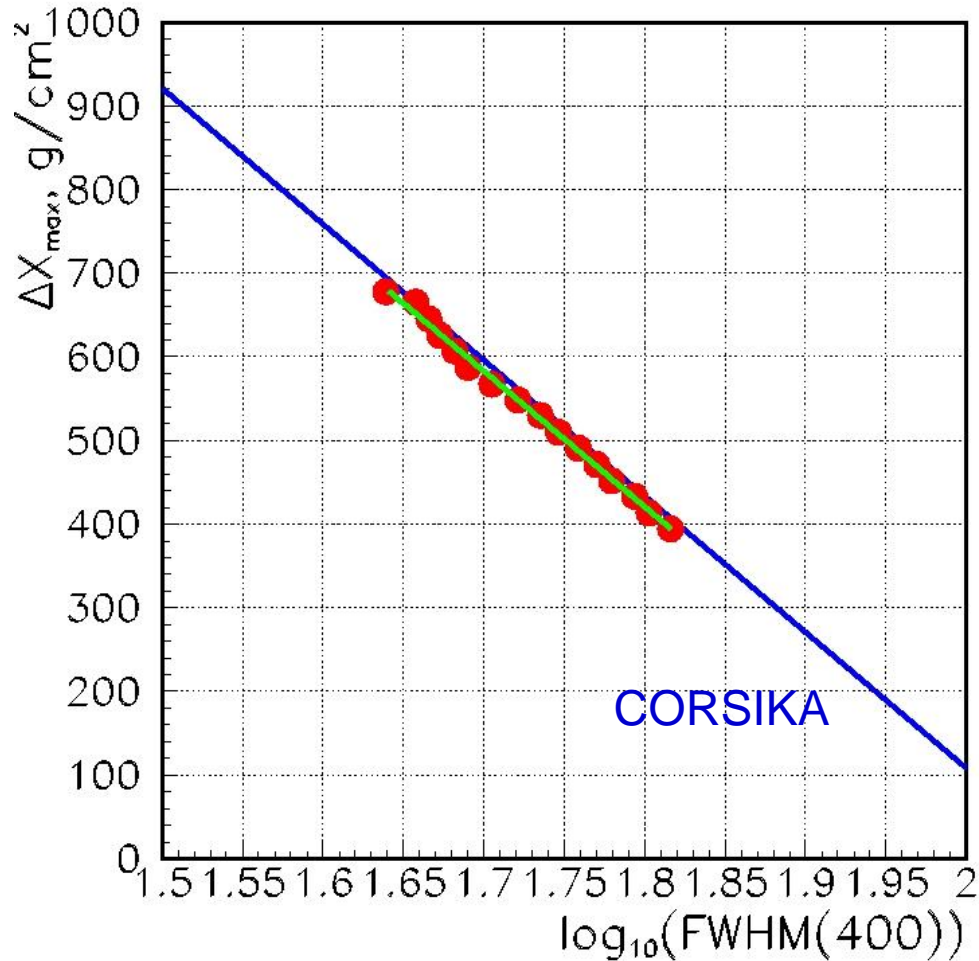


$$\cos\theta \rightarrow \Delta X_{\text{max}} = X_0/\cos\theta - X_{\text{max}}$$

$$X_0 = 965 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$$

Supposed:  $\langle X_{\text{max}} \rangle = 580 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$  for  $E_0 = 3 \cdot 10^{16} \text{ eV}$

# PHENOMENOLOGY: $\Delta X_{\max}$ by $\tau_{\text{eff}}(400)$



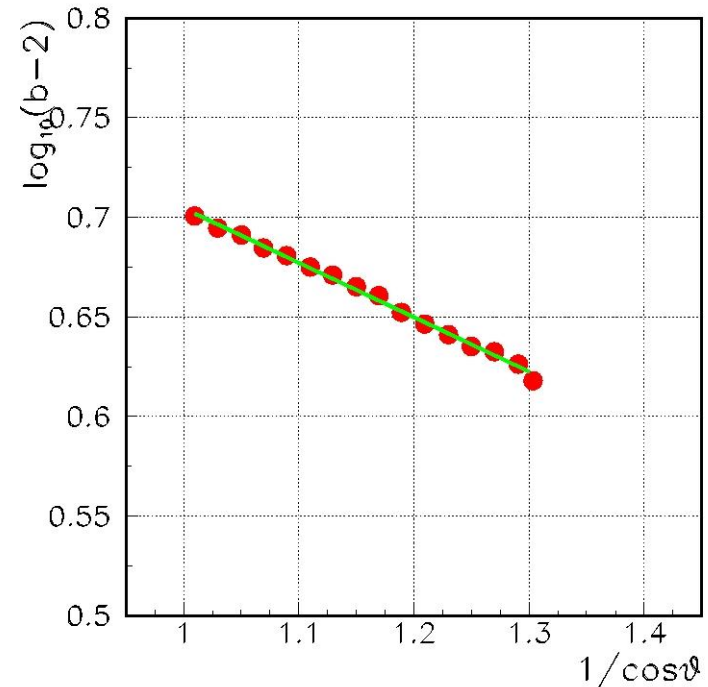
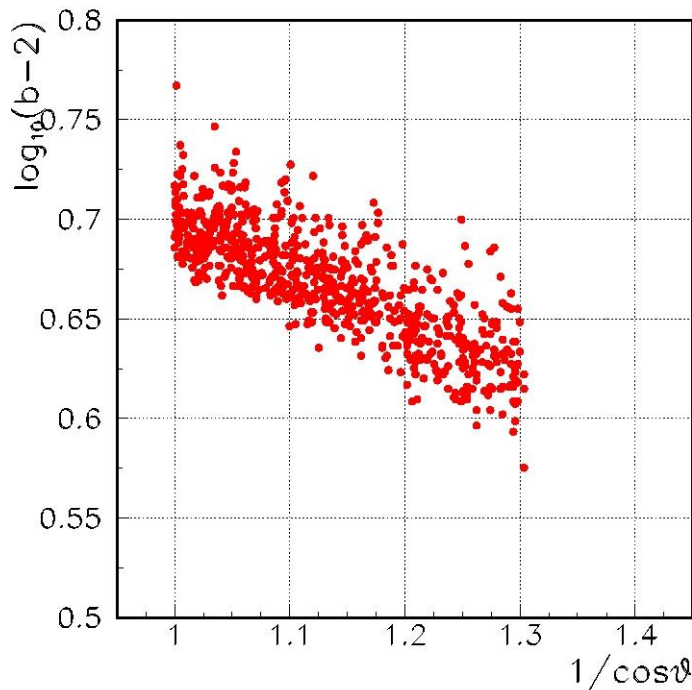
Consistency of  
phenomenological and  
CORSIKA  
simulated correlations

$$\Delta X_{\max} = 3344 - 1624 \cdot \log_{10}(\tau_{400}), \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$$

# PHENOMENOLOGICAL APPROACH: ADF steepness vs. zenith angle

$$E_0 = 3 \cdot 10^{16} \text{ eV}$$

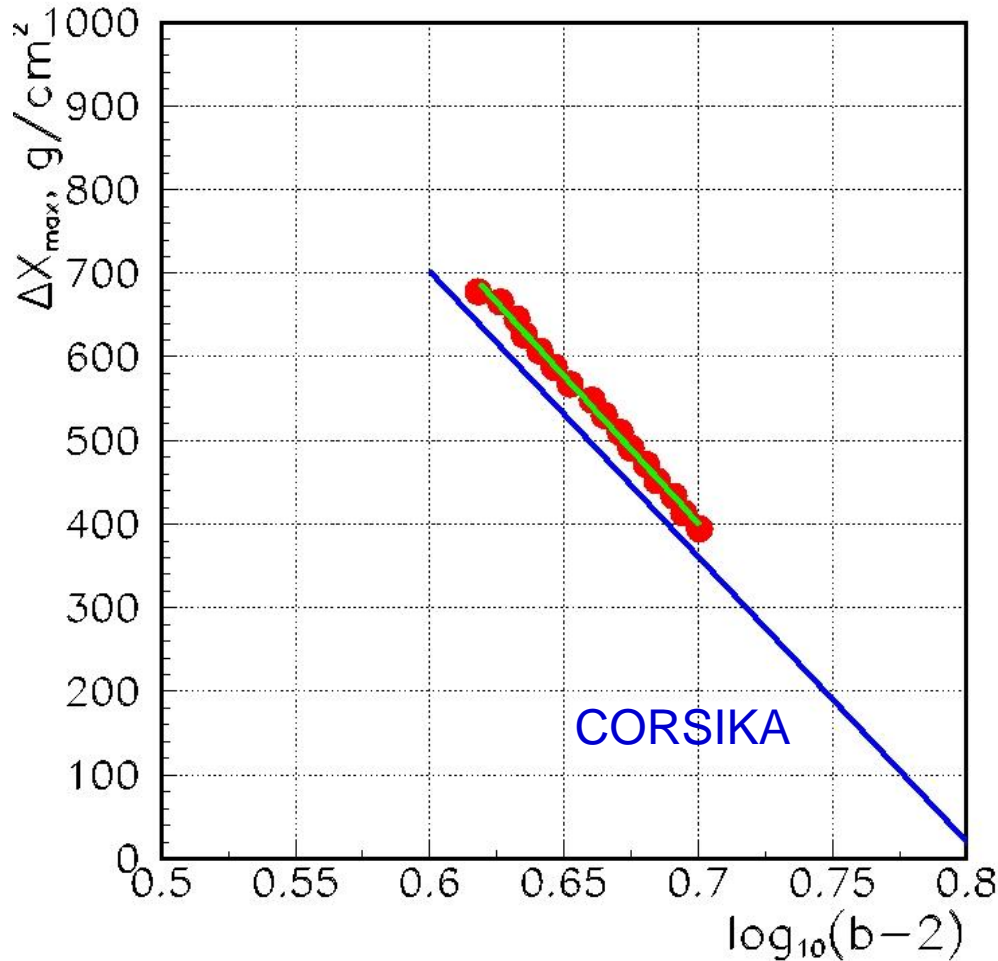
~3600 events:  $16.4 < \log_{10}(E_0/\text{eV}) < 16.5$



$$\cos\theta \rightarrow \Delta X_{\max} = X_0/\cos\theta - X_{\max}$$
$$X_0 = 965 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$$

Supposed:  $\langle X_{\max} \rangle = 580 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$  for  $E_0 = 3 \cdot 10^{16} \text{ eV}$

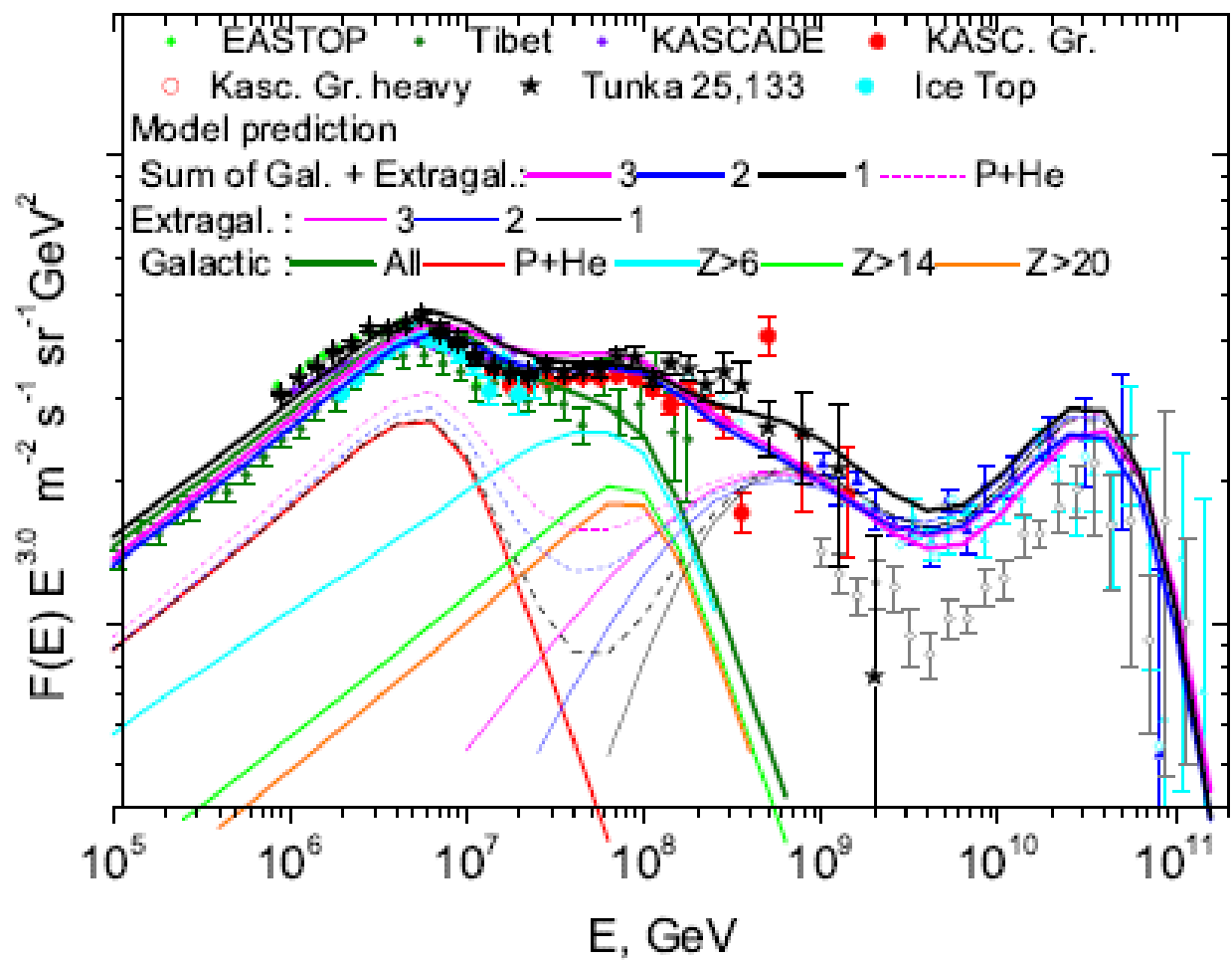
# PHENOMENOLOGY: $X_{\max}$ by the ADF steepness

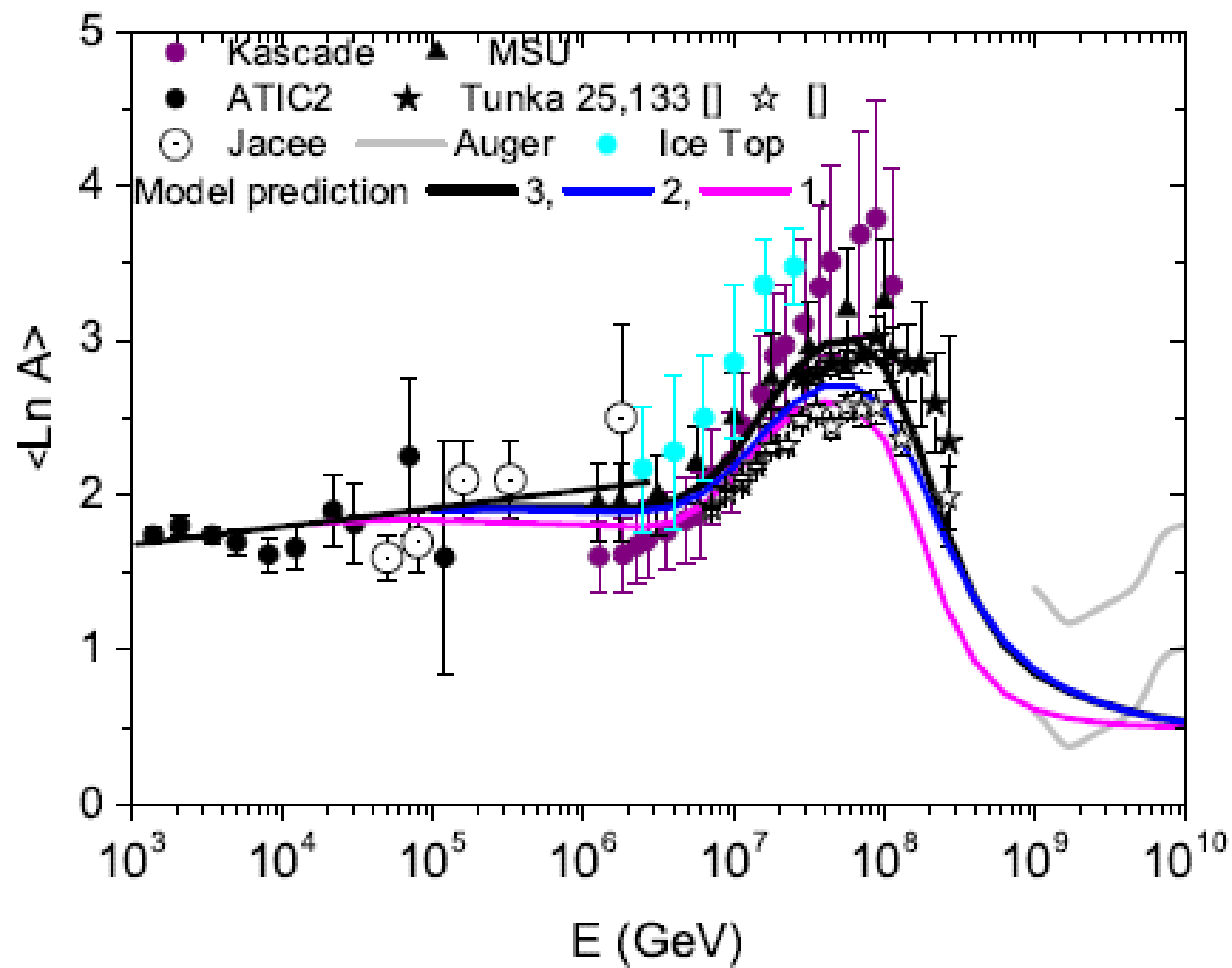


The experimental dependence deviates slightly from the simulated one. This can happen because of the more complicated character of the parameter  $b_A$ .

$$\Delta X_{\max} = 2865 - 3519 \cdot \log_{10}(b_A - 2), \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$$

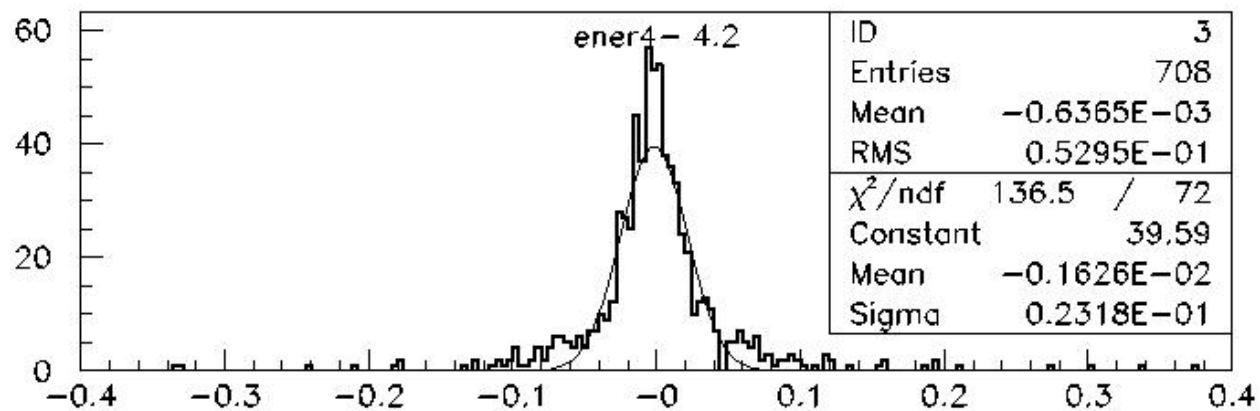
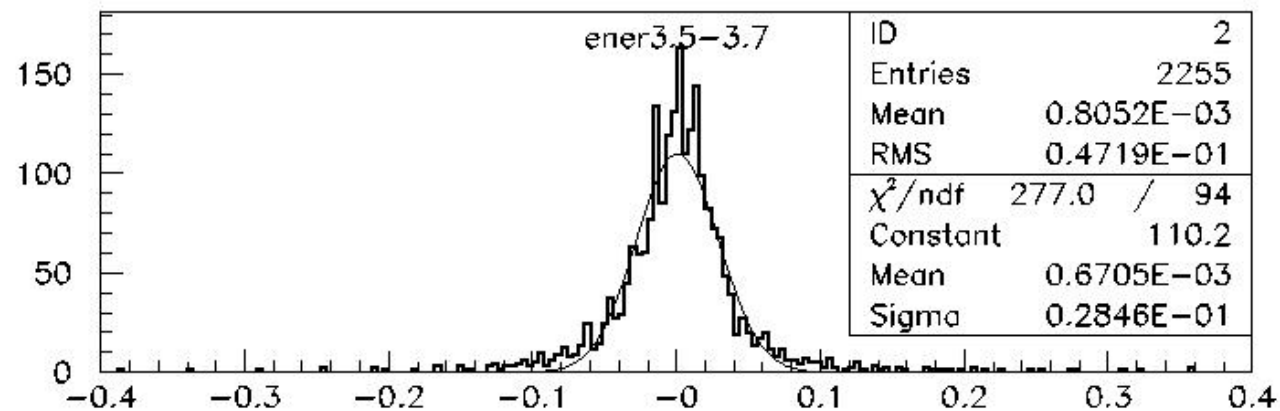
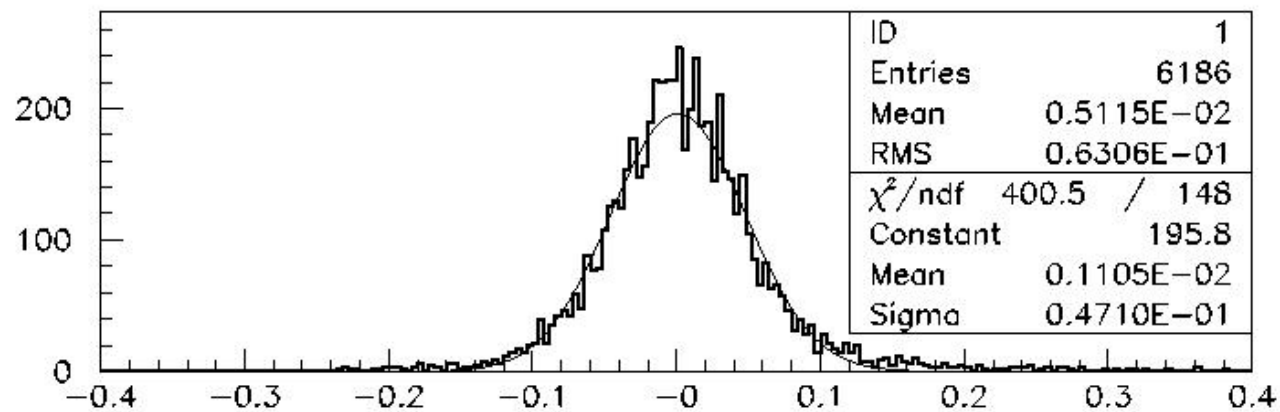




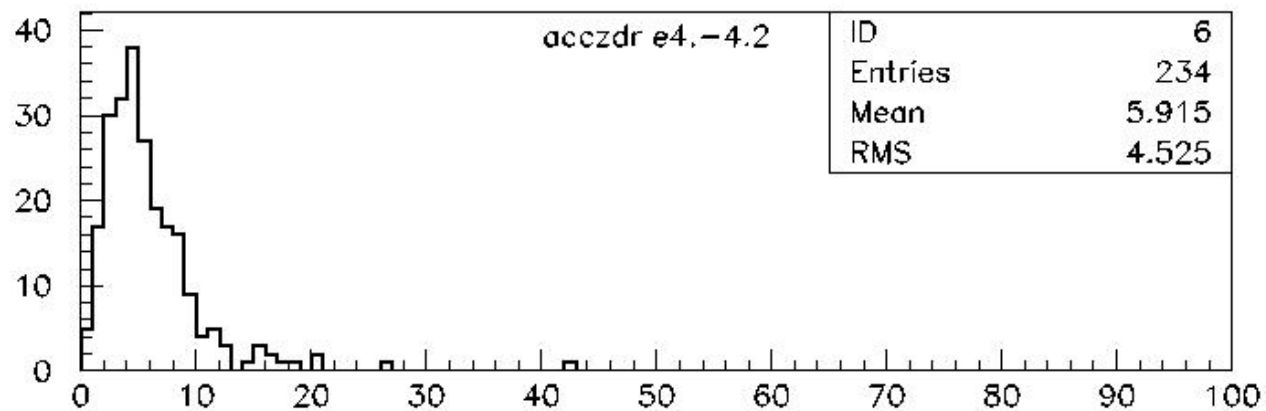
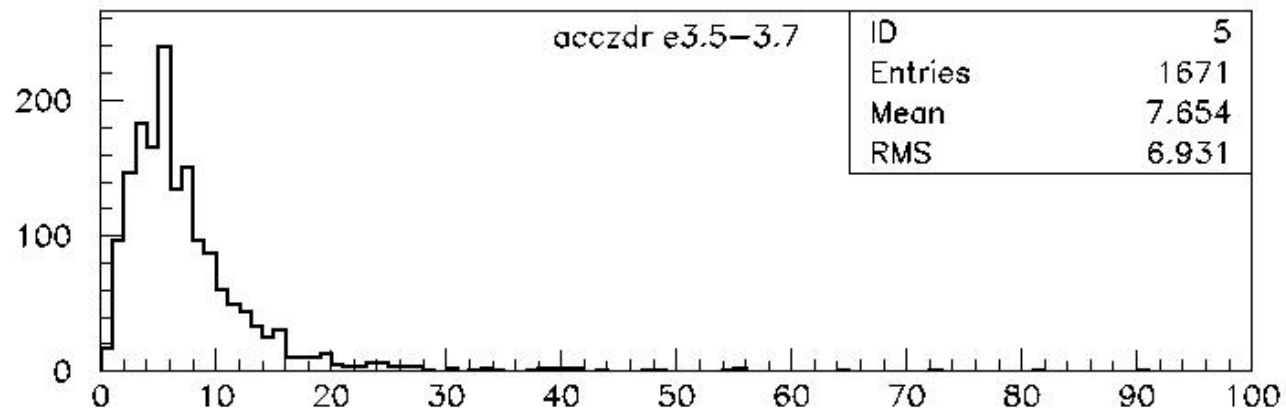
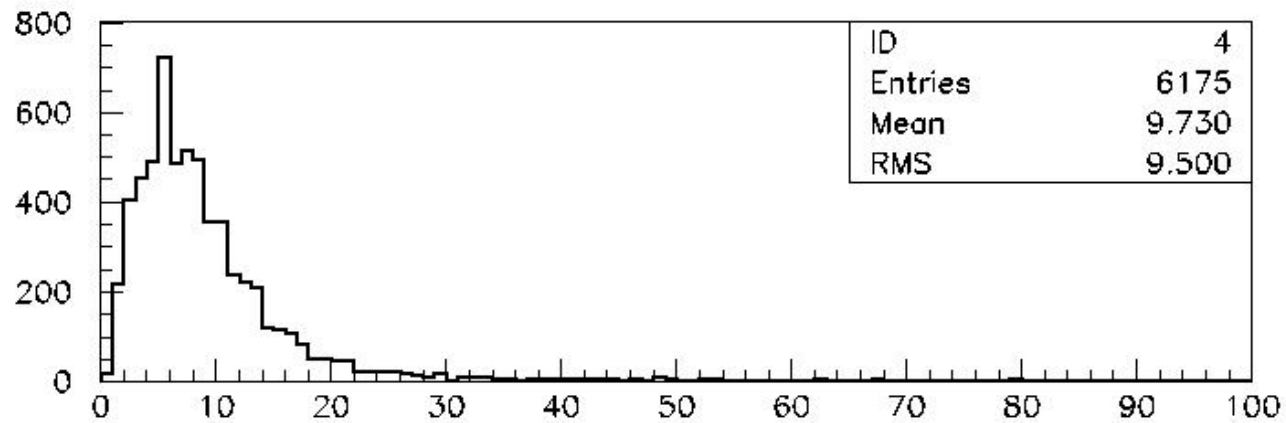


# История экспериментов в Тункинской долине

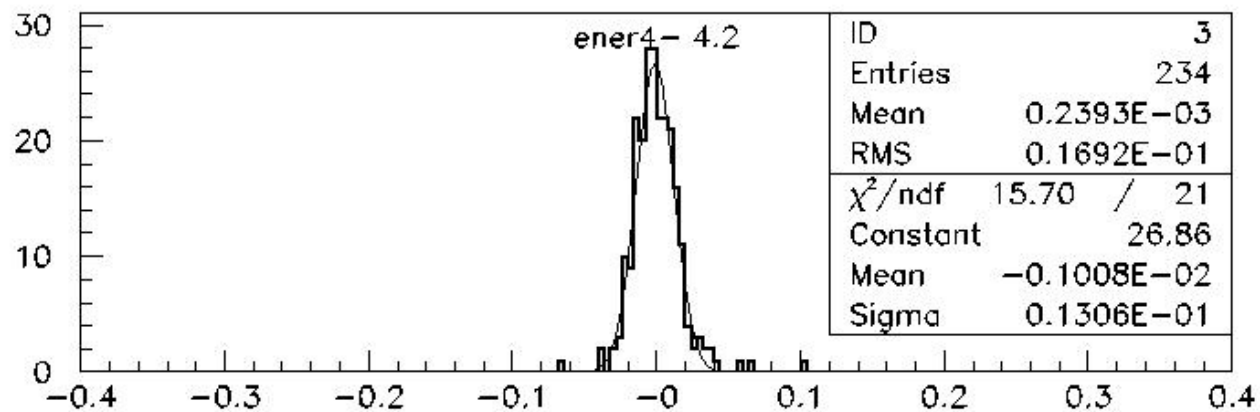
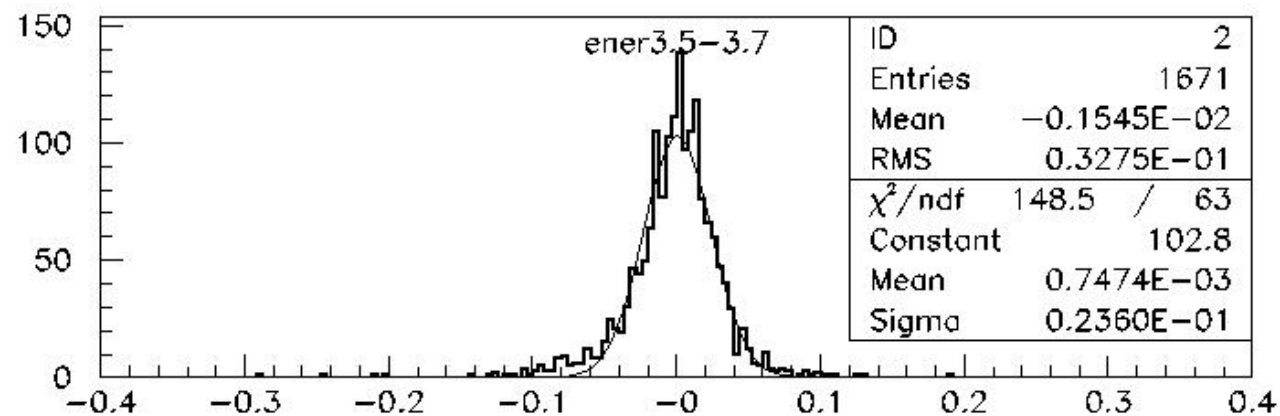
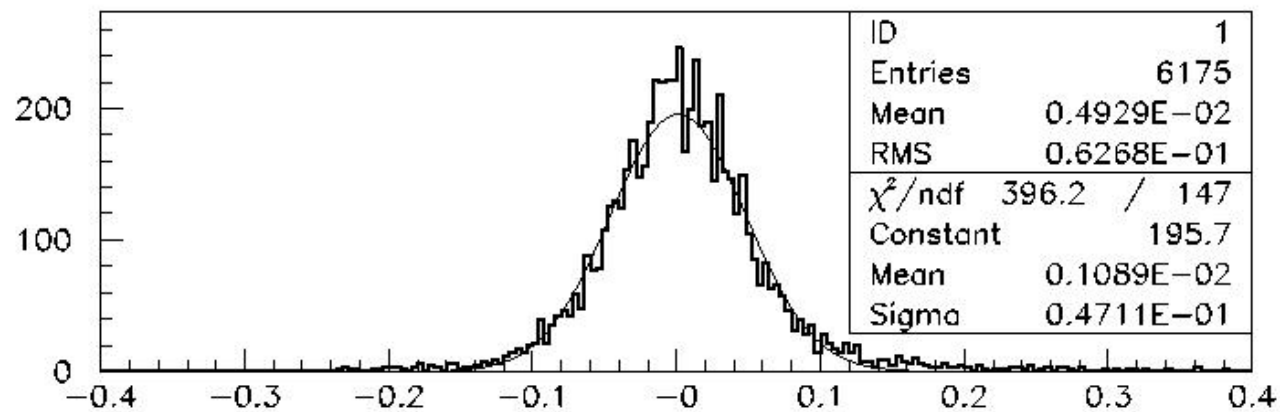
1. 1992 – 4 ФЭУ КВАЗАР-370 на льду Байкала.
2. 1993 – 1995 – Тунка-4 – 4 ФЭУ КВАЗАР-370 в Тункинской долине.
3. **1995 – ICRC в Риме. Старт первой международной коллаборации с участием Gianni Navarra и A.M. Hillas.**
4. 1996 – 1999 – Тунка-13 – 13 ФЭУ КВАЗАР-370
5. **1998 – 2000 – QUEST (5 PMTs QUASAR-370 at EAS-TOP in LNGS).**
6. 2000 – 2003 – Тунка-25,  $S = 0.1 \text{ км}^2$  в Тункинской долине.
7. **2004 – 2009 – Тунка-133 – 133 ФЭУ из бывшего эксперимента MACRO в Гран Сассо (идея Gianni Navarra),  $S = 0.7 \text{ км}^2$ .**
8. **2011 – Расширение установки Тунка-133 – 175 ФЭУ, 6 внешних кластеров,  $S = 2.5 \text{ км}^2$ .**



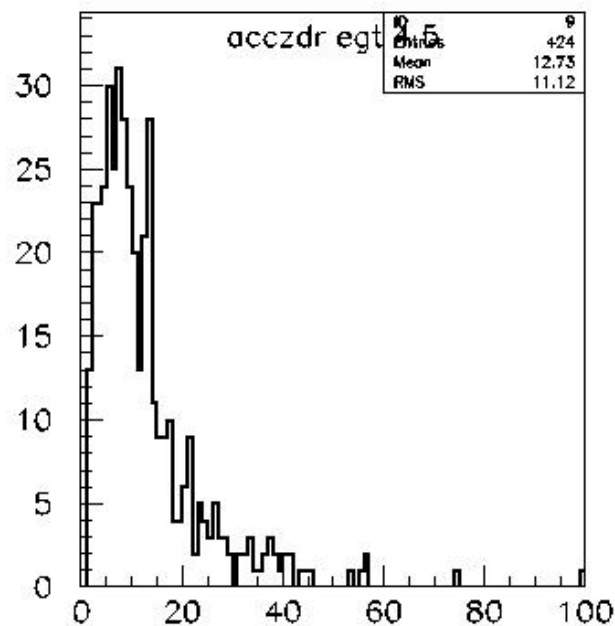
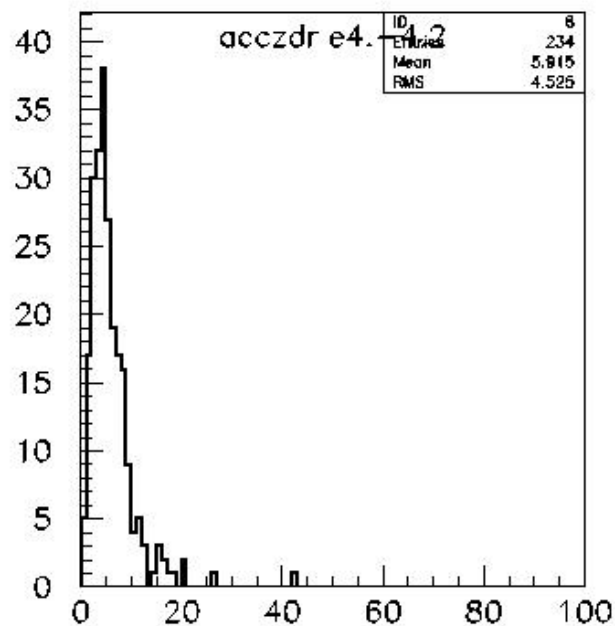
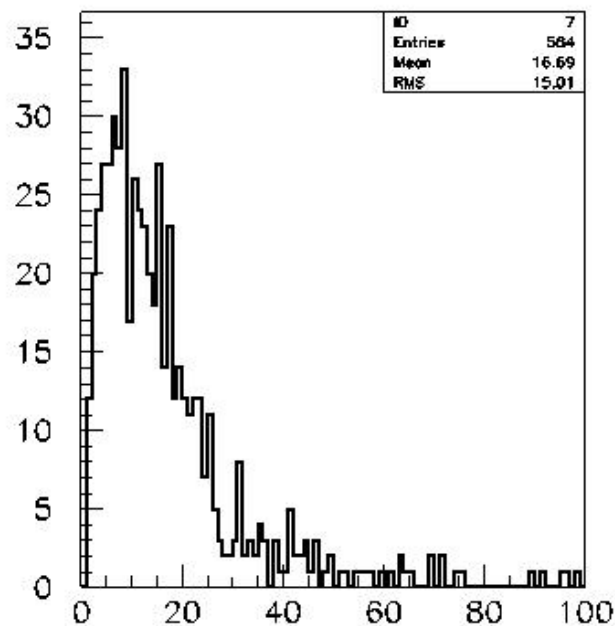
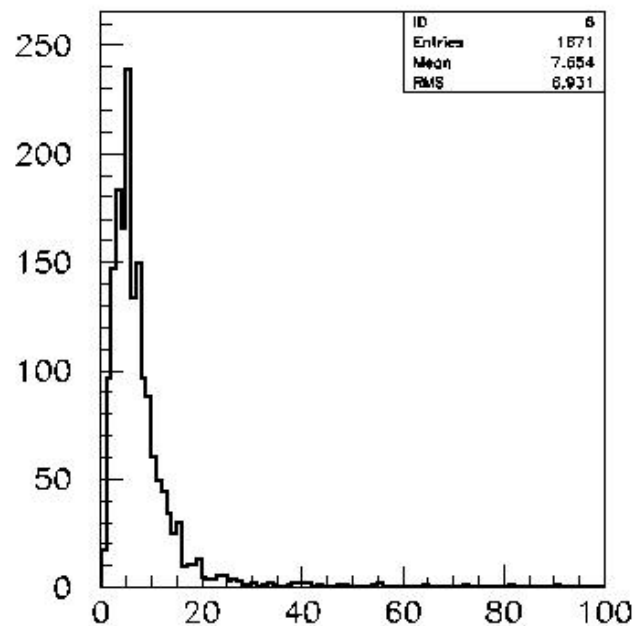
ener at 4.5



acczdr eqt 4.5

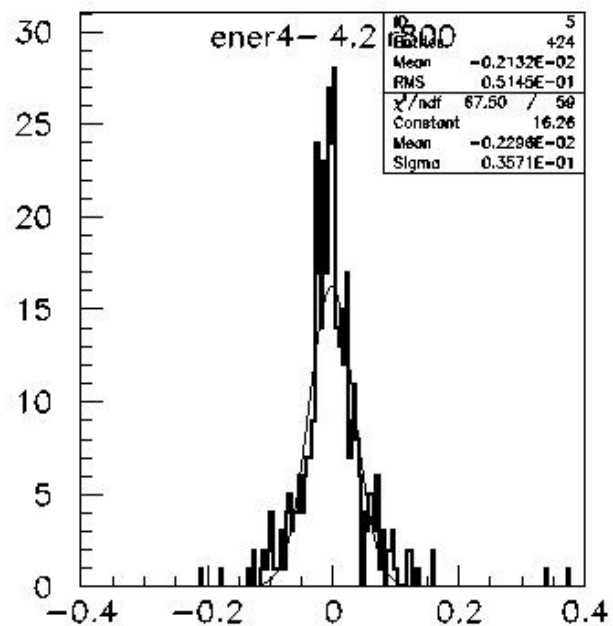
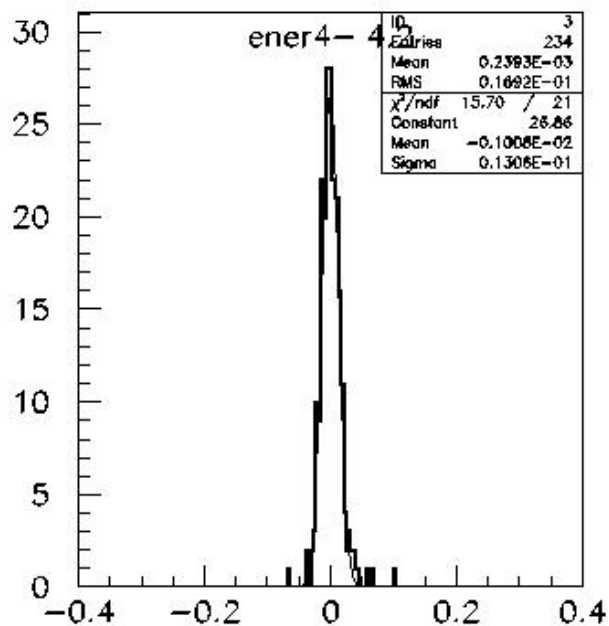
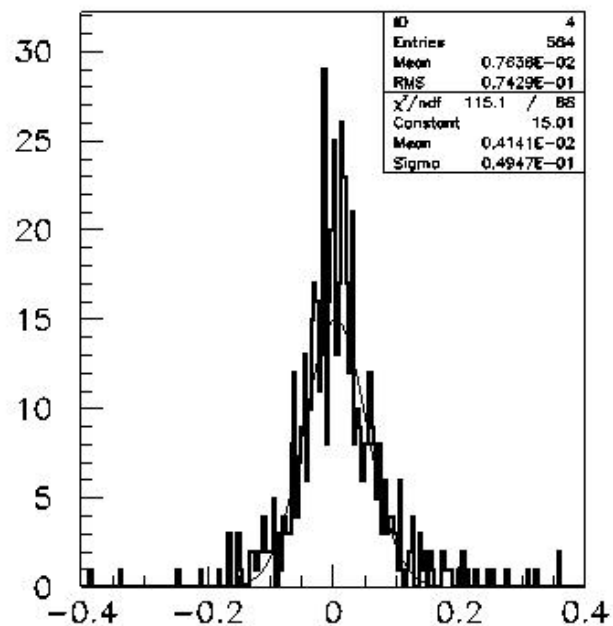
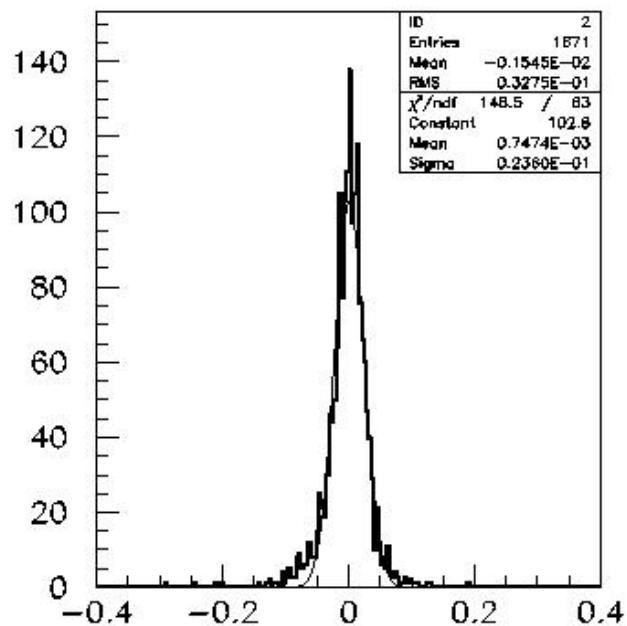


ener at 4.5



acczdr e4.-4.2 r800

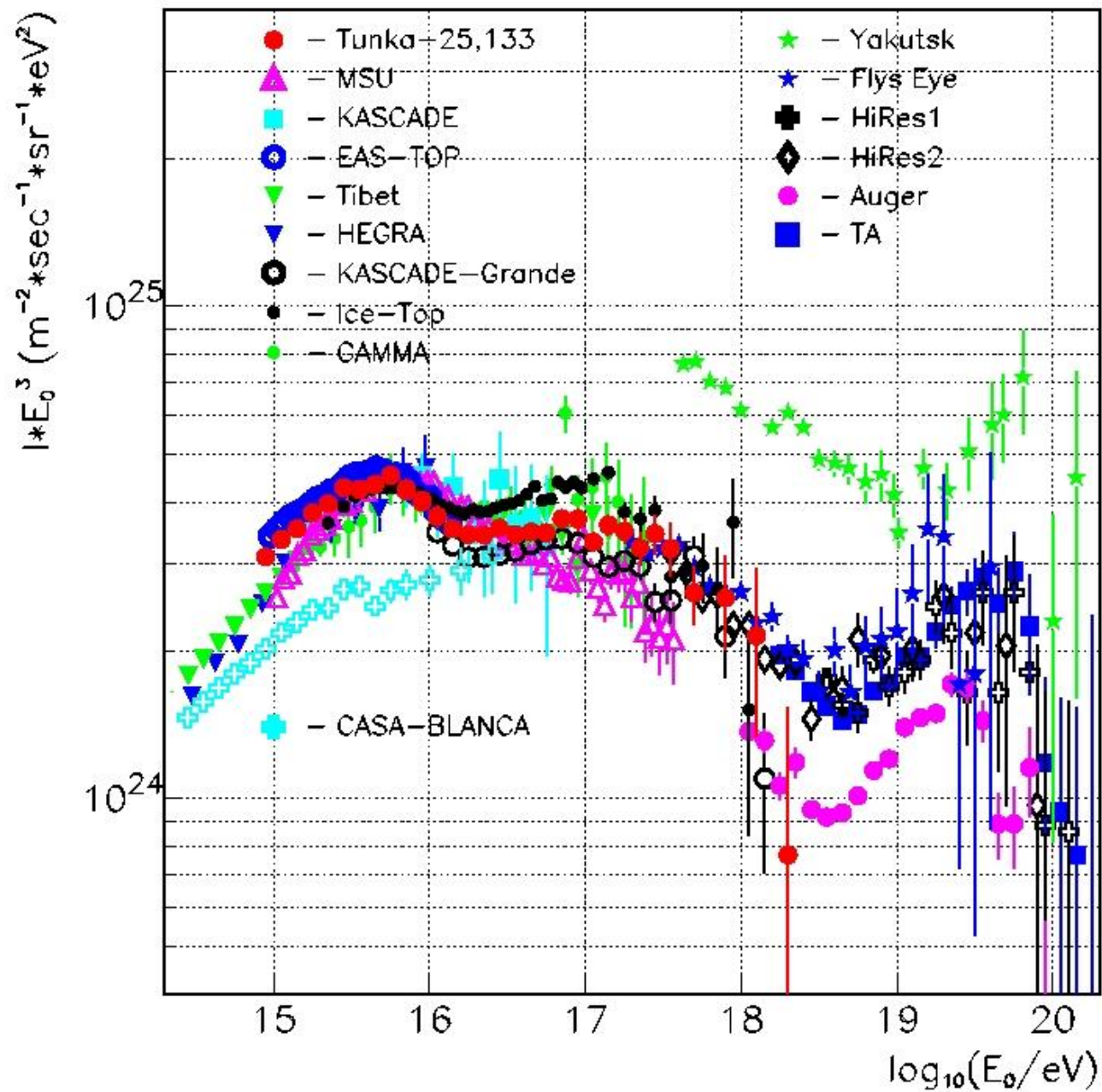
acczdr egt 4.5 r800



ener at 4.5

ener at 4.5 r800





# EXPERIMENT: MEAN $\langle \ln A \rangle$ vs. $E_0$

