

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ,  
ПОЛУЧЕННЫЕ НА НОВОЙ УСТАНОВКЕ  
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ШАЛ ПО ЧЕРЕНКОВСКОМУ СВЕТУ  
ТУНКА-133

В.В. Просин (НИИЯФ МГУ)  
от коллаборации Тунка

# Tunka Collaboration

**S.F. Beregnev, S.N. Epimakhov, N.N. Kalmykov, E.E. Korosteleva, N.I. Karpov, V.A. Kozhin, L.A. Kuzmichev, M.I. Panasyuk, E.G. Popova, V.V. Prosin, A.A. Silaev, A.A. Silaev(ju), A.V. Skurikhin, L.G. Sveshnikova, I.V. Yashin**

**– Skobeltsyn Inst. of Nucl. Phys. of Lomonosov Moscow State Univ., Moscow, Russia;**

**N.M. Budnev, A.V. Dyachok, O.A. Chvalaev, O.A. Gress, A.V. Korobchenko, R.R. Mirgazov, L.V. Pan'kov, Yu.A. Semenev, A.V. Zagorodnikov**

**– Inst. of Applied Phys. of Irkutsk State Univ., Irkutsk, Russia;**

**B.K. Lubsandorzhiiev, B.A. Shaibonov(ju)**

**– Inst. for Nucl. Res. of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;**

**V.S. Ptuskin**

**– IZMIRAN, Troitsk, Moscow Region, Russia;**

**Ch. Spiering, R. Wischnewski**

**– DESY-Zeuthen, Zeuthen, Germany;**

**A. Chiavassa**

**– Dip. di Fisica Generale Universita' di Torino and INFN, Torino, Italy.**

**D. Besson, J. Snyder, M. Stockham**

**– Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, USA**

# Черенковский свет в воде и в воздухе

Вода – к-т преломления  $n = 1.333$   $\theta_C = \arccos(1/n) = 41$

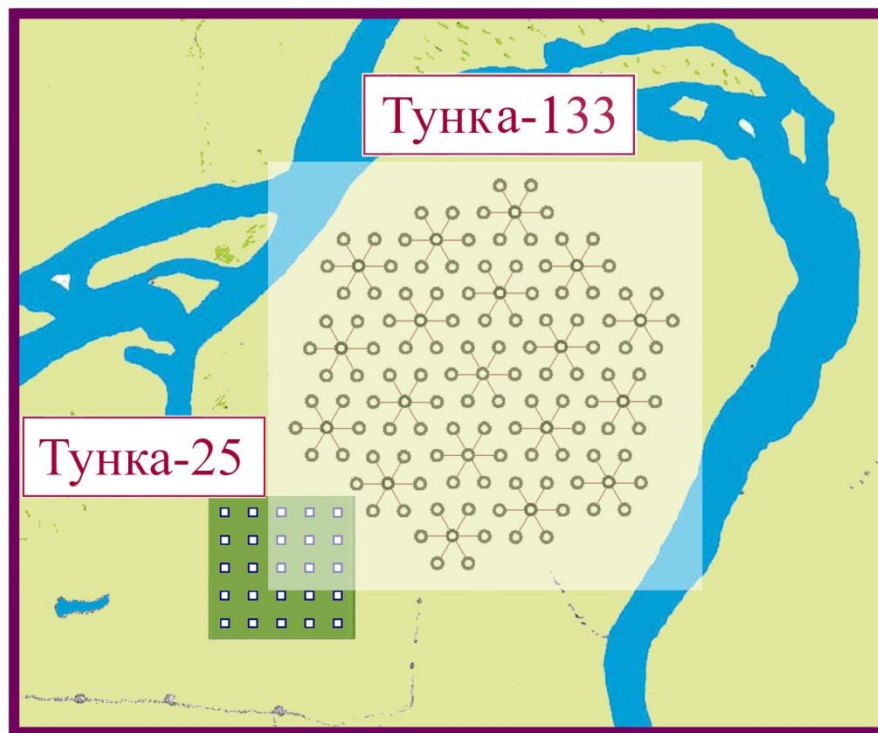
Воздух – к-т преломления  $n = 1.0003$   $\theta_C = \arccos(1/n) = 1.4$

На высоте 5 км  $\theta_C = 1^\circ$

Средний угол многократного рассеяния электронов в ливне  
~ 6

Распределение света определяется ФПУР электронов и  
продольным развитием ливня – каскадной кривой.

# Географическое положение установки ТУНКА



<http://dbserv.sinp.msu.ru/tunka>

51° 48' 35" N  
103° 04' 02" E  
675 м над у.м.



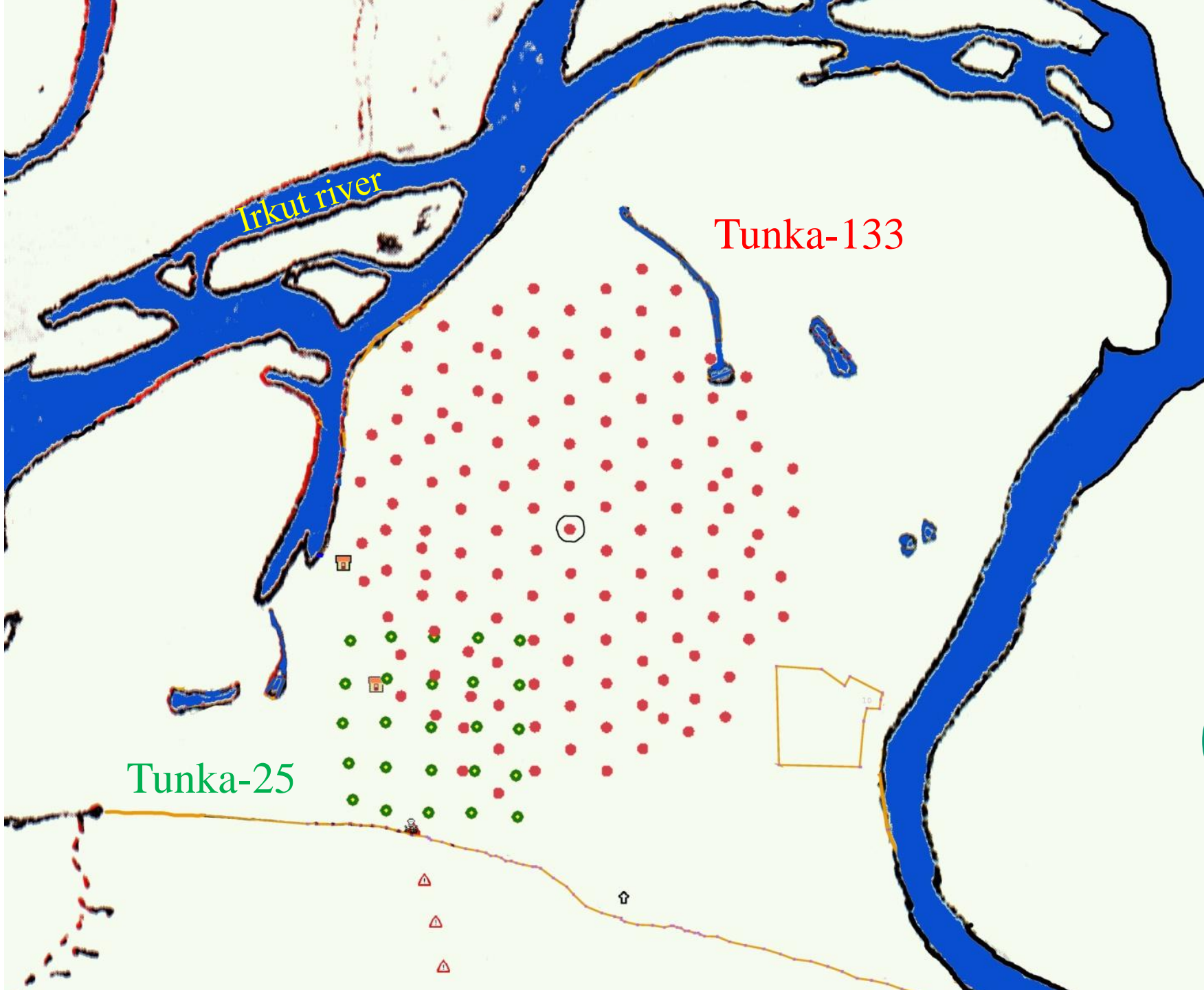
# Тункинская долина.





# Тункинская долина. Река Иркут.





Irkut river

Tunka-133

Tunka-25

10



# ФЭУ типа ЕМІ-9350









# Detectors

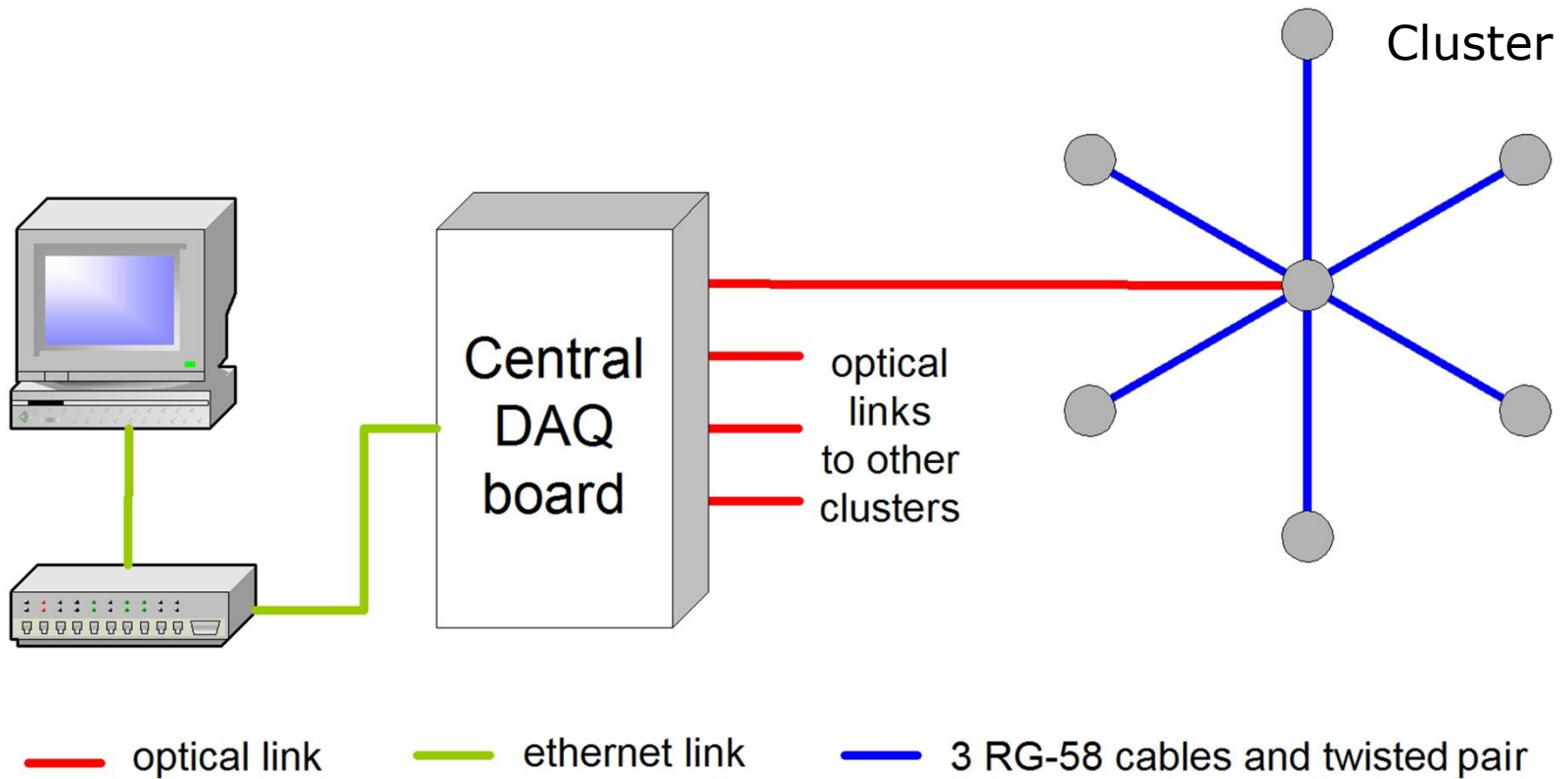


Ноябрь 2009 – Март 2010 – 286 часов  
Октябрь 2010 – Апрель 2011 – ~ 275 часов

>2 млн. событий с энергией  $\geq 10^{15}$  эВ.  
>10 событий в течение ночи, когда  
срабатывают все 19 кластеров

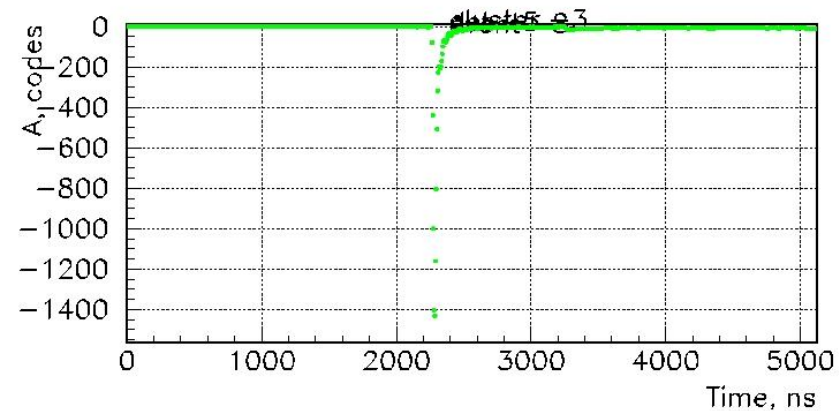


# DAQ system

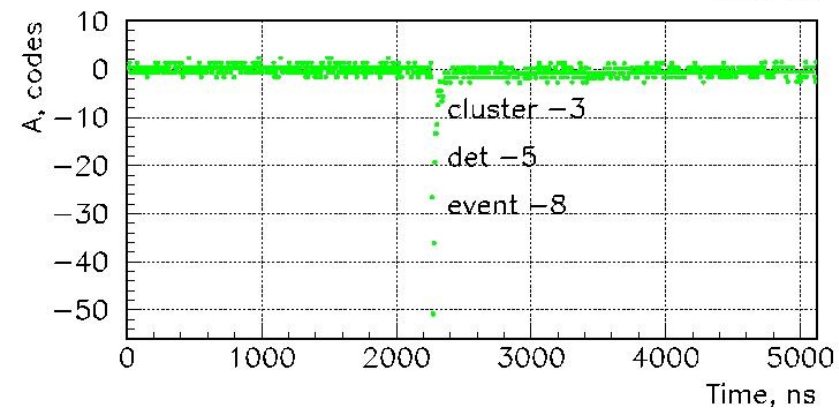
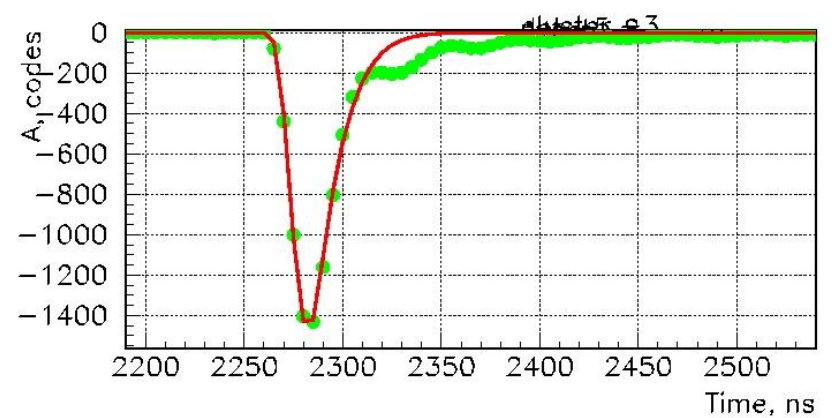


# Эксперимент

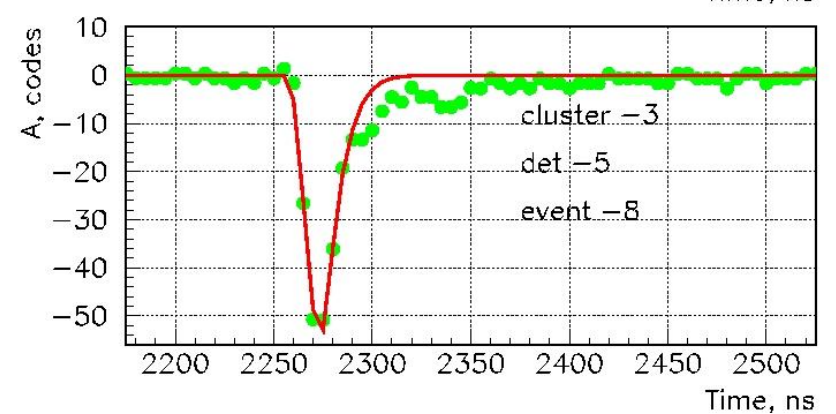
1024 точки с шагом 5 нс:



anode



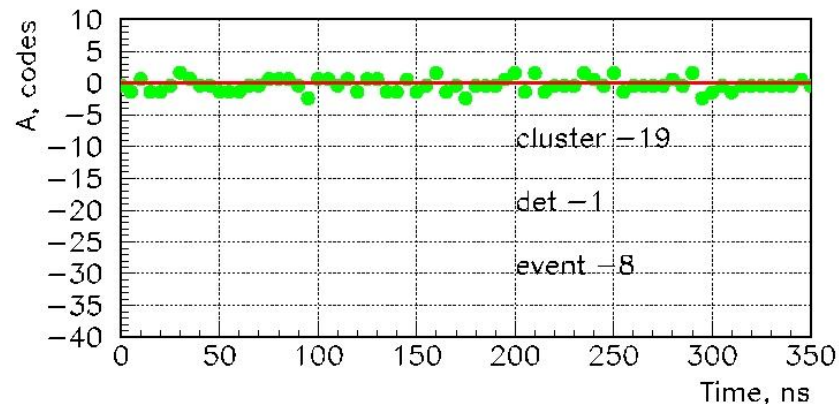
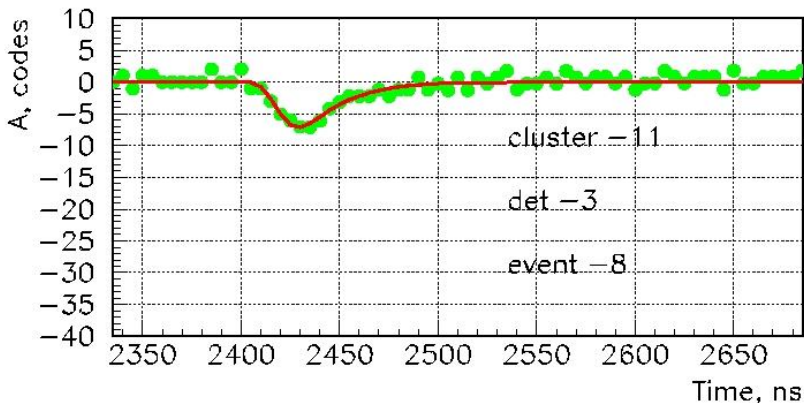
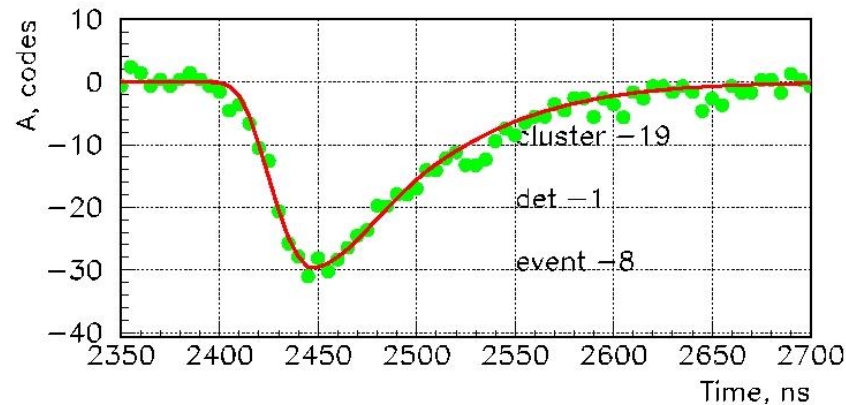
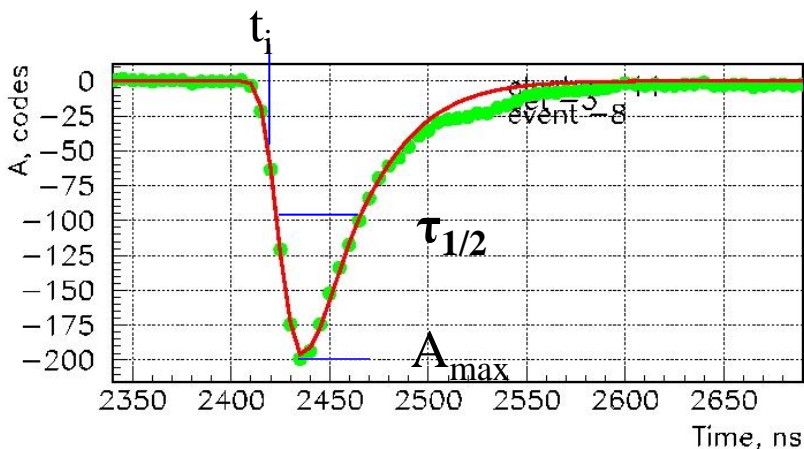
dynode



# Эксперимент 2010: ~2 млн. событий

## «событие» = 7 – 133 пар записей:

Фитирование специально сконструированной функцией  
3 параметра: 1) задержка фронта  $0.25A_{\max}$ , 2) площадь, 3) длительность

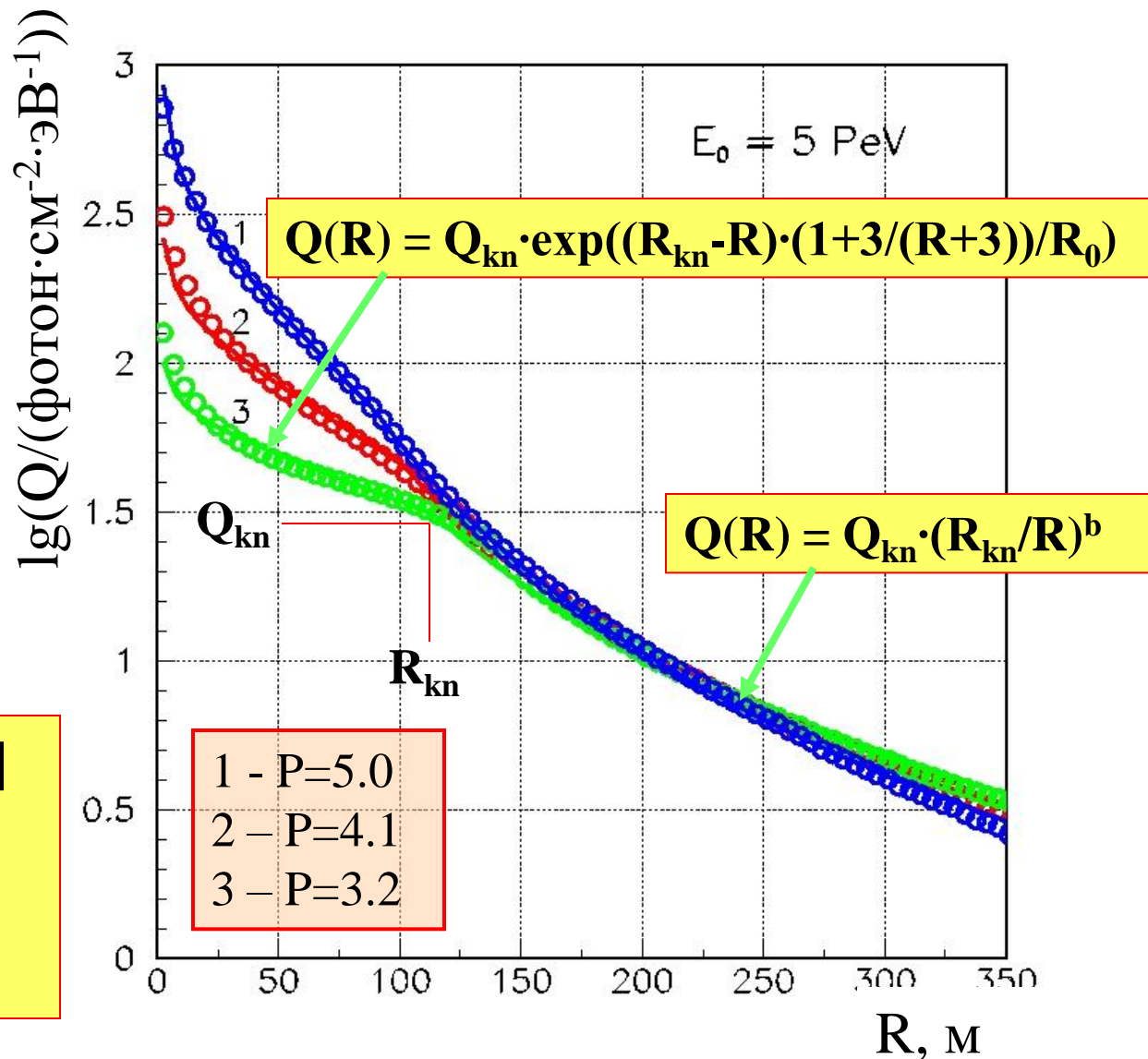


Вместо  $\tau_{1/2}$  применяется  $\tau_{\text{eff}} = Q/A_{\max}$



# CORSIKA: Расчетные пространственные распределения для Тунгусской долины.

У ФПР имеется один переменный параметр формы - крутизна:  
 $P = Q(100) / Q(200)$



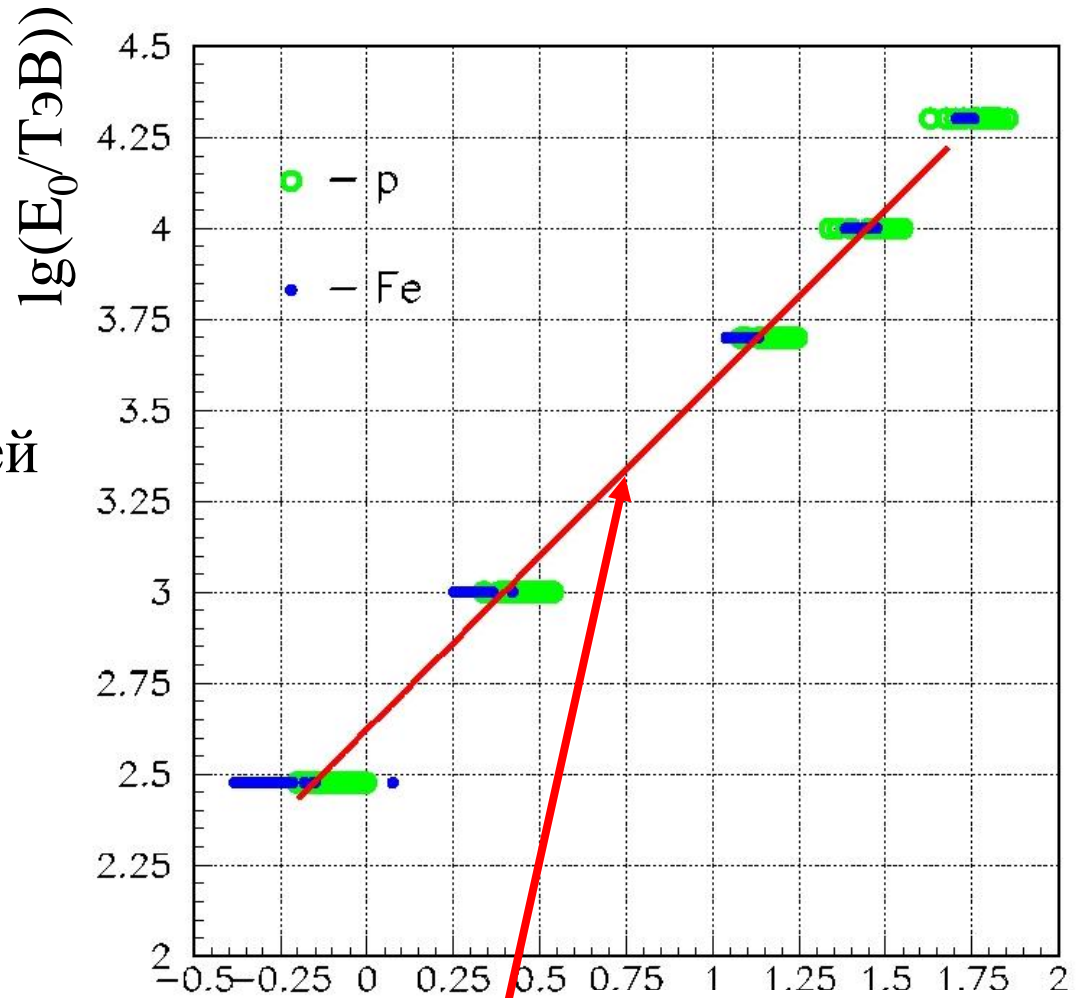
$$R_0 = 10^{2.95 - 0.245 \cdot P} [\text{м}]$$

$$R_{kn} = 155 - 13 \cdot P [\text{м}]$$

$$b = 1.19 + 0.23 \cdot P$$

# CORSIKA: Определение энергии по параметру $Q_{175}$

600 разыгранных ливней  
с зенитными углами  
 $\theta$  от 0 до 25



$$E_0 = 4 \cdot 10^{14} Q_{175}^{0.95}, \text{ эВ},$$
$$Q_{175} \text{ в ед.: } [\text{фотон}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{эВ}^{-1}]$$

$\lg(Q/(\text{фотон}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{эВ}^{-1}))$

*Достигнутая точность  
характеристик ШАЛ:*

Энергия первичной частицы  $E_0$   
(относительная точность 15%  
систематическая погрешность  $< 10\%$ )

Глубина максимума  $X_{\max}$   
(случайная ошибка  $< 30 \text{ г/см}^2$   
систематическая погрешность  $< 7 \text{ г/см}^2$  )



# Zenith angular acceptance

Simulated for:

- $R = 25$  cm – window radius
- $r = 11$  cm – PMT radius
- $z_0 = 15$  cm – distance from window to PMT



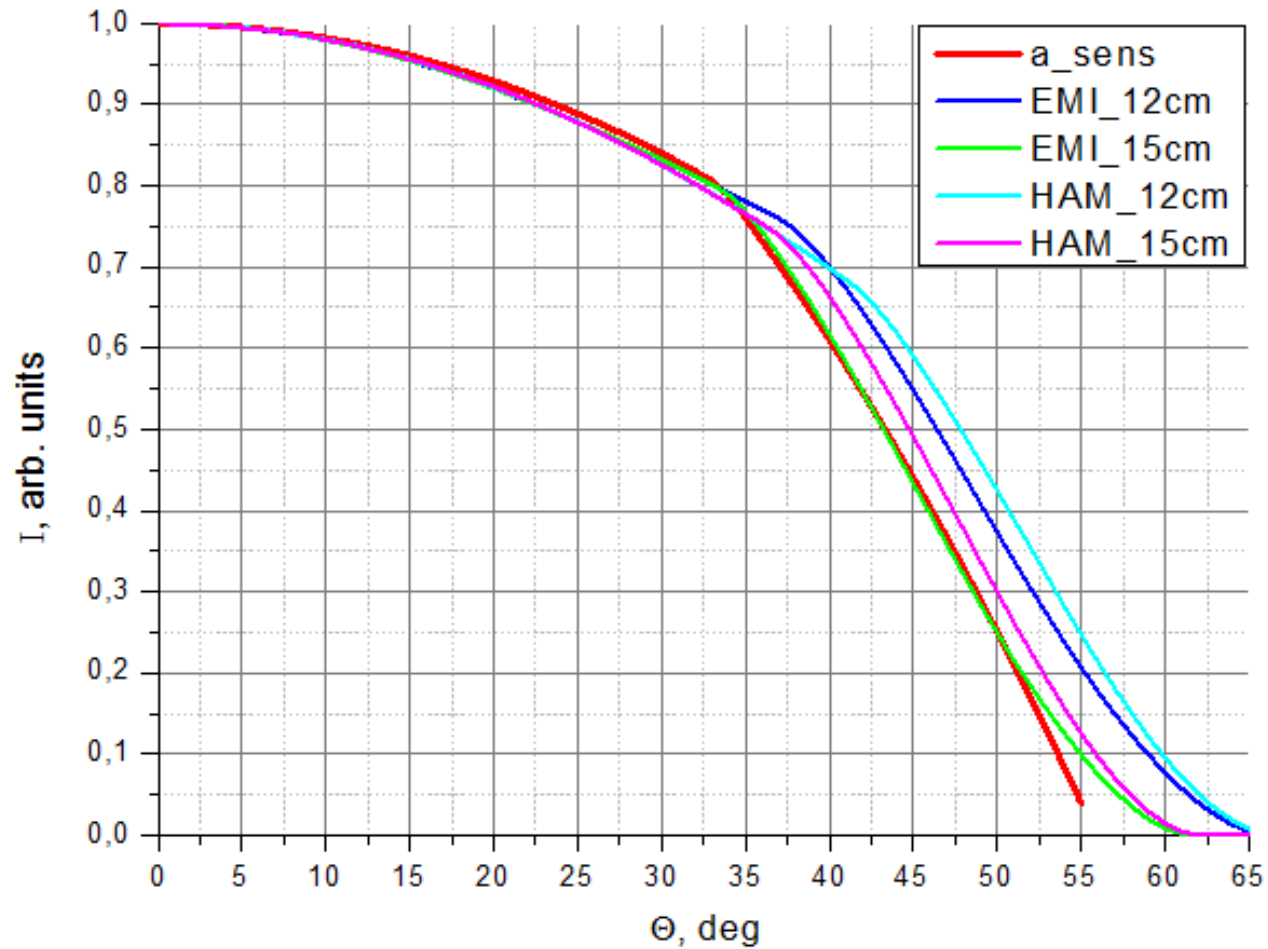
# Transparency for EAS Cerenkov light

Simulation for the EAS cascade at  $\theta = 35^\circ$  taking into account molecular (Reighley) scattering ( $T_R$ ) and aerosol attenuation ( $T_{Mie}$ )

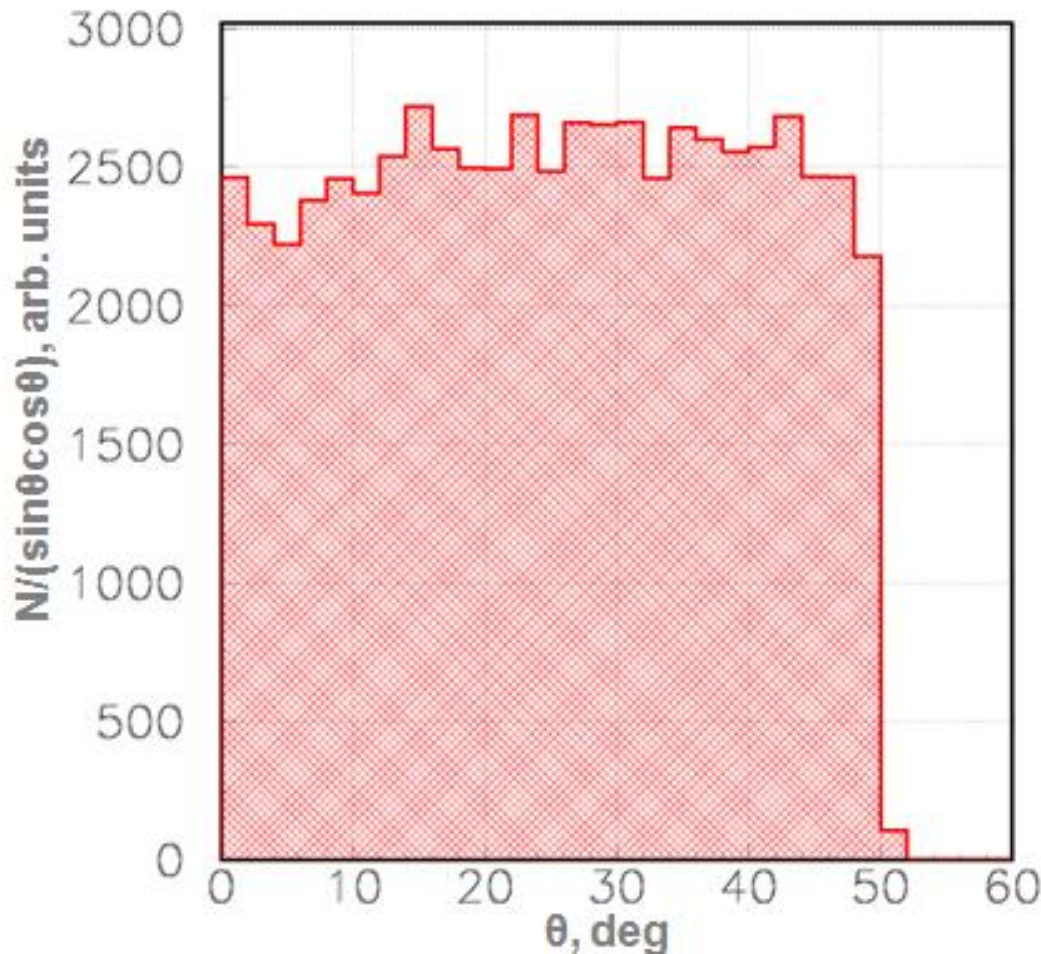
	EMI	HAM
$T_R$	85.4%	86.5
$T_{Mie}$	88.1%	88.6%
T	75.2%	76.6%

- $T(\theta) = T \cdot \exp(\sec \theta - \sec 35)$

# Zenith angular correction function



# EAS zenith angular distribution ( $E_0 > 10^{16}$ eV)



■ a\_sens:

$$\vartheta < 34^\circ$$

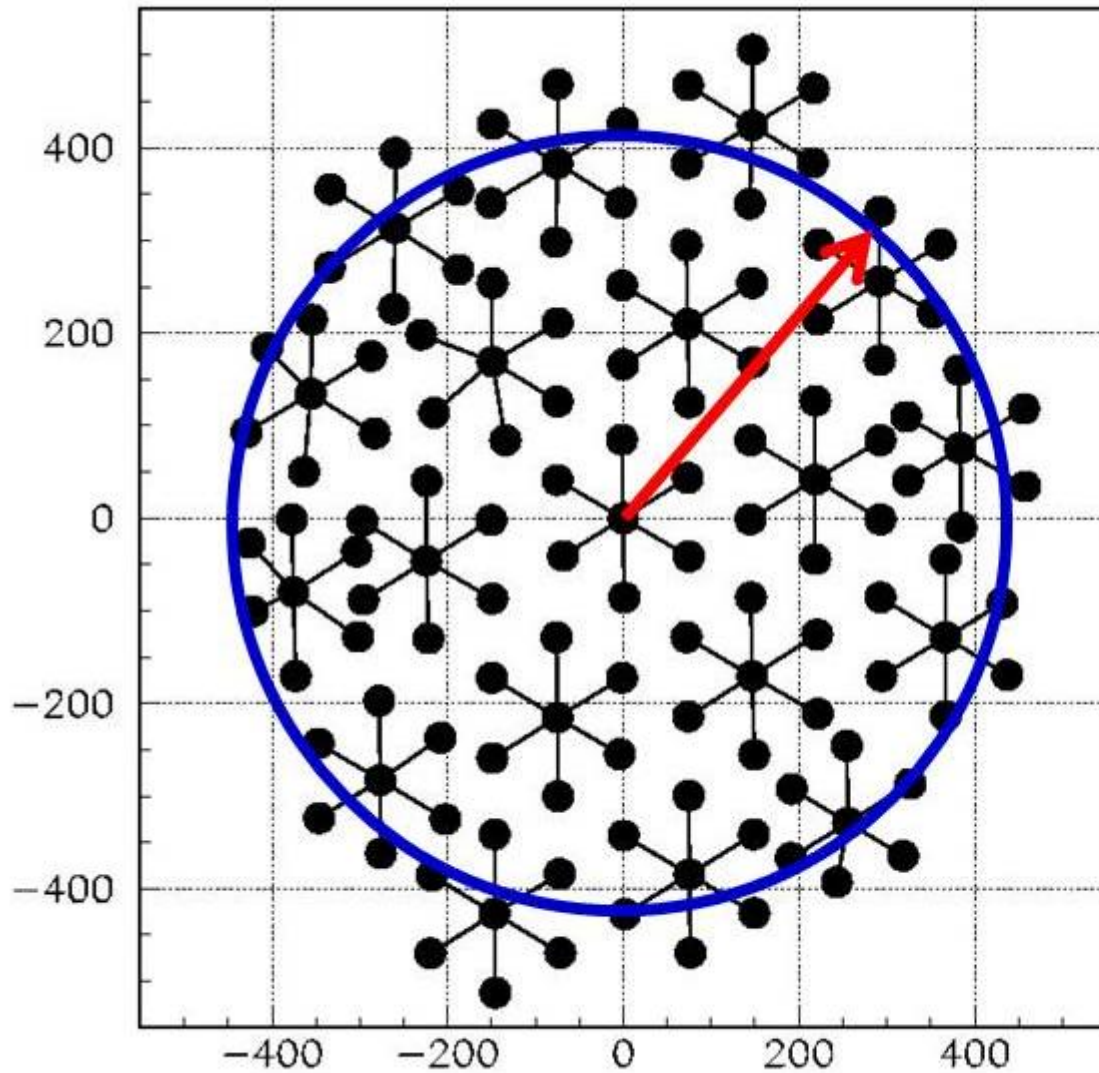
$$1.00 - (\vartheta/75)^2$$

$$\vartheta > 34^\circ$$

$$1.25 - (\vartheta/50)^2$$

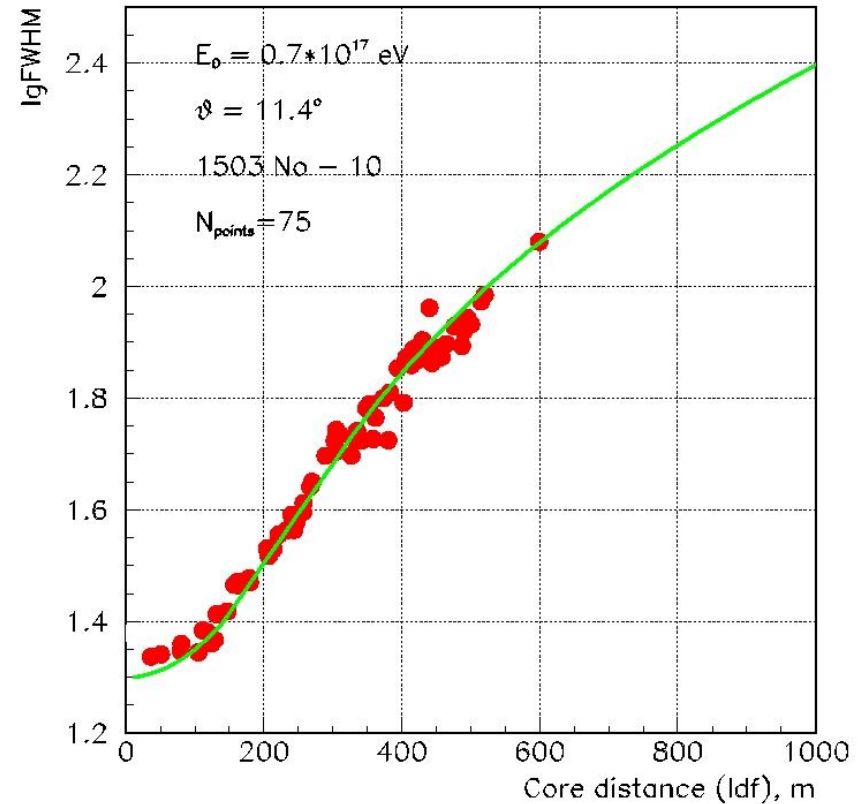
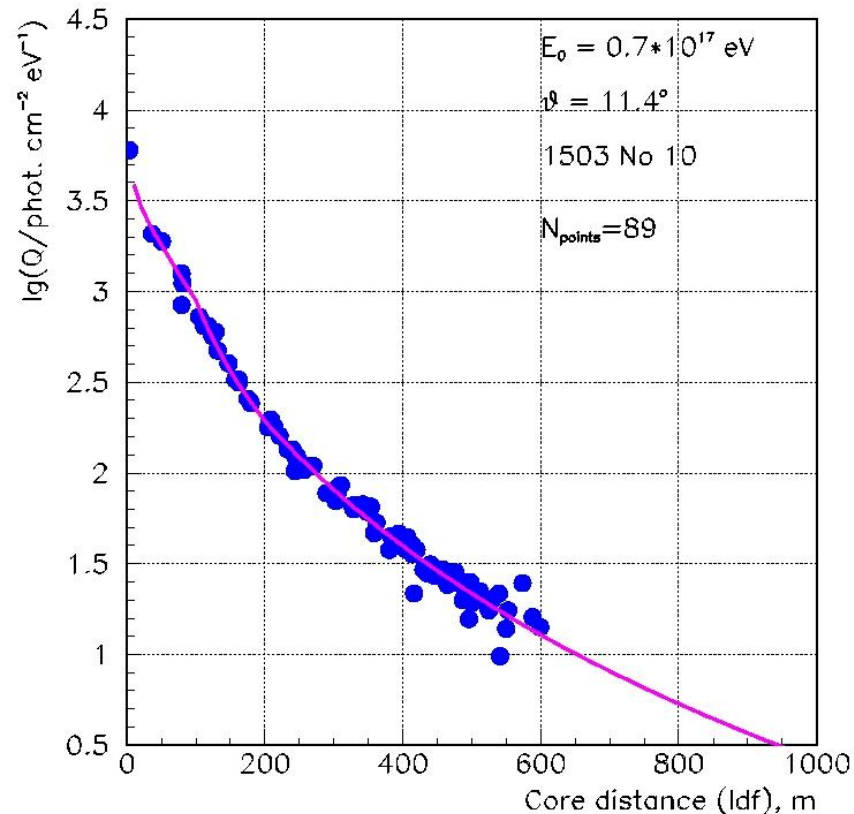
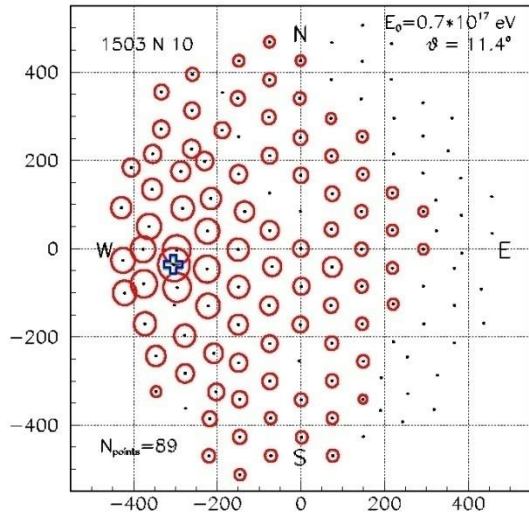


# Effective area

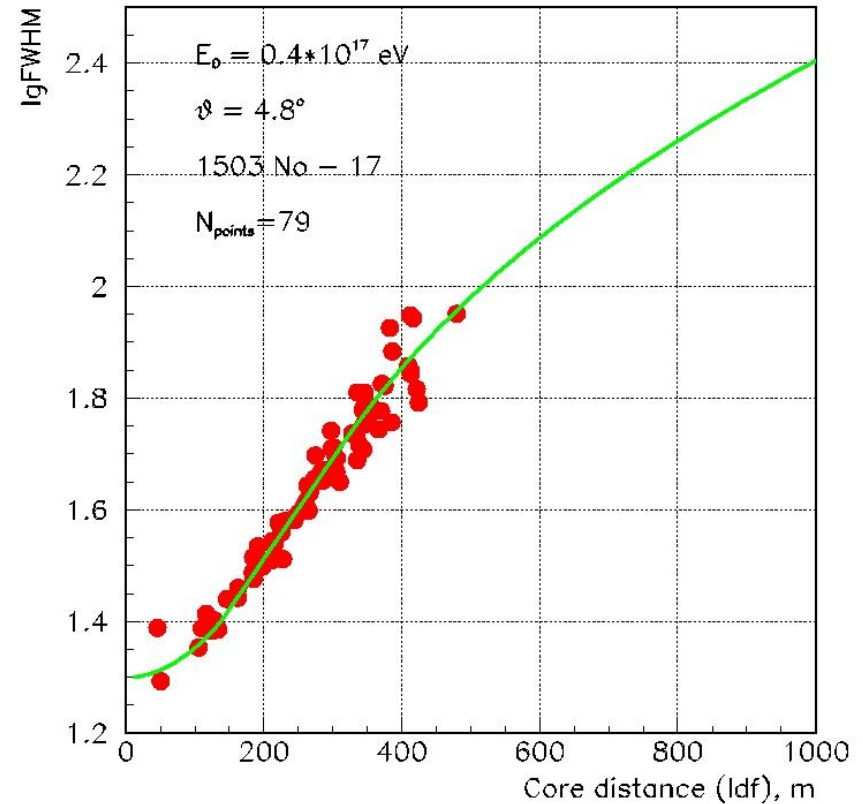
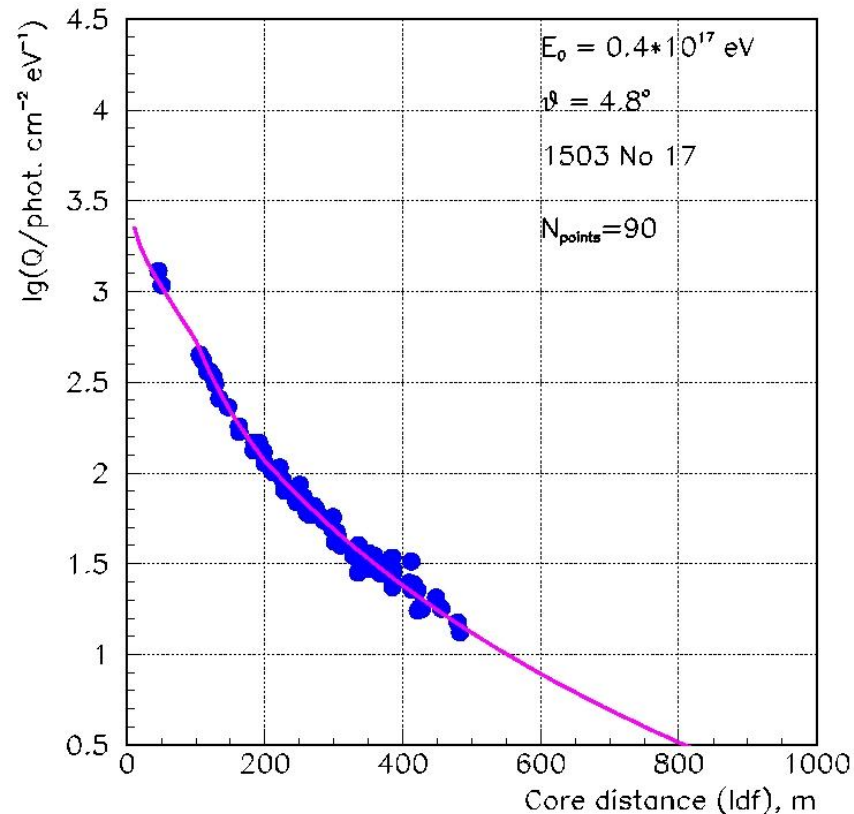
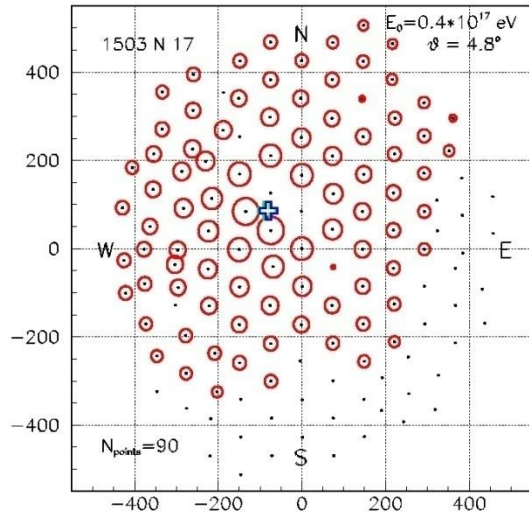


$R = 450\text{m}$

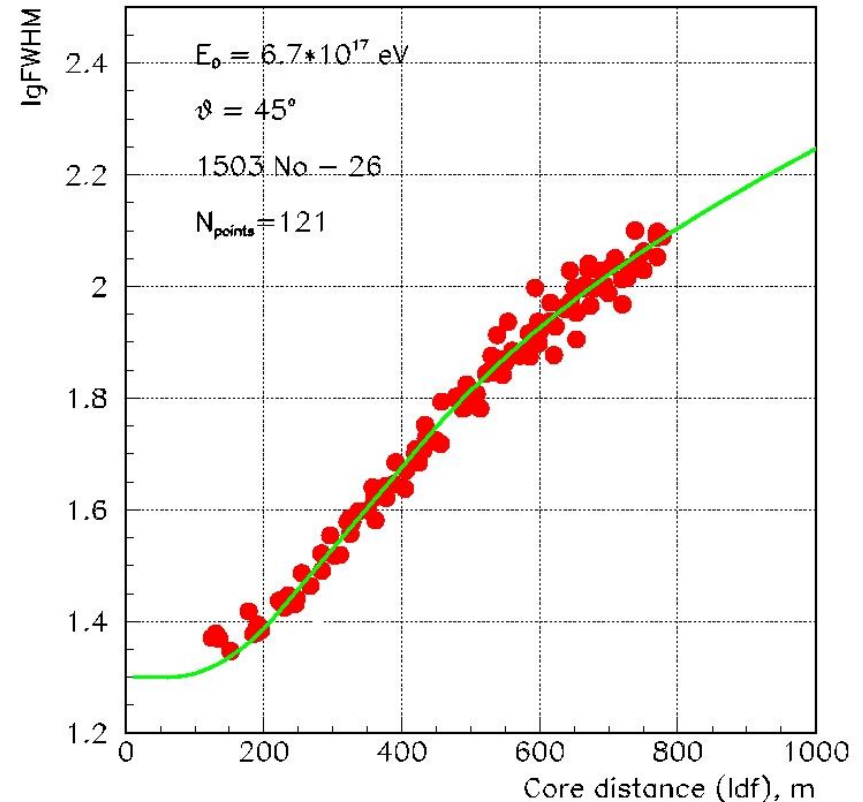
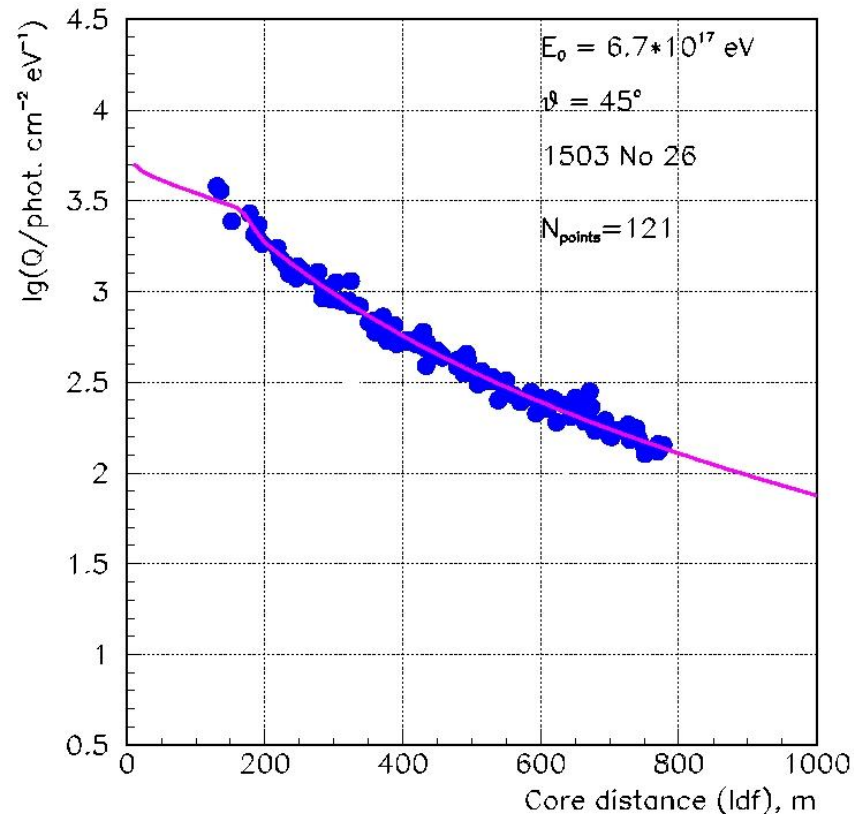
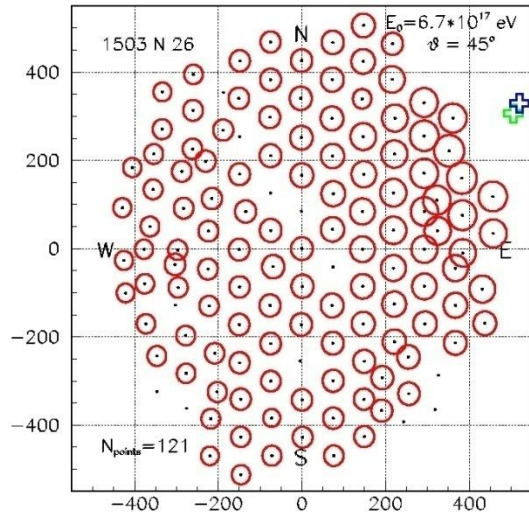
# Пример события. Тунка-133. 15.03.2010



# Пример события. Тунка-133. 15.03.2010

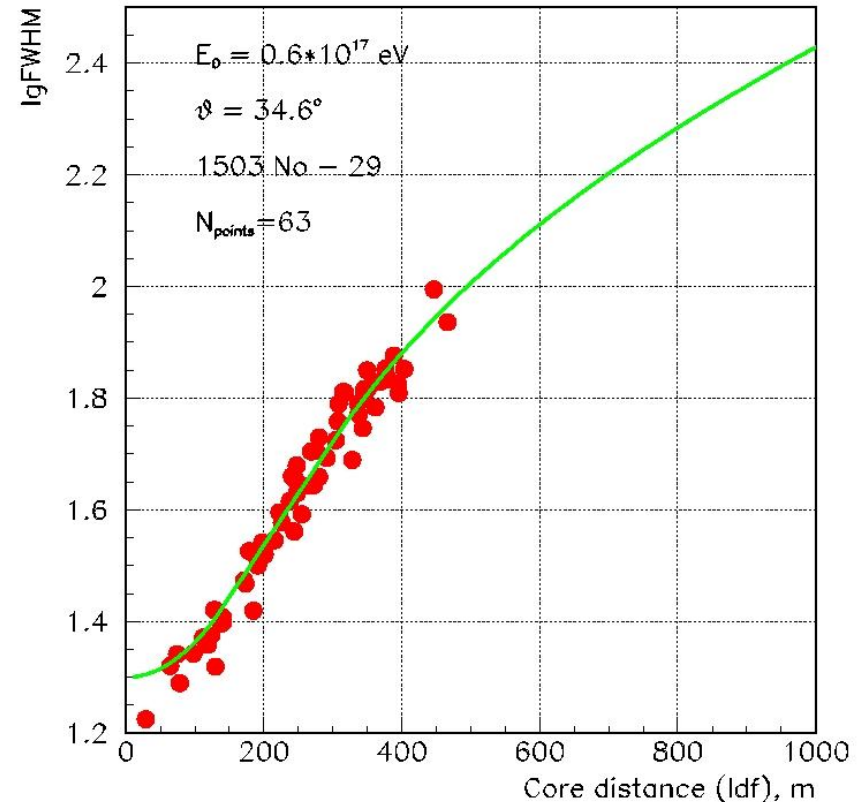
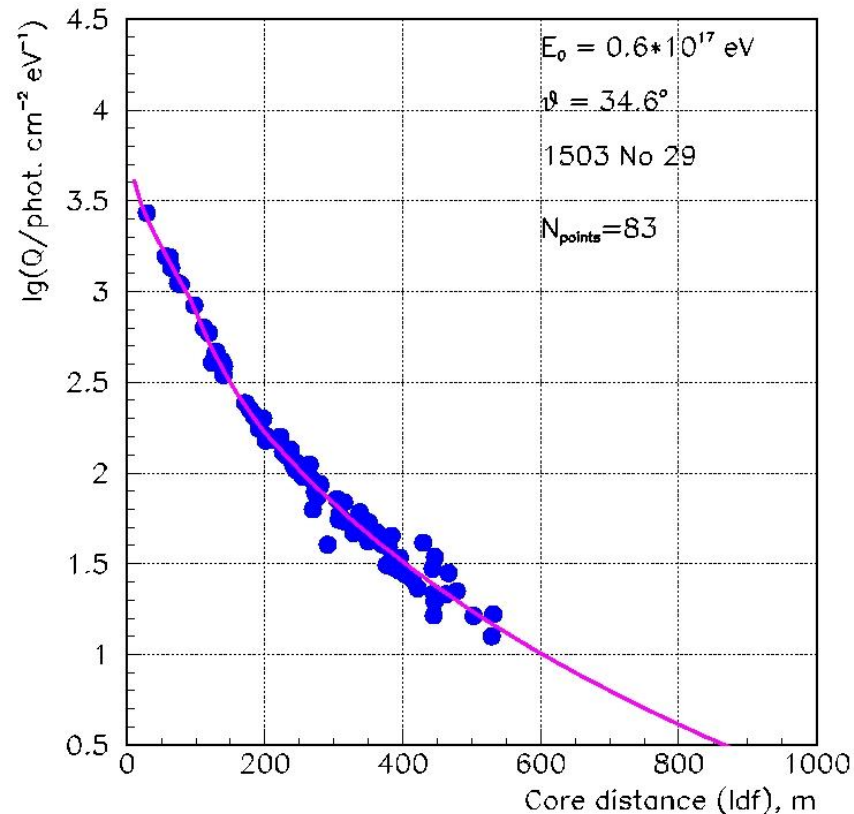
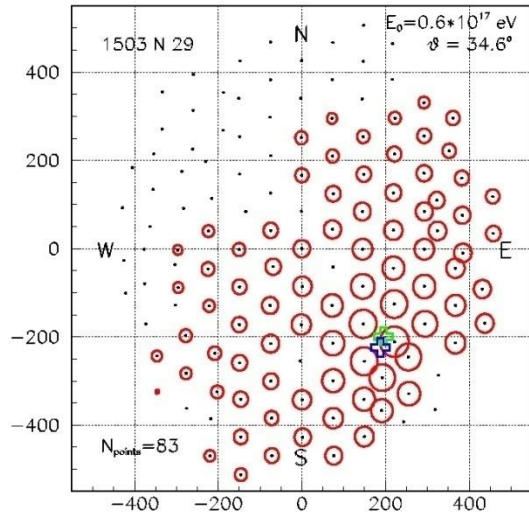


# Пример события. Тунка-133. 15.03.2010

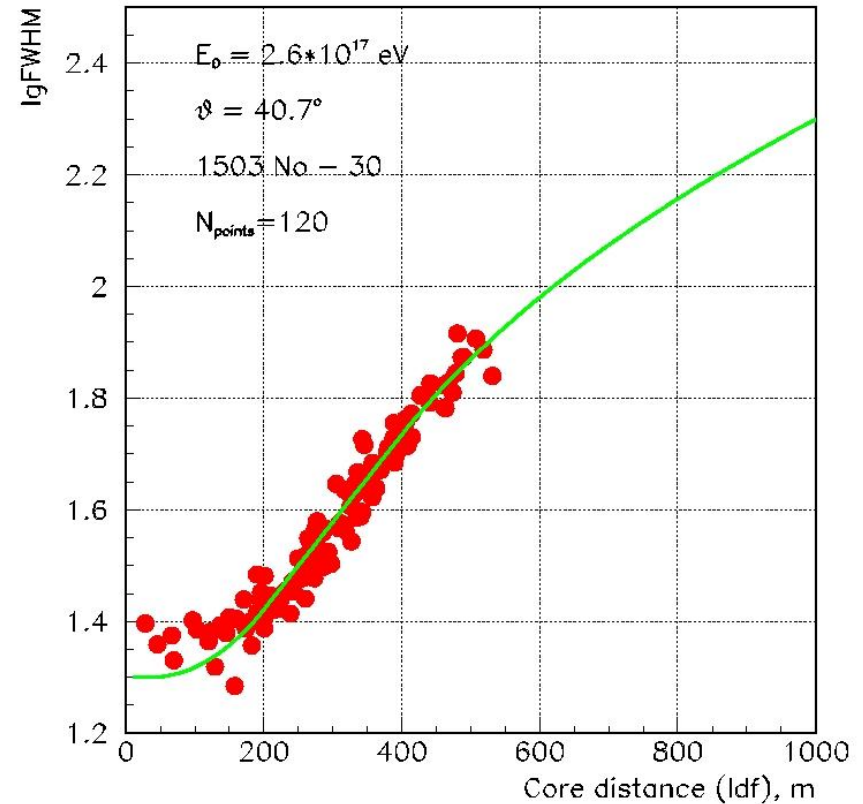
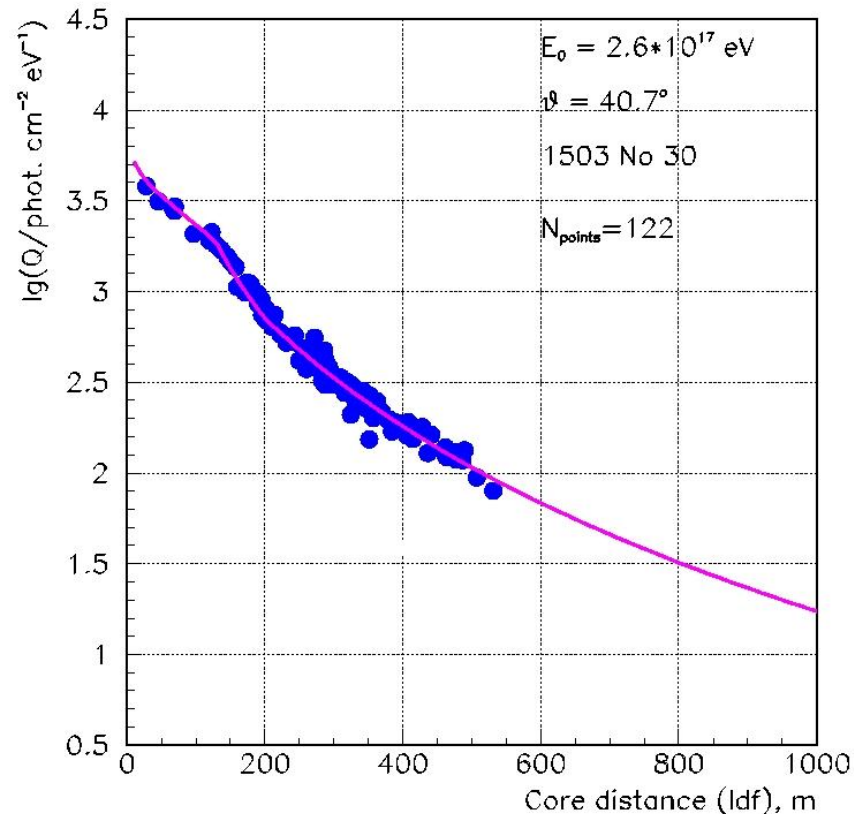
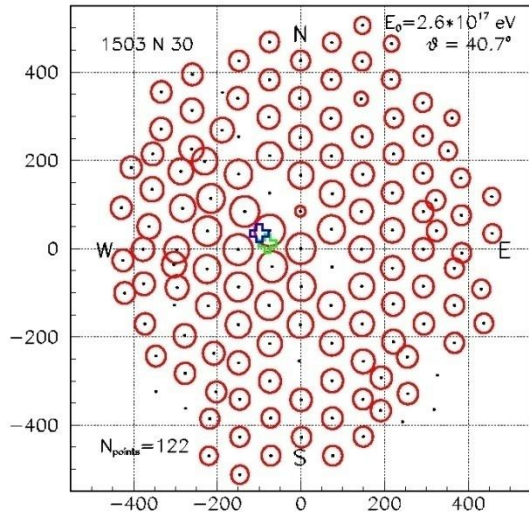




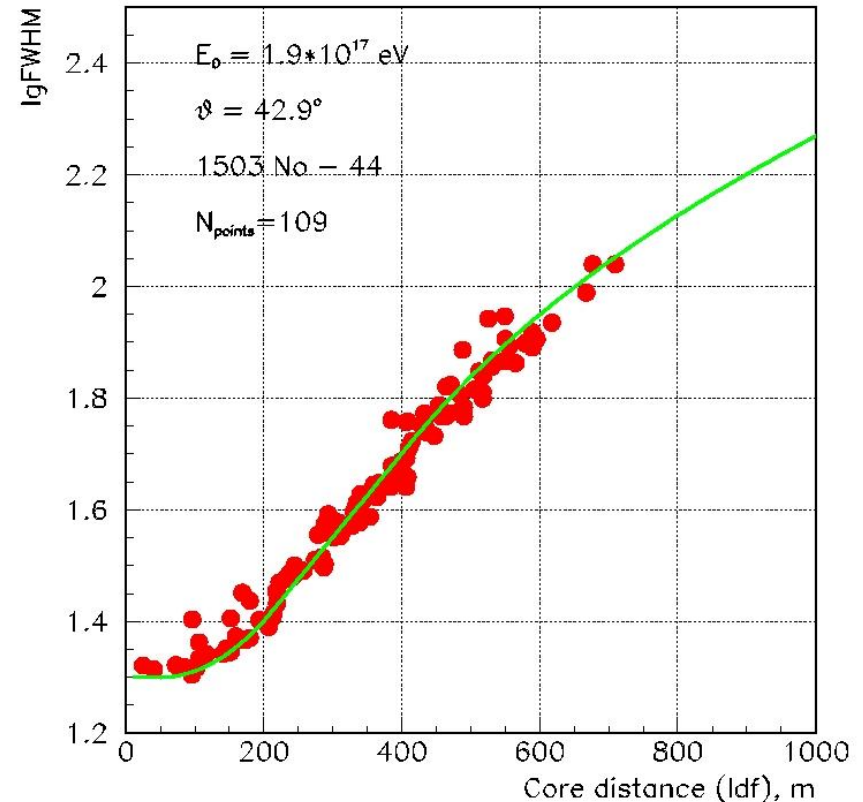
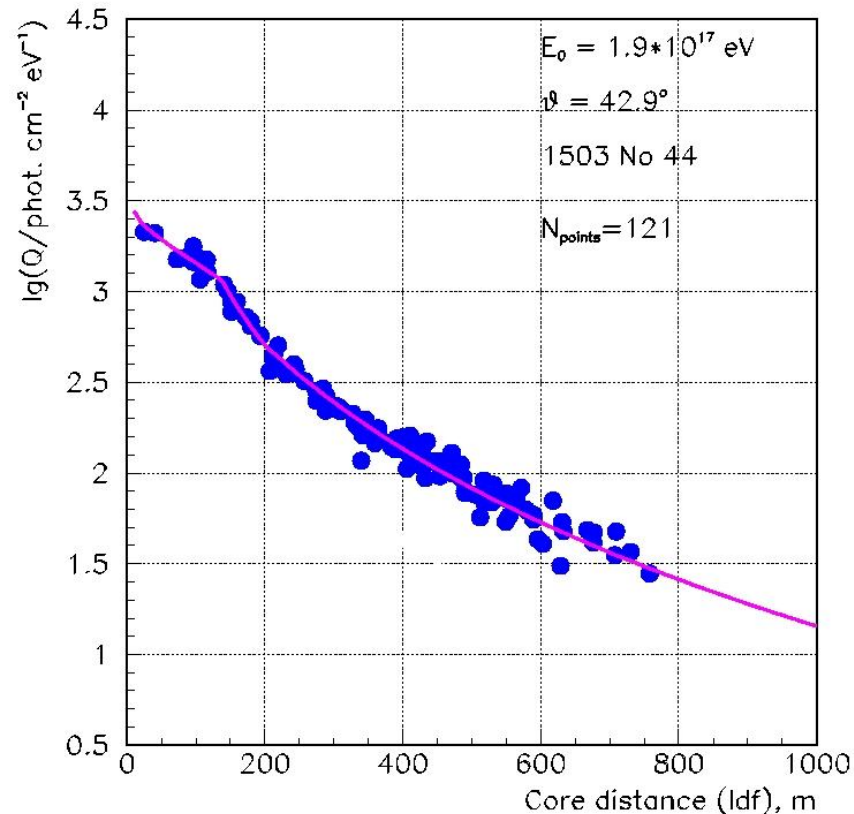
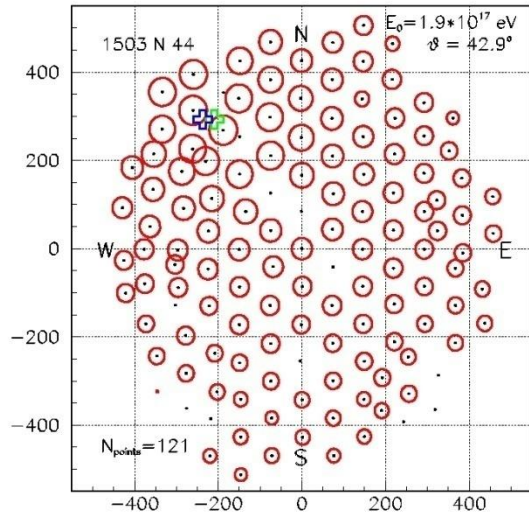
# Пример события. Тунка-133. 15.03.2010



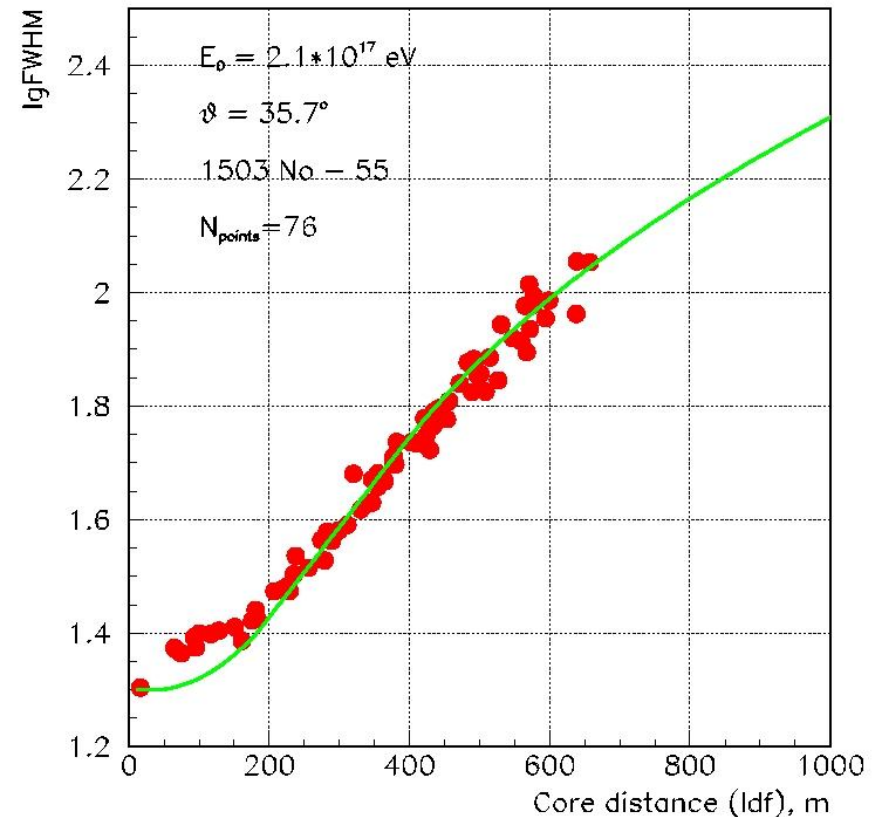
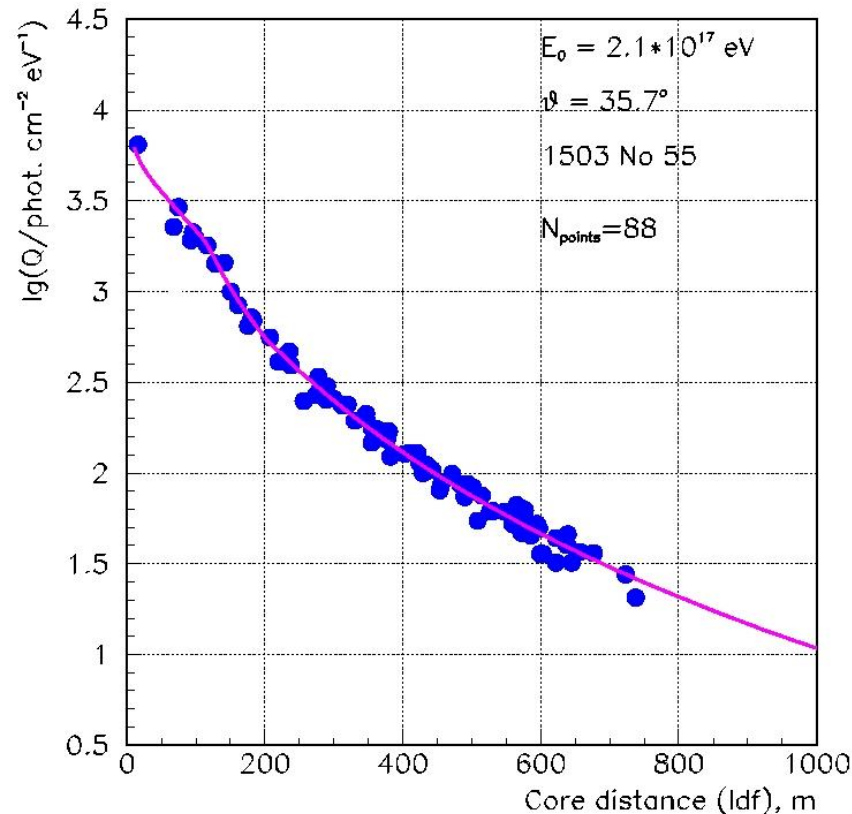
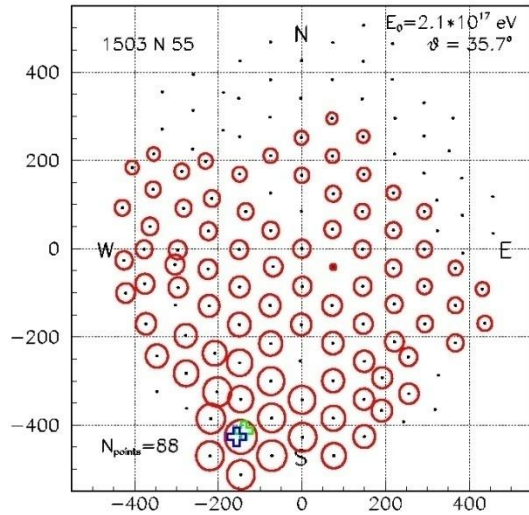
# Пример события. Тунка-133. 15.03.2010



# Пример события. Тунка-133. 15.03.2010

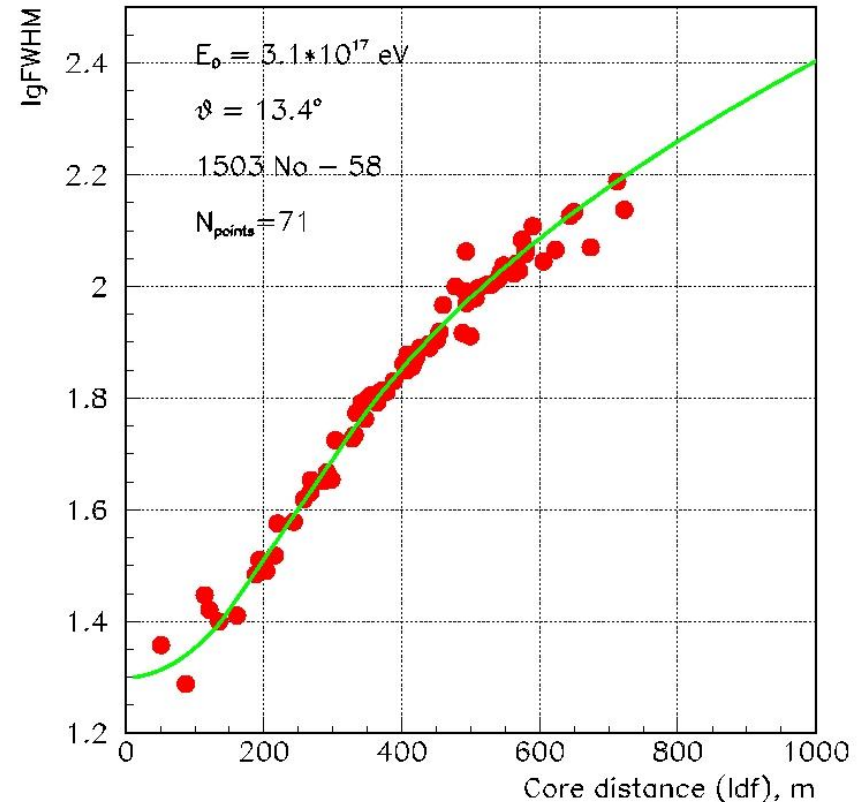
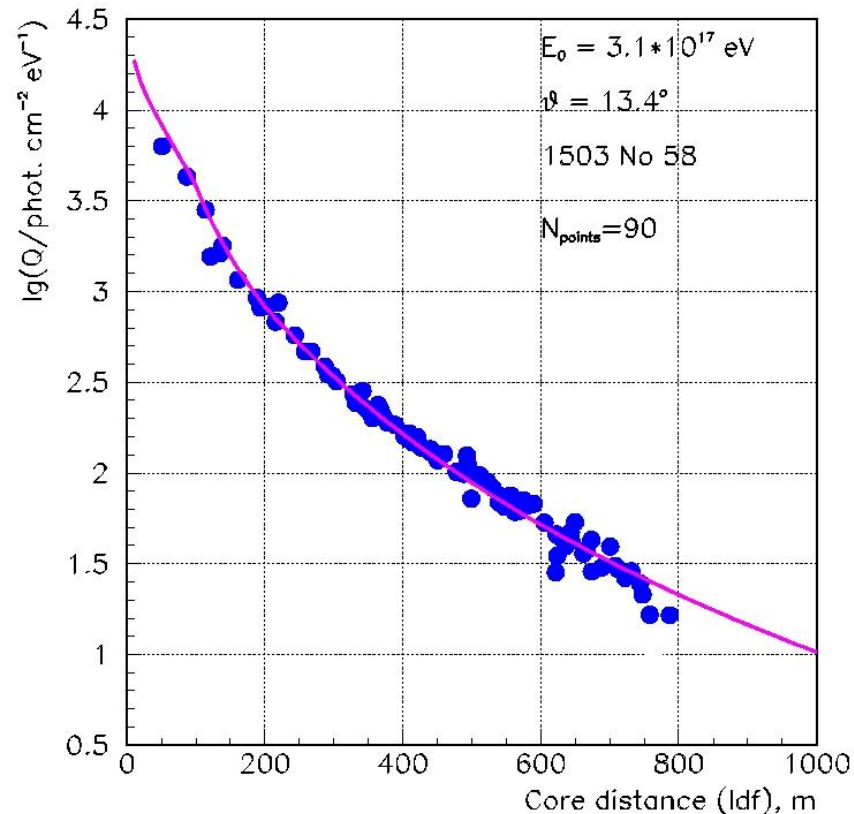
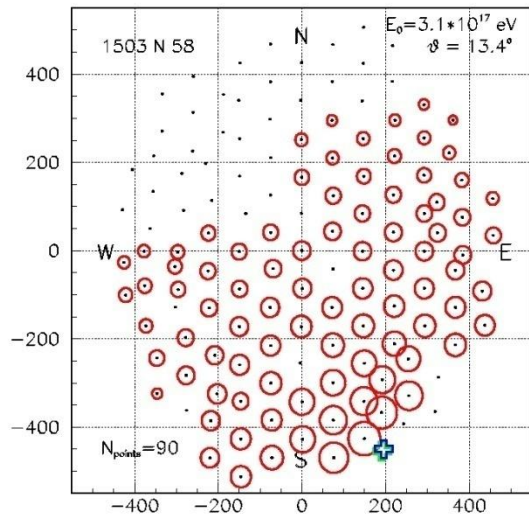


# Пример события. Тунка-133. 15.03.2010

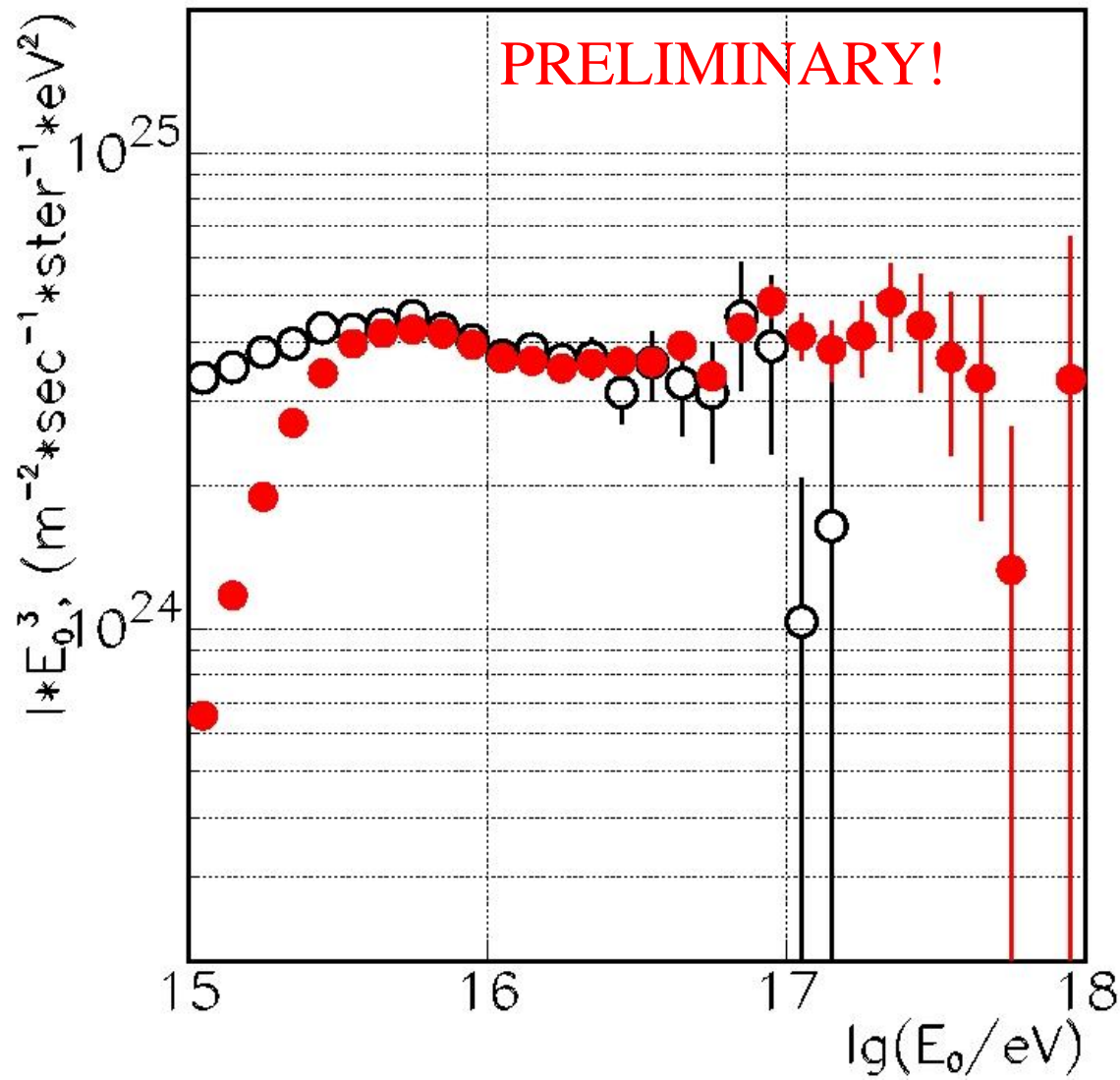




# Пример события. Тунка-133. 15.03.2010



# Tunka-133: Primary energy spectrum



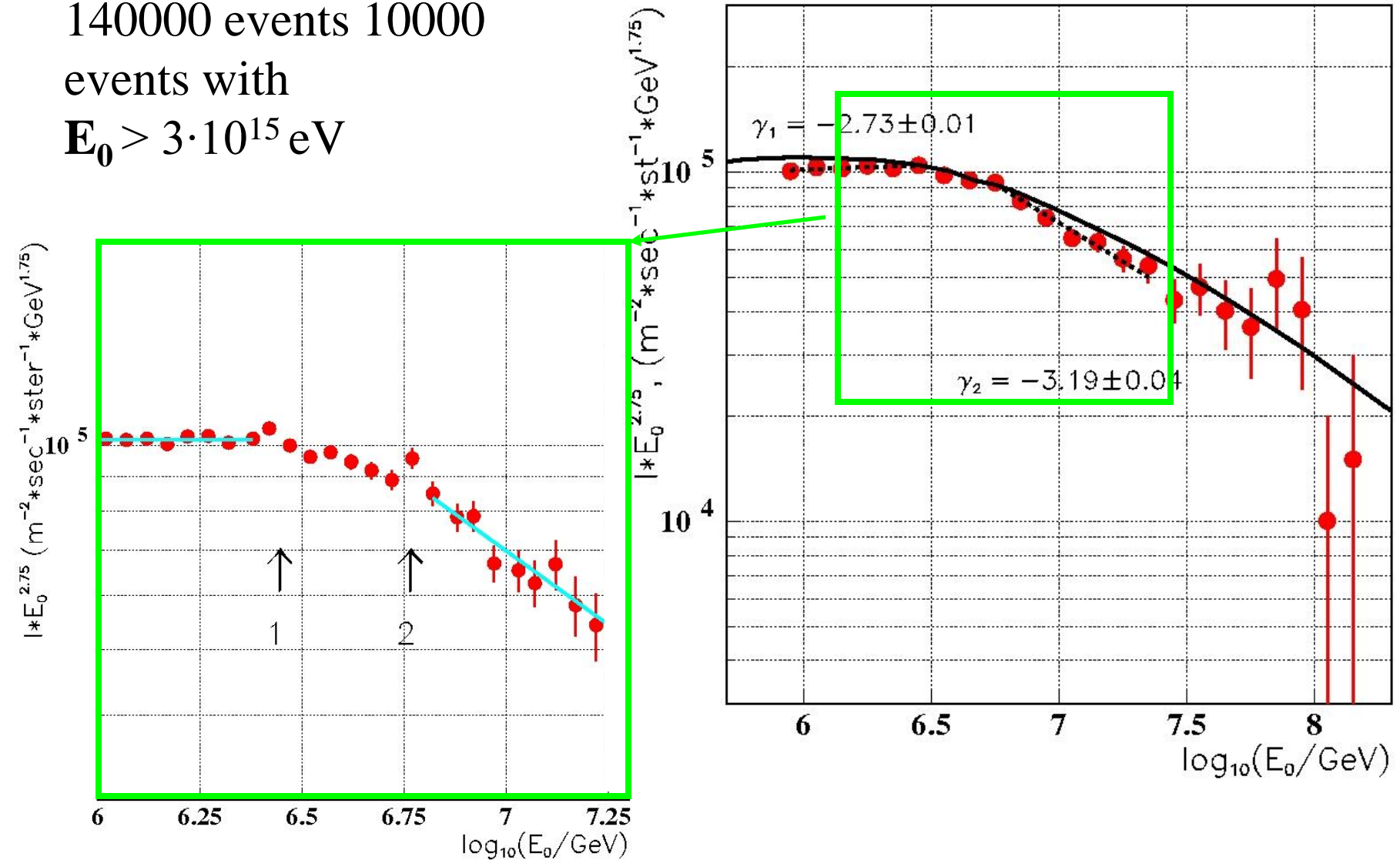
# Differential energy spectrum – Tunka-25

300 hours  $\theta < 25$

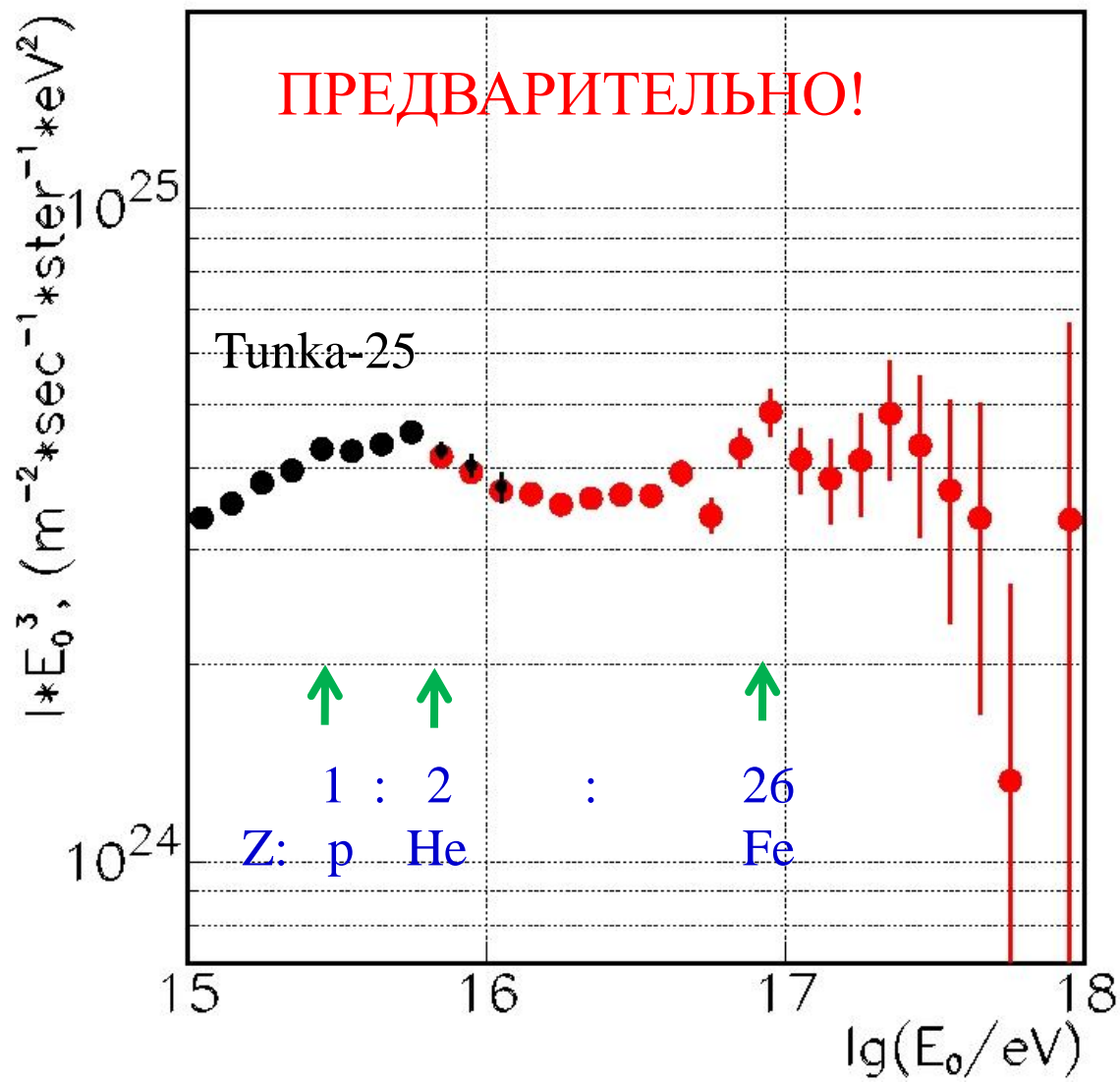
140000 events 10000

events with

$E_0 > 3 \cdot 10^{15}$  eV



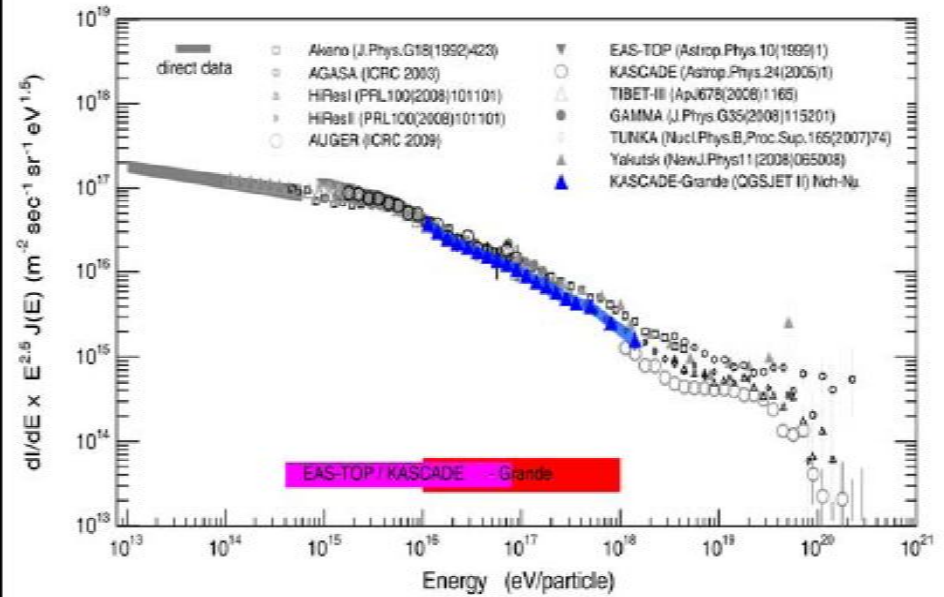
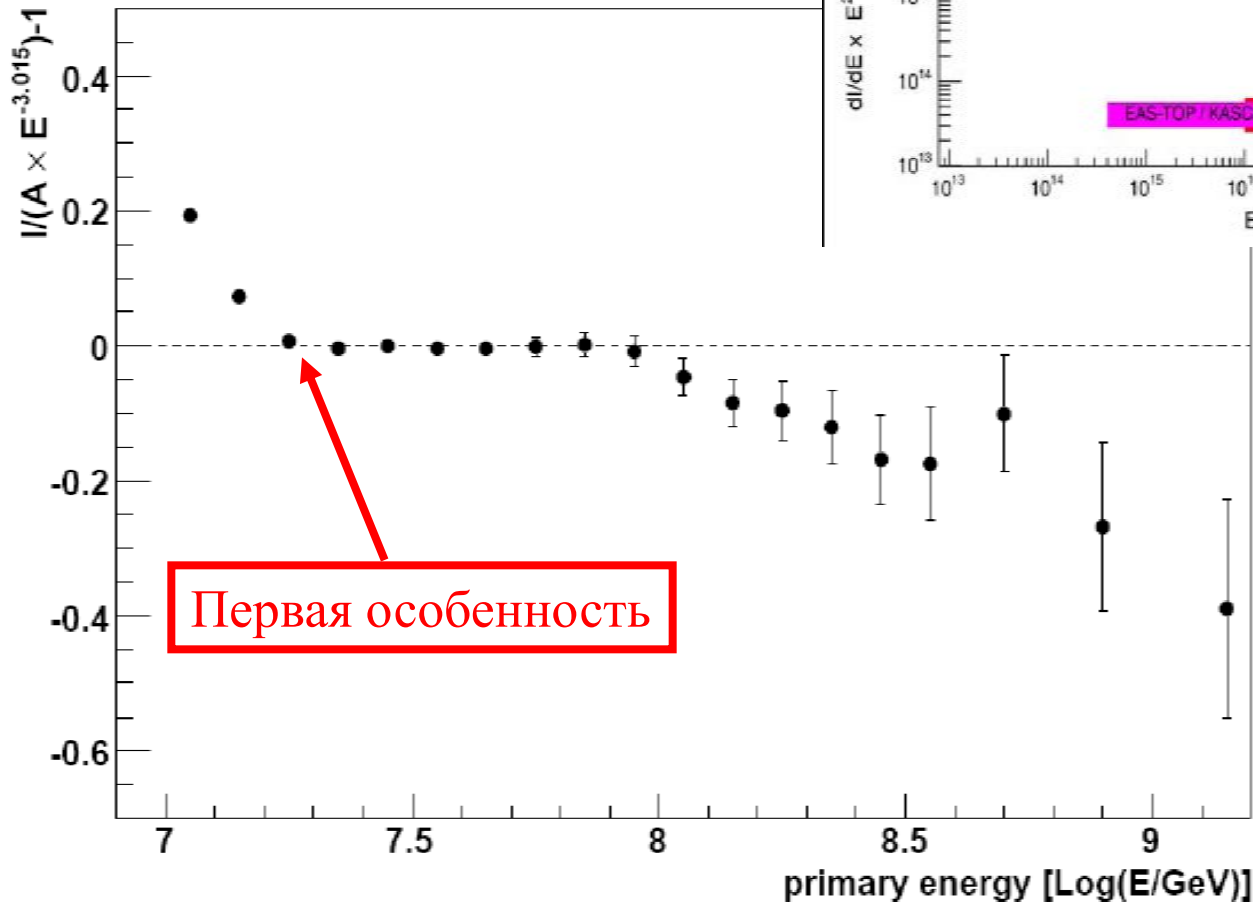
# Тунка-133: Энергетический спектр





# Особенности спектра в переходной области

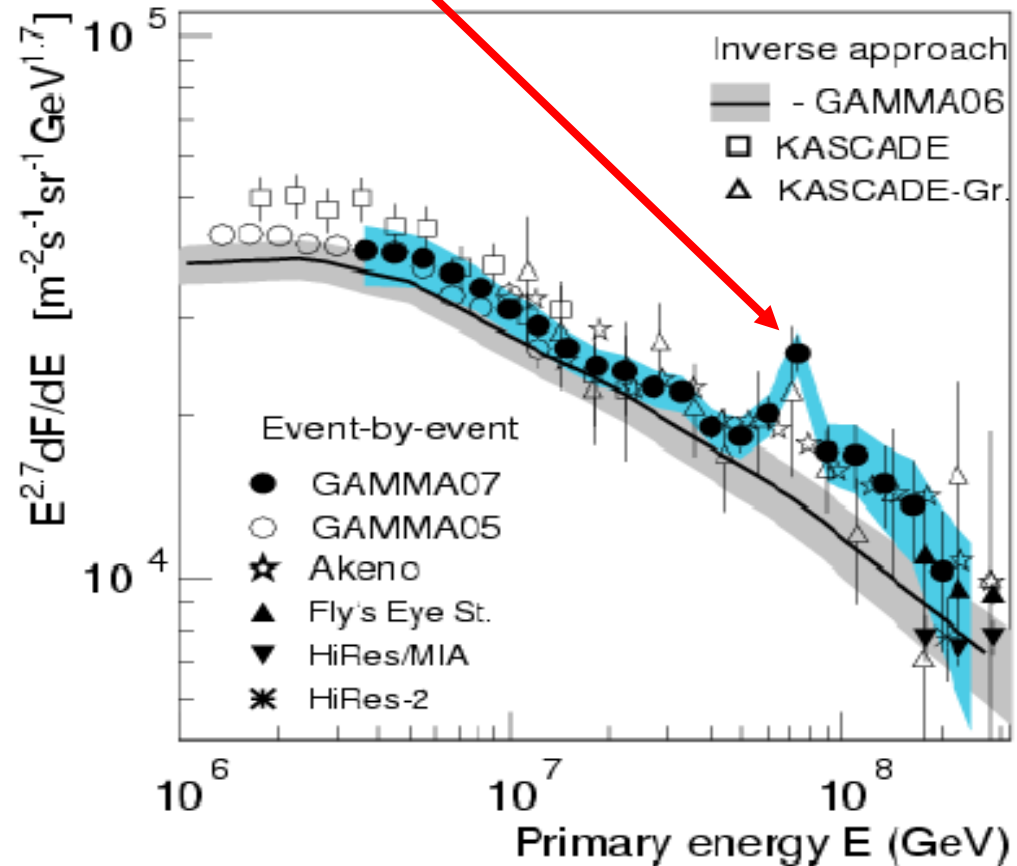
## KASCADE-Grande 2010

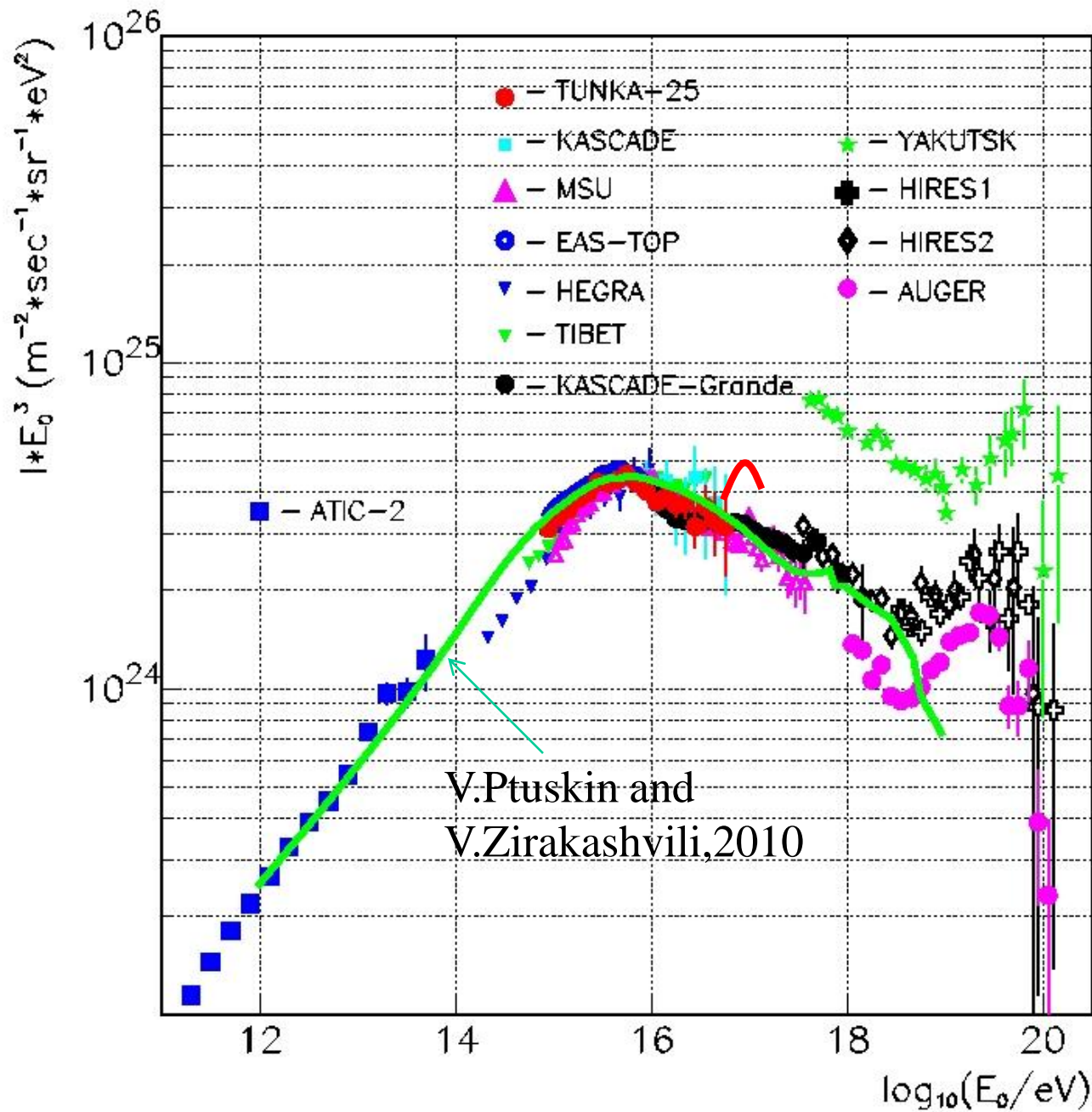


# GAMMA (Mt. Aragaz, 3200 a.s.l.)



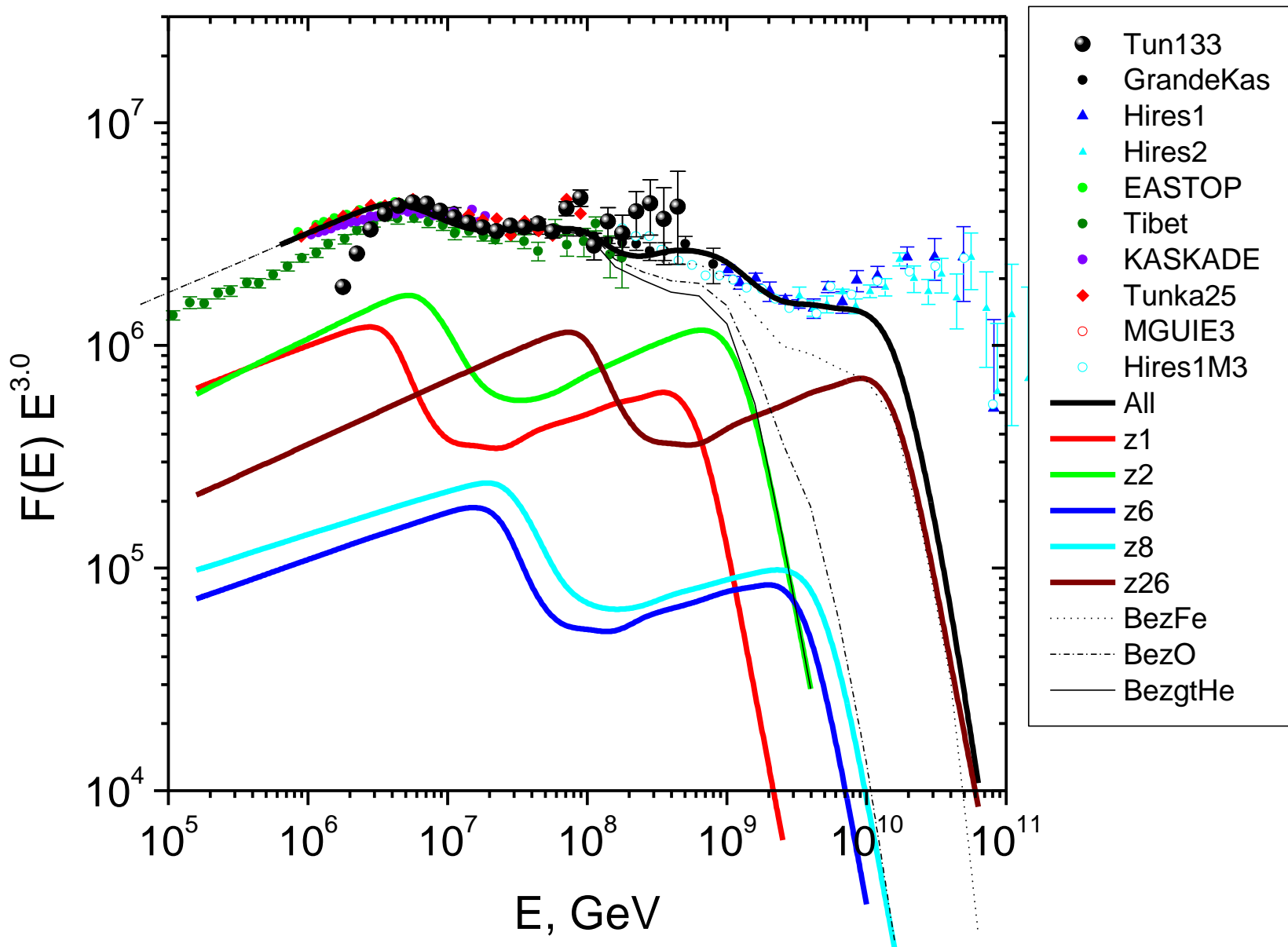
Вторая особенность





4 types of SNR

L. Sveshnikova, private communication,  
2 types of SNR with  $E_{\max}$  difference  $\sim 150$

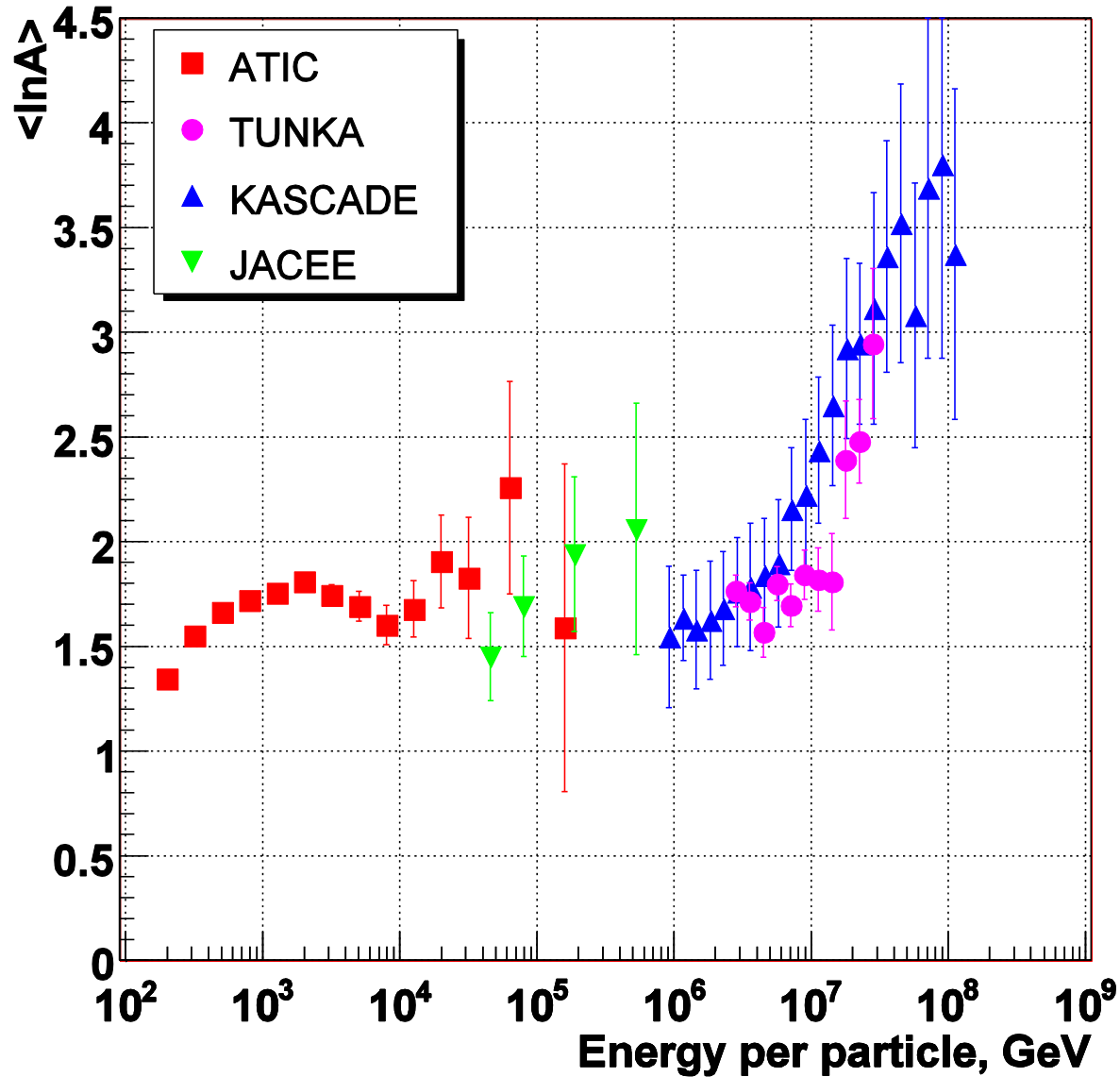




# Оценка массового состава ПРЕДВАРИТЕЛЬНО!

1. Связь  $X_{\max}$  с массой первичной частицы
2. Два метода измерения  $X_{\max}$  с помощью Черенковского света
3. Зависимость средних  $X_{\max}$  от энергии
4. Предварительные результаты по зависимости  $\ln A$  от  $E_0$

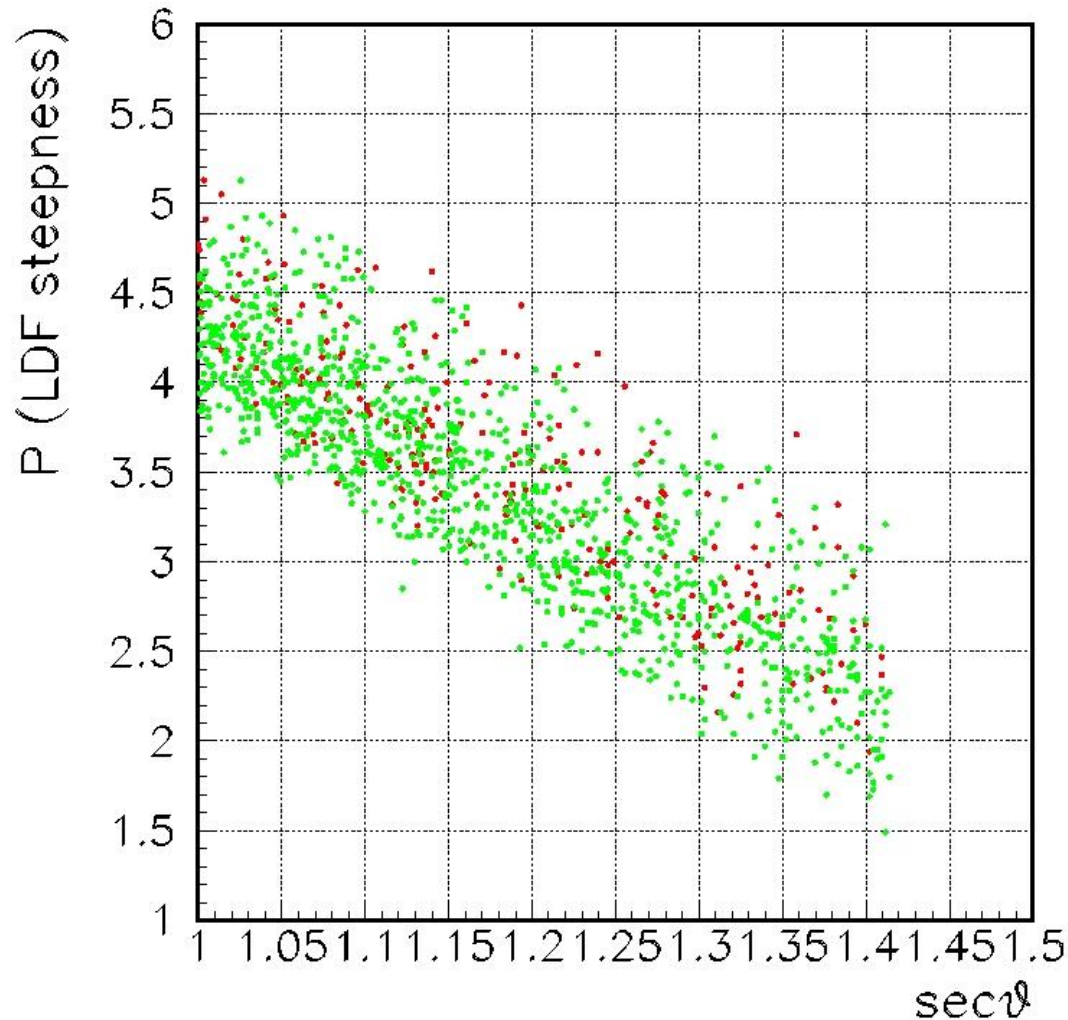
# Mean mass composition



# ЭКСПЕРИМЕНТ:

Корреляция крутизны ФПР и зенитного угла

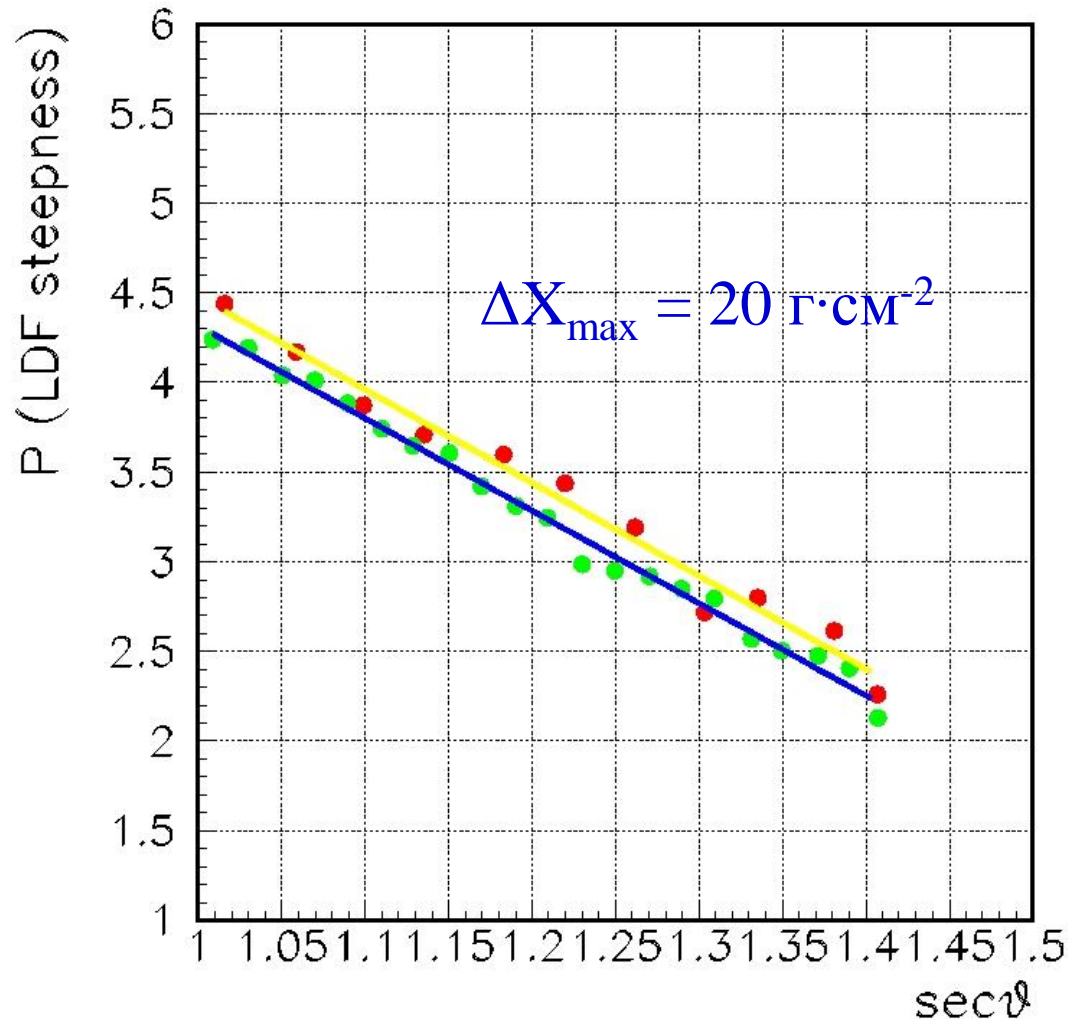
$$E_0 = 3 \cdot 10^{16} \text{ eV} \text{ and } E_0 = 6 \cdot 10^{16} \text{ eV}$$



# ЭКСПЕРИМЕНТ:

Зависимость средней крутизны ФПР от зенитного

угла  $E_0 = 3 \cdot 10^{16}$  эВ и  $E_0 = 6 \cdot 10^{16}$  эВ





# ЭКСПЕРИМЕНТ:

## Зависимость $H_{\max}$ от крутизны ФПР $P$

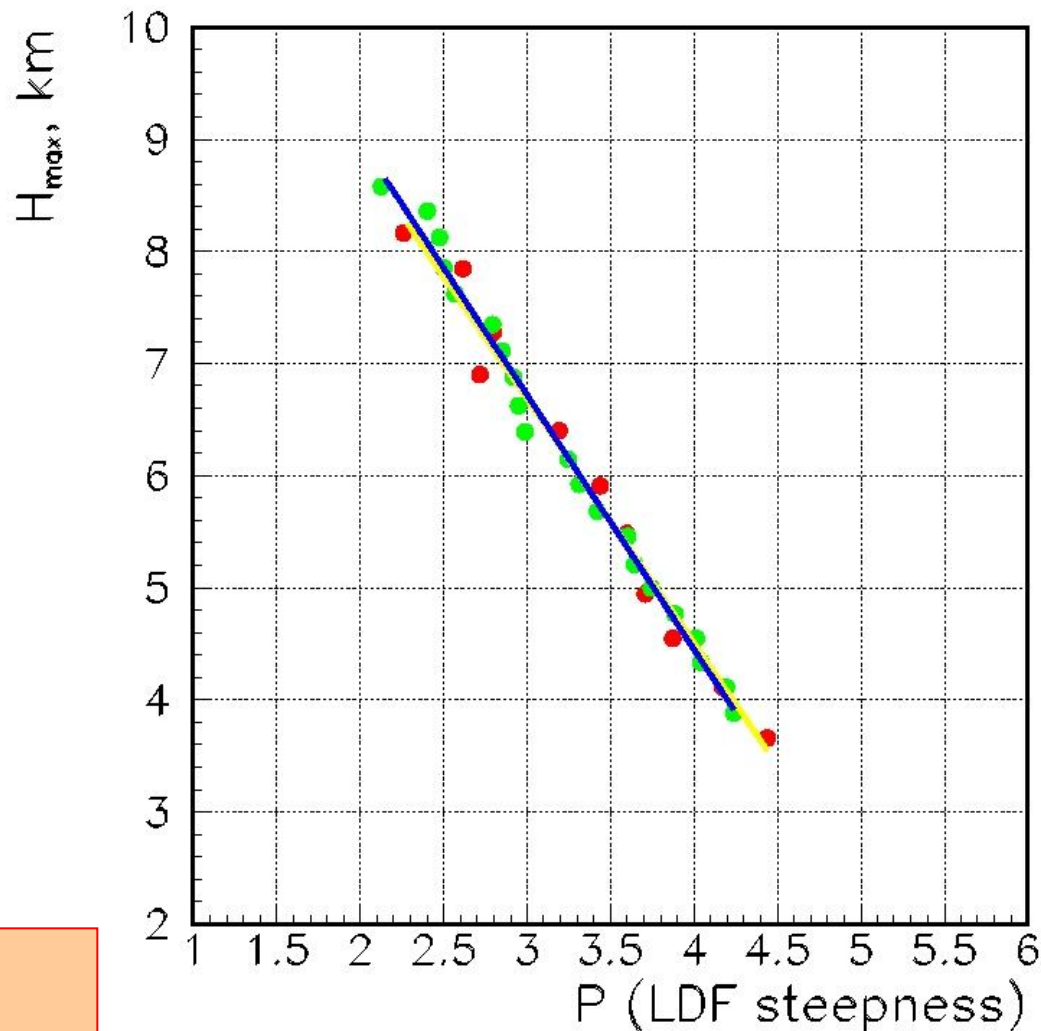
$$\langle X_{\max} \rangle = 560 \text{ Г}\cdot\text{см}^{-2}$$

for

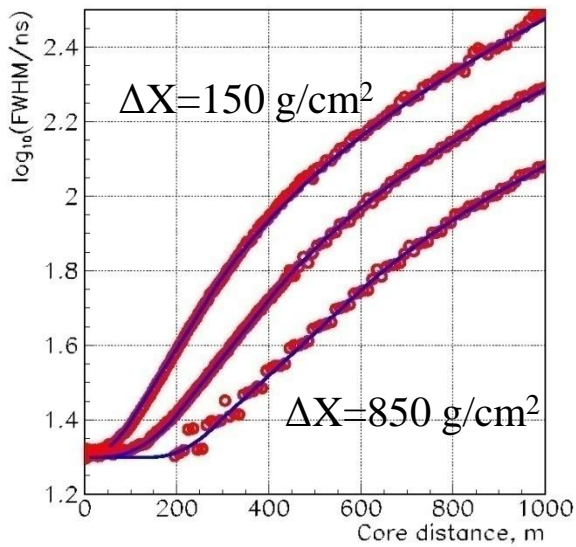
$$E_0 = 3 \cdot 10^{16} \text{ эВ}$$

$\sec\theta \rightarrow H_{\max}$  в [км]

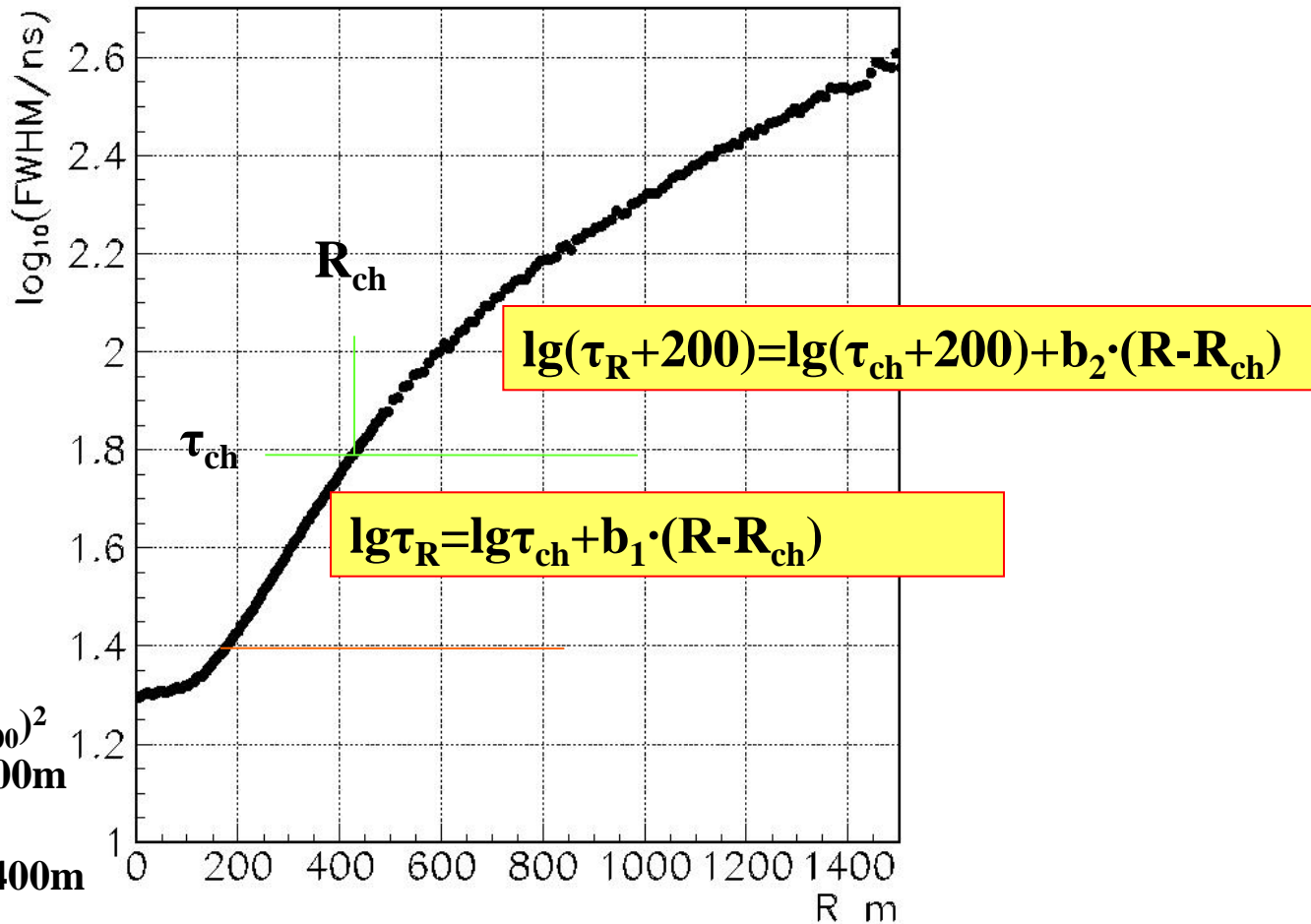
Используется для  
получения  $X_{\max}$



$$H_{\max} = 12.73 - 2.07 \cdot P, \text{ [км]}$$



# CORSIKA: Функция длительность-расстояние (ФДР)



$$\tau_R = \text{FWHM}(R)$$

Форма ФДР

описывается

одним

параметром -

FWHM(400):

$$b_1 = 0.00196 \cdot \lg \tau_{400} - 0.00183$$

$$b_2 = 0.000381 \cdot \lg \tau_{400} - 0.000335$$

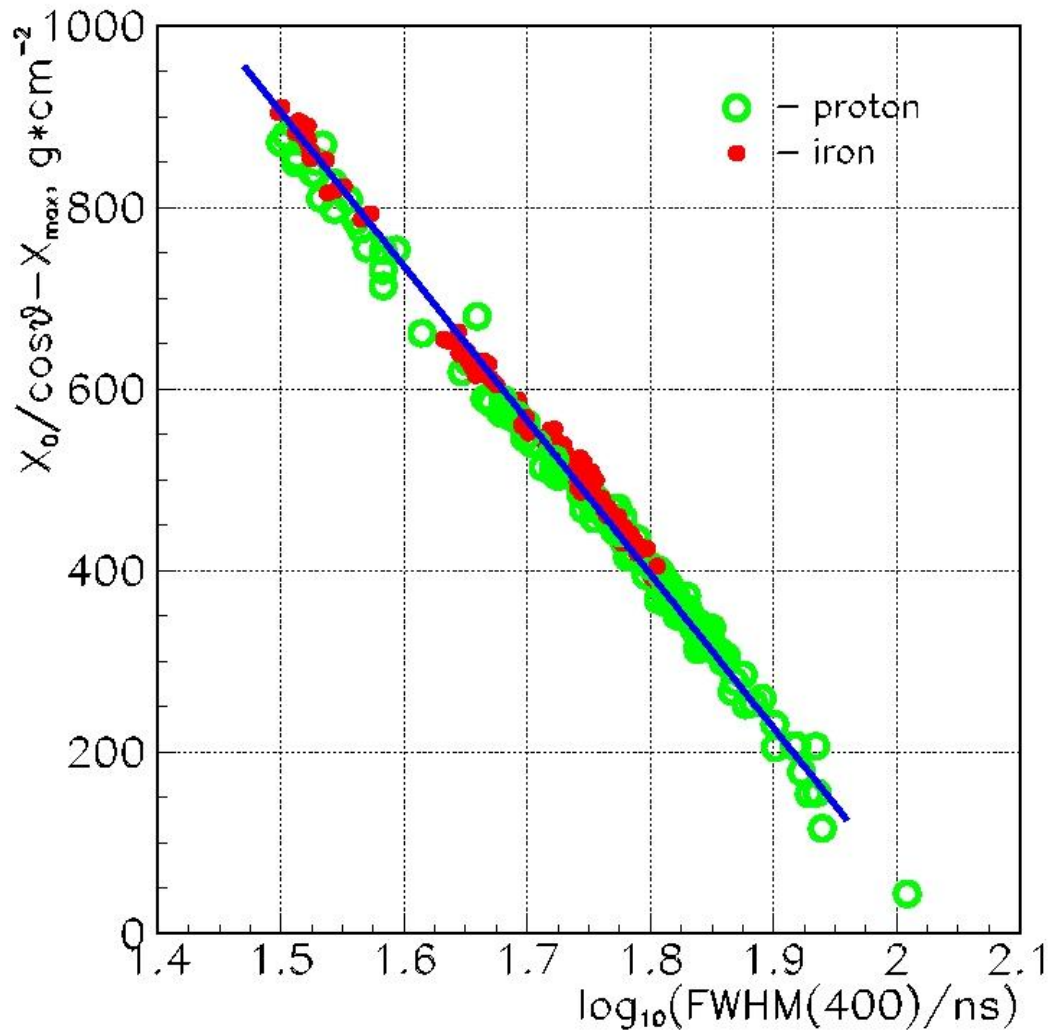
$$R_{ch} = 3976 - 3429 \cdot \lg \tau_{400} + 786 \cdot (\lg \tau_{400})^2$$

$$\lg \tau_{ch} = \lg \tau_{400} + b_1 (R_{ch} - 400), R_{ch} < 400 \text{ m}$$

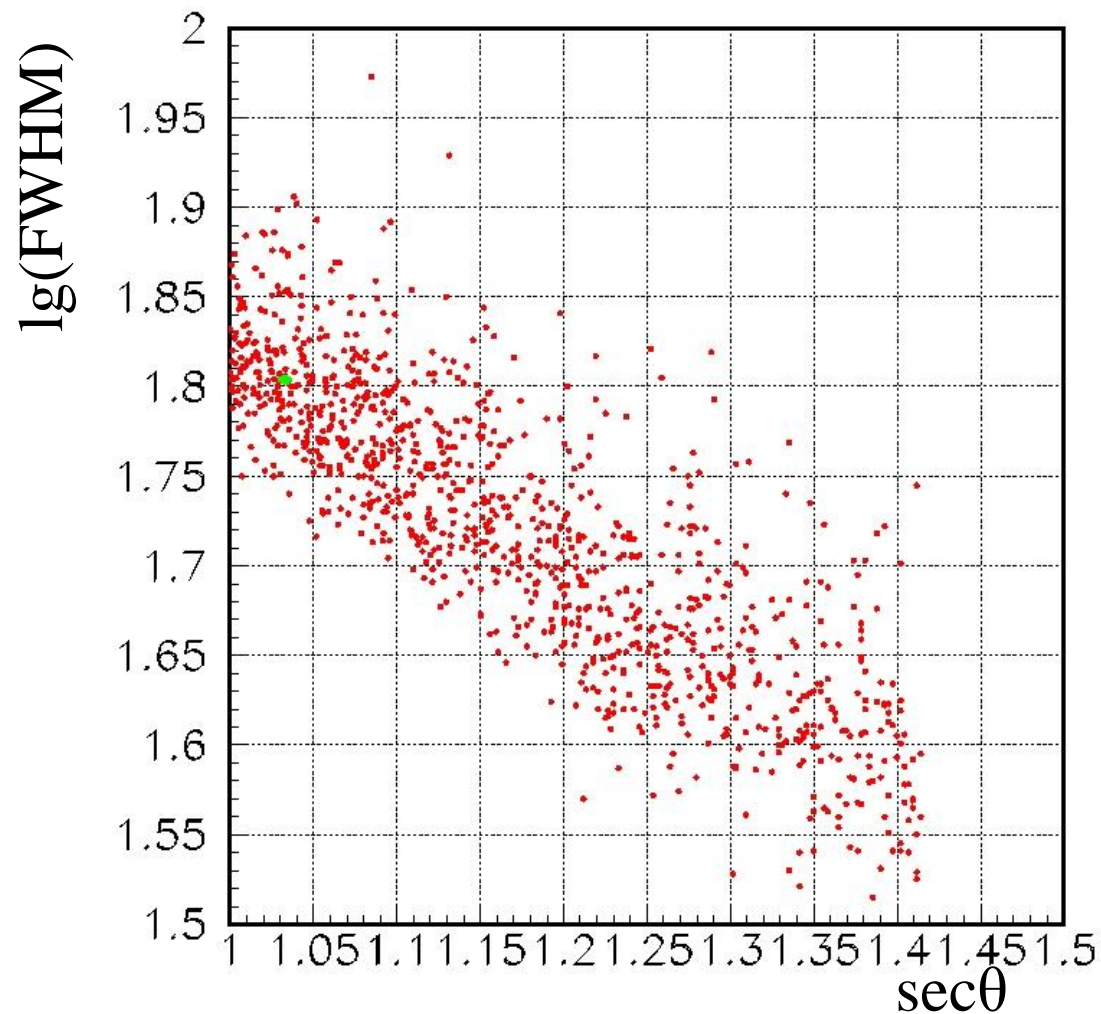
$$\lg(\tau_R + 200) =$$

$$\lg(\tau_{ch} + 200) + b_2 (R_{ch} - 400), R_{ch} > 400 \text{ m}$$

# CORSIKA: $X_{\max}$ vs. FWHM(400)



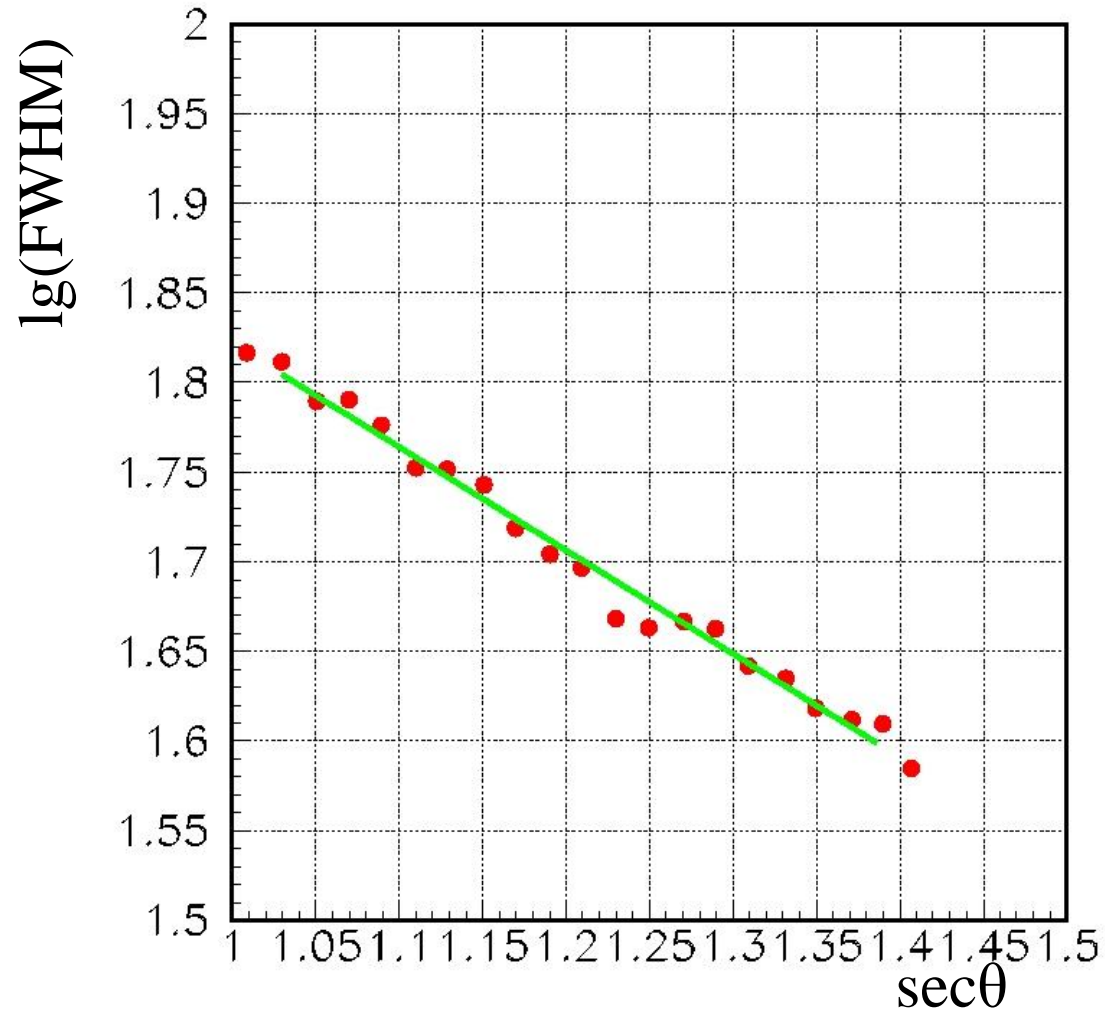
# ЭКСПЕРИМЕНТ: Зависимость FWHM(400) от зенитного угла для $E_0 = 3 \cdot 10^{16}$ эВ





# ЭКСПЕРИМЕНТ:

Средняя FWHM(400) от  $\theta$  для  $E_0 = 3 \cdot 10^{16}$  эВ



# ЭКСПЕРИМЕНТ:

$\Delta X_{\max}$  В ЗАВИСИМОСТИ ОТ FWHM(400)

$$\langle X_{\max} \rangle = 560 \text{ Г}\cdot\text{СМ}^{-2}$$

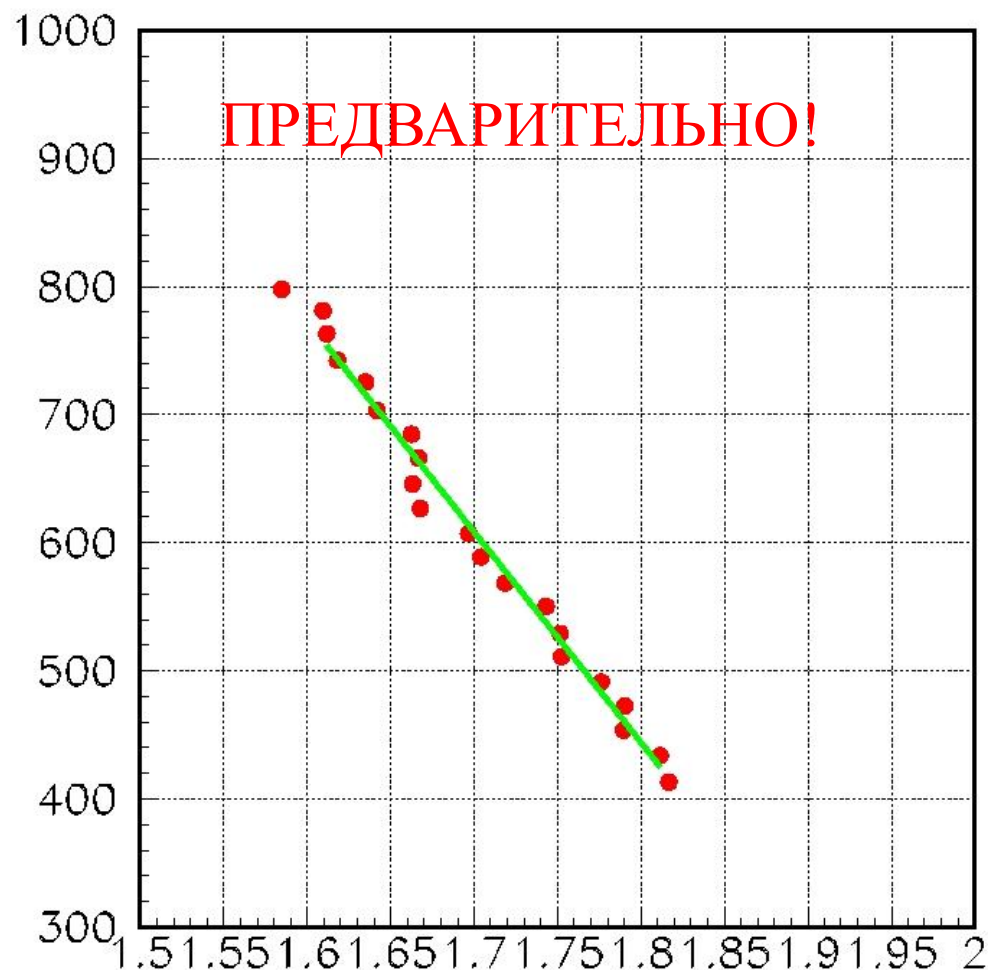
for

$$E_0 = 3 \cdot 10^{16} \text{ ЭВ}$$

$$\sec\theta \rightarrow \Delta X_{\max} \text{ В } [\text{Г}\cdot\text{СМ}^{-2}]$$

Используется для  
получения  $X_{\max}$

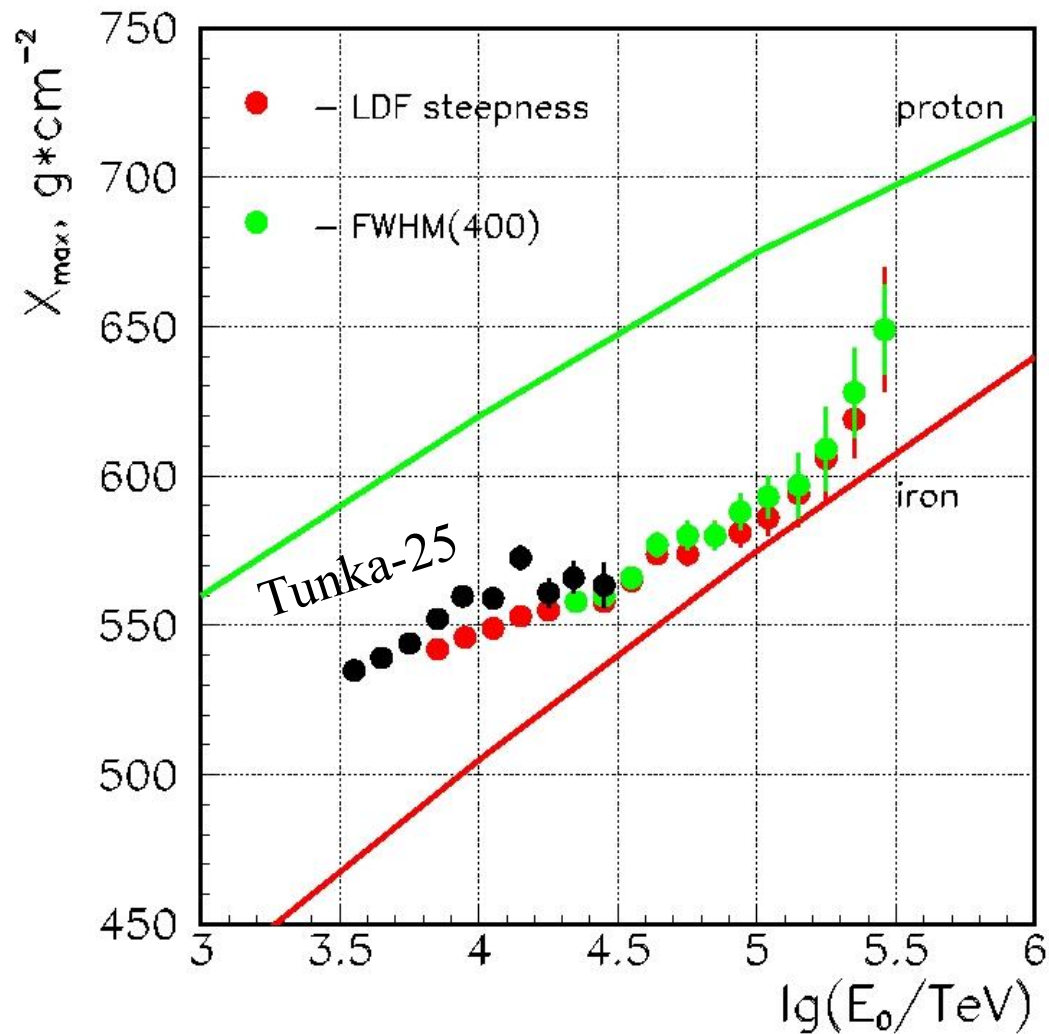
$$\Delta X_{\max} = X_0 \cdot \sec\theta - X_{\max}$$



$$\Delta X_{\max} = 3450 - 1645 \cdot \text{FWHM}(400)$$

$$\lg(\text{FWHM}(400))$$

# Средняя глубина максимума ШАЛ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО!



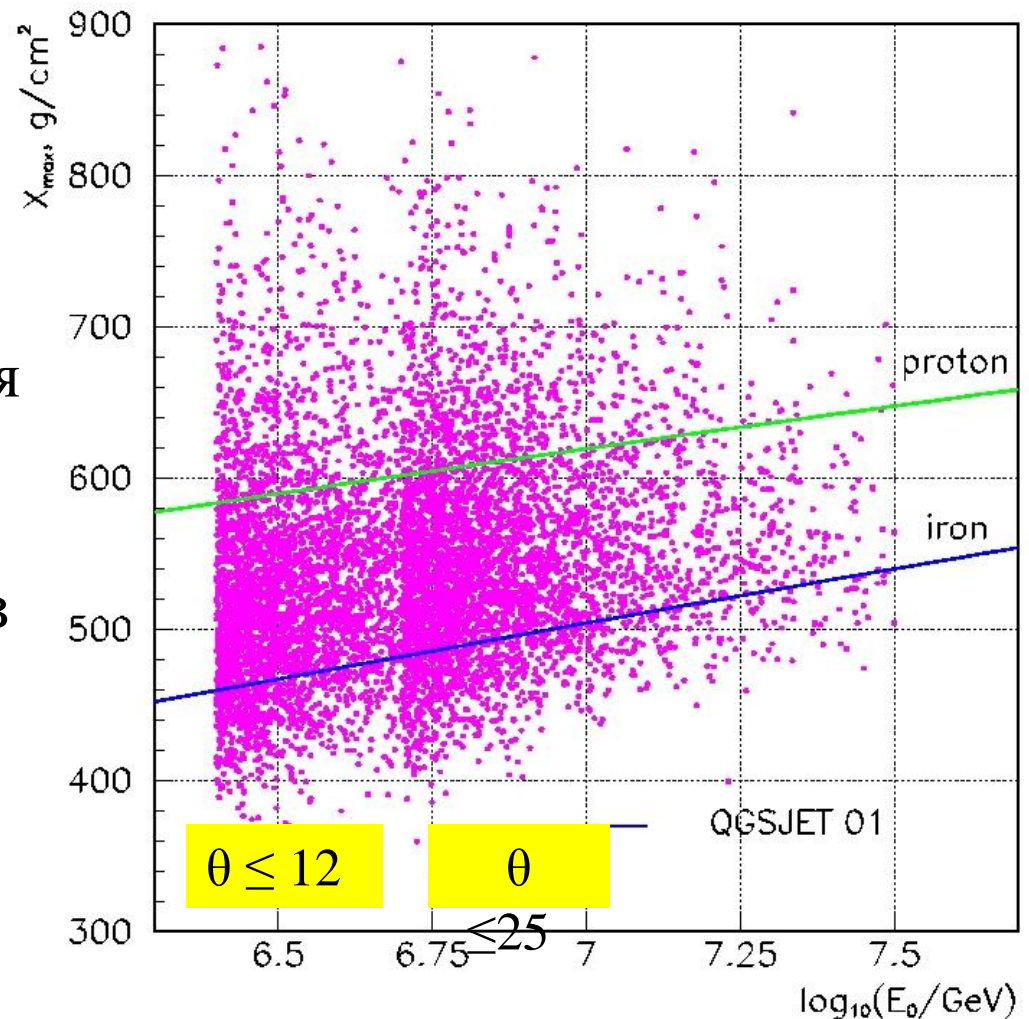
## Дальнейший анализ информации

1. Построение распределений по  $X_{\max}$  в узких бинах по  $\lg E_0$
2. Моделирование распределений по  $X_{\max}$  для групп ядер от протонов до железа
3. Сравнение экспериментальных распределений с комбинированными расчетными и определение наиболее вероятного состава в каждом бине
4. Нахождение  $\langle \ln A \rangle$  в каждом бине по энергии

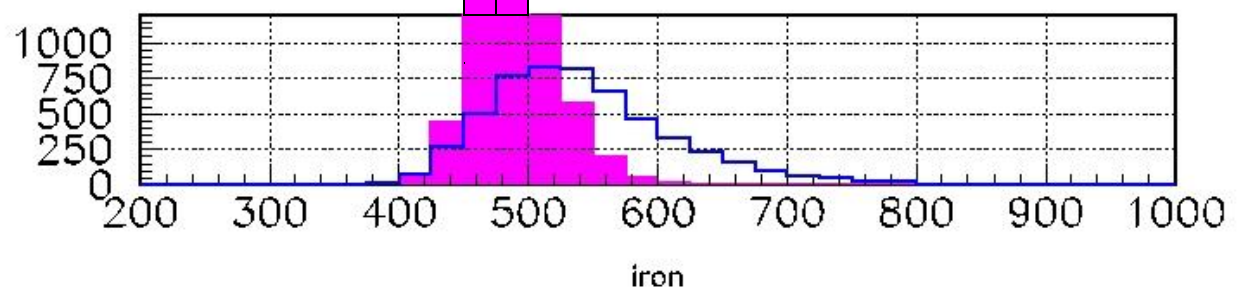
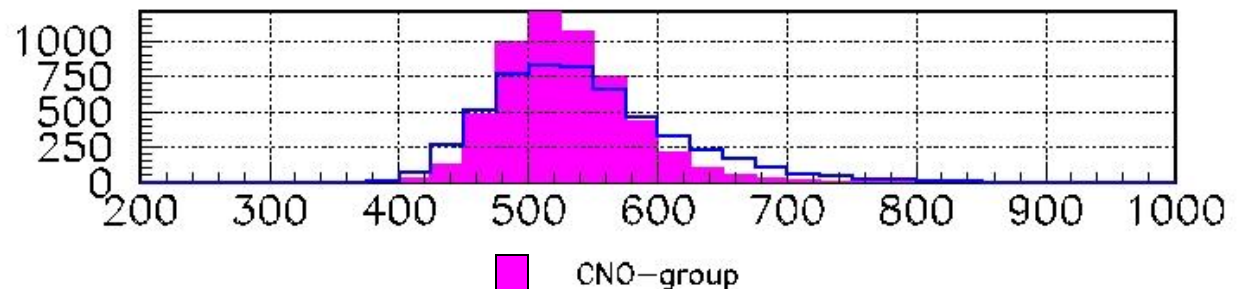
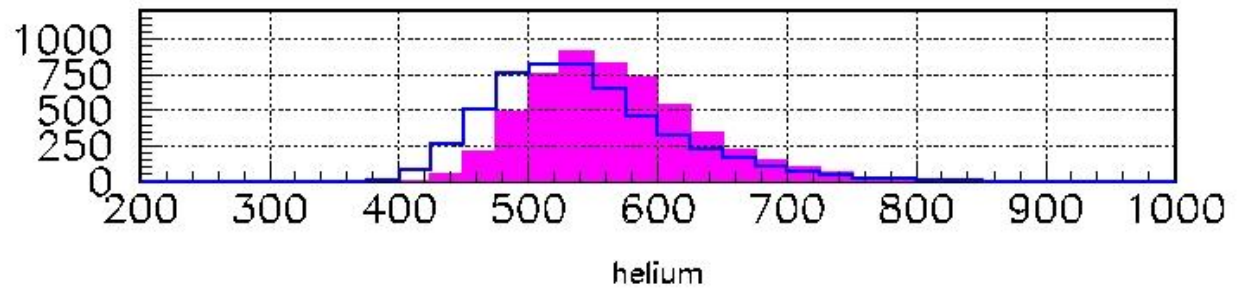
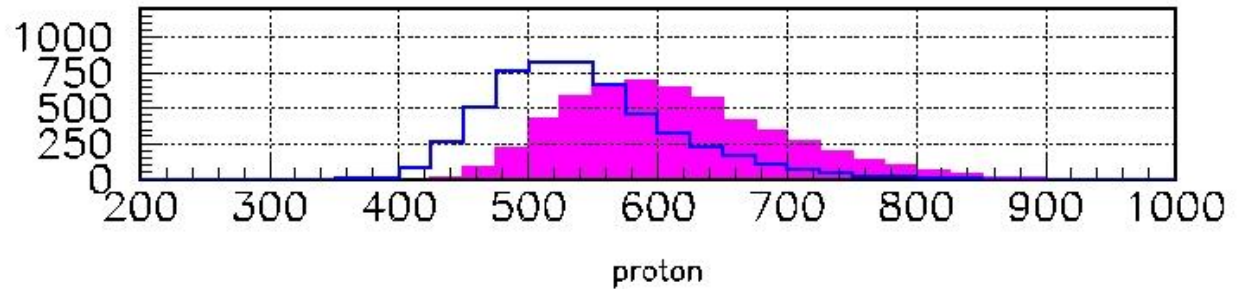


# $X_{\max}$ индивидуальные измерения на пимере предшествующего эксперимента Тунка-25

Оценка средних величин для широких несимметричных распределений недостаточна. Нужен анализ распределений в целом.

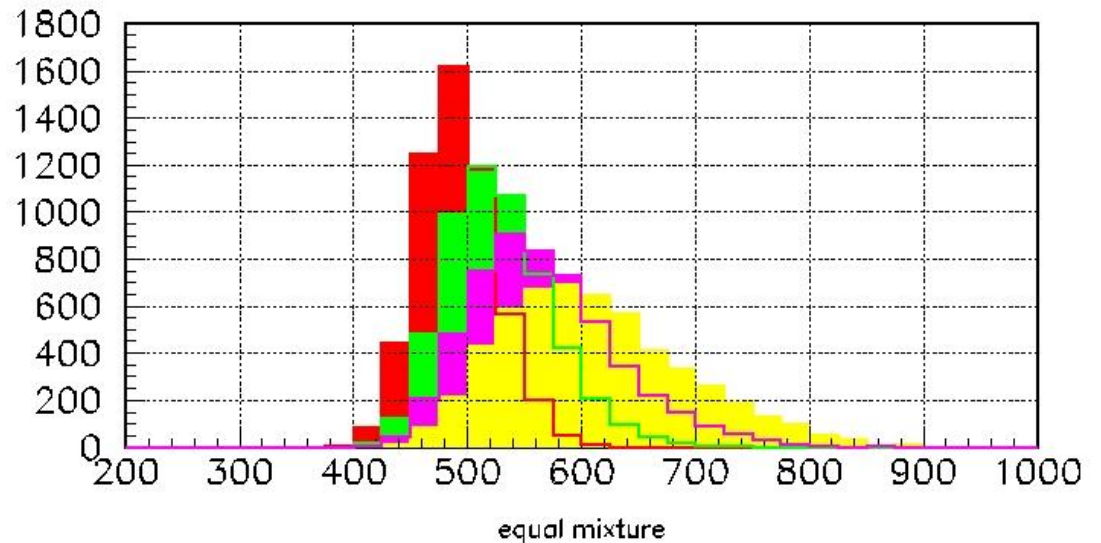


Simulated  $X_{\max}$  distributions for 4 different nuclei groups taking into account all apparatus uncertainties. Model QGSJET-01.

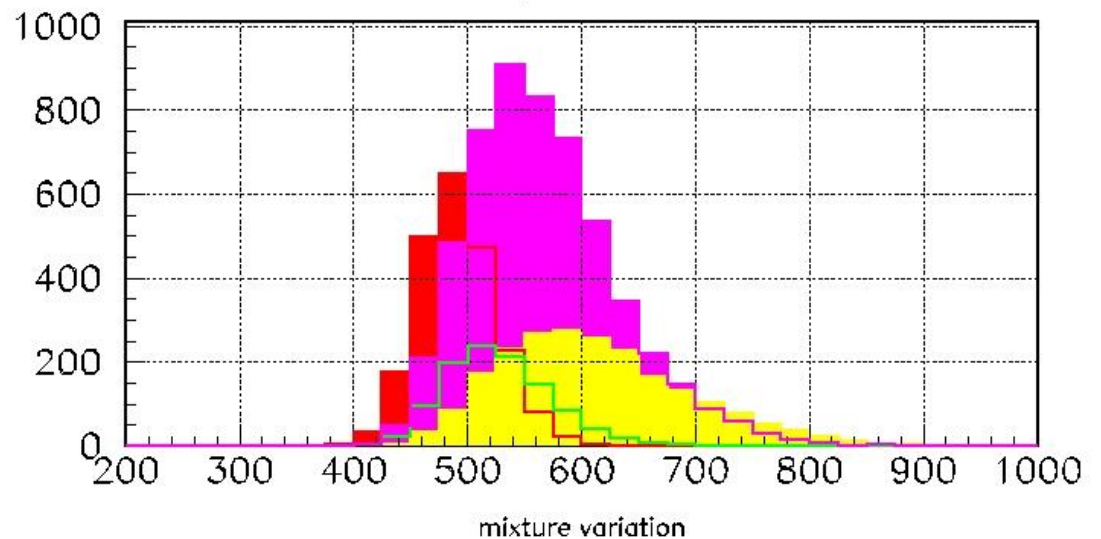


# Mass composition fit.

4 groups with equal weights:



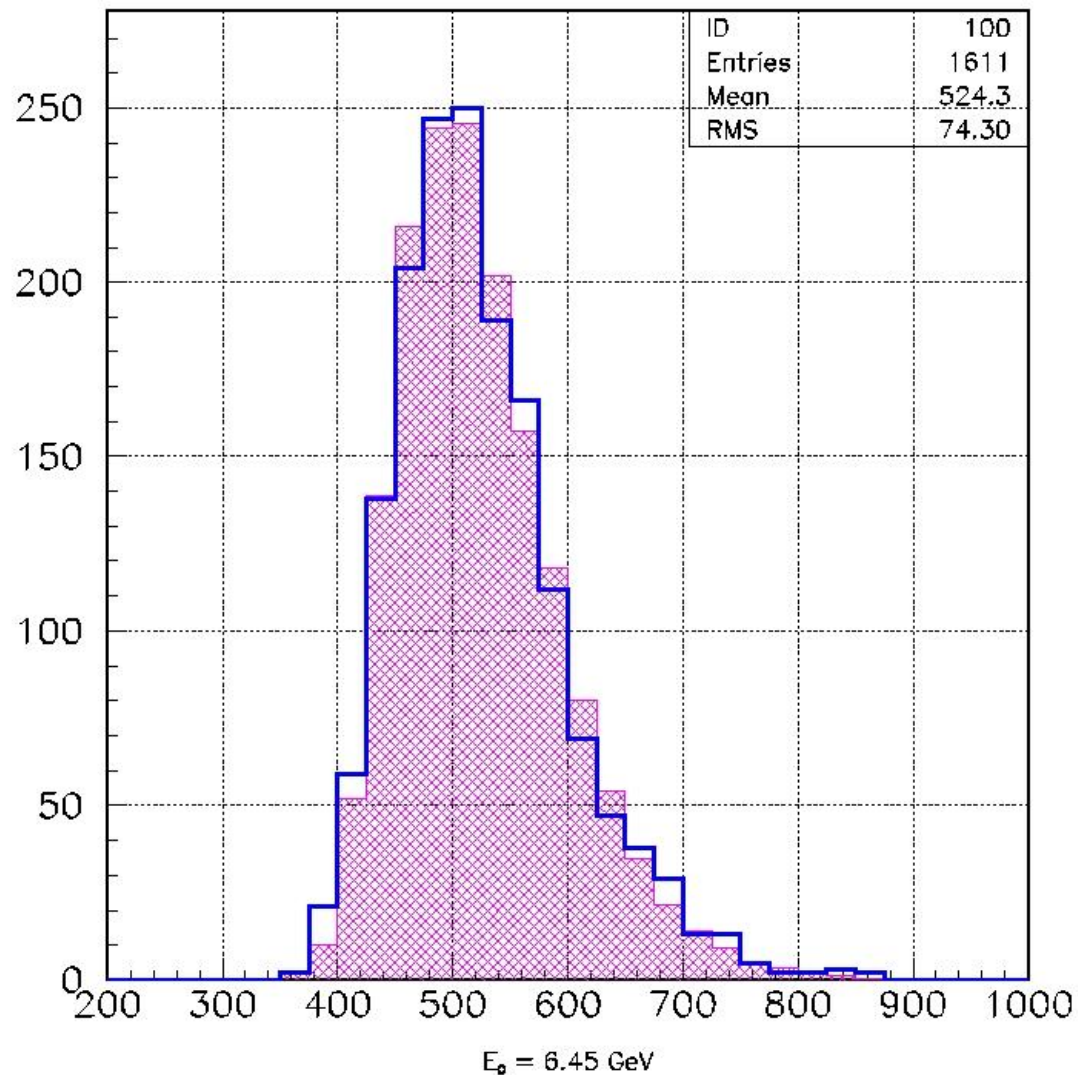
Weights fit for the best agreement with the experimental distribution:



# Тунка-25: распределение по $X_{\max}$

line – experiment

filled area – simulation

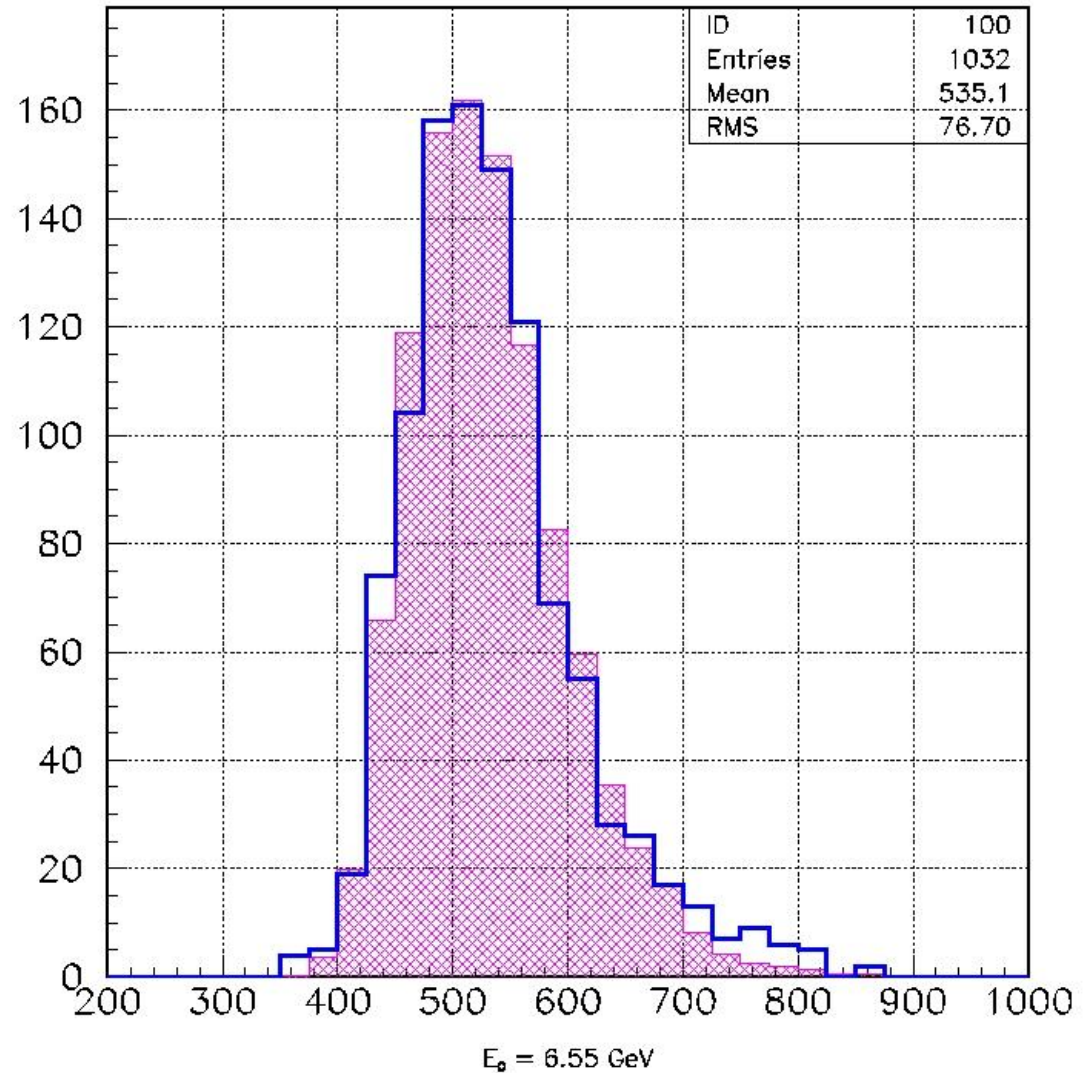




# $X_{\max}$ distribution

line – experiment

filled area – simulation

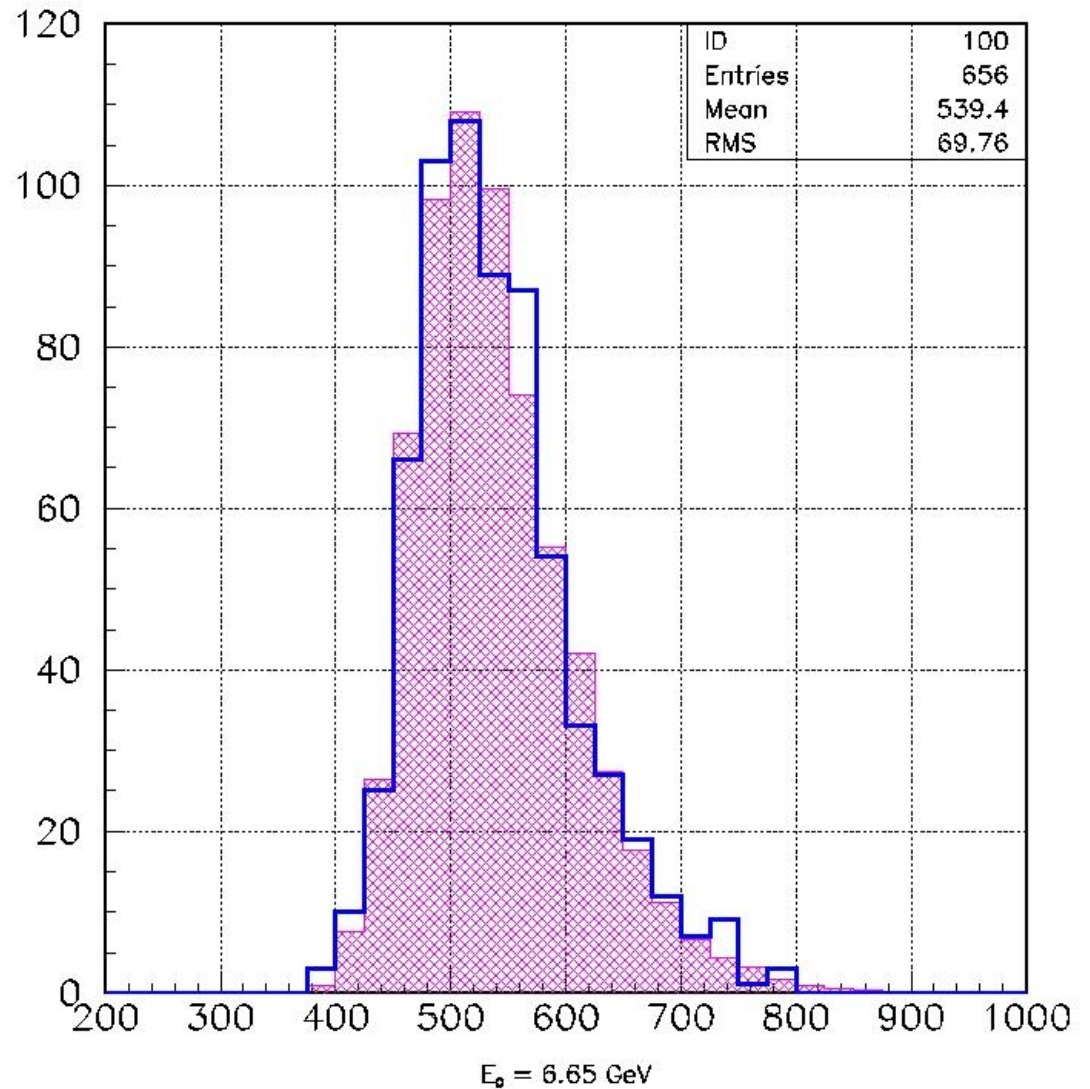




# $X_{\max}$ distribution

line – experiment

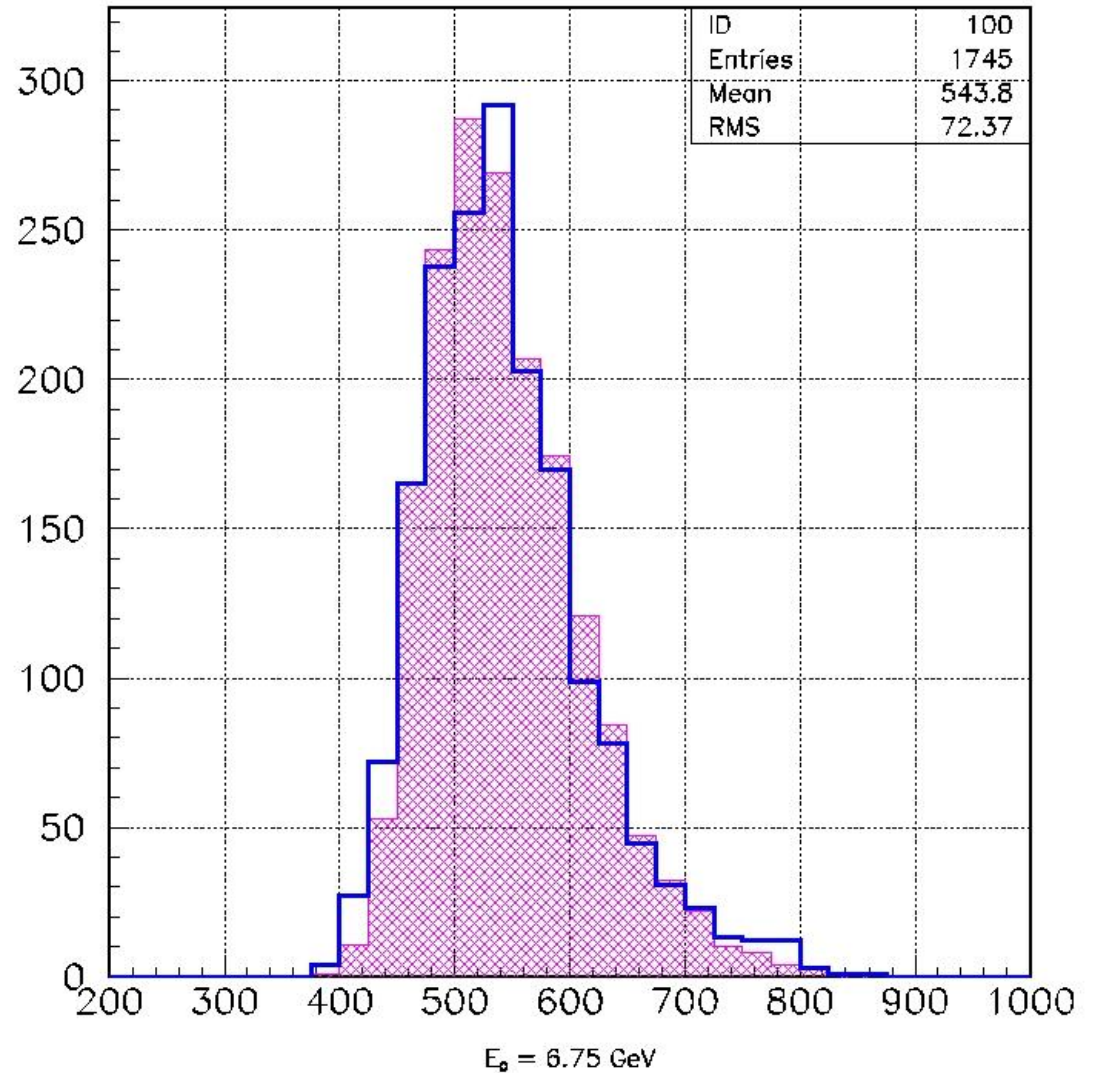
filled area – simulation



# $X_{\max}$ distribution

line – experiment

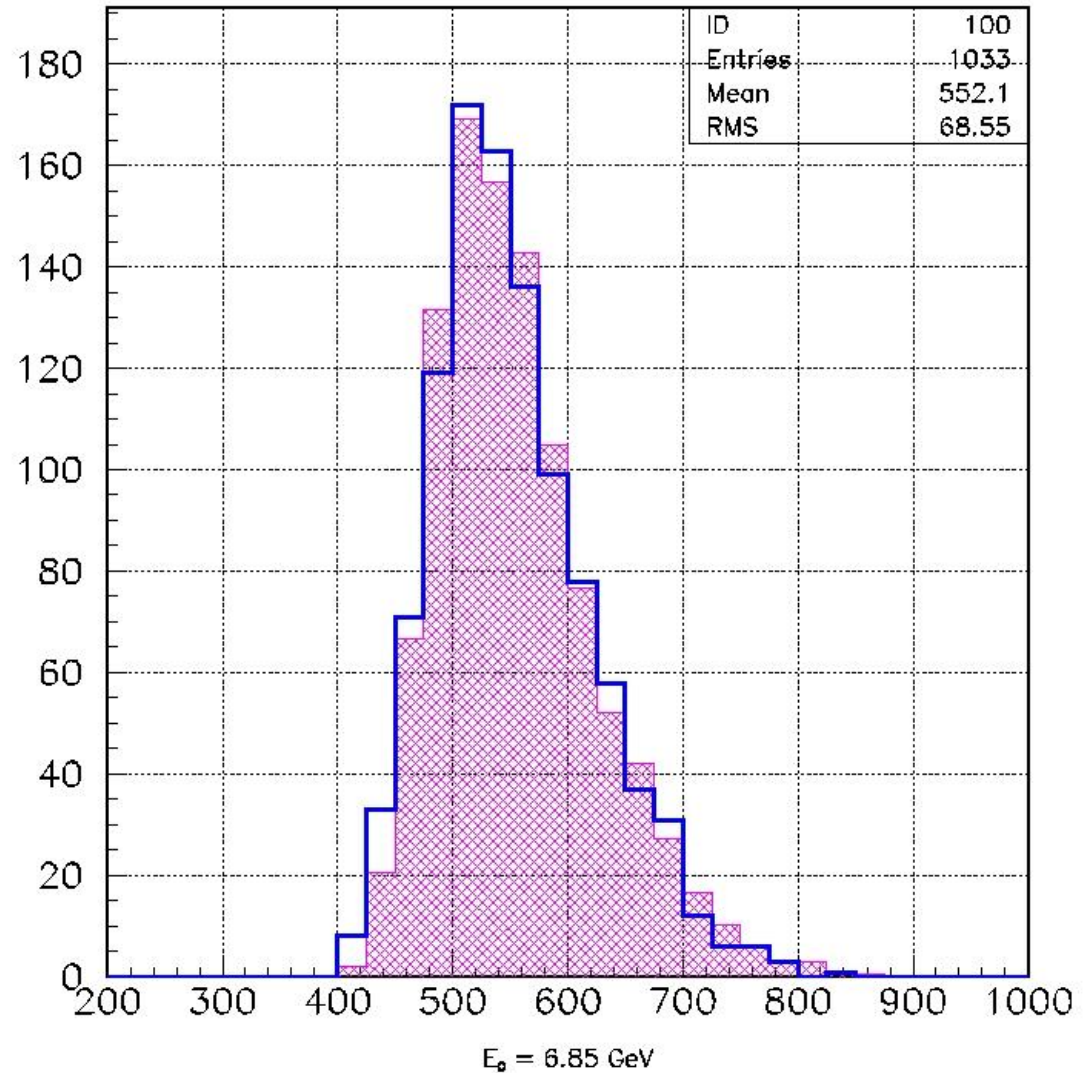
filled area – simulation



# $X_{\max}$ distribution

line – experiment

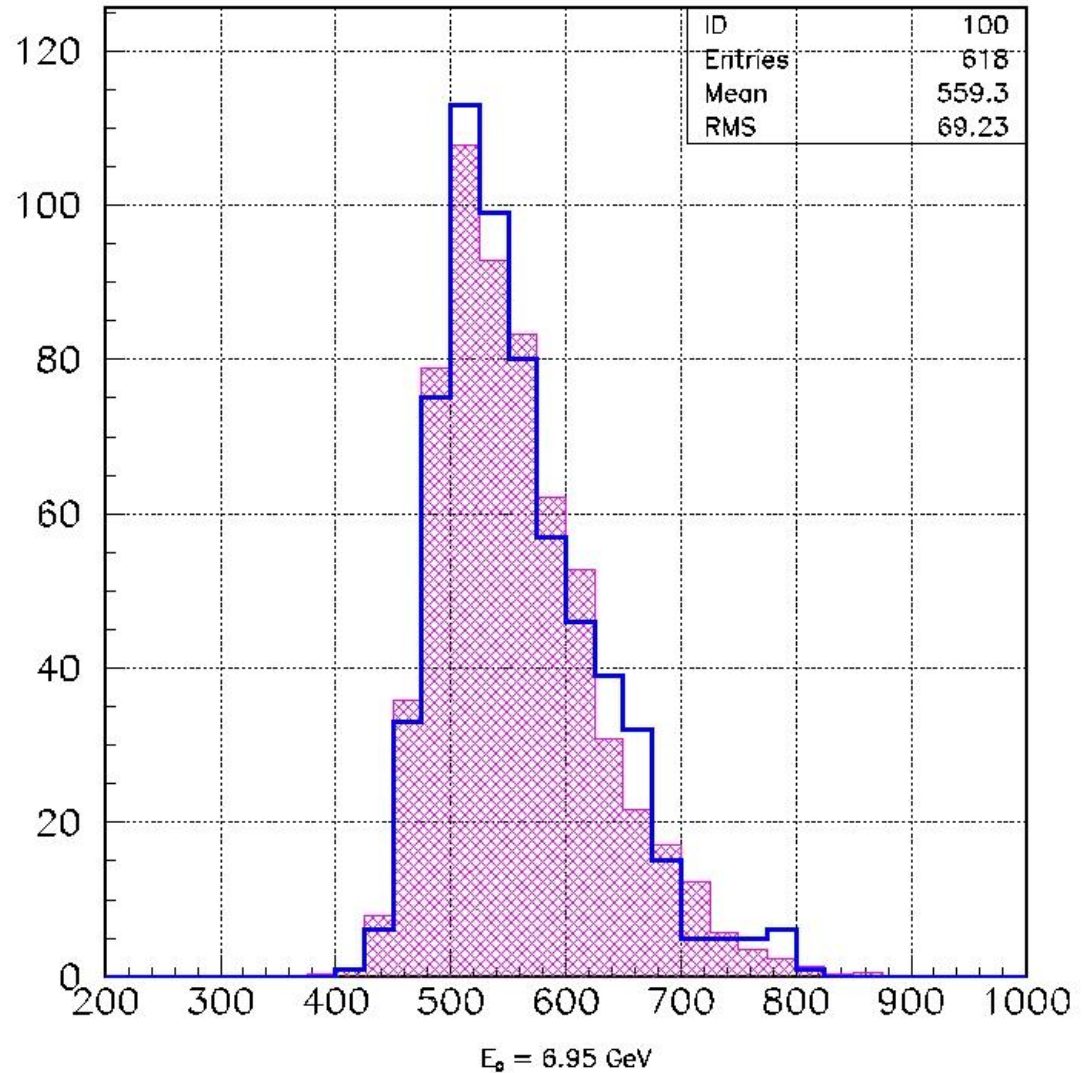
filled area – simulation



# $X_{\max}$ distribution

line – experiment

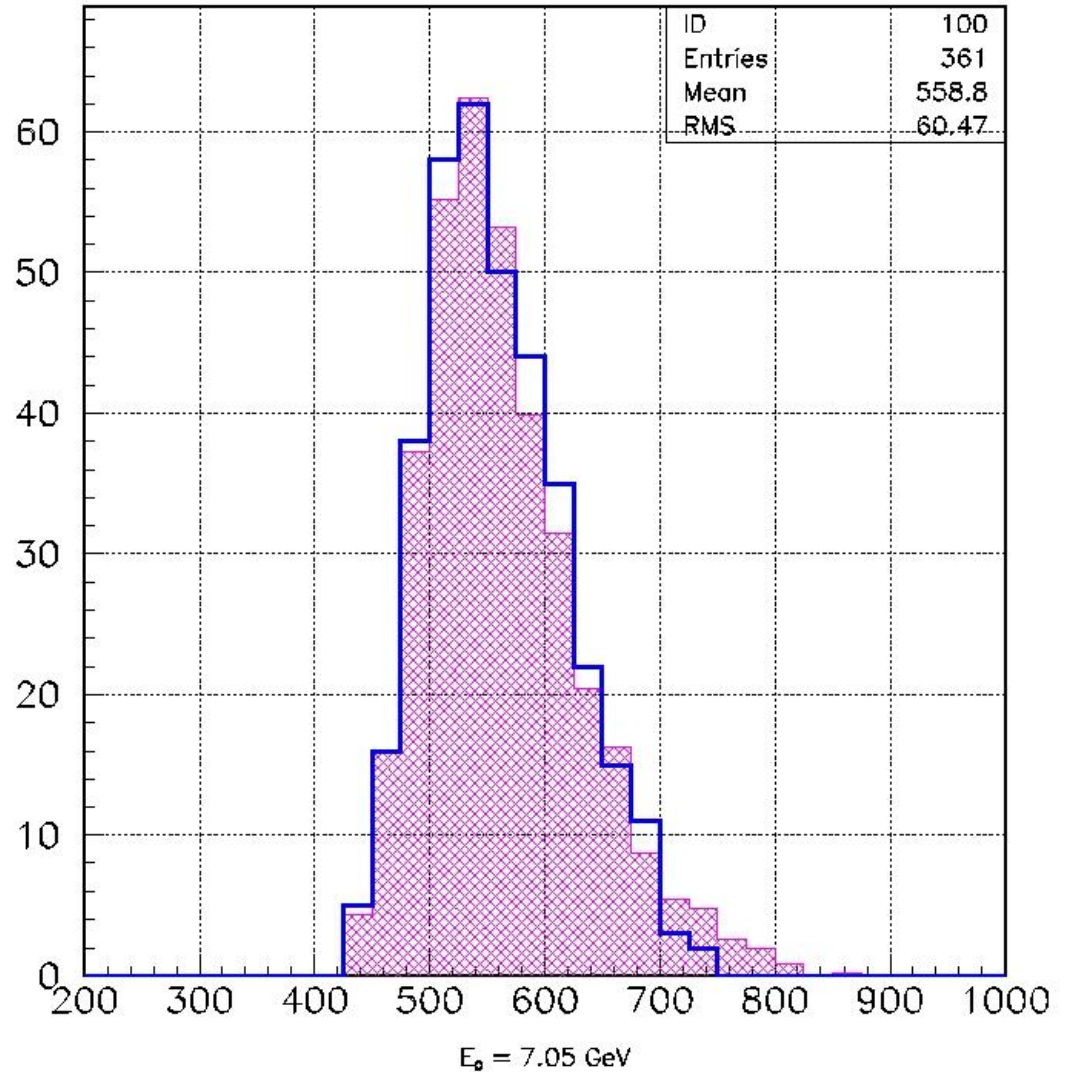
filled area – simulation



# $X_{\max}$ distribution

line – experiment

filled area – simulation

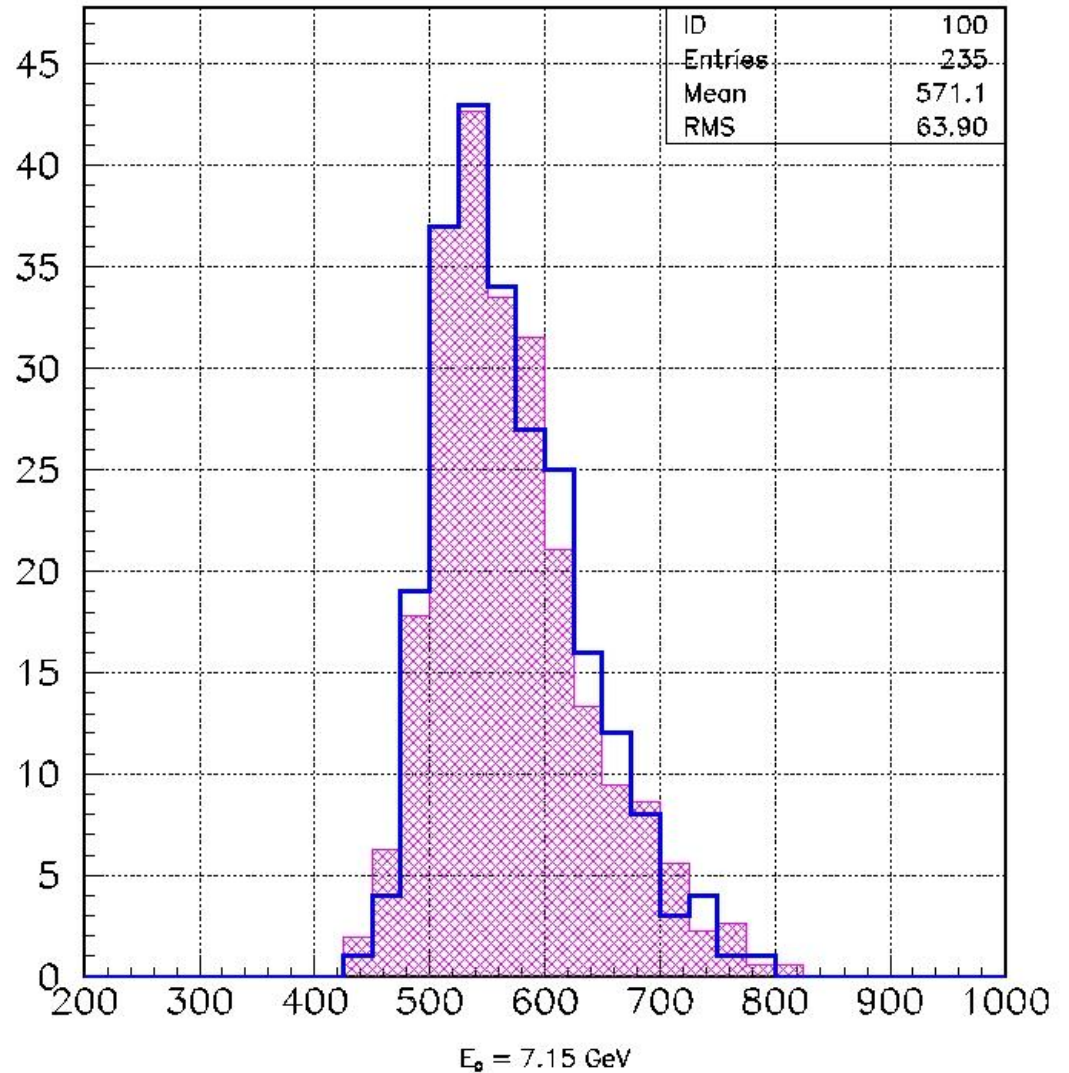




# $X_{\max}$ distribution

line – experiment

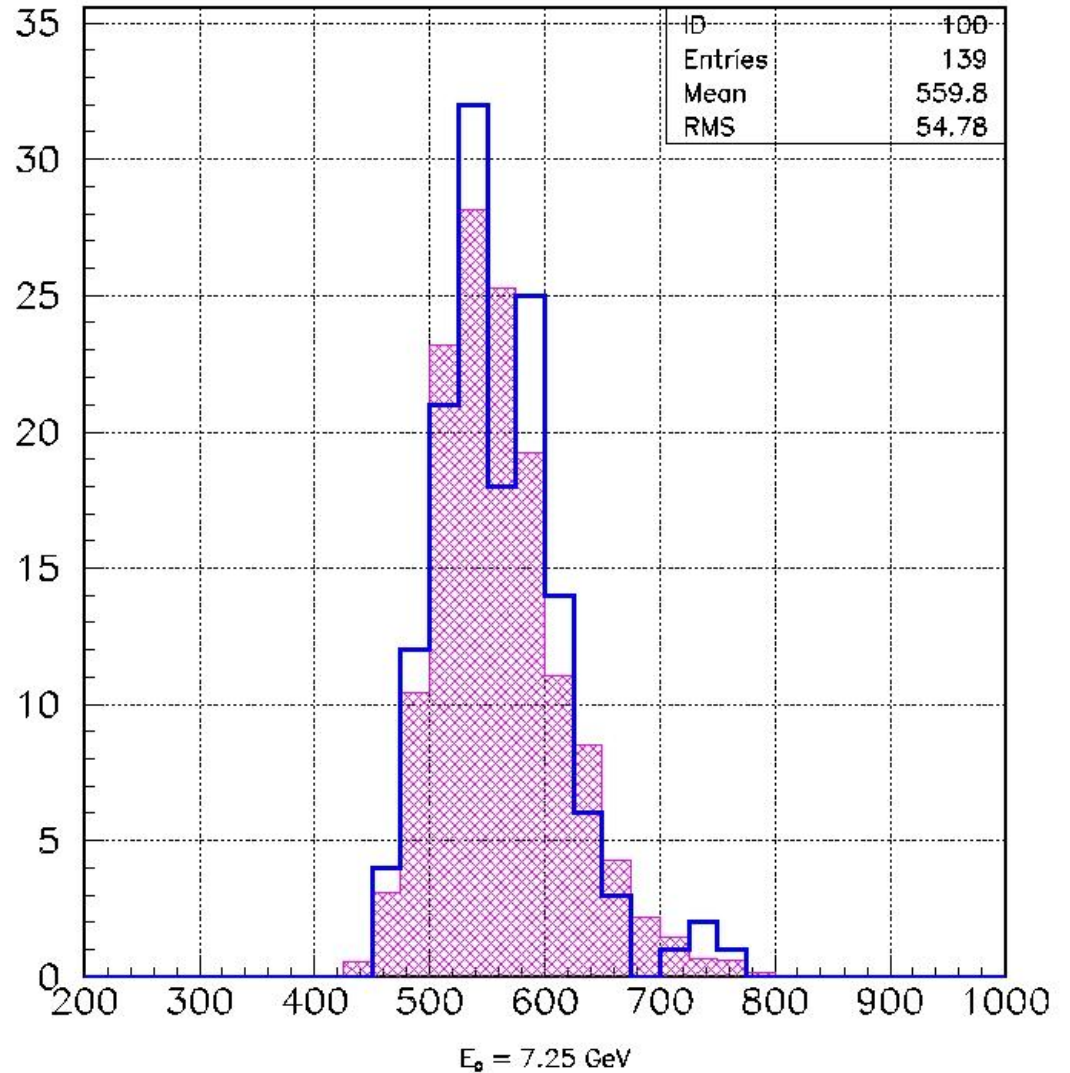
filled area – simulation



# $X_{\max}$ distribution

line – experiment

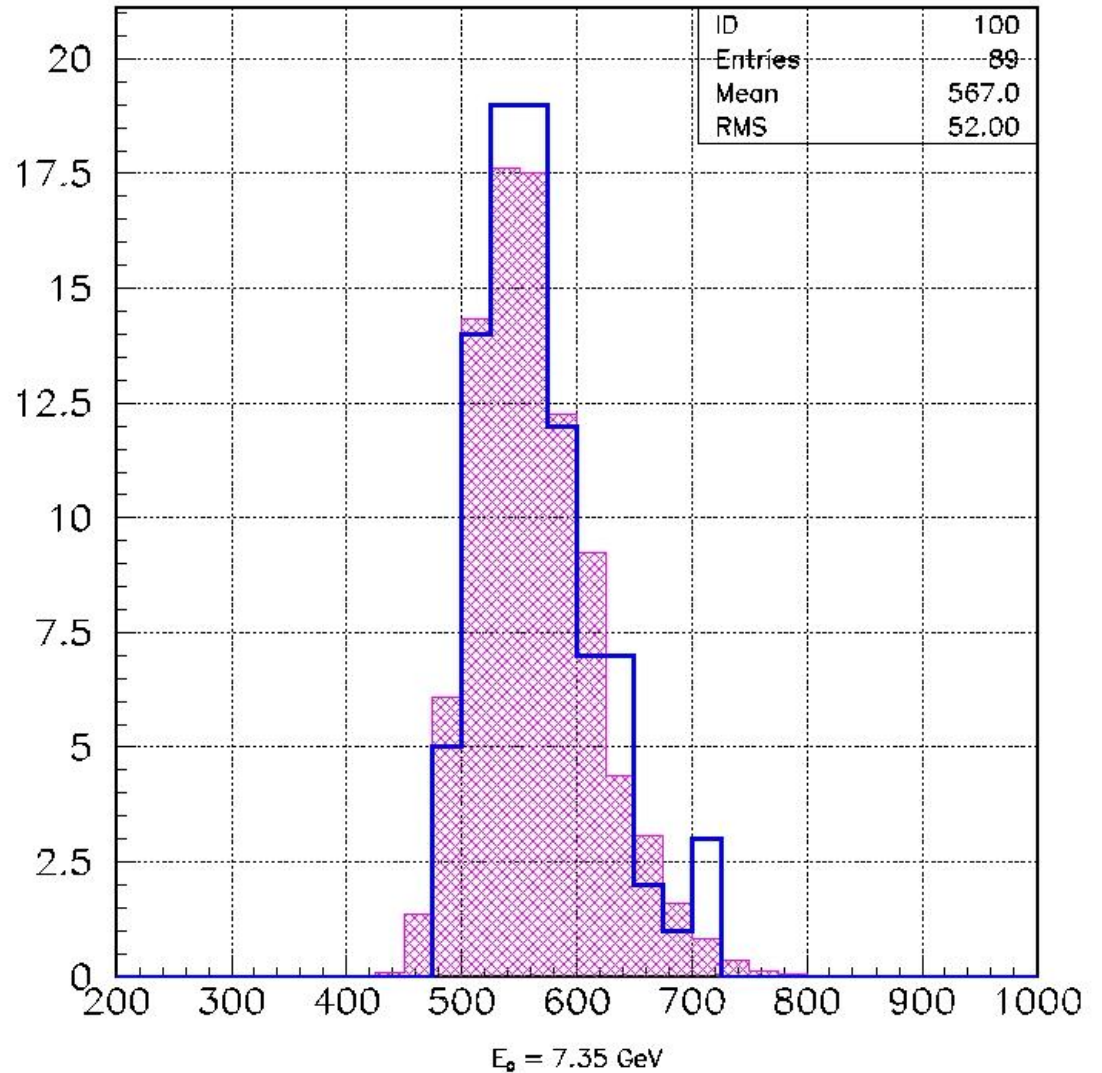
filled area – simulation



# $X_{\max}$ distribution

line – experiment

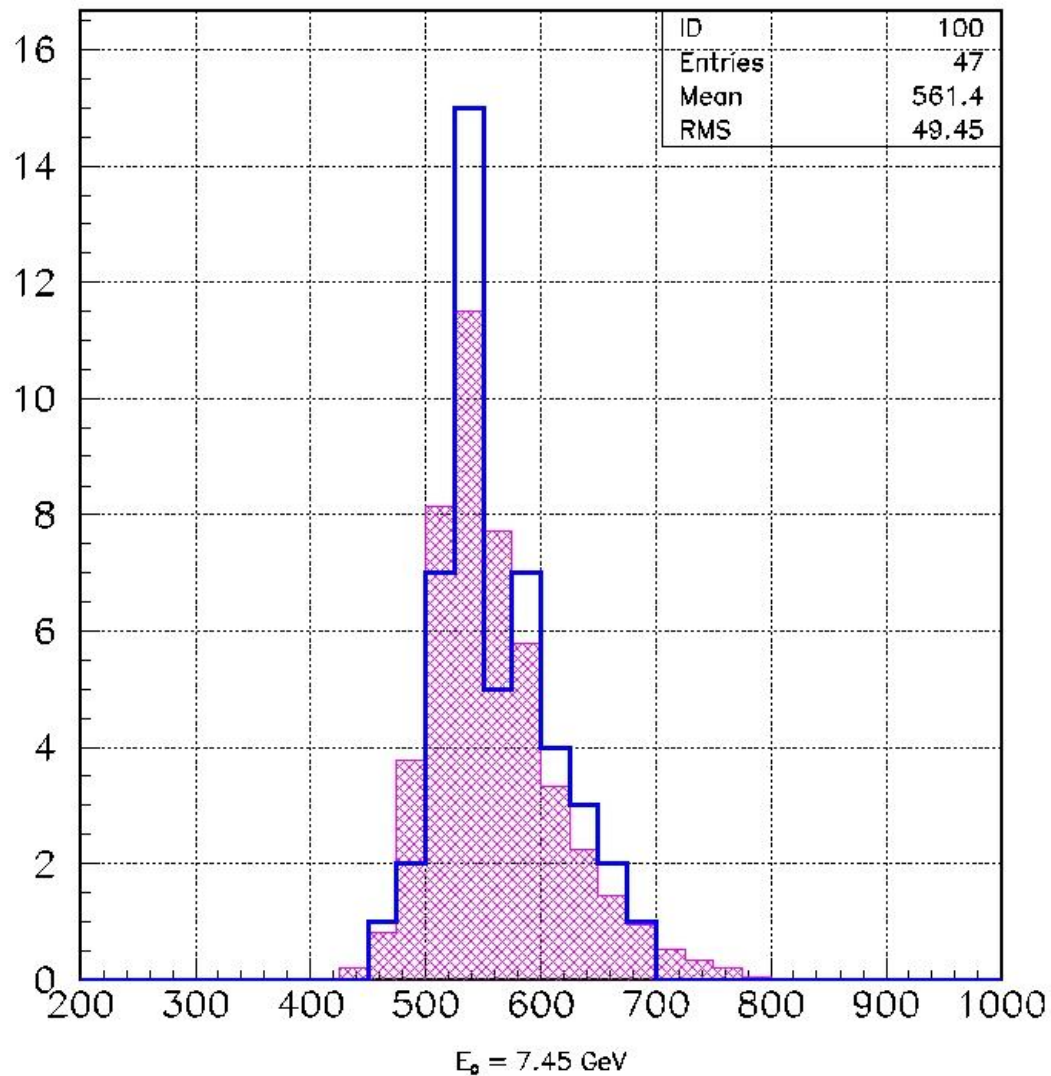
filled area – simulation



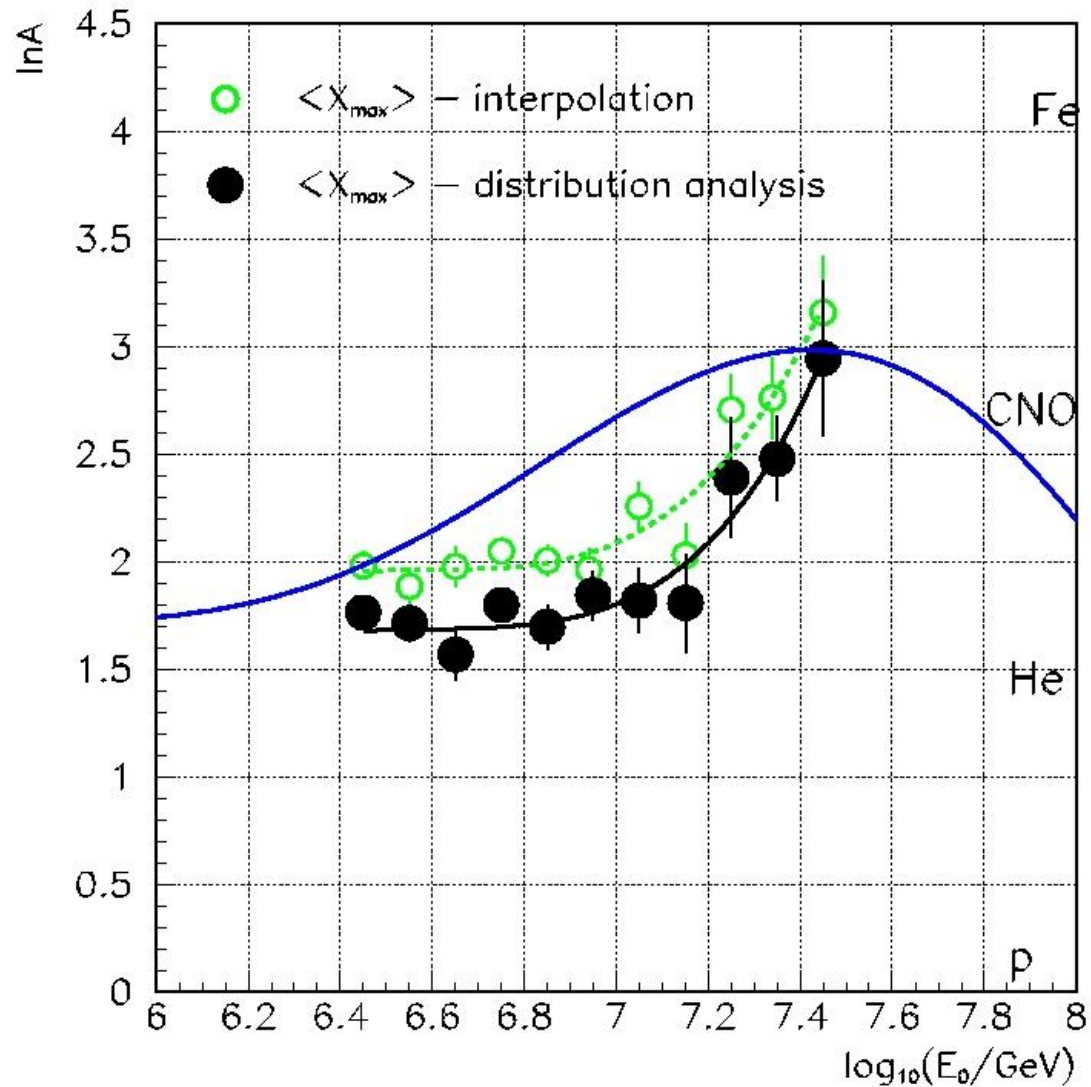
# $X_{\max}$ distribution

line – experiment

filled area – simulation

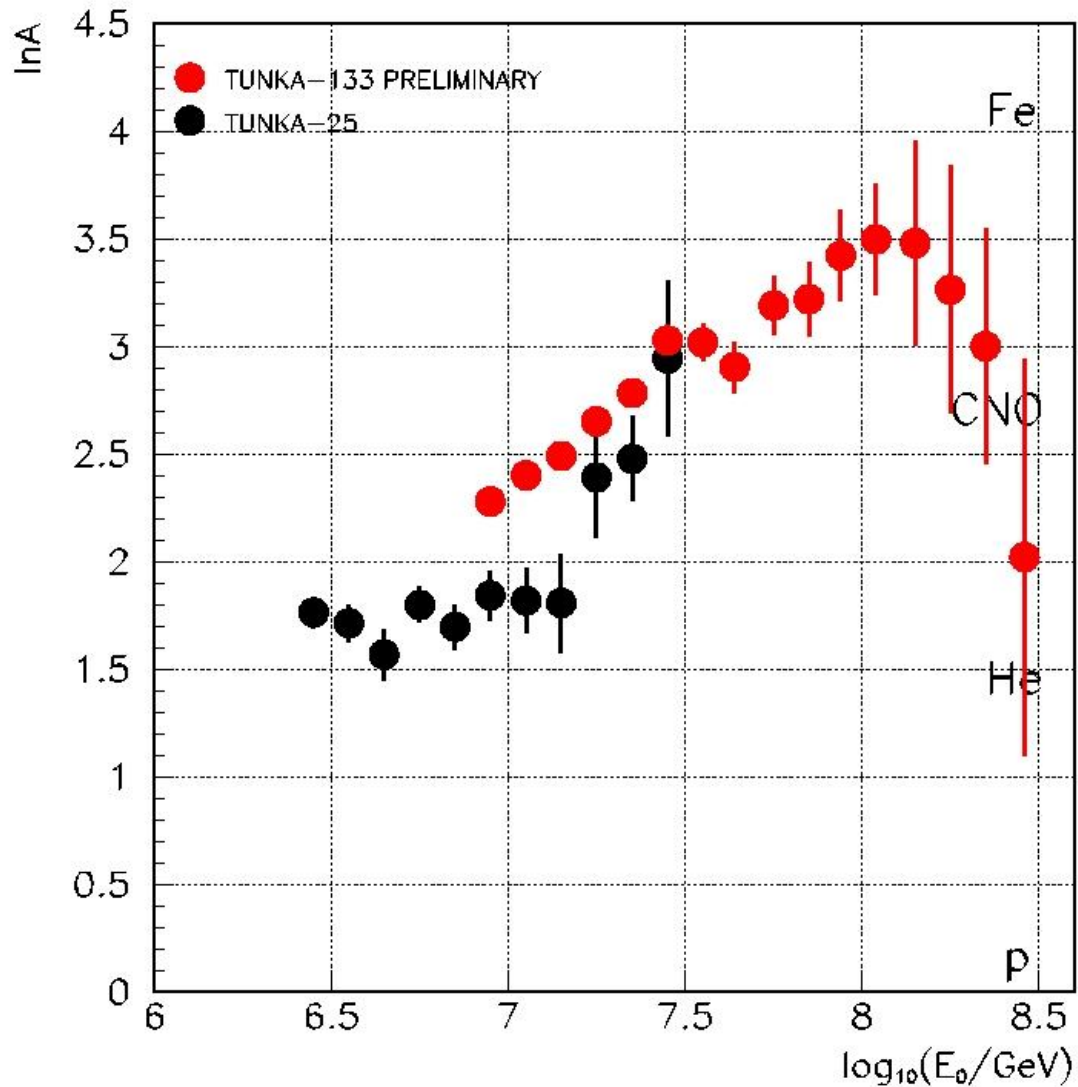


# Средний $\ln A$

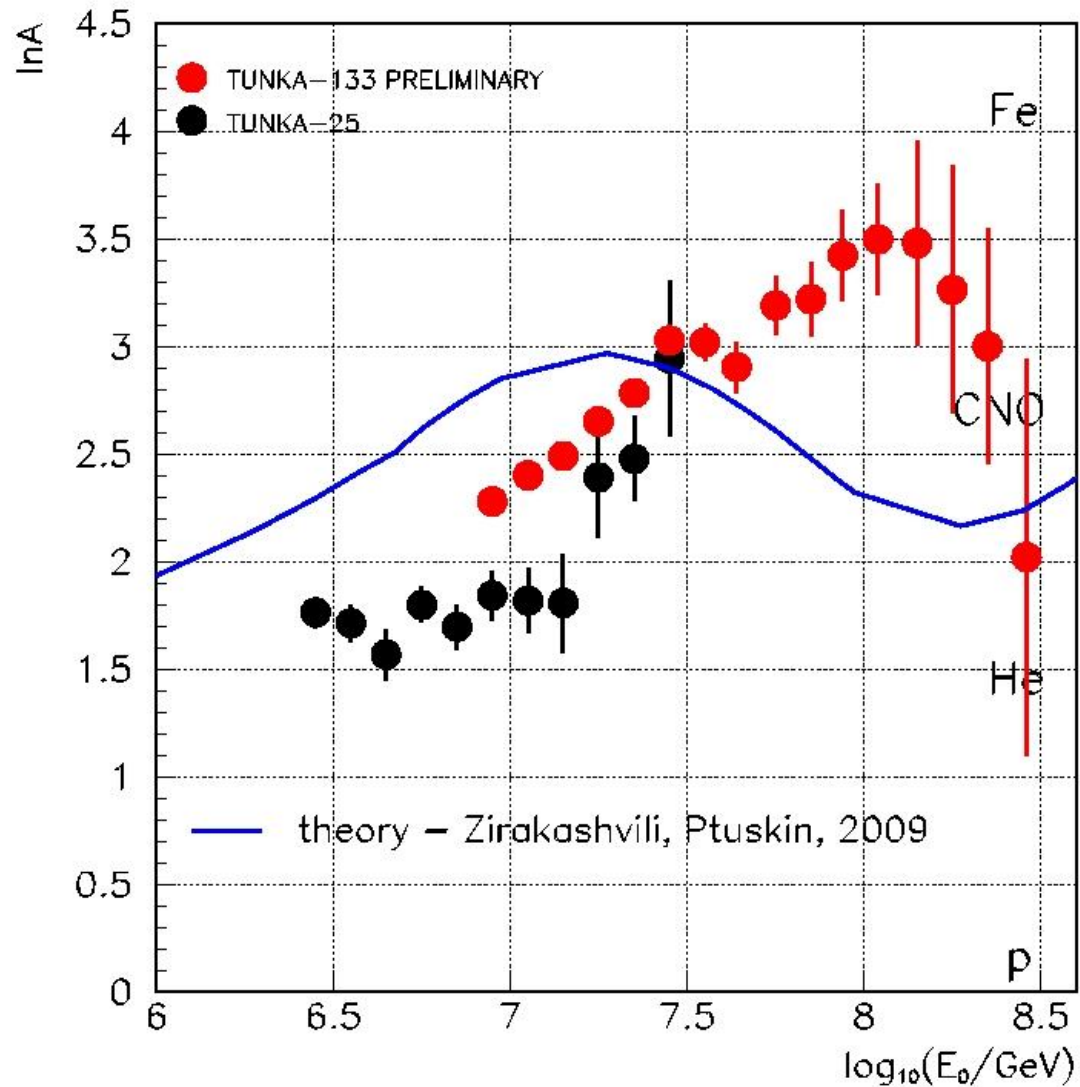




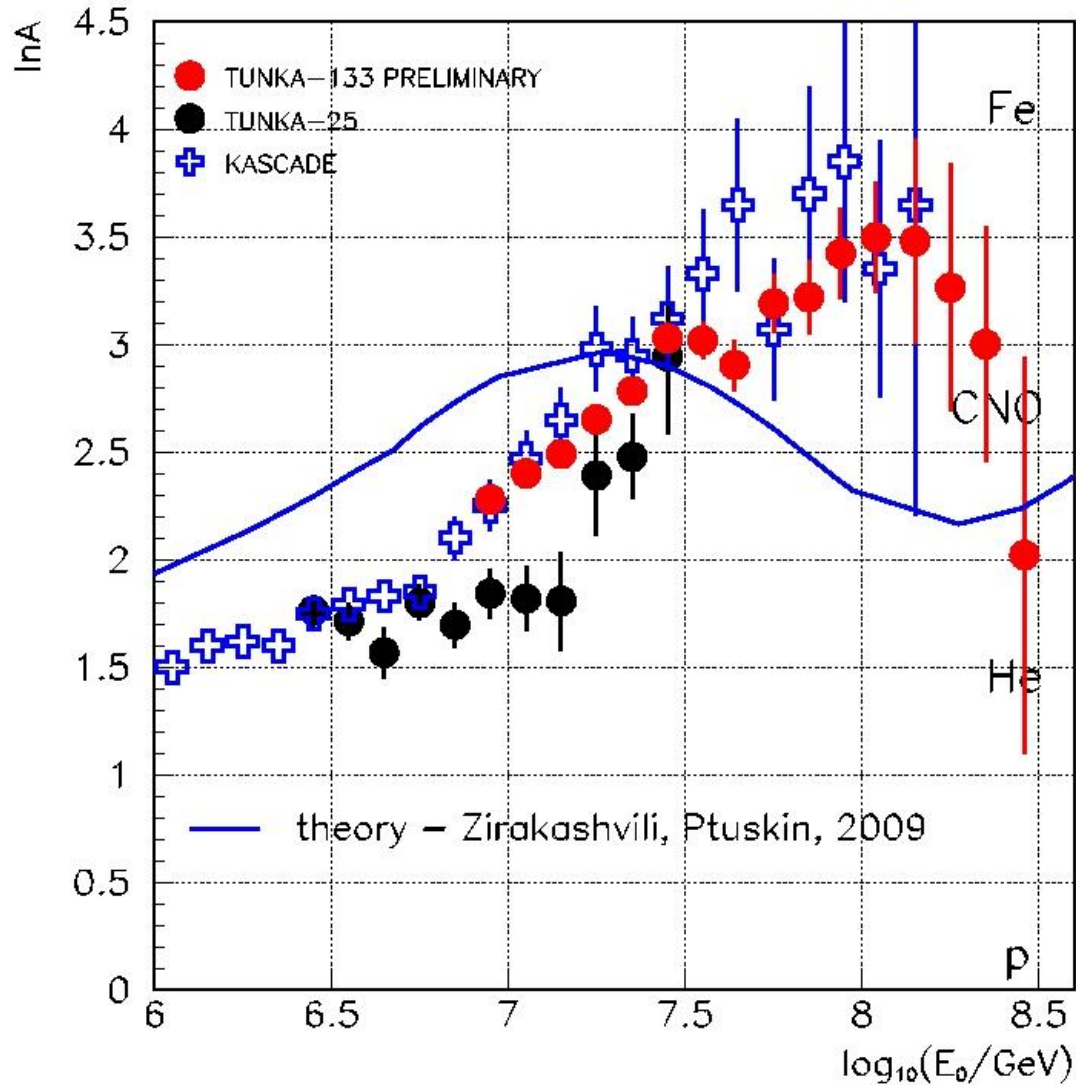
# Средний массовый состав Тунка-133



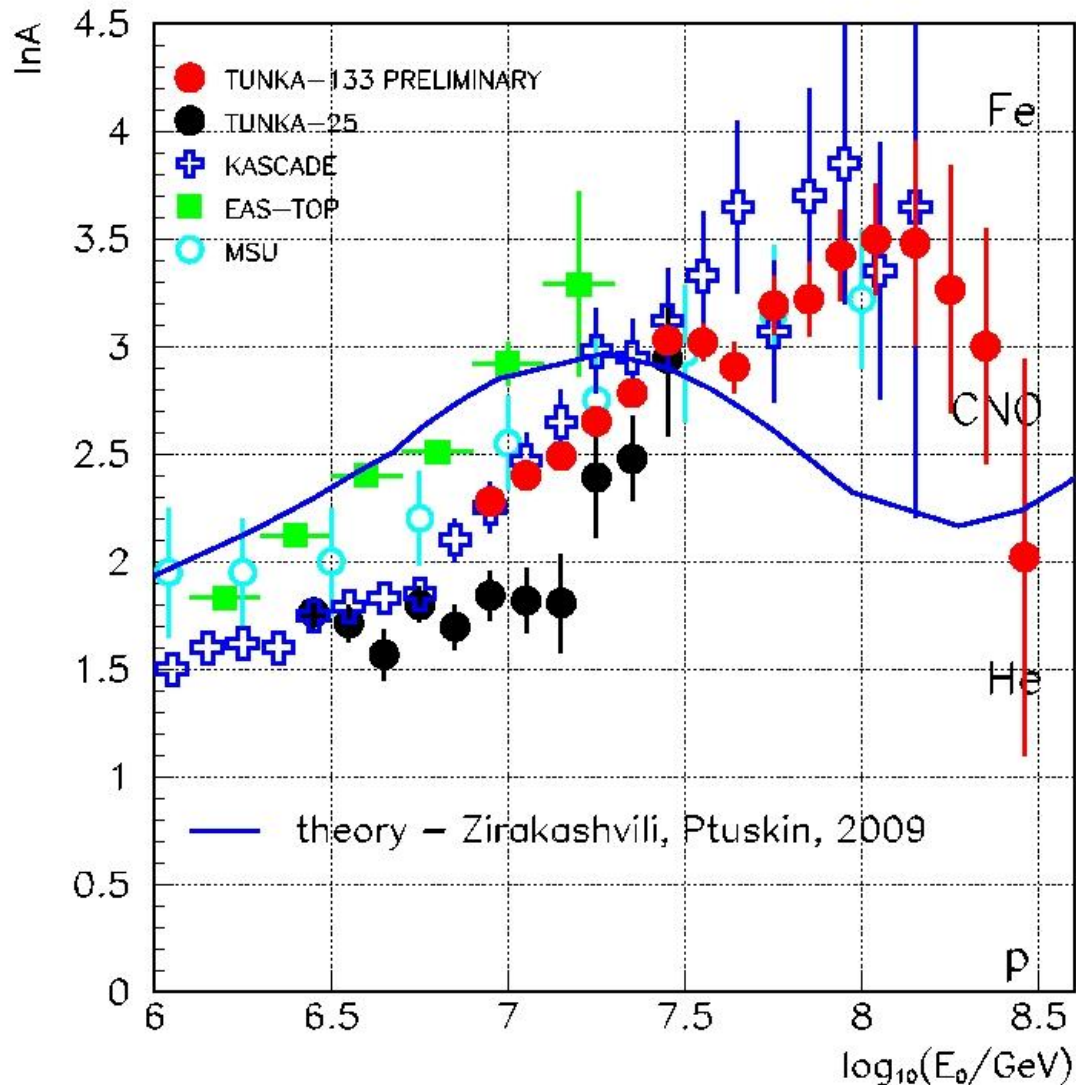
# Средний массовый состав Тунка-133



# Средний массовый состав Тунка-133



# Средний массовый состав Тунка-133



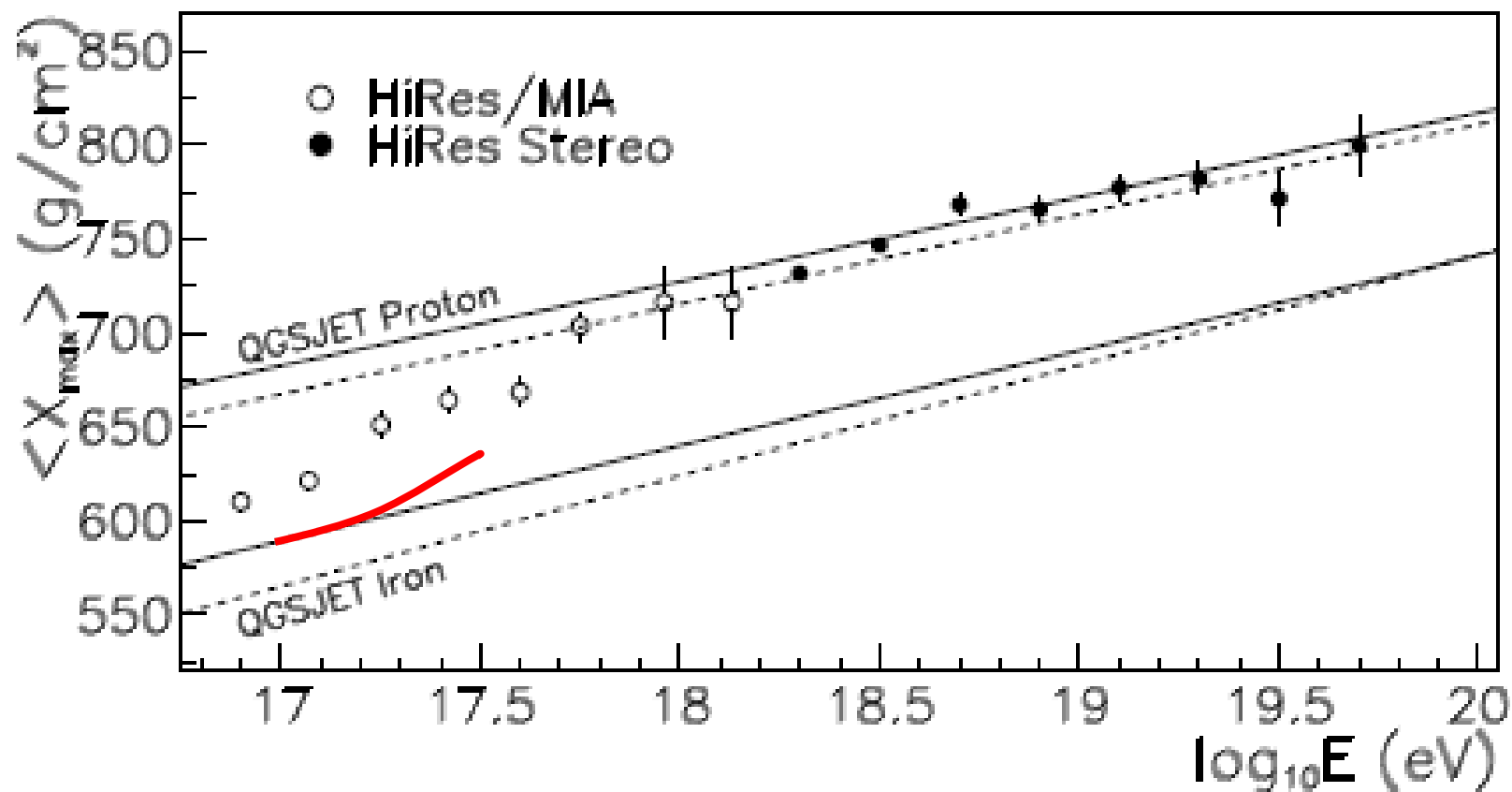
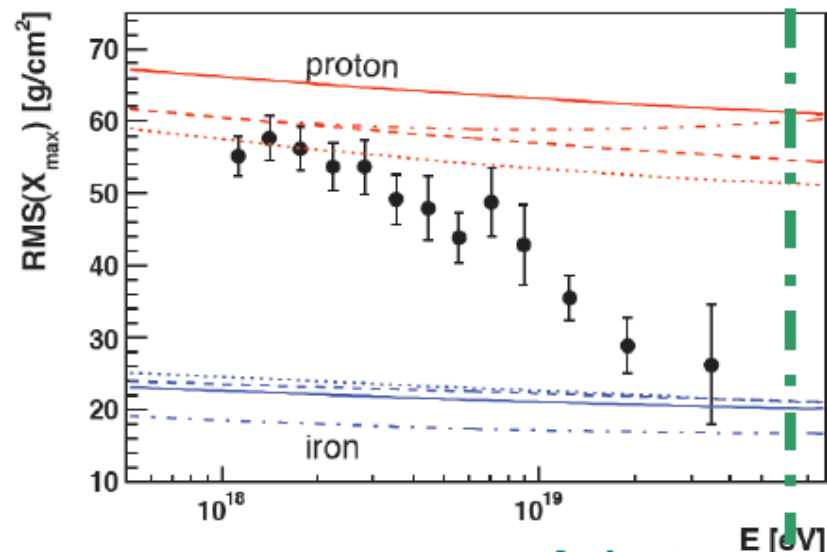
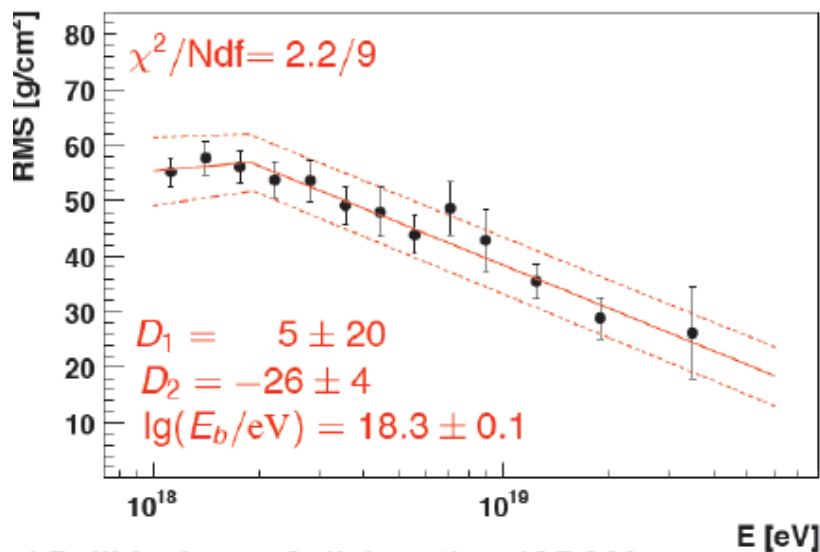
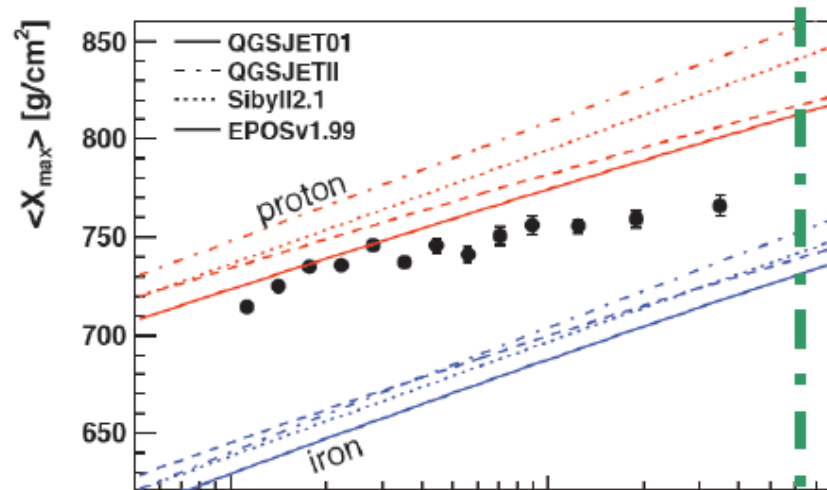
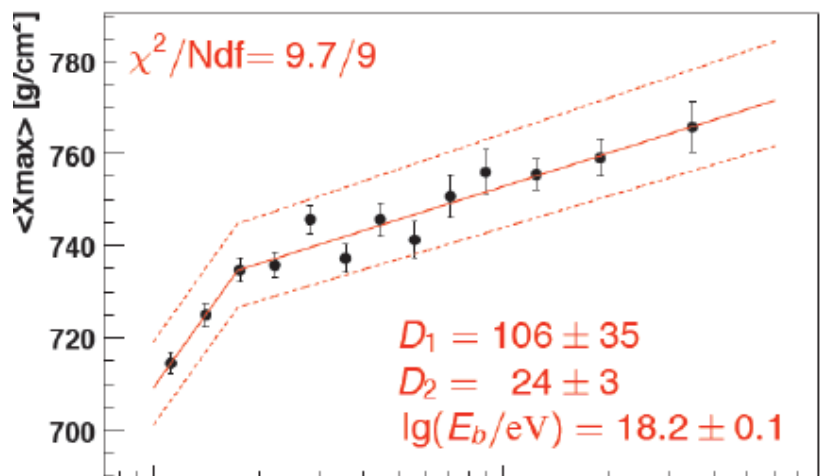


FIG. 1: Comparison of current HiRes stereo  $\langle X_{\text{max}} \rangle$  results with results from the HiRes-prototype/MIA hybrid [21]. Also included are QGSJET01 (dashed) and QGSJET-II (solid) predictions for pure-proton and pure iron compositions.

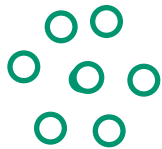


# Auger

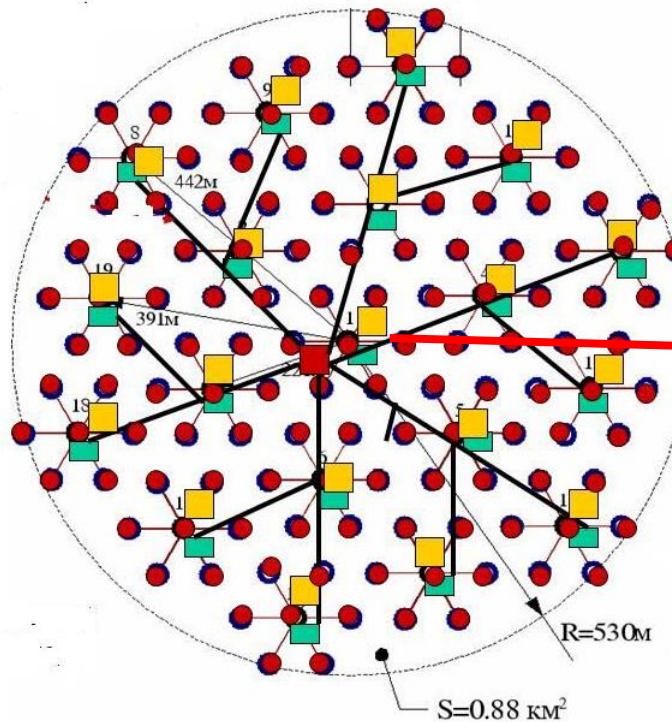
## Composition: mean depth and rms of shower maximum



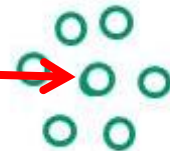
**6 remote  
clusters  
( 42 detectors)**



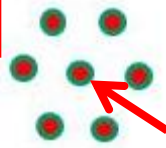
**4 times enlarging  
of effective area  
for  
 $E_0 > 10^{17}$  eV**



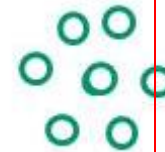
1 km



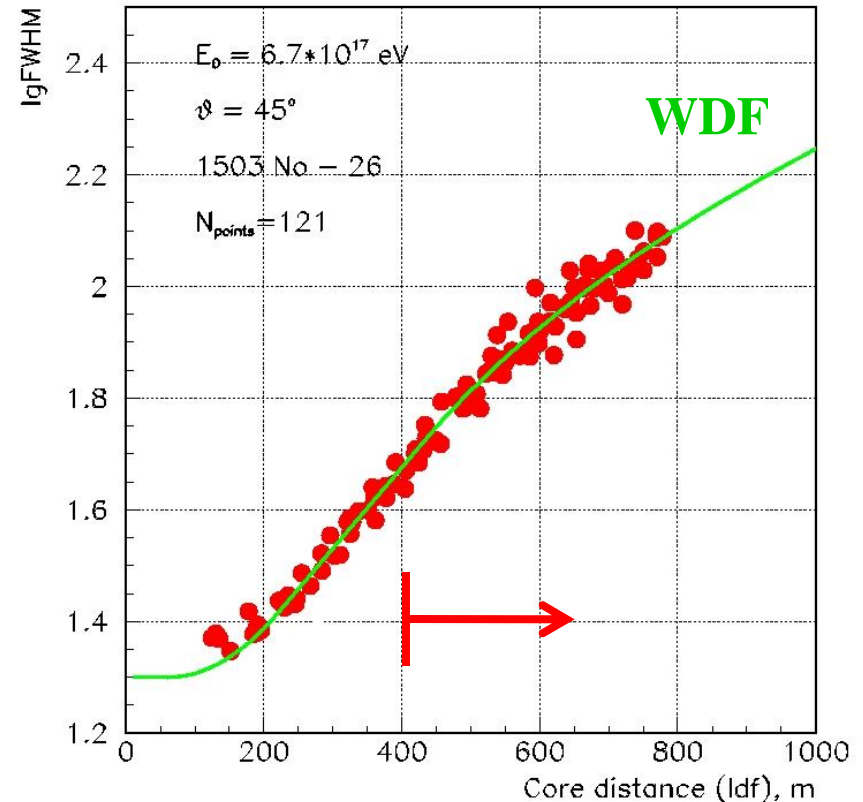
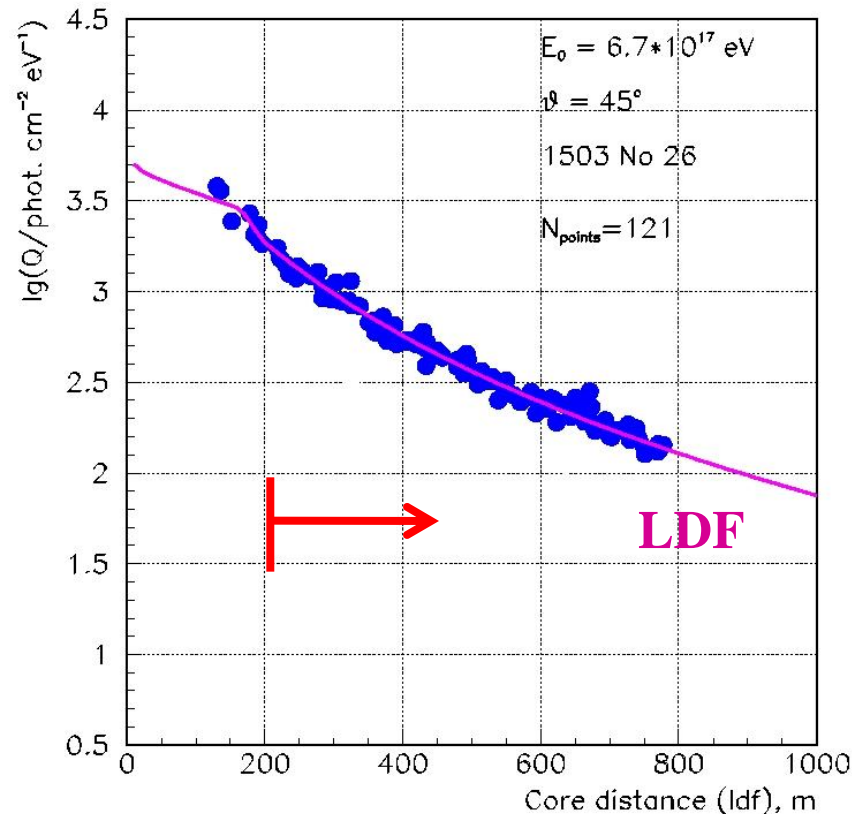
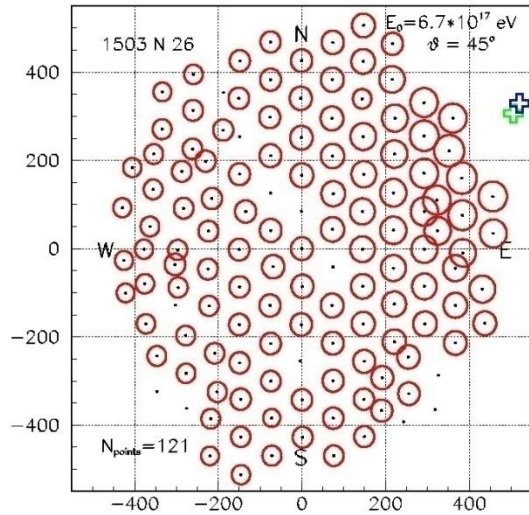
**Statistics in  
2012  
(  $> 10^{17}$  eV ) :  
600 (inside) +  
800 (outside)  
Total: 1400**

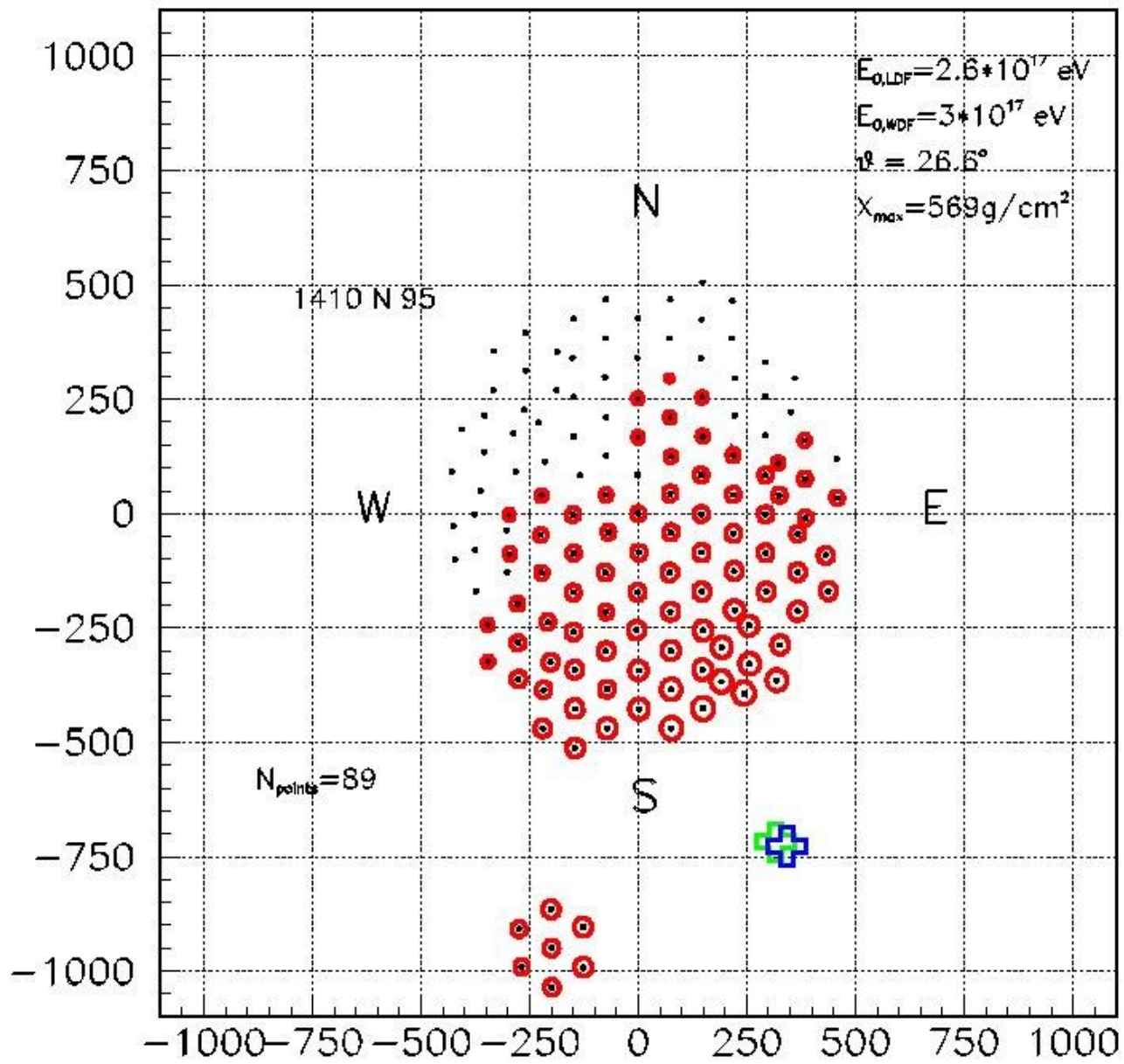


**In operation NOW**



# the array border. 5.03.2010





**Спасибо за внимание!**