

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 $n = 1.333$ $\theta_C = \arccos(1/n) = 41$

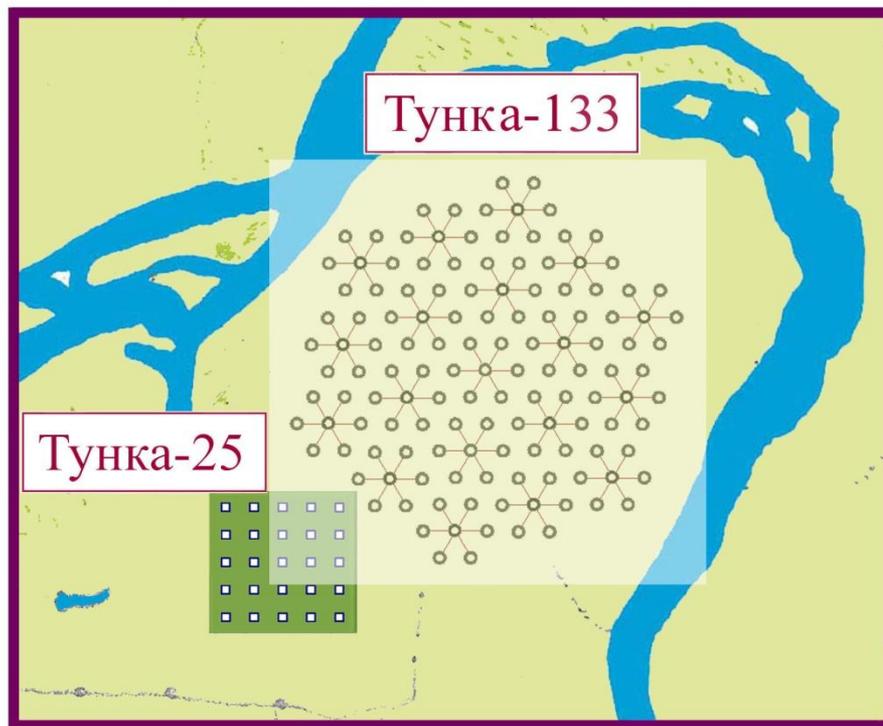
Воздух – к-т преломления $n = 1.0003$ $\theta_C = \arccos(1/n) = 1.4$

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.

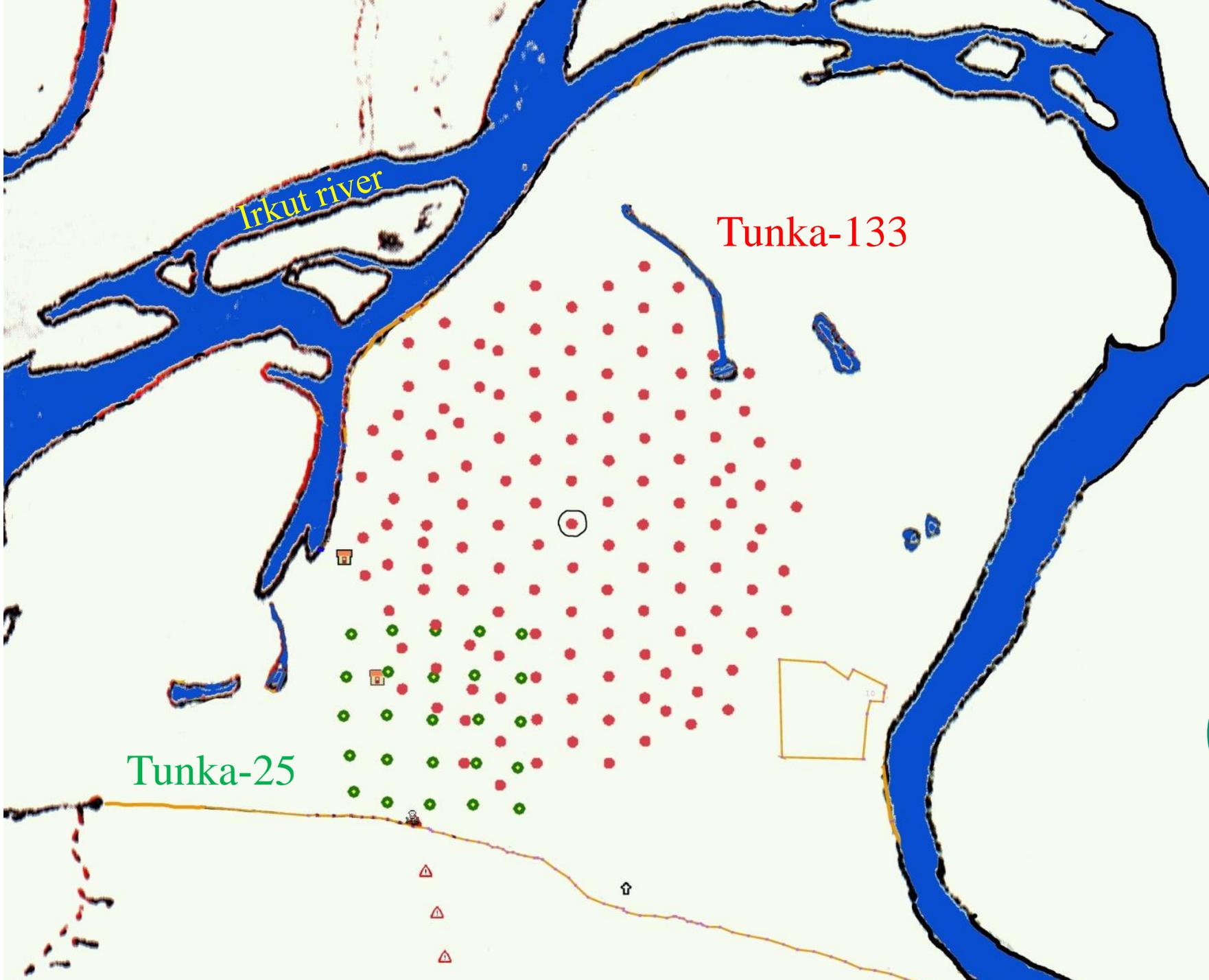


Тункинская долина.



Тункинская долина. Река Иркут.





Irkut river

Tunka-133

Tunka-25

10

ФЭУ типа ЕМІ-9350





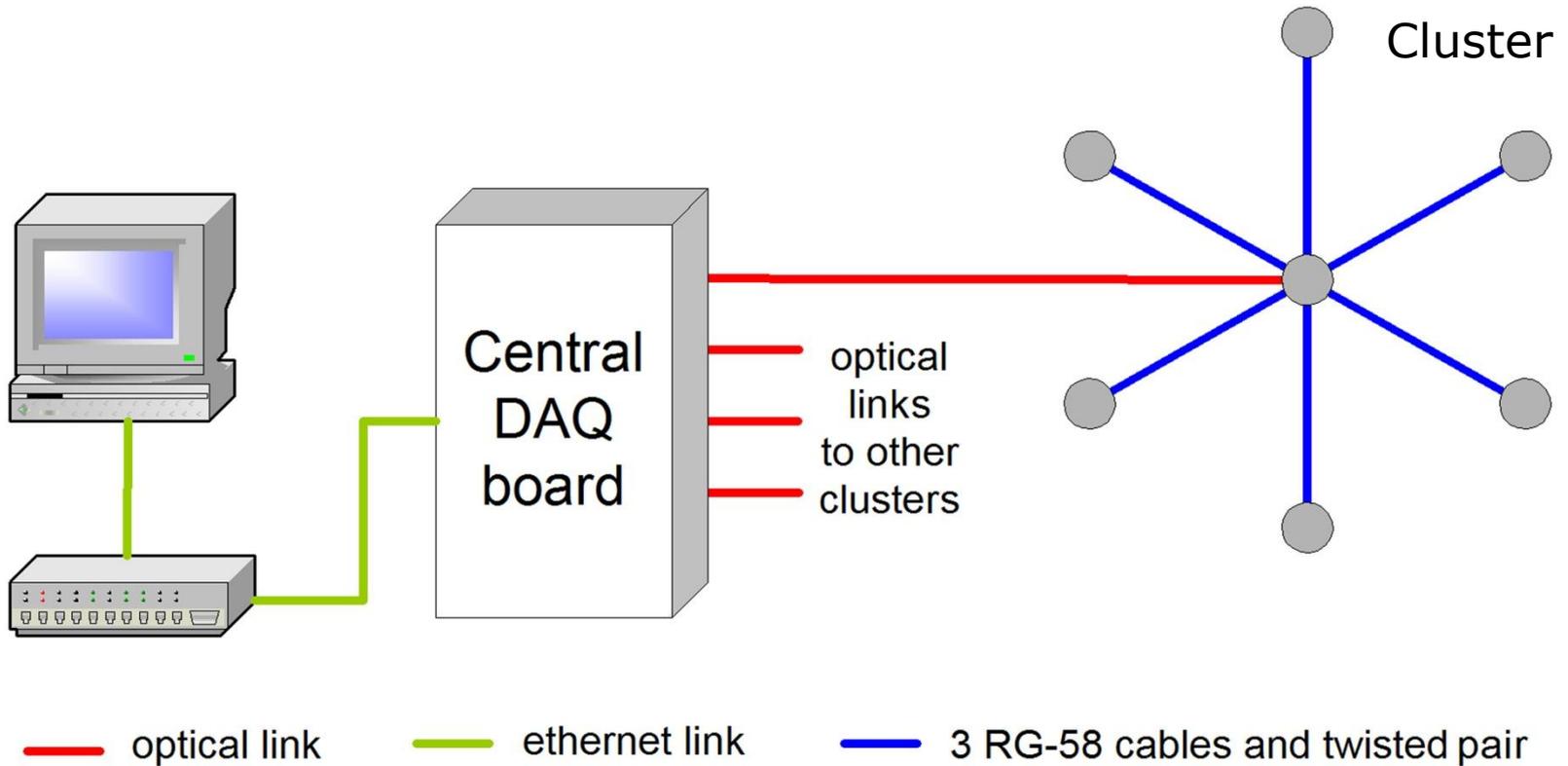
Detectors



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

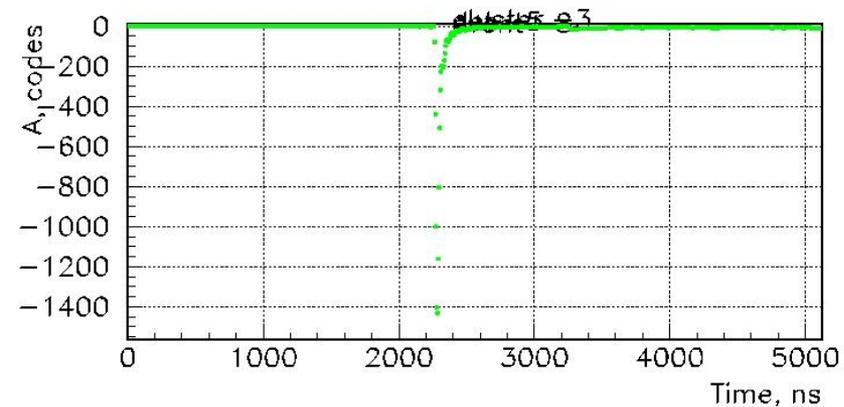
>2 млн. событий с энергией $\geq 10^{15}$ эВ.
>10 событий в течение ночи, когда
срабатывают все 19 кластеров

DAQ system

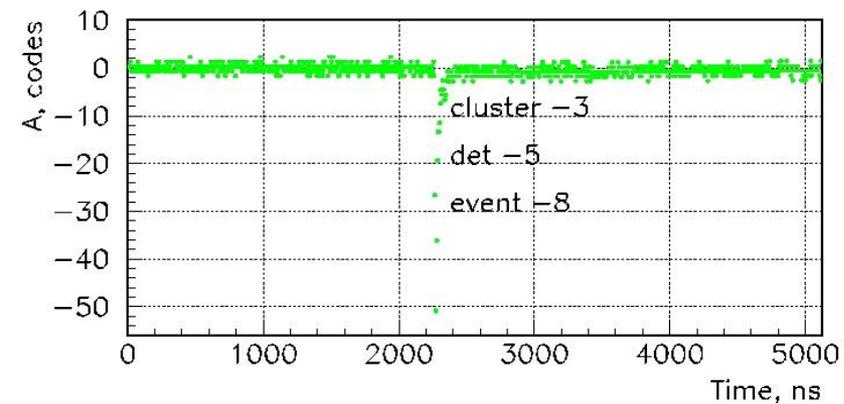
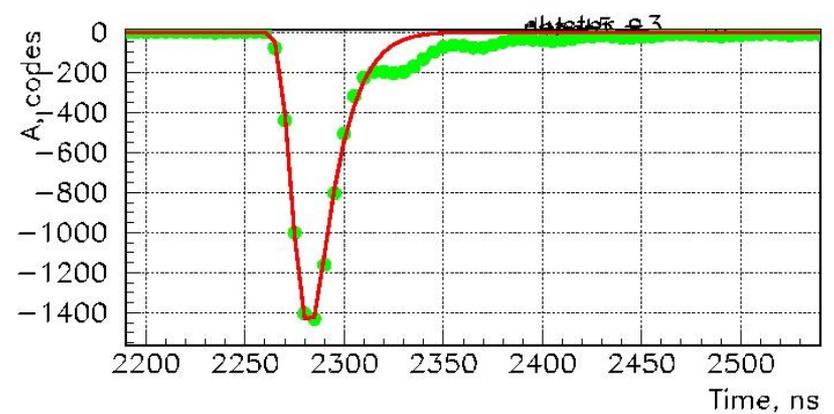


Эксперимент

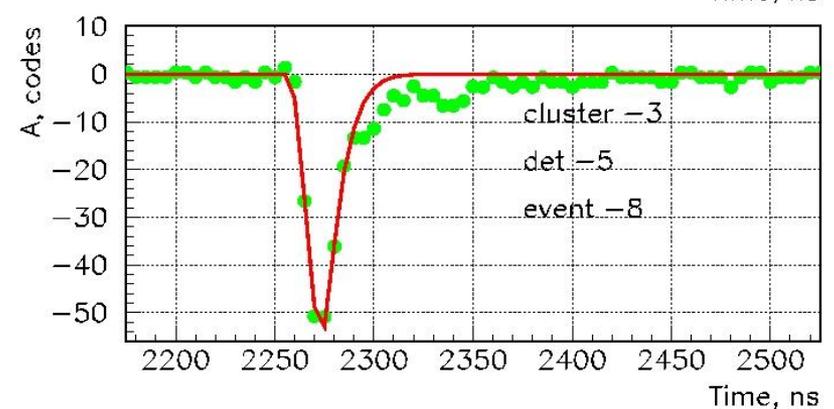
1024 точки с шагом 5 нс:



anode



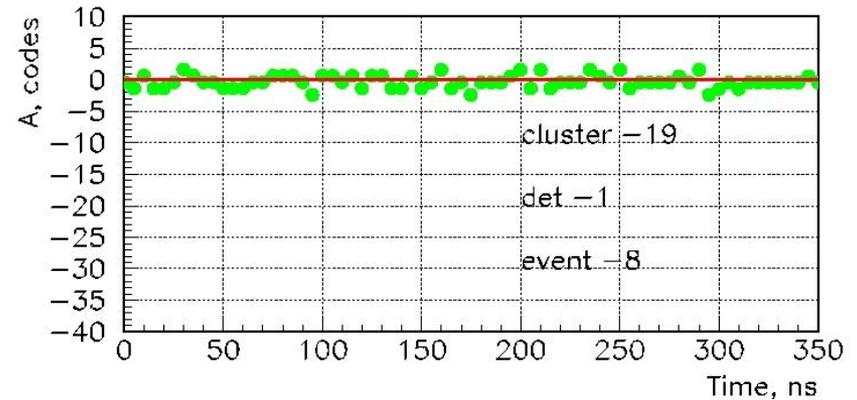
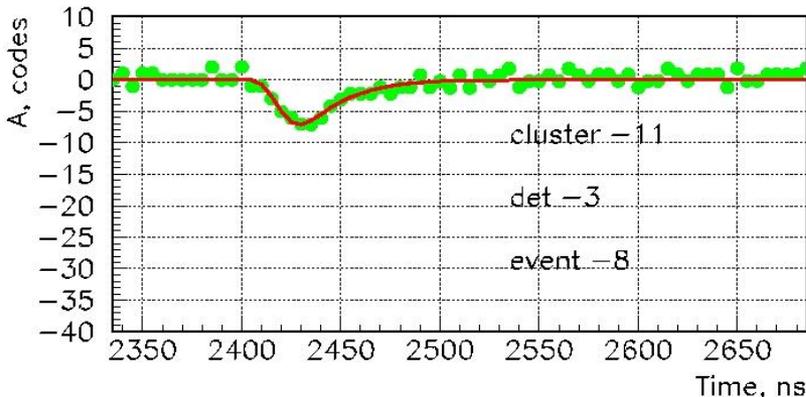
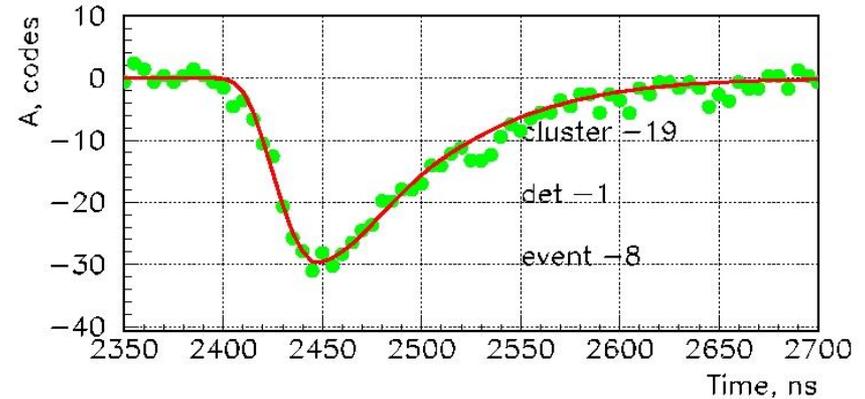
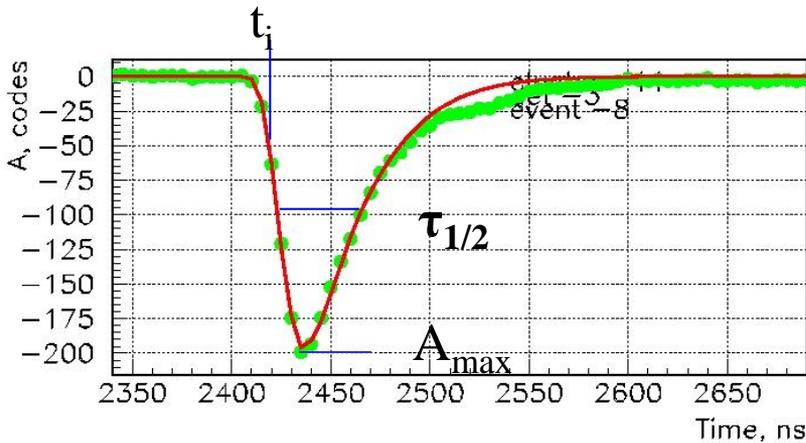
dynode



Эксперимент 2010: ~2 млн. событий

«событие» = 7 – 133 пар записей:

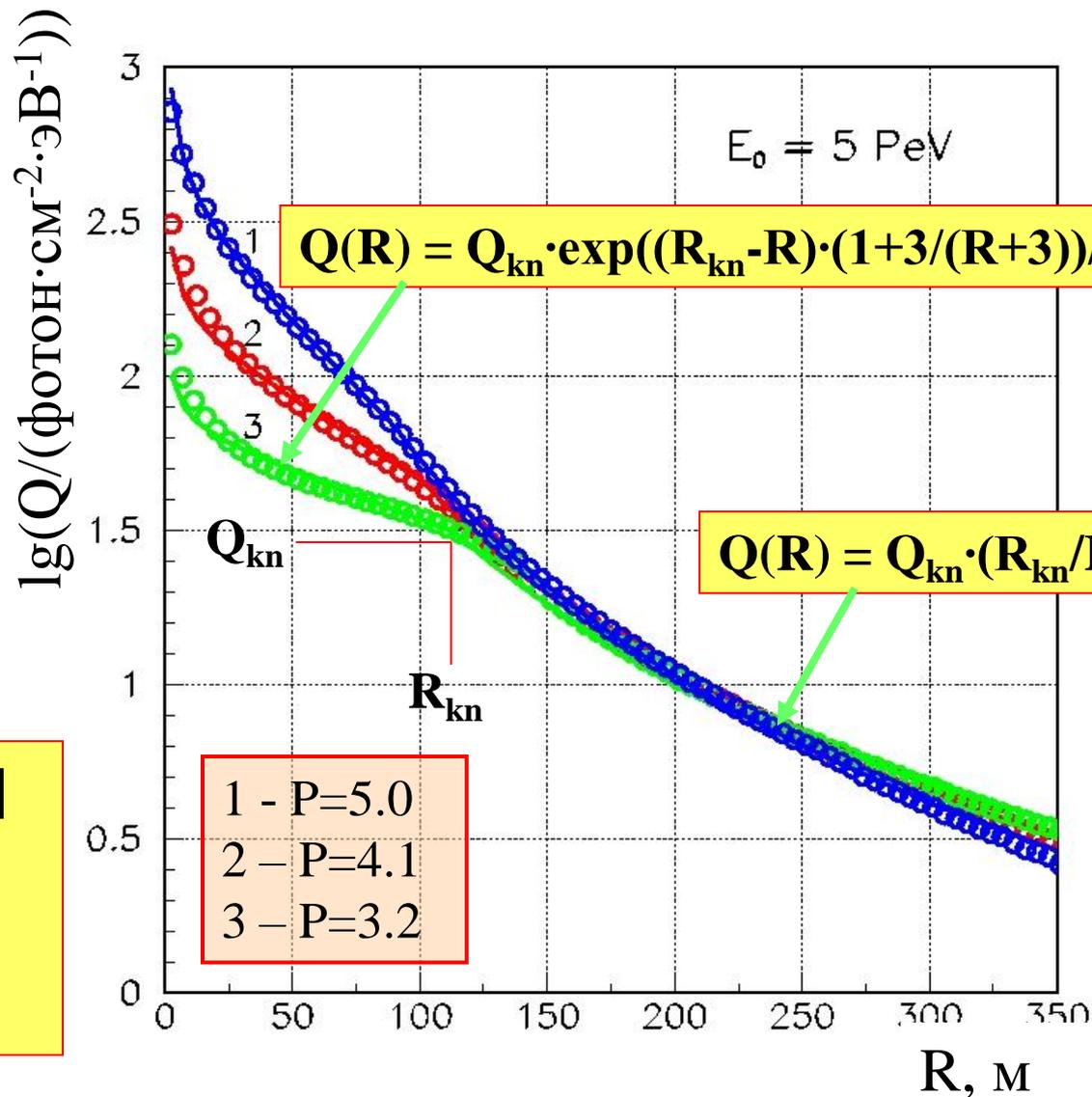
Фитирование специально сконструированной функцией
 3 параметра: 1) задержка фронта $0.25A_{\max}$, 2) площадь, 3) длительность



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:
 $P = Q(100) / Q(200)$



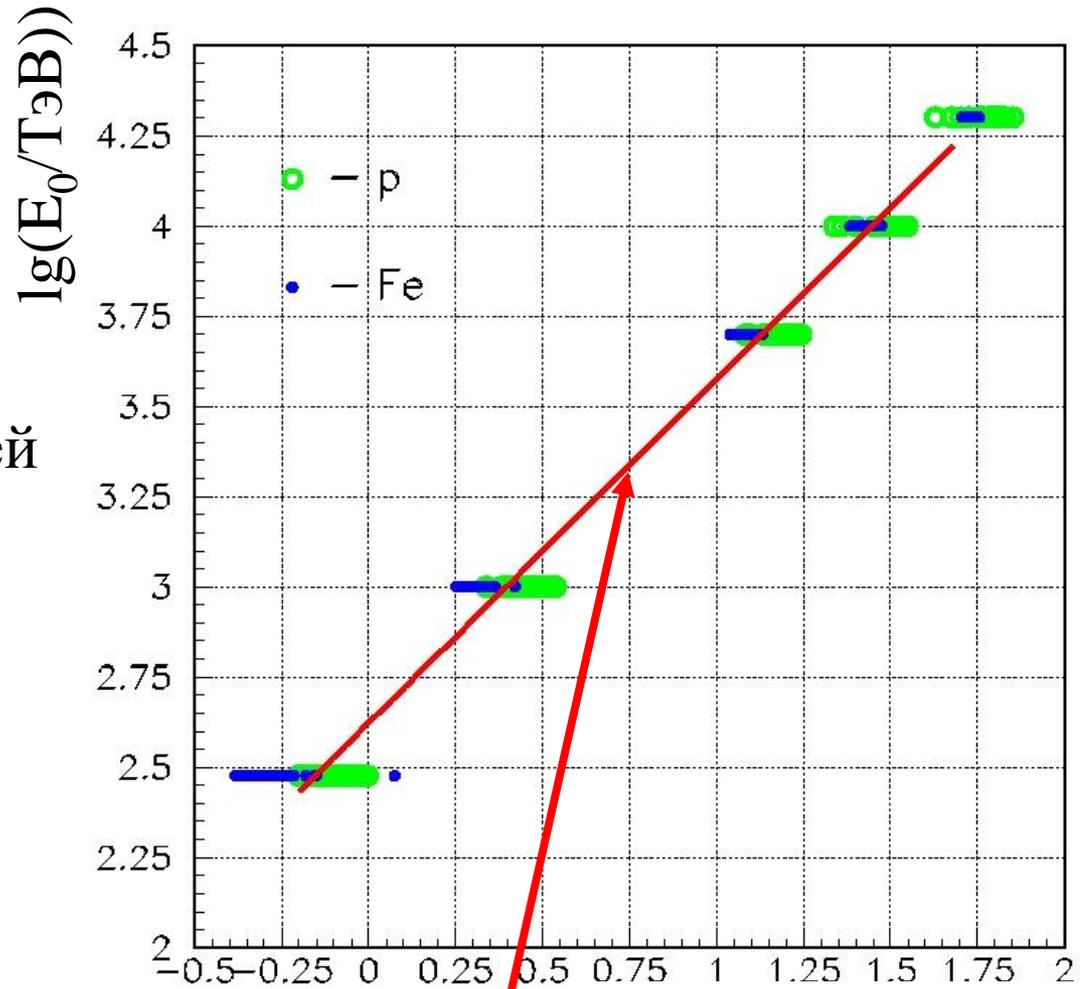
$$R_0 = 10^{2.95 - 0.245 \cdot P} [\text{м}]$$

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

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

CORSIKA: Определение энергии по параметру Q_{175}

600 разыгранных ливней
с зенитными углами
 θ 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 г/см²
систематическая погрешность < 7 г/см²)

Zenith angular acceptance

Simulated for:

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



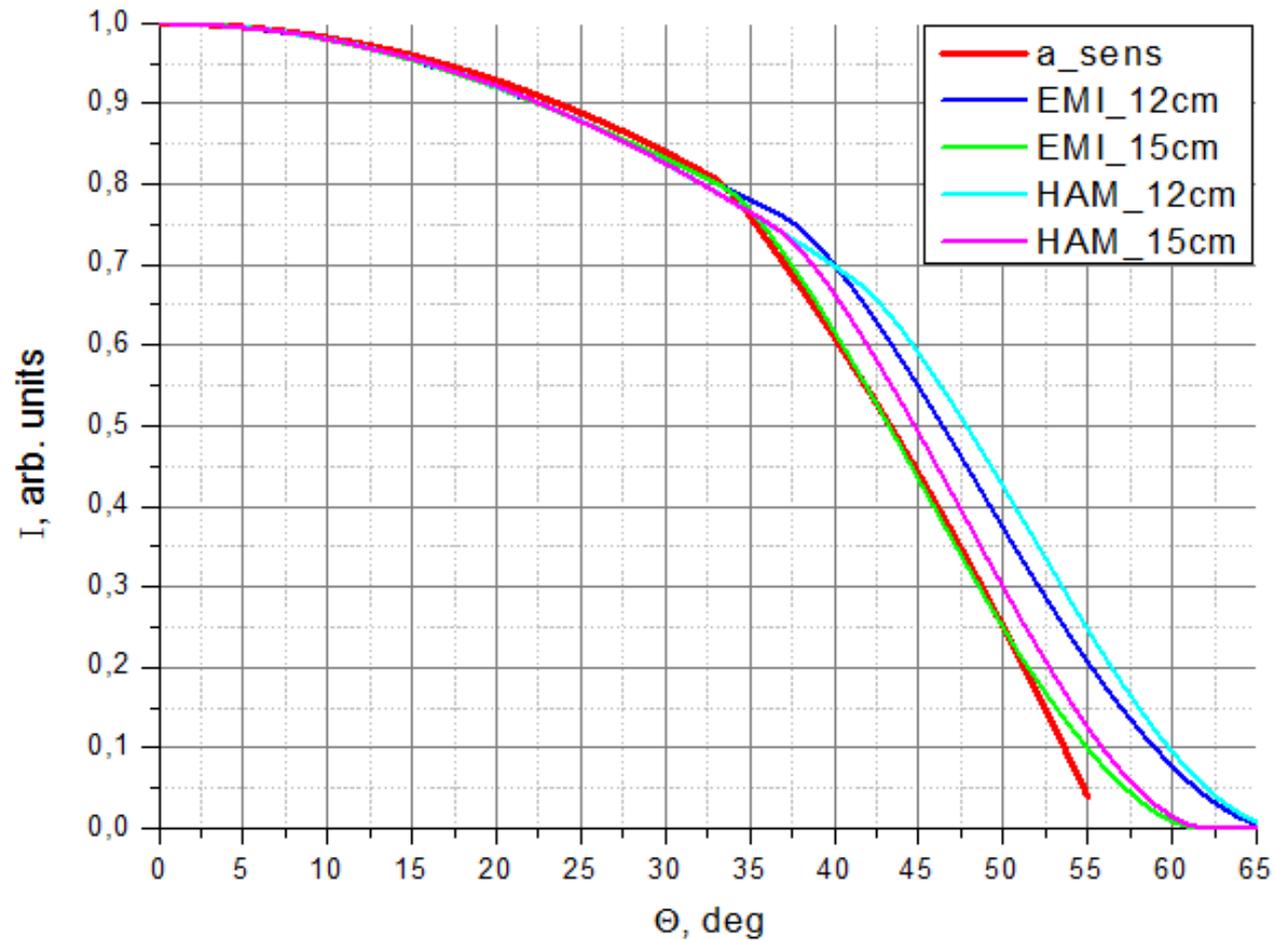
Transparency for EAS Cerenkov light

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

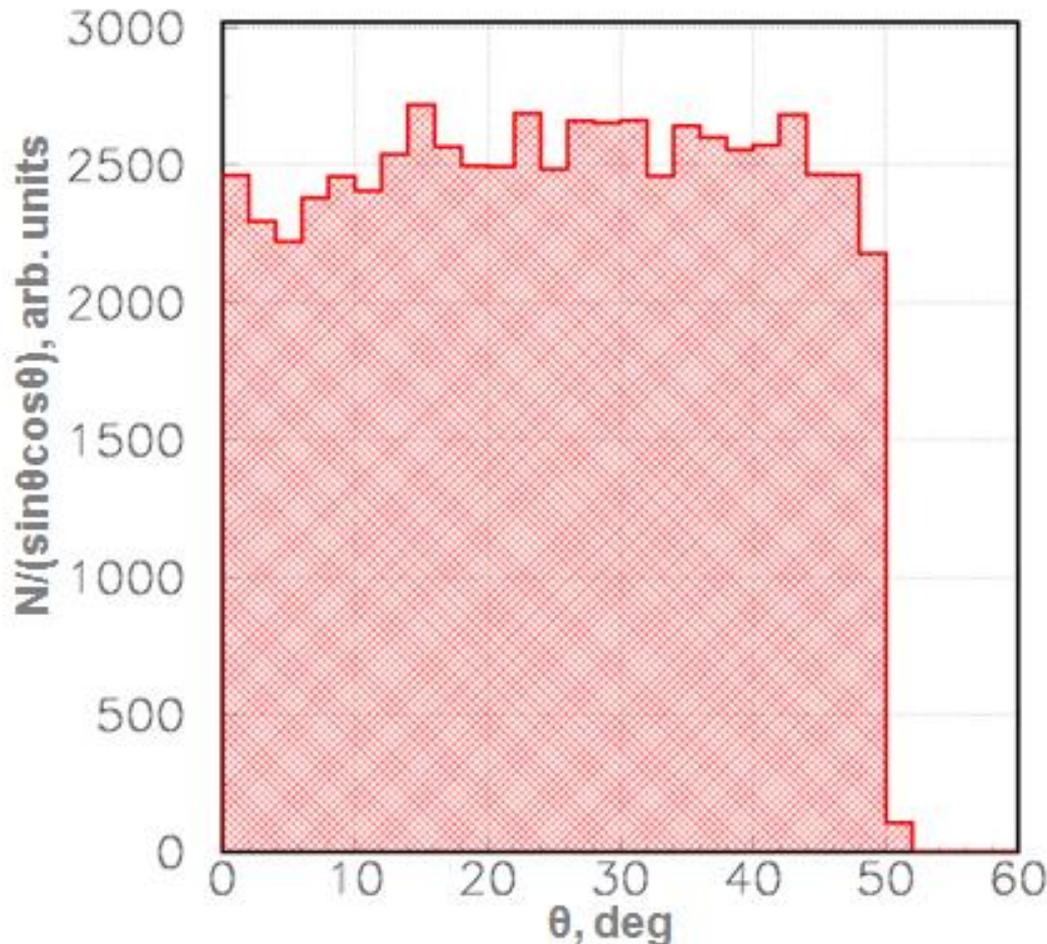
	EMI	HAM
T_R	85.4%	86.5
T_{Mie}	88.1%	88.6%
T	75.2%	76.6%

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

Zenith angular correction function



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



■ a_sens:

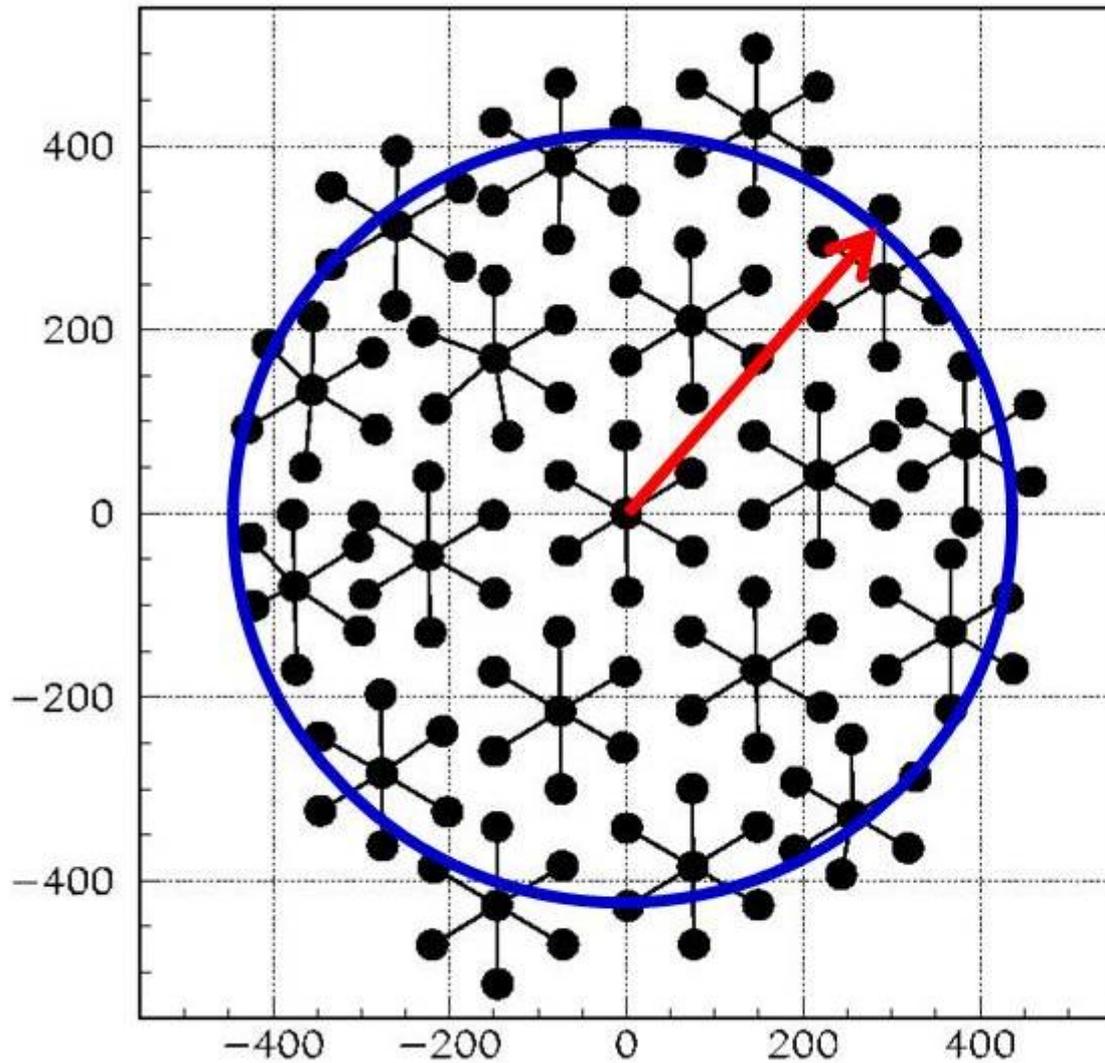
$$\vartheta < 34^\circ$$

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

$$\vartheta > 34^\circ$$

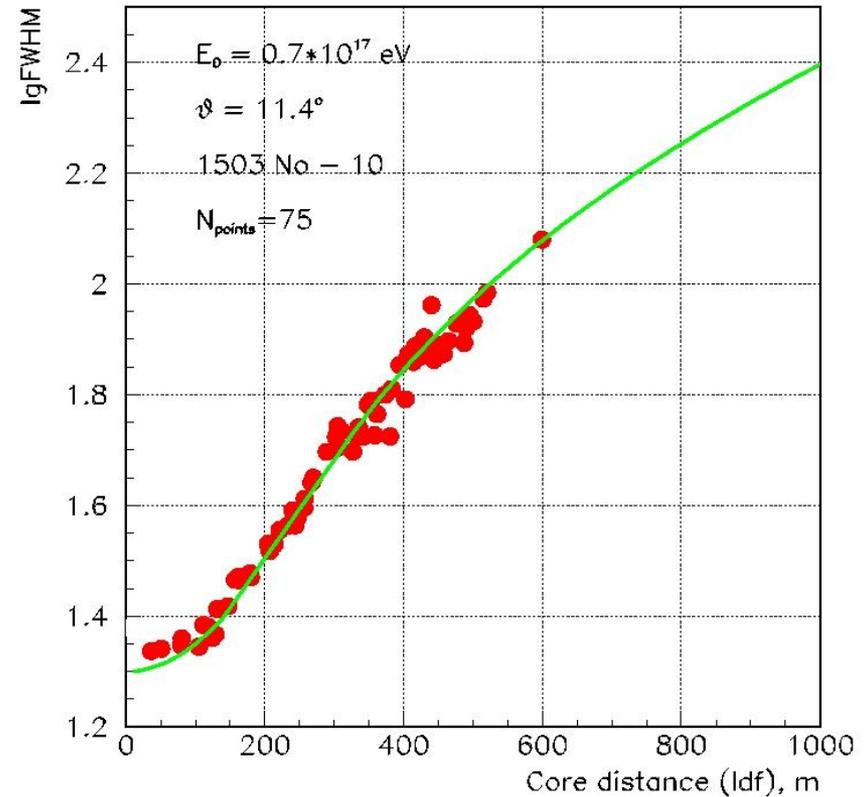
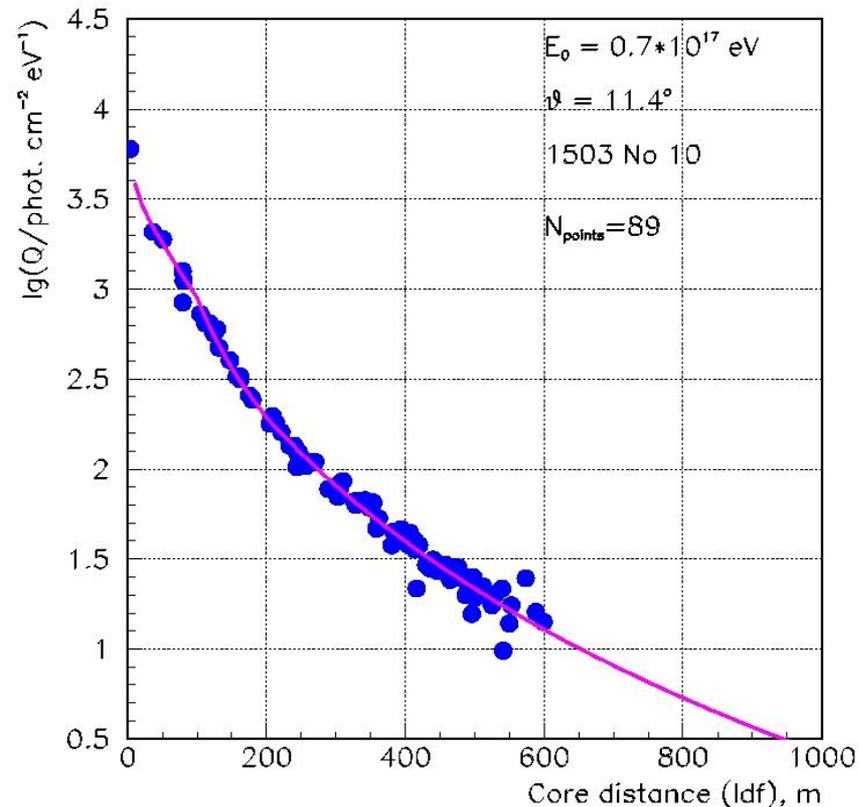
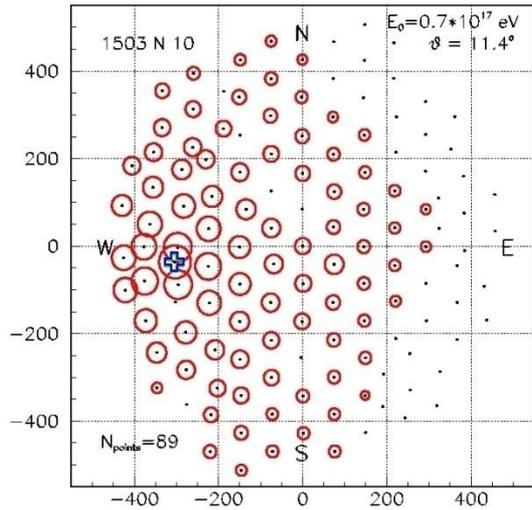
$$1.25 - (\vartheta/50)^2$$

Effective area

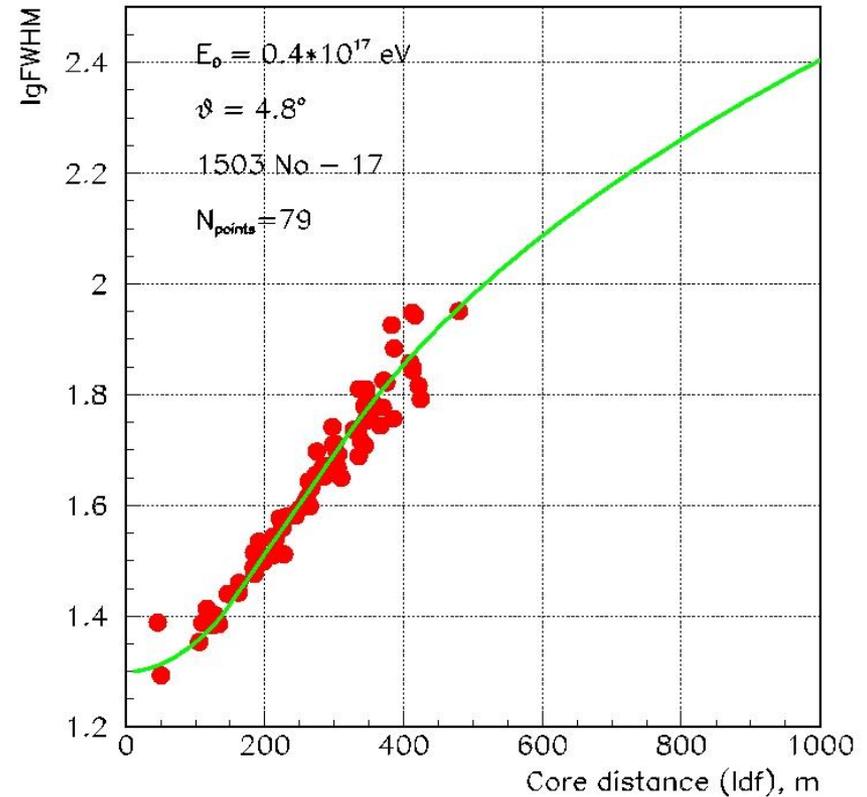
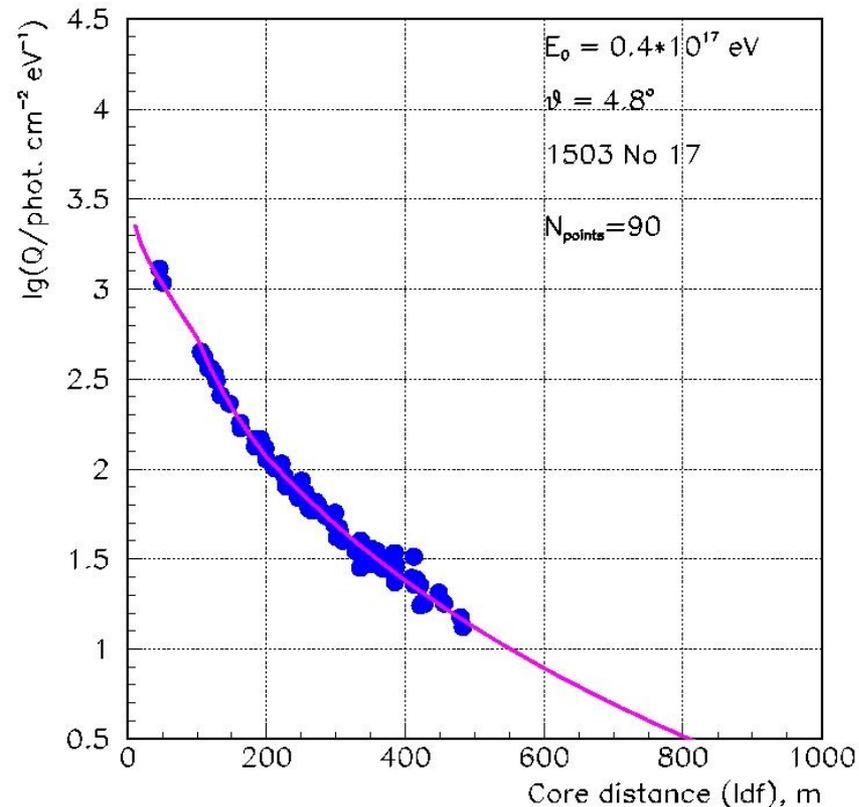
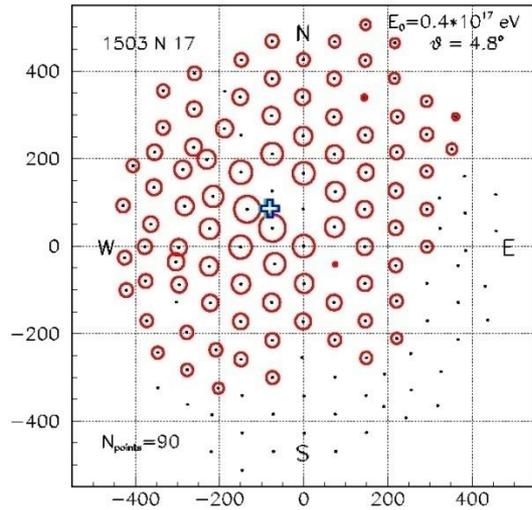


$R = 450\text{m}$

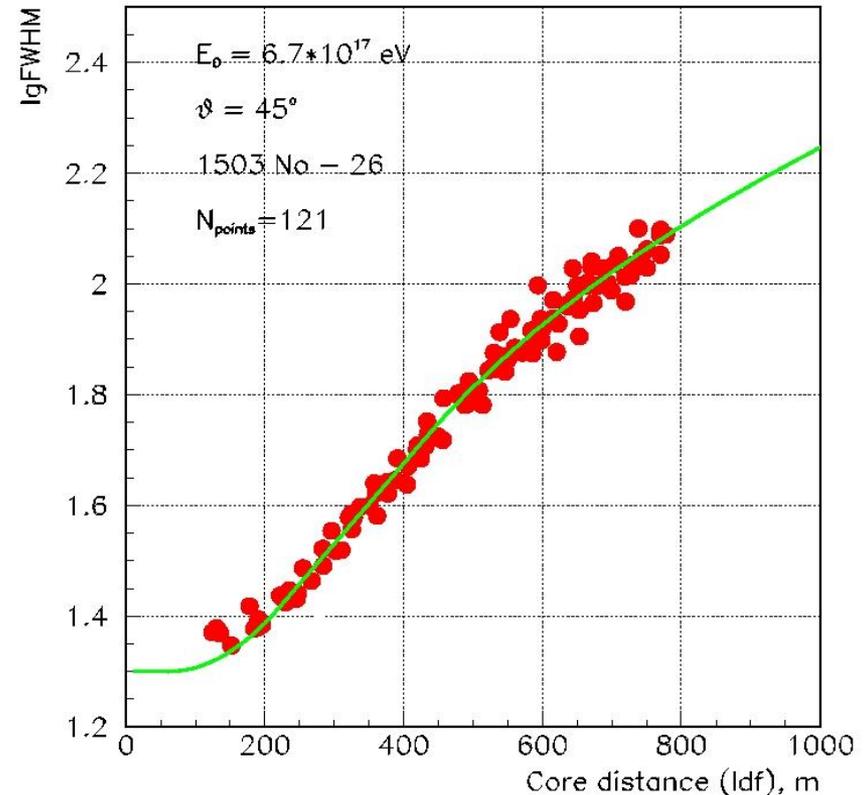
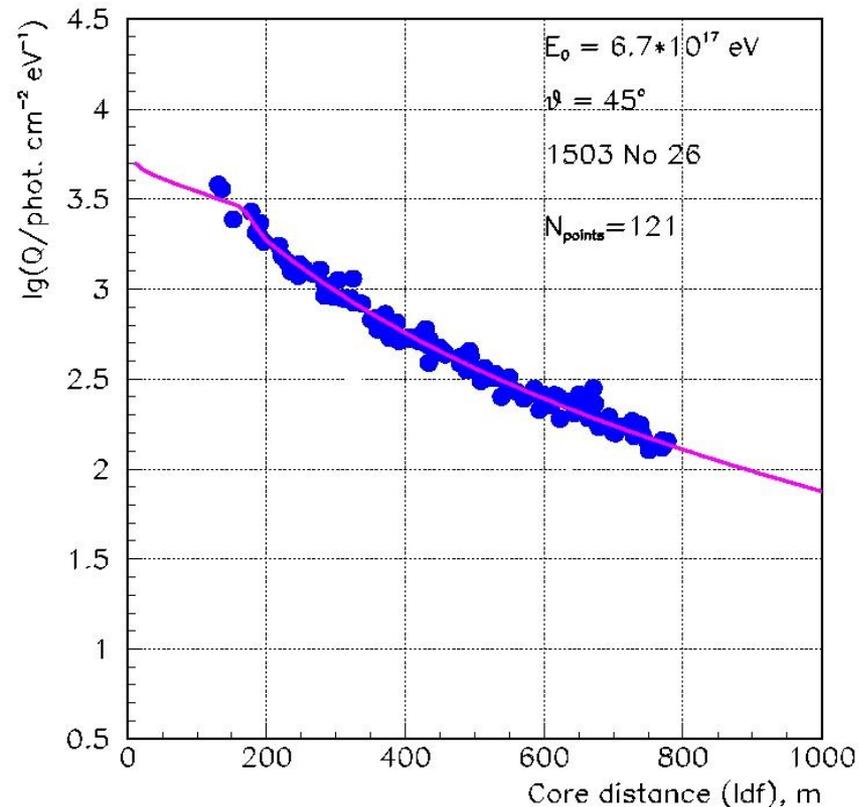
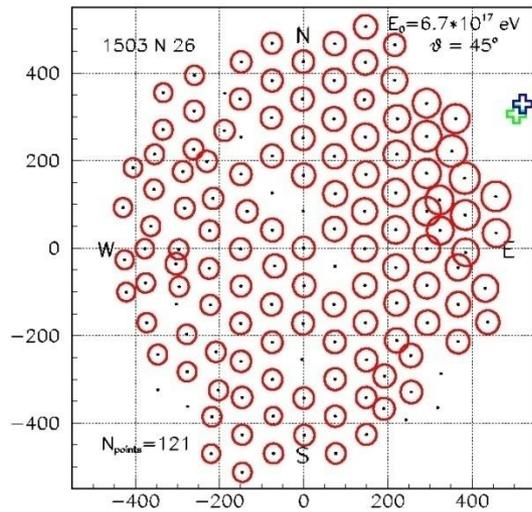
Пример события. Тунка-133. 15.03.2010



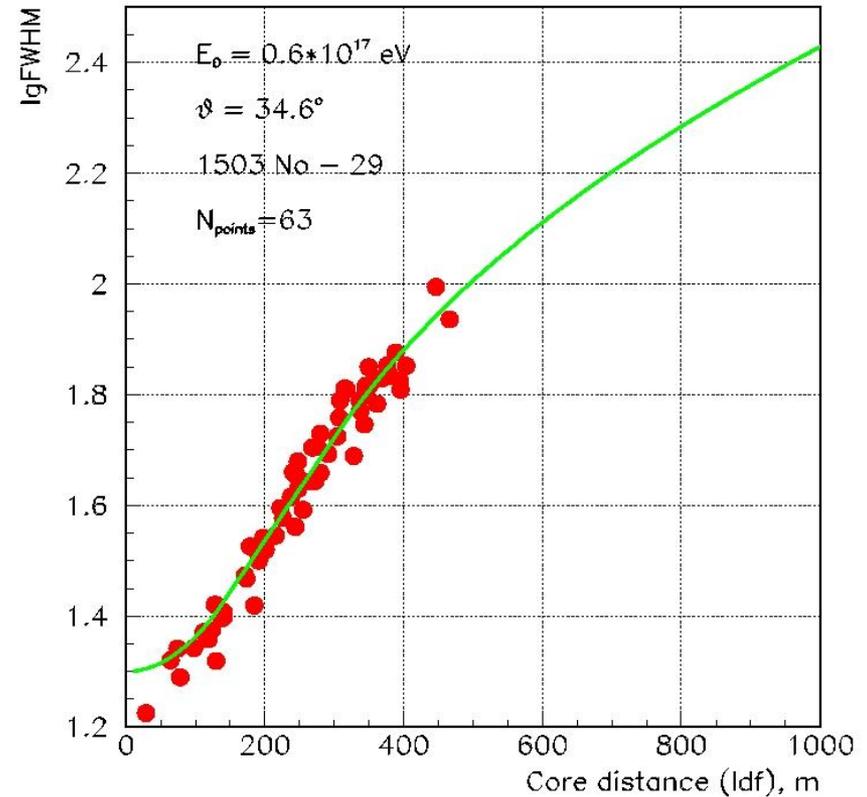
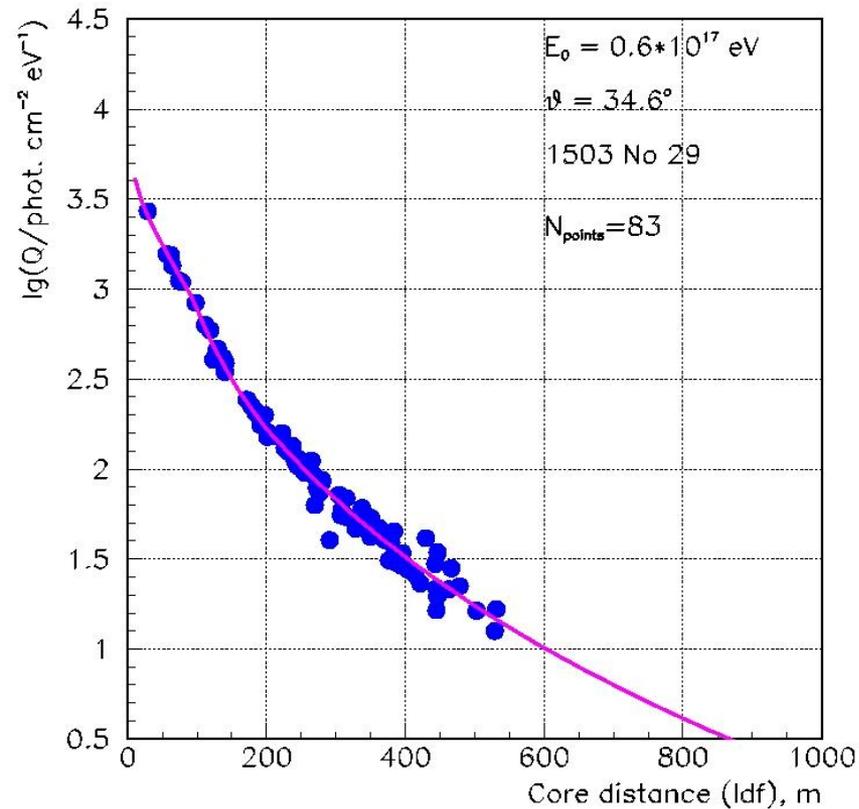
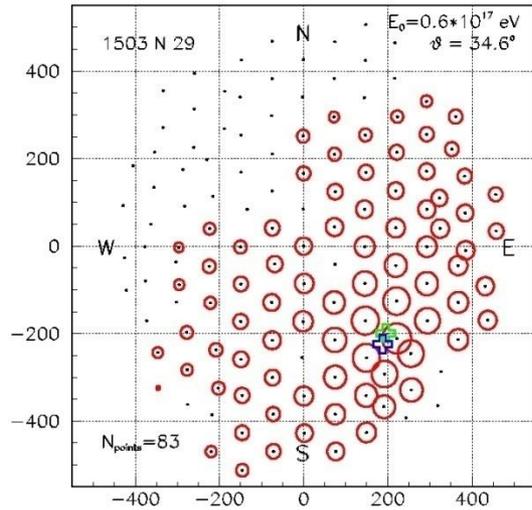
Пример события. Тунка-133. 15.03.2010



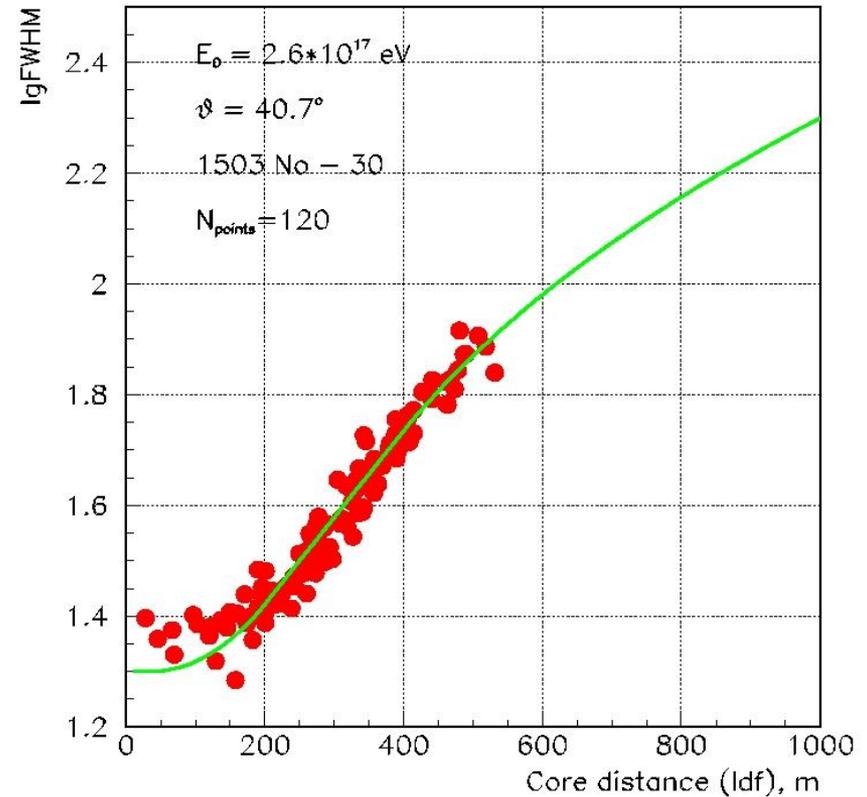
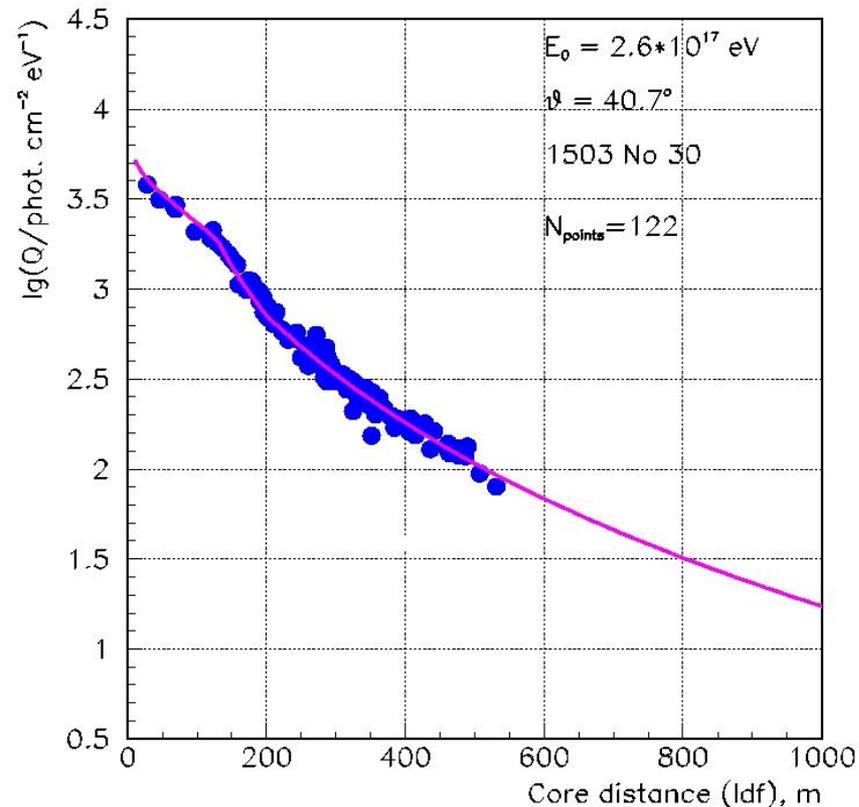
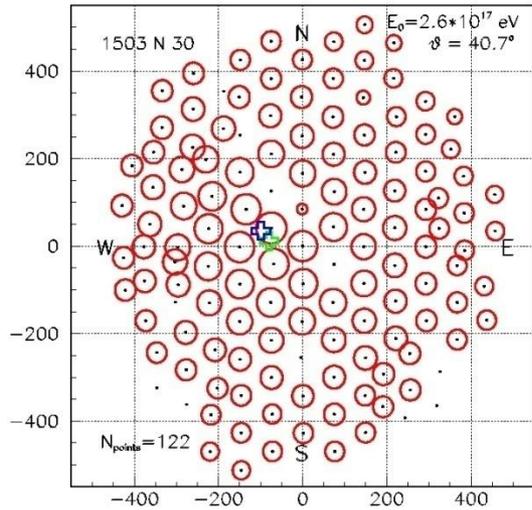
Пример события. Тунка-133. 15.03.2010



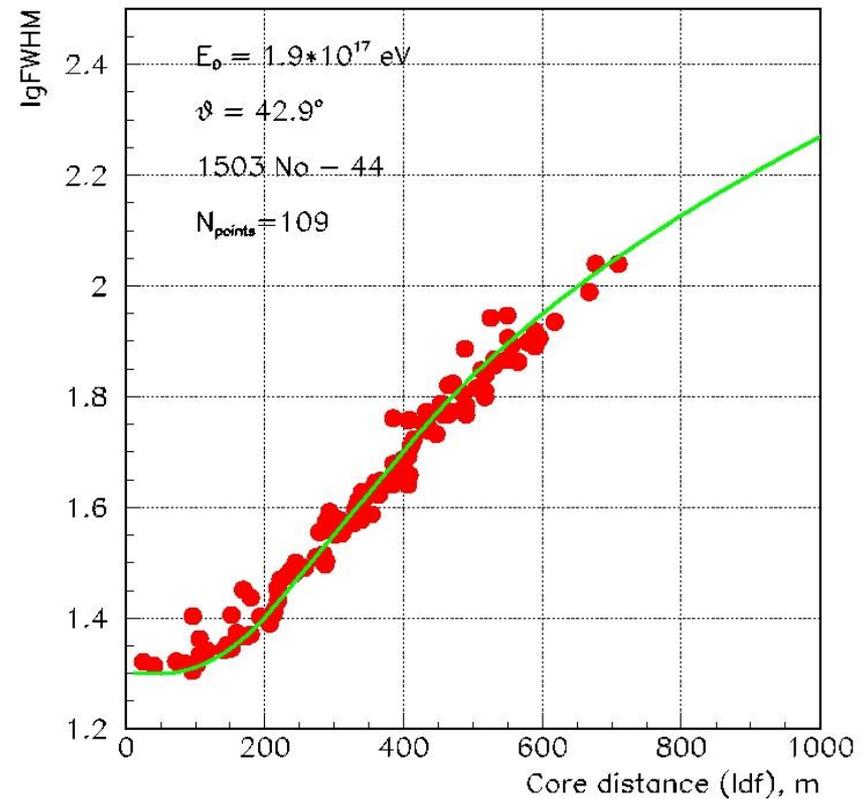
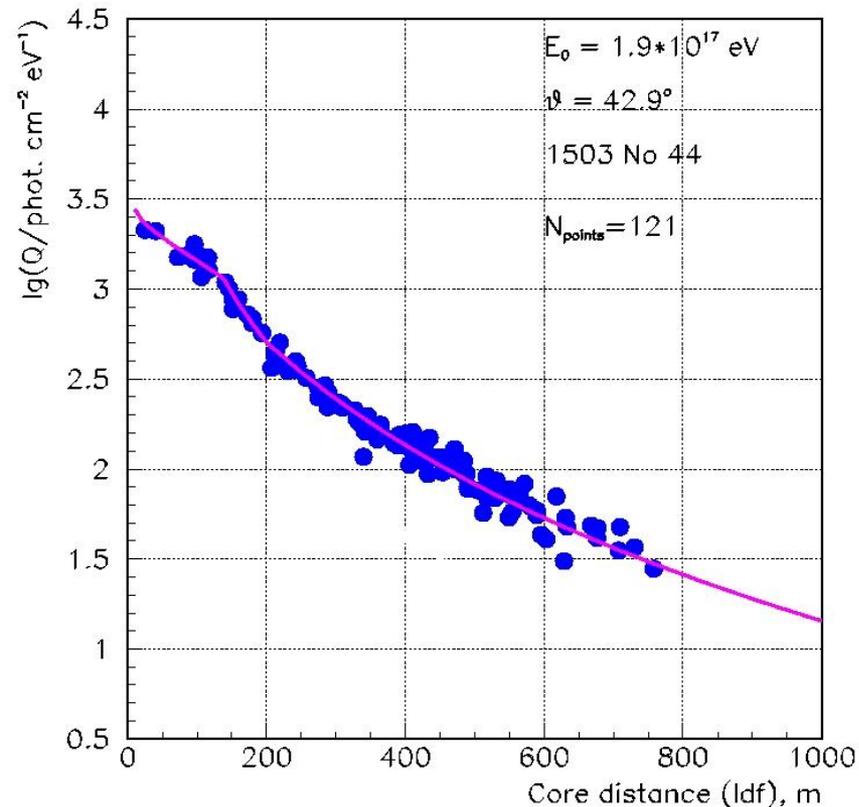
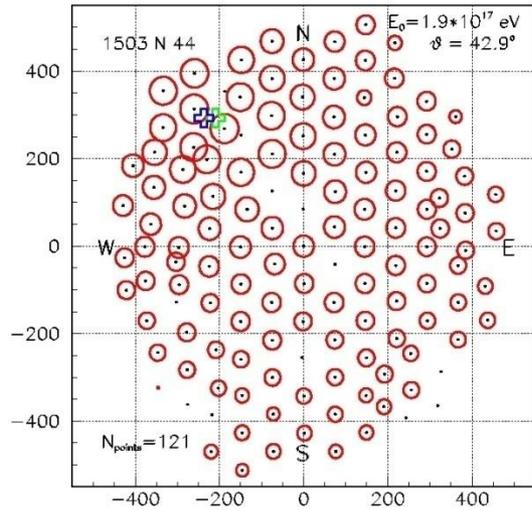
Пример события. Тунка-133. 15.03.2010



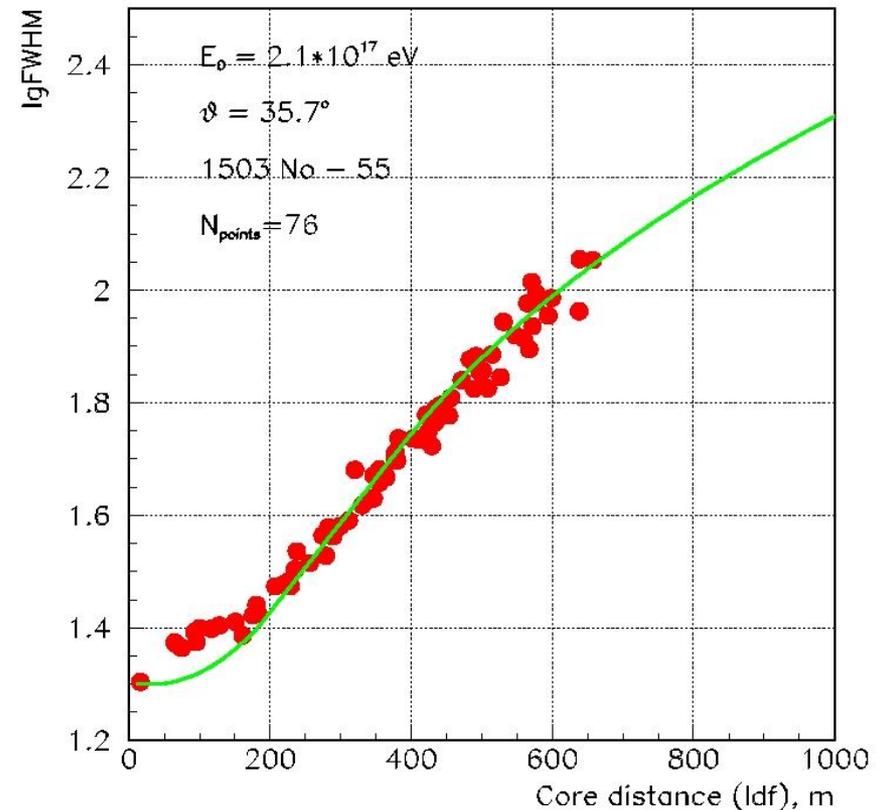
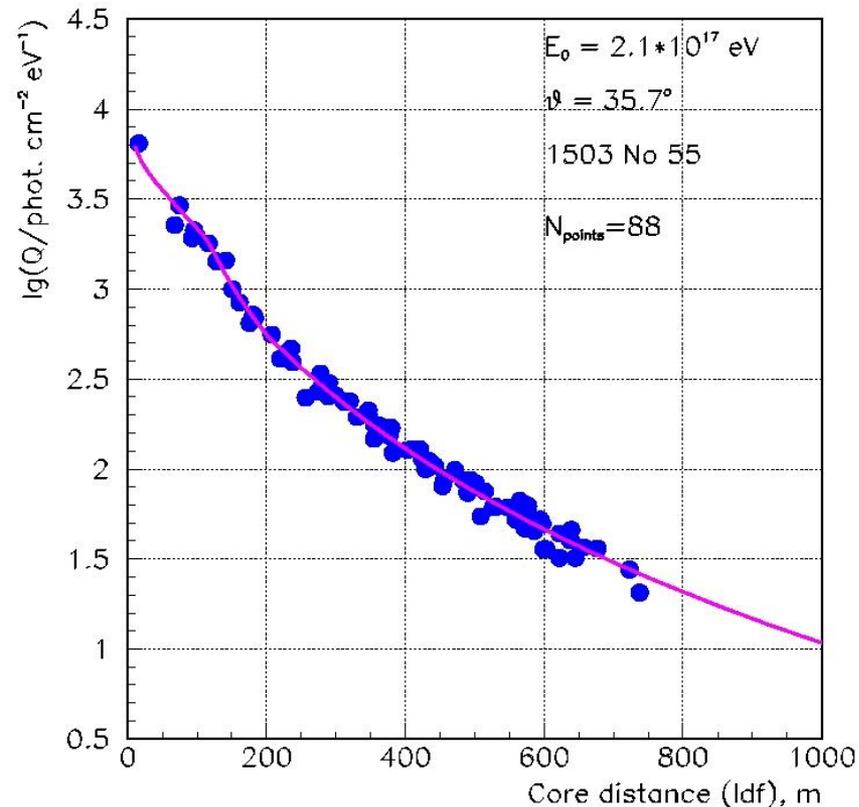
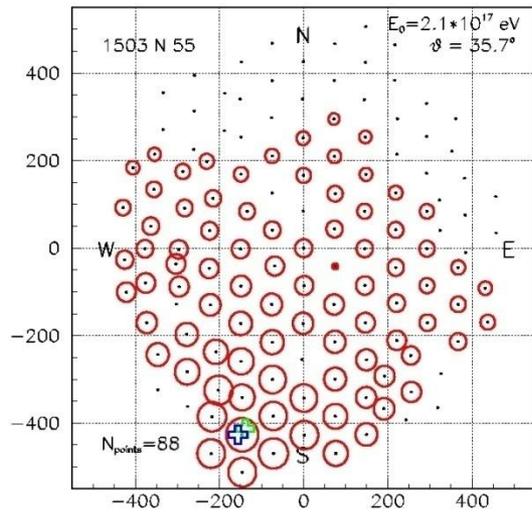
Пример события. Тунка-133. 15.03.2010



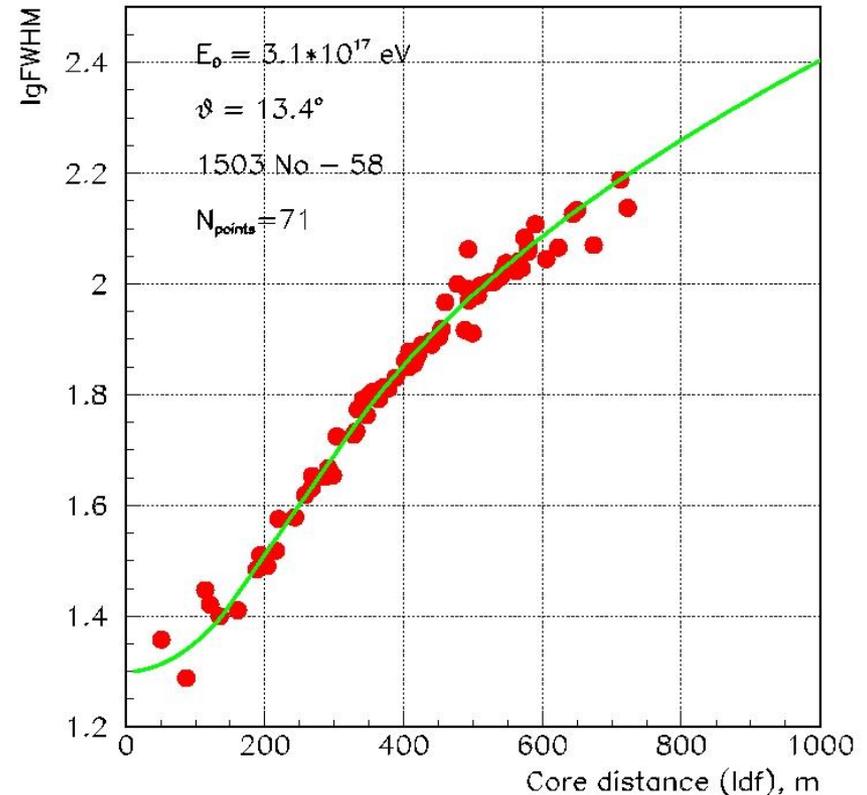
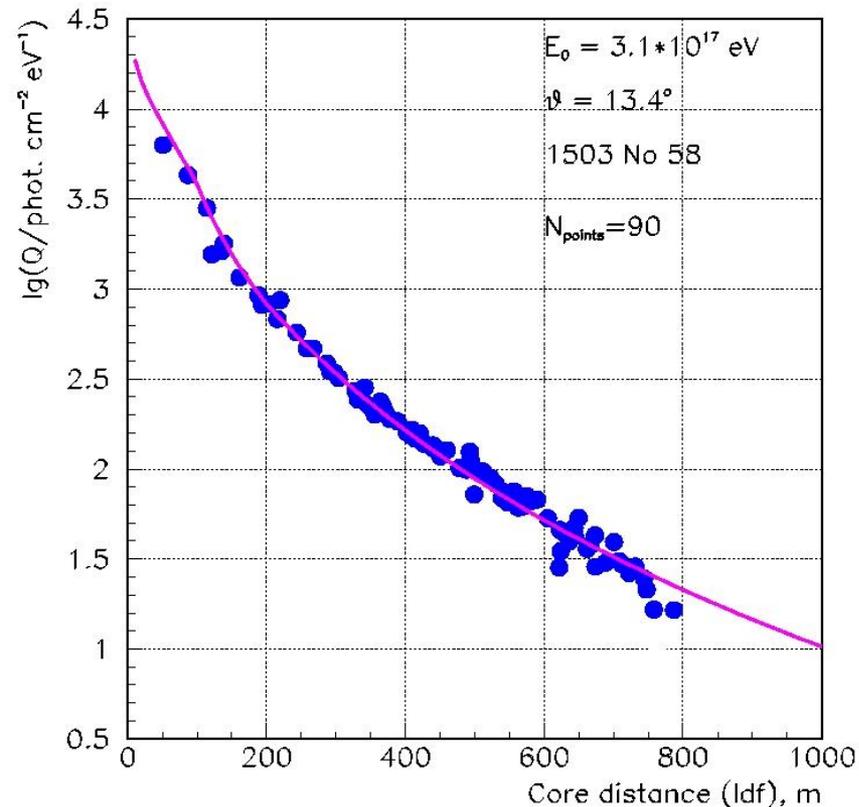
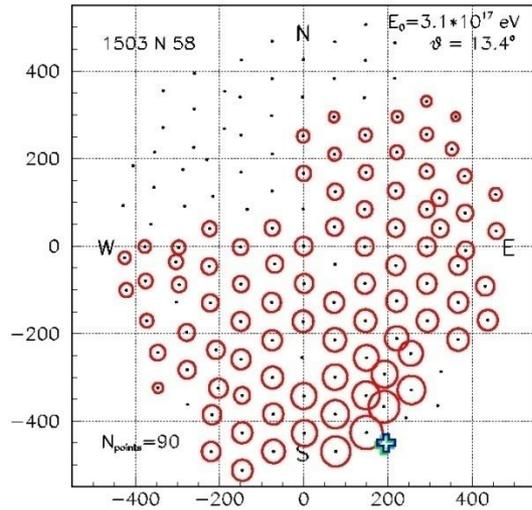
Пример события. Тунка-133. 15.03.2010



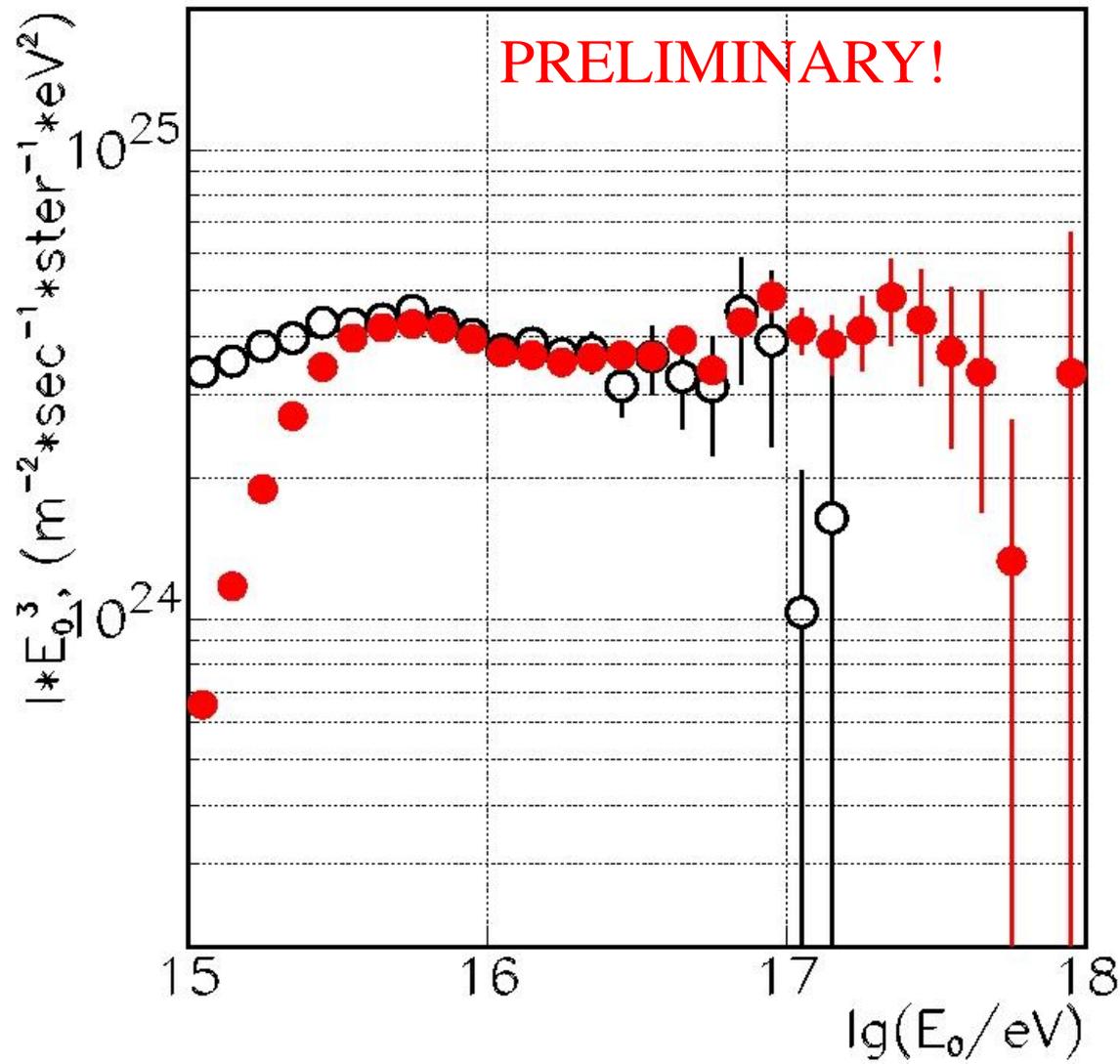
Пример события. Тунка-133. 15.03.2010



Пример события. Тунка-133. 15.03.2010



Tunka-133: Primary energy spectrum



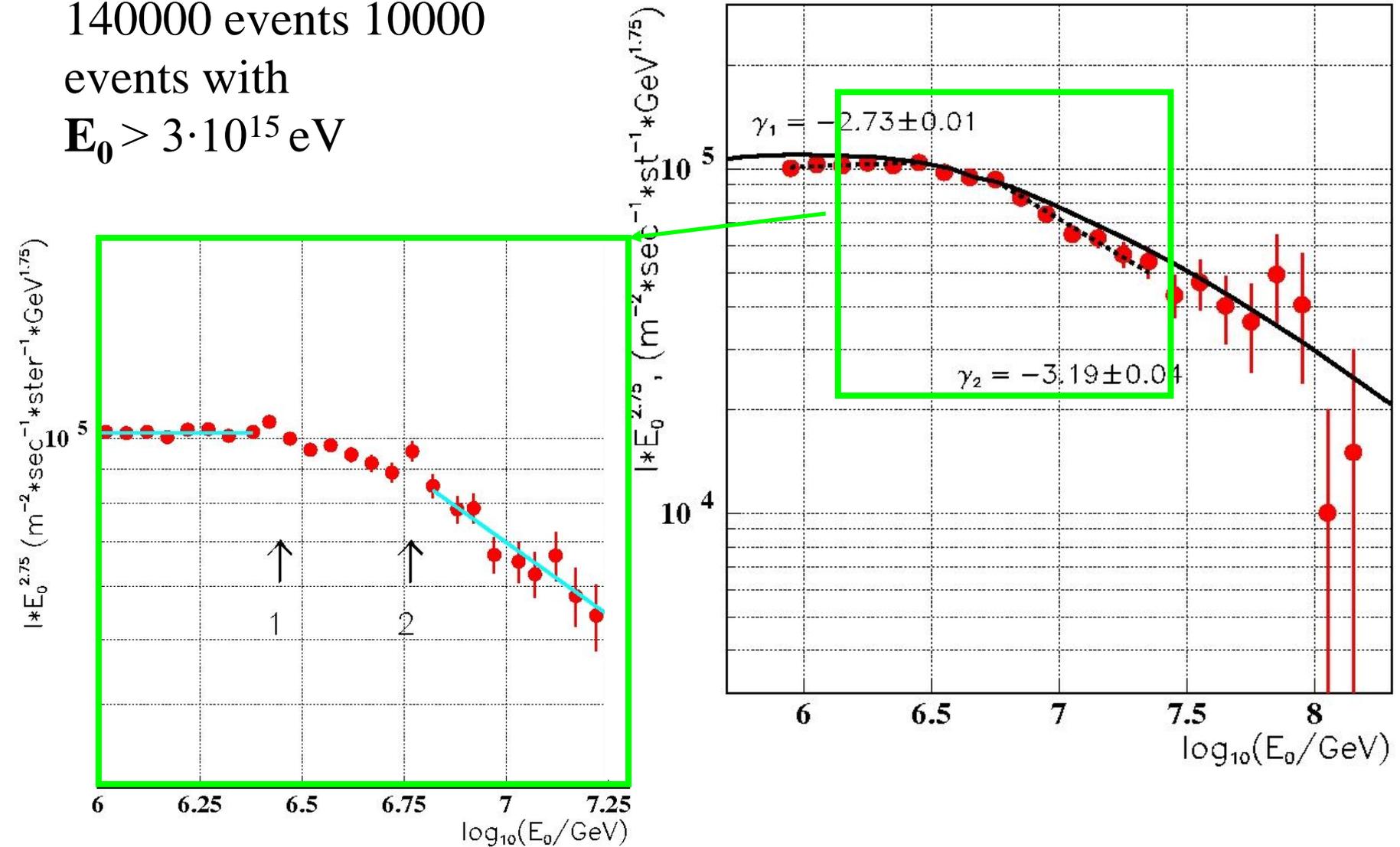
Differential energy spectrum – Tunka-25

300 hours $\theta < 25^\circ$

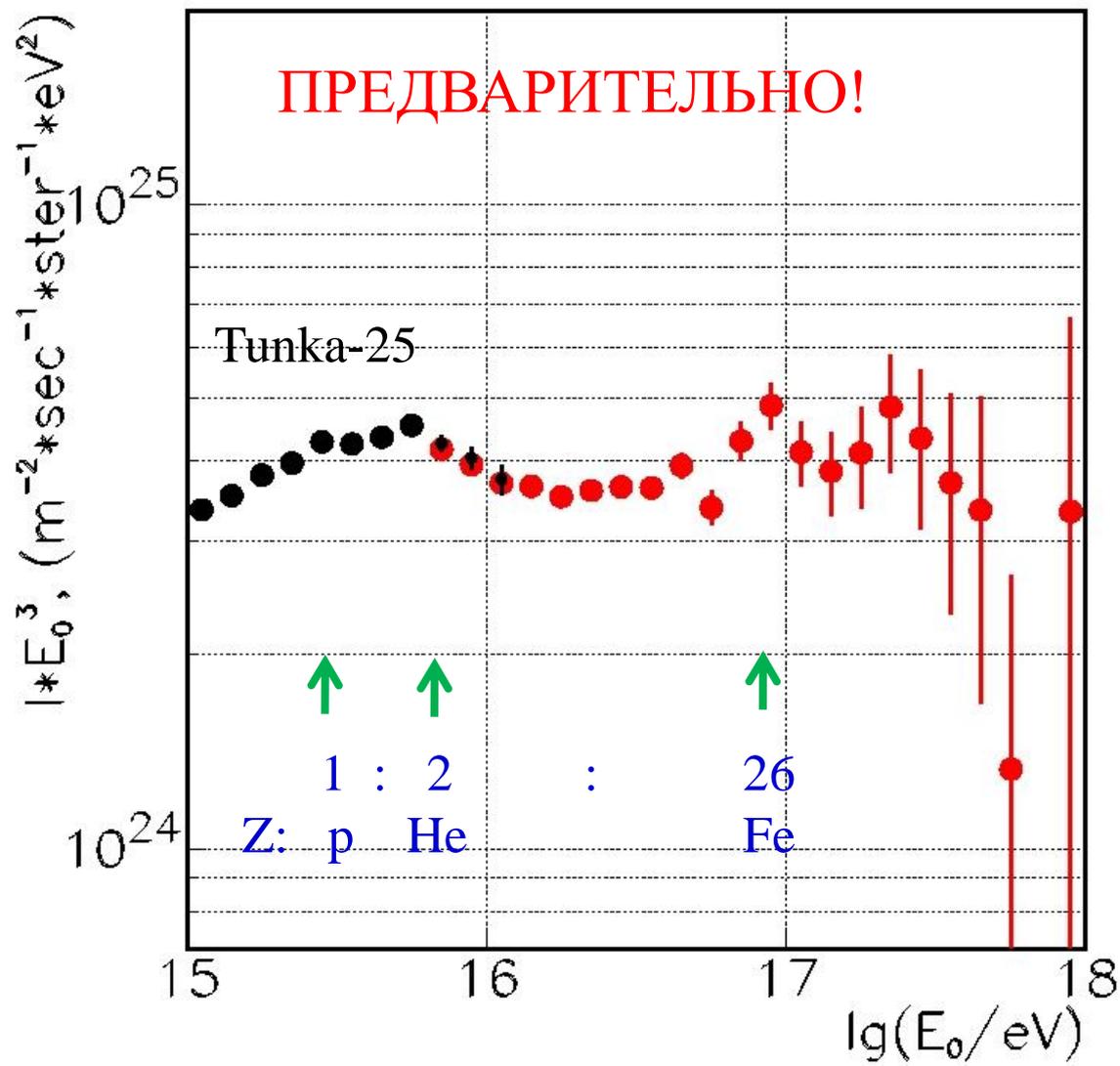
140000 events 10000

events with

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

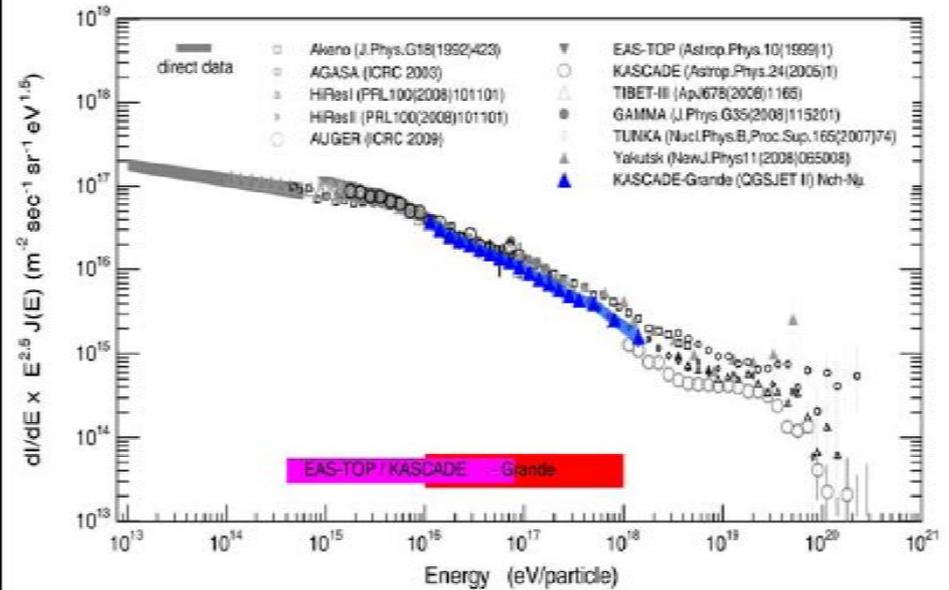
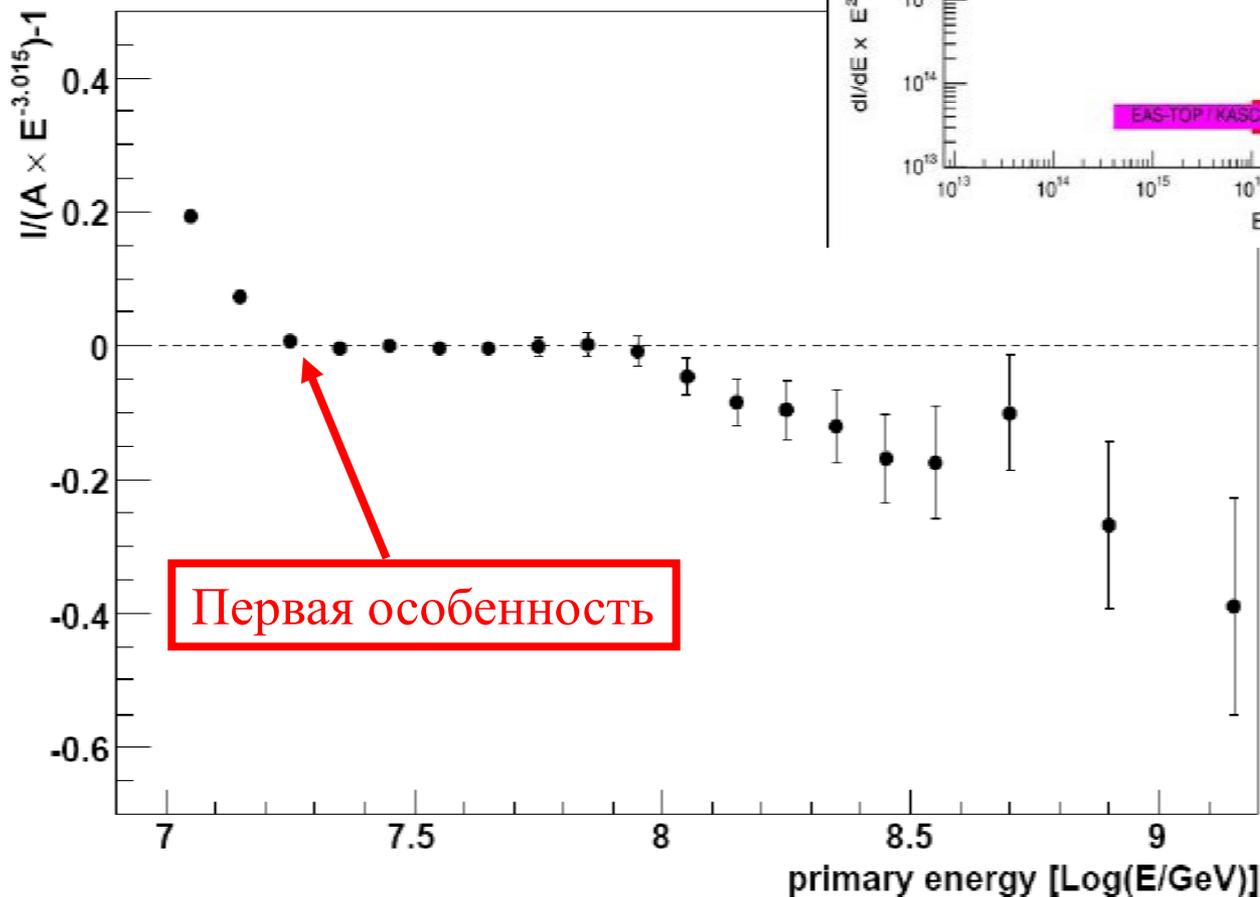


Тунка-133: Энергетический спектр



Особенности спектра в переходной области

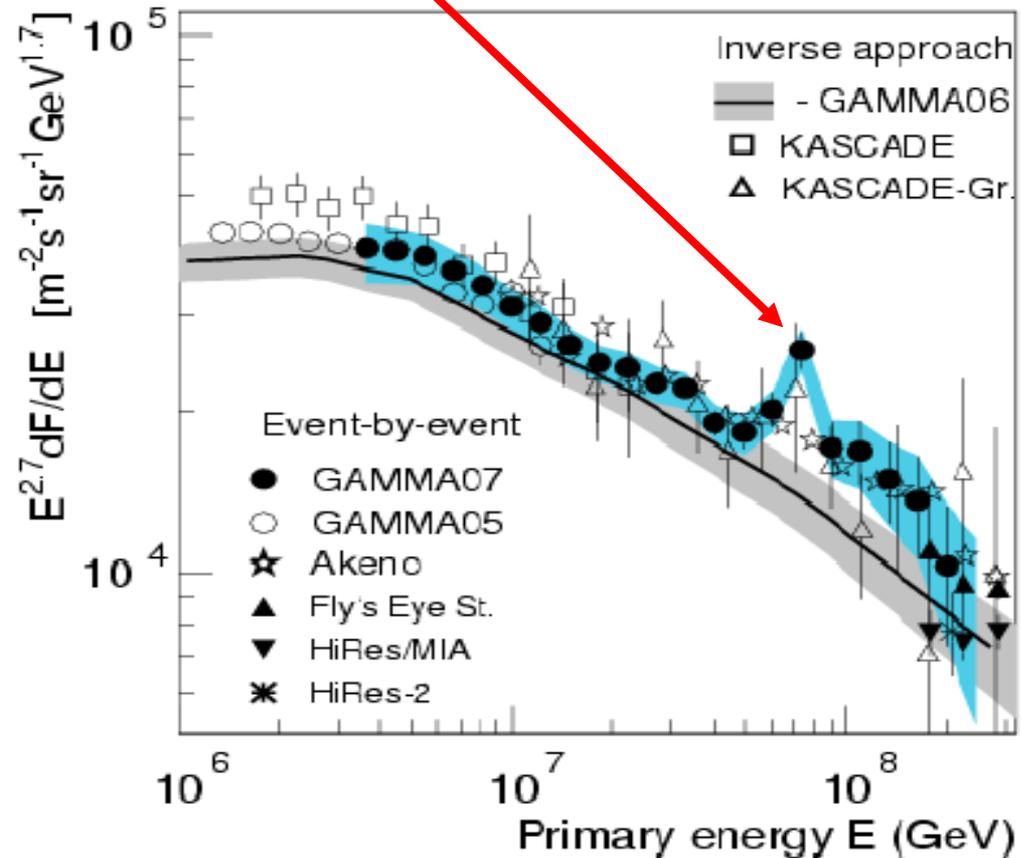
KASCADE-Grande 2010

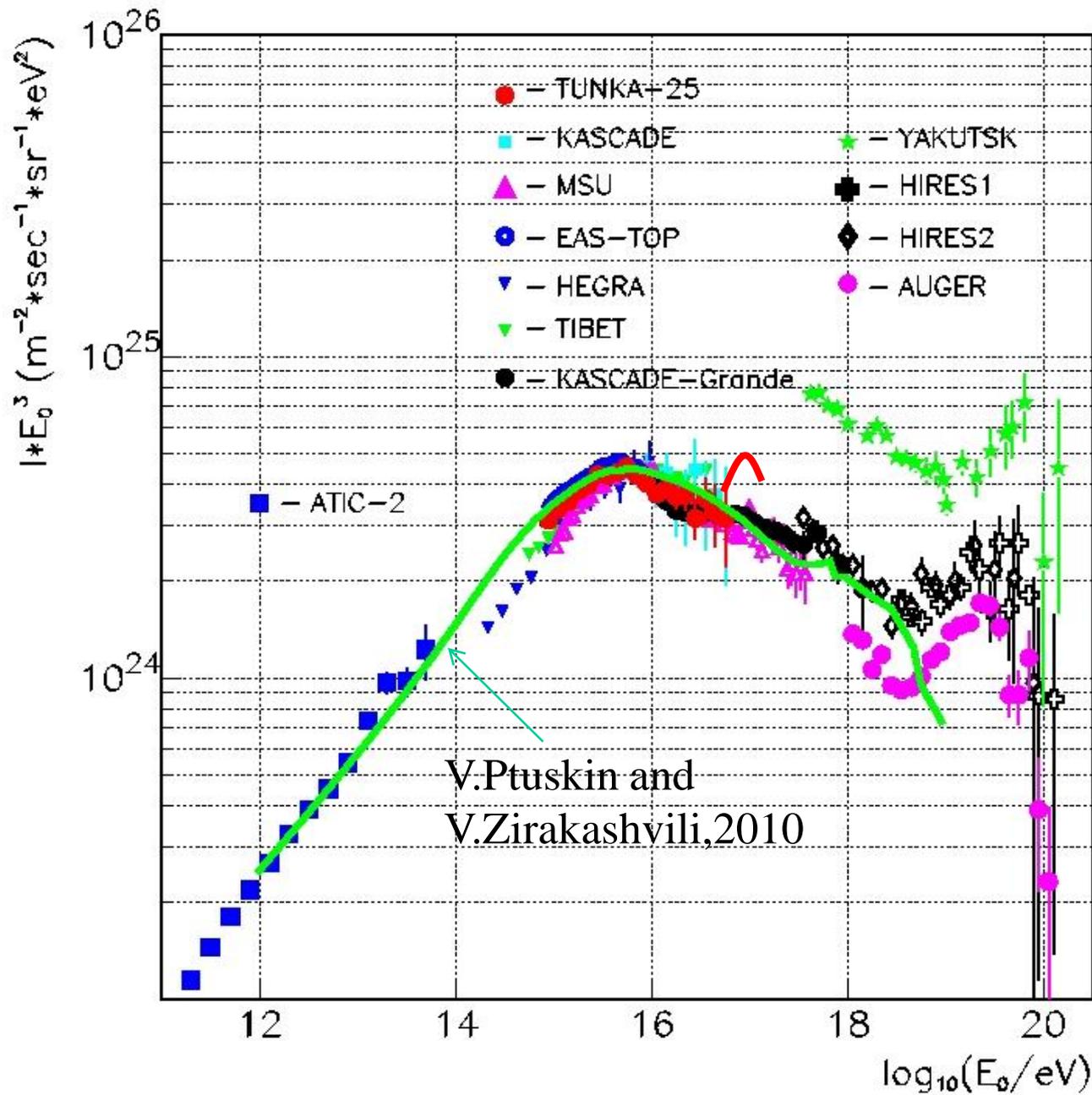


GAMMA (Mt. Aragaz, 3200 a.s.l.)



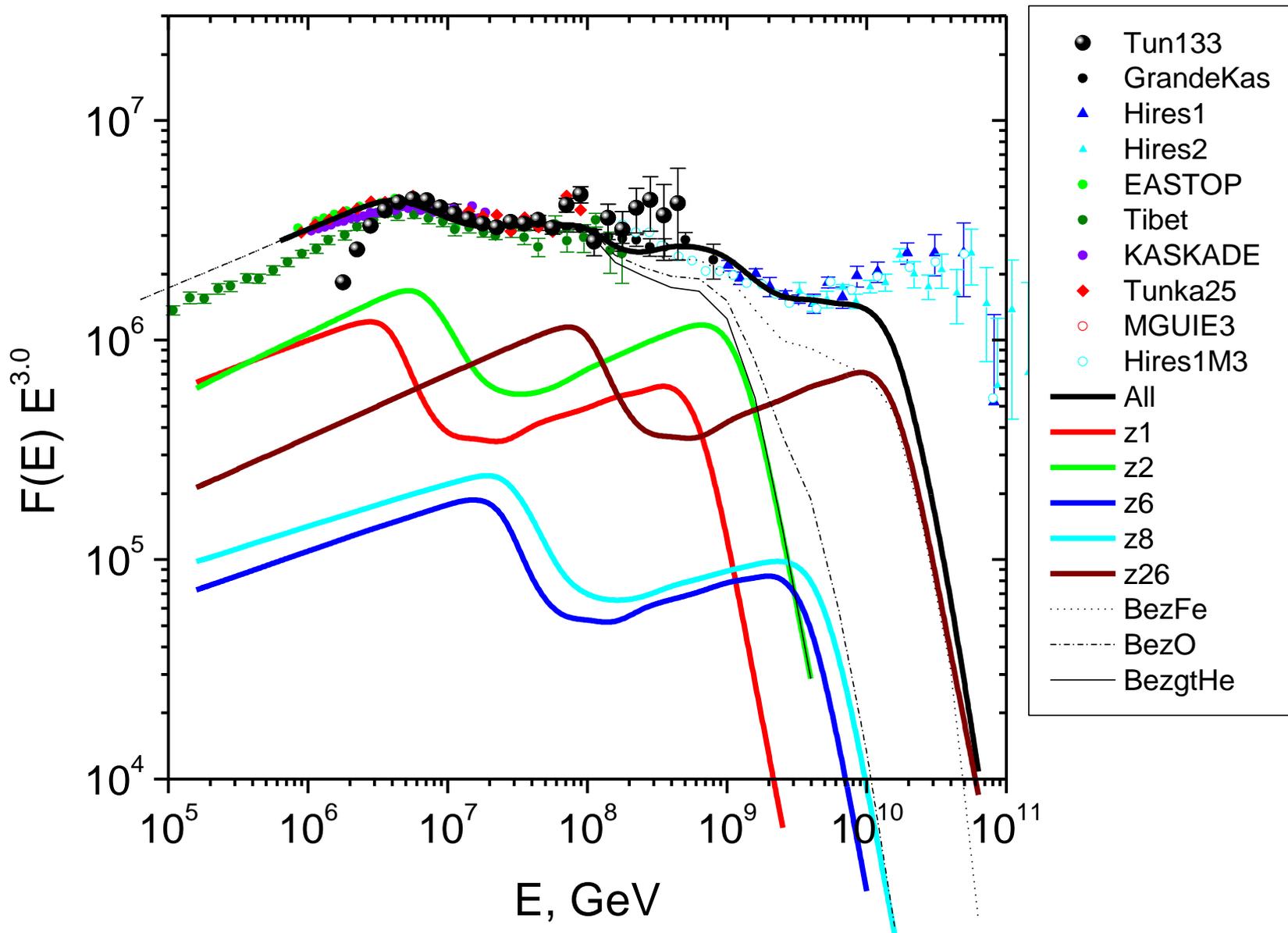
Вторая особенность





4 types
of SNR

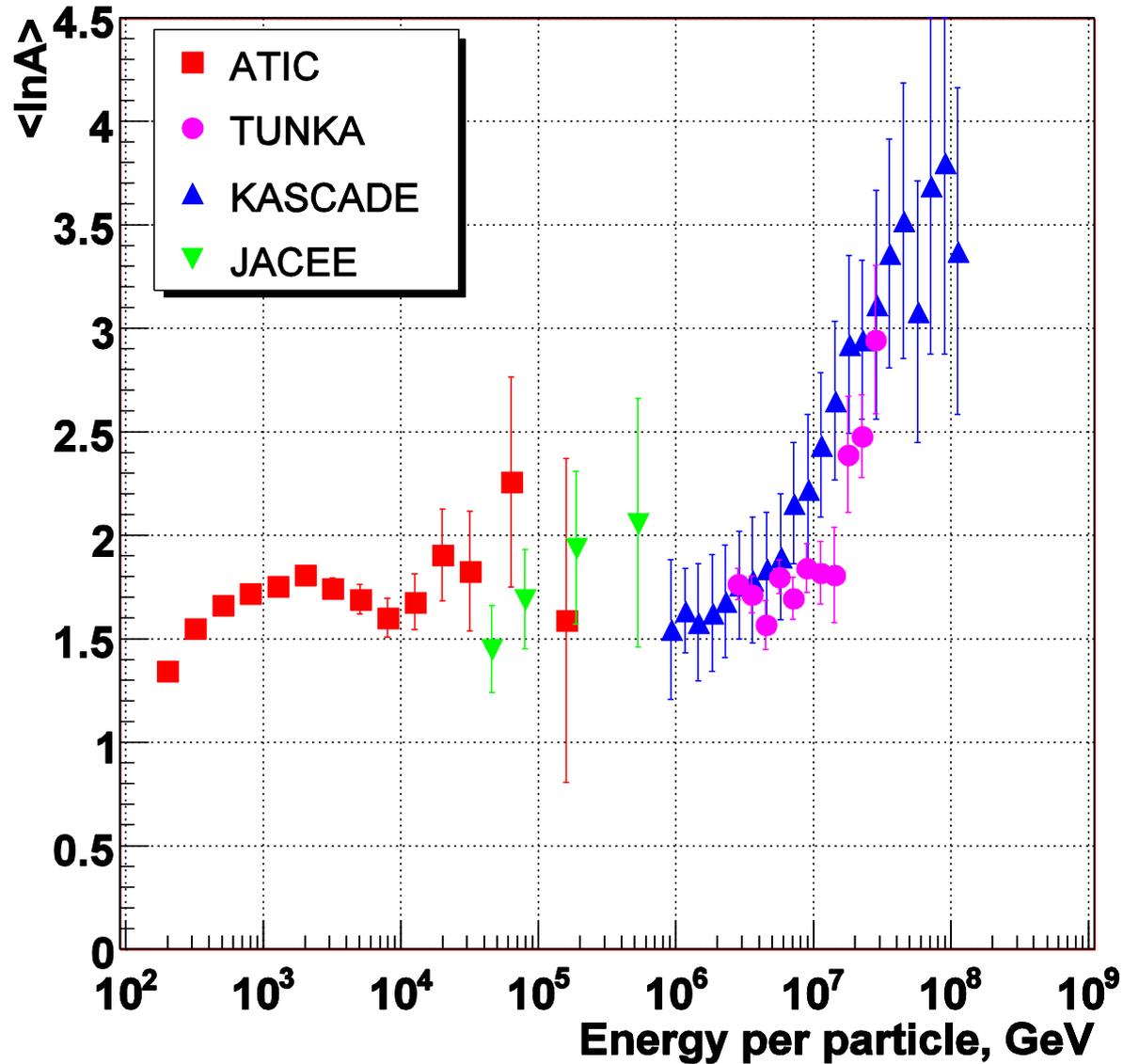
L. Sveshnikova, private communication,
2 types of SNR with E_{\max} difference ~ 150



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

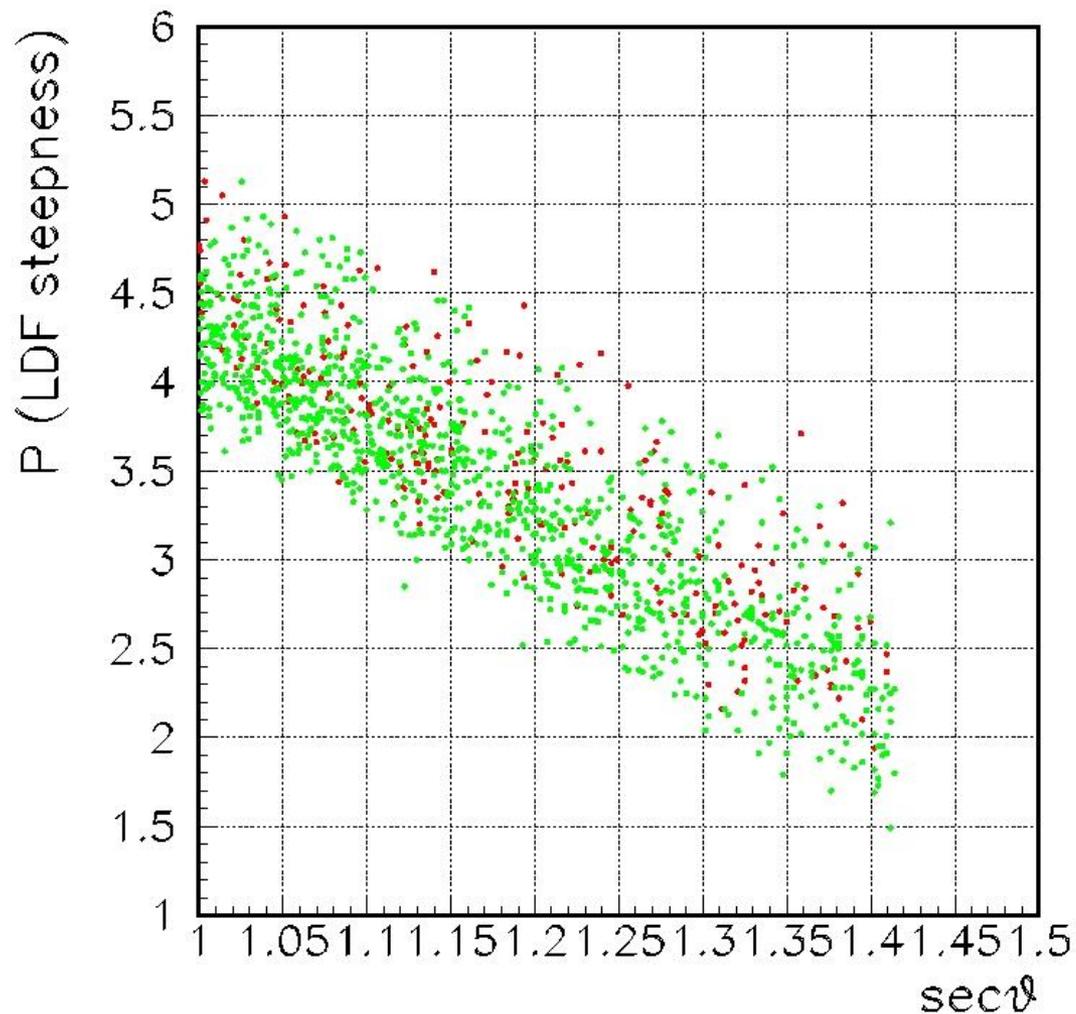
Mean mass composition



ЭКСПЕРИМЕНТ:

Корреляция крутизны ФПР и зенитного угла

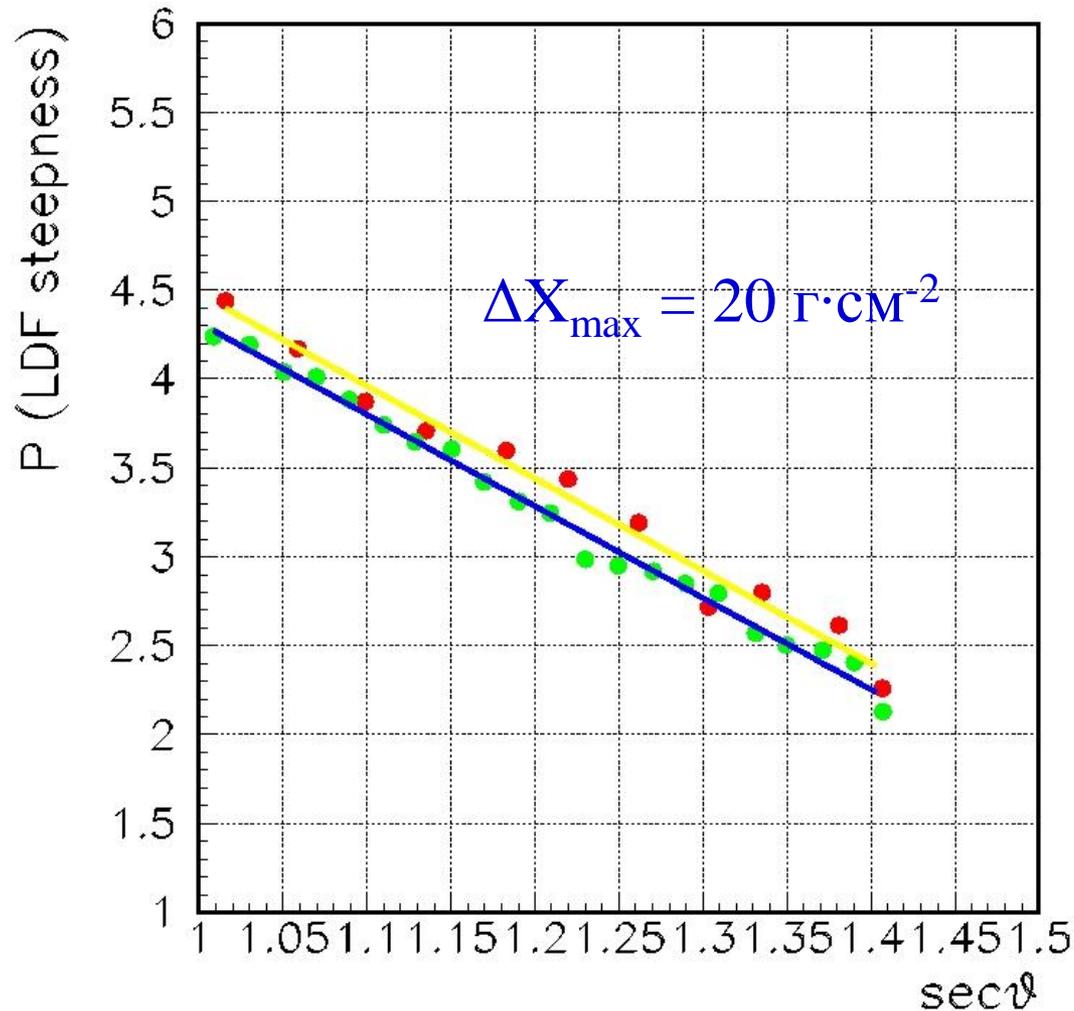
$$E_0 = 3 \cdot 10^{16} \text{ eV} \text{ and } E_0 = 6 \cdot 10^{16} \text{ eV}$$



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

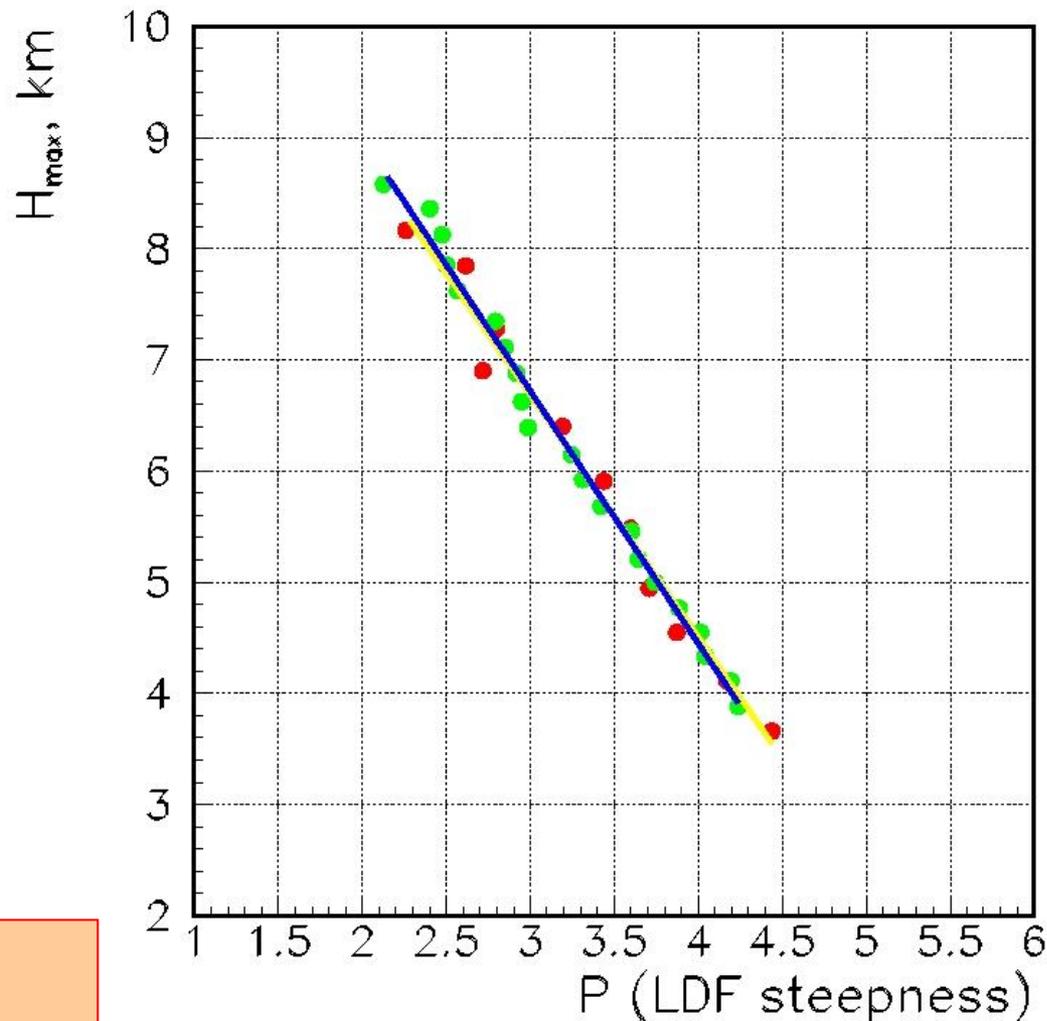
$$\langle X_{\max} \rangle = 560 \text{ Г} \cdot \text{см}^{-2}$$

for

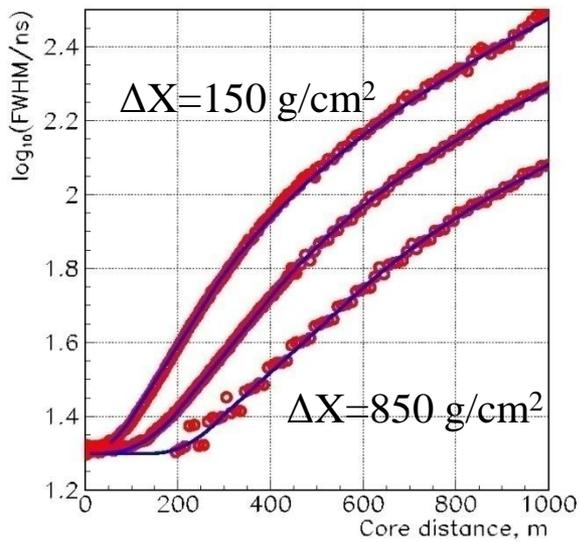
$$E_0 = 3 \cdot 10^{16} \text{ эВ}$$

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

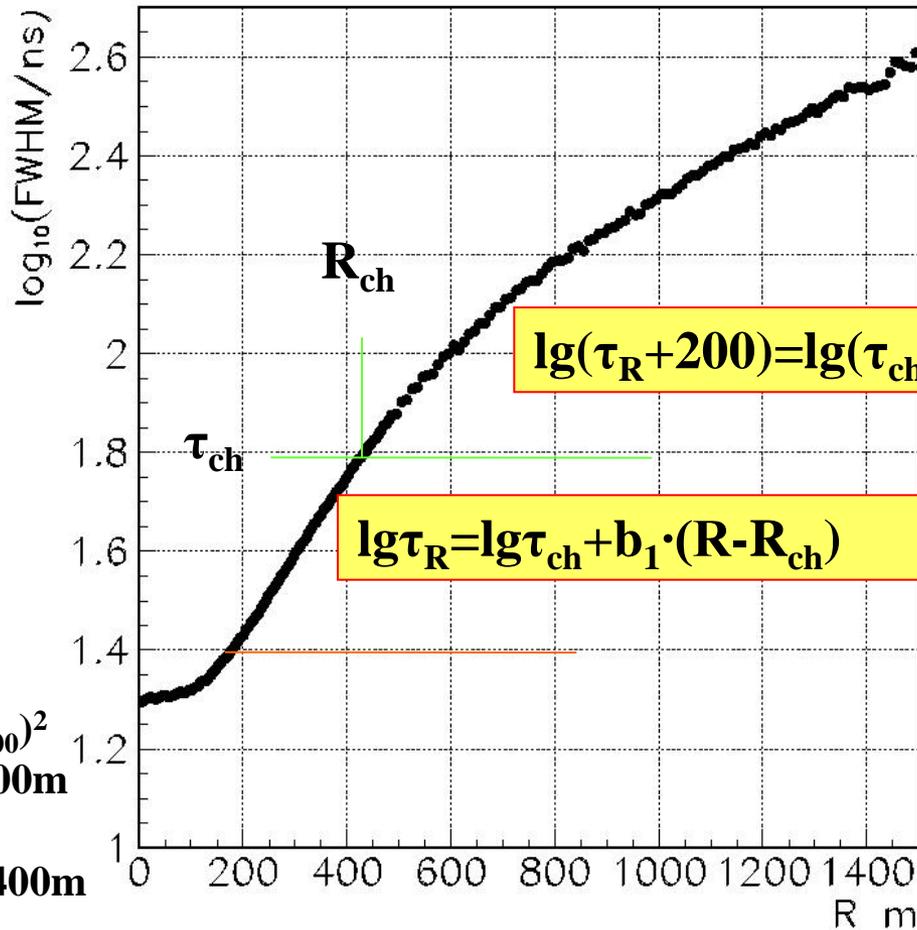
Используется для
получения X_{\max}



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



CORSIKA: Функция длительность-расстояние (ФДР)



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

Форма ФДР

описывается

одним

параметром -

$\text{FWHM}(400)$:

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

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

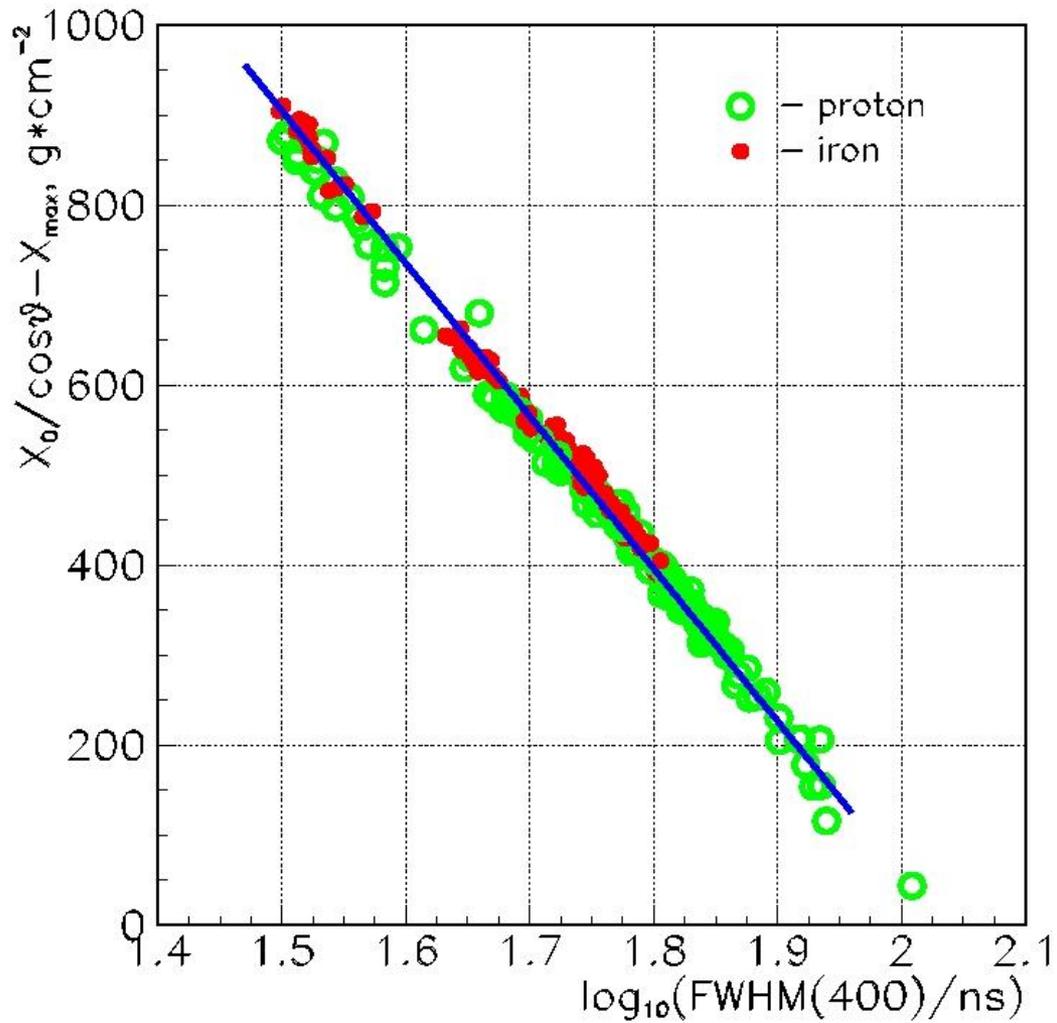
$$R_{ch} = 3976 - 3429 \cdot \lg \tau_{400} + 786 \cdot (\lg \tau_{400})^2$$

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

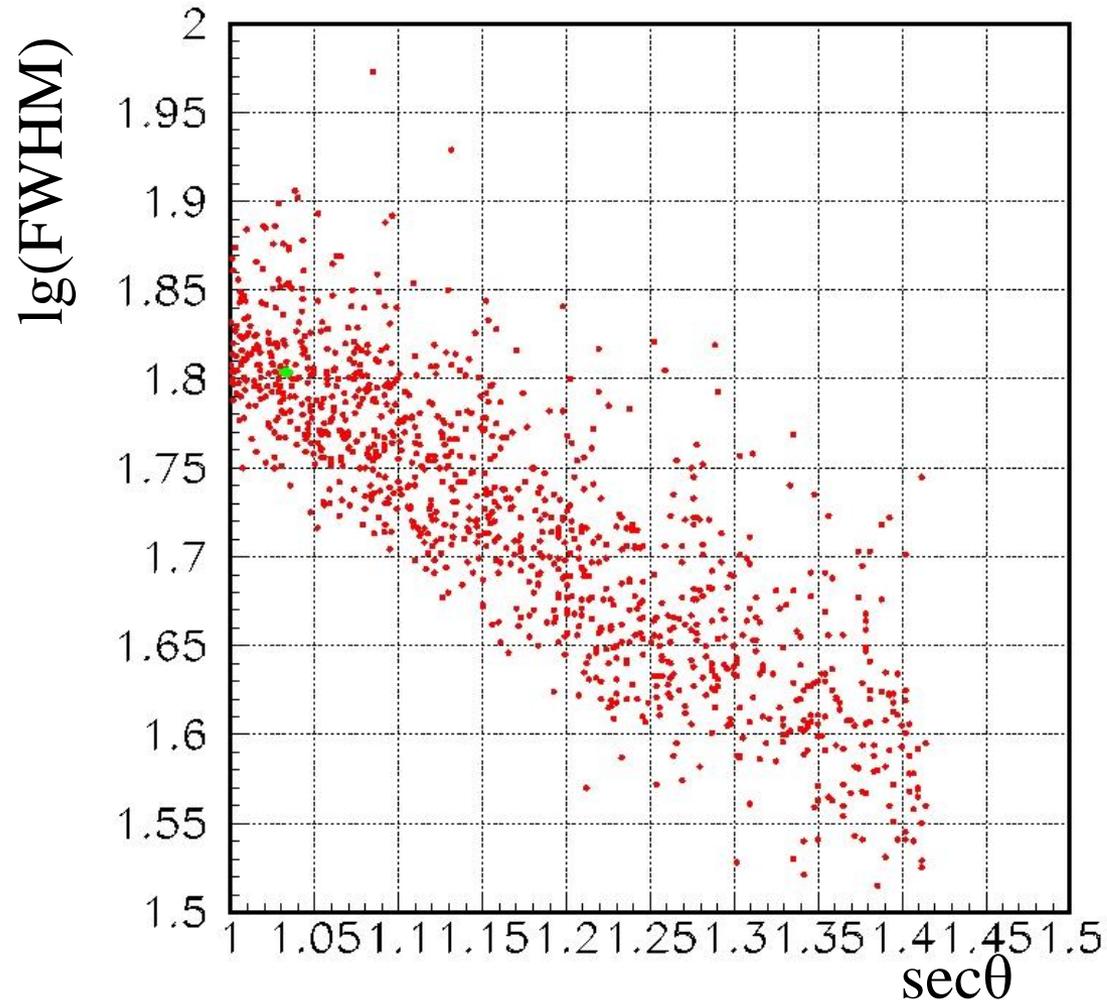
$$\lg(\tau_R + 200) =$$

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

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

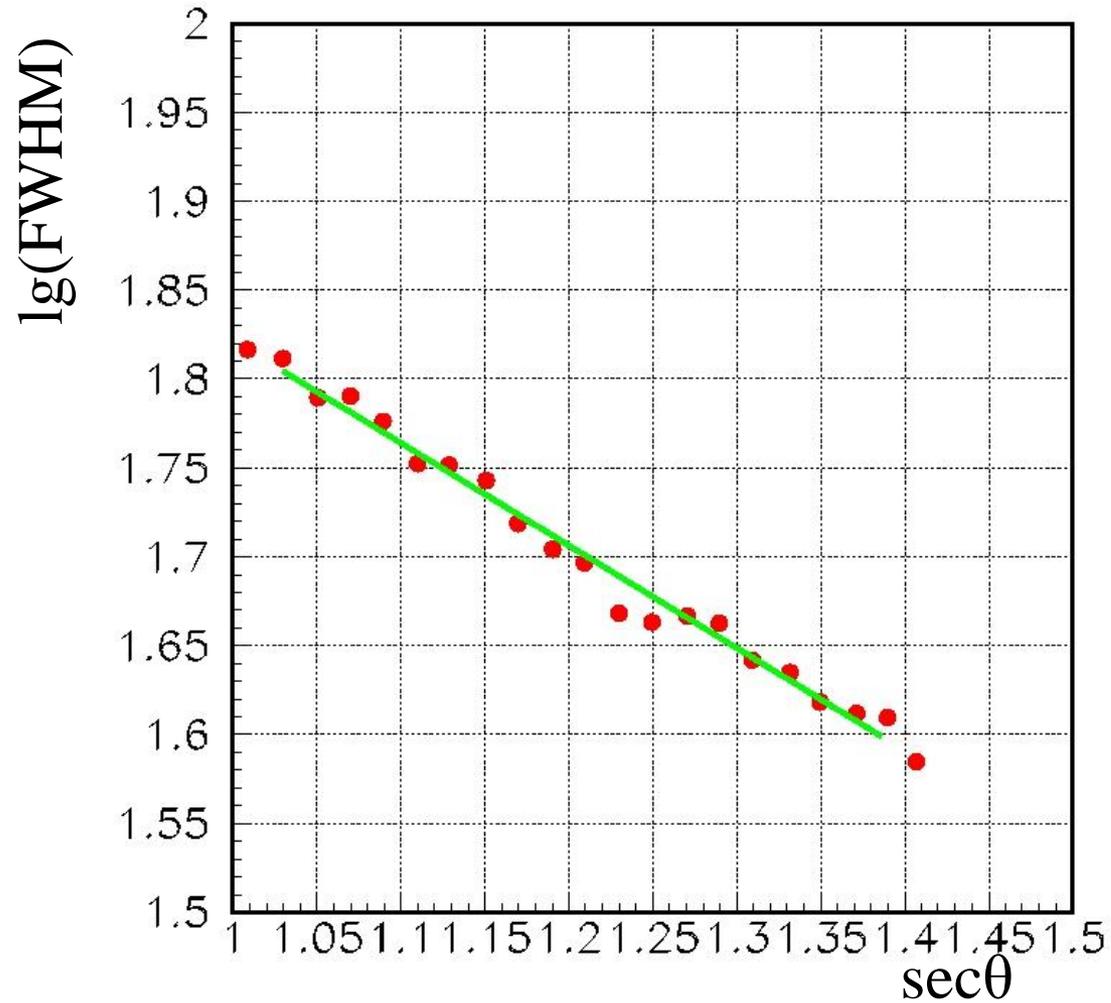


ЭКСПЕРИМЕНТ: Зависимость FWHM(400) от зенитного угла для $E_0 = 3 \cdot 10^{16}$ эВ



ЭКСПЕРИМЕНТ:

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



ЭКСПЕРИМЕНТ:

ΔX_{\max} В ЗАВИСИМОСТИ ОТ FWHM(400)

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

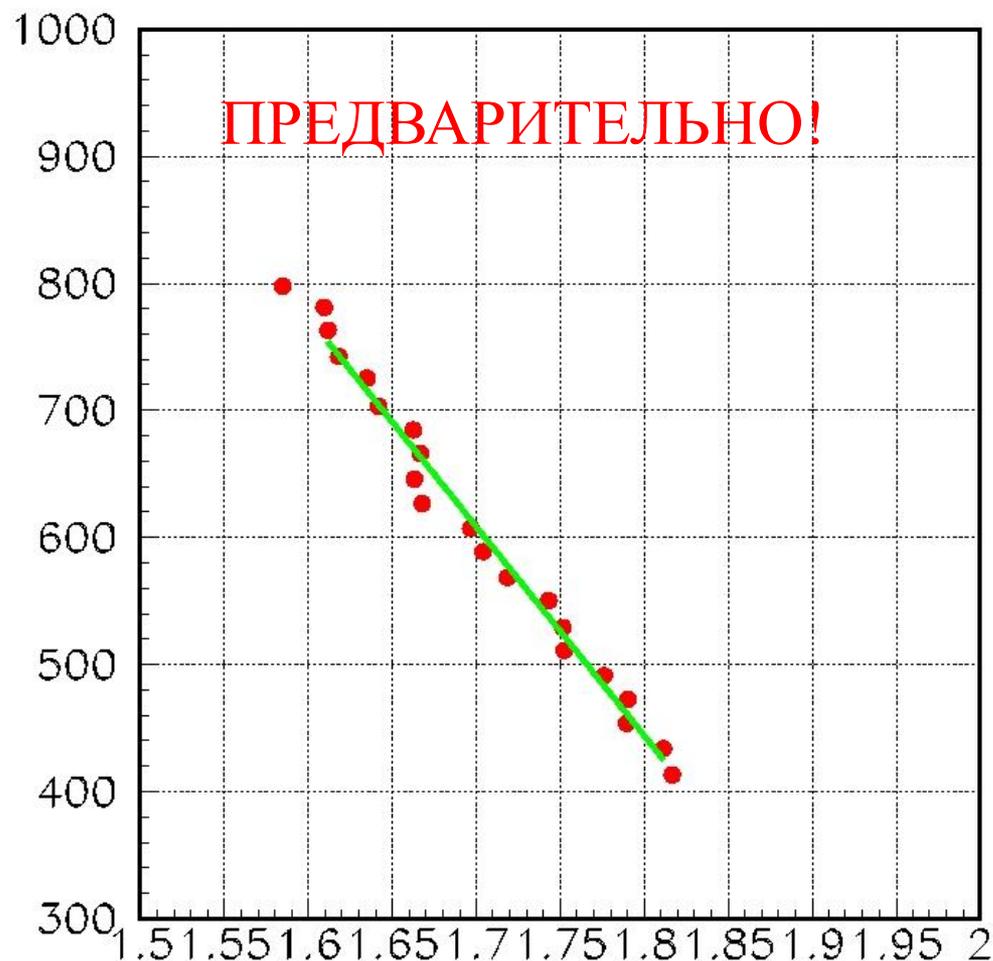
for

$$E_0 = 3 \cdot 10^{16} \text{ ЭВ}$$

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

Используется для
получения X_{\max}

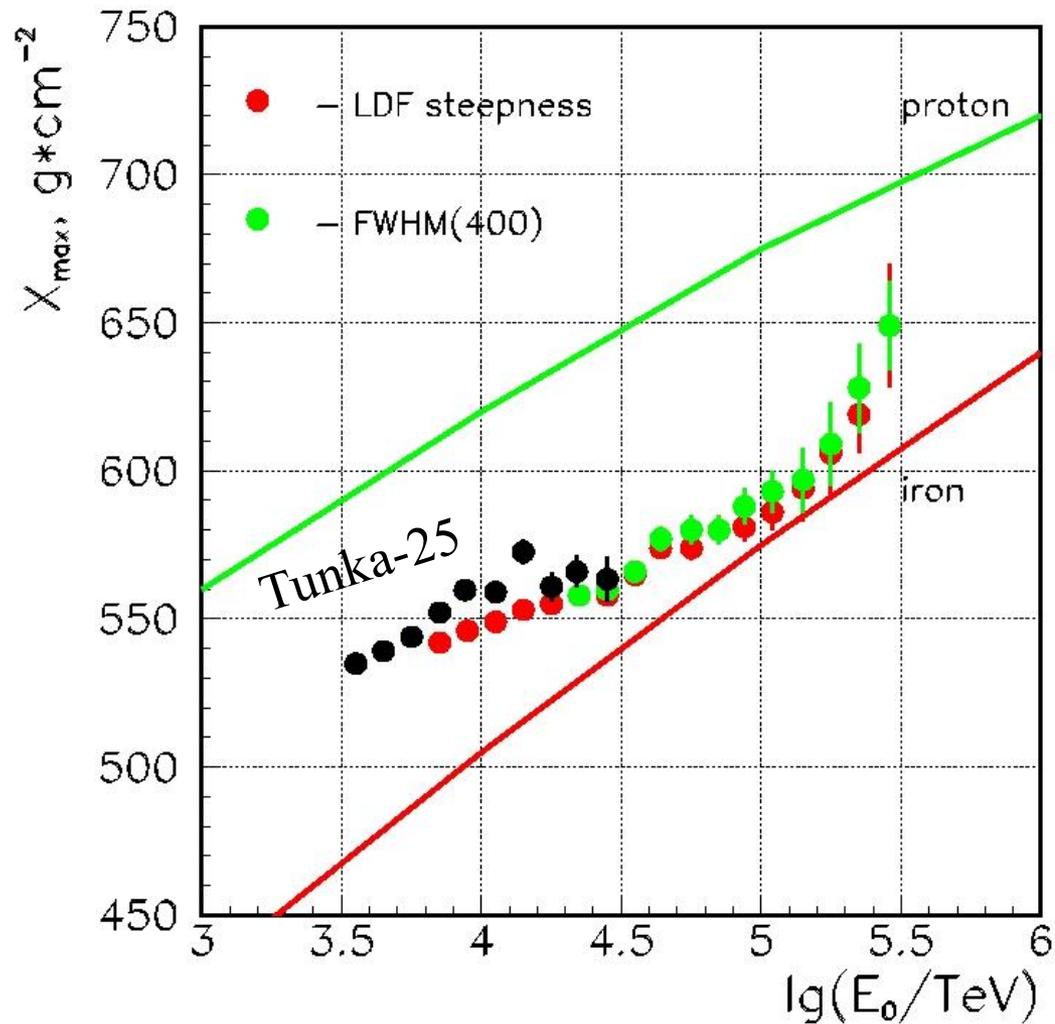
$$\Delta X_{\max} = X_0 \cdot \sec\theta - X_{\max}$$



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

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

Средняя глубина максимума ШАЛ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО!

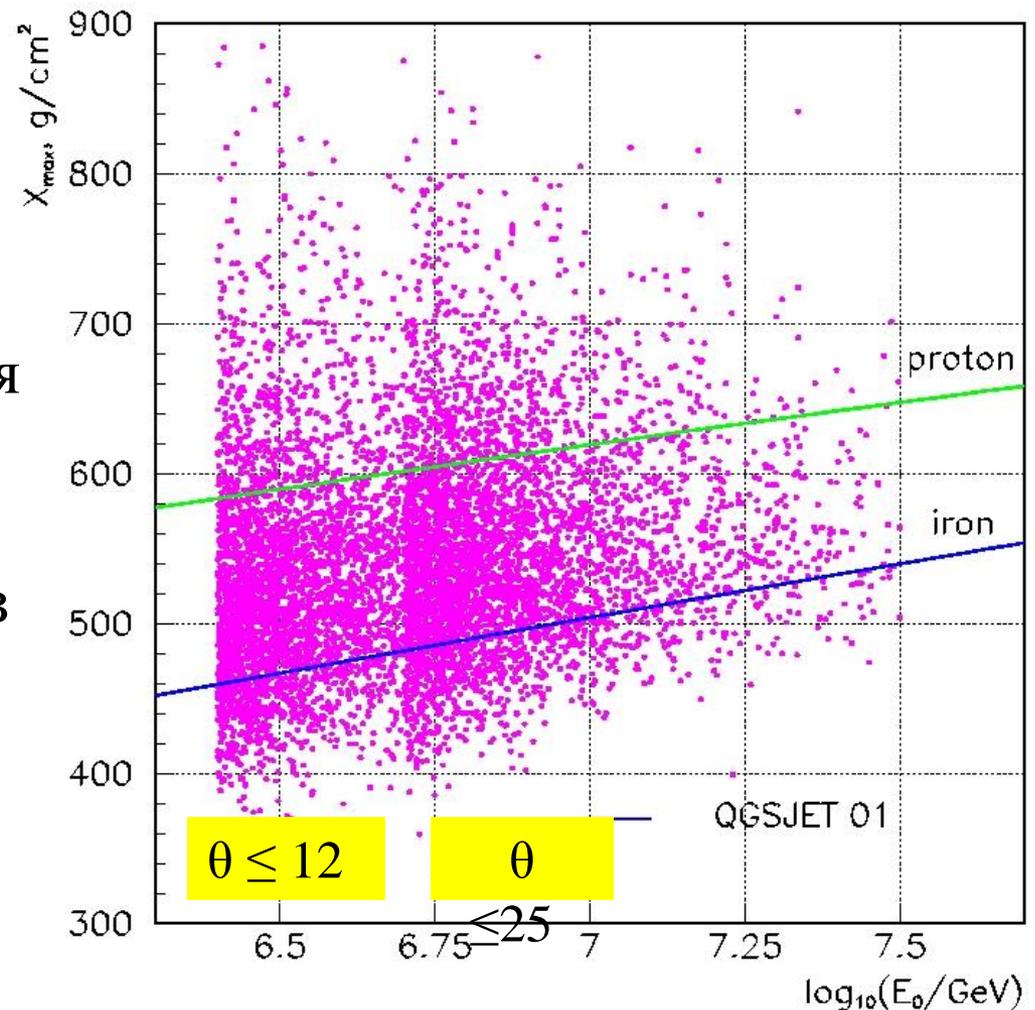


Дальнейший анализ информации

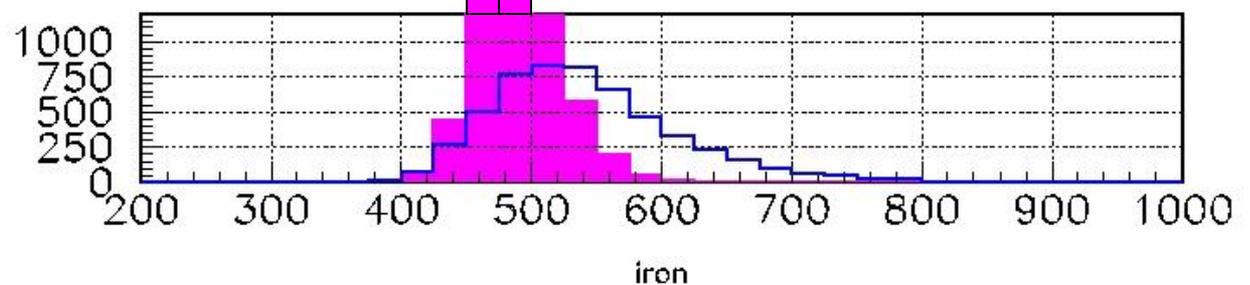
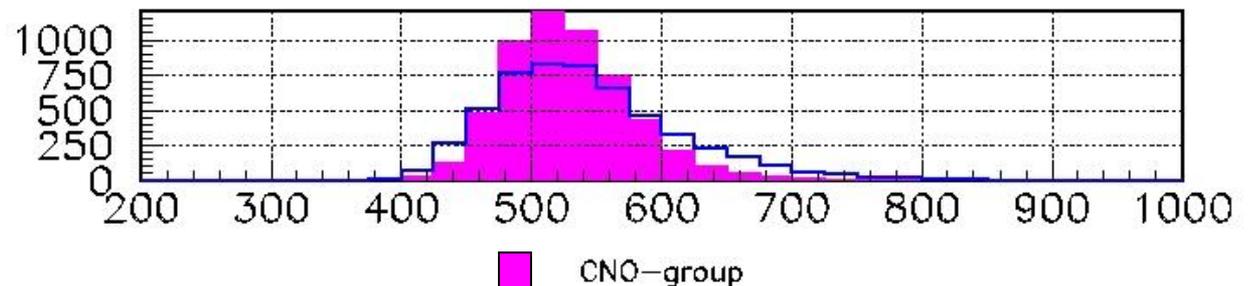
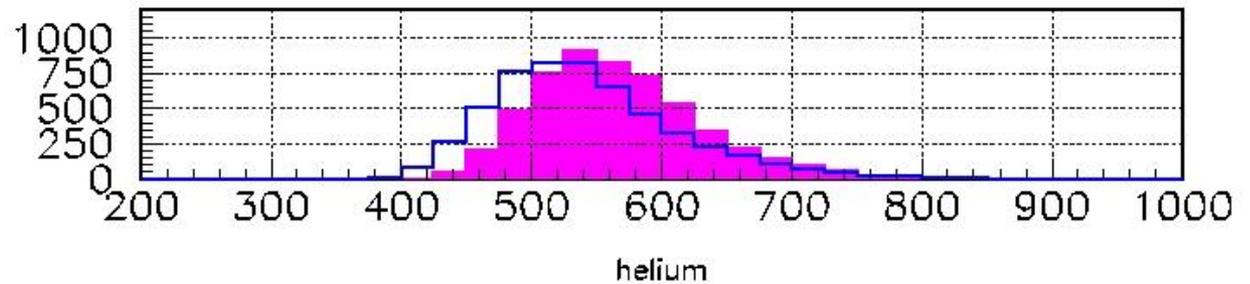
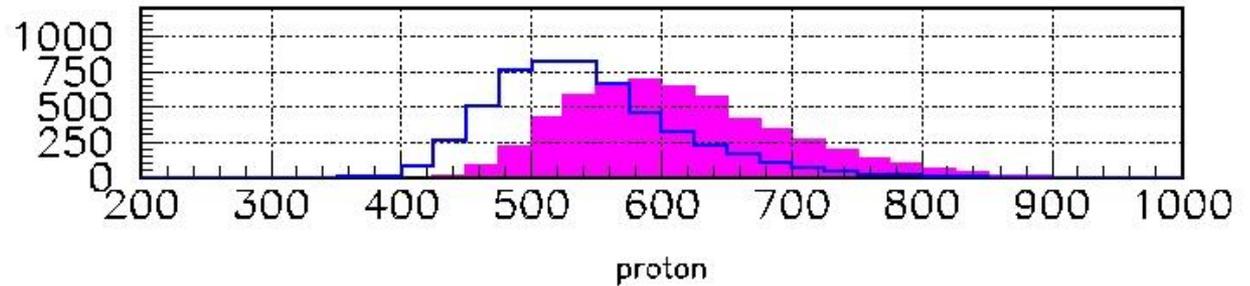
1. Построение распределений по X_{\max} в узких бинах по $\lg E_0$
2. Моделирование распределений по X_{\max} для групп ядер от протонов до железа
3. Сравнение экспериментальных распределений с комбинированными расчетными и определение наиболее вероятного состава в каждом бине
4. Нахождение $\langle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

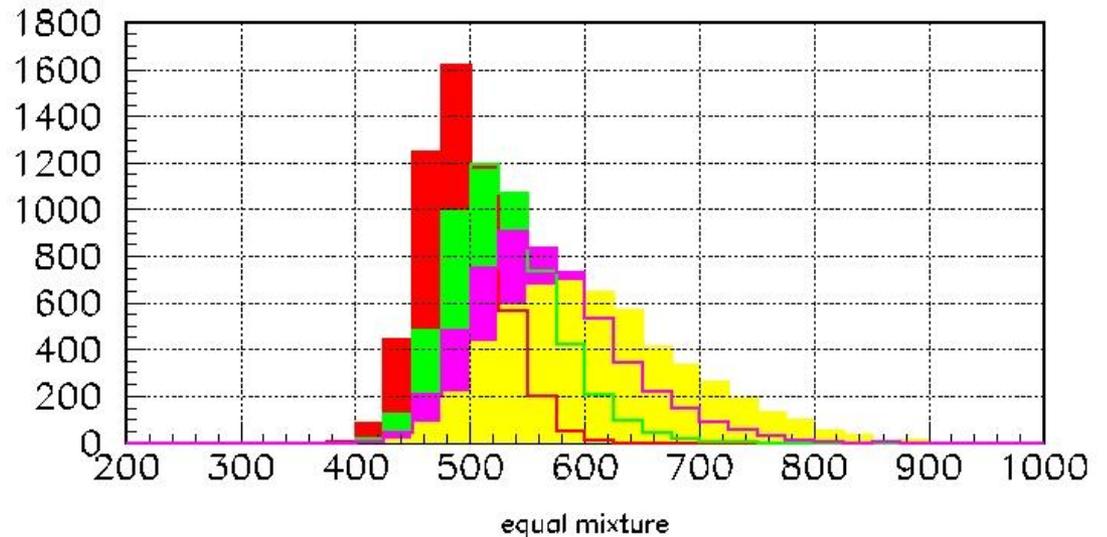


Simulated X_{\max} distributions for 4 different nuclei groups taking into account all apparatus uncertainties. Model QGSJET-01.

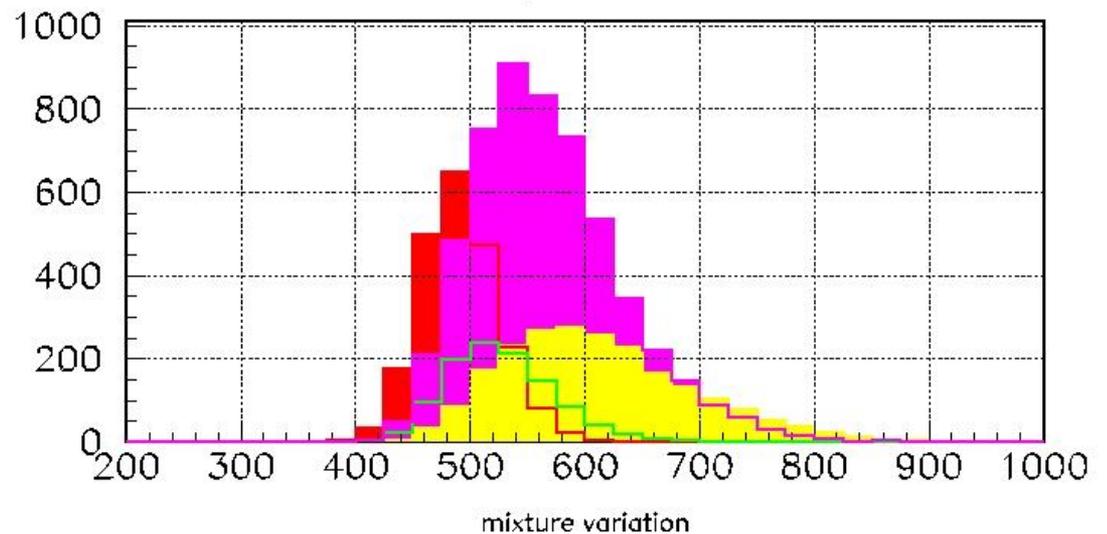


Mass composition fit.

4 groups with equal weights:



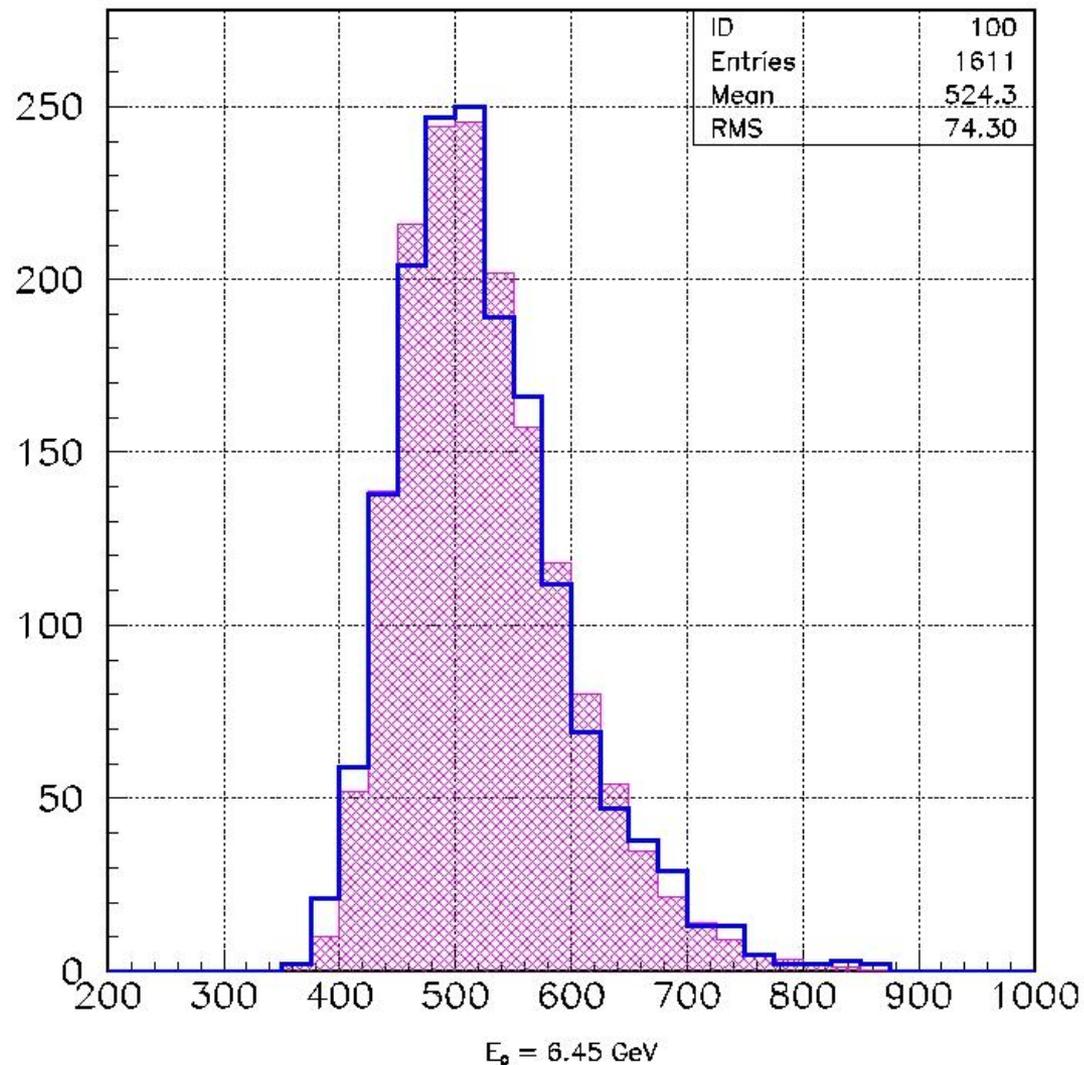
Weights fit for the best agreement with the experimental distribution:



Тунка-25: распределение по X_{\max}

line – experiment

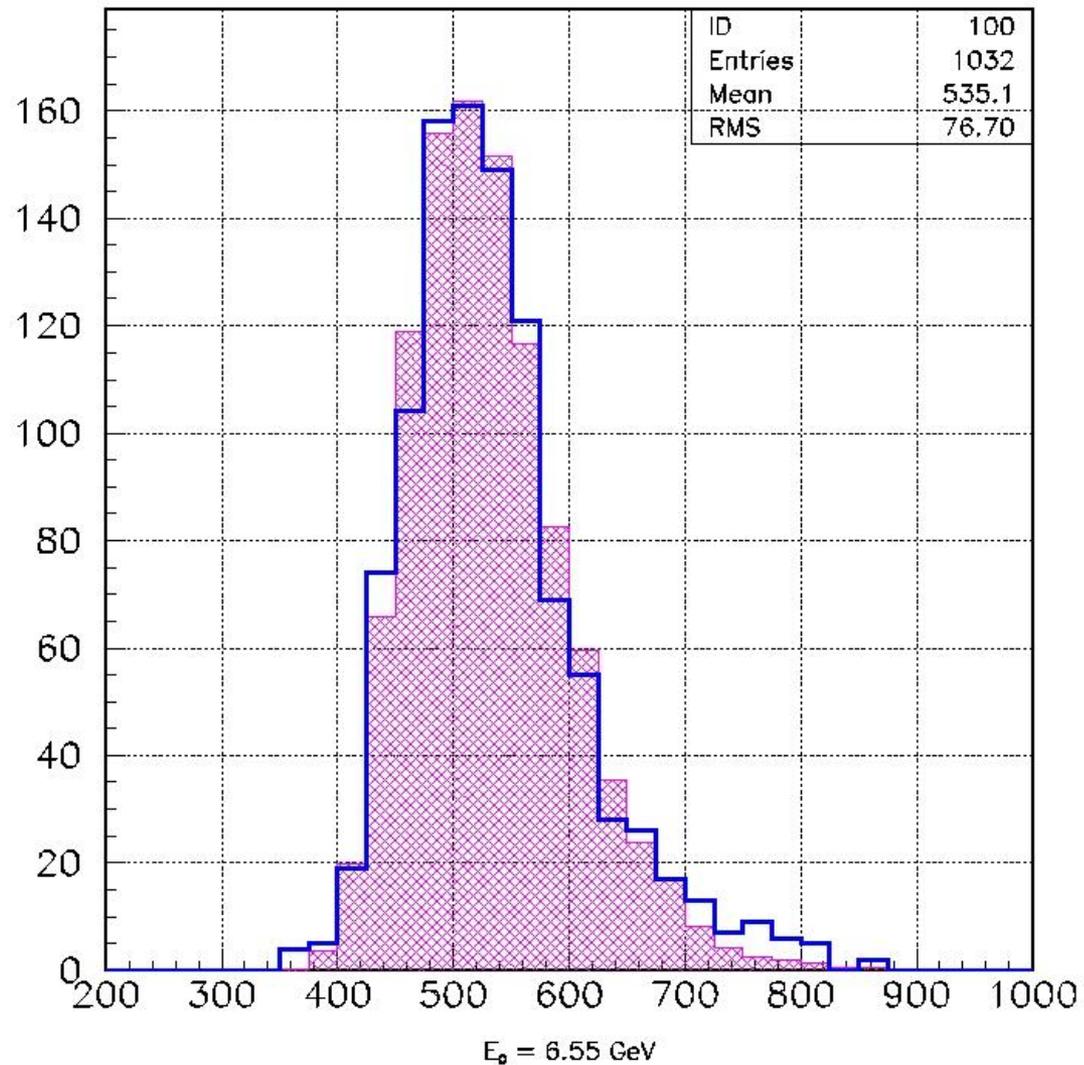
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

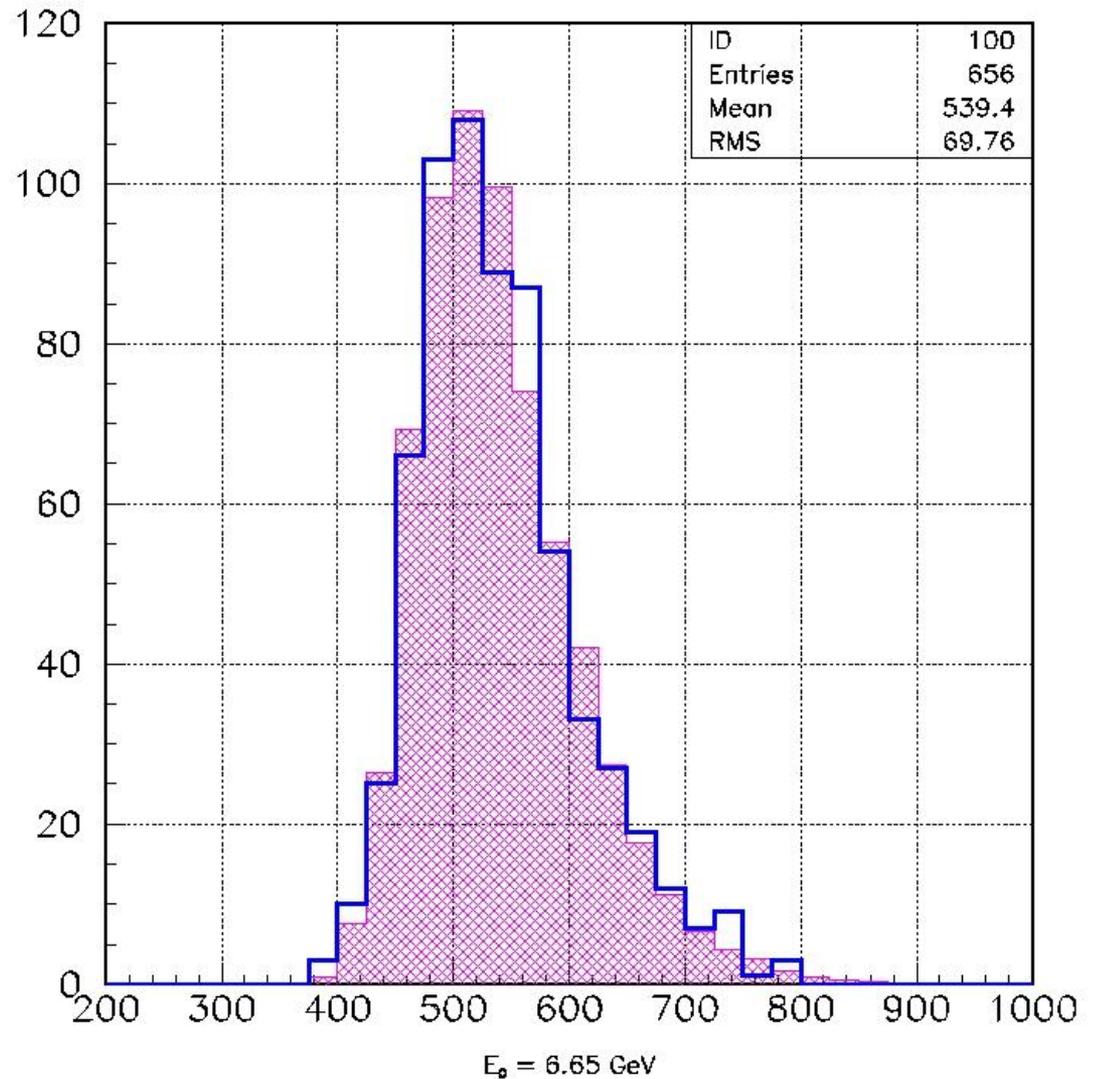
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

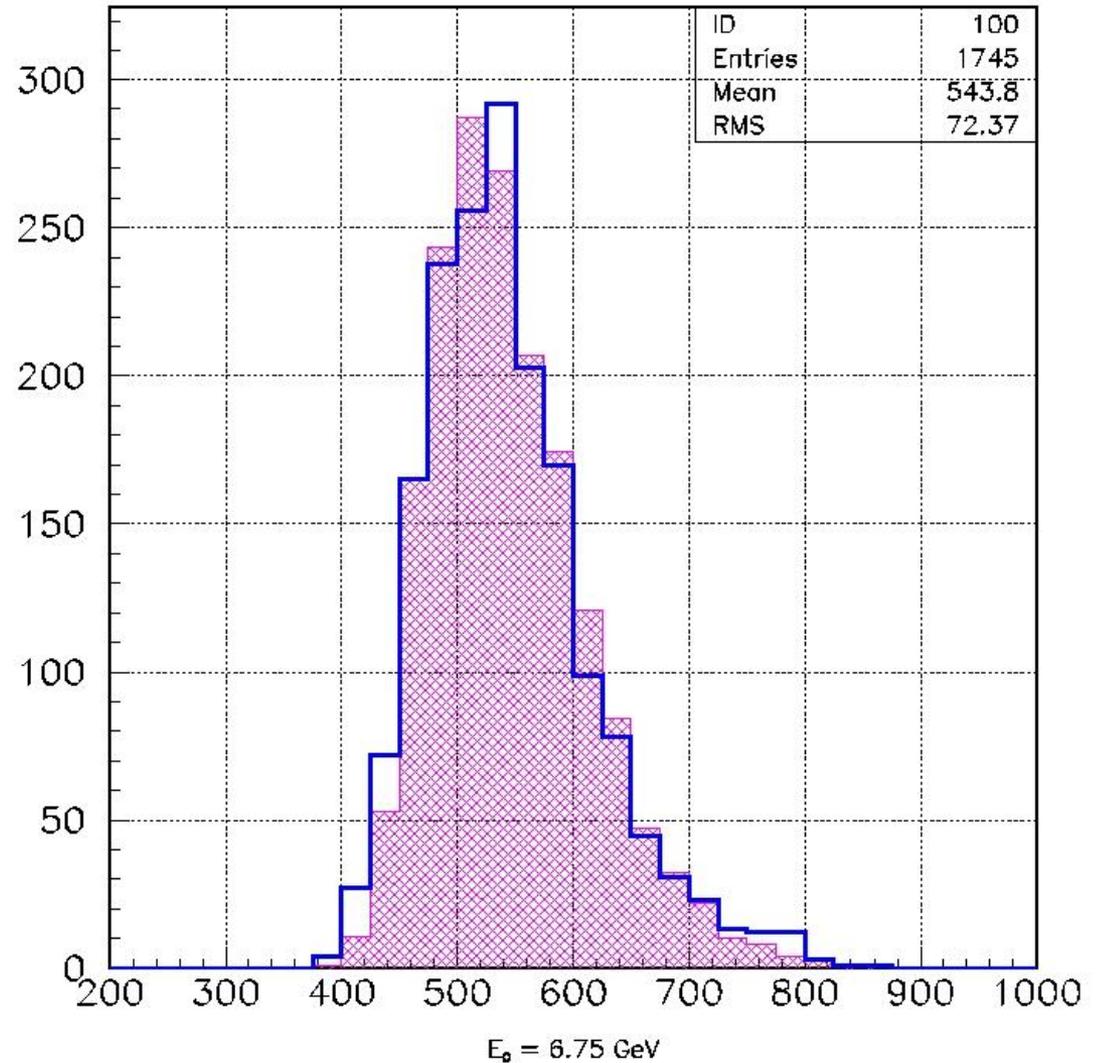
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

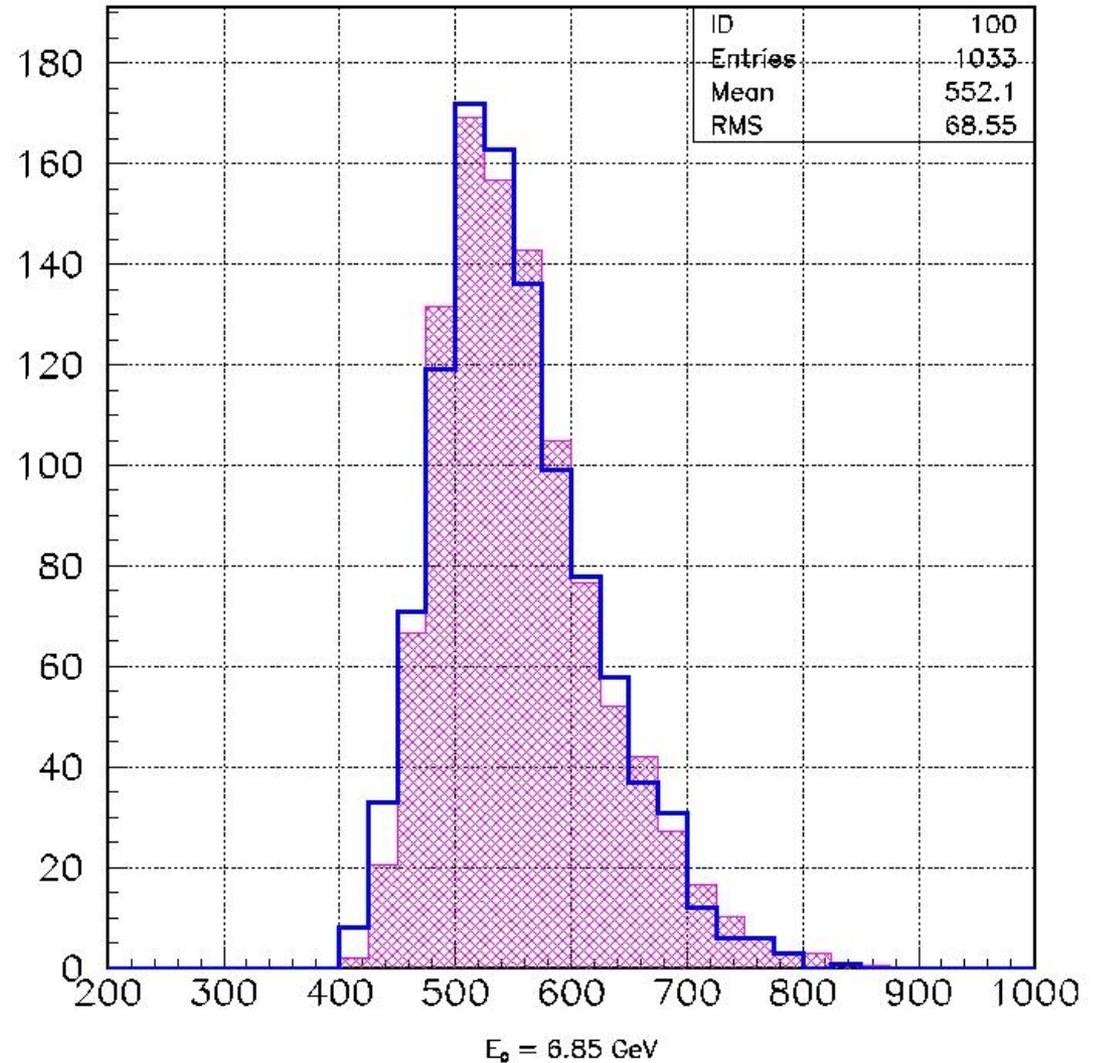
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

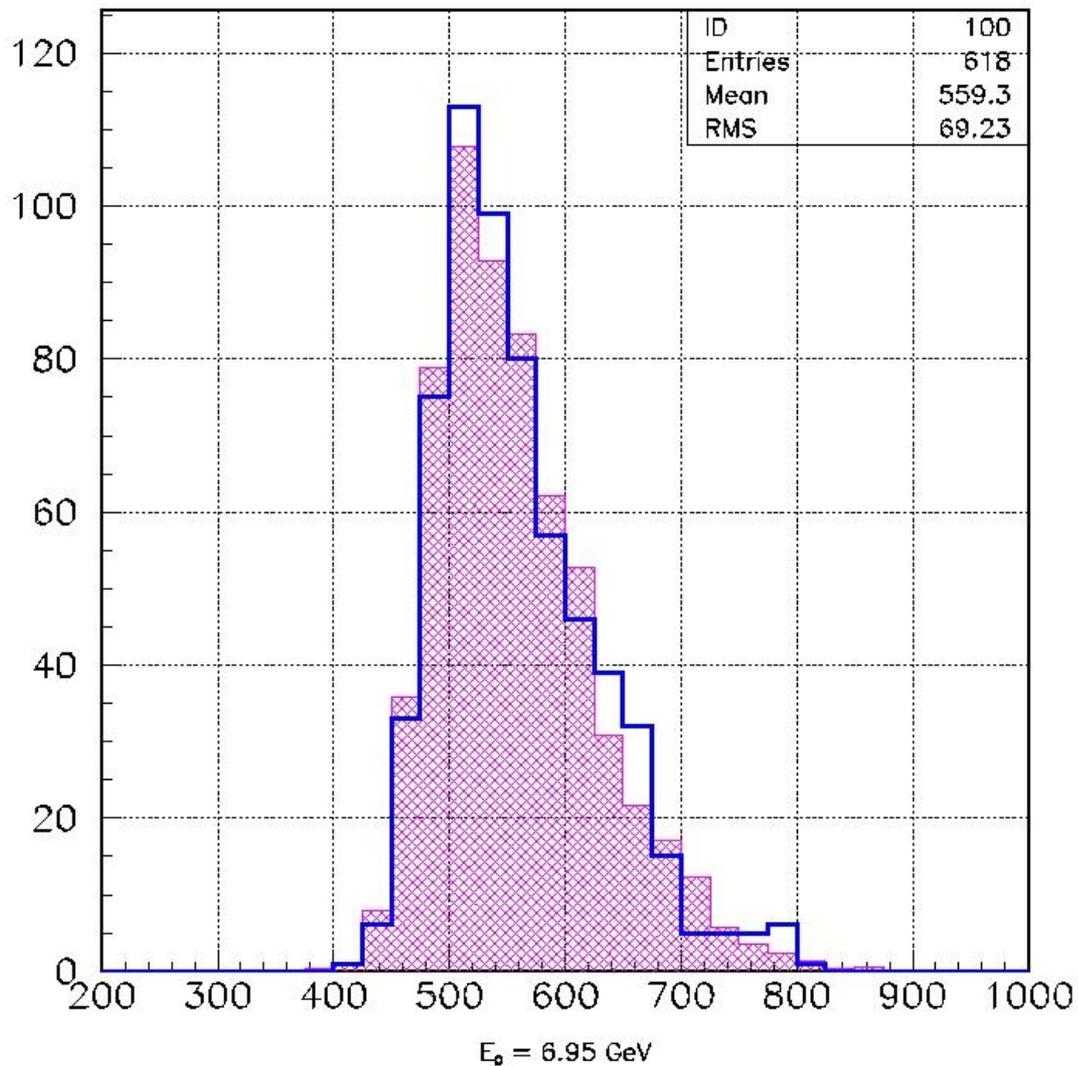
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

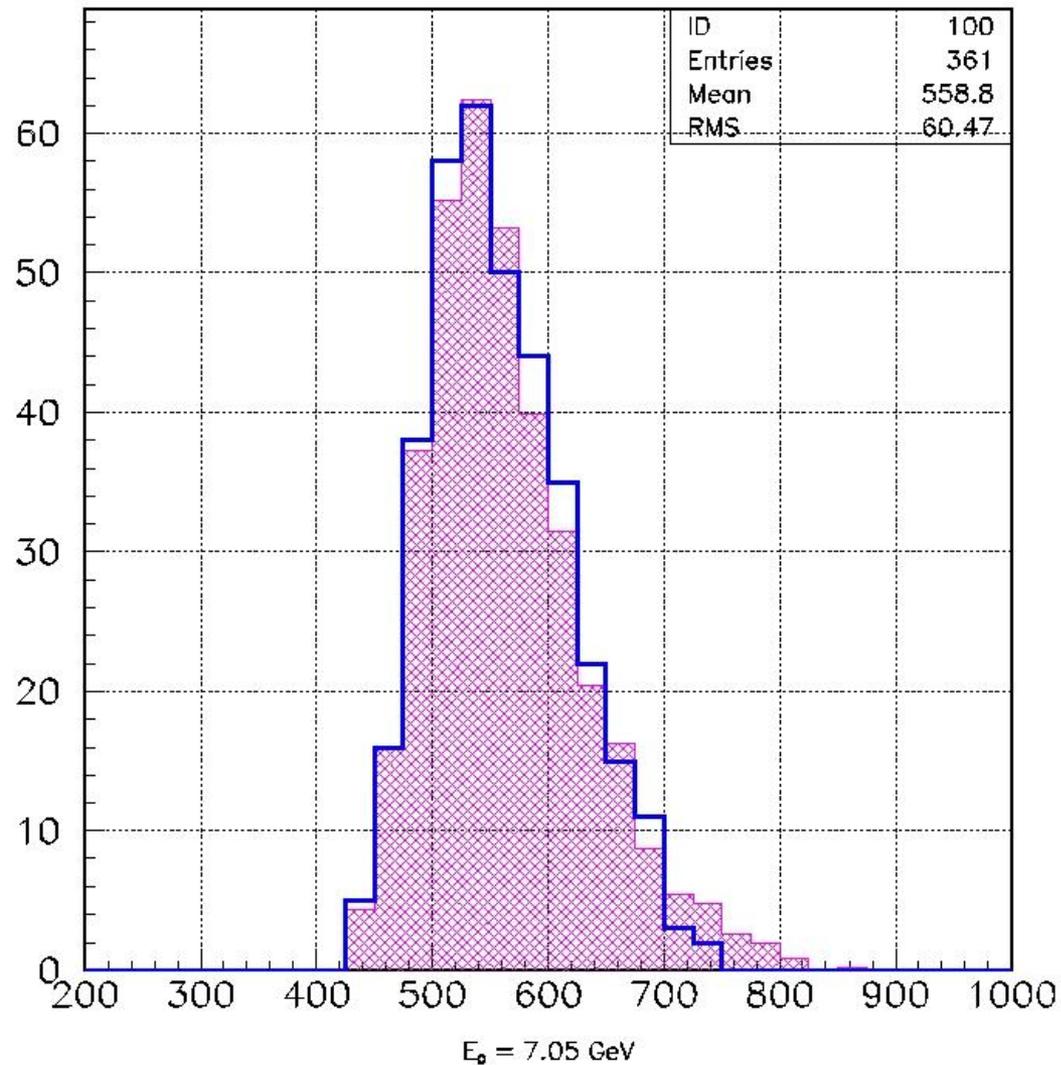
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

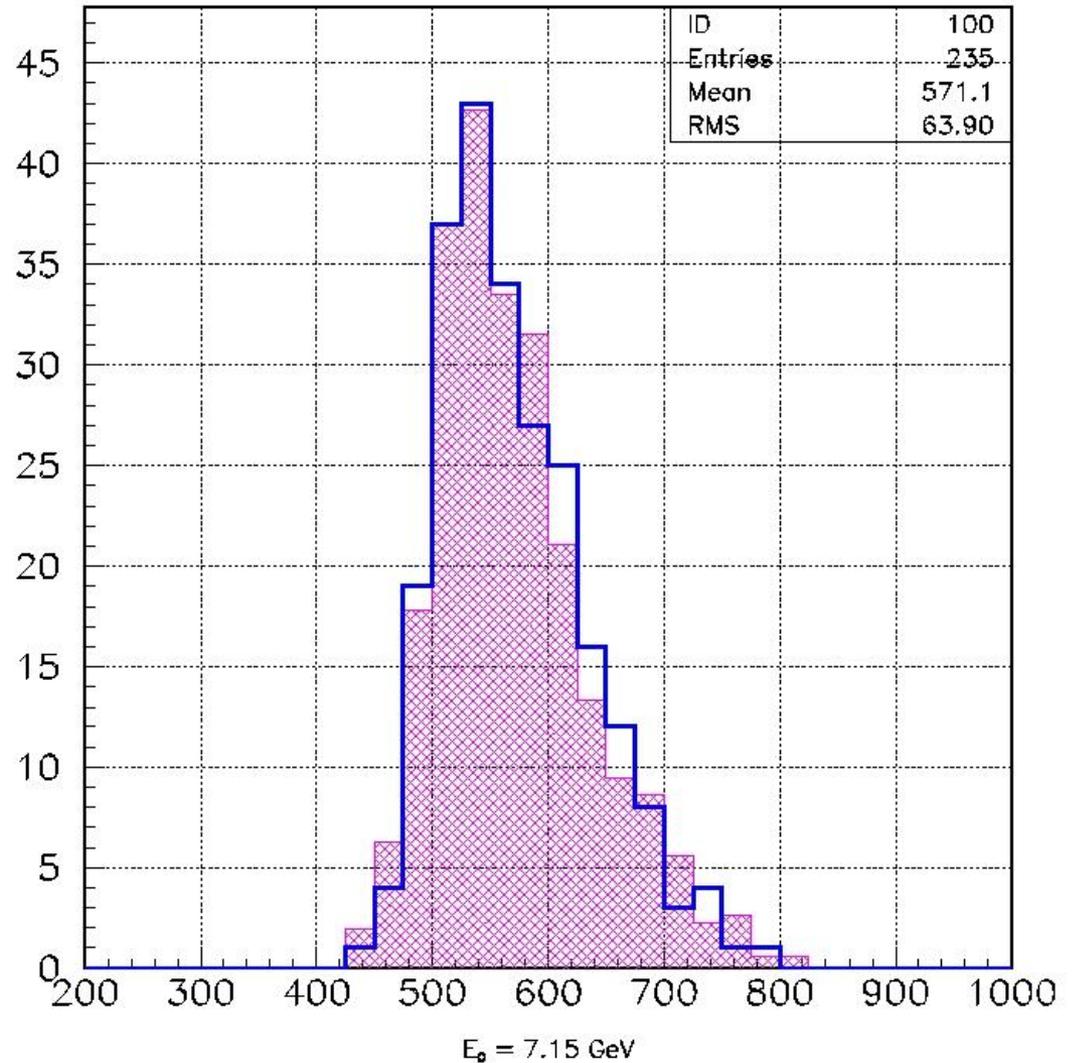
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

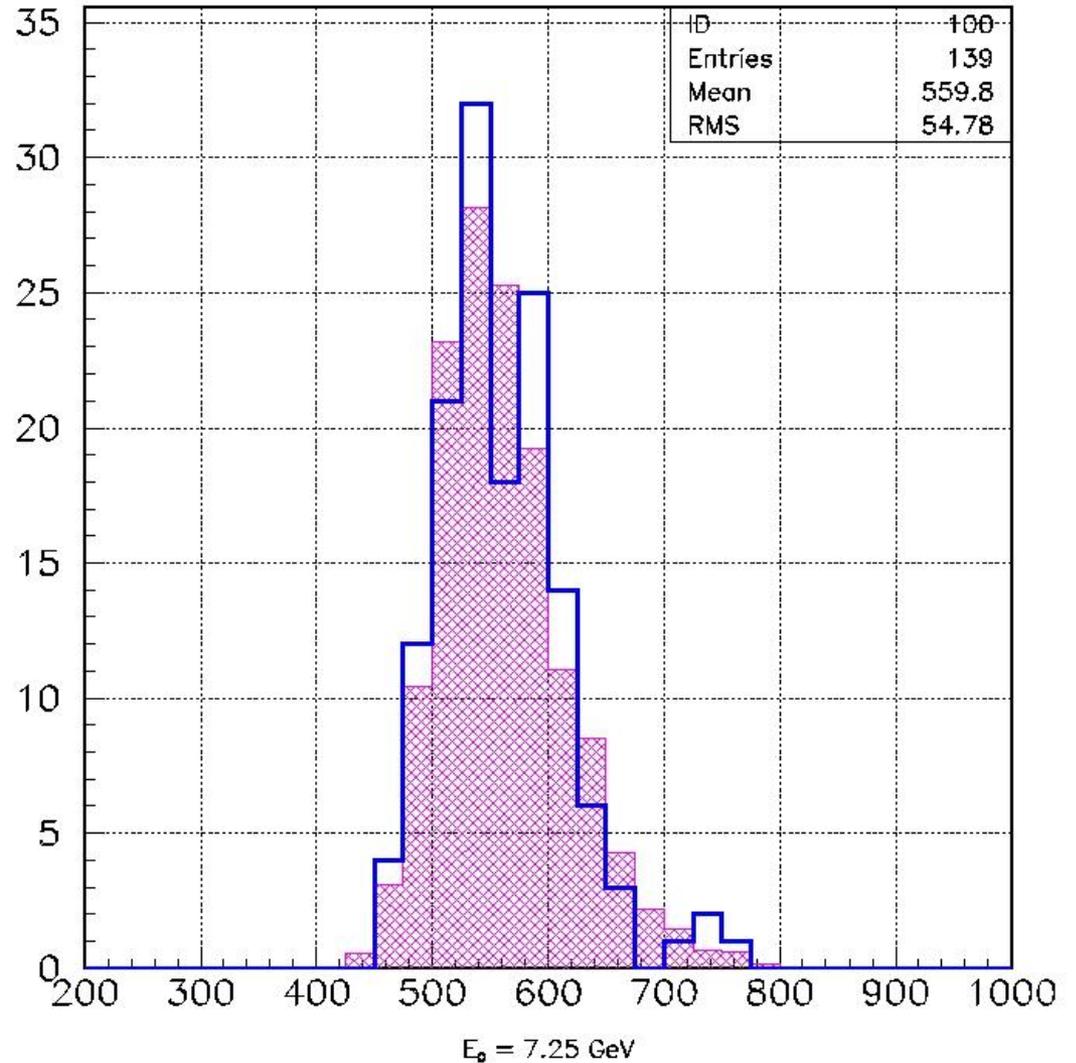
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

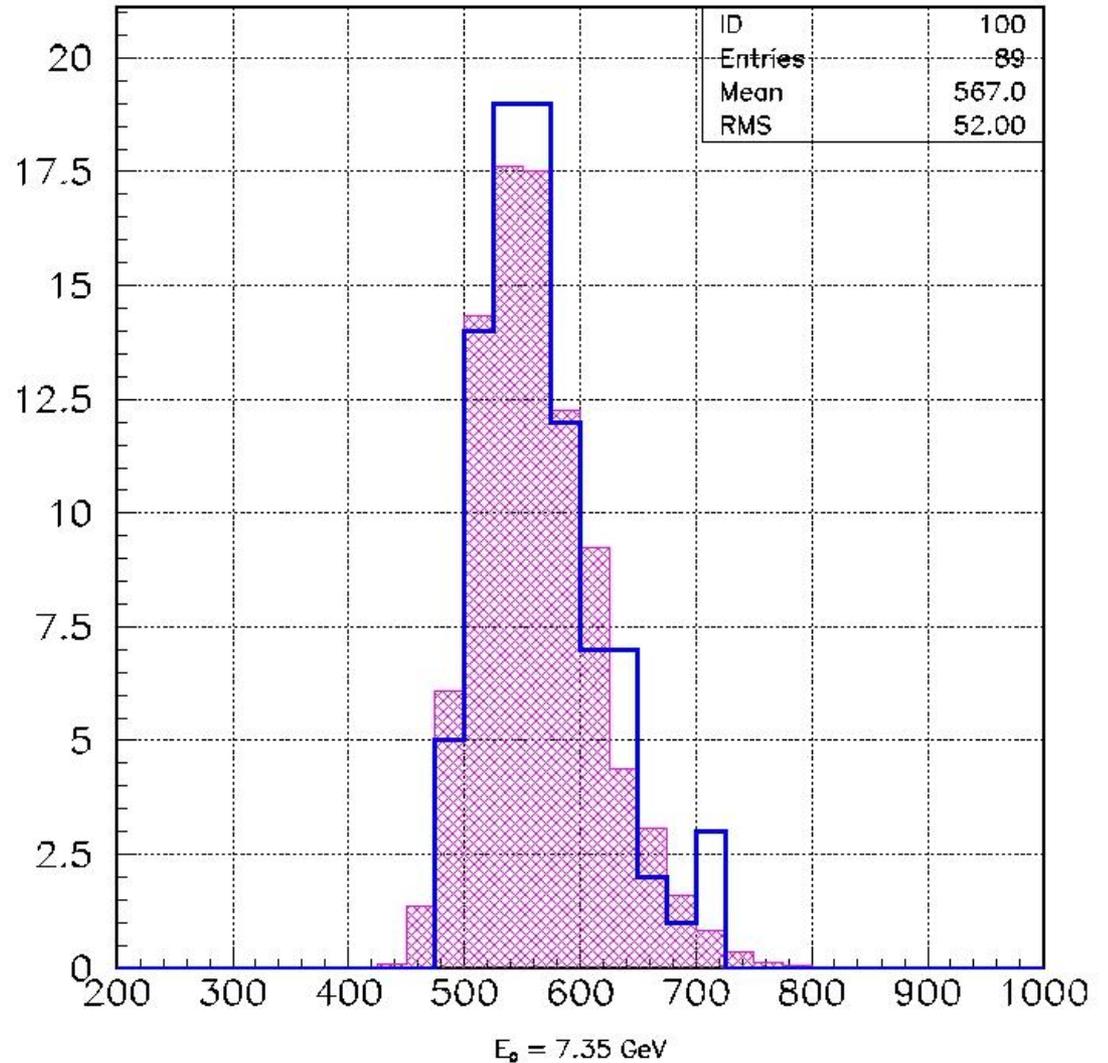
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

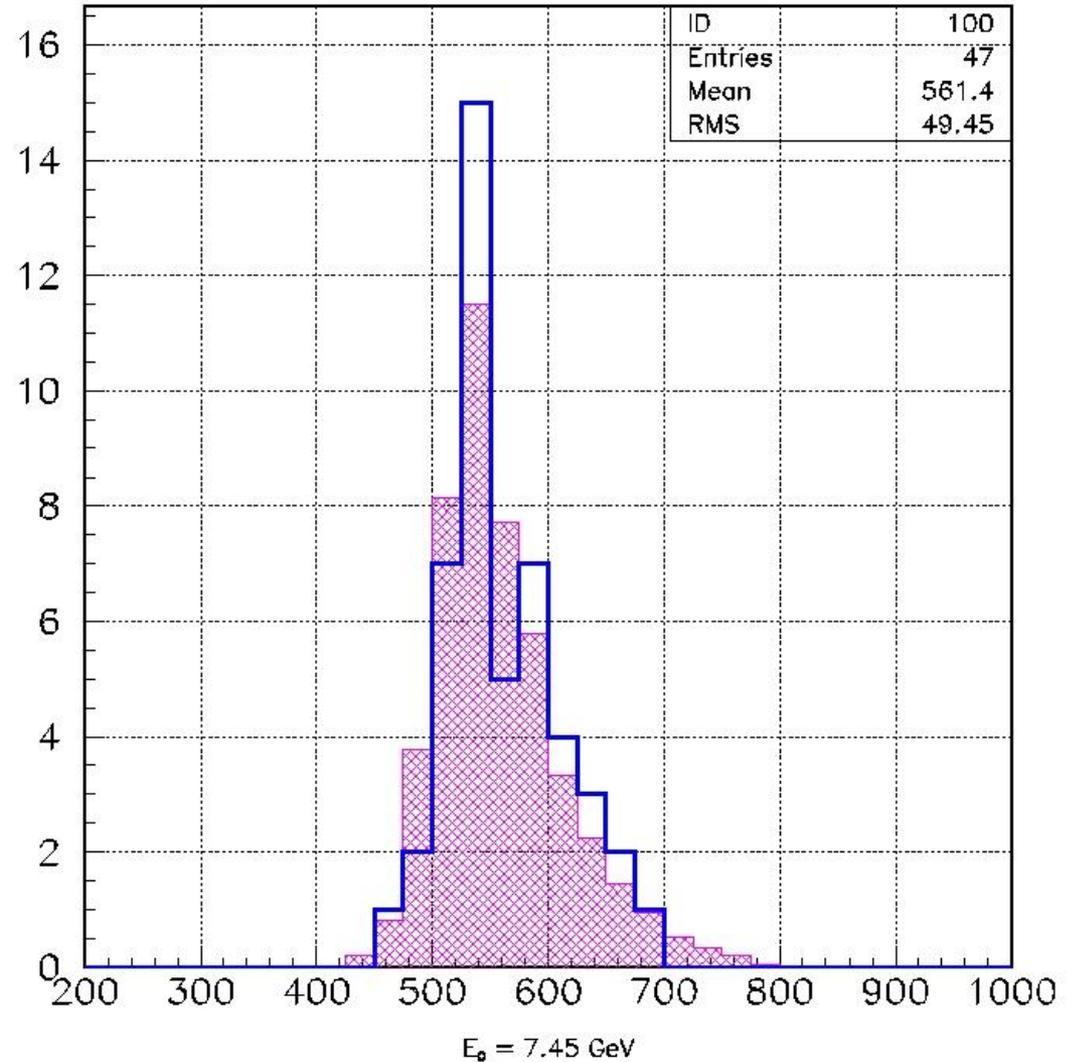
filled area – simulation



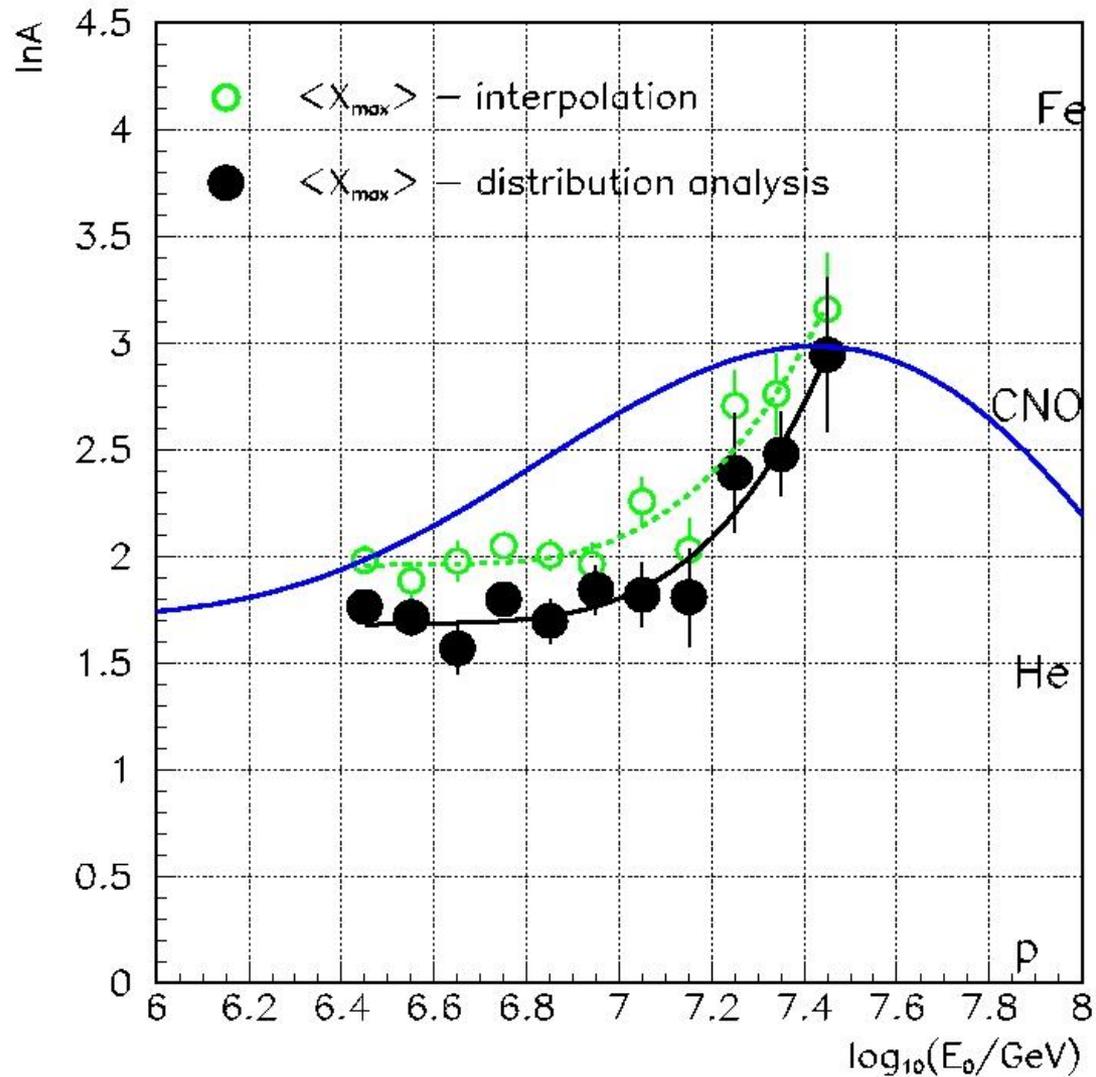
X_{\max} distribution

line – experiment

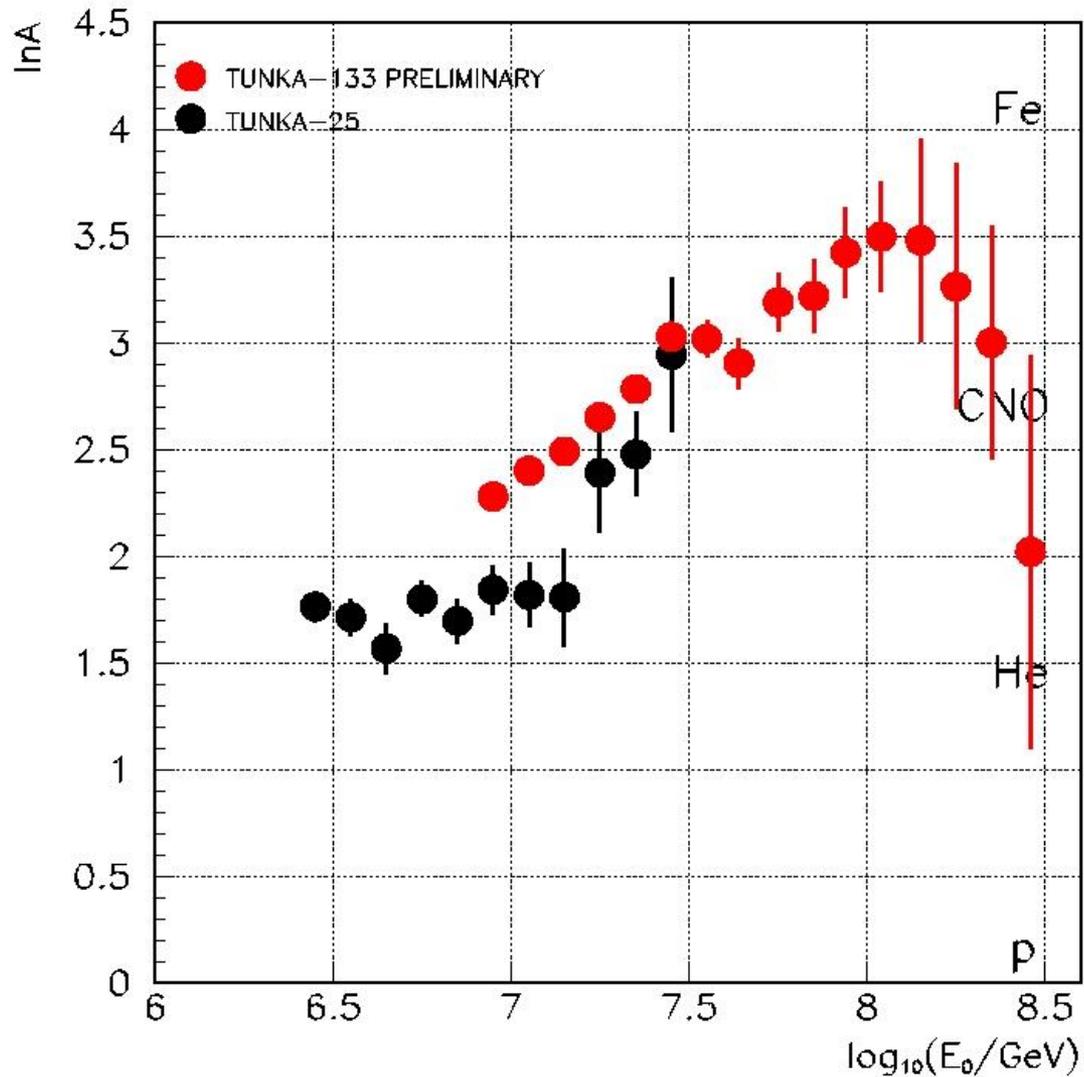
filled area – simulation



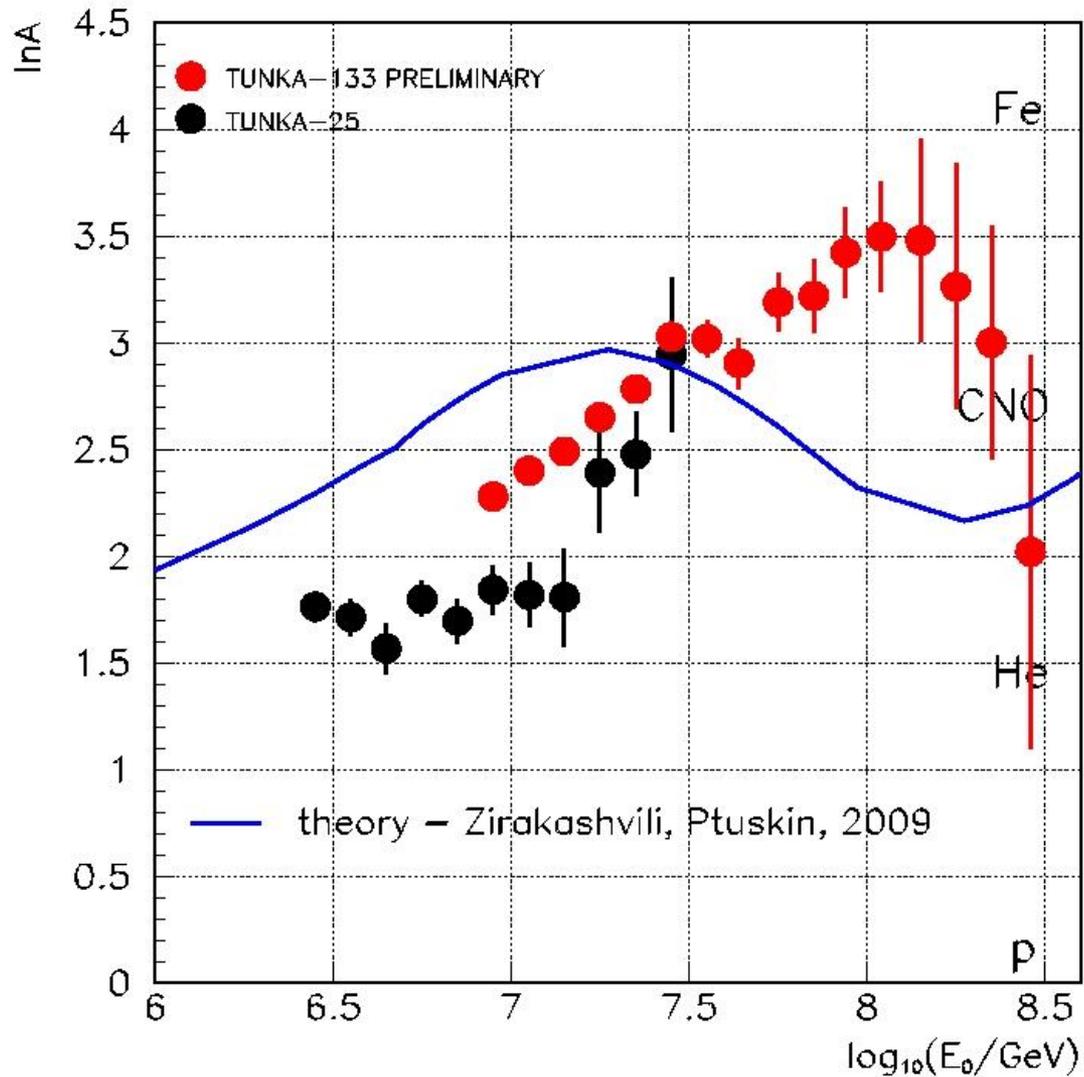
Средний $\ln A$



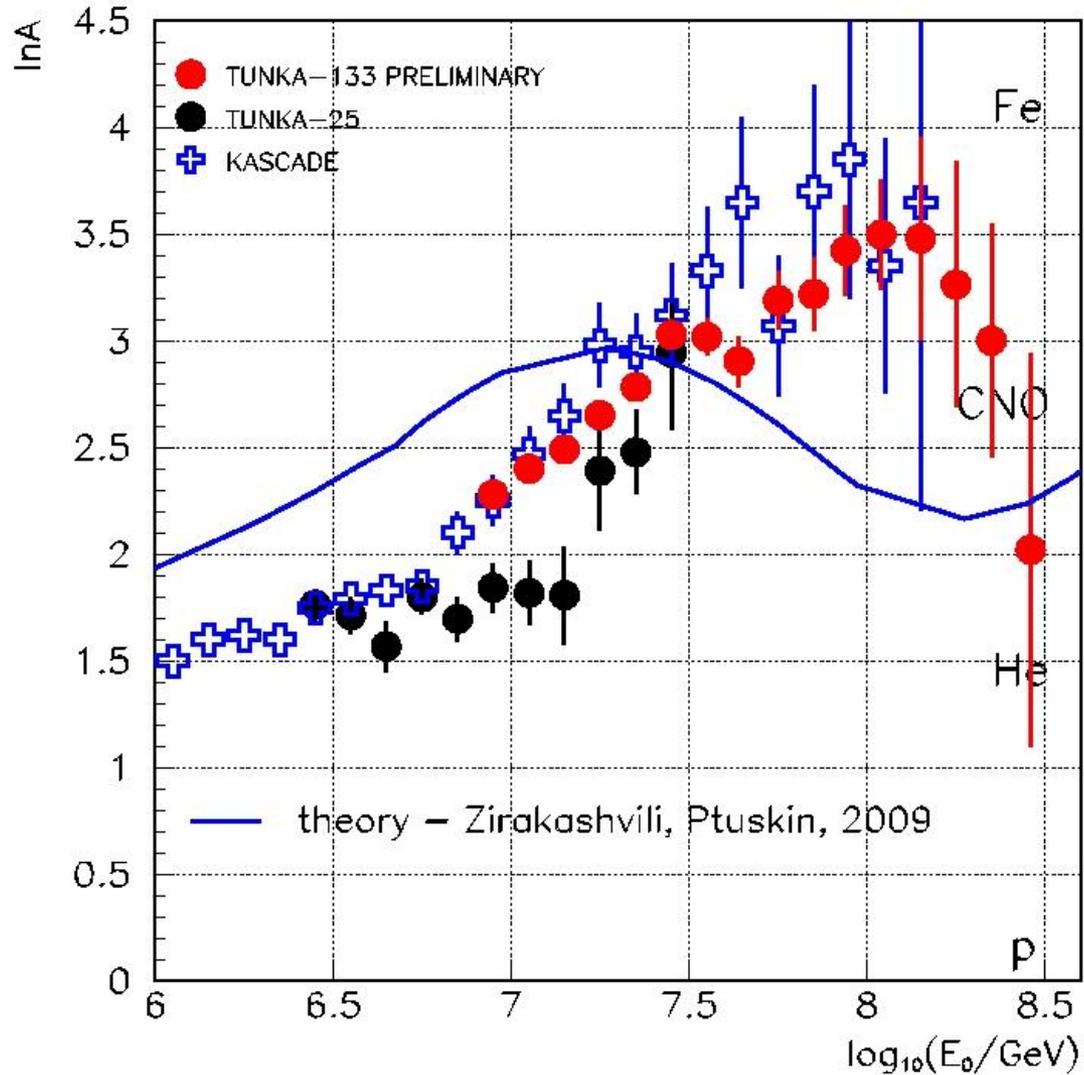
Средний массовый состав Тунка-133



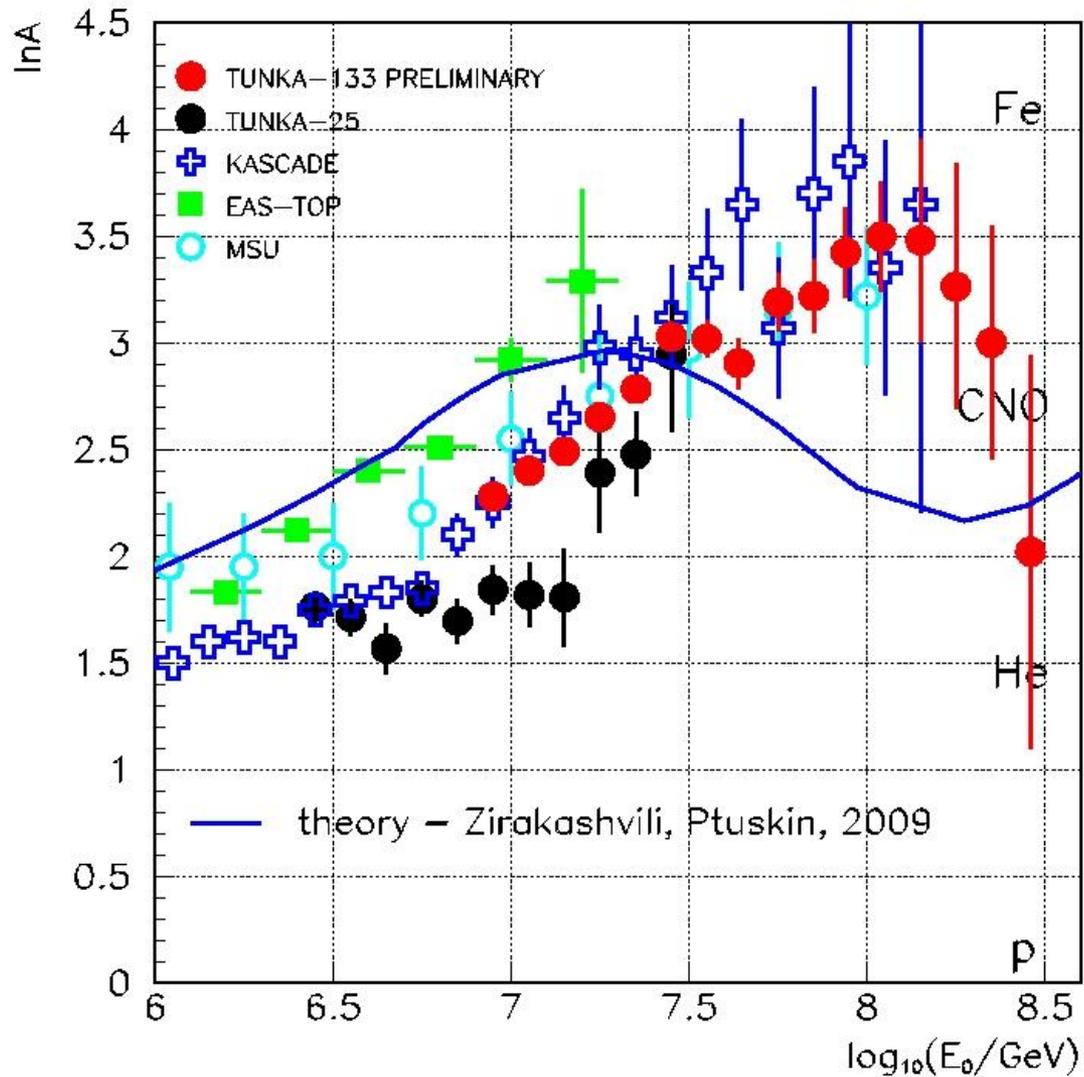
Средний массовый состав Тунка-133



Средний массовый состав Тунка-133



Средний массовый состав Тунка-133



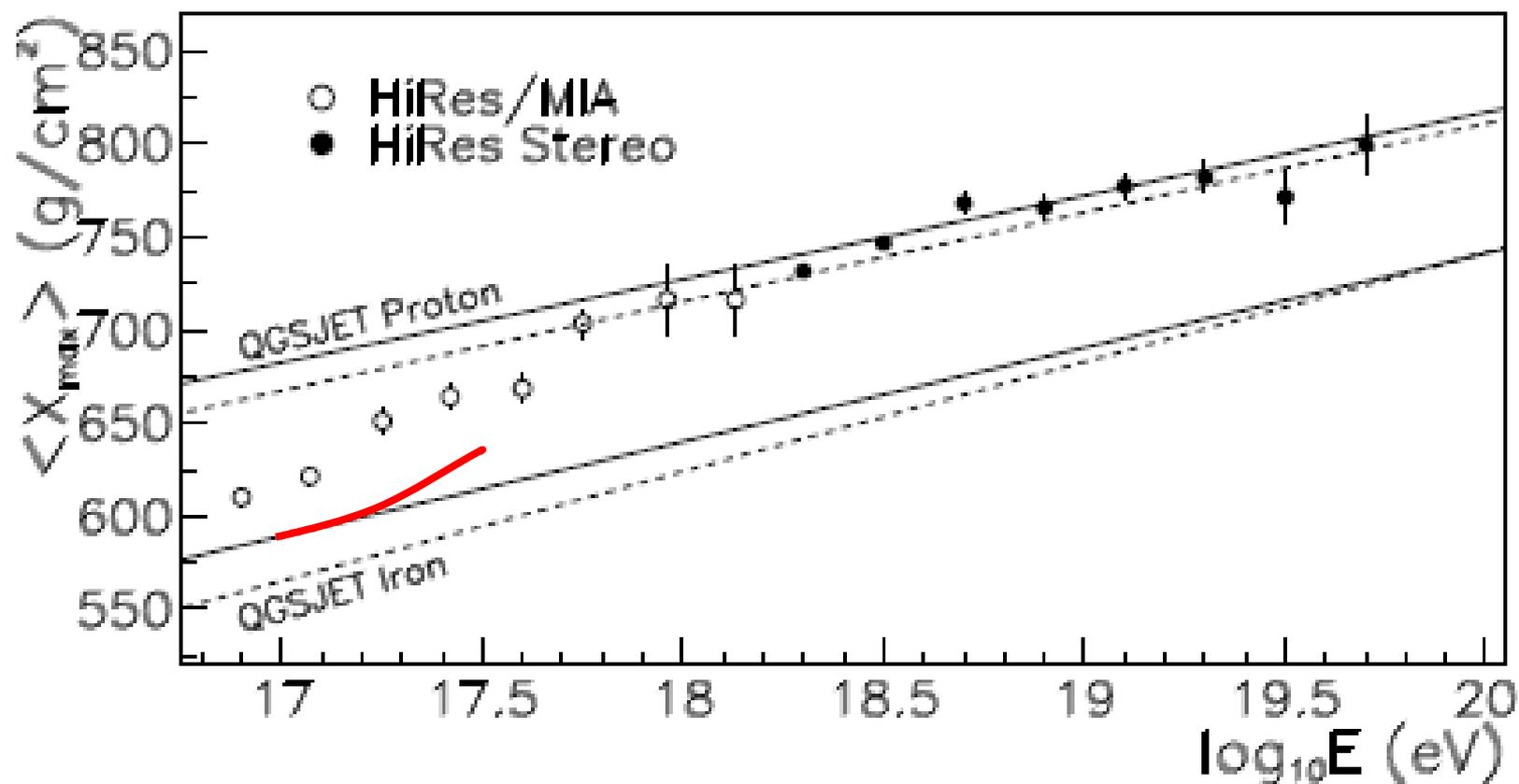
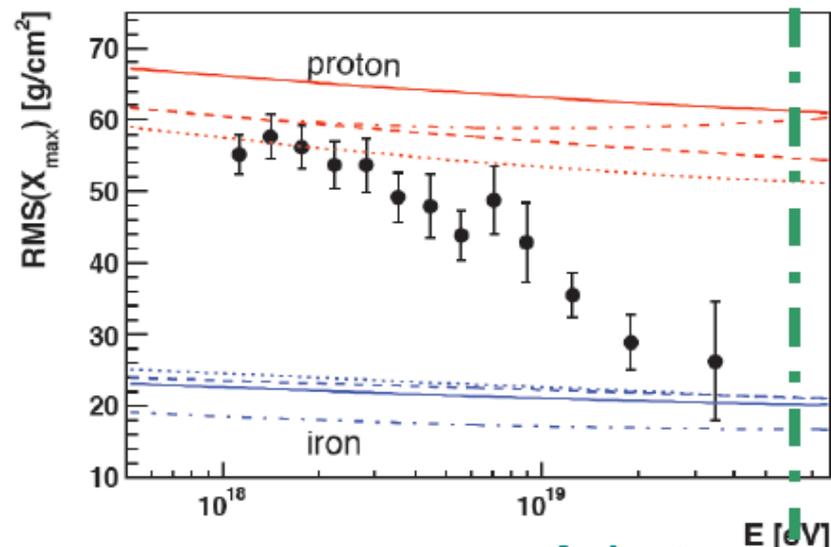
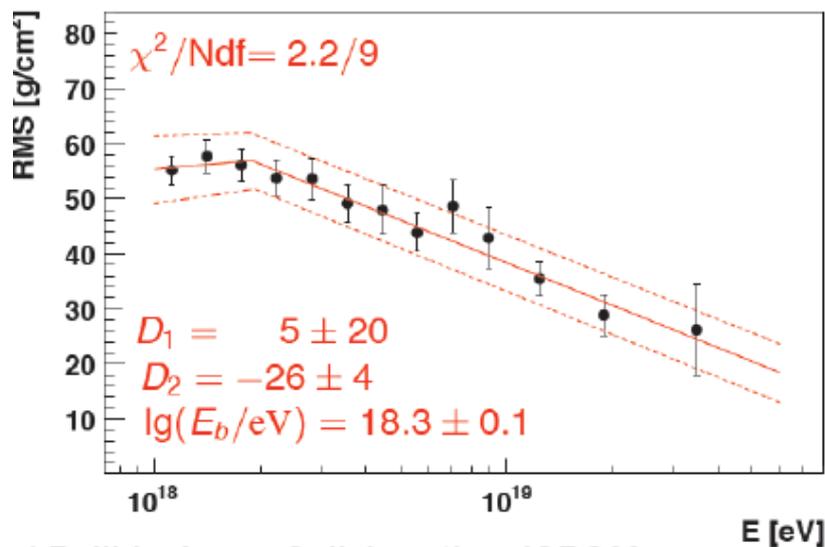
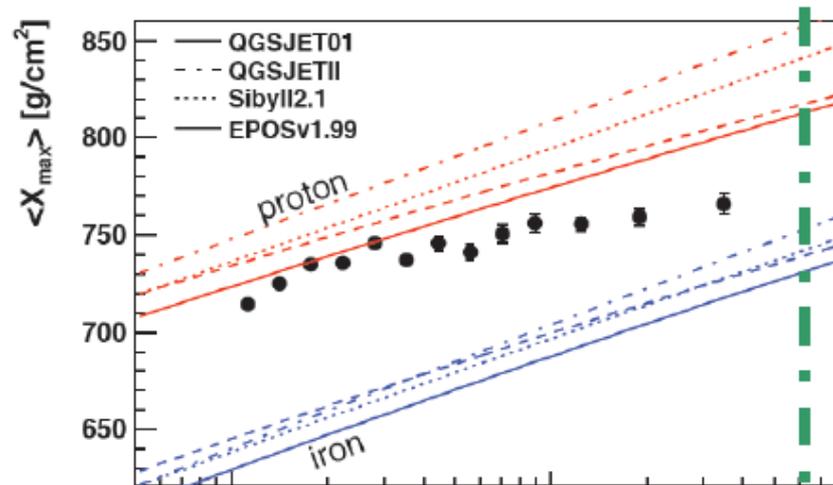
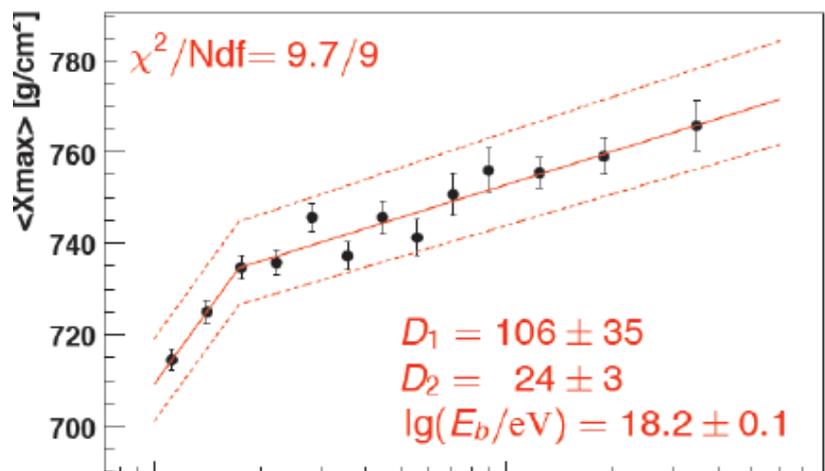


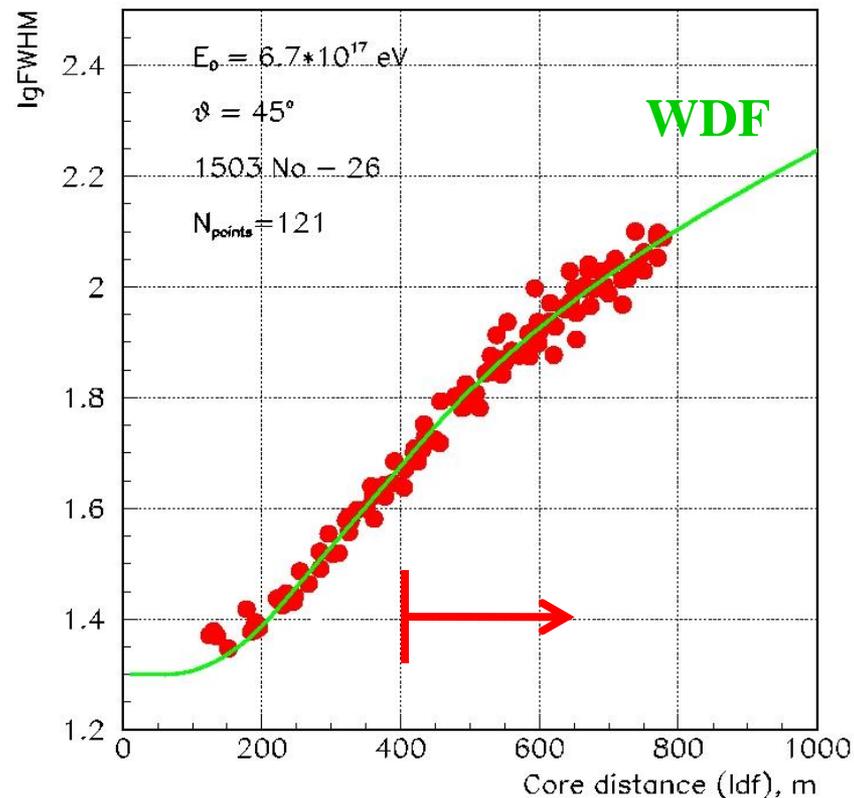
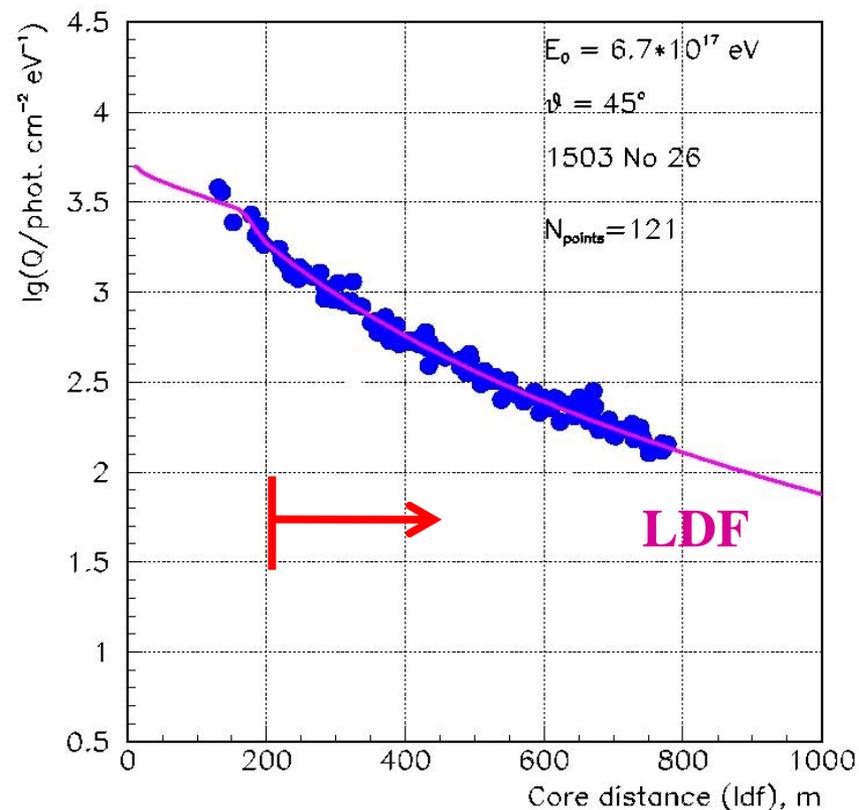
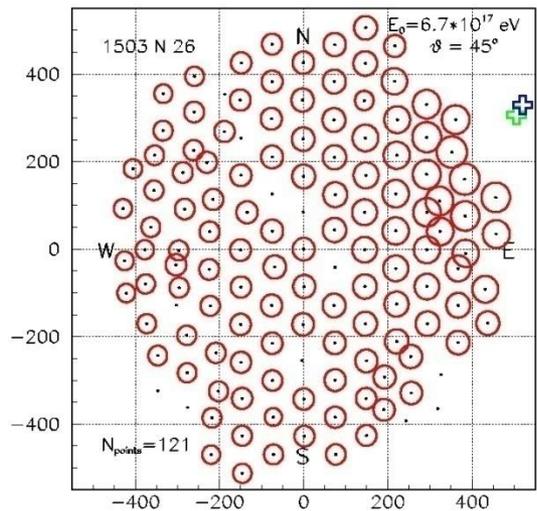
FIG. 1: Comparison of current HiRes stereo $\langle X_{\text{max}} \rangle$ results with results from the HiRes-prototype/MIA hybrid [21]. Also included are QGSJET01 (dashed) and QGSJET-II (solid) predictions for pure-proton and pure iron compositions.

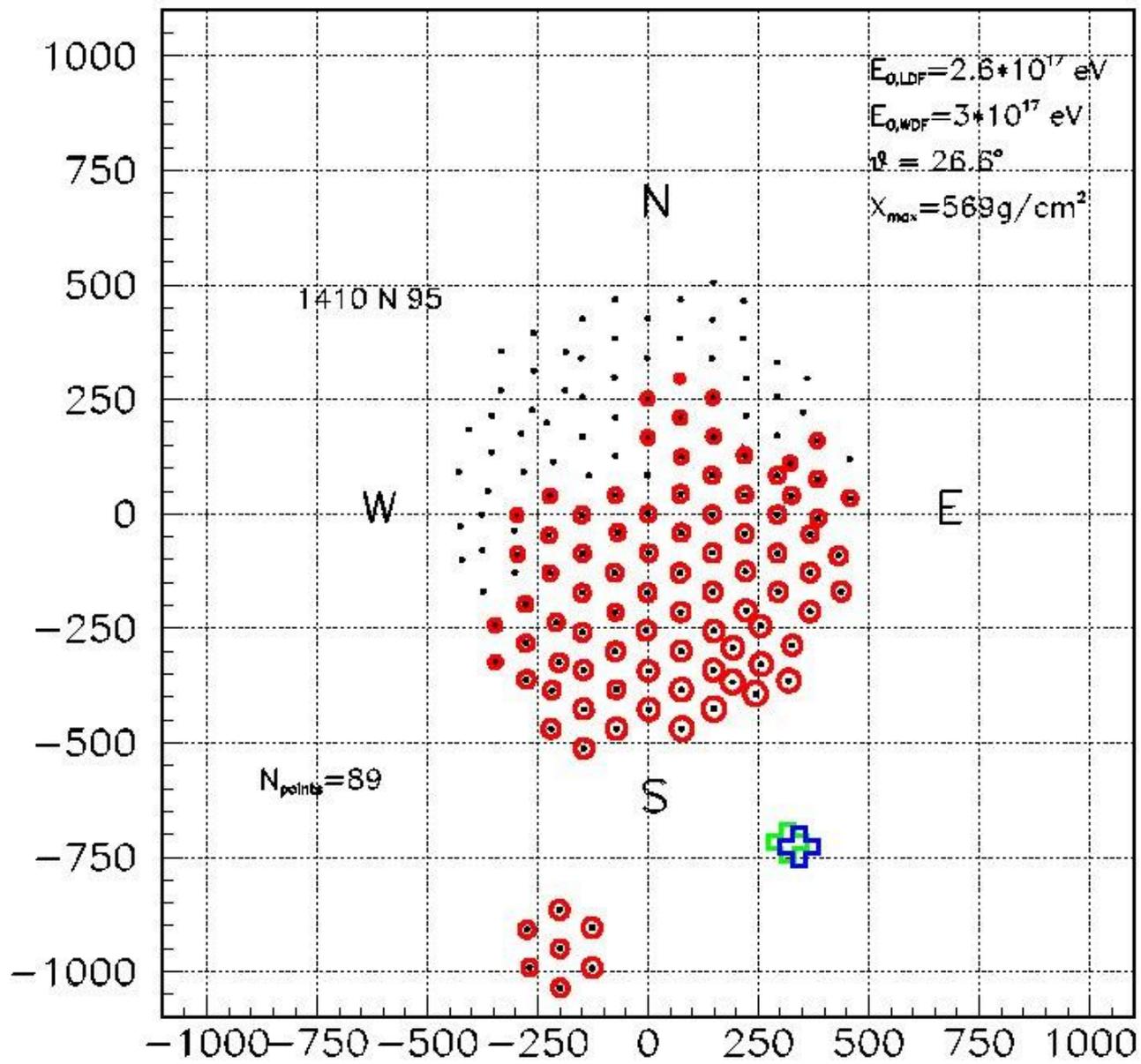
Auger

Composition: mean depth and rms of shower maximum



the array border. 5.03.2010





Спасибо за внимание!