

ИЗУЧЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА В ТУНКИНСКОЙ ДОЛИНЕ

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

Коллаборация Тунка



- Н.М.Буднев², Р.Вишневский⁵, О.А.Гресс², А.В.Заблоцкий¹, А.В.Загородников², Н.Н.Калмыков¹, В.А.Кожин¹, Е.Е.Коростелева¹, Л.А.Кузьмичев¹, Б.К.Лубсандоржиев³, Д.Наварра⁶, Р.Р.Миргазов², М.И.Панасюк¹, Л.В.Паньков², В.В.Просин¹, В.С.Птускин⁴, Ю.А.Семеней², А.А.Силаев¹, А.А.Силаев(мл.)¹, А.В.Скурихин¹, О.А.Чвалаев², Б.А.Шайбонов(мл)³, К.Шпиринг⁵, И.В.Яшин¹
- 1 Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва, Россия
- 2 Институт прикладной физики ИГУ, Иркутск, Россия
- 3 Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия
- 4 ИЗМИРАН, Троицк, Московская обл., Россия
- 5 ДЭЗИ-Цойтен, Цойтен, Германия
- 6 Туринский университет, Турин, Италия

Черенковский свет в воде и в воздухе

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

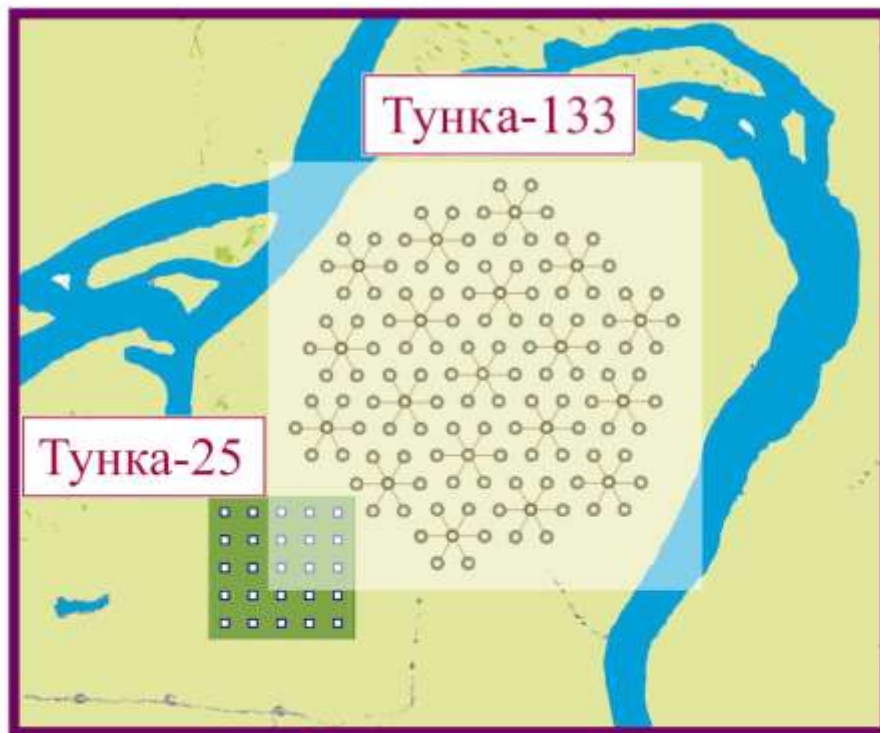
Воздух – к-т преломления $n = 1.0003$ $\theta_C = \arccos(1/n) = 1.4$

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 Зун-Мурино

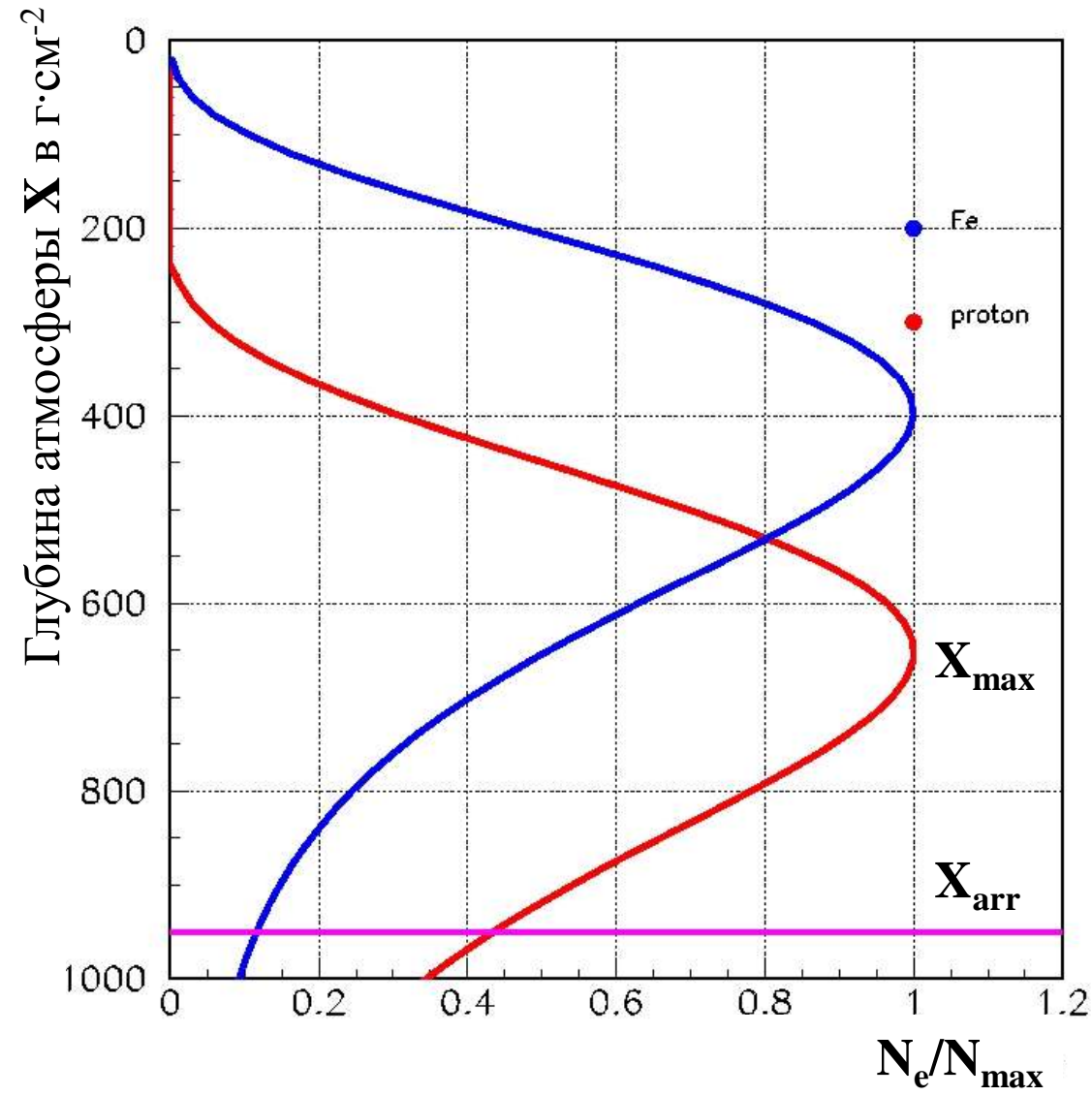


Тункинская долина. Река Иркут.



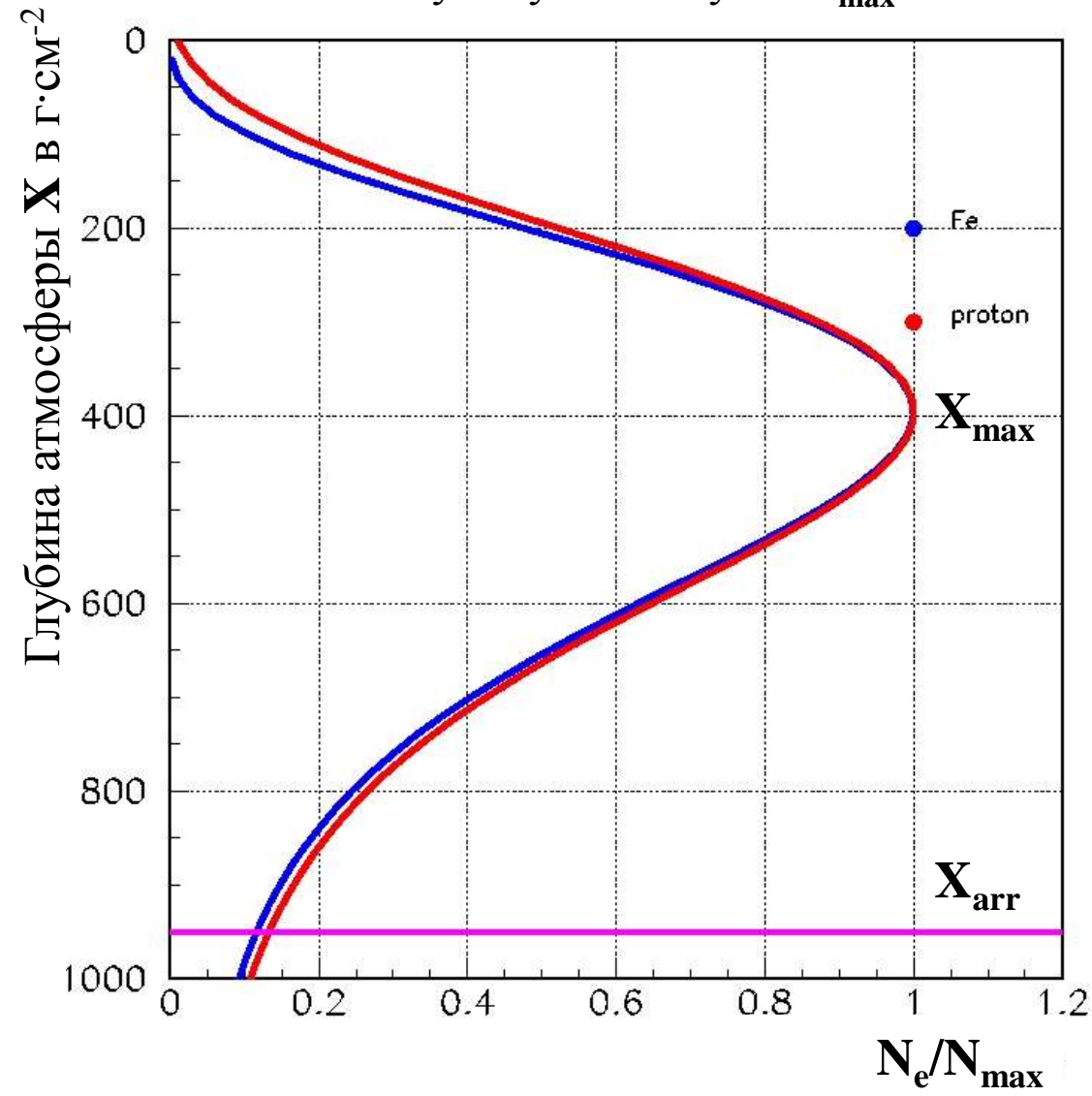
Принципы исследований.

Атмосфера Земли – гигантский калориметр.



Неразличимость формы каскадных кривых

Почему достаточно получать только один количественный параметр – глубину максимума X_{\max} ?



Потому что:

1. Отличия в следующем моменте (ширине) каскадных кривых малы и имеют характер случайных флуктуаций. Средняя форма каскадных кривых не зависит в определенных пределах от:
 - 1) сорта первичного ядра,
 - 2) модели взаимодействия,
 - 3) энергии –,потому что определяется электронно-фотонной лавиной.
2. Черенковская методика не чувствует отклонений ширины каскада от стандартной. Вариации ширины маскируются вариациями глубины максимума.

Измеряемые параметры

Первичное ядро E_0, Λ ?

$$\langle X_{\max} \rangle \sim \langle \ln \Lambda \rangle$$

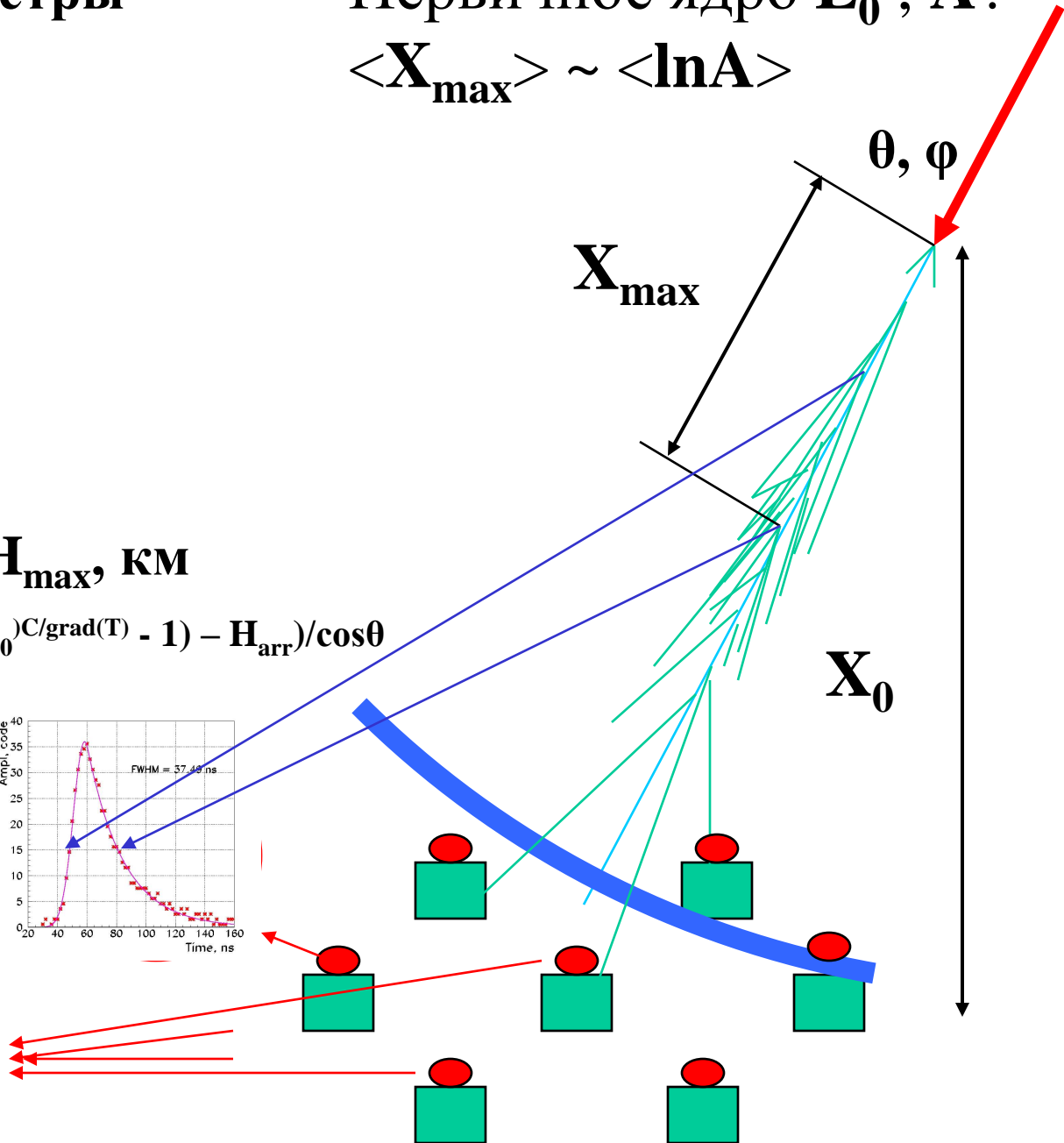
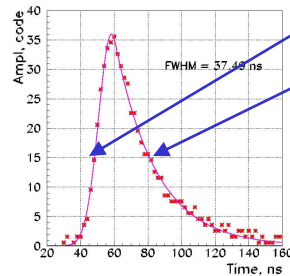
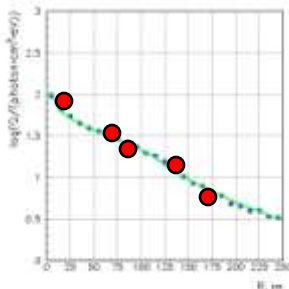
$$Q_{175} \rightarrow E_0$$

$$FWHM \sim \Delta X \text{ Г/см}^2$$

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

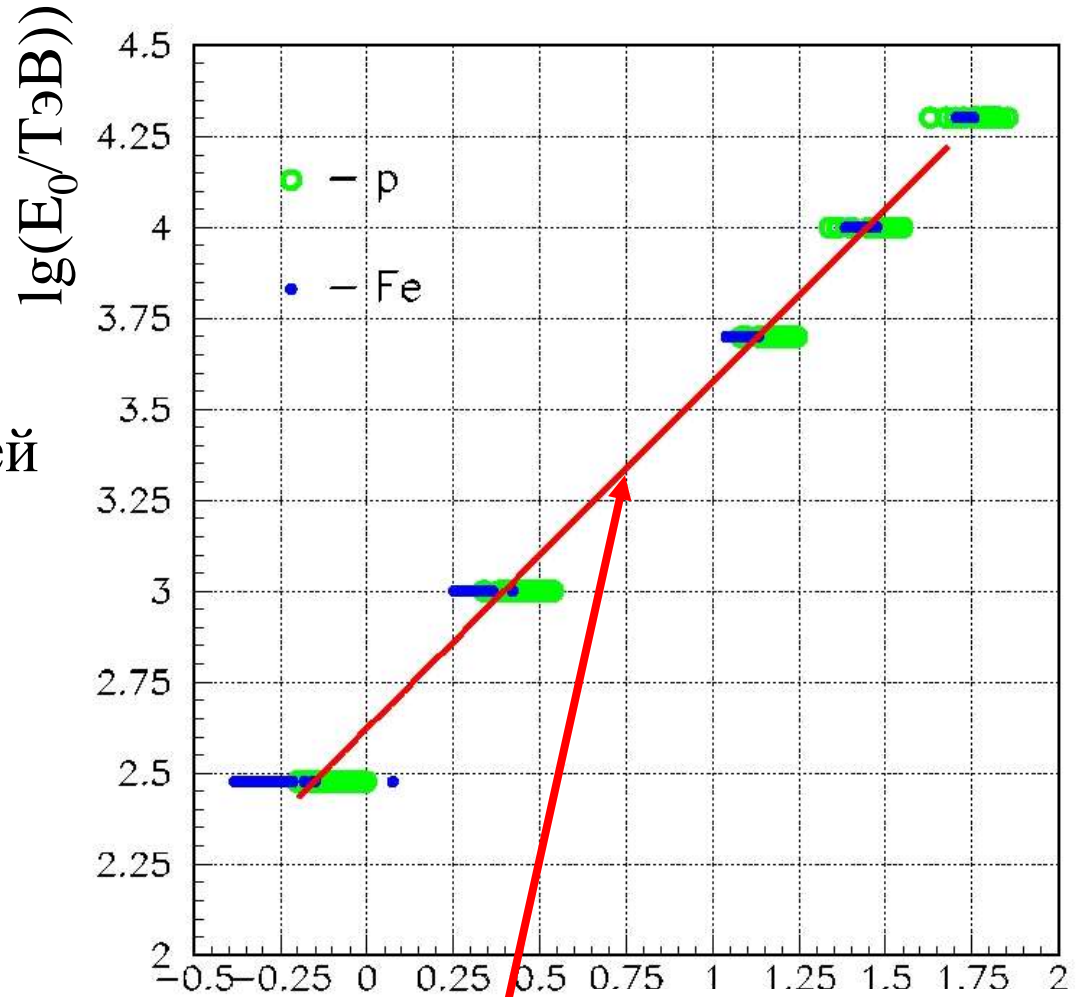
Крутизна ФПР $P \sim H_{\max}, \text{ КМ}$

$$H_{\max} = (T_0 / \text{grad}(T)) ((X_{\max} \cos \theta / X_0)^{C / \text{grad}(T)} - 1) - H_{\text{arr}} / \cos \theta$$



CORSIKA: Определение энергии по параметру Q_{175}

600 разыгранных ливней
с зенитными углами
 θ от 0 до 25

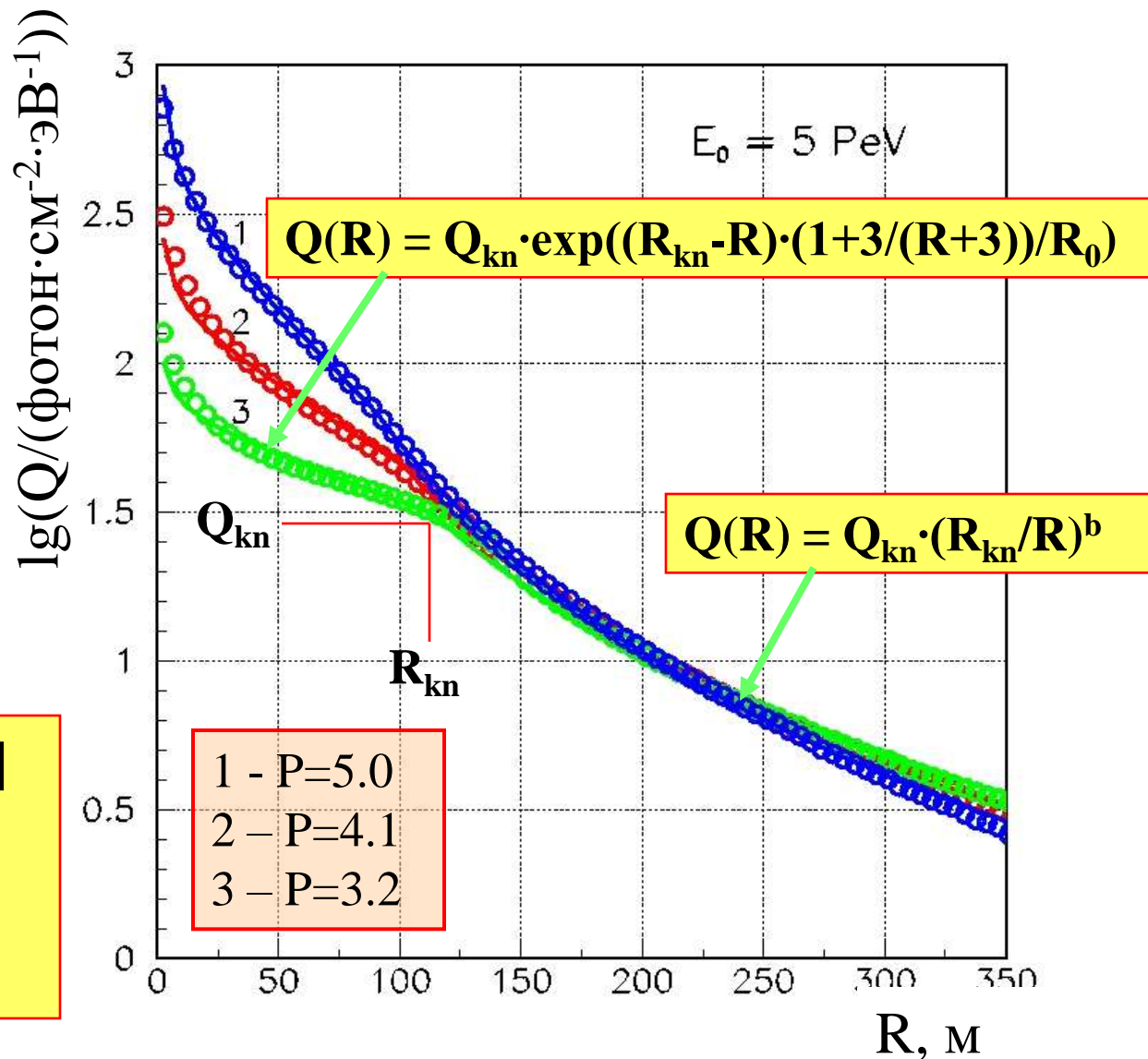


$$E_0 = 4 \cdot 10^{14} Q_{175}^{0.95}, \text{ эВ},$$
$$Q_{175} \text{ в ед.: } [\text{фотон}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{эВ}^{-1}]$$

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

CORSIKA: Расчетные пространственные распределения для Тунгусской долины.

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



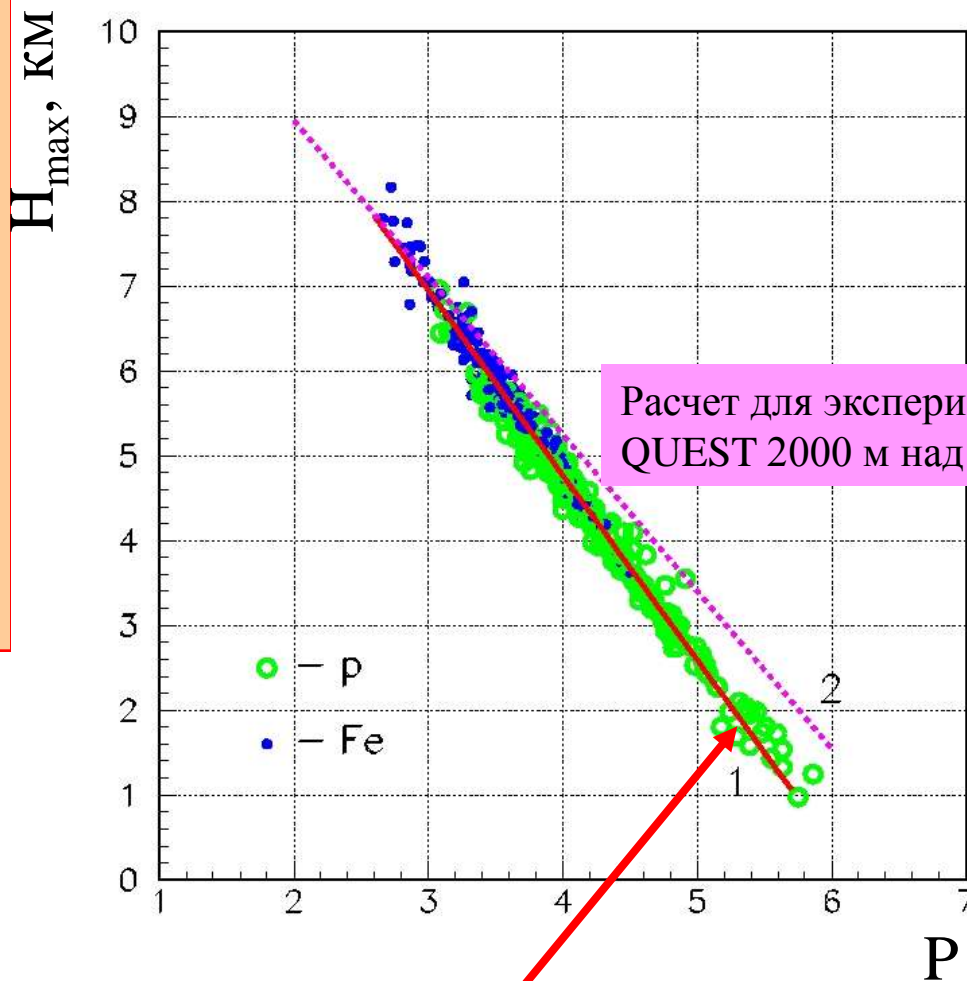
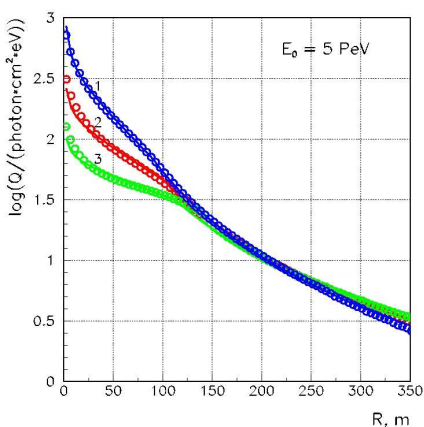
$$R_0 = 10^{2.95 - 0.245 \cdot P} [\text{м}]$$

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

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

CORSIKA: Расчет
для установки Тунка
675 м над уровнем
моря.

480 разыгранных
ливней с энергиями:
 $1 \text{ ПэВ} < E_0 < 20 \text{ ПэВ}$
 $0 < \theta < 25$



$$H_{max} = 13.61 - 2.18 \cdot P, \text{ [км]}$$

*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)

Начало работ по экспериментальному исследованию черенковского света ШАЛ.

Функция пространственного распределения (ФПР):

Эксперименты на Памире – Н.М. Нестерова и А.Е. Чудаков. – 1958 г,

Расчеты ФПР - В.И.Зацепин и А.Е.Чудаков – 1962 г.

Форма импульса: Расчетная работа Ю.А.Фомина и Г.Б.Христиансена
– 1971 г. Экспериментальная работа в

Якутске А.А.Силаева и Ф.В.Шикалова – 1970 – 1973 гг.

Вместо определения формы каскада по точкам, измерять две
количественные характеристики – энергию E_0 и глубину максимума
каскадной кривой X_{\max} – 1975 г.

Эксперименты 1970 – 1990 годов.

Проводились по инициативе и под общим руководством
Г.Б.Христиансена

коллективами:

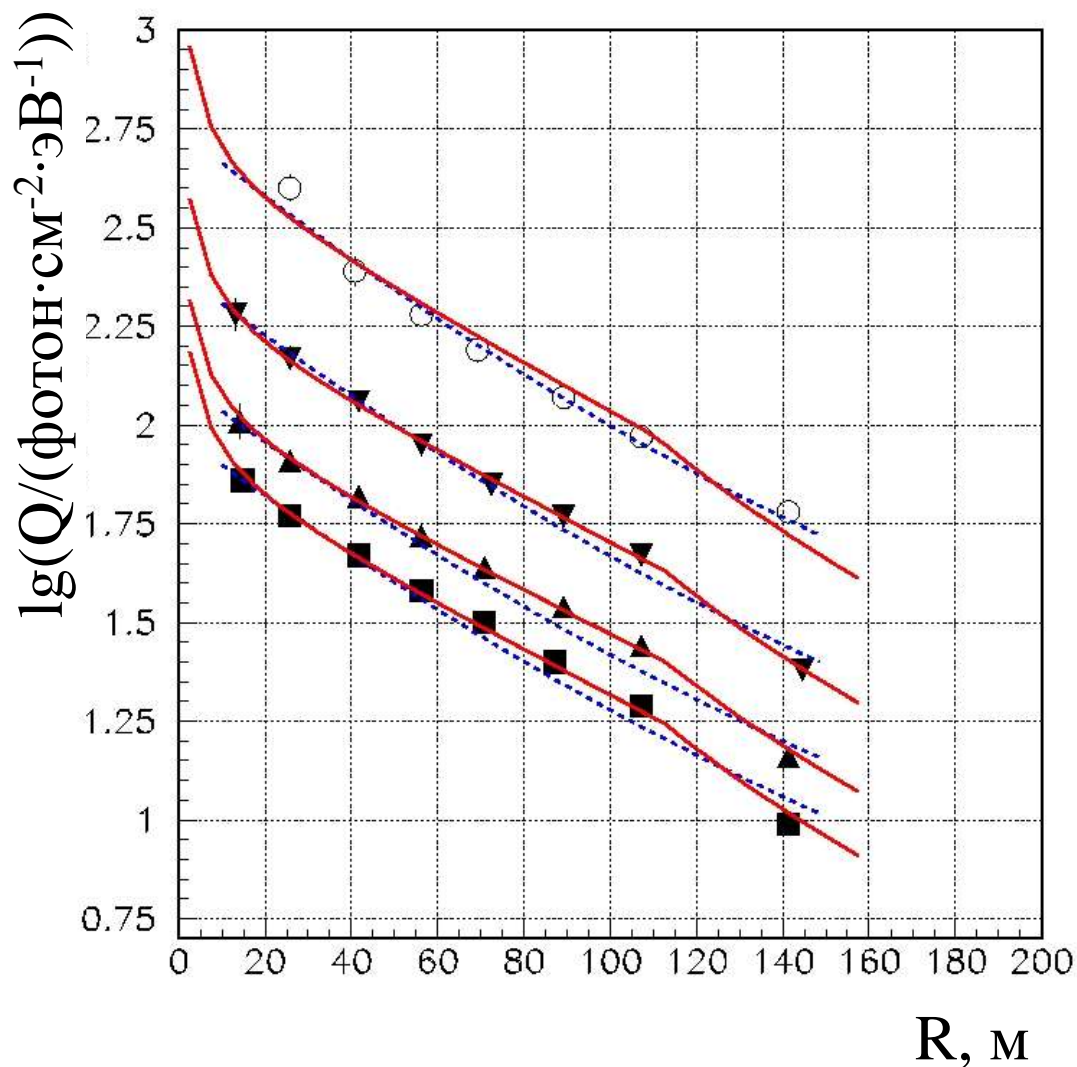
НИИЯФ МГУ (Москва),

ИКФИА ЯФ СО АН СССР (Якутск),

СамГУ (Самарканд).

Самарканд – 1980 -1985

Пространственное
распределение
черенковского света,
красные кривые – новые
негладкие функции

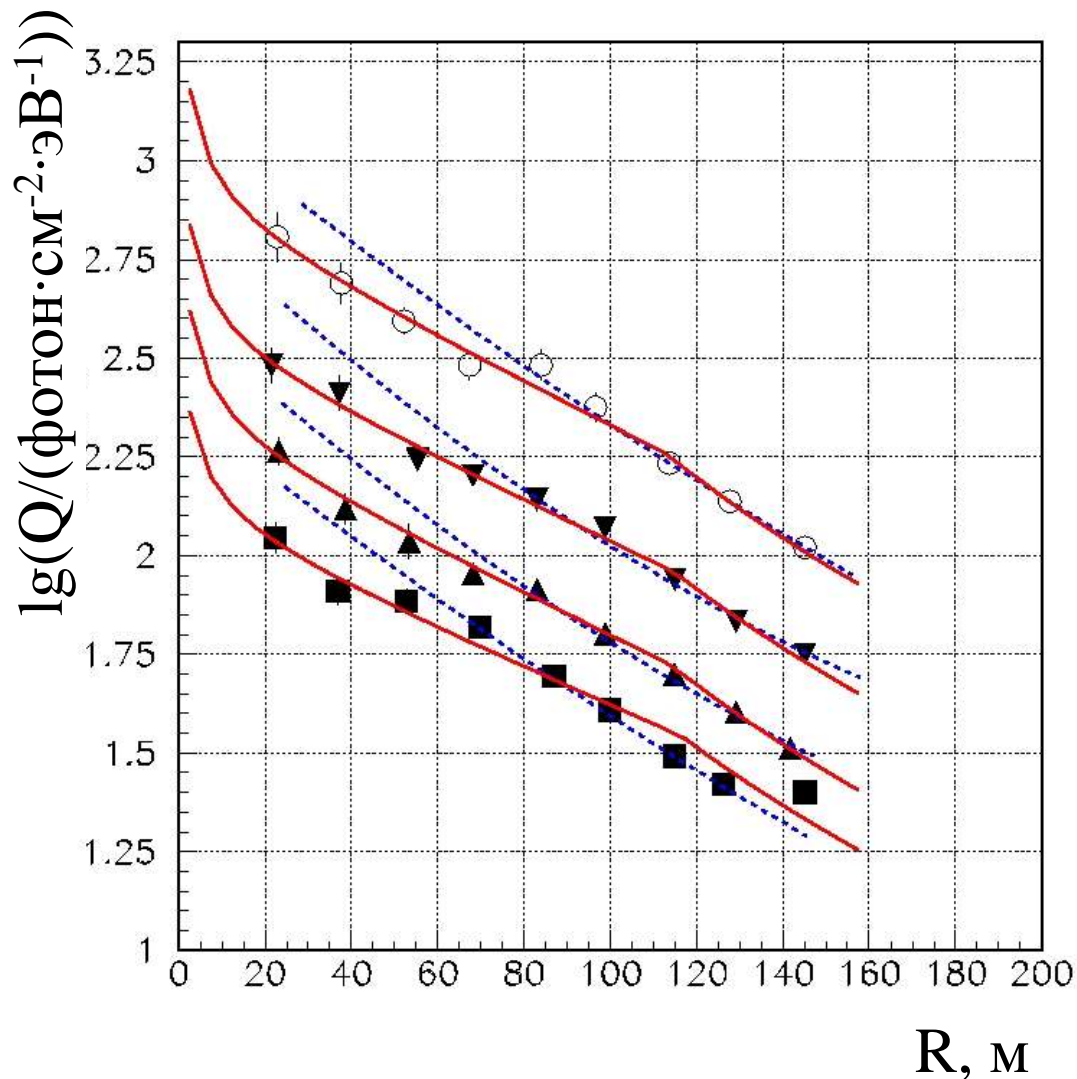


Якутск: плотная установка 1984 - 1990

Средние ФПР для 4
энергий
от $7 \cdot 10^{15}$ до $4 \cdot 10^{16}$ эВ

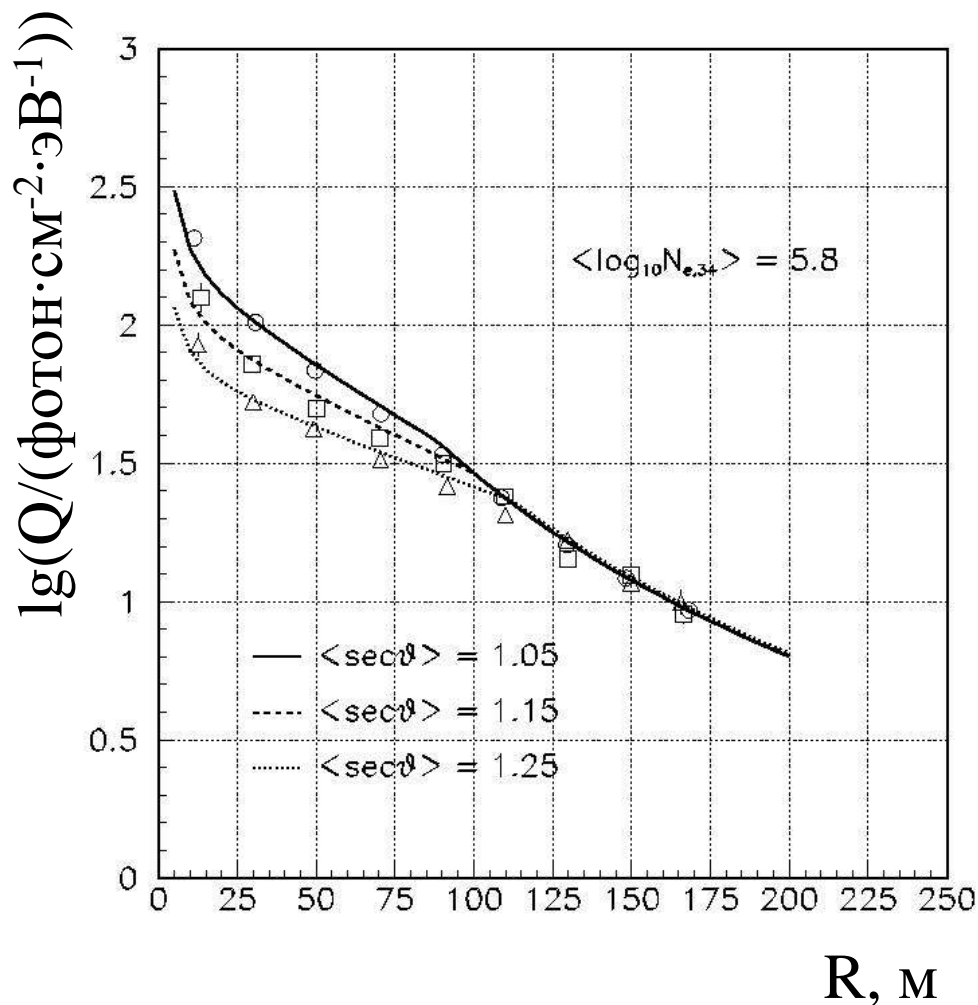
Пунктир – старые
гладкие функции
 $Q \sim (1+R/R_0)^{-4.3}$

Сплошные красные
кривые – новые
негладкие функции.



Эксперимент QUEST: средние ФПР для различных зенитных углов

Классификационный параметр: $N_{e,34}$ — число частиц, пересчитанное к фиксированному зенитному углу $\theta = 34$ пропорционально энергии.



Современные эксперименты

Проводятся по инициативе и под общим руководством
Л.А. Кузьмичева

коллективами:

НИИЯФ МГУ и ИЯИ РАН (Москва),

НИИПФ ИГУ (Иркутск),

Туринский университет (Италия),

ДЭЗИ-Цойтен (Германия):

1994 – 1995 – Тунка-4

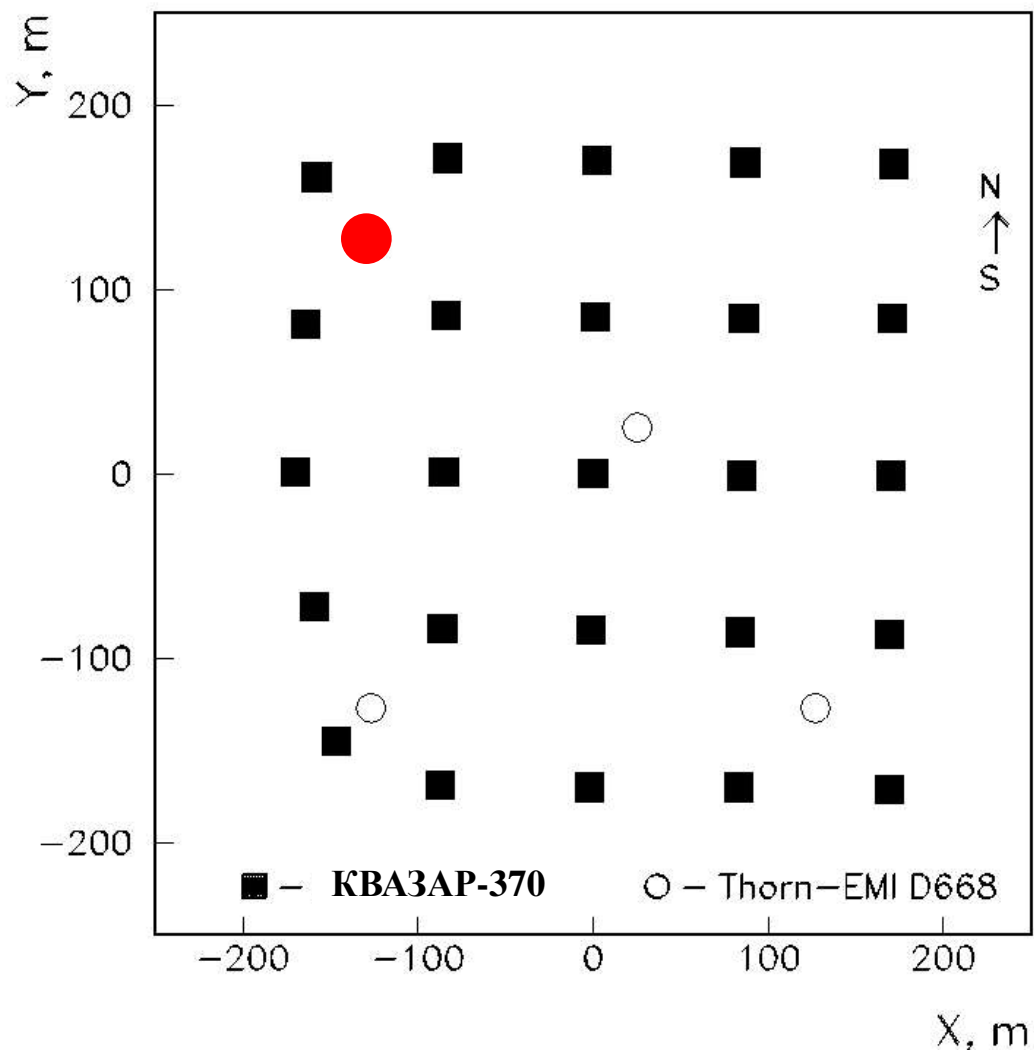
1996 – 1999 – Тунка-13

1998 – 2000 – QUEST на установке EAS-TOР в Италии

2000 – 2004 – Тунка-25

2005 – 2009 – Тунка-133

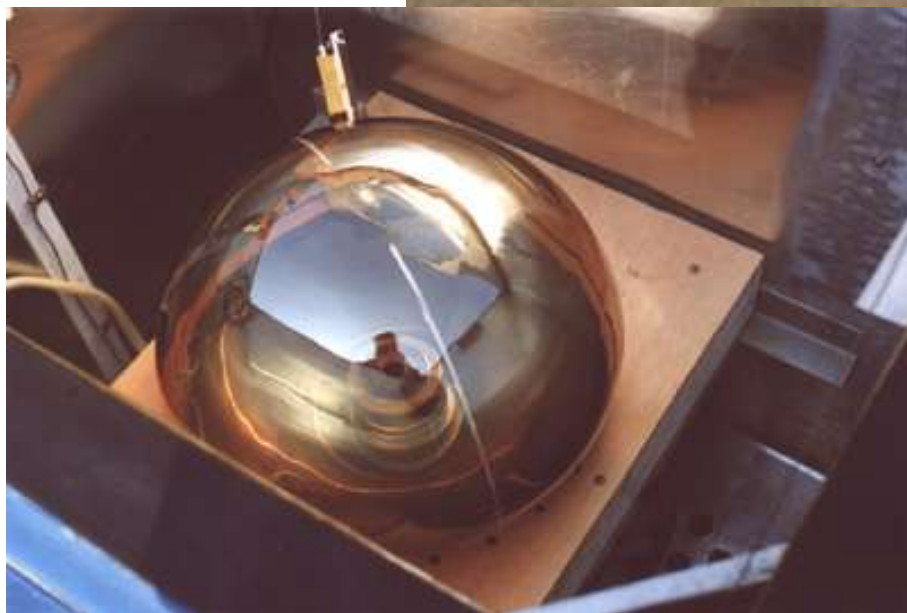
План установки Тунка-25



Установка Тунка-25



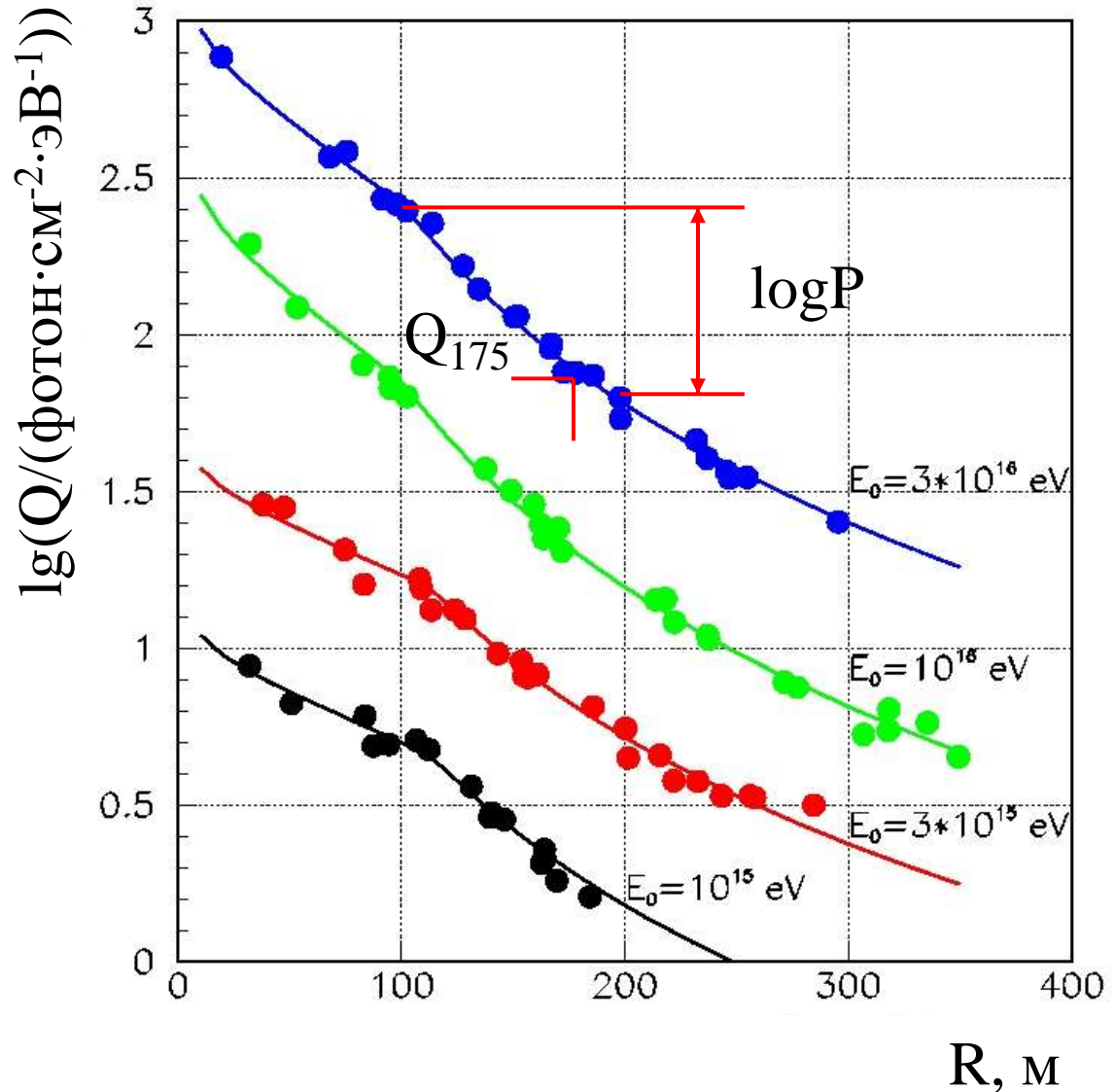
Детекторы черенковсвкого света



Тунка-25: примеры реконструкции параметров ливней

Параметры,
измеряемые в
каждом событии:

1. Координаты оси - x, y
2. Поток черенковского света на расстоянии 175 м от оси - Q_{175}
3. Крутизна ФПР - $P=Q(100)/Q(200)$



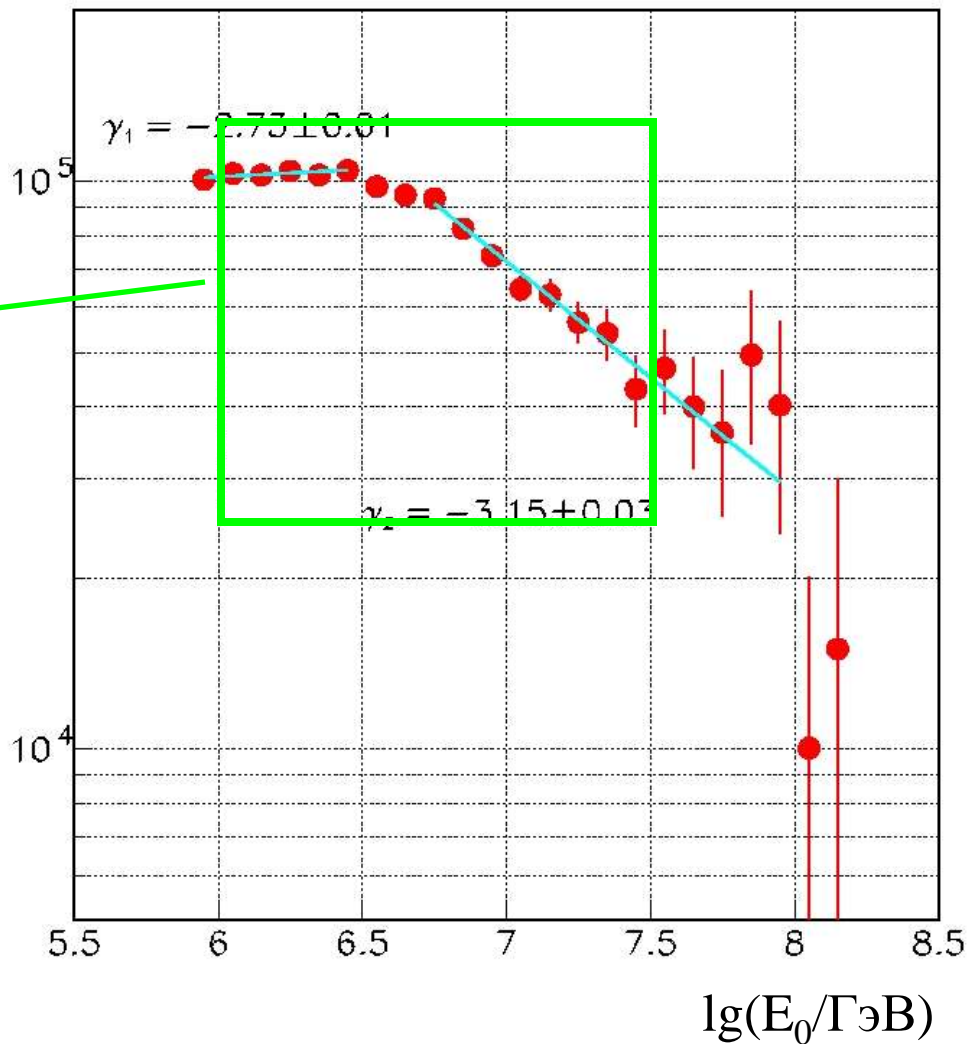
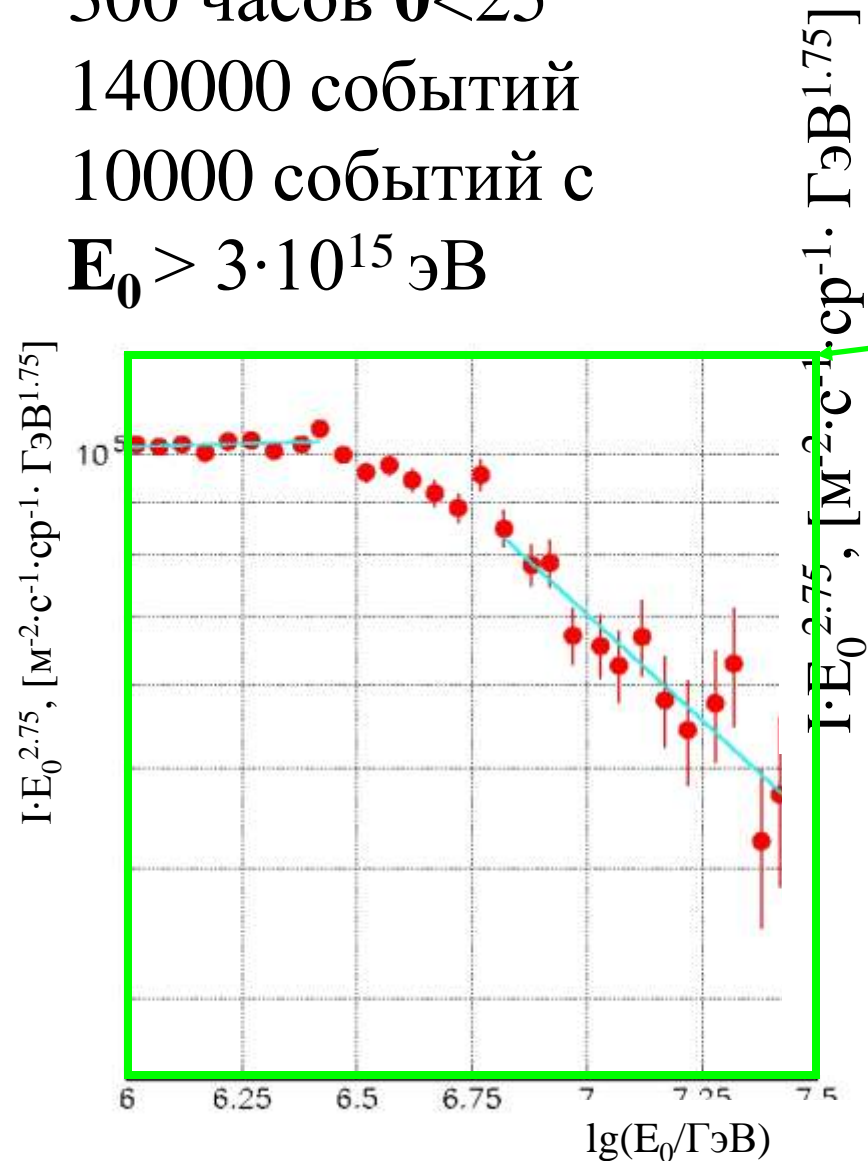
Дифференциальный энергетический спектр

300 часов $\theta < 25$

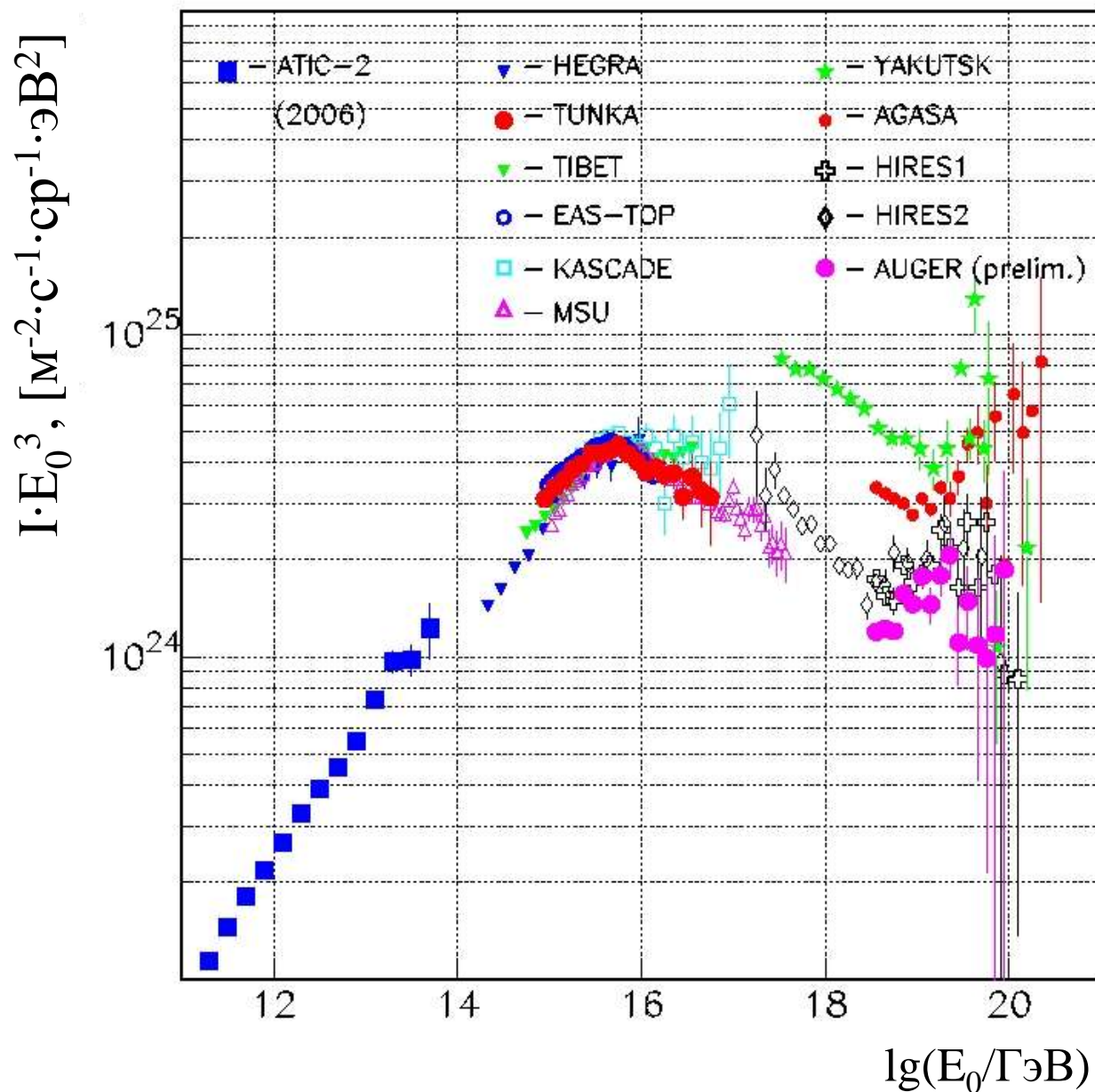
140000 событий

10000 событий с

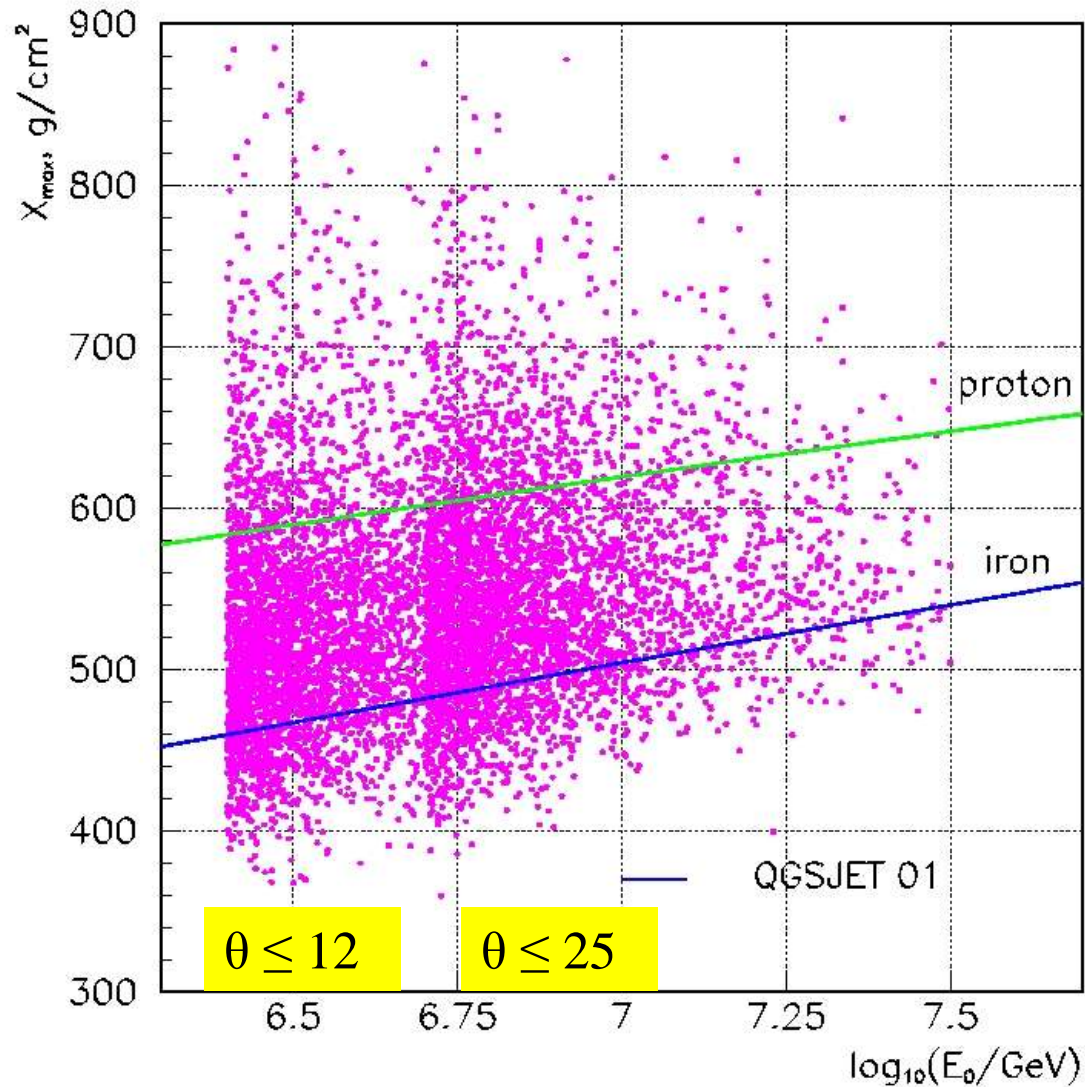
$E_0 > 3 \cdot 10^{15}$ эВ



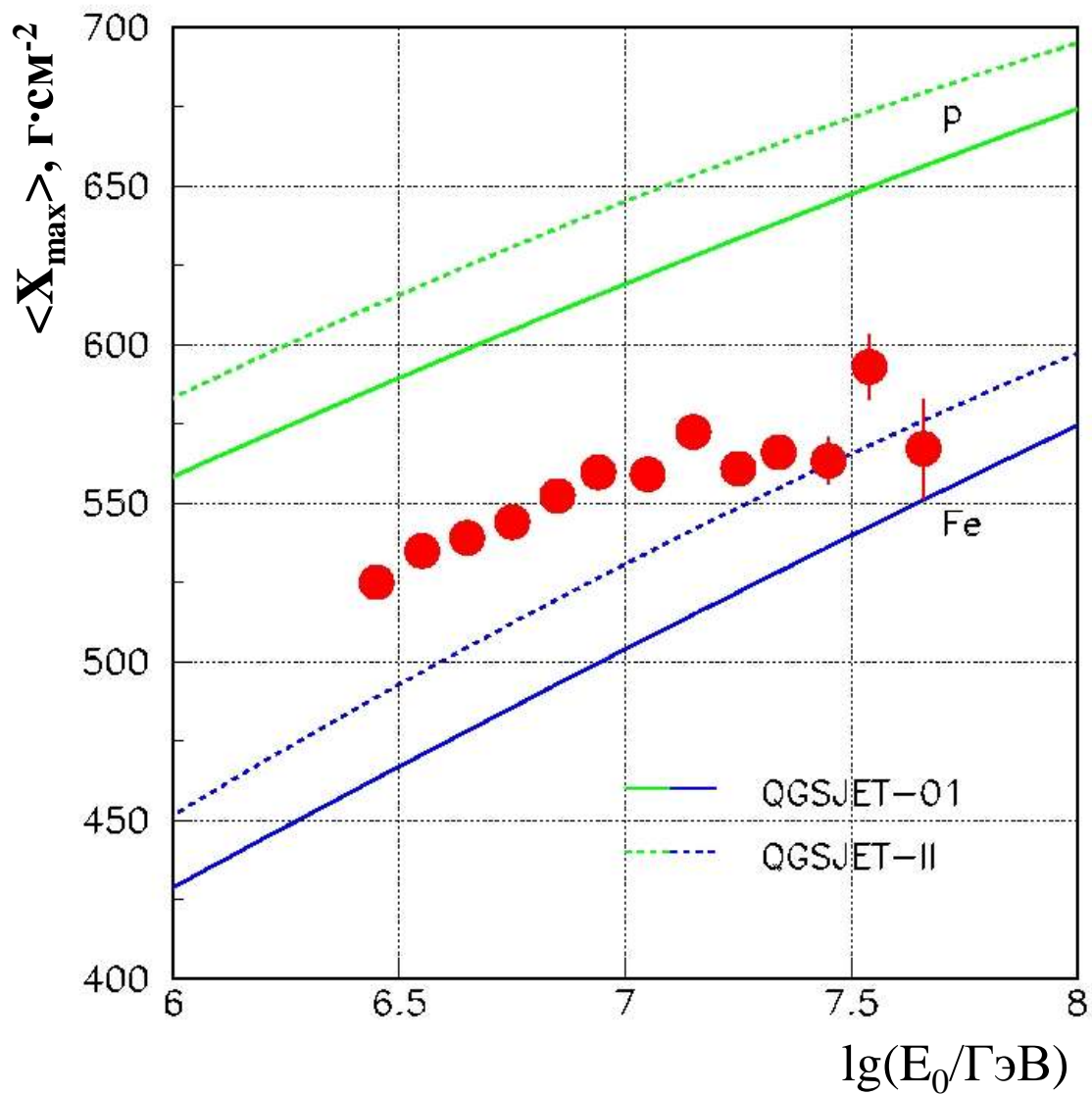
Сравнение с
другими
работами в
широком
диапазоне
энергий



X_{\max} индивидуальные измерения



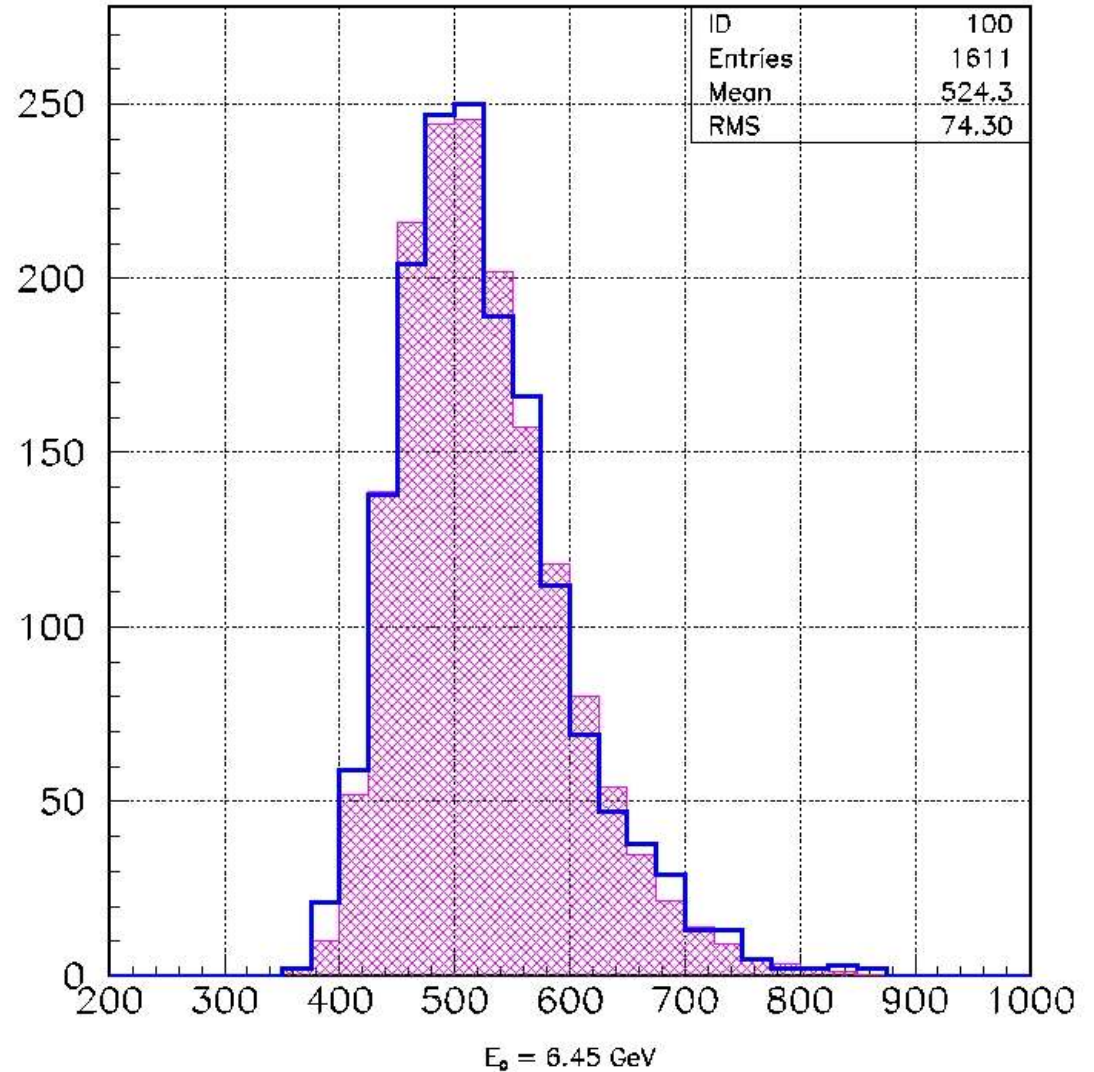
Средняя глубина максимума ШАЛ



X_{\max} distribution

line – experiment

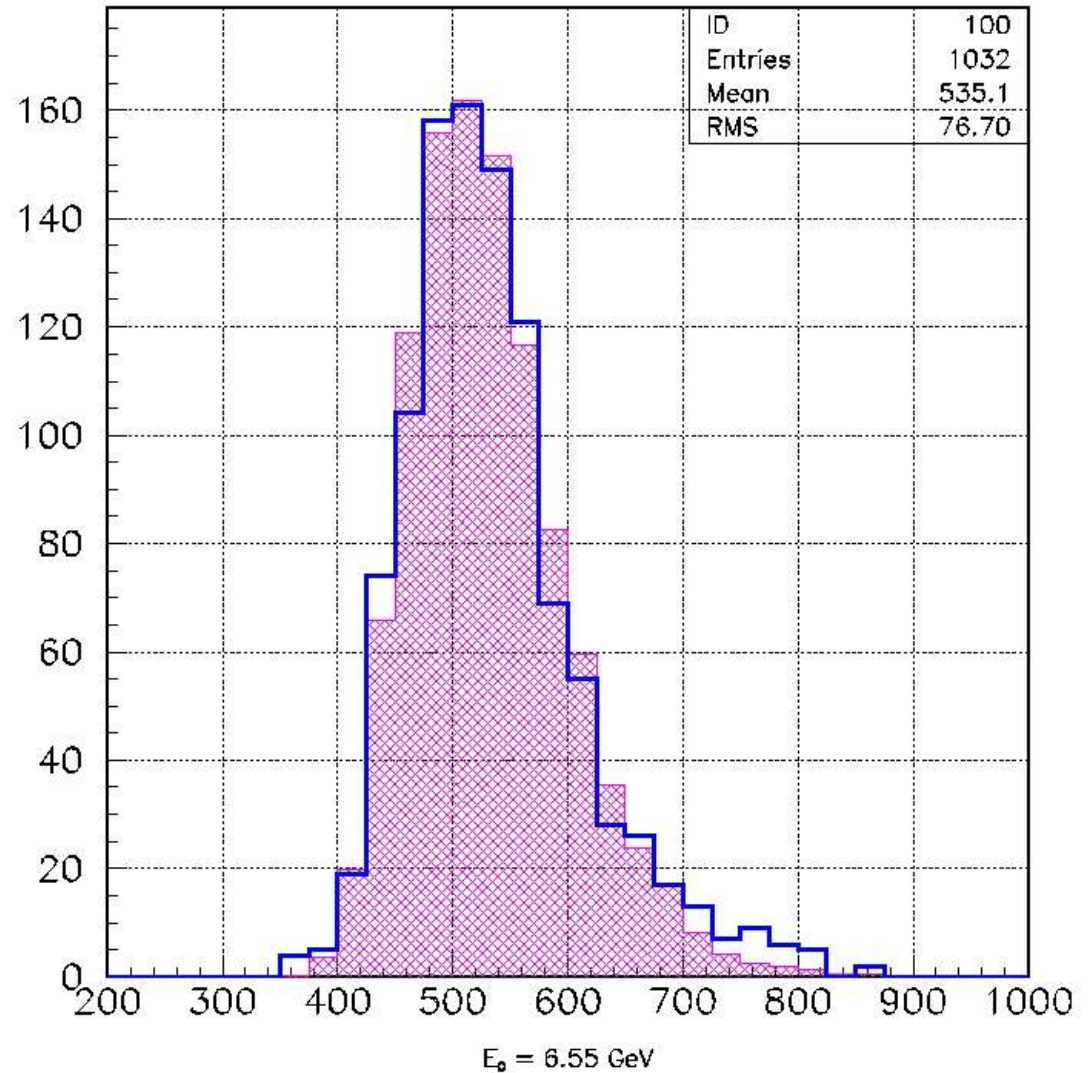
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

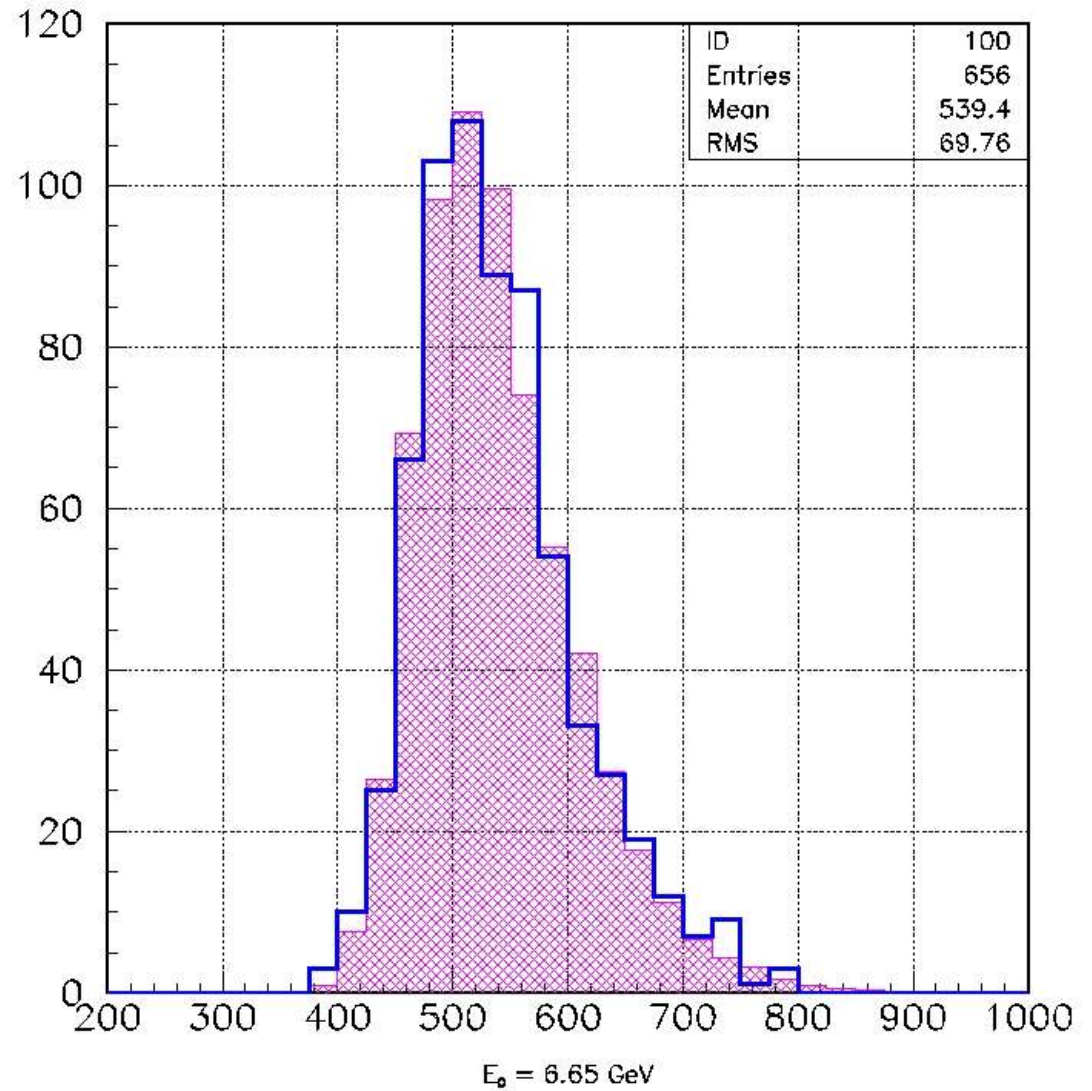
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

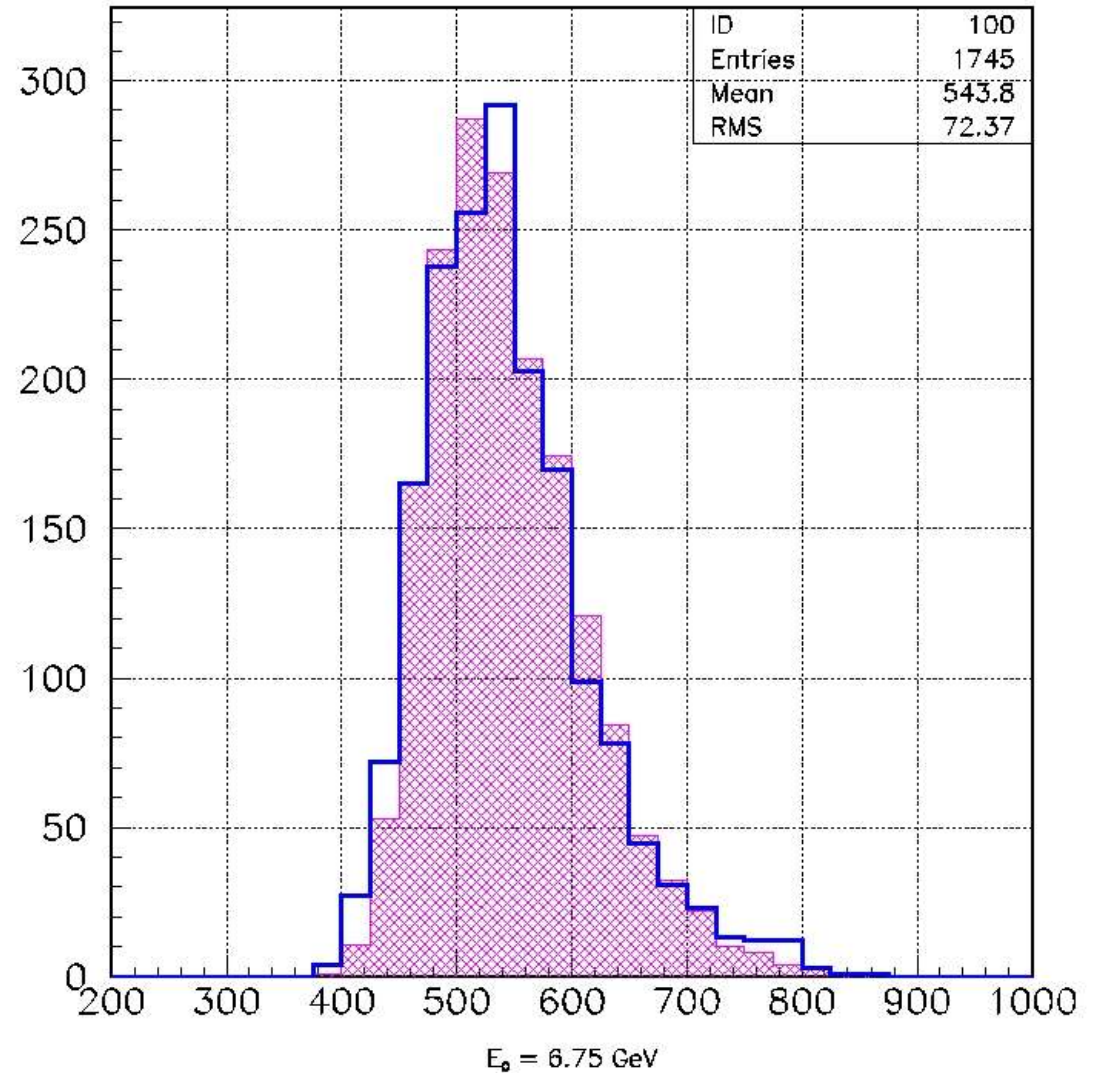
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

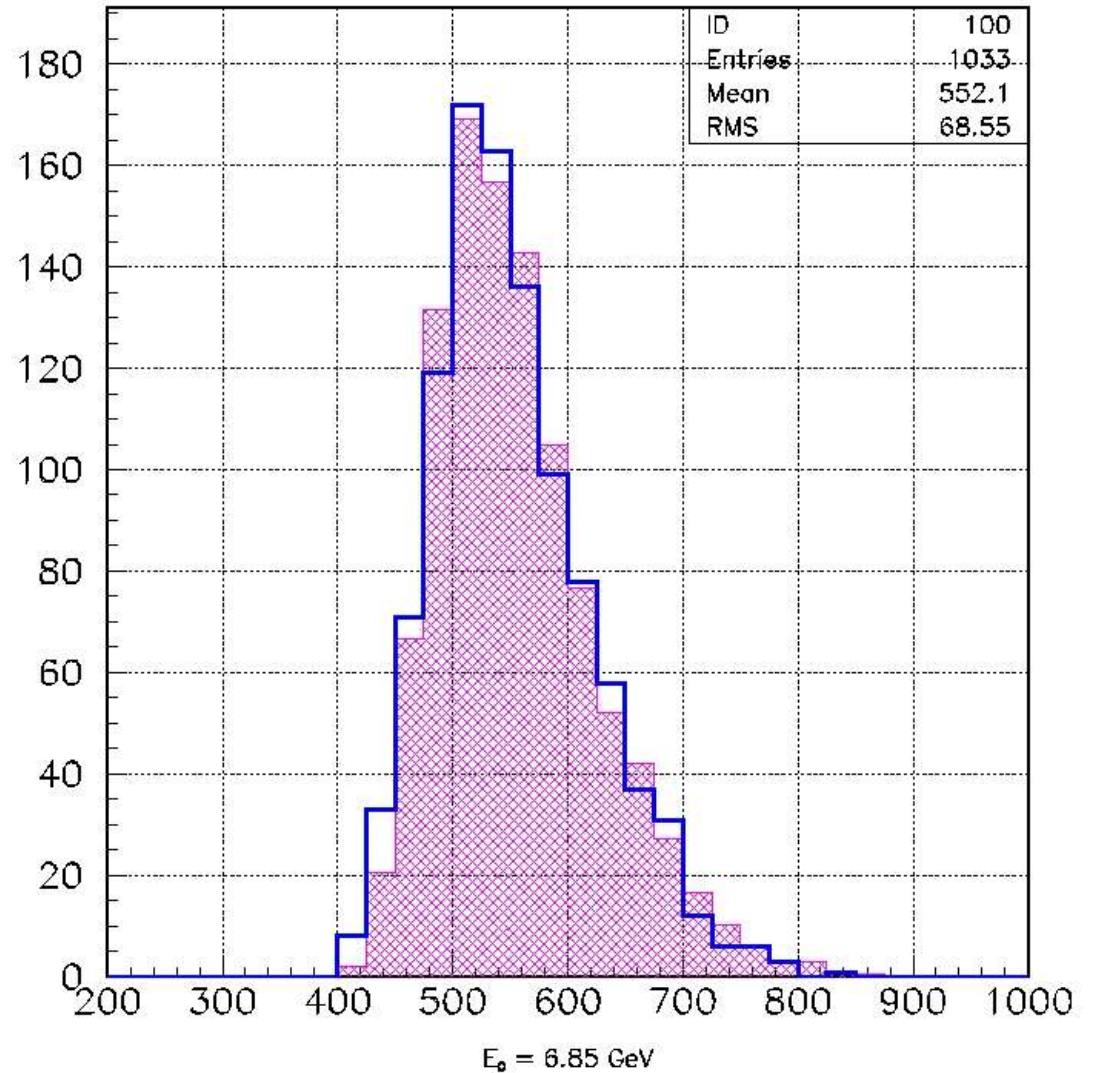
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

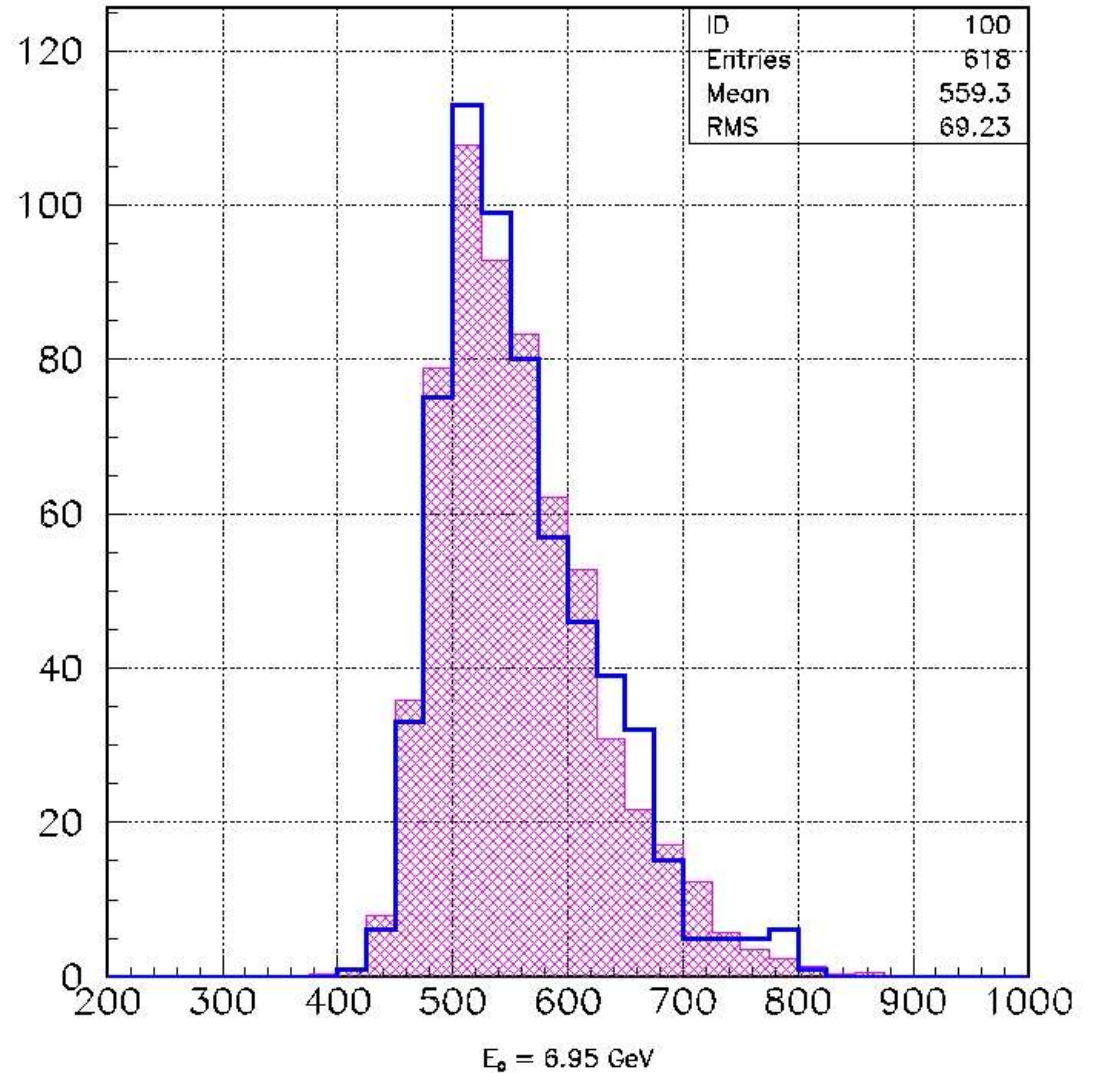
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

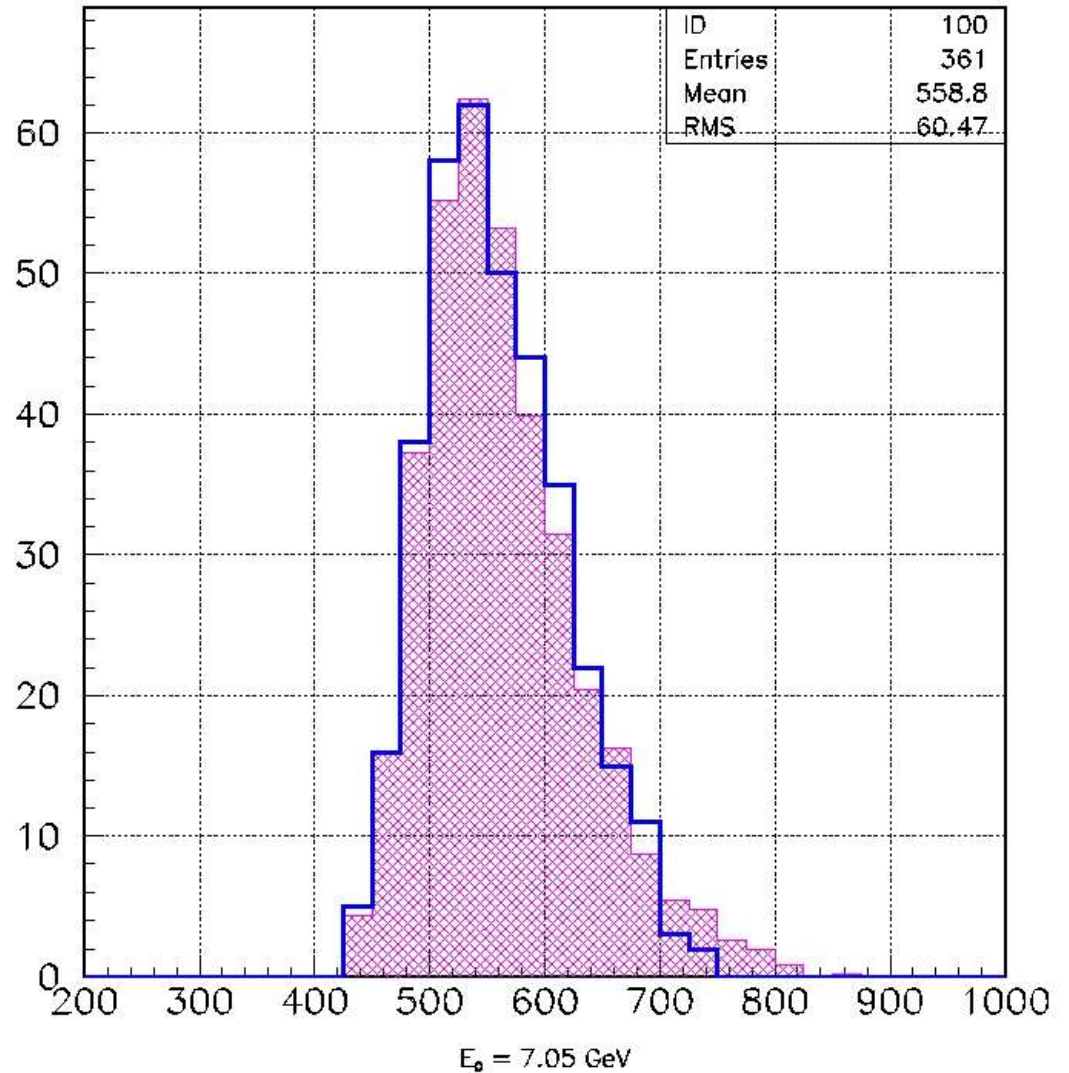
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

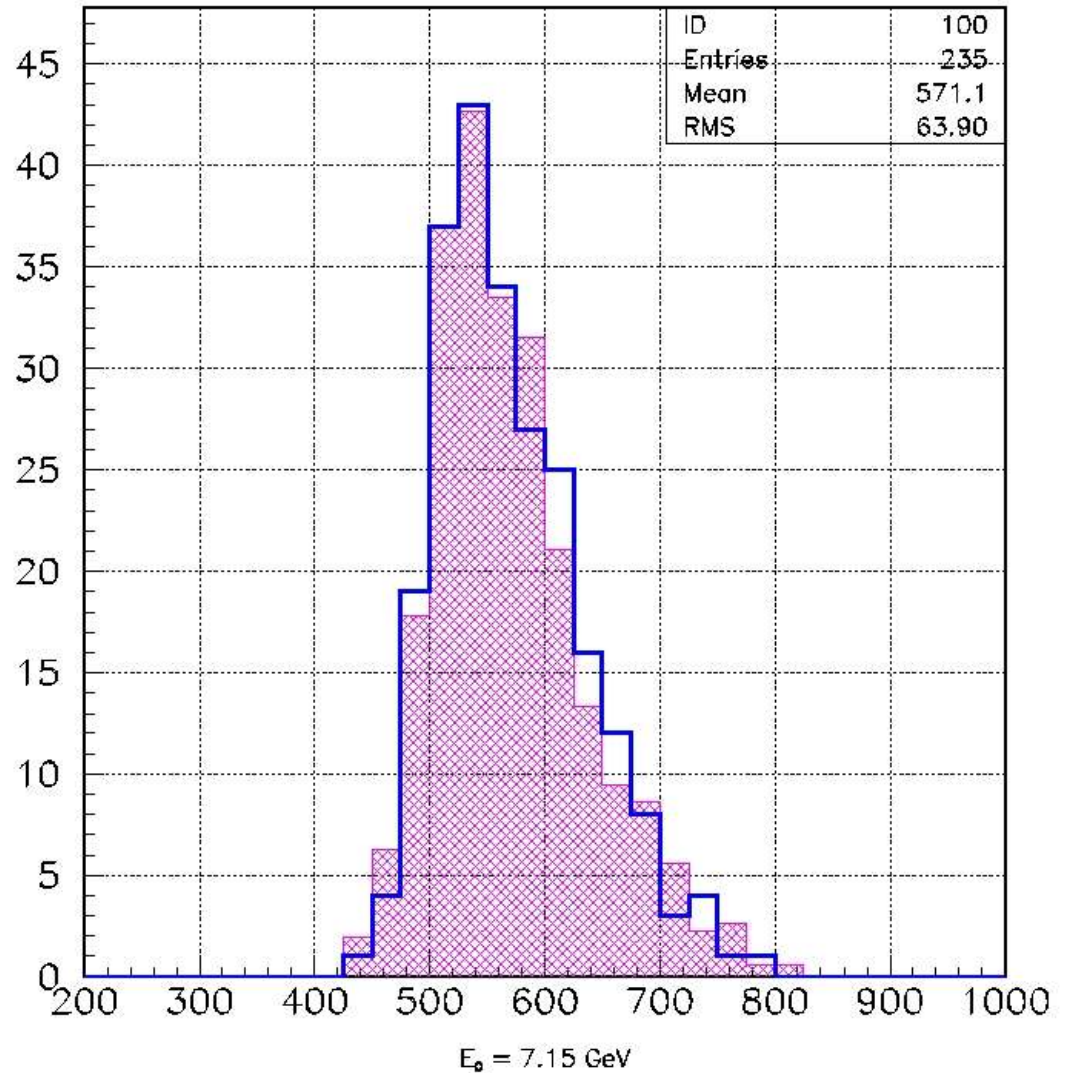
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

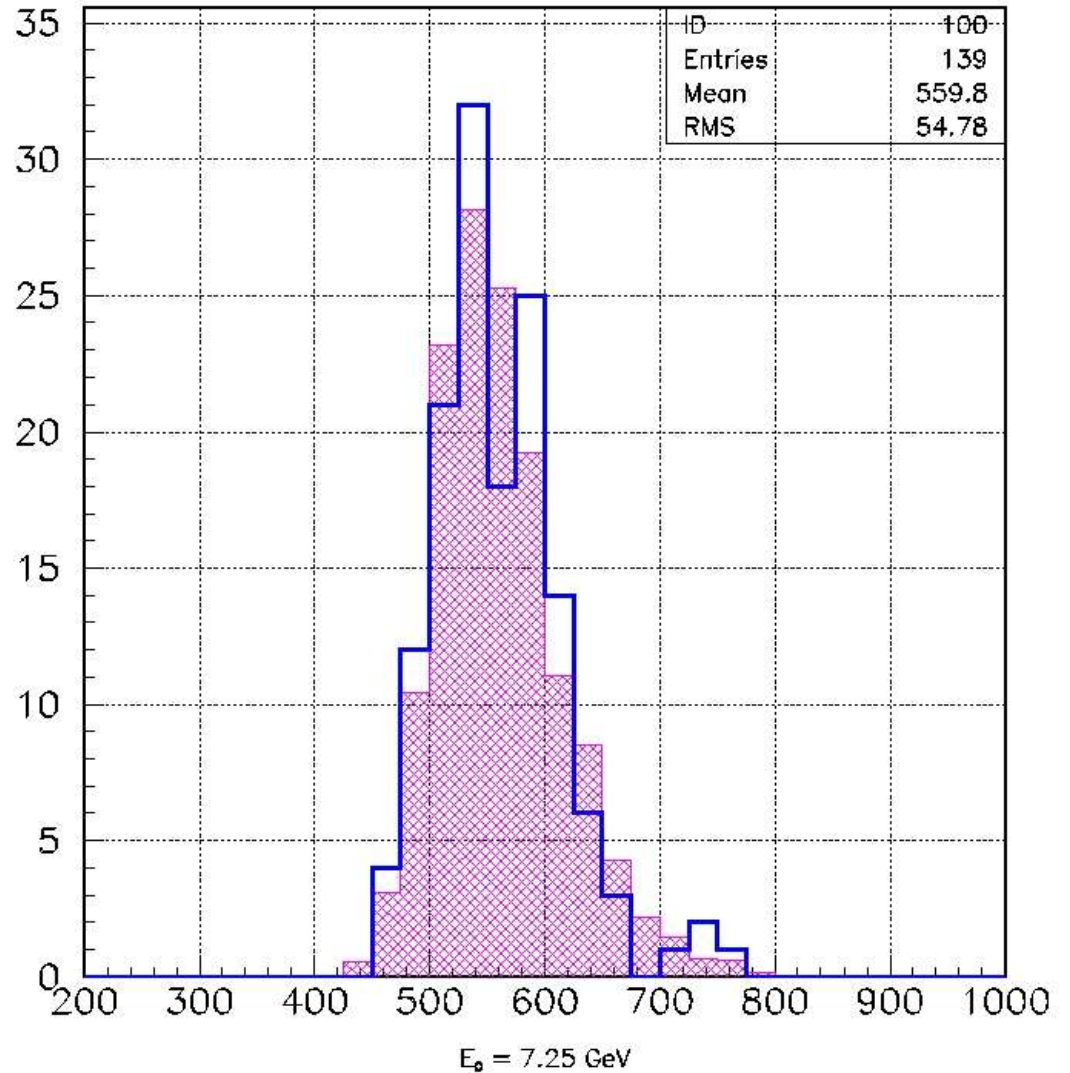
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

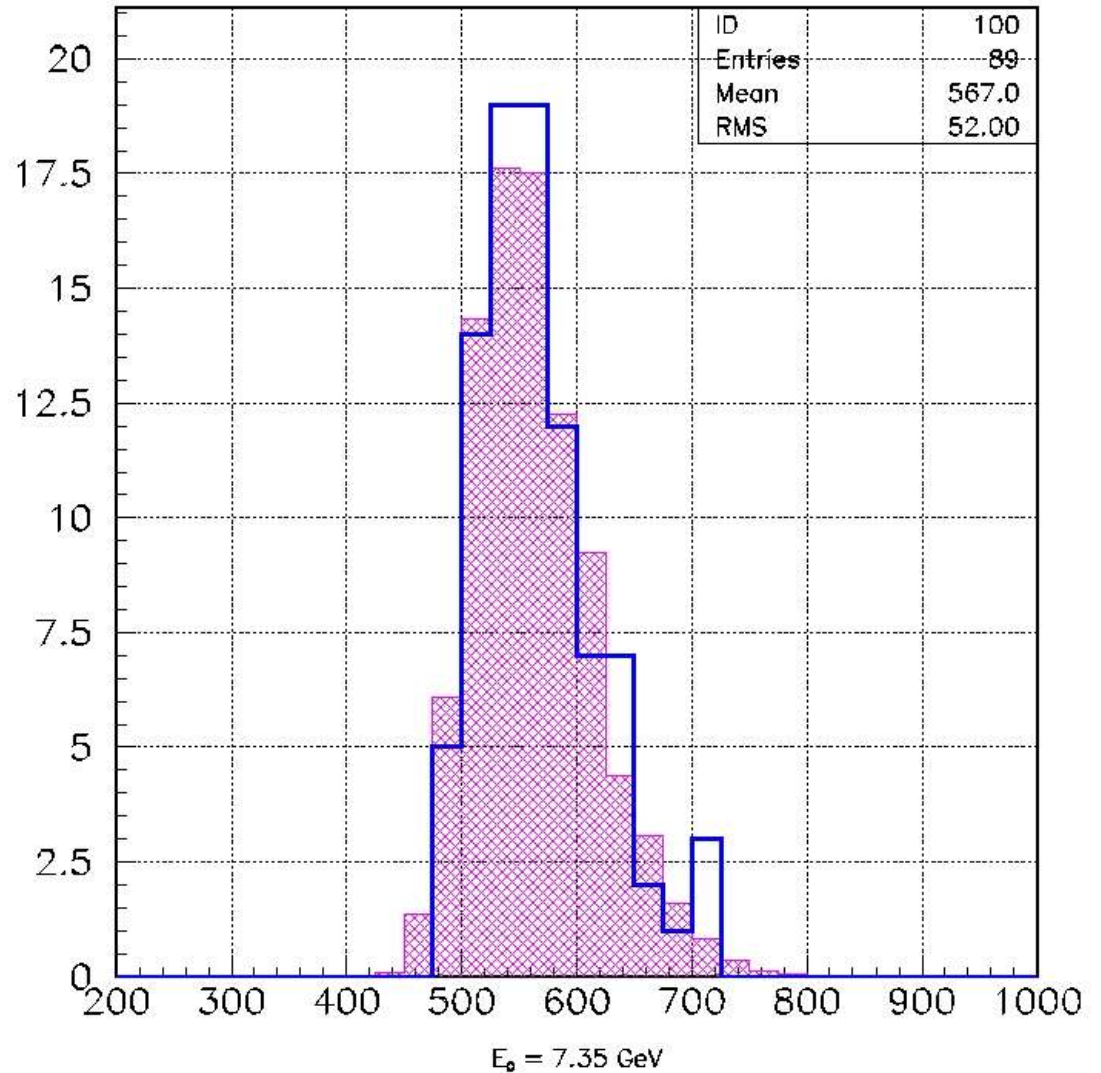
filled area – simulation



X_{\max} distribution

line – experiment

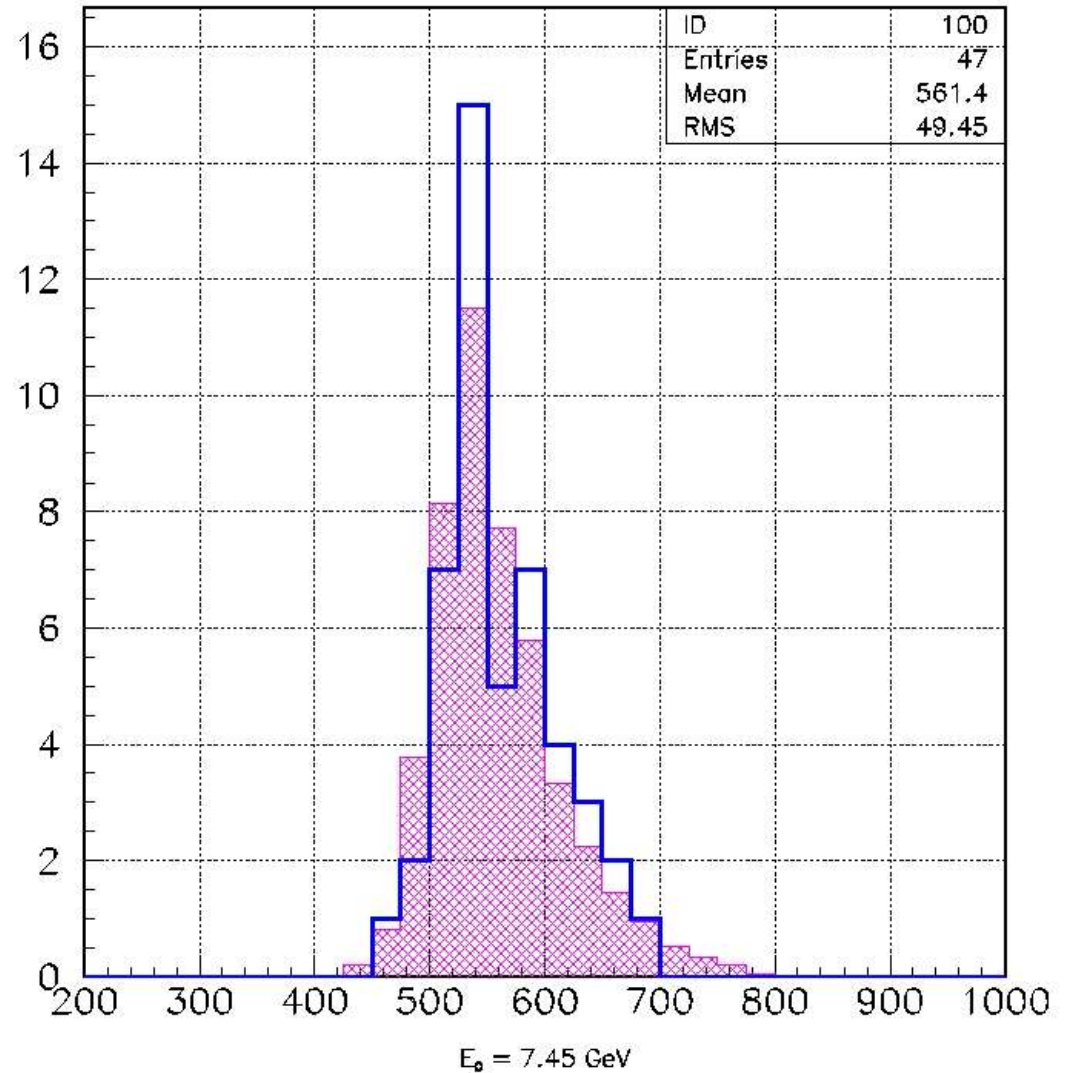
filled area – simulation



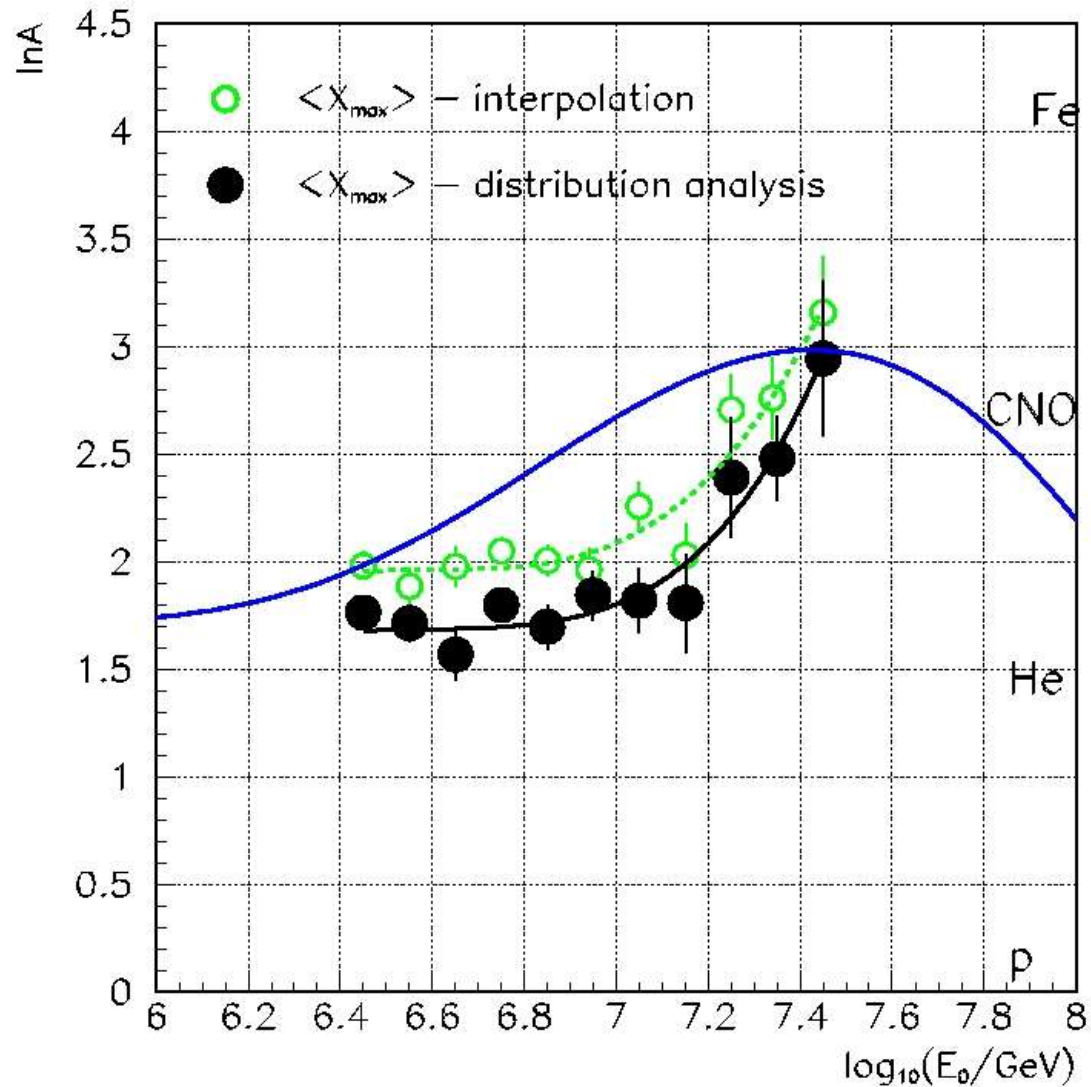
X_{\max} distribution

line – experiment

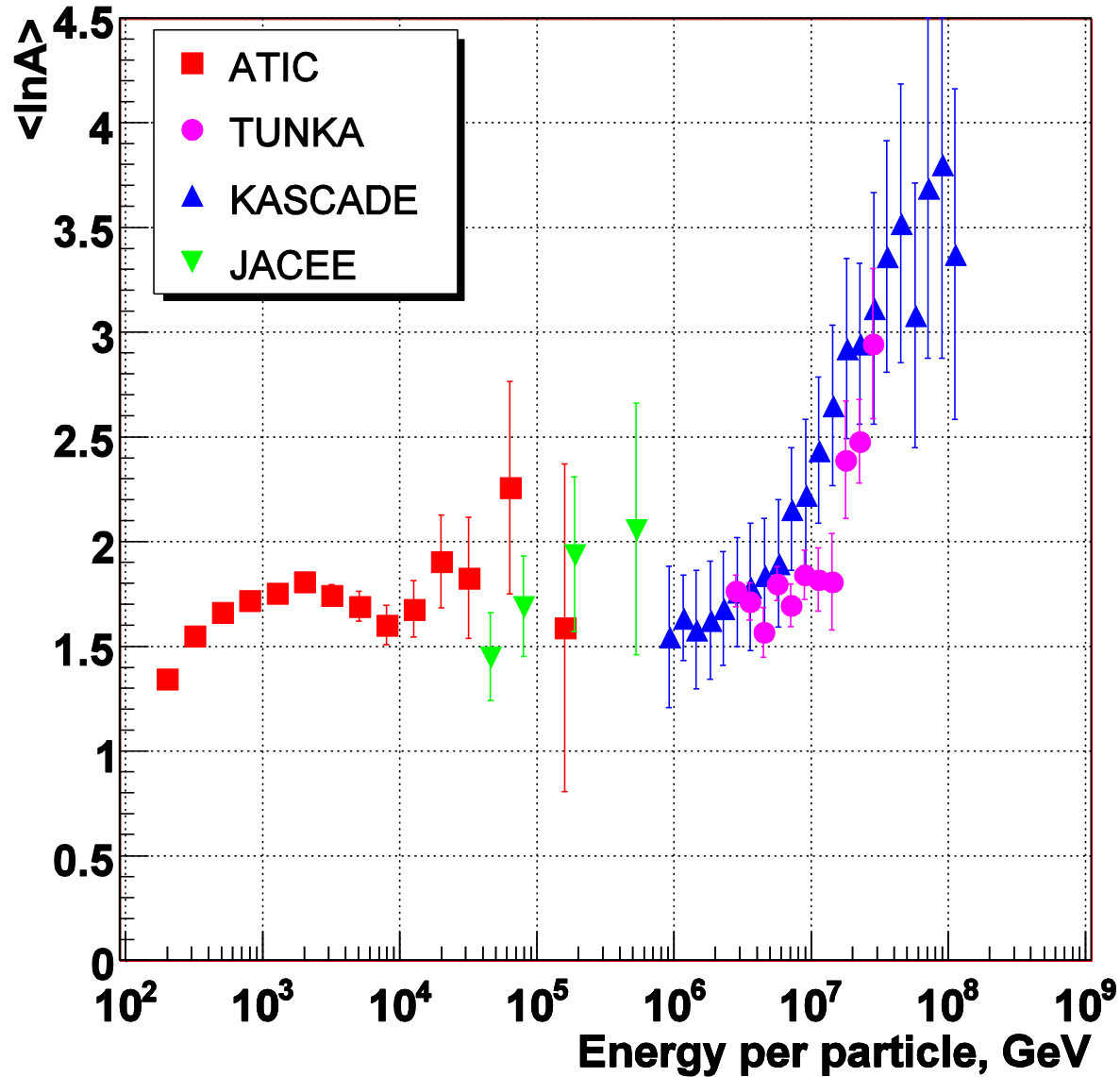
filled area – simulation

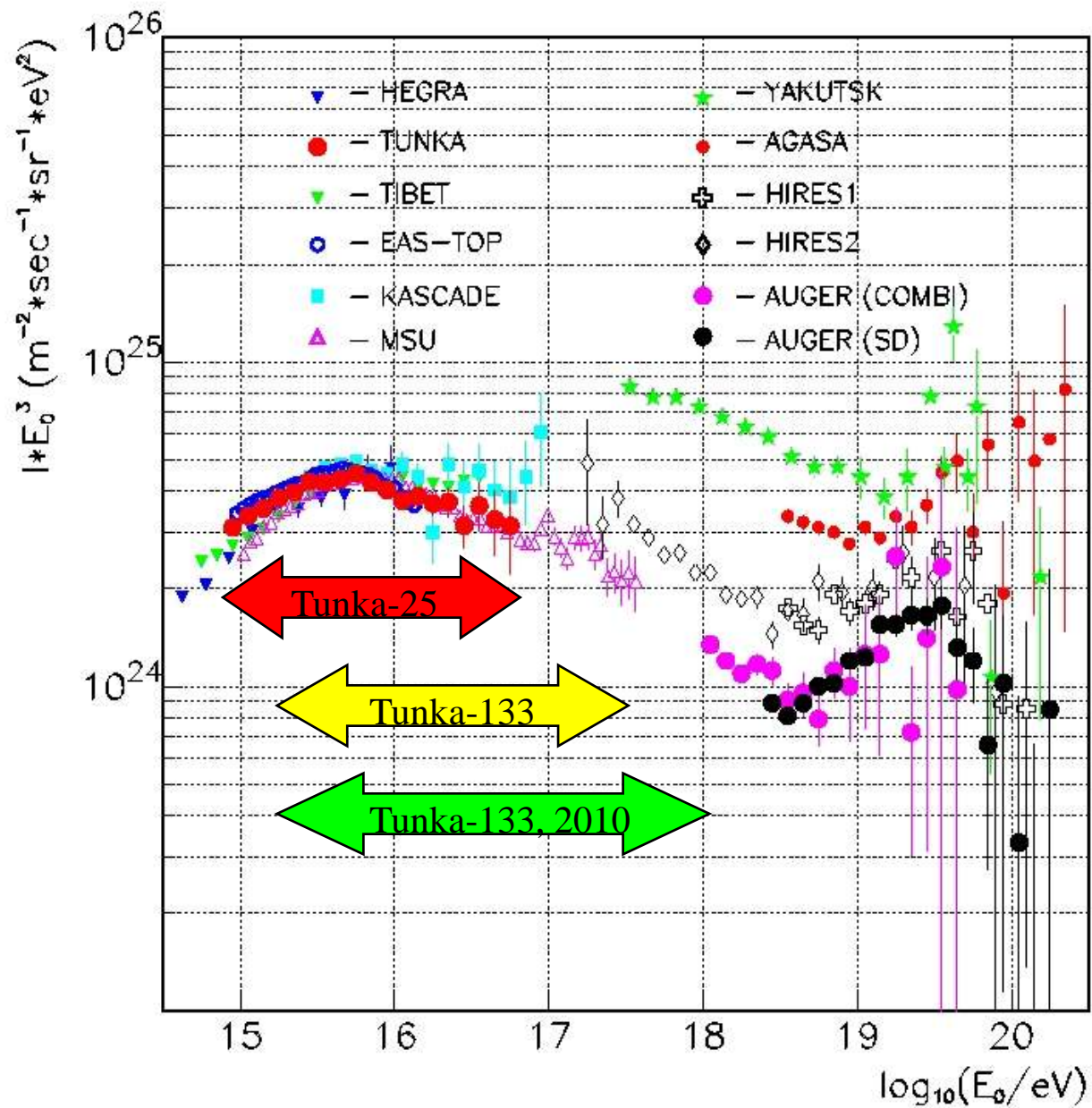


Средний LnA



Mean mass composition









Как защититься от коров?



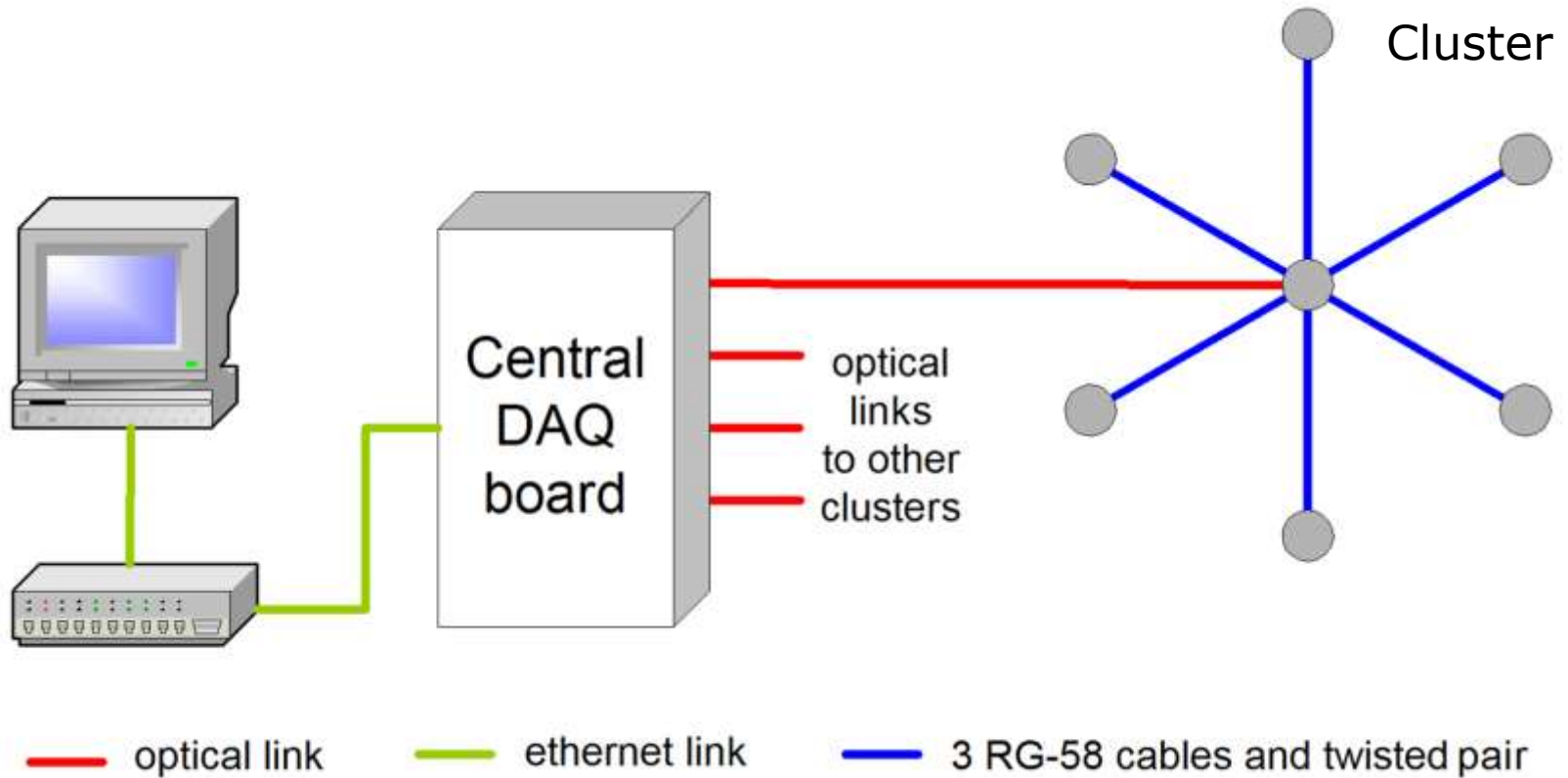
Tunka-133

2007





DAQ system

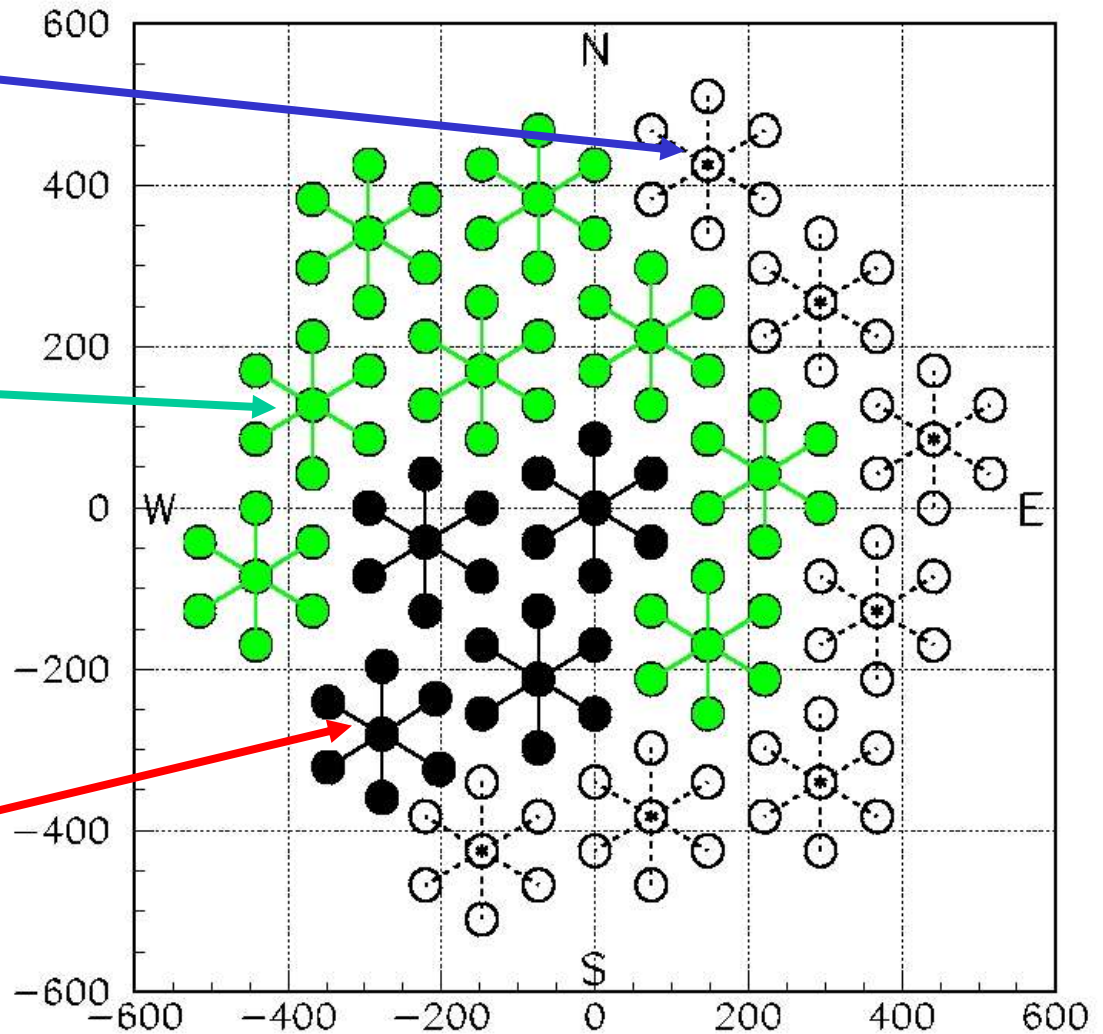


Layout of Tunka-133

2009 – 19 clusters

2008 – 12 clusters

2007 – 4 clusters
Operation: 270 h of clean weather, 200,000 triggers



ФЭУ типа ЕМІ-9350



Optical detectors

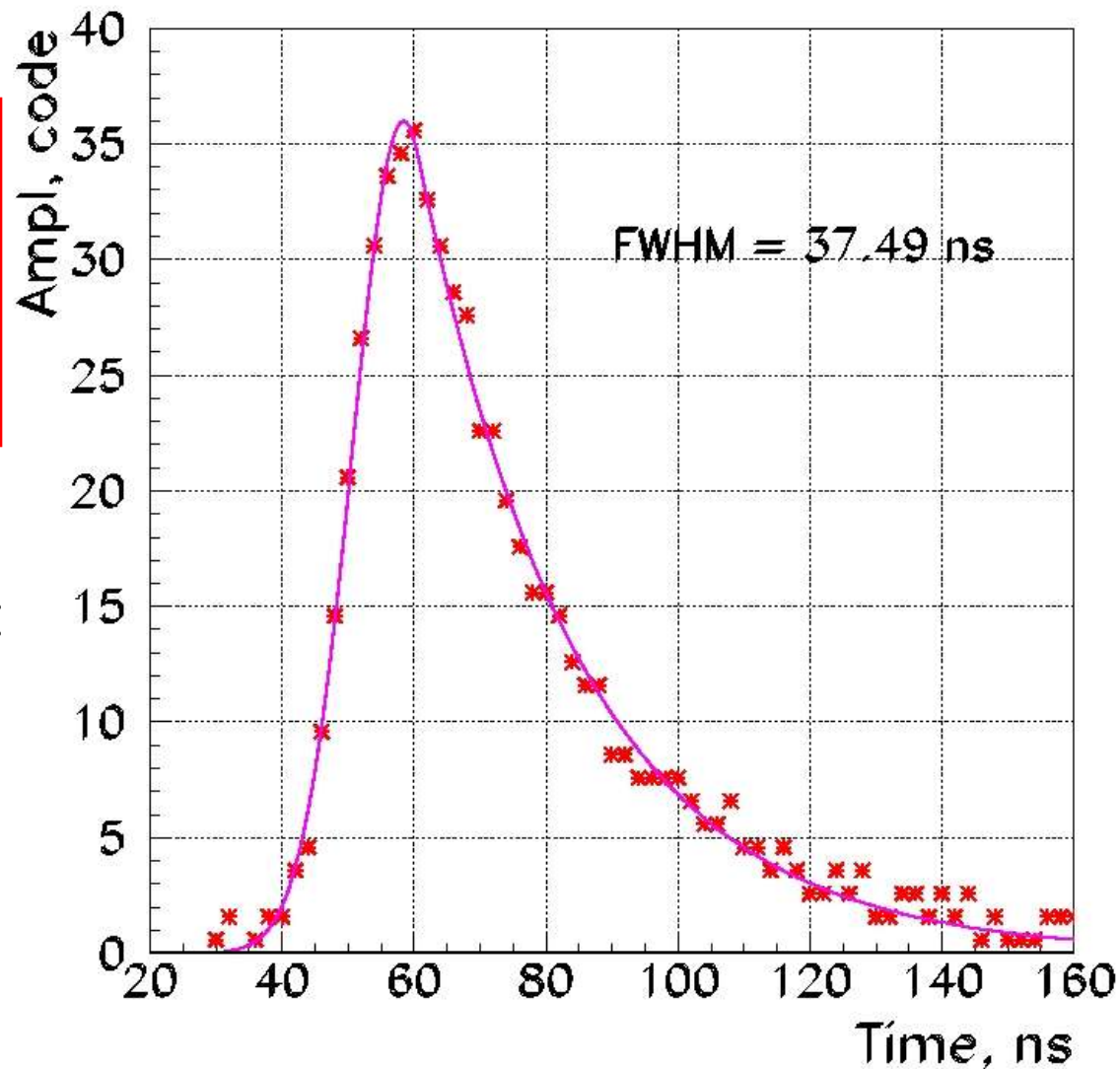


It contains EMI 9350 PMT with 20 cm photocathode diameter.

The angular aperture is defined by the shadowing of PMT by construction. $\theta \leq 45^\circ$

Пример
экспериментальног
о импульса

Расстояние от оси:
300 м.

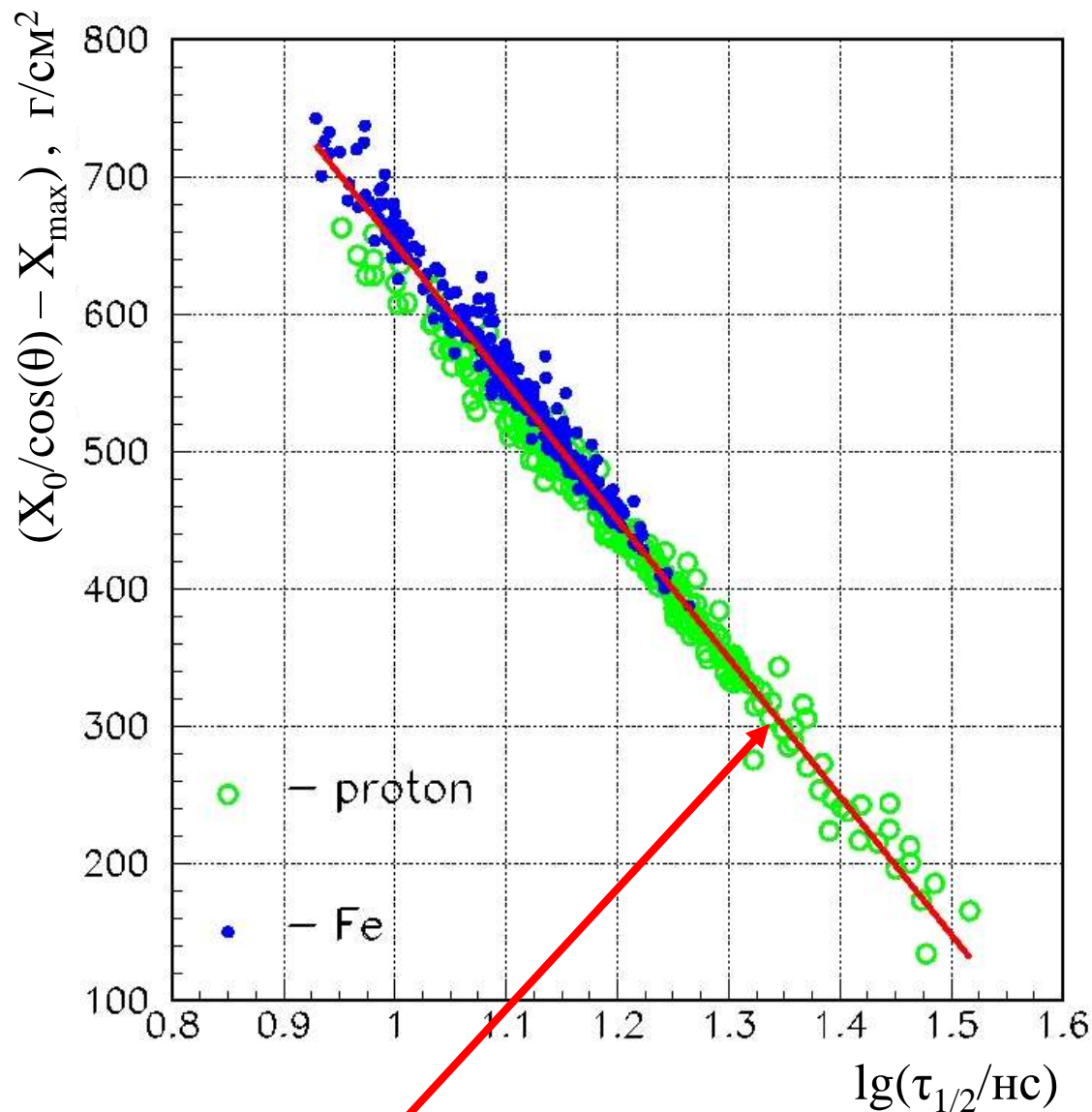


$$F_{\text{FALL}}(T) = A_{\text{QM}} \cdot \exp(-((T - T_{\text{QM}})/T_{\text{FALL}})), \text{ для } T > T_{\text{QM}}$$

$$F_{\text{FRONT}}(T) = \exp(-((T - T_{\text{QM}})/T_{\text{FRONT}})^2) \cdot F_{\text{FALL}}(T), \text{ для } T \leq T_{\text{QM}}$$

CORSIKA:
Измерение
относительного
положения
максимума по
длительности
импульса.
Частная
зависимость для
250 м от оси ШАЛ.

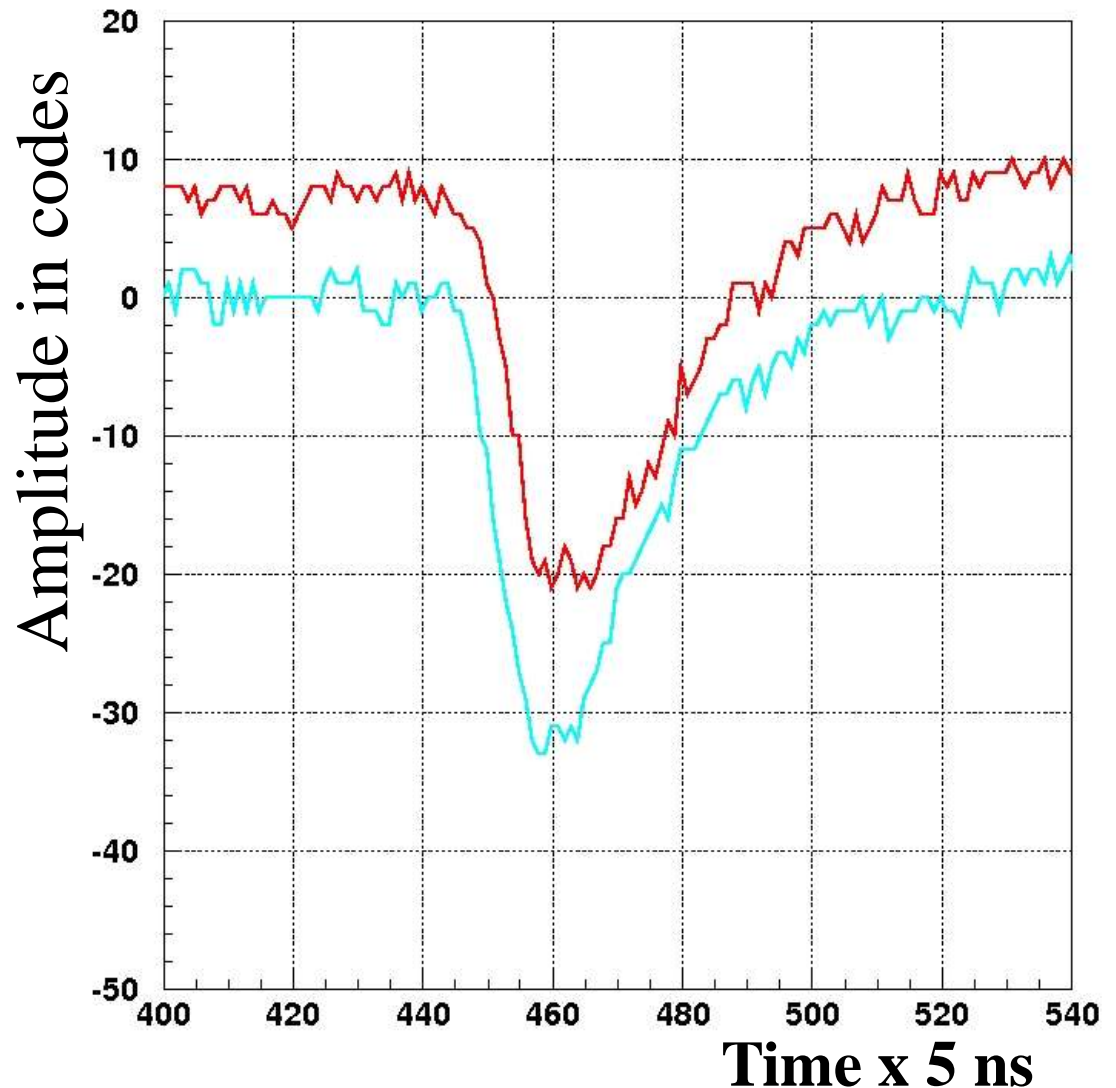
480 разыгранных ливней с E_0 от
1 ПэВ до 20 ПэВ и зенитными
углами θ от 0 до 25



$$(X_0/\cos(\theta) - X_{\max}) = 1659 - 1006 \cdot \lg(\tau_{1/2}/\text{нс}), \text{ Г/см}^2$$

“Normal” Cerenkov Light Pulses

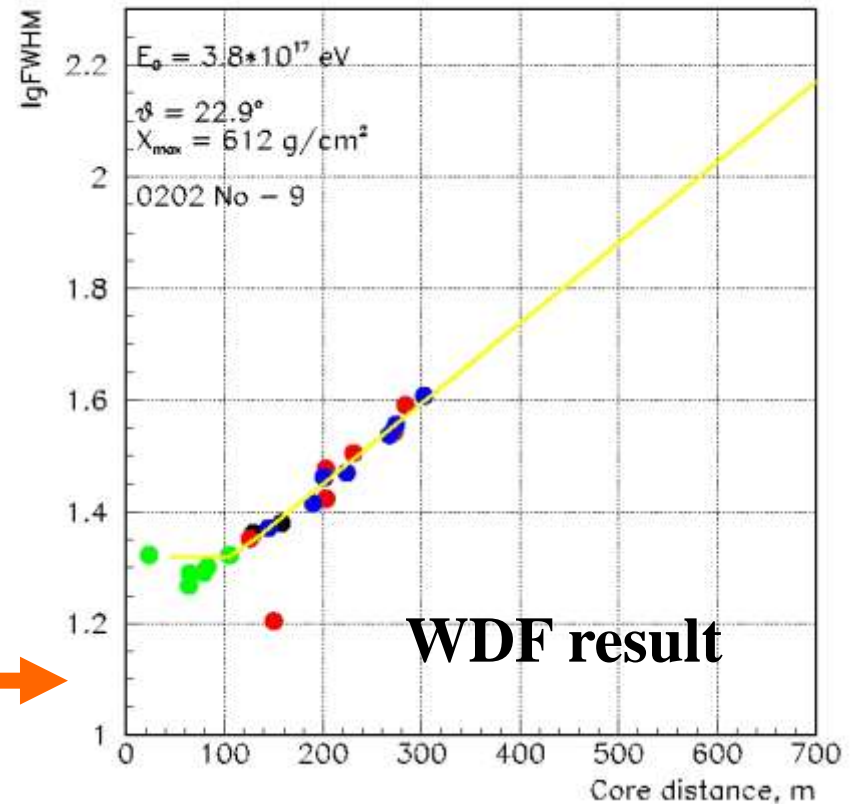
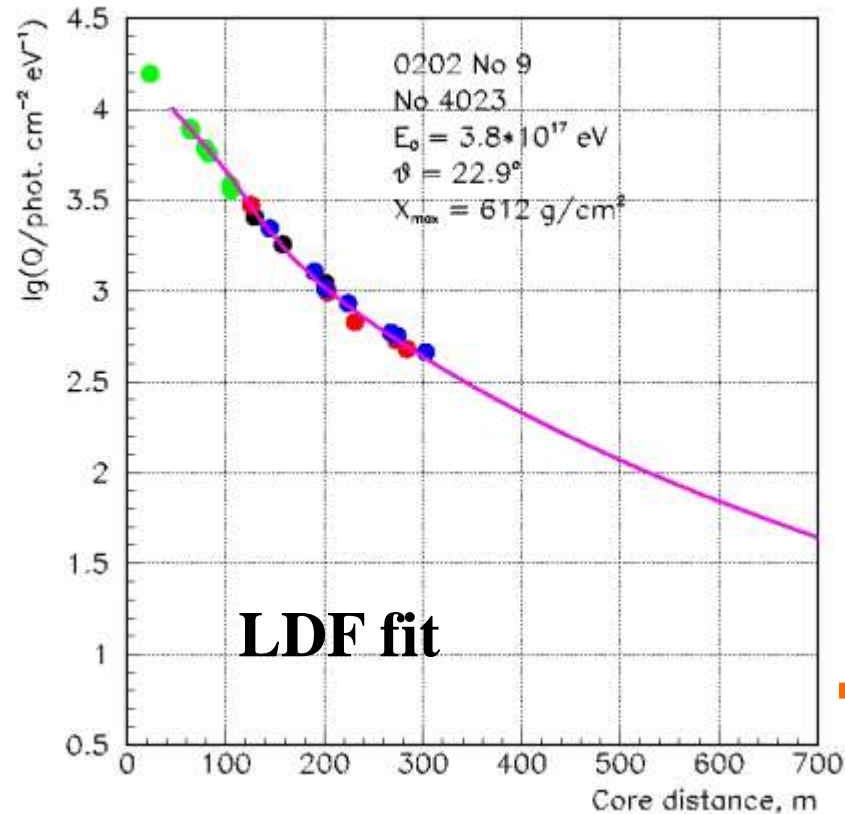
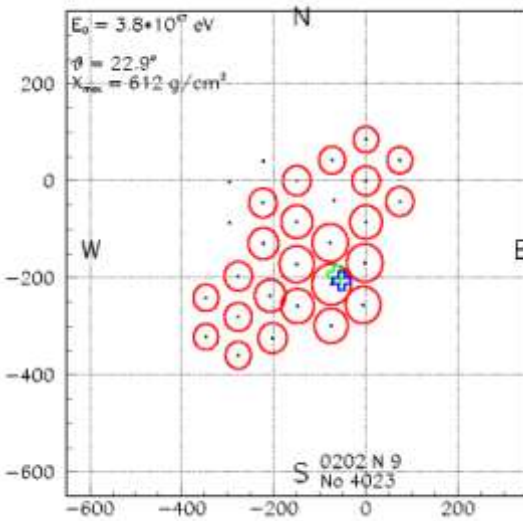
“Normal” Cerenkov light pulses at two detectors of one of the clusters at a core distance ~ 700 m. Other detectors record the similar pulse shape.



An example of an event inside the array.

The highest energy event

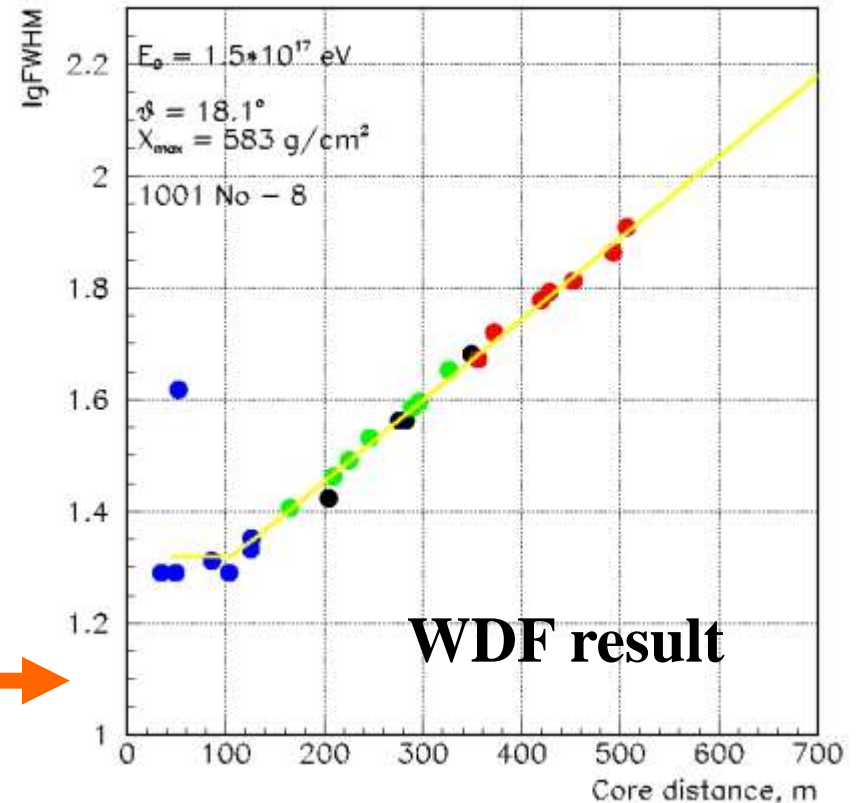
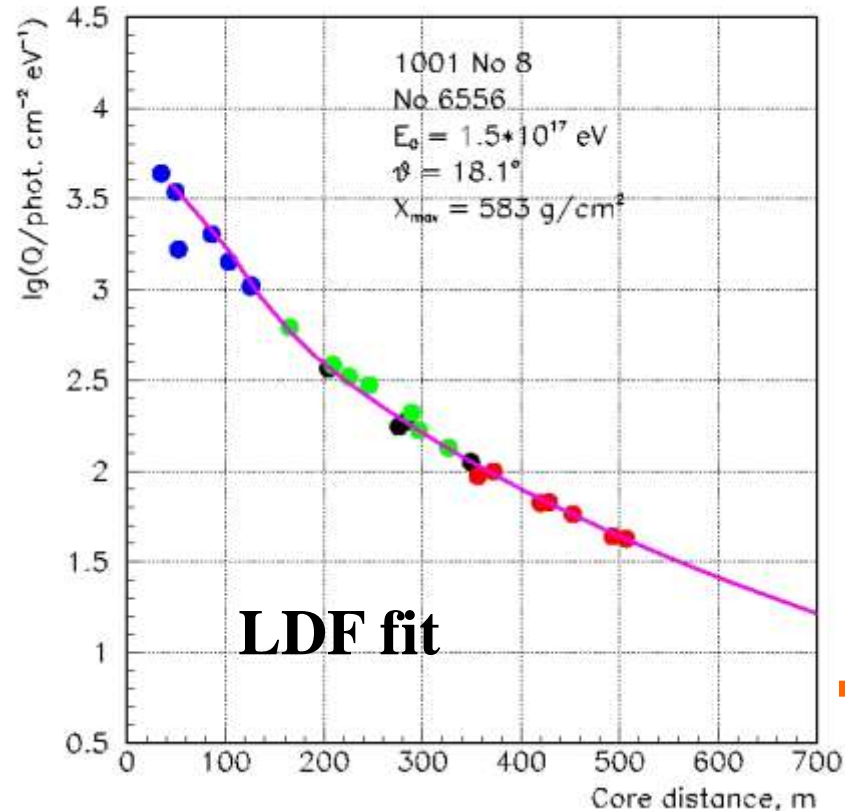
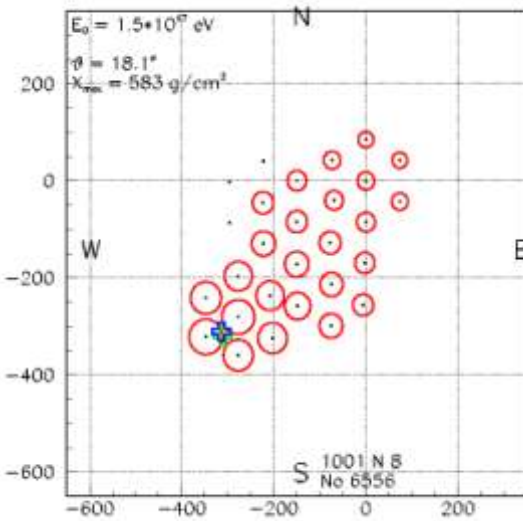
WDF – Width vs. Distance Function



High distance range event

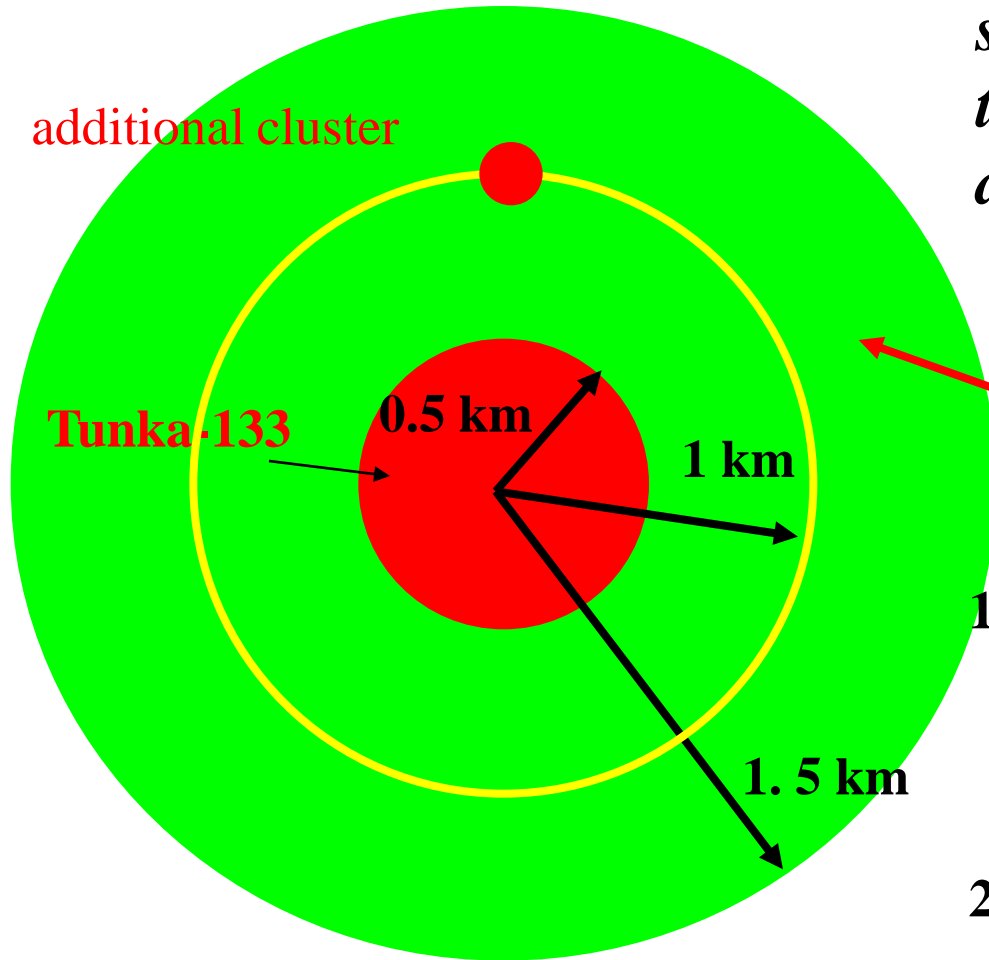
WDF is more simple than LDF.

FWHM $\sim \exp(R/R_0)$



EAS core reconstruction outside the array

This was John Linsley who suggested many years ago to use the pulse duration for EAS core distance measurement.



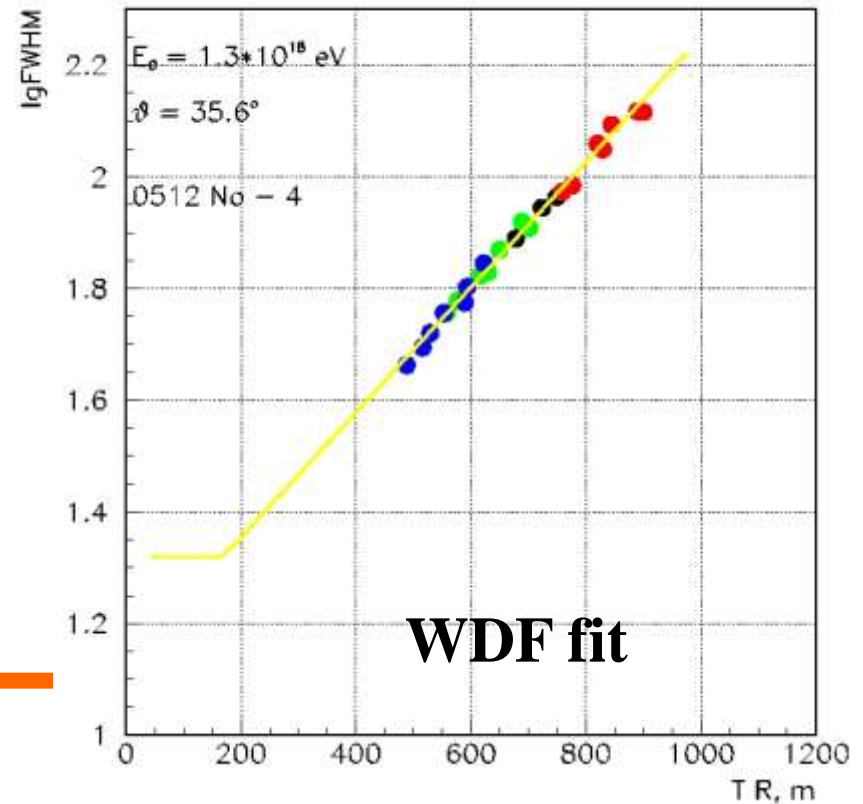
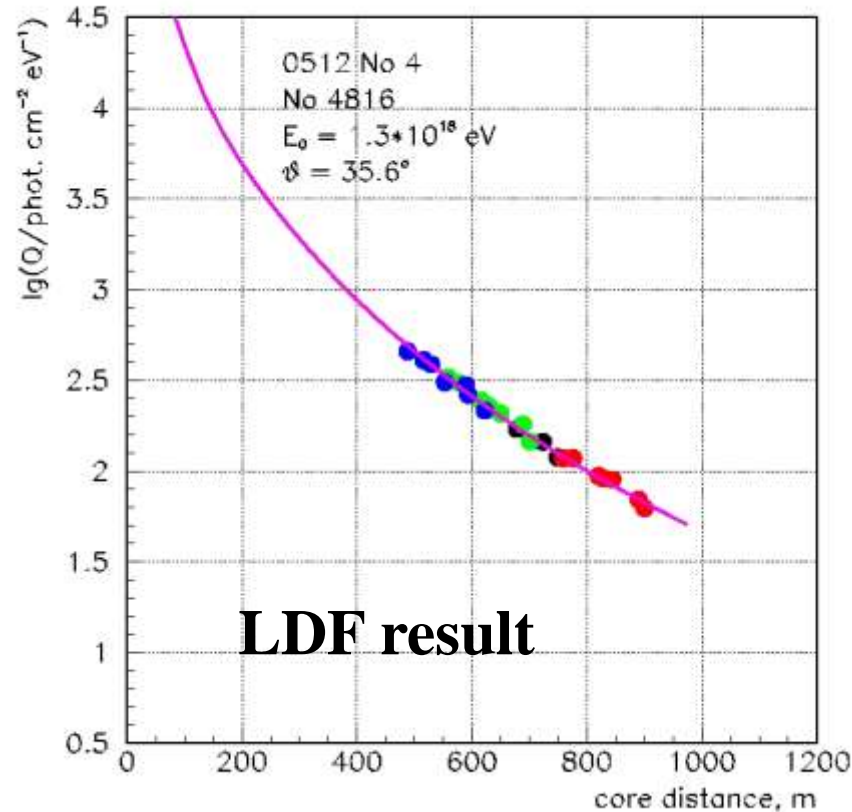
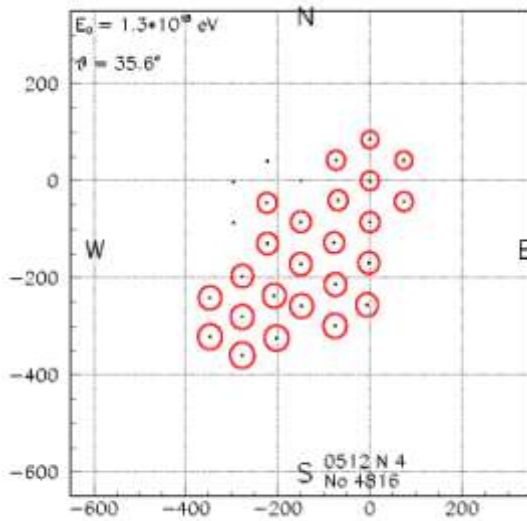
$$E > 5 \cdot 10^{17} \text{ eB}$$

Increasing of the effective area to 4 – 9 times

1. Study of WFD inside the array from 0 to 1 km. Use it for core reconstruction increases the effective area to 4 times.
2. Study of WFD with the additional cluster from 0.5 to 1.5 km. Use it for reconstruction increases the effective area to 9 times.

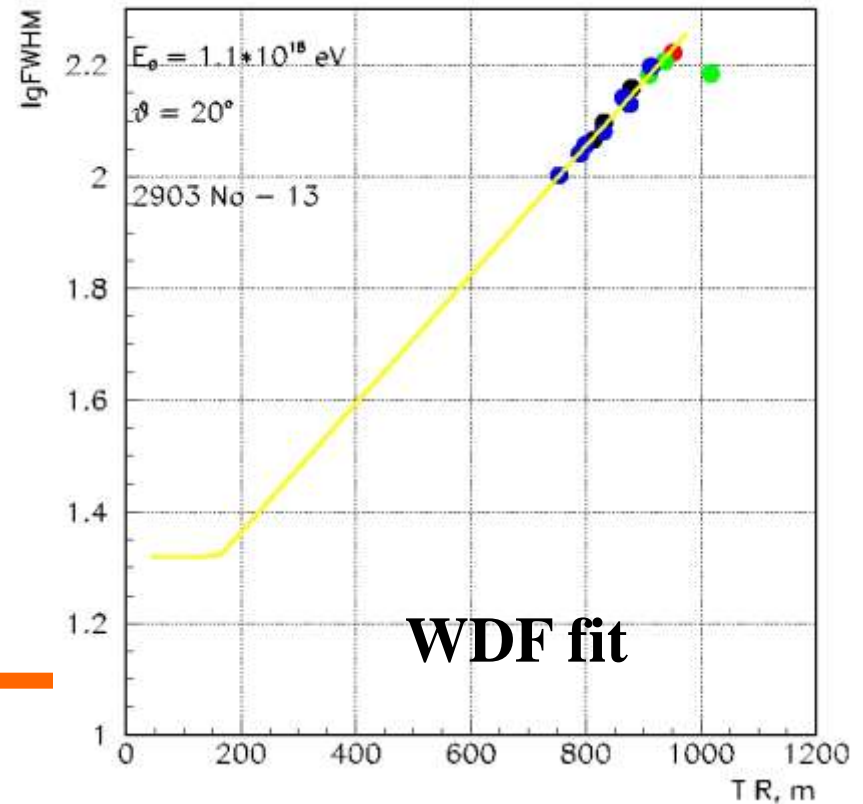
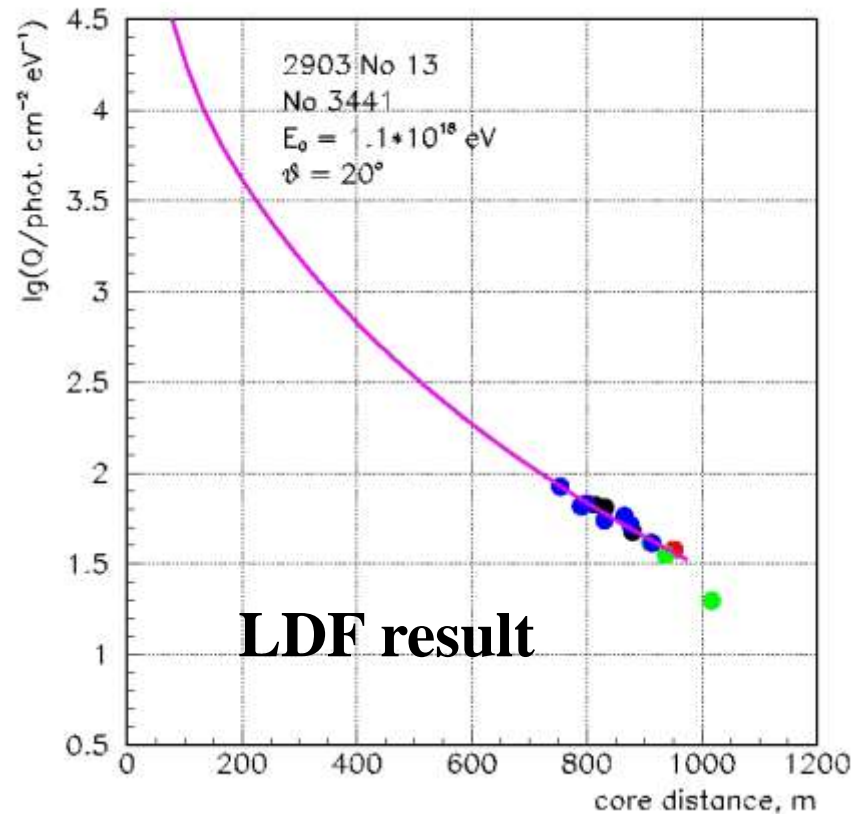
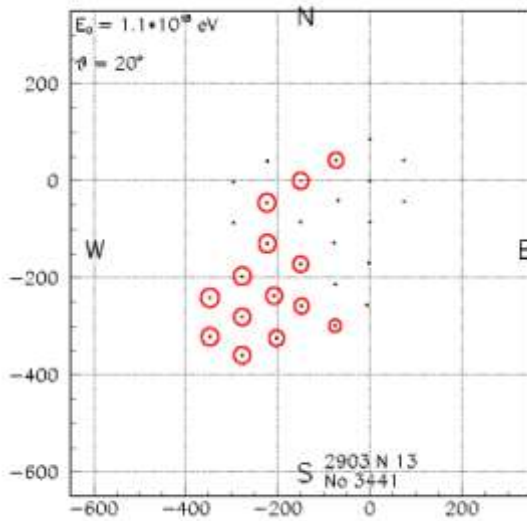
Distant core event

Experiment – very preliminary.



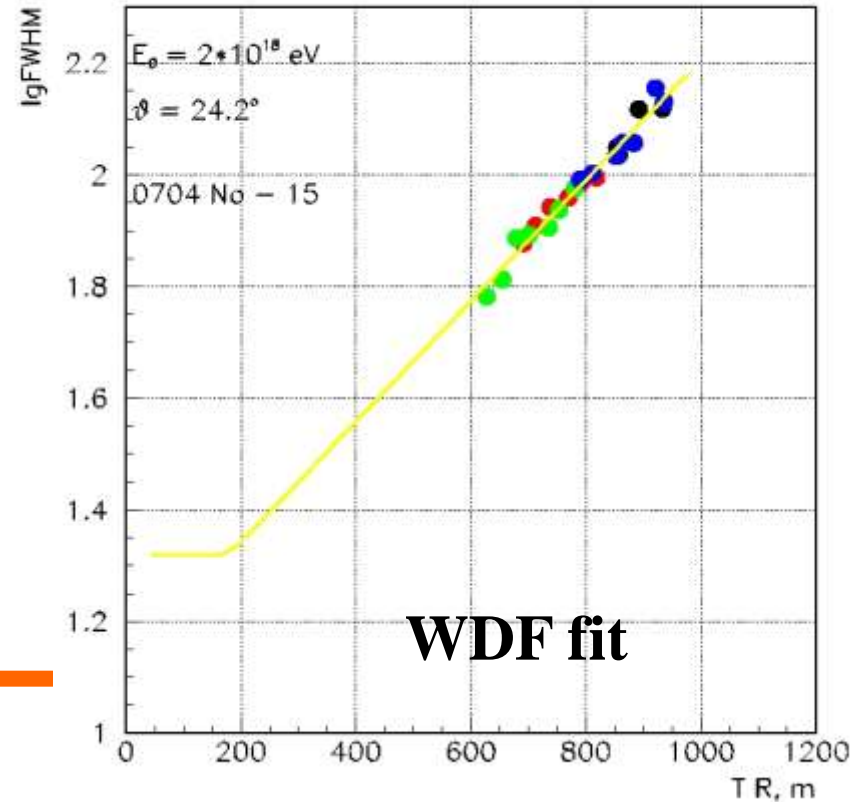
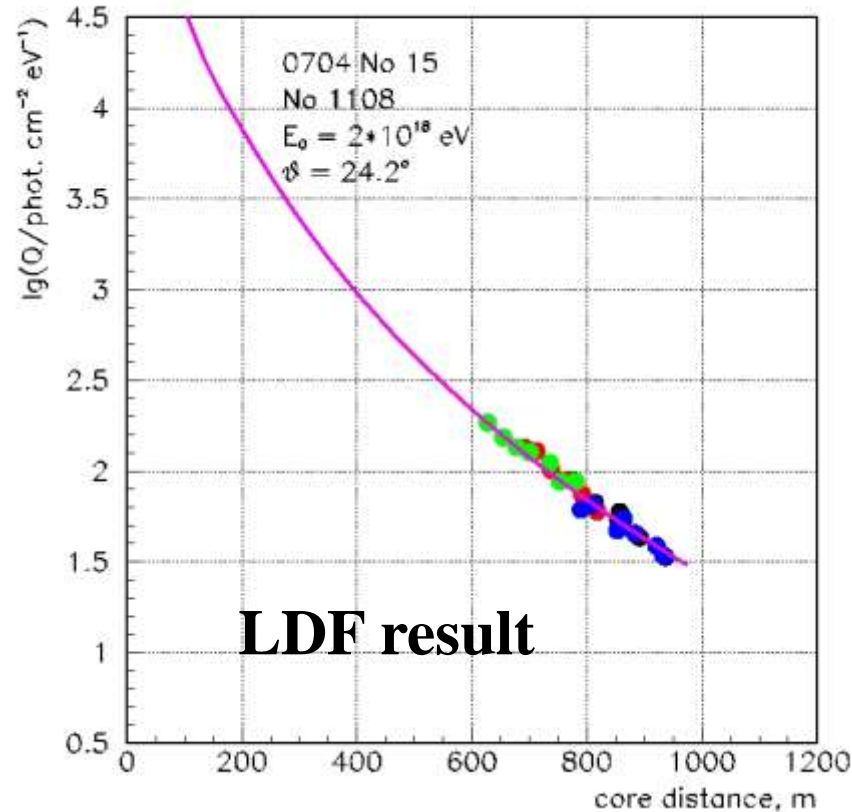
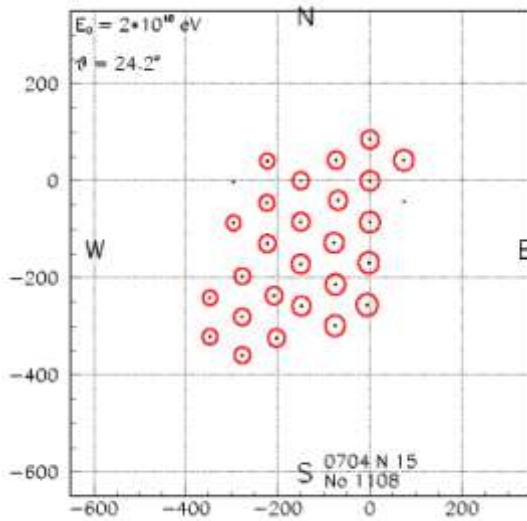
Distant core event

Experiment – very preliminary.



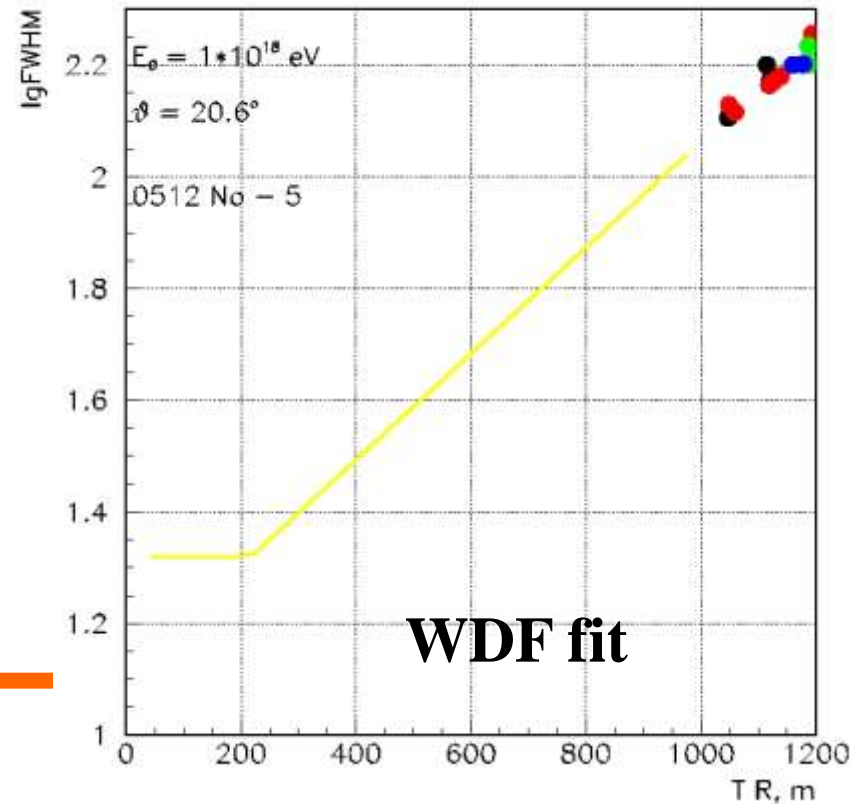
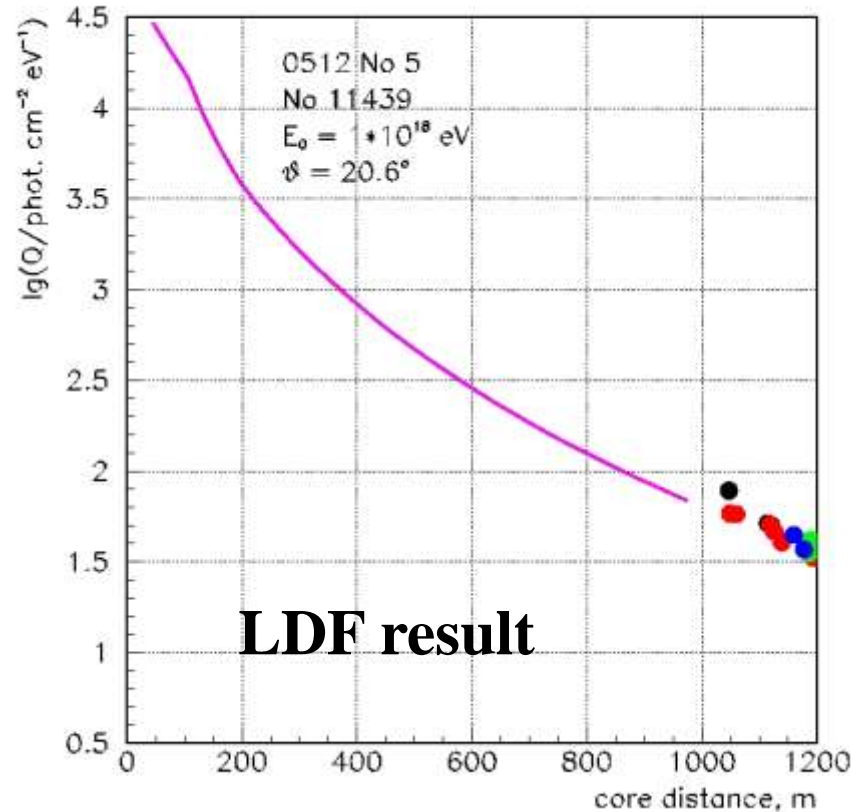
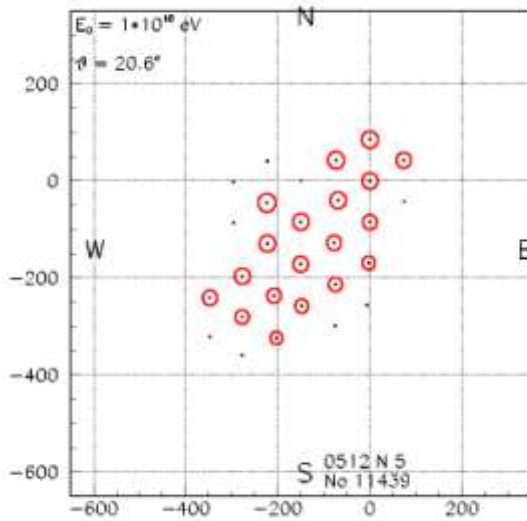
Distant core event

Experiment – very preliminary.

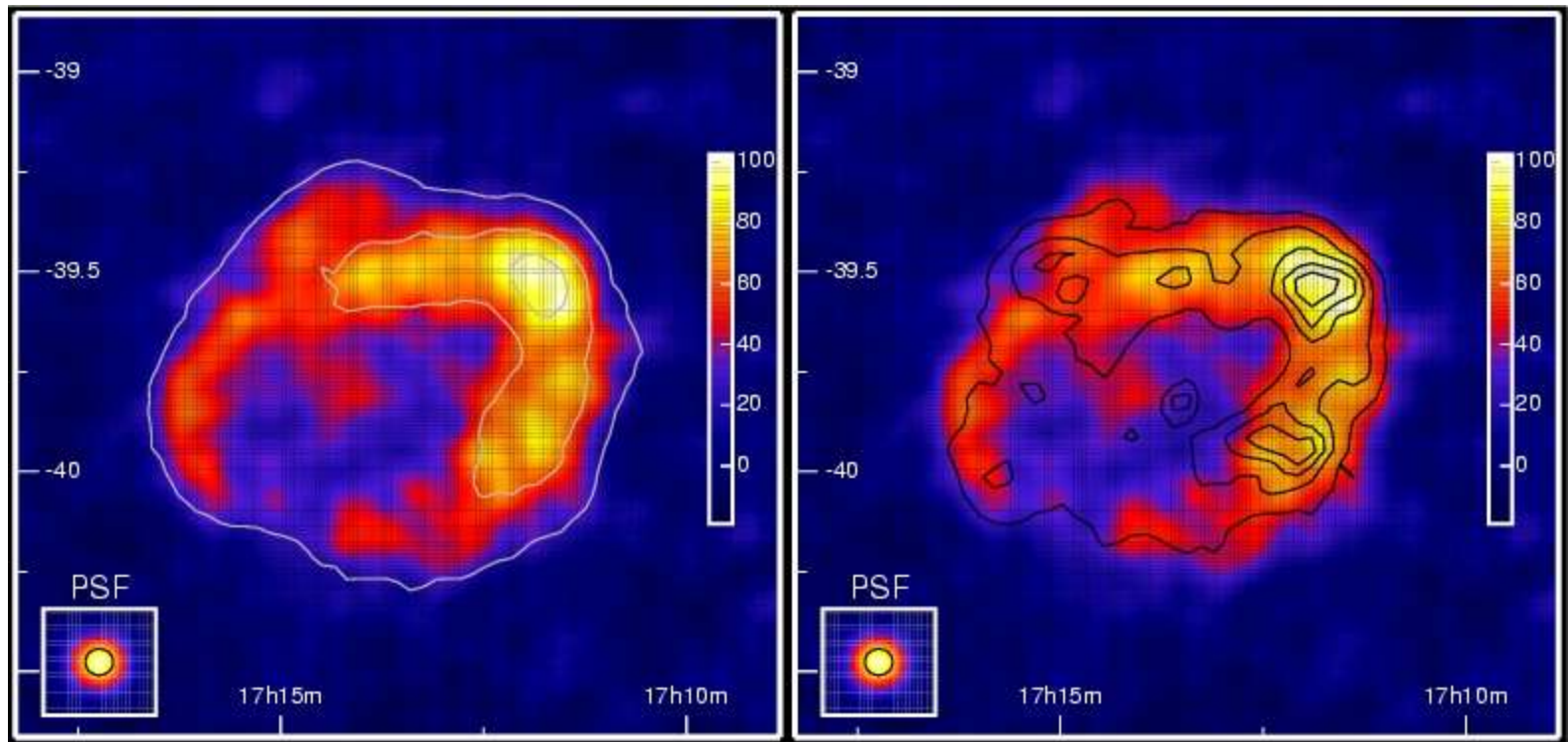


Distant core event

Experiment – very preliminary.



RXJ1713.7-4639



Active Galaxies

The dominant contribution to the total luminosity is not from stars but from an **Active Nucleus**

$R \sim 30 \text{ kpc}$

$R \sim 2 \text{ kpc}$

$R \sim 10^{-5} \text{ kpc}$

M87



M87 © Anglo-Australian Observatory
Photo by David Malin



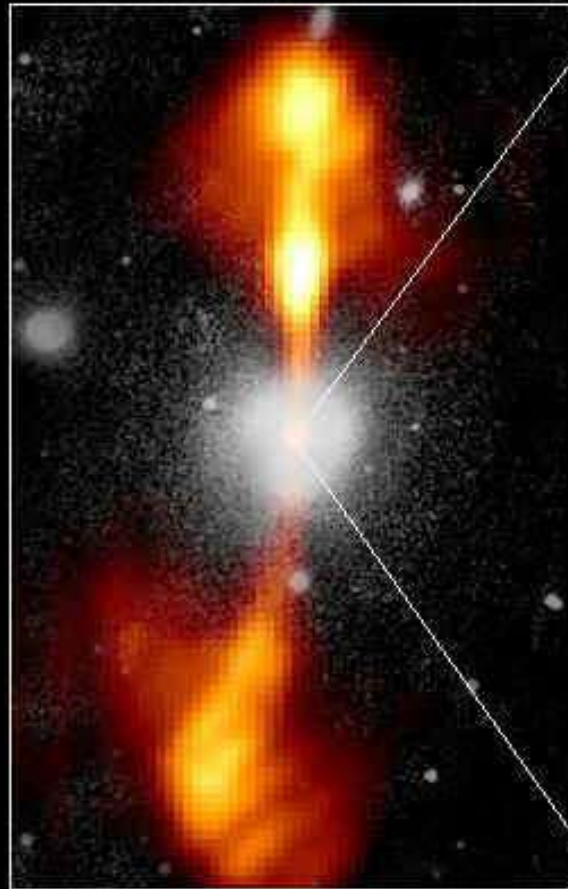
© 2000 Don Dixon / cosmographica.com

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

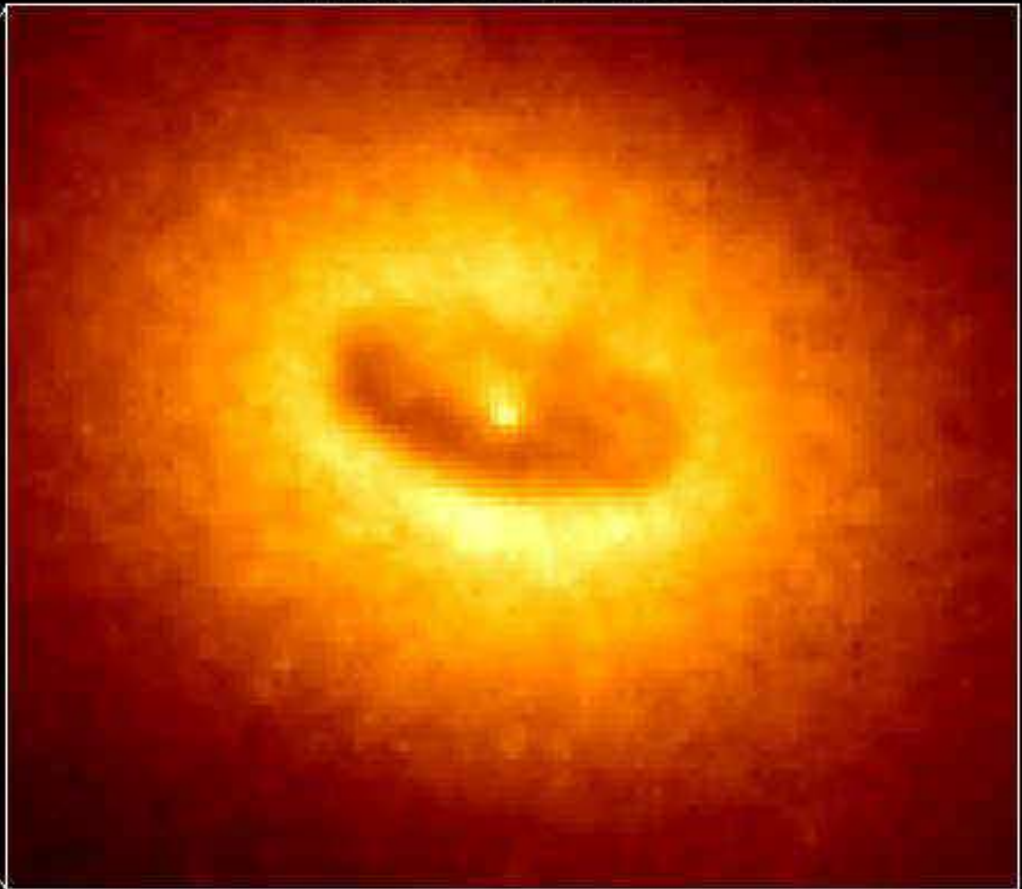
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk

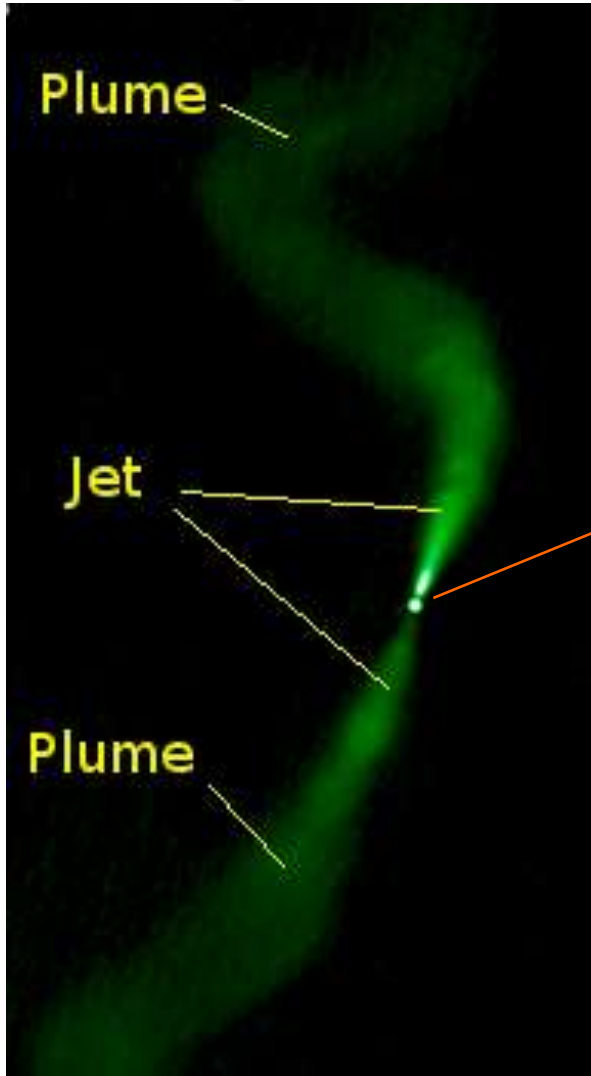


17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS

Observed morphologies: The Fanaroff-Riley classification

FR I or jet dominated

FR II or lobe dominated
(classical doubles)

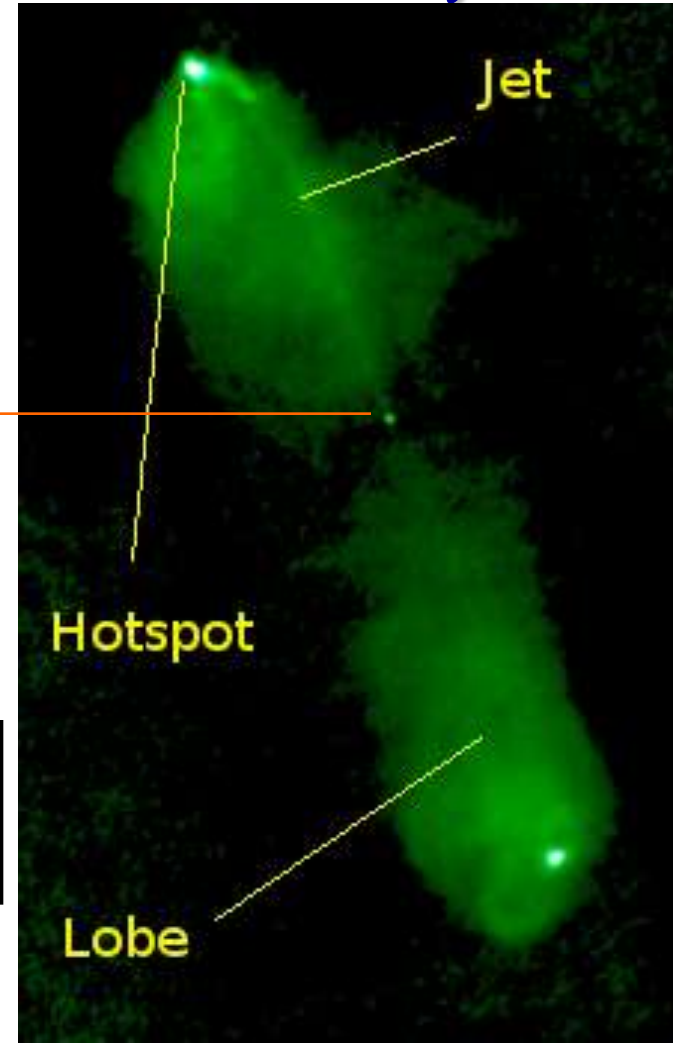


3C 31
VLA

Active
Nuclei

3C 98
VLA

**FR II only have
Hot-spots!**



Hotspot

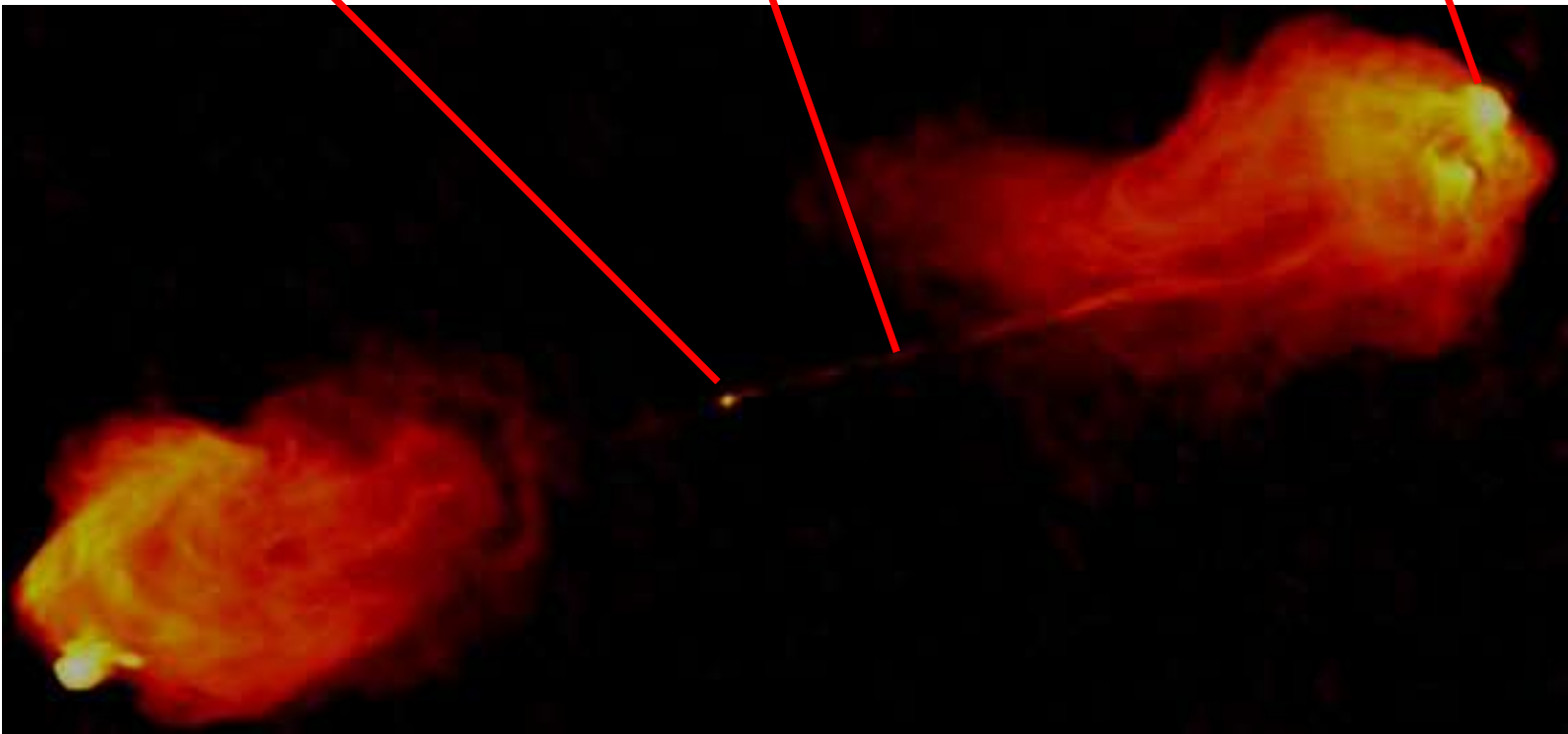
Lobe

Possible sites of UHECRs acceleration

Active
Nucleus:
all AGNs

Jet: Radio
loud AGNs

Hot-spot:
FR II radio
sources



Дополнительные детекторы астрофизического комплекса

Радиоантенны Канзасского (США)
университета

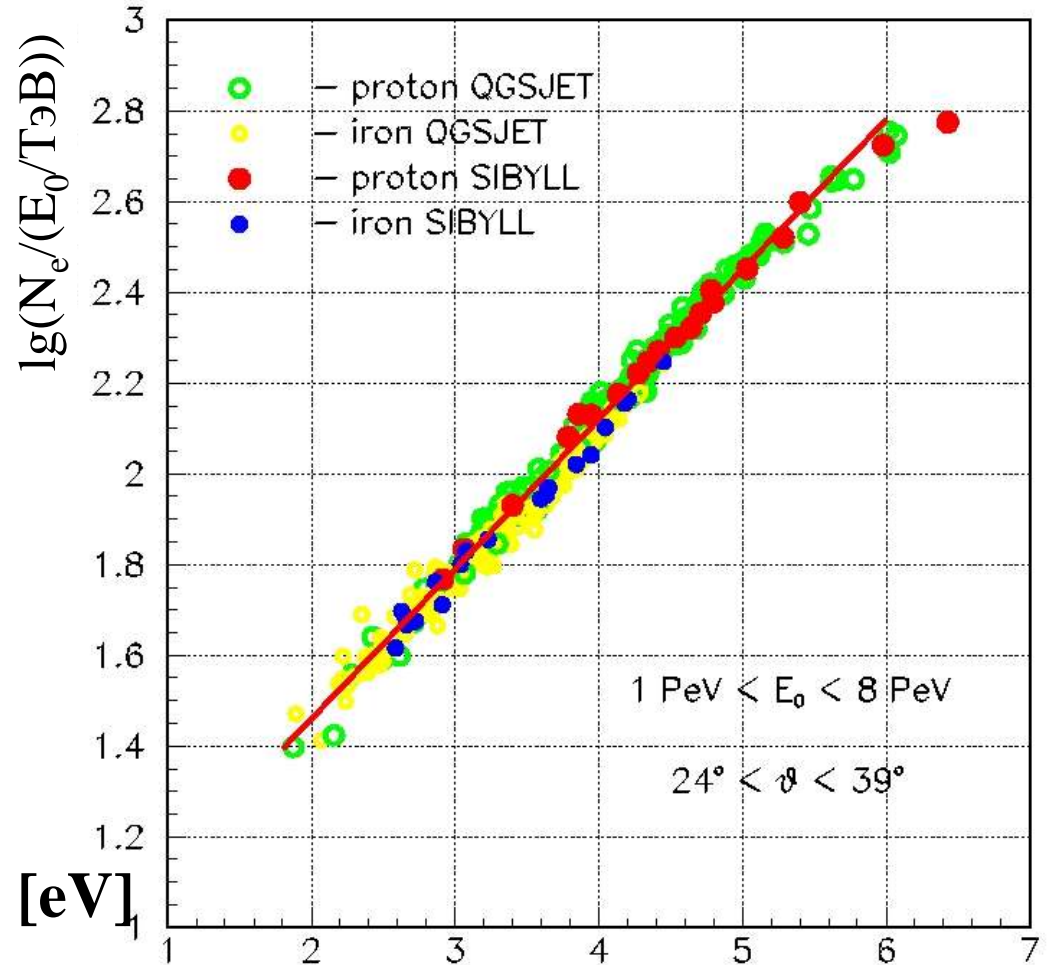
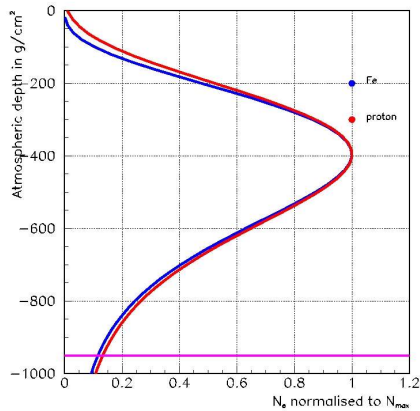
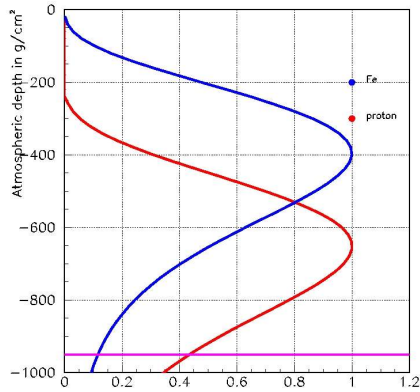


Система
роботизированных
автоматических
телескопов МАСТЕР
(ГАИШ, МГУ)

Выводы

1. На установке Тунка-133 будет получен энергетический спектр космических лучей в диапазоне $10^{15} - 10^{18}$ эВ.
2. Будет решен вопрос энергетической калибровки гигантских установок.
3. Будет оценено изменение с ростом энергии среднего состава космических лучей и найдена предельная энергия Галактических космических лучей.
4. Будет проводиться поиск гигантских гамма всплесков и их источников в оптическом диапазоне.

CORSIKA: Корреляция отношения N_e/E_0 с крутизной ФПР P

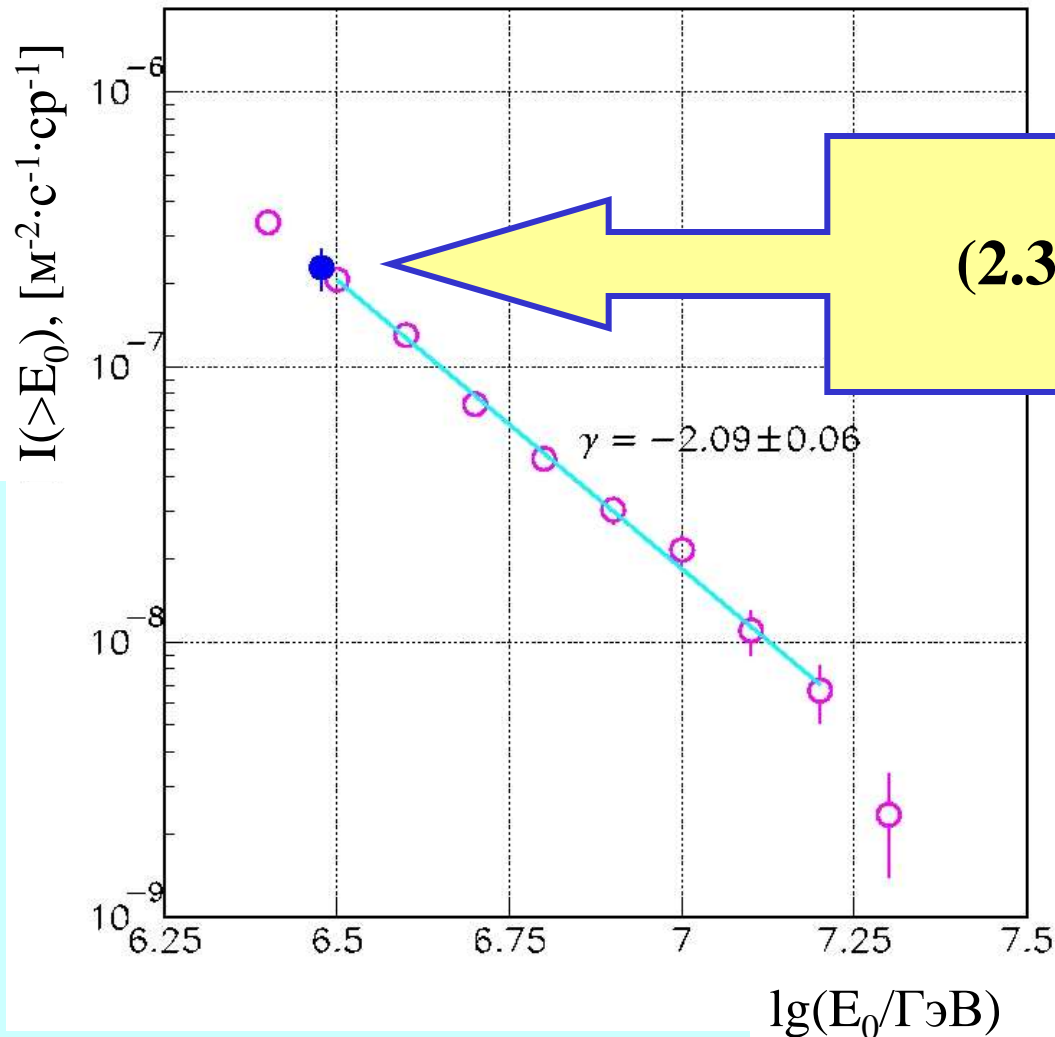


$$E_{SIZE} = 1.59 \cdot 10^{11} N_e / \exp(0.76P), [eV]_1$$

Комбинированный метод $N_e + P$

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

Интегральный энергетический спектр, полученный в эксперименте QUEST.

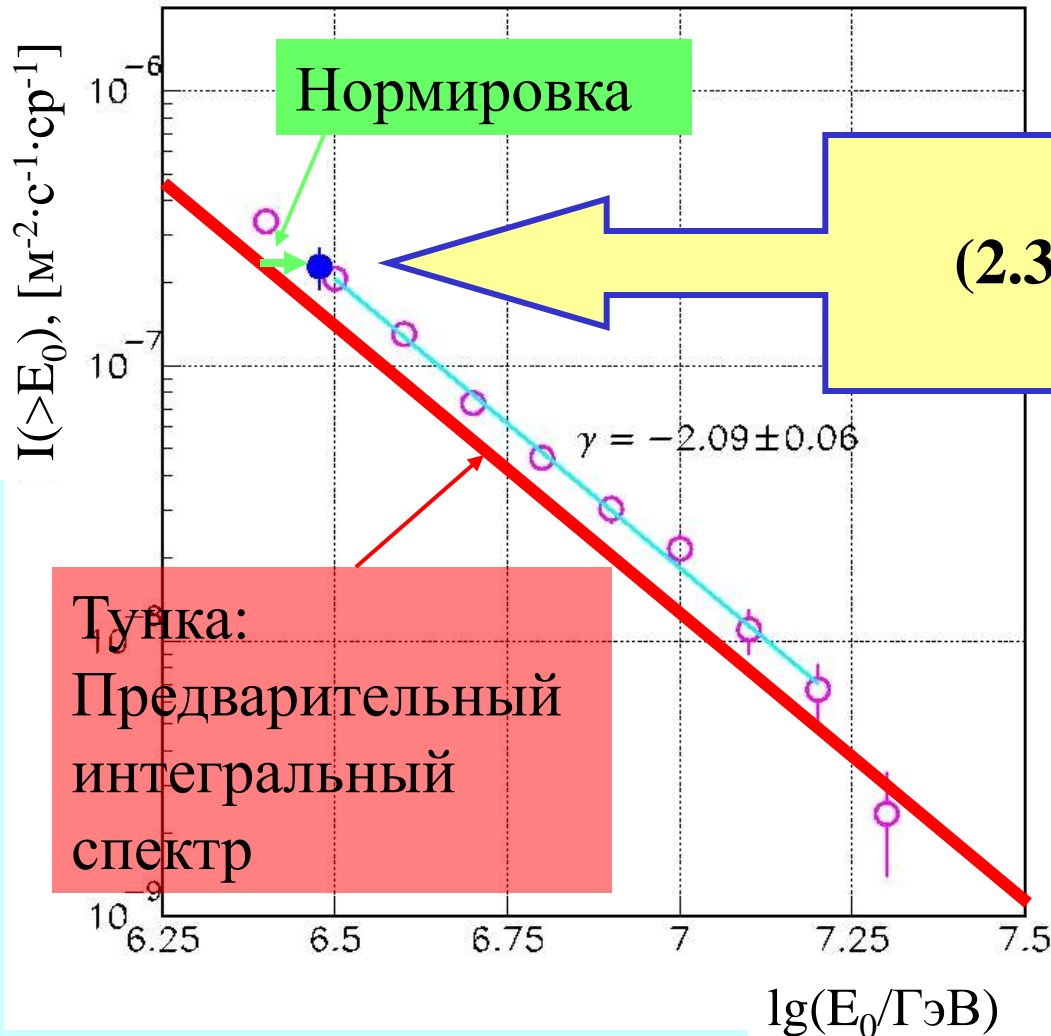


$$I(E_0 > 3 \cdot 10^{15} \text{ эВ}) = (2.3 \pm 0.1^{\text{стат}} \pm 0.4^{\text{сист}}) \cdot 10^{-7} \text{ [M}^{-2} \cdot \text{c}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}\text{]}$$

594 события с энергией $E_0 > 3 \cdot 10^{15}$ эВ

Абсолютная калибровка энергии в эксперименте Тунка-25

**QUEST: Эталонная
ИНТЕНСИВНОСТЬ**



$$I(E_0 > 3 \cdot 10^{15} \text{ эВ}) = (2.3 \pm 0.1^{\text{стат}} \pm 0.4^{\text{сист}}) \cdot 10^{-7} \text{ [м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}\text{]}$$

Метод обеспечивает погрешность абсолютной калибровки не более 10%