

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ



Кузьмичев Л.А.
НИИЯФ МГУ
ноябрь 2010

План доклада

1. Введение: открытие космических лучей.
2. Что мы знаем от космических лучах сверхвысоких энергий.
3. Широкие атмосферные ливни –открытие и методы регистрации.
4. Крупные современные установки.
5. Главные результаты последних лет.
6. Главные результаты последних лет.
7. Космические лучи предельно высоких энергий.

Принятые обозначения:

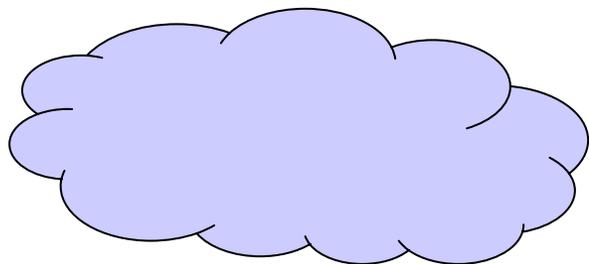
10^{12} эВ - 1 ТэВ

10^{15} эВ - 1 ПэВ

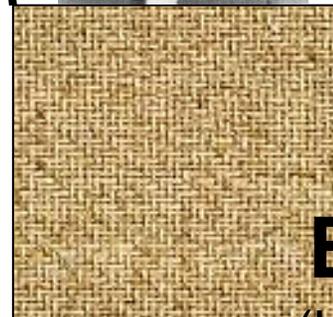
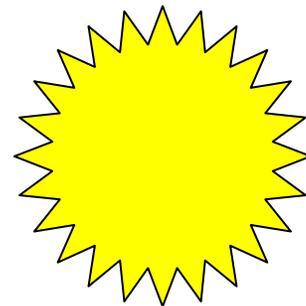
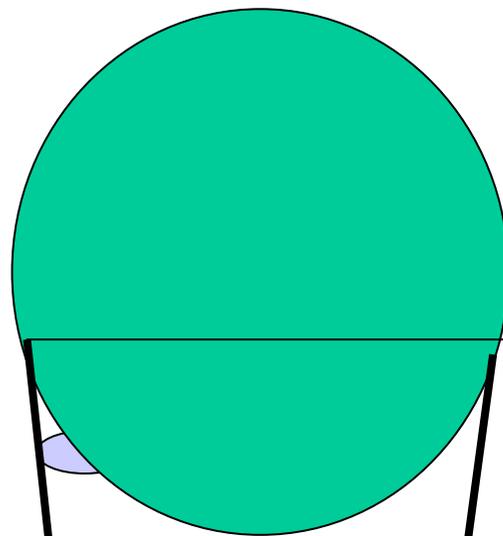
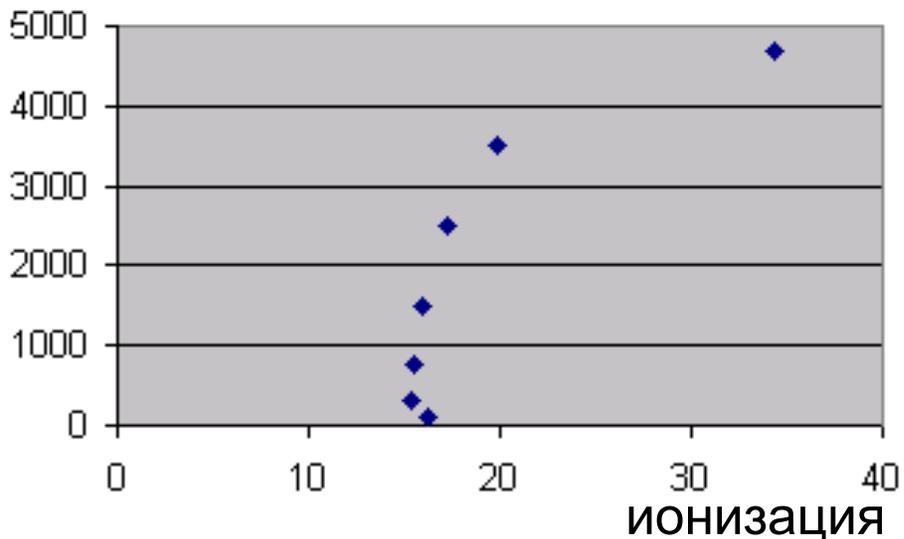
10^{18} эВ - 1 ЕэВ

10^{21} эВ - 1 ЗэВ

Открытие космических лучей

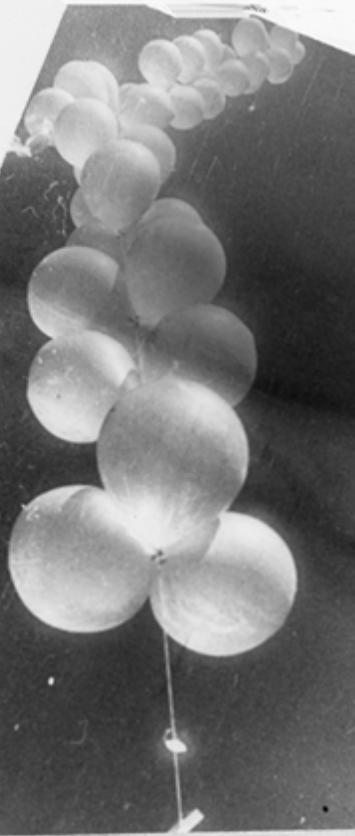


Высота (м)



Виктор Гесс
(Нобелевская премия
1936)

Радиозонды
Вернова



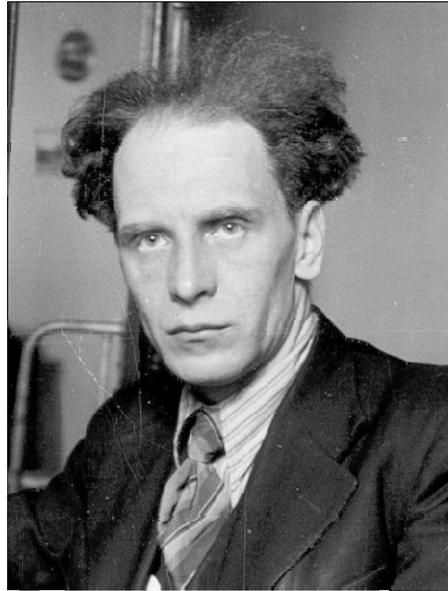
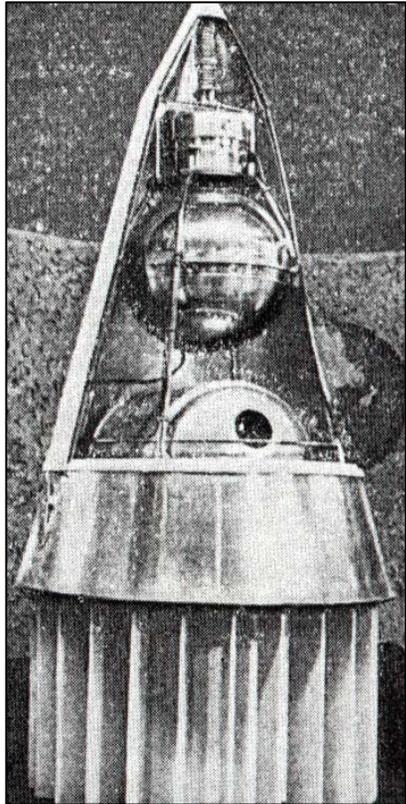
С.Н.Вернов 1912-2012

Директор НИИЯФ МГУ
1960-1982

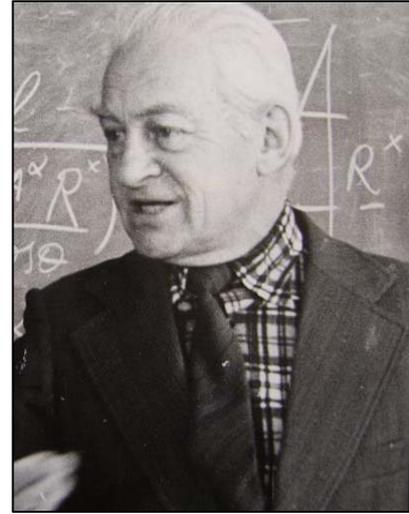
Зам.директора 1946-1960

Первый физический эксперимент в космосе (ноябрь, 1957)

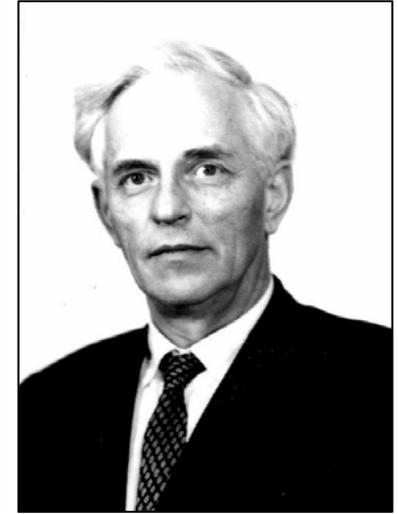
Scientists from Moscow State University
provided the first space physics experiment in space



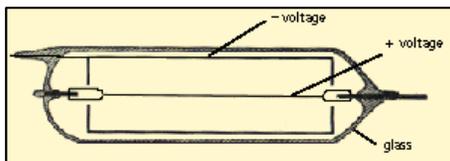
S. N. Vernov



N.L. Grigorov



A.E. Chudakov



GM - tube



Yu. I. Logachev

Космические лучи (V.Hess, 1912)

Cosmic rays – proton and π nuclear with spectrum up to $\sim 10^{20}$ эВ

Flux: $\sim 10^4 \text{ m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ at $E \sim 10^9 \text{ eV}$

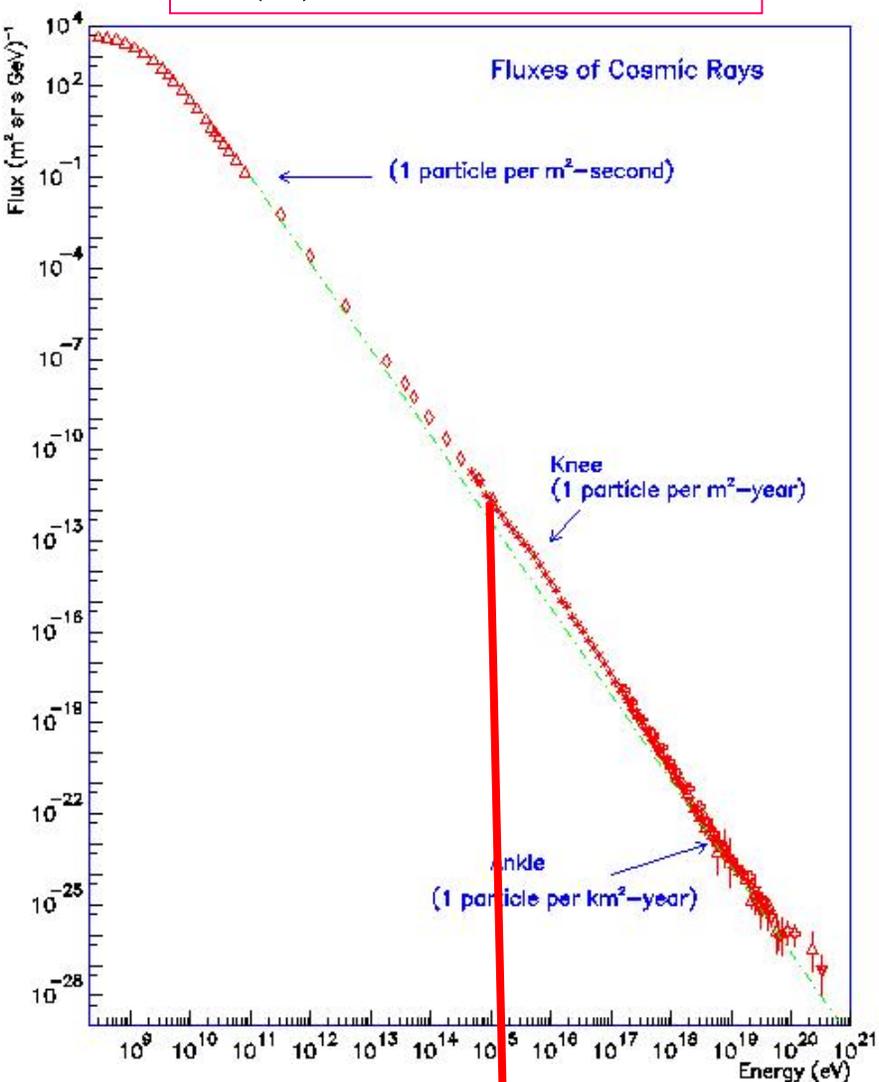
20 порядков !

$\sim 10^{-2} \text{ km}^{-2} \text{ year}^{-1}$ at $E \sim 10^{20} \text{ eV}$

Astrophysics: In what sources accelerated and how propagated in space (origin and propagation)

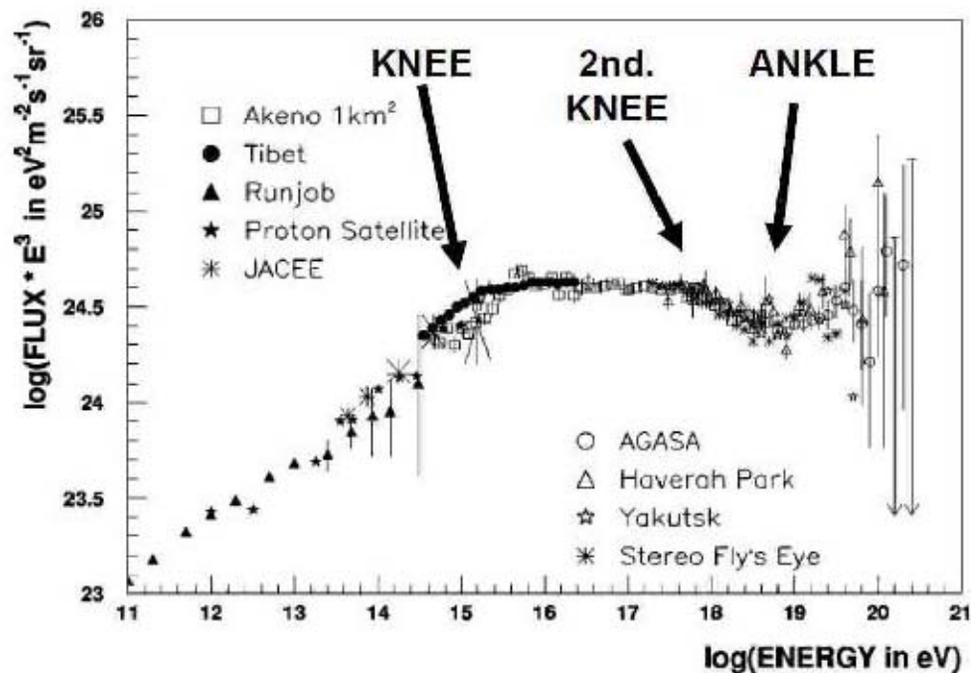
High energy physics : Study of interaction at UHE and search for new particles

$$P(E) = A E^{-(\gamma+1)}$$



γ : от 1.7 до 2

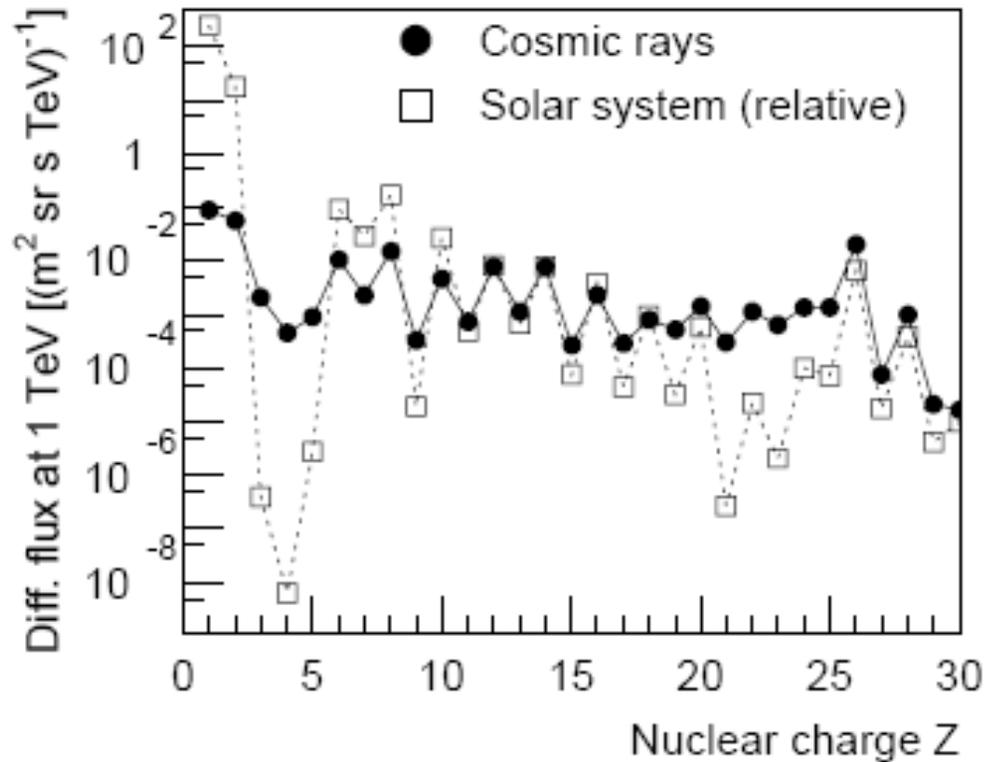
$$P(E) \cdot E^3$$



Метод регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ)

«Прямые» методы

Массовый состав



5 групп ядер

1. Протоны
2. Гелий
3. CNO
4. Si
5. Fe

Вторичные ядра:

Литий, Бериллий, Бор
В космических лучах их
в 10^4 - 10^5 больше, чем в
Солнечной системе

Рождение легких ядер и время жизни космических лучей в Галактике

Легкие ядра – L (Li, Be, B) , Средние ядра – M (Z – 6-9)

$L/M \approx 0.3$ (при $E \square 1$ ГэВ) - (в 10^5 раз больше чем в звездах) $\sim E^{-0.7}$



$$L = 4 \cdot 10^{24} \text{ см} = 4 \cdot 10^6 \text{ парсек}$$

Диаметр Галактики – $3 \cdot 10^4$ парсек

Время жизни – $L / c \approx 4 \cdot 10^6$ лет

$$\tau(E) = \tau_0 E^{-0.7}$$

Направления исследований

1,2. Галактические космические лучи.

Какие источники? Действительно ли это остатки сверхновых? До каких энергий могут ускоряться космические лучи в этих источниках? Какой вклад от других источников? Есть ли близкие локальные источники? В чем причина существования “колена” в спектре? При какой энергии начинают доминировать метагалактические космические лучи?

3. Метагалактические космические лучи.

Какие источники? Есть ли обрезание спектра на реликтовом излучении? Нужна ли новая физика (нарушение Лоренц-инвариантности, сверхтяжелые частицы, топологические дефекты) для объяснения экспериментальных данных

Требования к источникам космических лучей

1. Возможность ускорение космических лучей до высоких энергий

$$E_{\max} \sim Z \cdot H \cdot L \quad (\text{правило Хиллоса})$$

(Z – заряд, H – магнитное поле, L – размер источника)

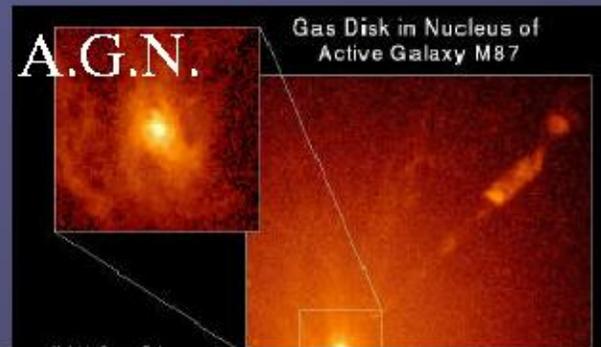
2. Обеспечить экспериментально наблюдаемую интенсивность космических лучей:

плотность энергии ~ 1 эВ/см³ (в Галактике)

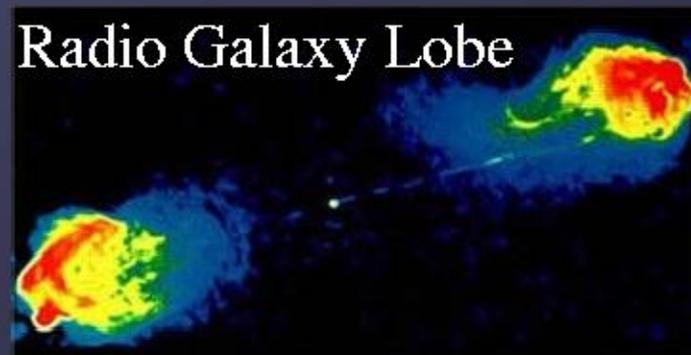
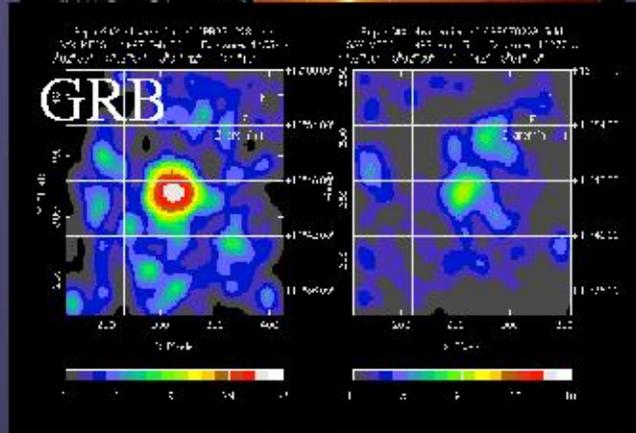
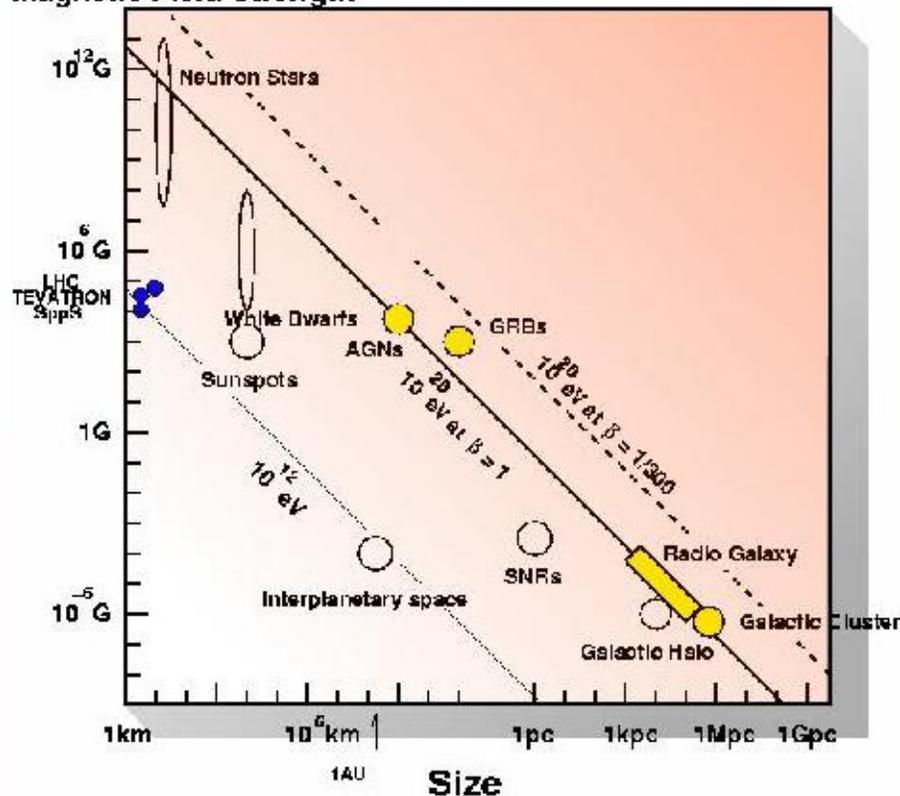
$$\sim 5 \cdot 10^{40} \text{ эрг/сек}$$

$$\text{темп генерации} \quad E^2 \frac{d\dot{n}}{dE} (10^{19} - 10^{21} \text{ эВ}) \sim 10^{44} \frac{\text{эрг}}{\text{Мпск}^3 \text{ год}}$$

Candidates for UHE C.R. accelerator



Magnetic Field Strength



Ускорение КЛ ударными волнами

Замечательная особенность-степенной спектр ускоренных частиц $\gamma=(\sigma+2)/(\sigma-1)$, где σ степень сжатия ударной волны, для сильных ударных волн $\sigma=4$ и $\gamma=2$

Крымский 1977;
Bell 1978

Максимальная энергия E_{\max} :

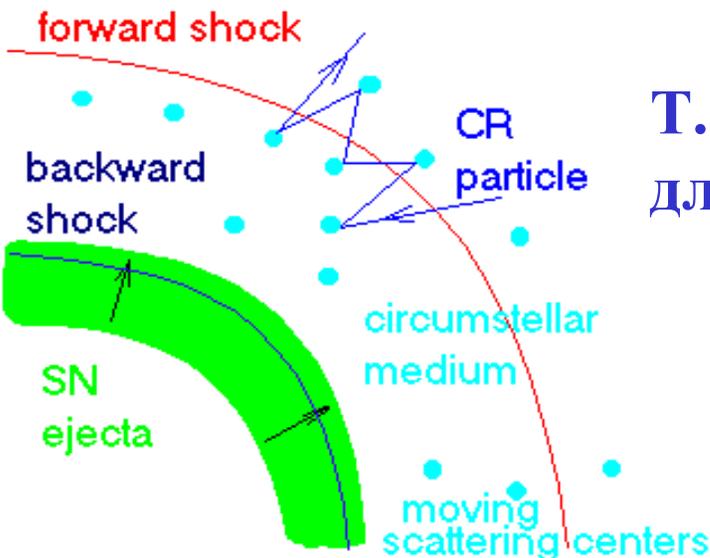
Спектр в источнике:

$$P(E) \sim E^{-2}$$

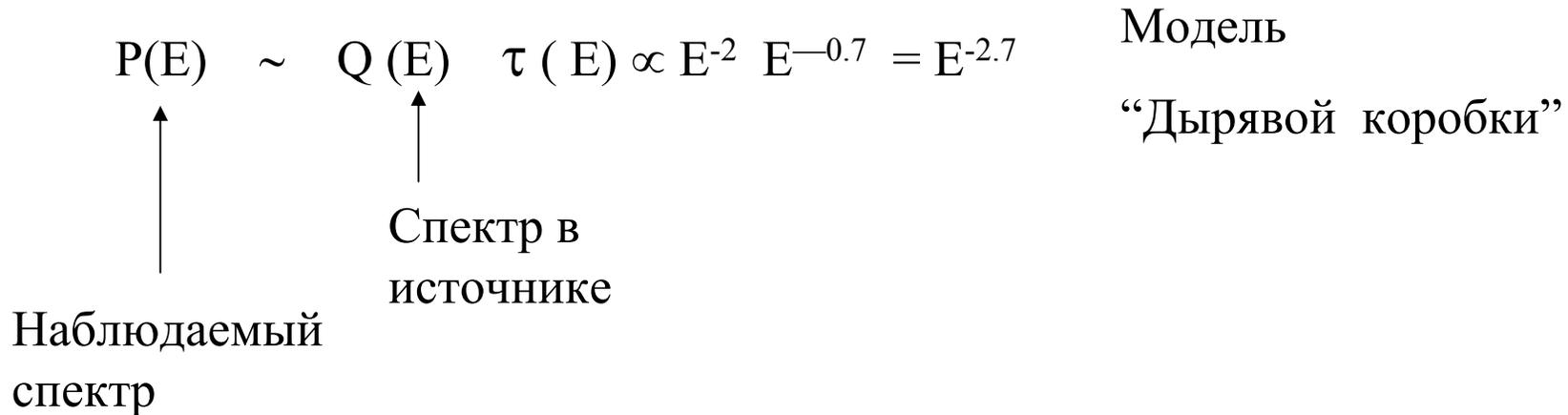
$$E_{\max} = Z \cdot 10^{14} \text{ eV} \left(\frac{B}{10 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{R_{\text{sh}}}{3 \text{ pc}} \right) \left(\frac{u_{\text{sh}}}{3000 \text{ km s}^{-1}} \right)$$

Т.е. необходимо усиление магнитного поля для ускорения до 10^{15} эВ

Механизм Бела – усиление магнитного поля космическими лучами



Спектр космических лучей у Земли

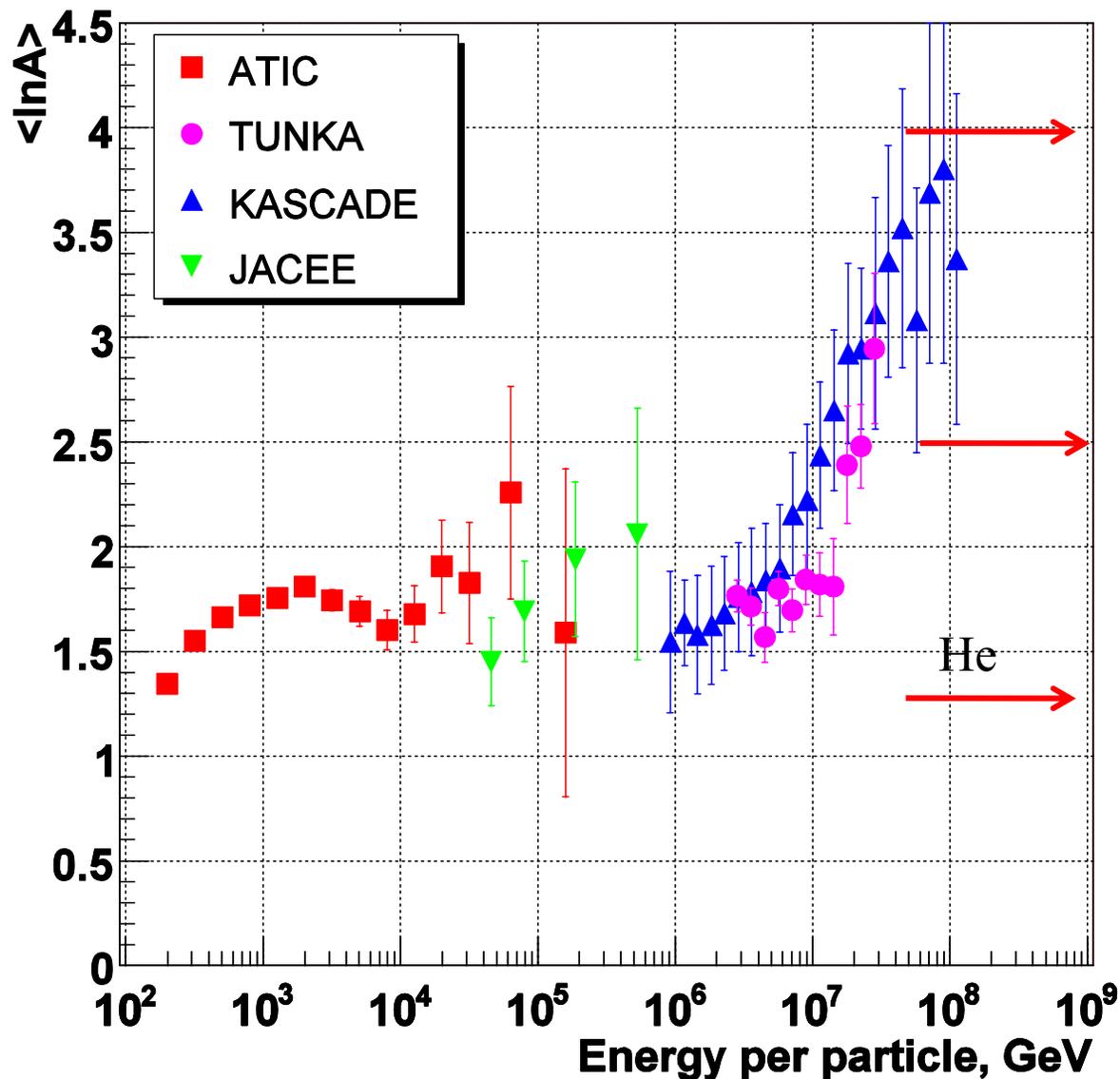


$$r_g \text{ (cm)} = E \text{ (eV)} / 300 Z B \text{ (гаусс)}$$

Для $E = 10^{18} \text{ eV}$ $r_g \approx 1 \text{ кпс}$ – сравнима с толщиной диска Галактики

Космические лучи с энергией выше 10^{18} эВ не удерживаются в Галактике

Mean mass composition



Fe

CNO

He

E_{\max} \square Z B L

С увеличением энергии
происходит утяжеление
массового состава

Эксперимент и теория
указывают, что в диапазоне
 $10^{17} - 10^{18}$ эВ может
происходить переход от
галактических к
метагалактическим
космическим лучам

Широкие атмосферные ливни: открытие и методы регистрации

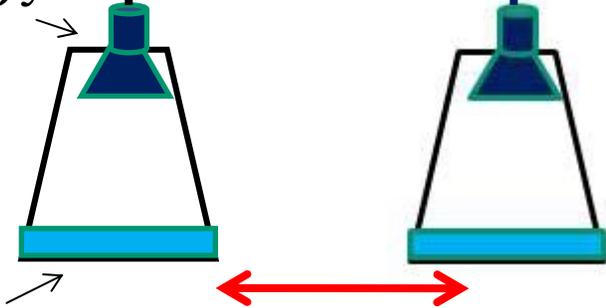
Открытие:
Пьер Оже (1938)
1889 - 1993

Схема совпадений, окно $\tau = 50$ мкс

$N \odot 100$

Гц

ФЭУ



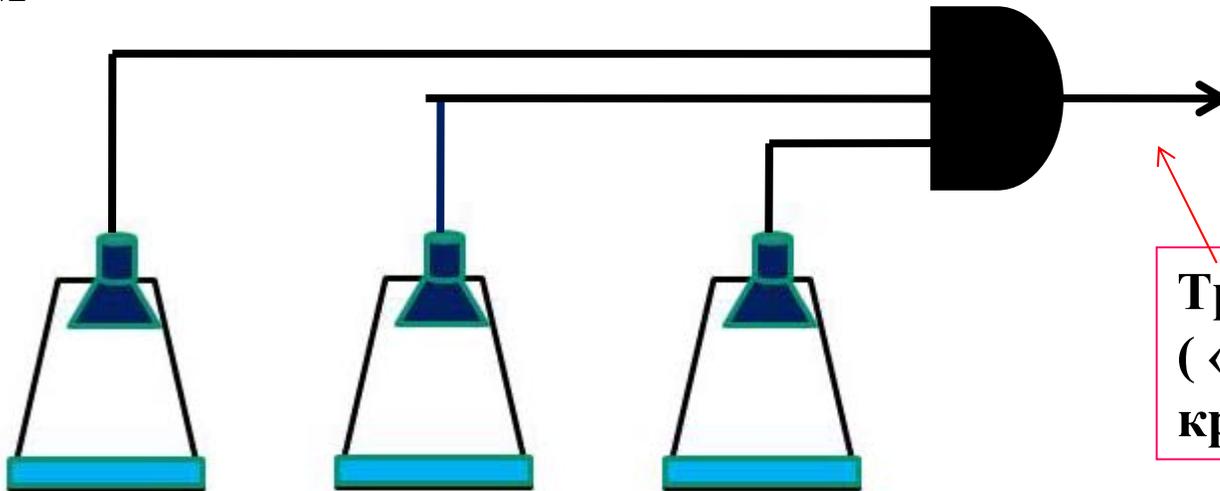
сцинтиллятор

5 м

$S = 1 \text{ м}^2$

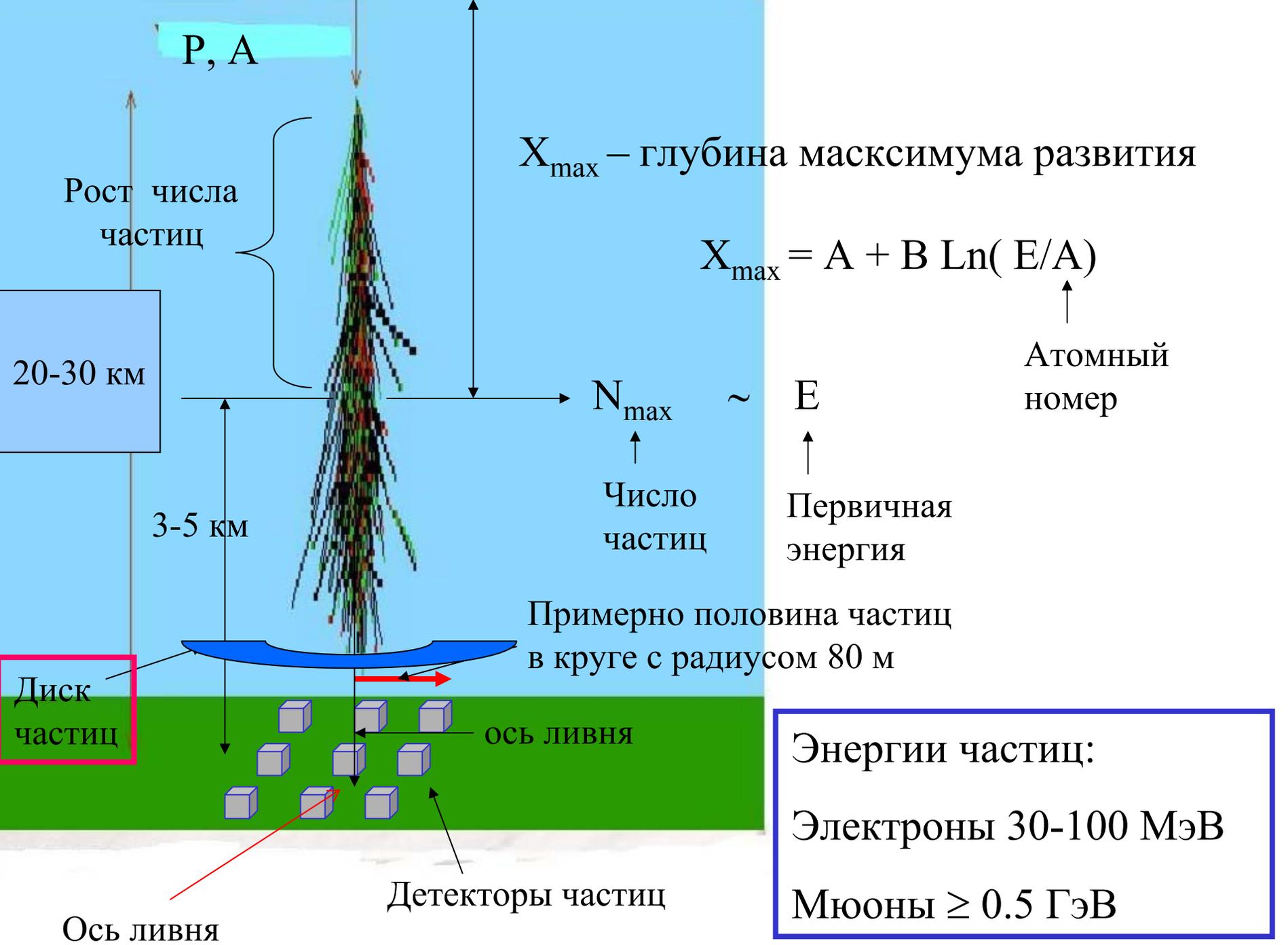
$$2 \tau N_1 N_2$$

$\odot 1$ Гц



Триггер
(«спусковой
крючок»)

$$3 \tau^2 N_1 N_2 N_3$$



P, A

Регистрация черенковского света

Для $E_e > 25$ МэВ

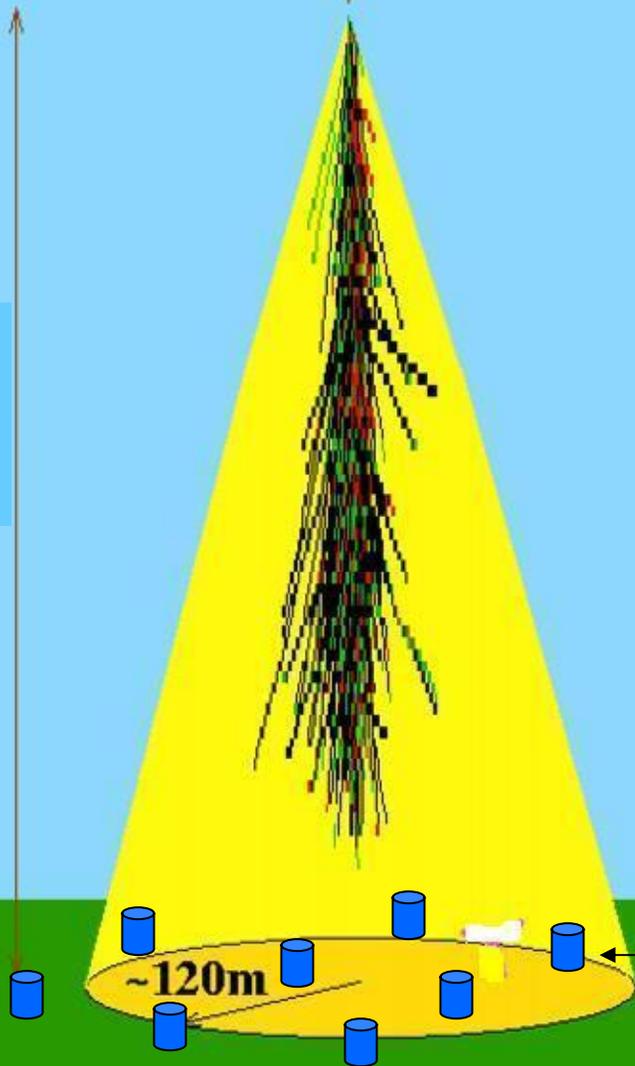
$V_e > C/n$ — скорость света
в воздухе



Черенковский свет

$$Q_{\text{tot}} \sim E$$

20-30 км



Детекторы фотонов

Что можно измерить с помощью черенковского света?

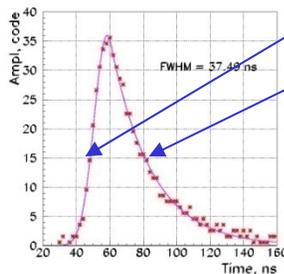
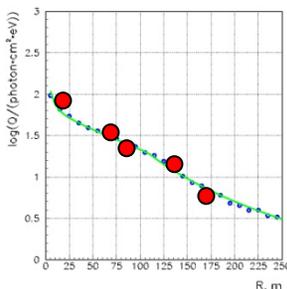
Энергию первичной частицы E_0
 (относительная точность 15%
 систематическая погрешность < 10%)

Глубину максимума X_{\max}
 (относительная точность 30 г/см² систематическая погрешность < 7 г/см²)

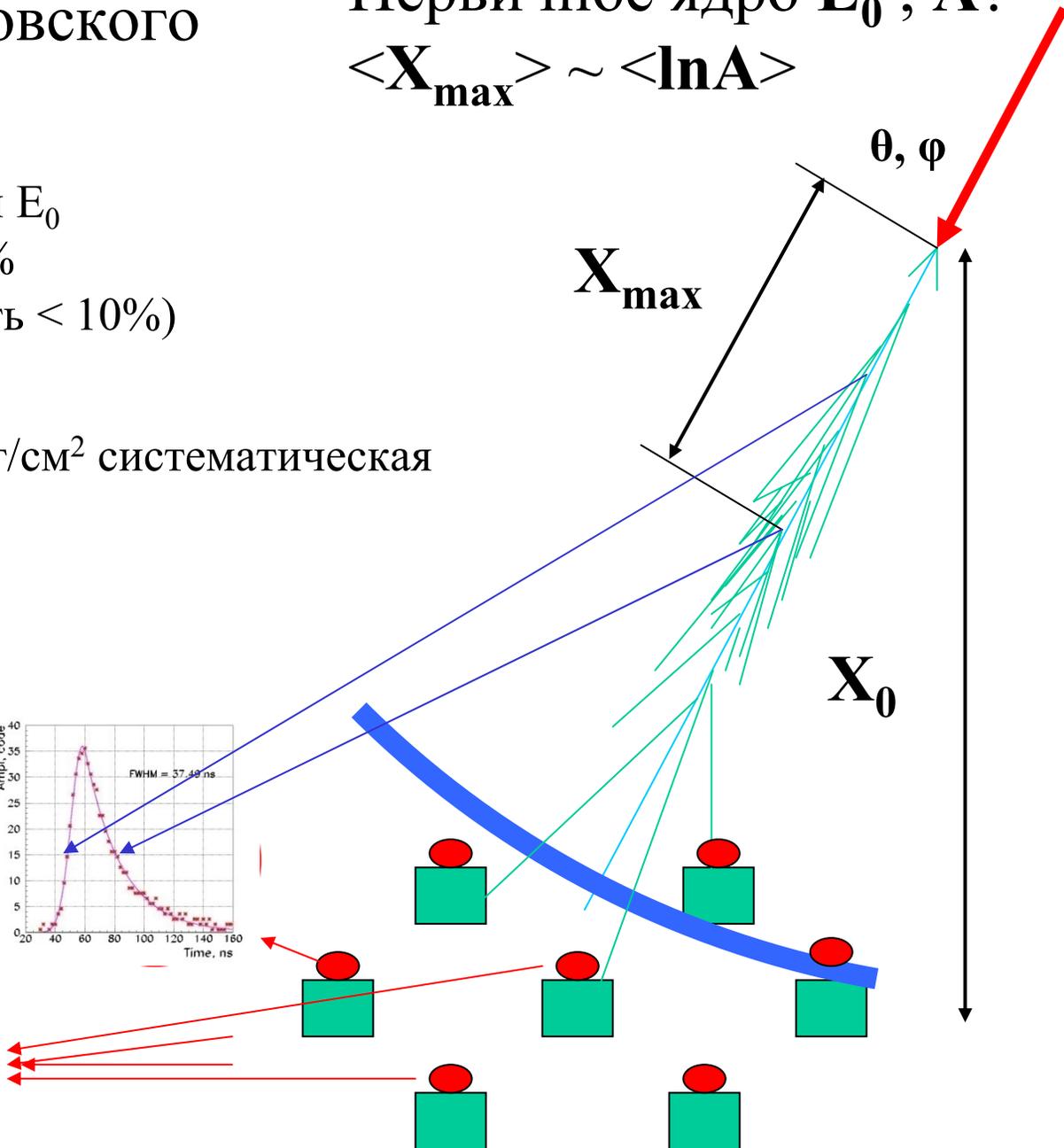
FWHM $\sim \Delta X$ г/см²

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

Крутизна
 ФПР



Первичное ядро E_0, Λ ?
 $\langle X_{\max} \rangle \sim \langle \ln \Lambda \rangle$



$$X_{\max} \sim \ln(E/A)$$



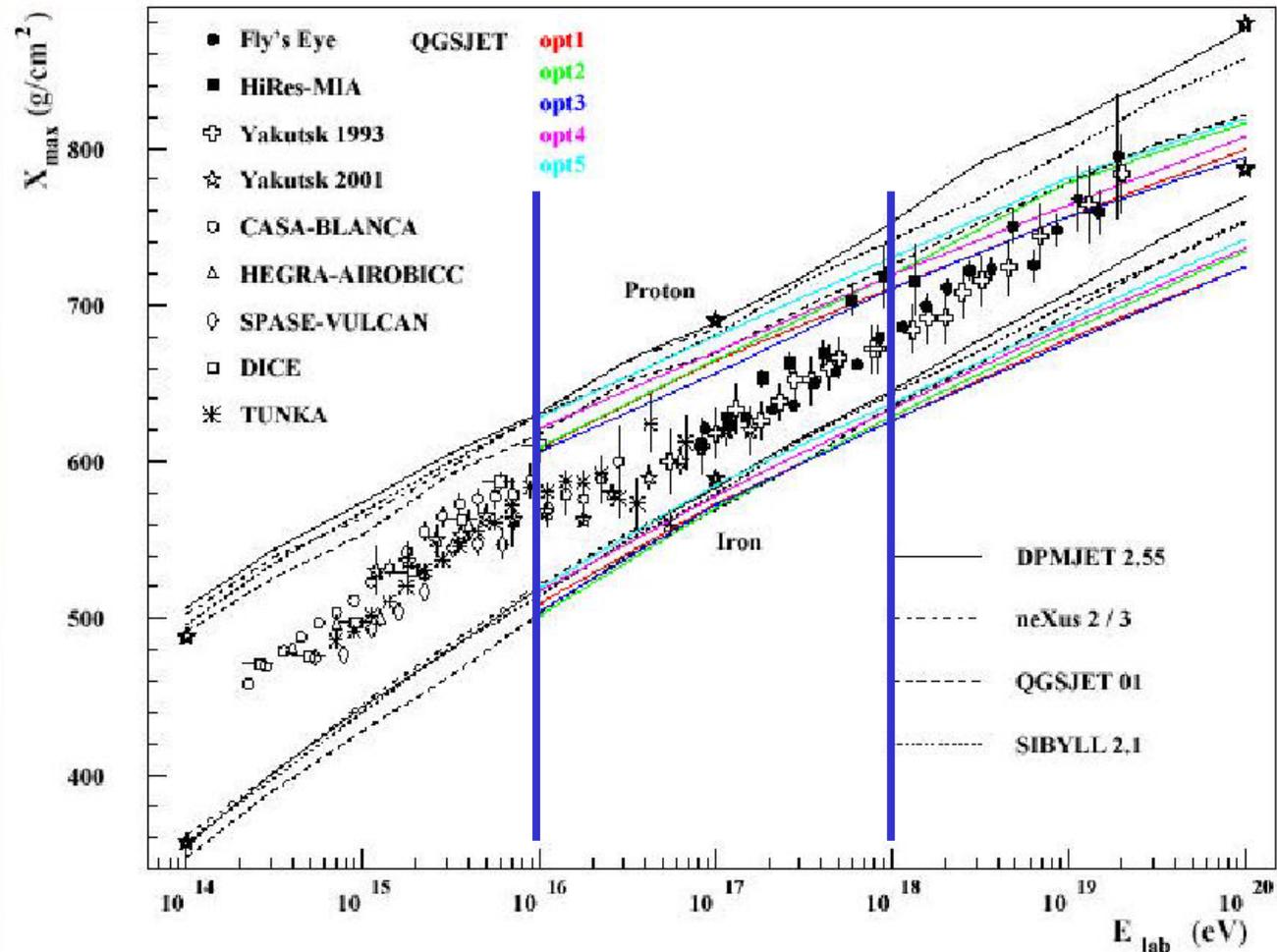
Средняя глубина
максимума развития
ШАЛ в атмосфере

Атомный
номер
ядра

Распределение
по X_{\max}

Широкое для
“легкого” состава

Узкое для
“тяжелого”
состава



Методы регистрации ШАЛ

1. Регистрация заряженных частиц ШАЛ
2. Регистрация черенковского света
3. Регистрация флюоресцентного света
4. Регистрация радиоизлучения

Measurement Techniques of Air Showers

energy ? mass ?
arrival directions ?
interaction mechanism ?

→ large number of
observables
→ multi-detector
system

Measurement of Cherenkov
light with telescopes
or wide angle pmts

← First interaction (usually several 10 km high)

← Air shower evolves (particles are created
and most of them later stop or decay)

← Some of the particles
reach the ground

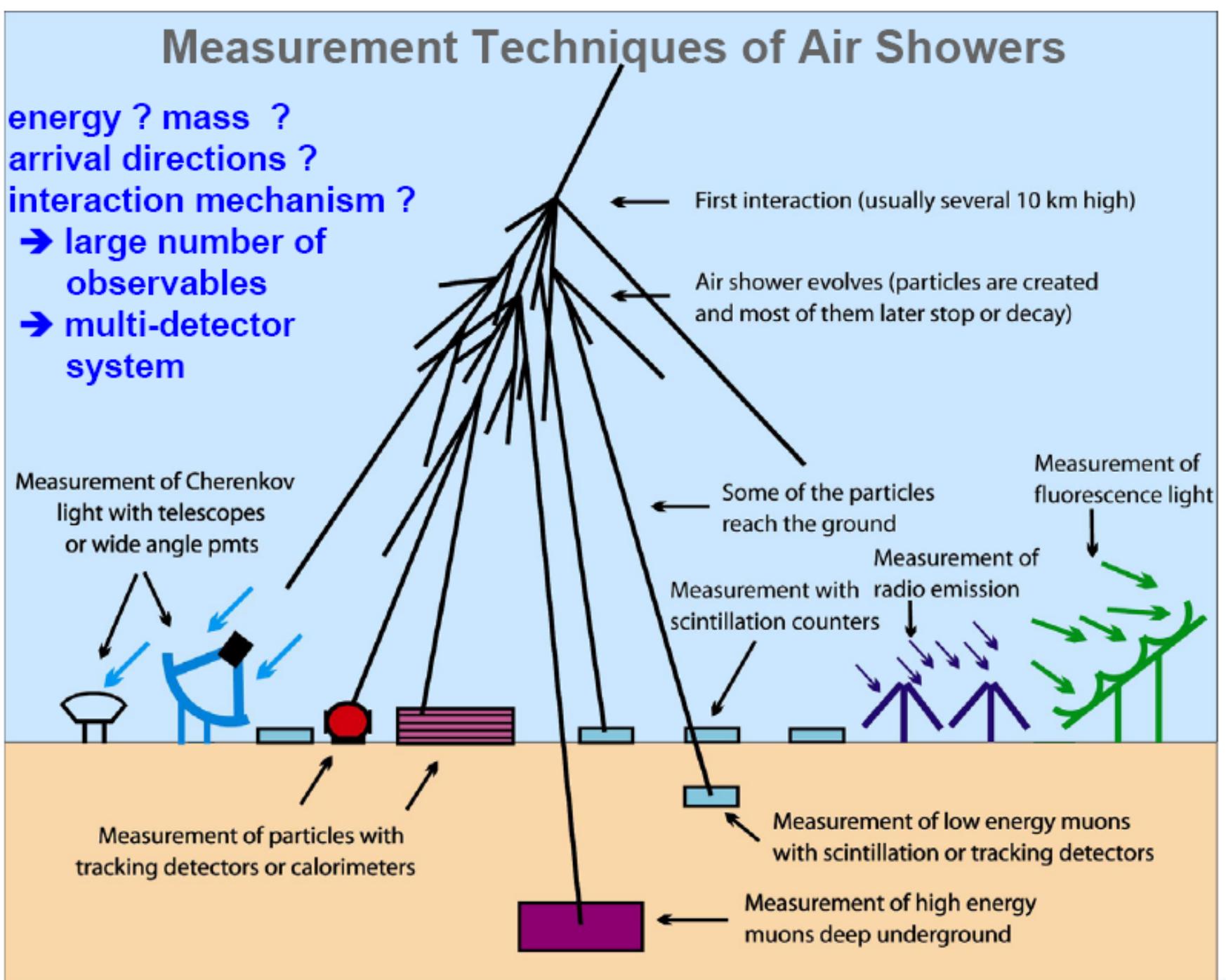
Measurement of
fluorescence light

Measurement of
radio emission
scintillation counters

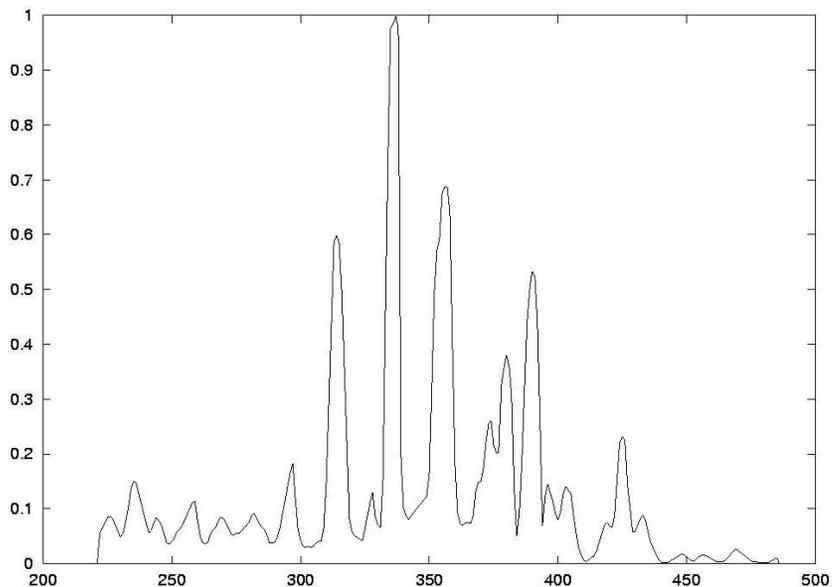
Measurement of particles with
tracking detectors or calorimeters

Measurement of low energy muons
with scintillation or tracking detectors

Measurement of high energy
muons deep underground



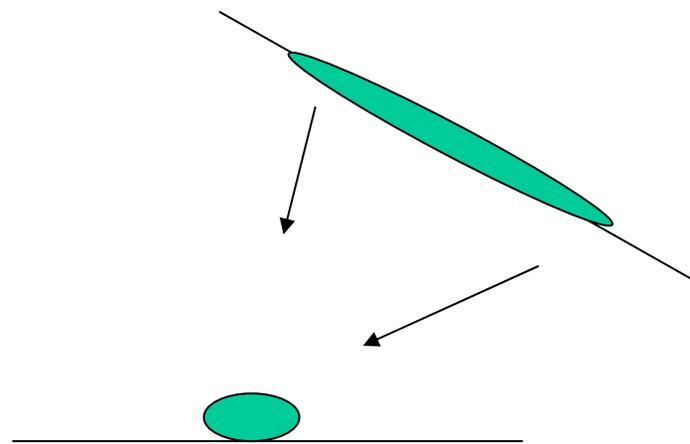
Флюоресцентное излучение заряженных частиц



Спектр излучения азота

Излучение изотропное

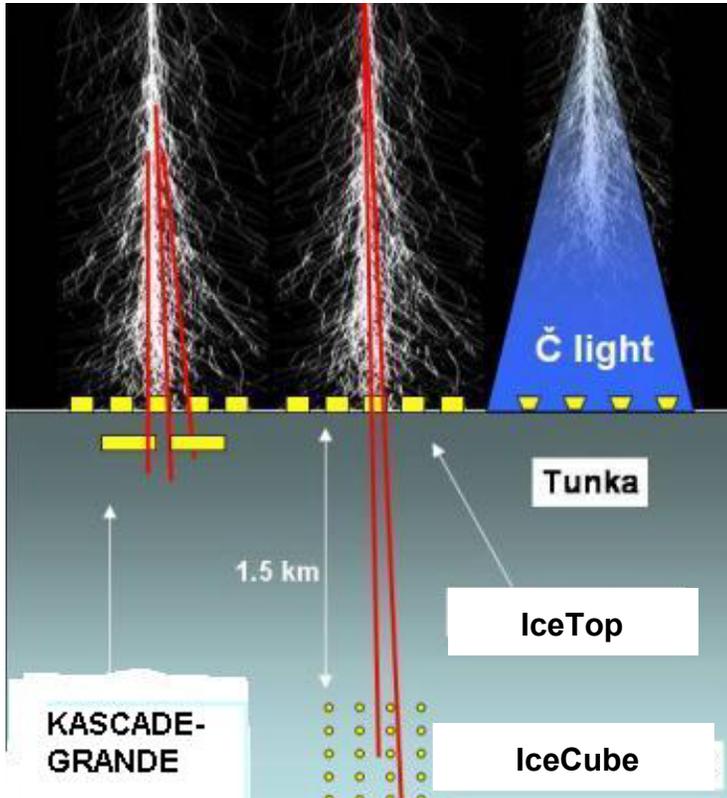
4-5 фотонов/ метр,
практически не зависит от
плотности



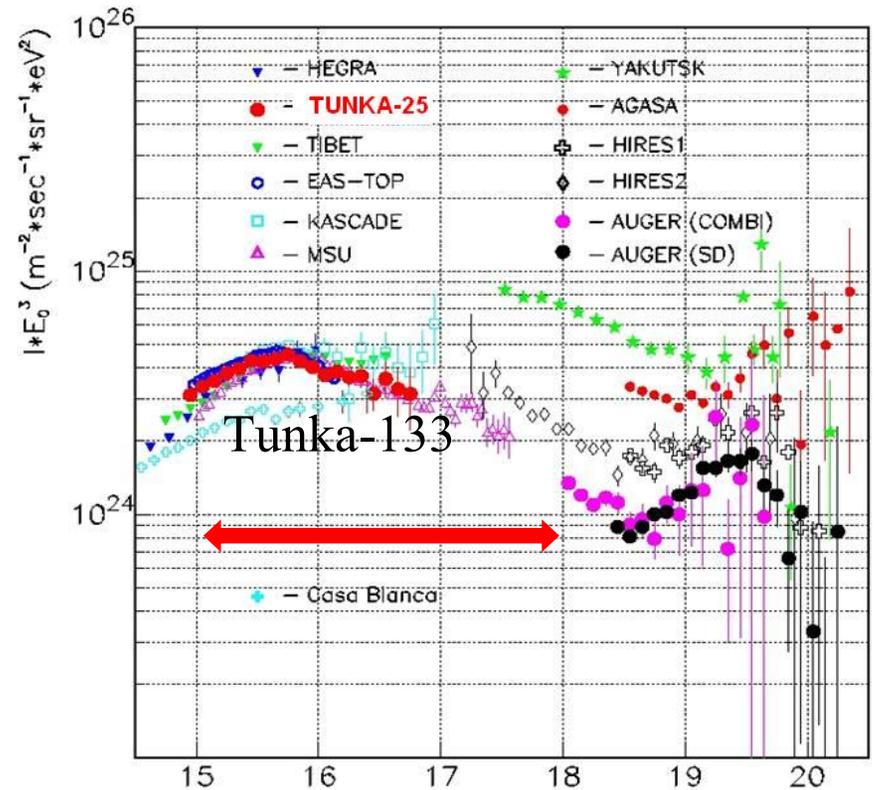
Мушиный глаз
(Flys Eye)

Современные установки для
регистрации космических лучей
сверхвысокой энергии
(10^{15} - 10^{18} эВ)

Современные установки для области выше 10^{16} эВ площадь $\cong 1\text{км}^2$

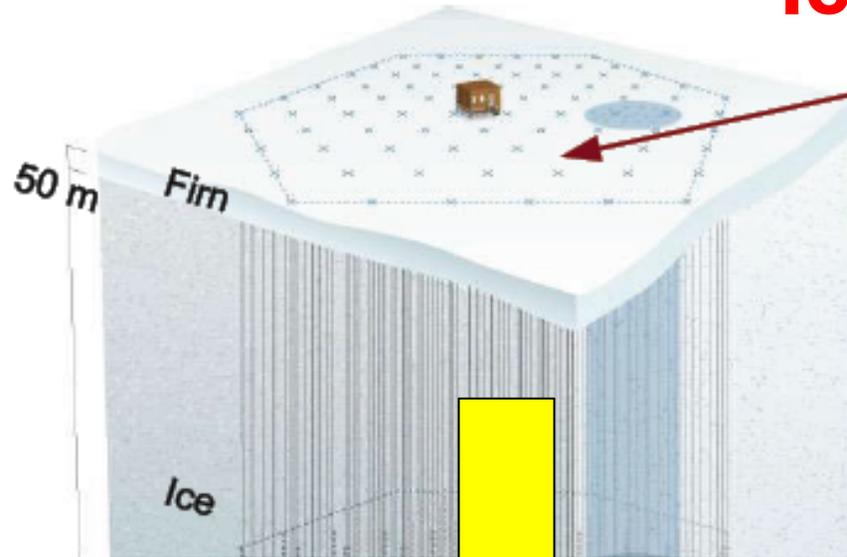


- KASCADE-Grande
 - IceTop/IceCube
 - **Тунка-133**
 - НЕВОД-ДЕКОР
 - Auger (низкие энергии)
 - SCORE
 - LHAASO
- зактыта*
70% ready
в работе
в работе
пуск в 2011
проект
проект



\leftarrow CR from SNR ? $\xrightarrow{\log_{10}(E_0/eV)}$ CR from AGN

Ice Cube/Ice Top

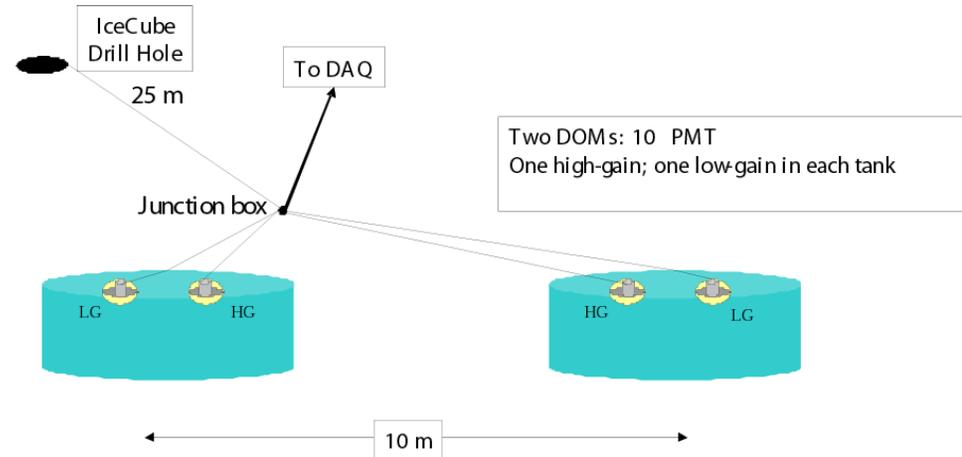
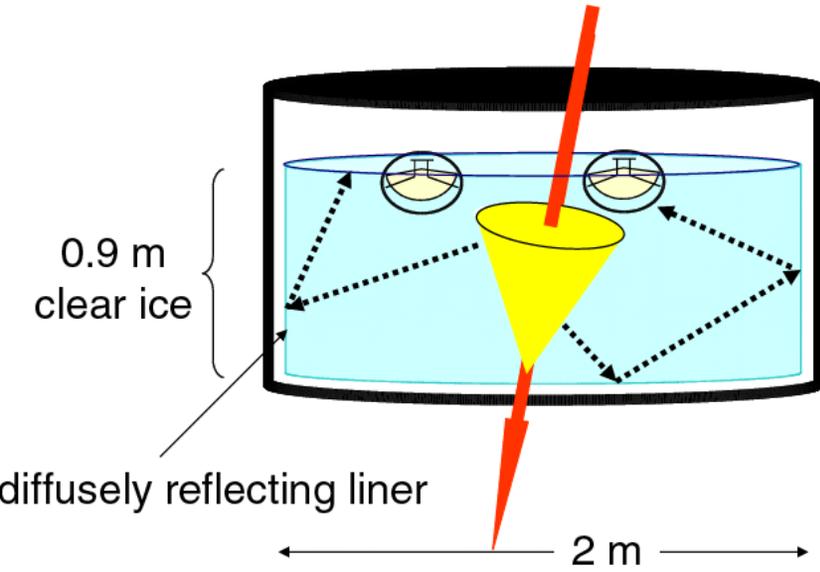


IceTop: air shower array

- ✓ 80 Stations / 2 Tanks each
- ✓ 2 DOMs each per tank
- ✓ 125 m grid, 1 km² at 690 g/cm²
- ✓ $E_{\text{thres}} \sim 300 \text{ TeV}$ for ≥ 4 stations
- ✓ Useful rate up to $\sim \text{EeV}$



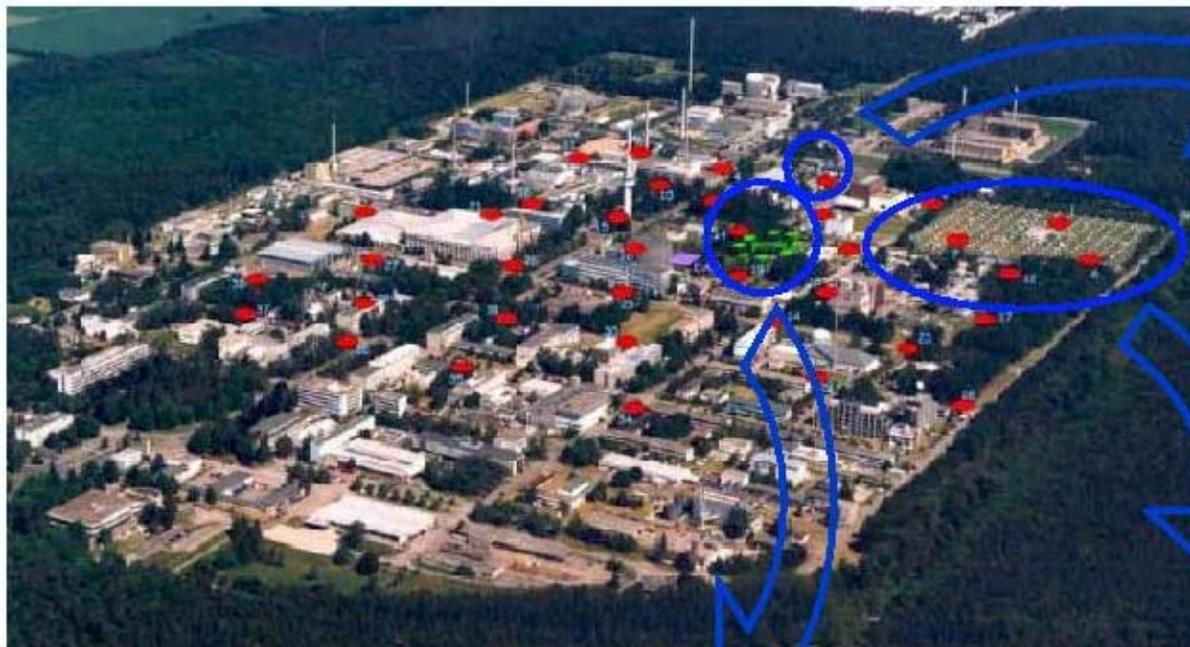
Ice Cerenkov Tank

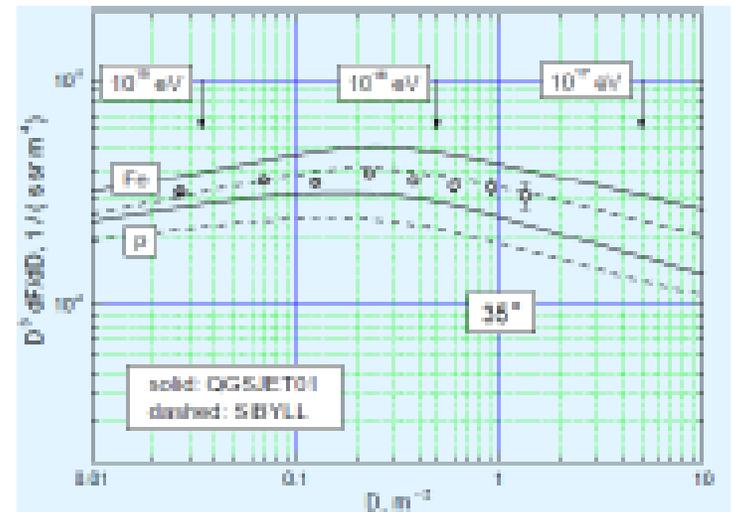
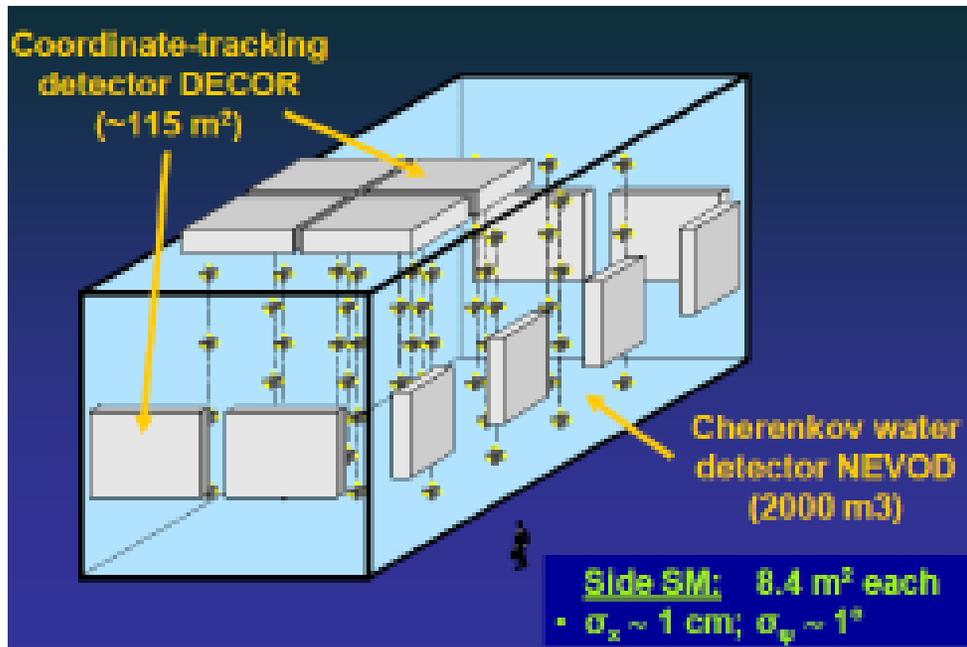




KASCADE-Grande = Karlsruhe Shower Core and Array Detector + Grande

Measurements of air showers in the energy range $E_0 = 100 \text{ TeV} - 1 \text{ EeV}$

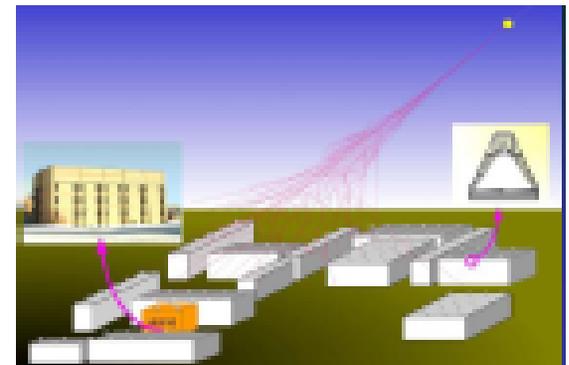




- large water cherenkov detector, Russia
- position detector

- ➔ Muon bundles (under large zenith angles)
- ➔ Sensitivity to energy and composition

- extension plans: array around



LHAASO (China, Tibet)

Three major components

- **1km² complex array for γ rays and CRs $>30\text{TeV}$**
 - 1 km² scintillation detector array
 - 40k m² μ detector array
 - 28 C-telescopes
 - 1k m² burst detector
- **90k m² water Cerenkov detector for $\gamma > 100\text{GeV}$**
- **Two Magic-type telescopes**

LHAASO Project: γ astronomy and origin of CR

Charge Particle Array
μdetector Array

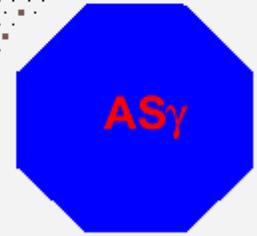
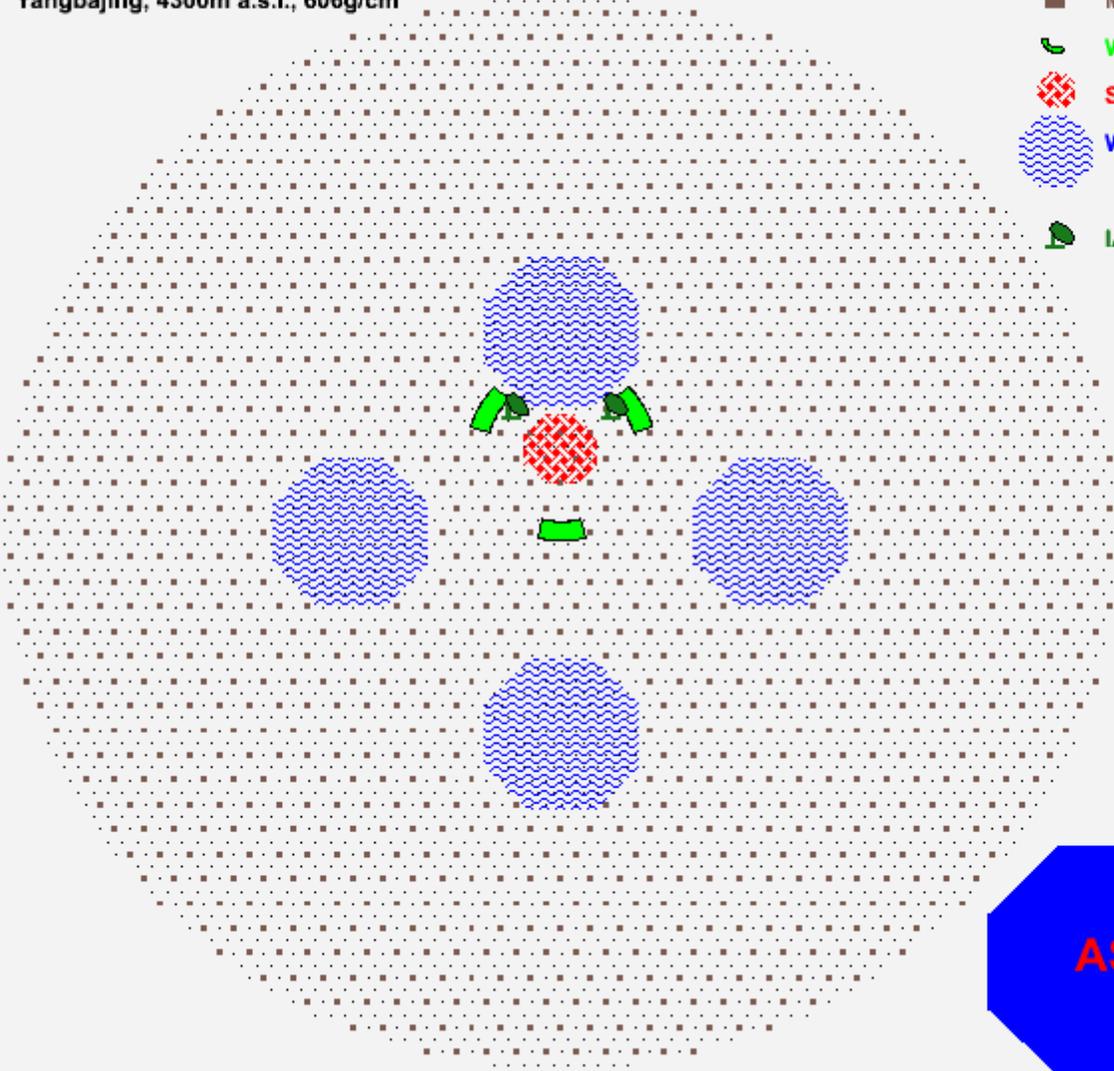
Water C Array

Wide FOV C-Telescope Array
&
Core Detector Array

Large High Altitude Air Shower Observatory

Yangbajing, 4300m a.s.l., 606g/cm²

- ED: 5137, 1m×1m×2cm
15m spacing
- MD: 1161, 6m×6m×2cm
30m spacing
- WFCAs: 3×8, 16×16pixels
130m spacing
- SCDA: 5000m² (Φ80m)
- WCDA: 4×900
Φ170m×4m
300m spacing
- IACs: 2
100m spacing



1000m

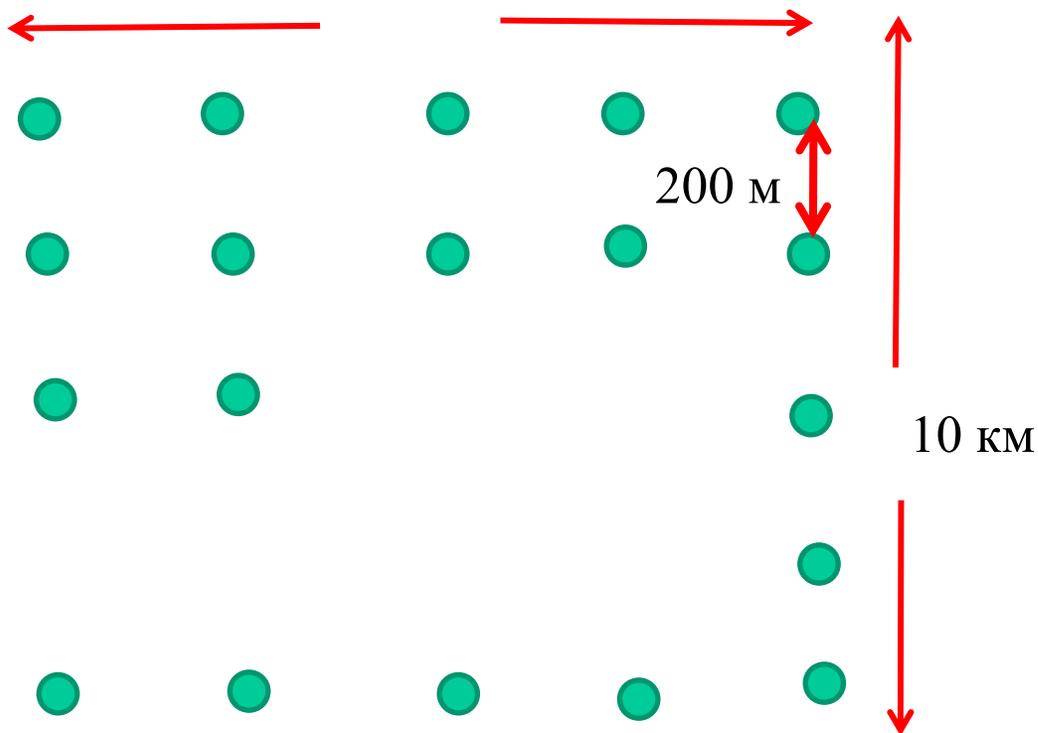
0.42° N 90°29'59.08° E

6 km

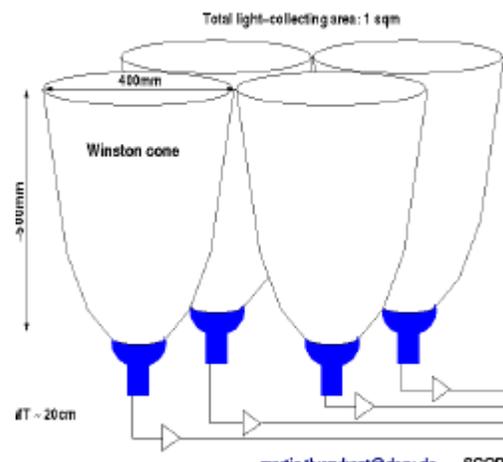
Проект SCORE – широкоугольный гамма-телескоп площадью 100 км² с порогом \square 30 ТэВ

(M. Tluczykont et al, ArXiv: 0909.0445)

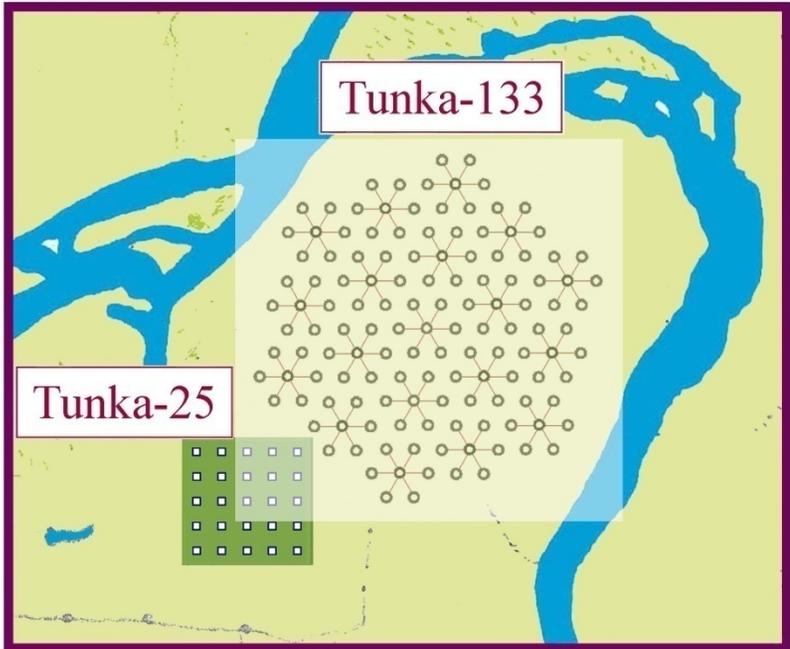
10 км



Прототип установки
площадью 0.1 -0.2 км²
в Тунке.



Tunka-133 – 1 km² “dense” EAS
Cherenkov light array



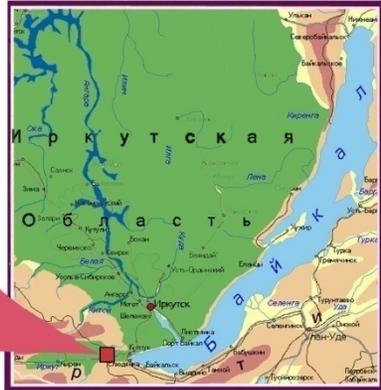
Energy threshold ~ 10¹⁵ eV
Statistics for one winter (400 hours):

- > 3 · 10¹⁵ eV – 5 · 10⁵ events
- > 10¹⁷ eV – ~ 300 events

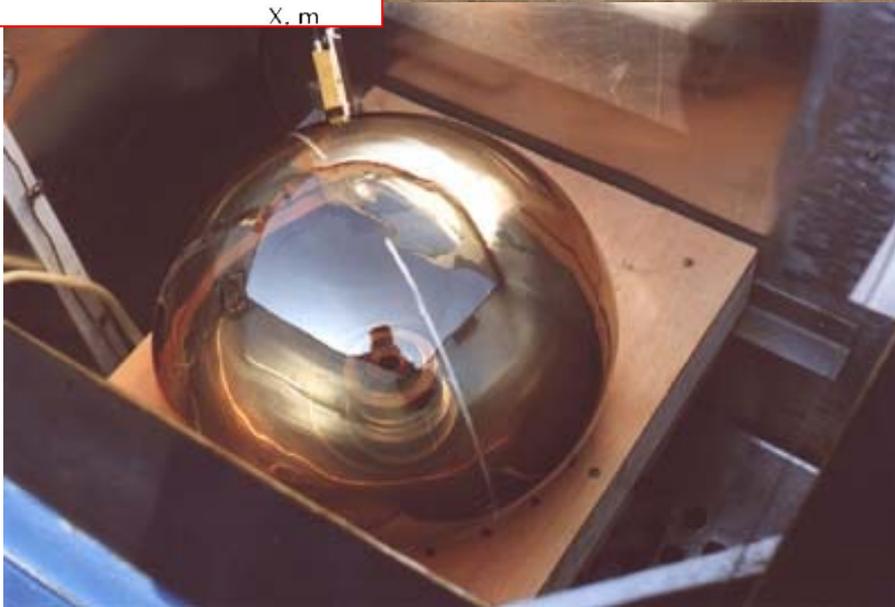
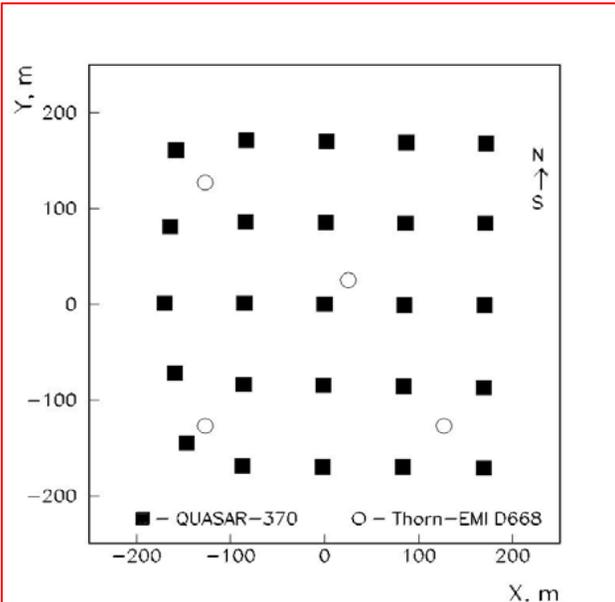
Accuracy: core location ~ 6 m
energy resolution ~ 15%
 $\delta X_{\max} < 25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$

$S\Omega$ (Tunka-133) = 30 • $S\Omega$ (Tunka-25)

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

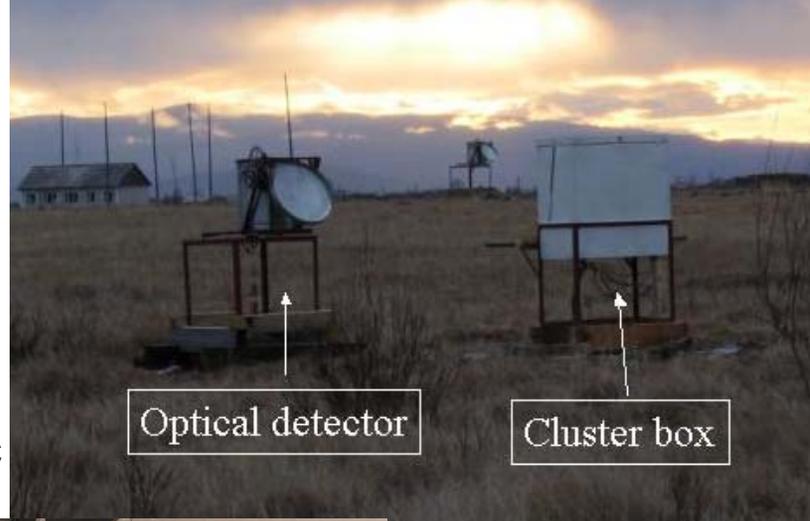


Tunka-25 (2000 -2005)



PMT QUASAR-370
(37 cm photocathode
Diameter)

Tunka-133: 19 clusters, 7 detectors in each cluster



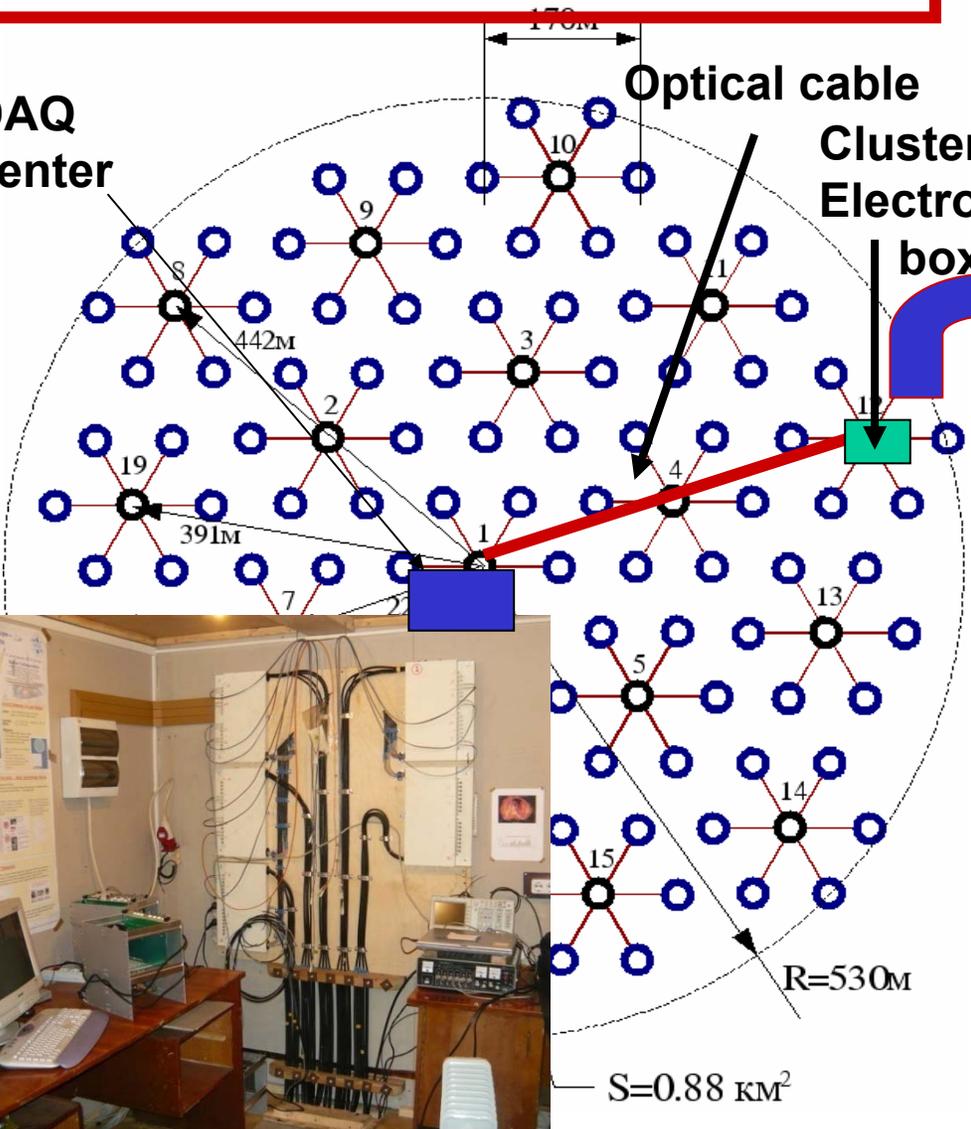
Optical detector

Cluster box

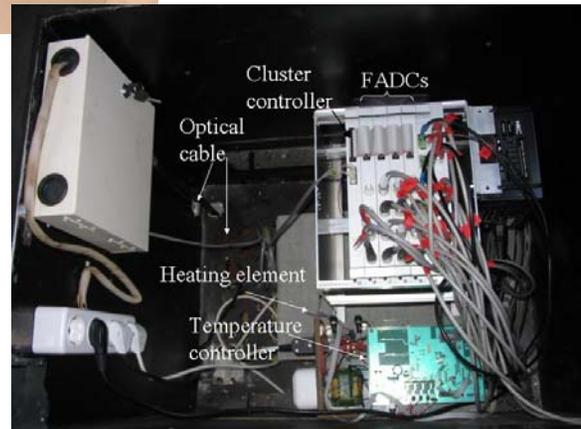
DAQ center

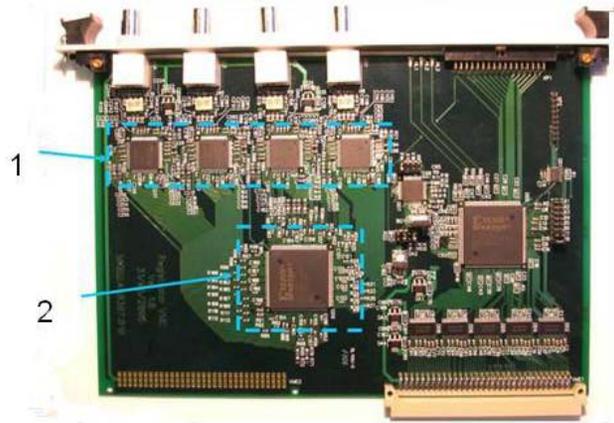
Optical cable

Cluster Electronic box

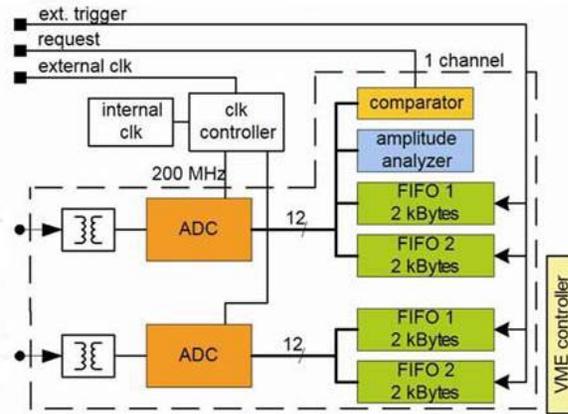


PMT
EMI 9350
Ø 20 cm



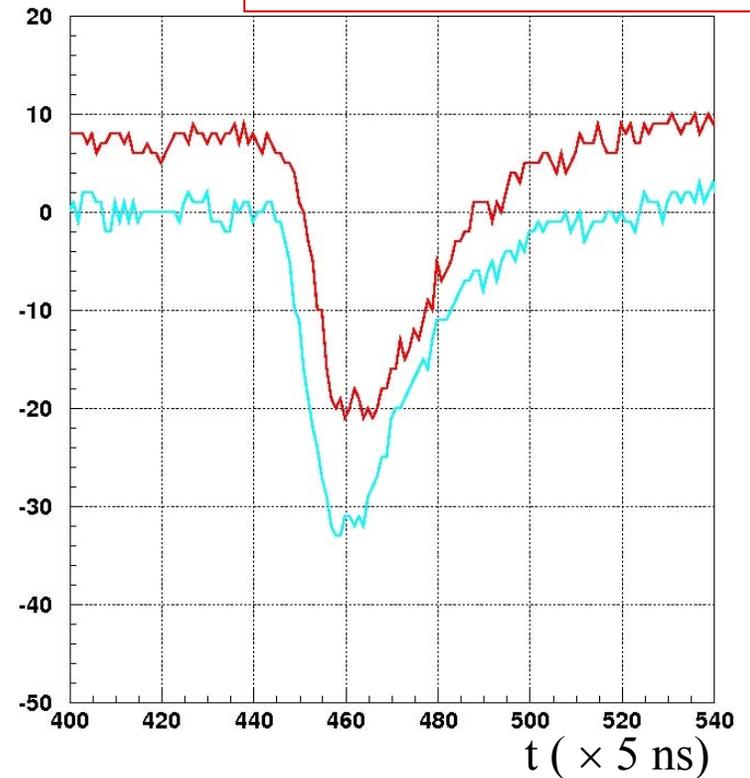
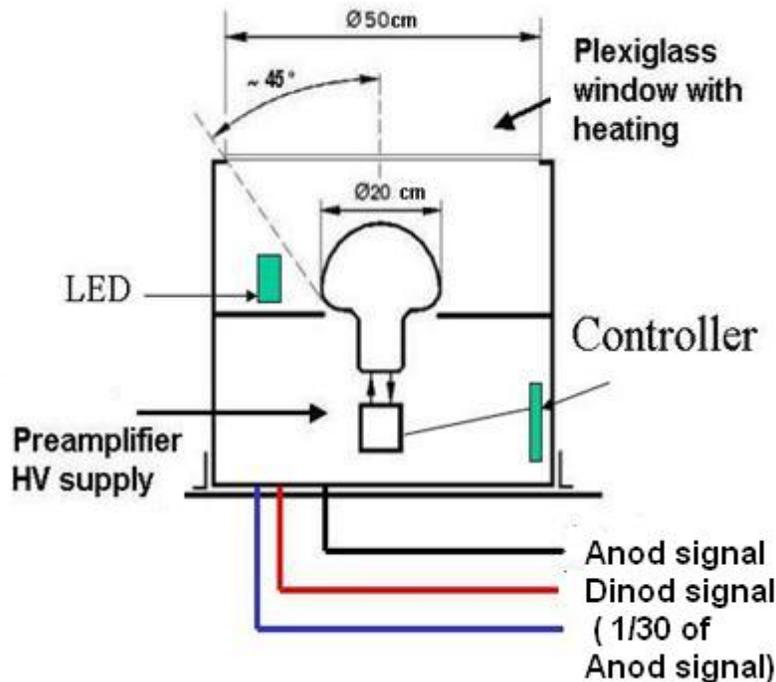


1. ADC AD9430, 12 bit, 200 MHz
2. FPGA XILINX Spartan-3



4 channel FADC

Cherenkov light pulses
at two detectors of
the cluster at core
distance ~ 700 m





Развертывание установки

Оптические кабели



Установка детекторов

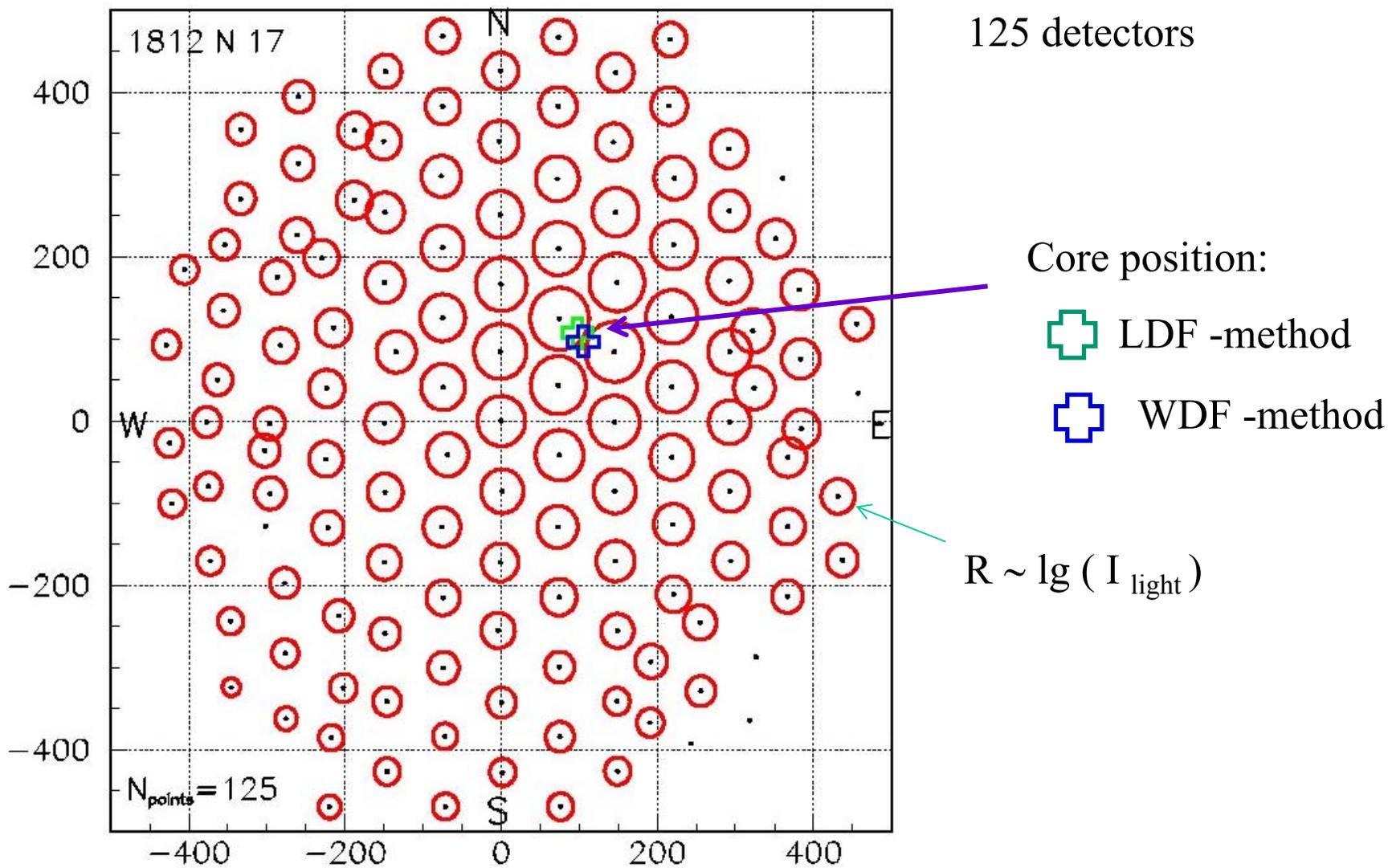


Подготовка ФЭУ

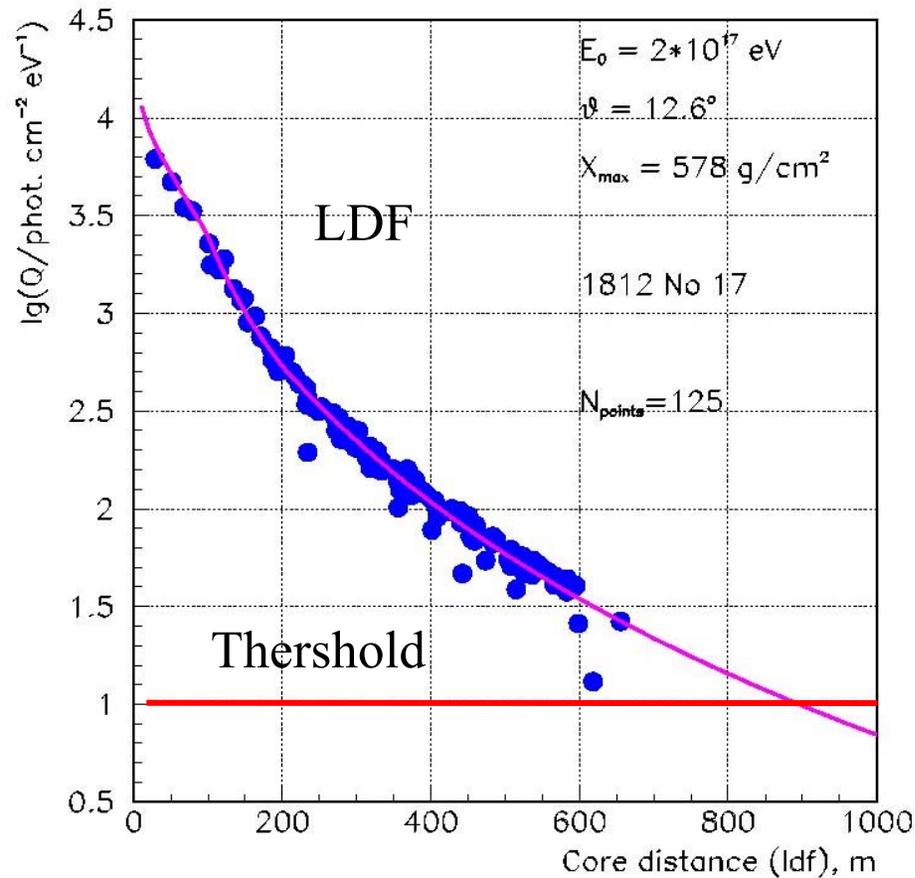


Example of event

Energy: $2.0 \cdot 10^{17}$ eV
zenith angle : 12.6°

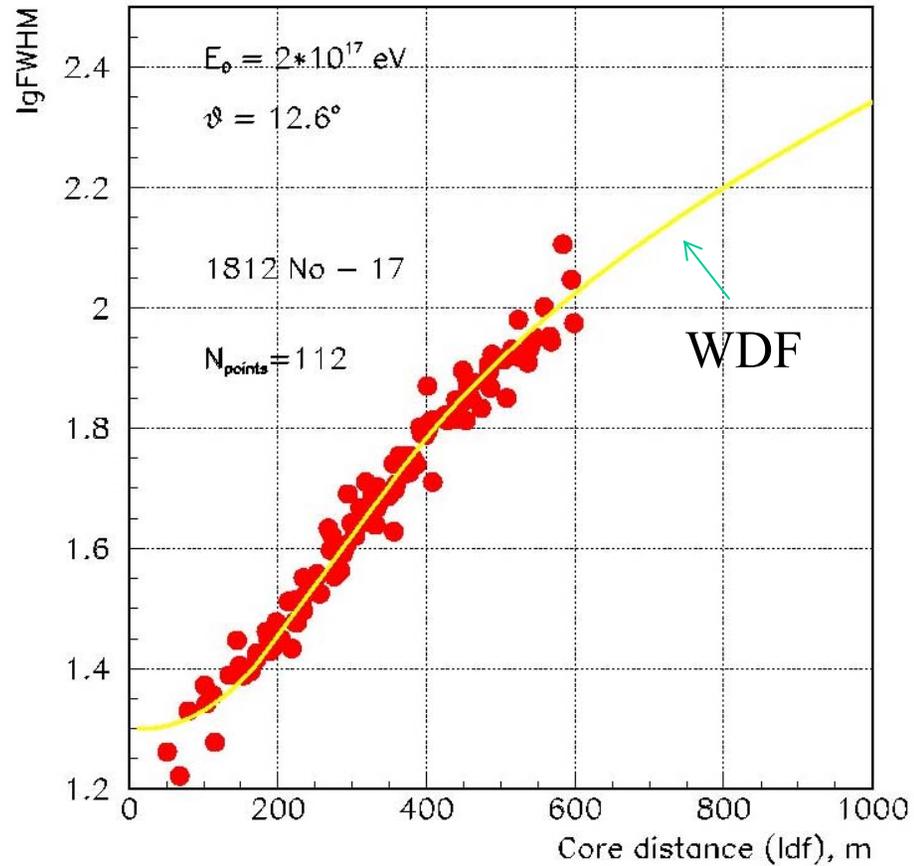


Lg $Q_{\text{exp}}(R)$



A

Lg $\tau(R)$

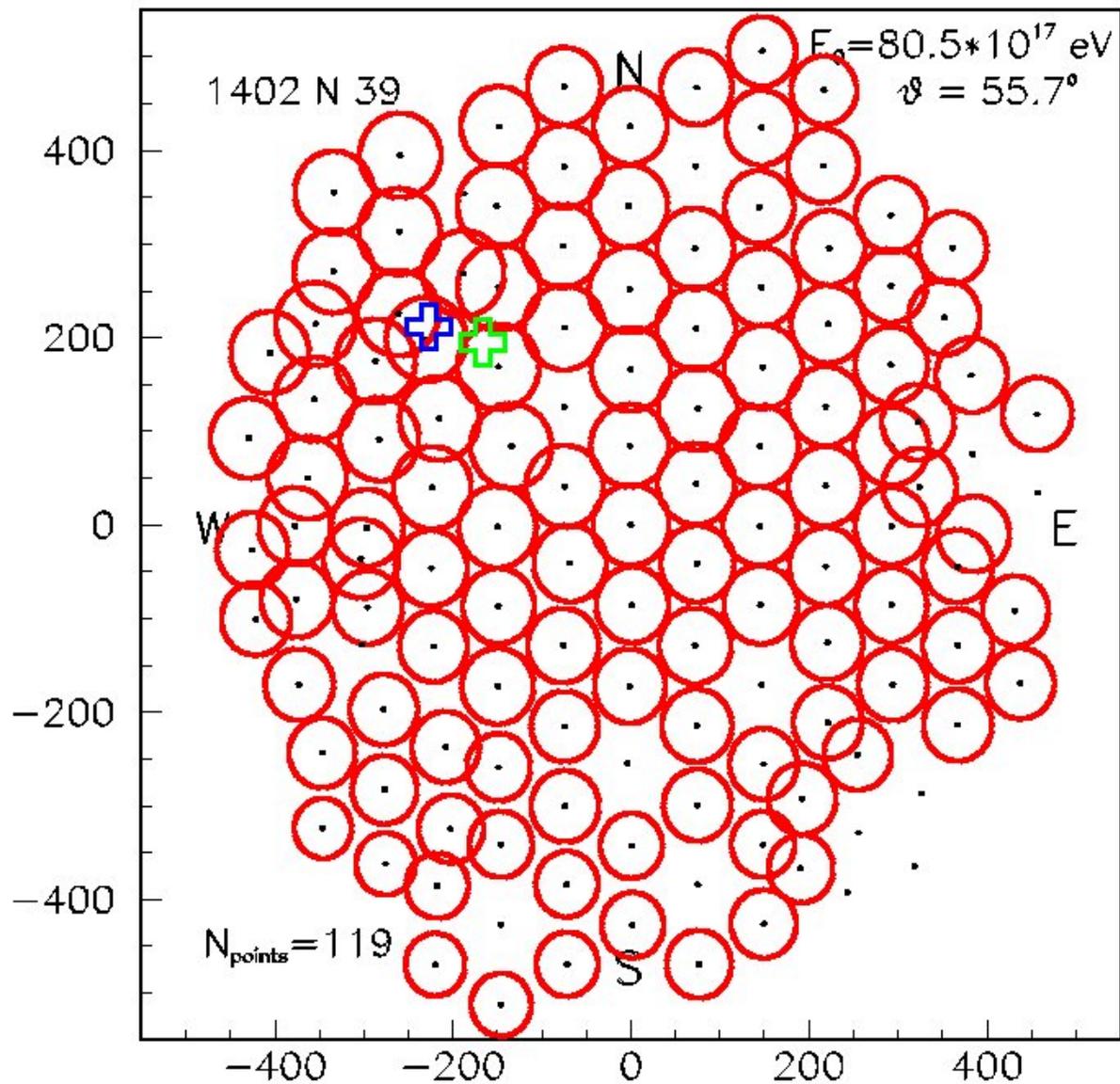


B

.A– Fitting experimental points with LDF

B – Fitting of $\tau(R)$ with Width – Distance Function.

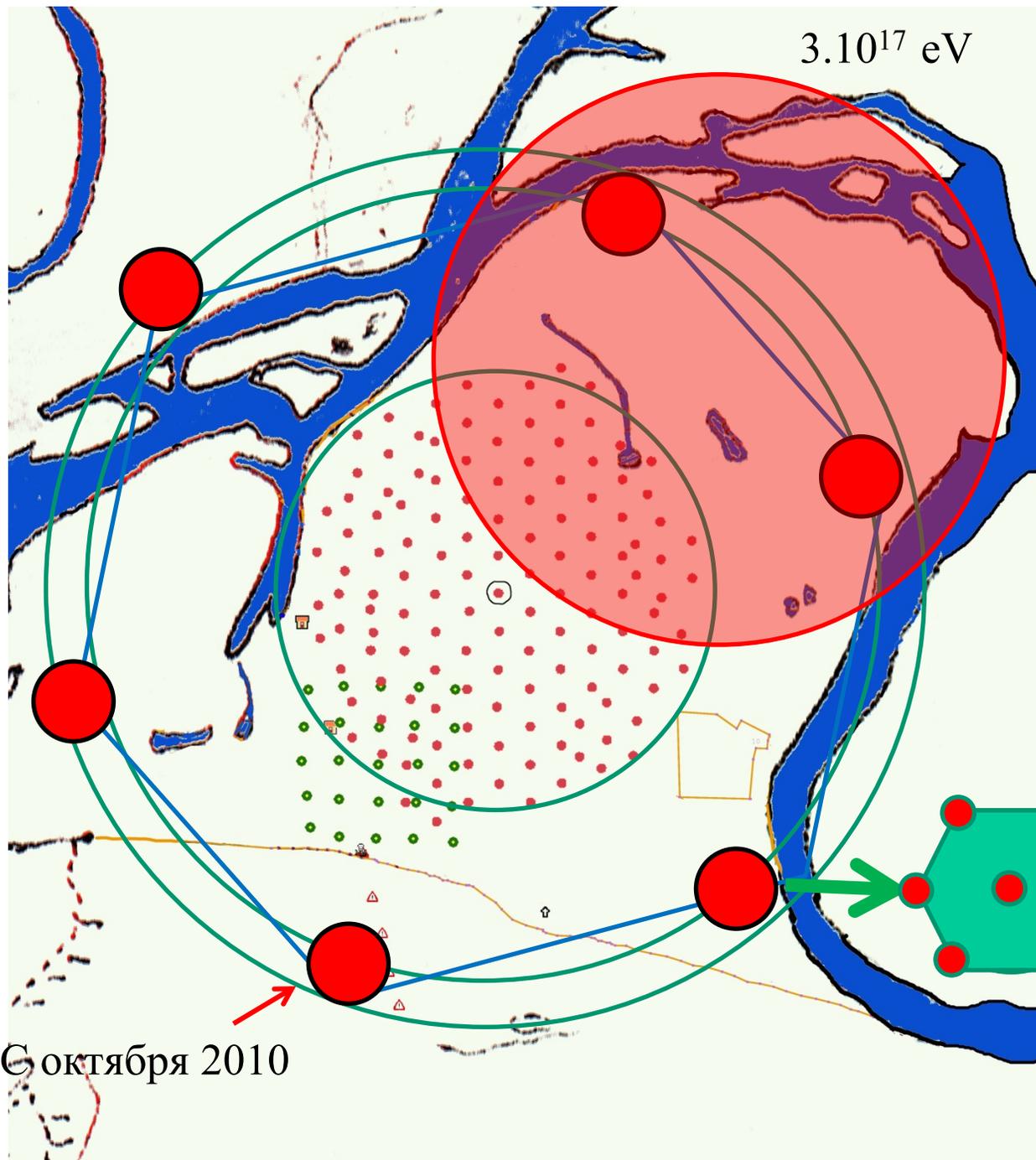
Событие с самой большой энергией – около 10^{19} эВ



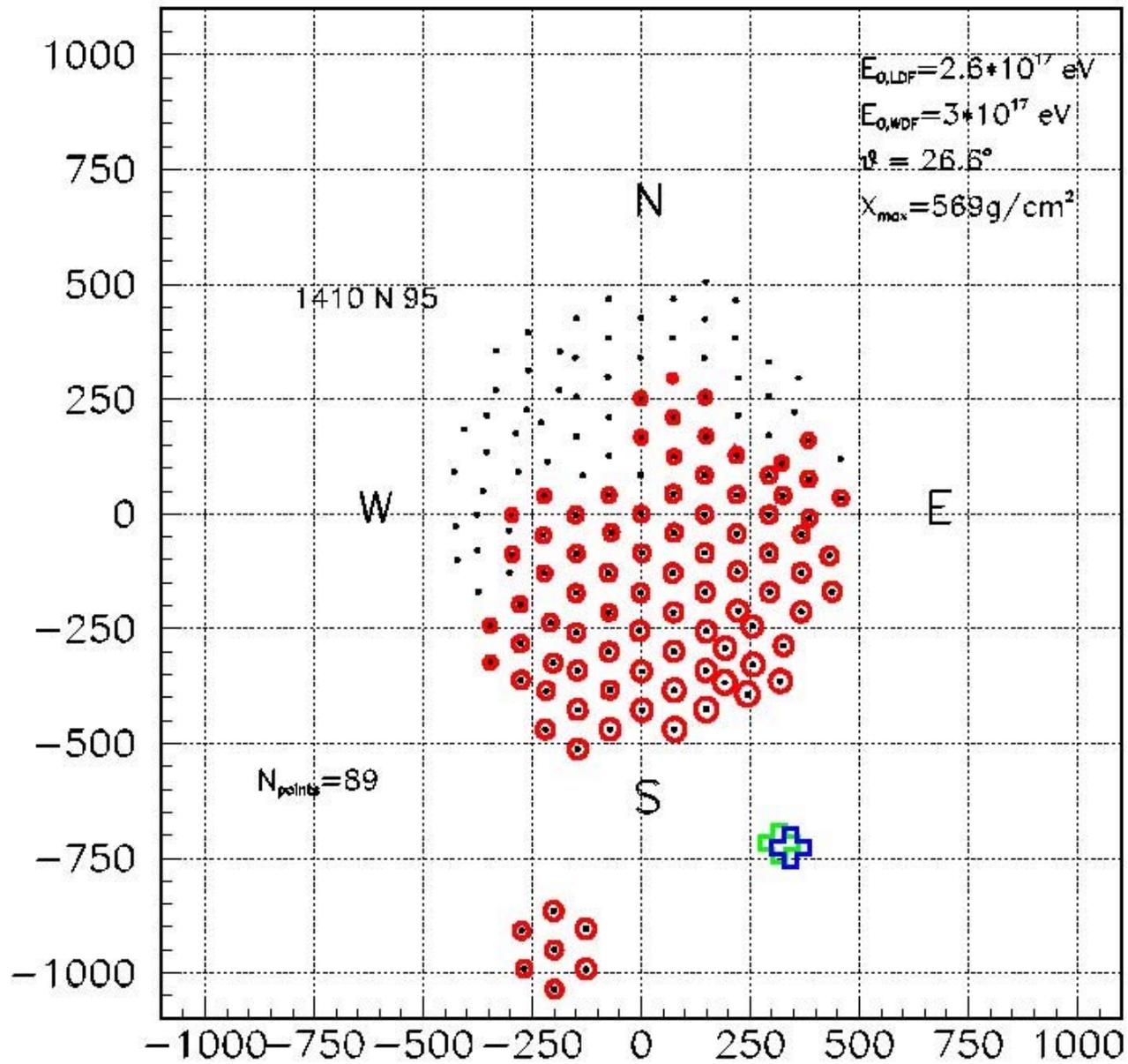
6 дальних
кластеров
(42 детектора)



Увеличение
в 4 раз
эффективной
площади для
событий
с энергией
выше
 10^{17} эВ



6 октября 2010

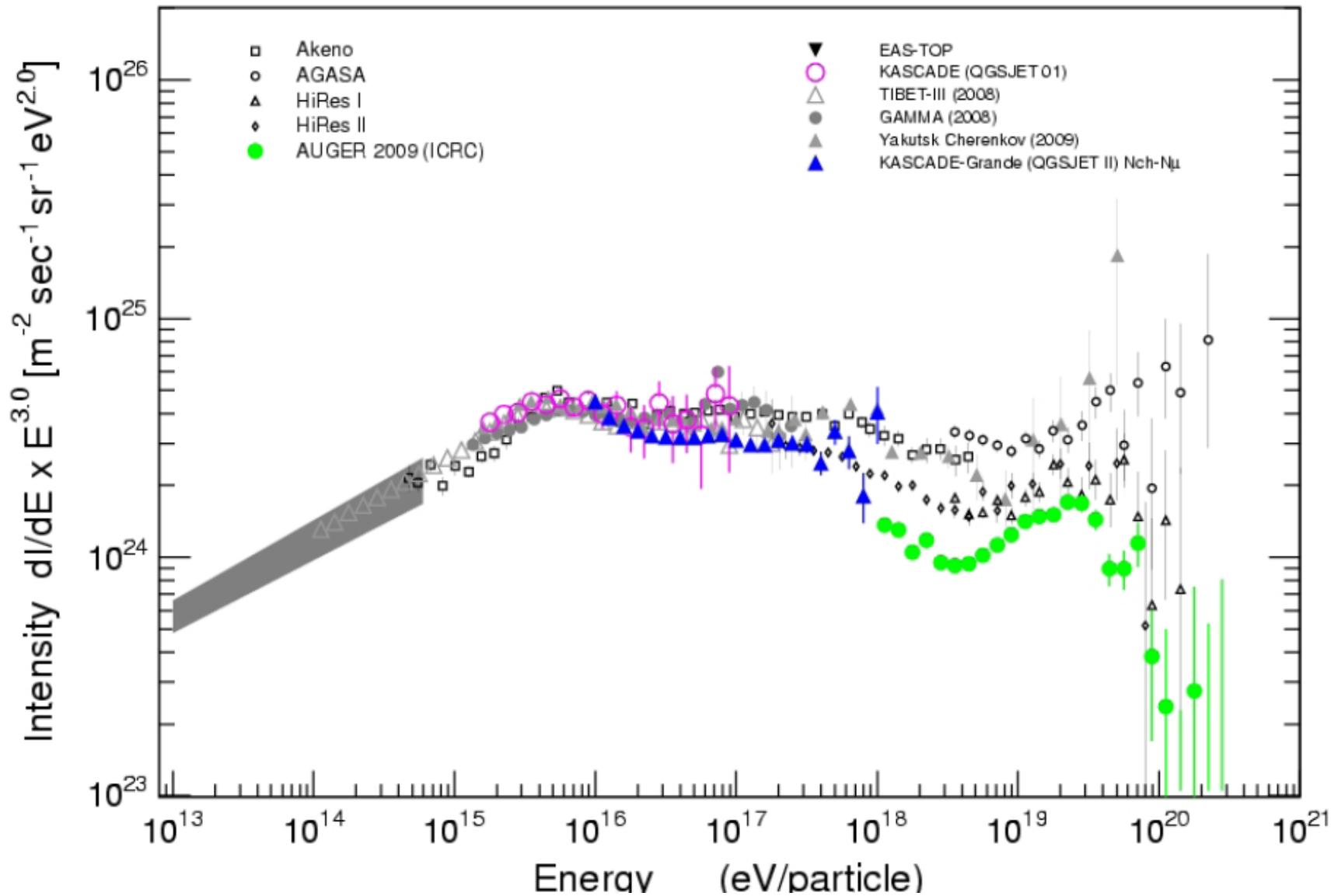


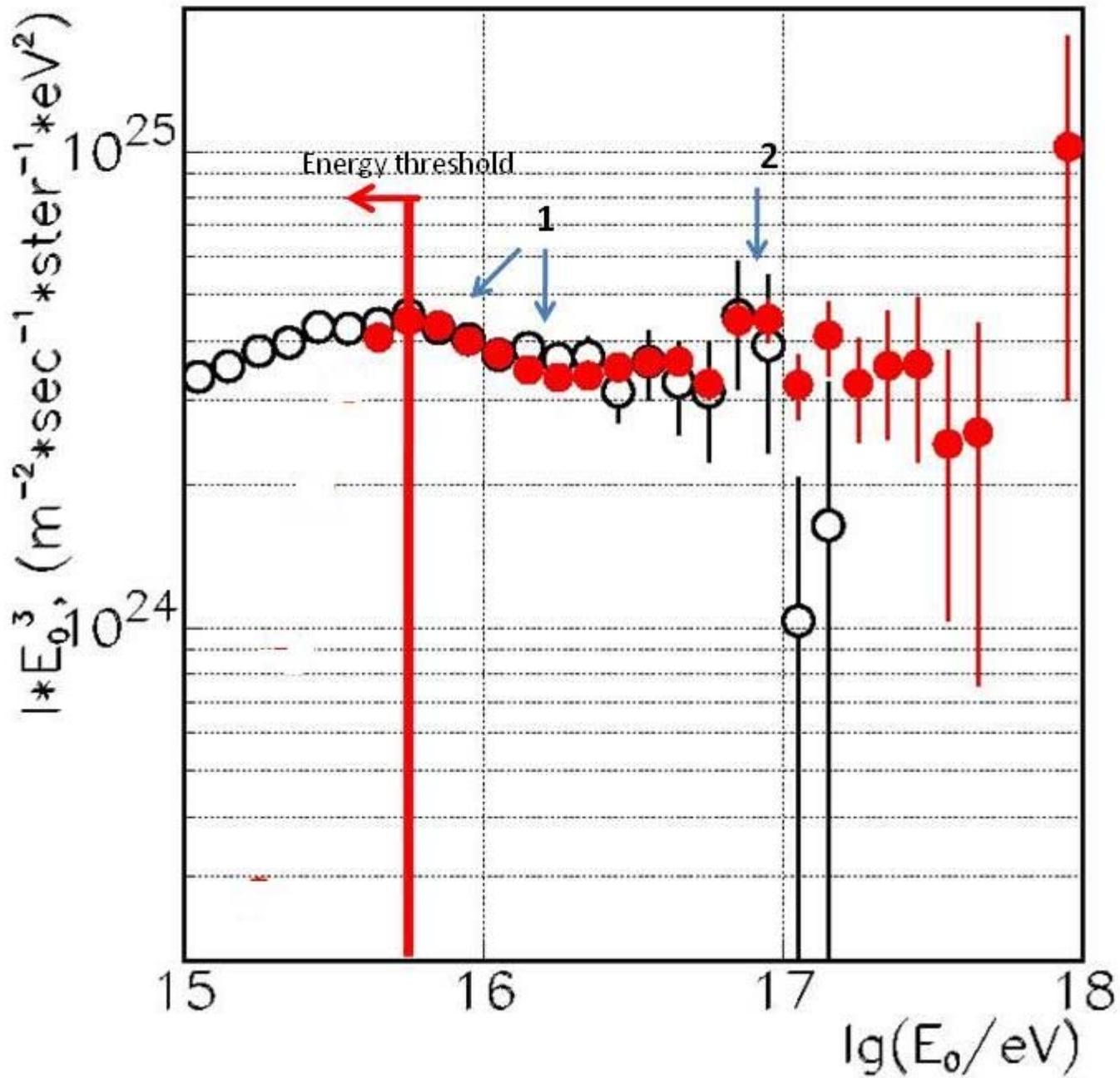
Результаты последних лет

KASKADE-Grande

Тунка-133

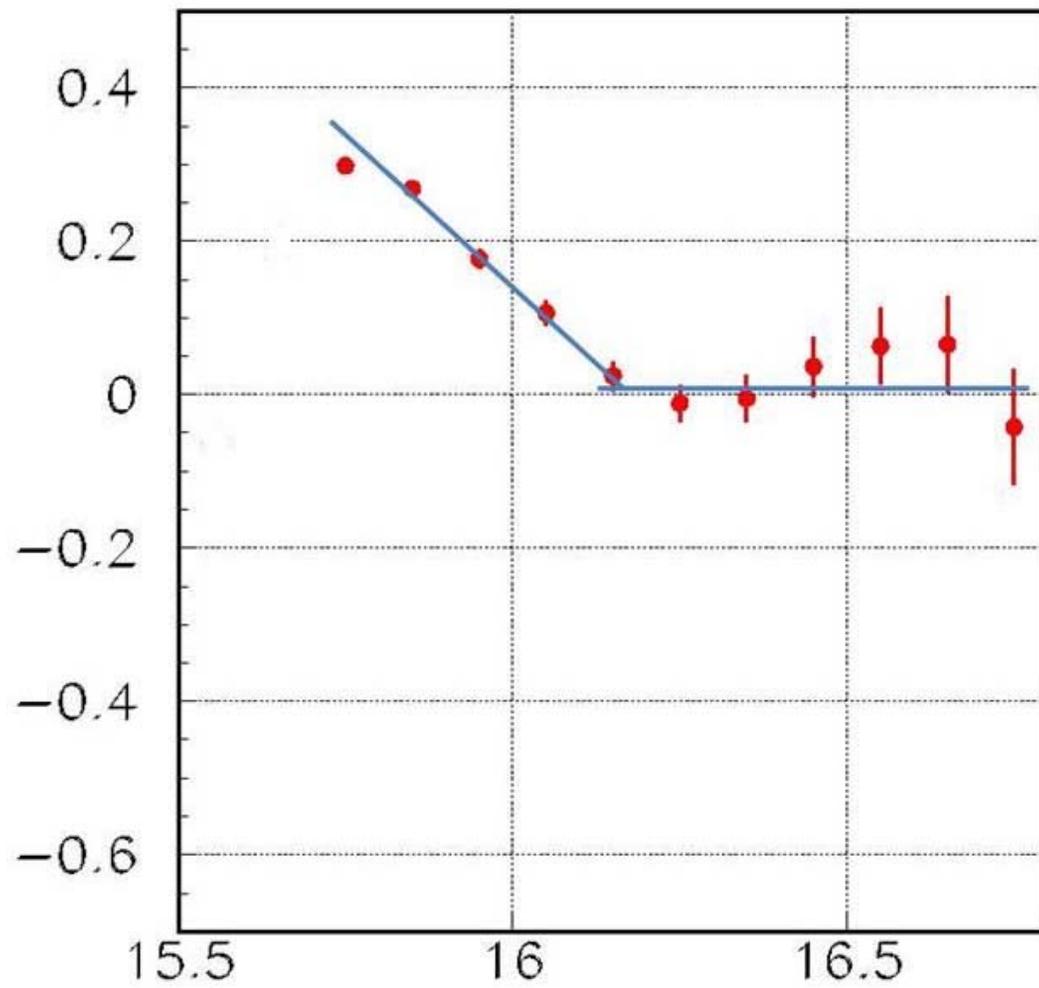
ГАММА





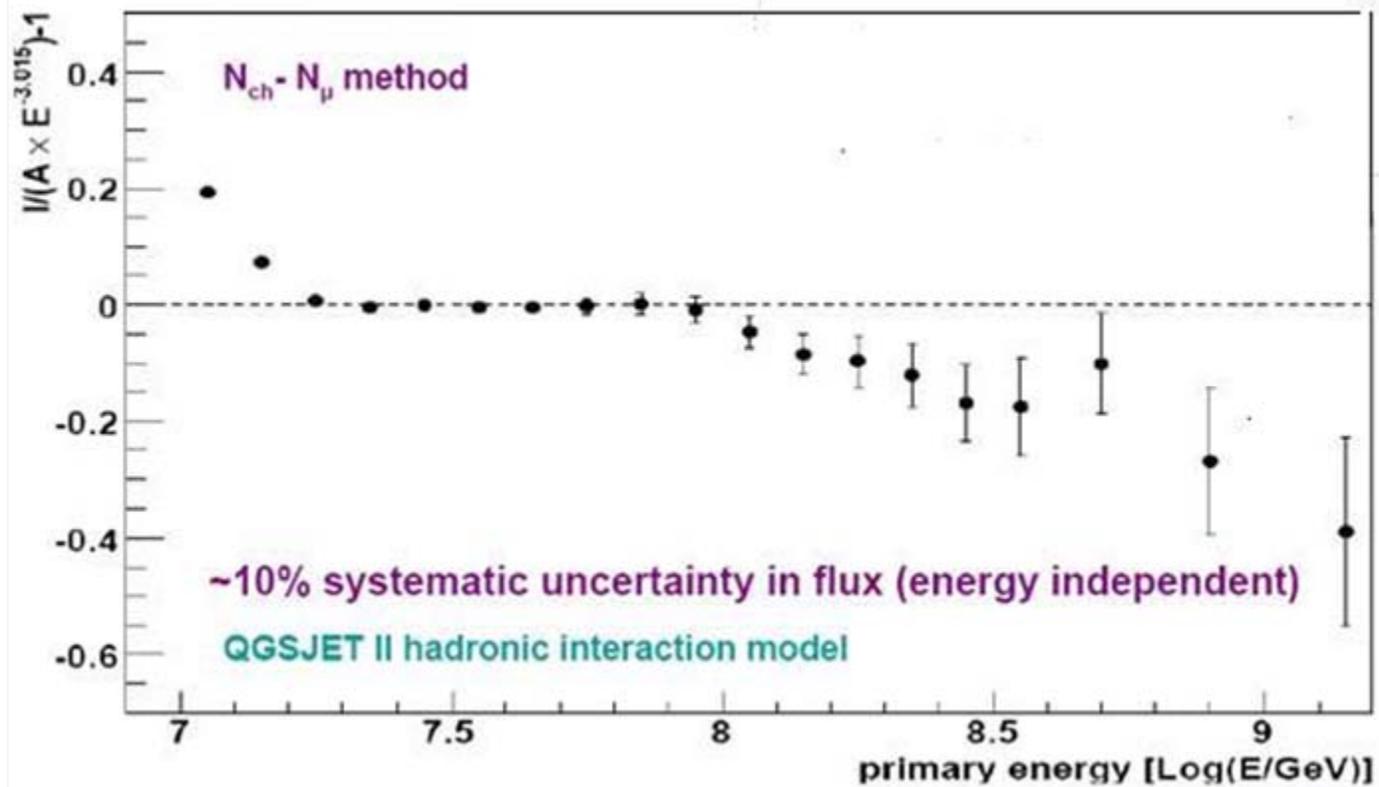
- Тунка-133
- Тунка-25

$I / A E^3 - 1$



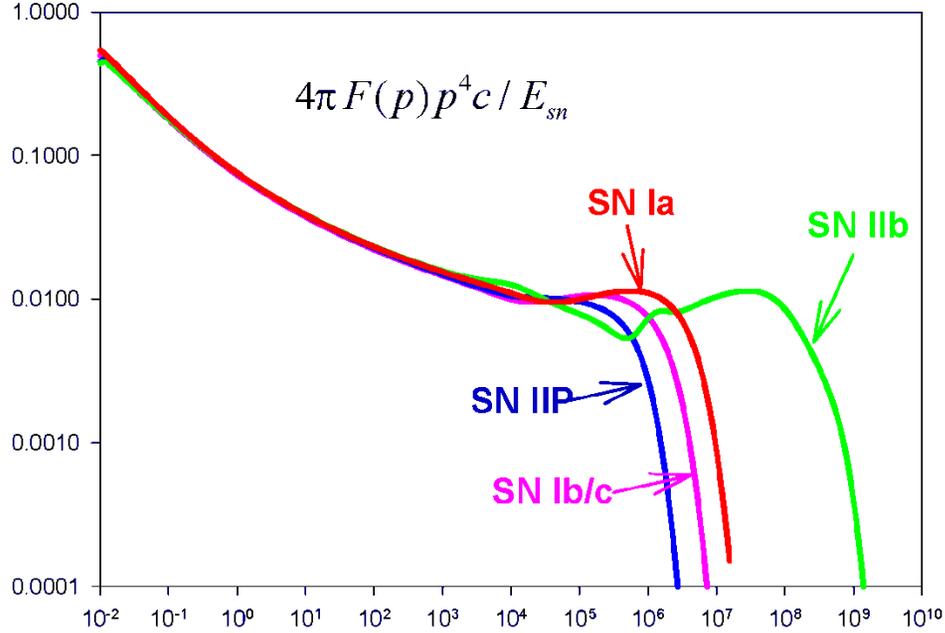
$\text{Log } E / 1 \text{ eV}$

KASKADE -Grande



Energy spectrum

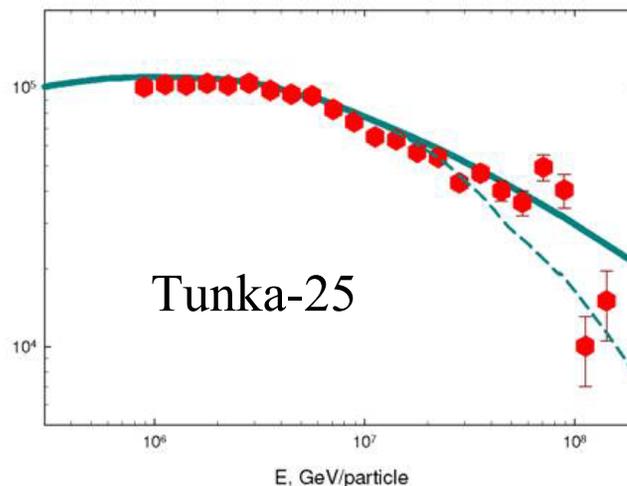
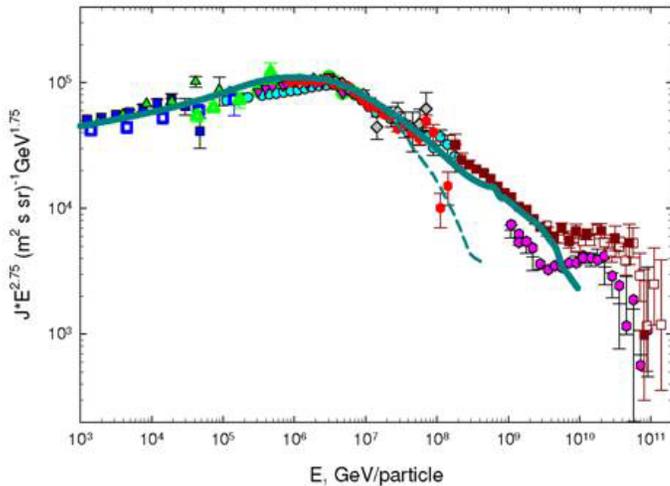
$$E_{\max} = 1.1 Z 10^{15} (E_{51})^{1/6} (M_{\text{ej}})^{-2/3} \text{ eV}$$



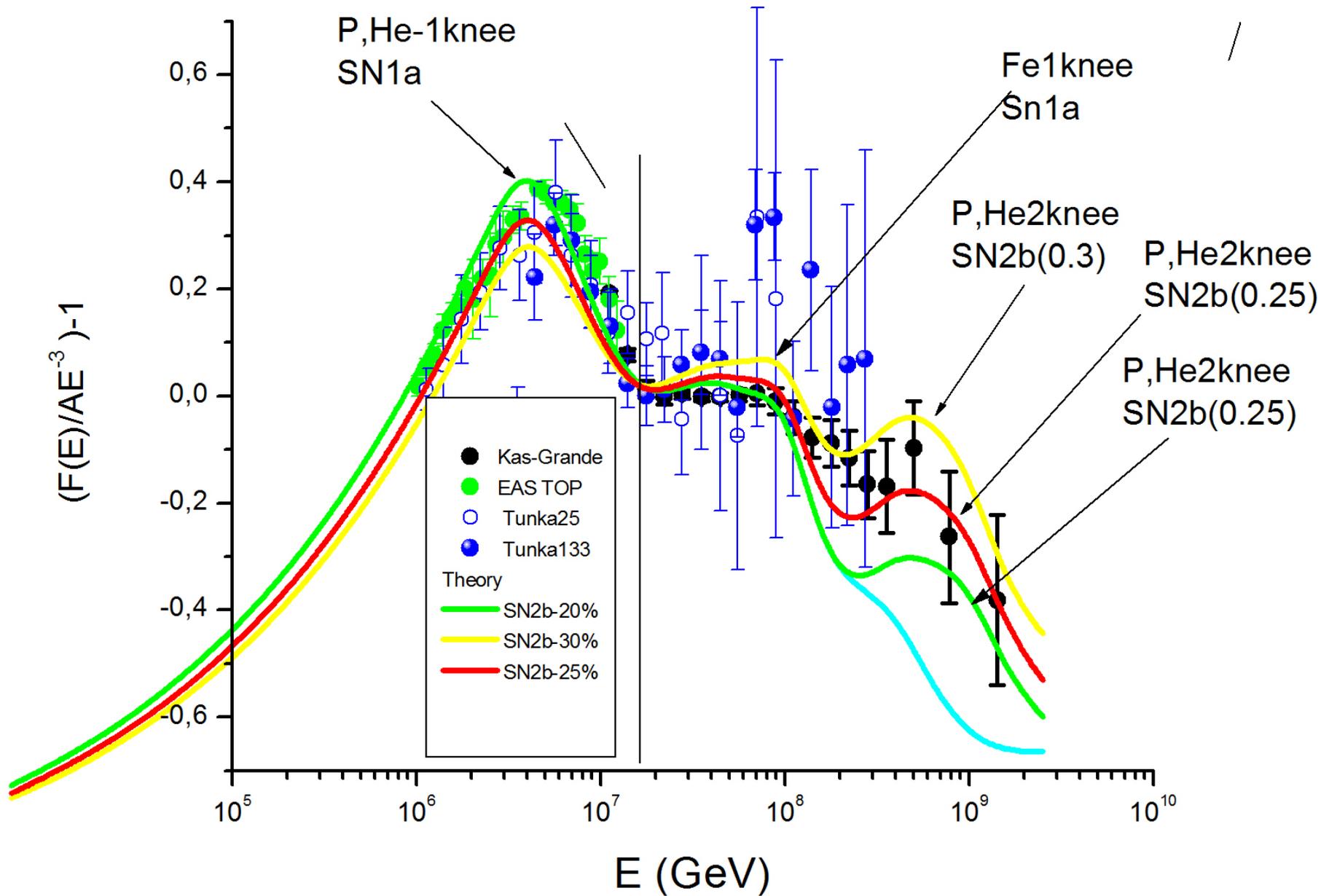
E_{51} – energy of explosion $\times 10^{51}$ erg
 M_{ej} – mass of remnant $\times M_{\odot}$

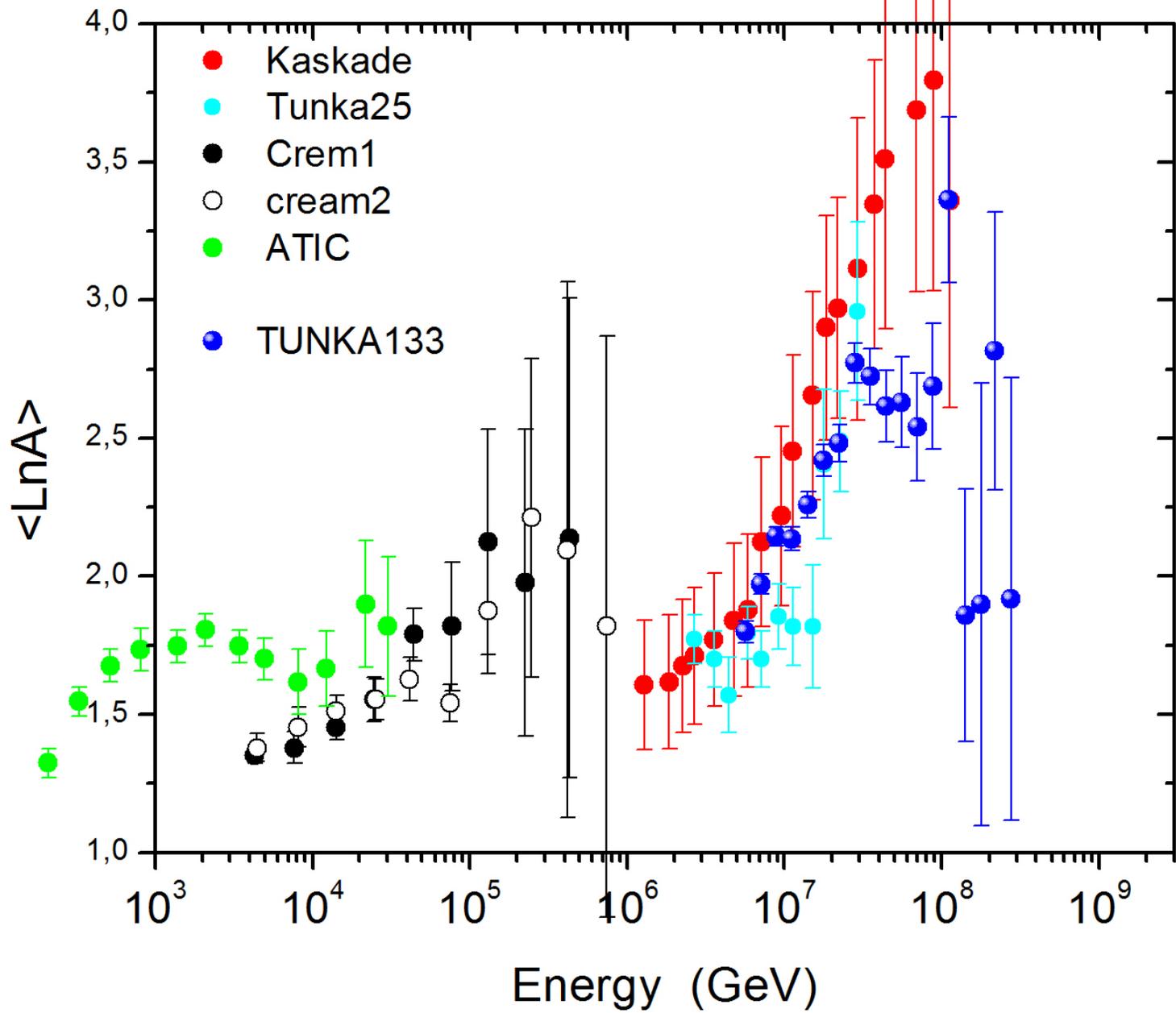
- Ia - 30%
- IIP - 44%
- Ib/c – 22%
- IIb - 4%

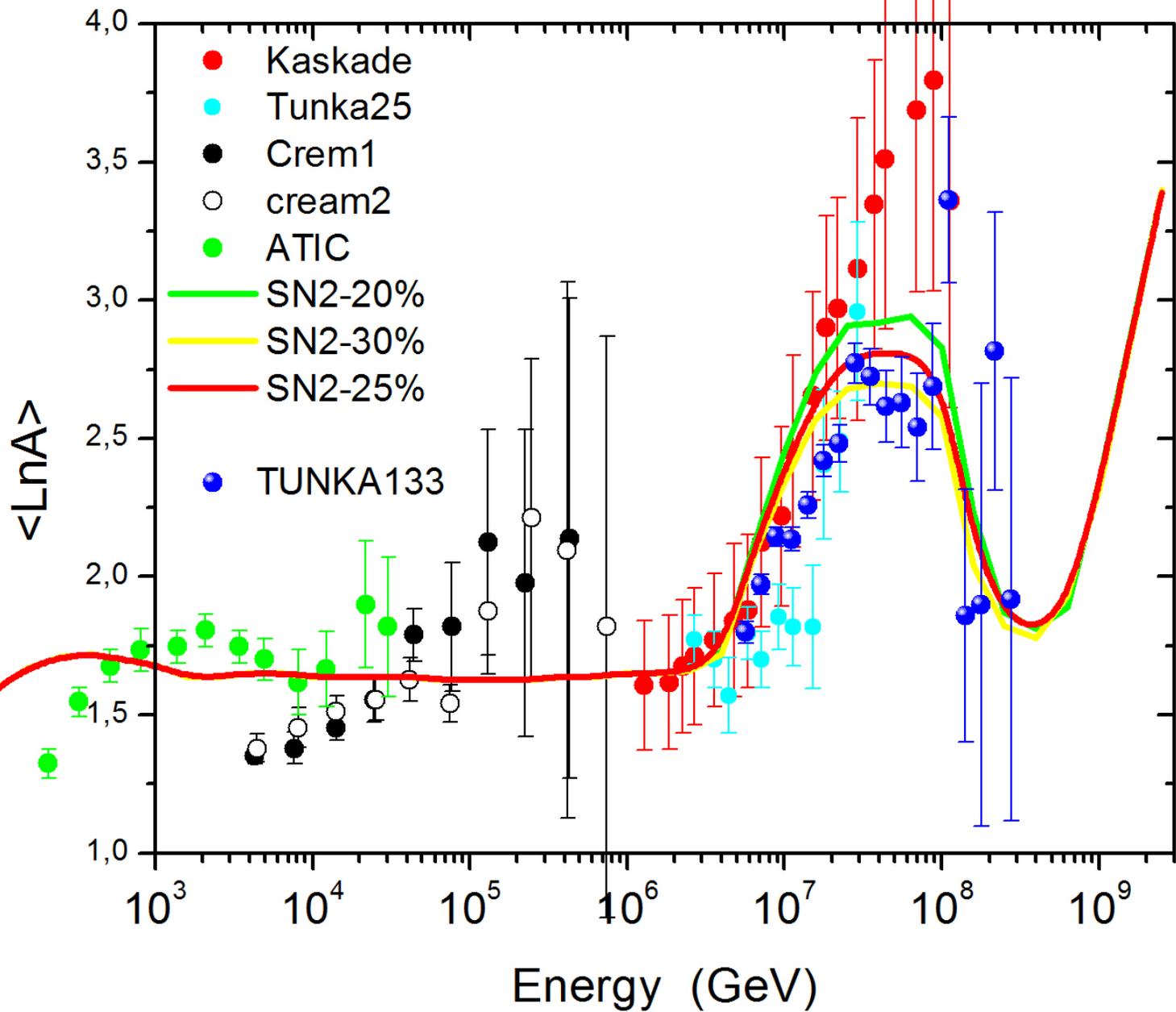
Normalization at 1 TeV



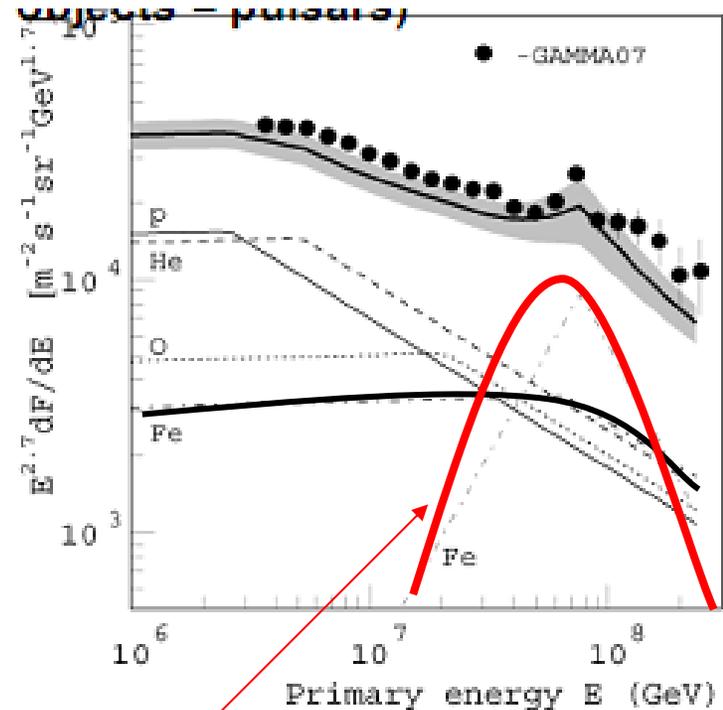
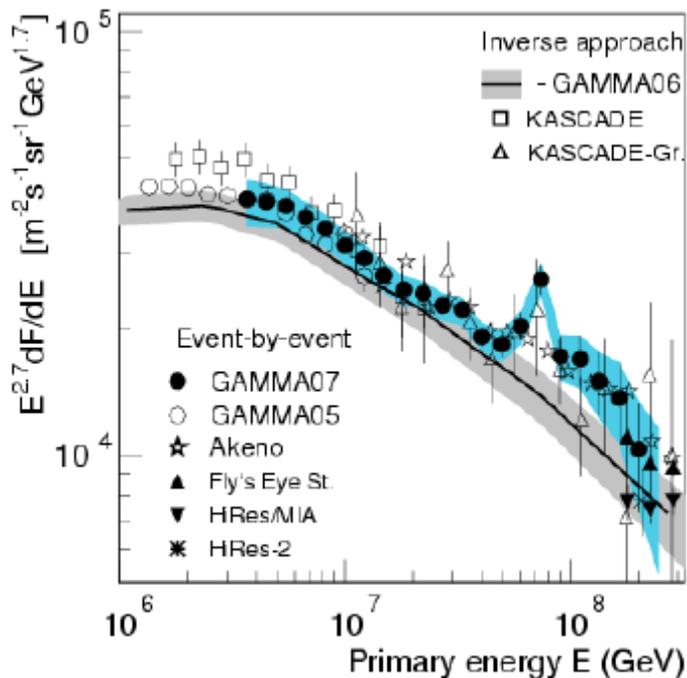
Ptuskin,
 Zirakashvili
 arXiv:
 0912.5172





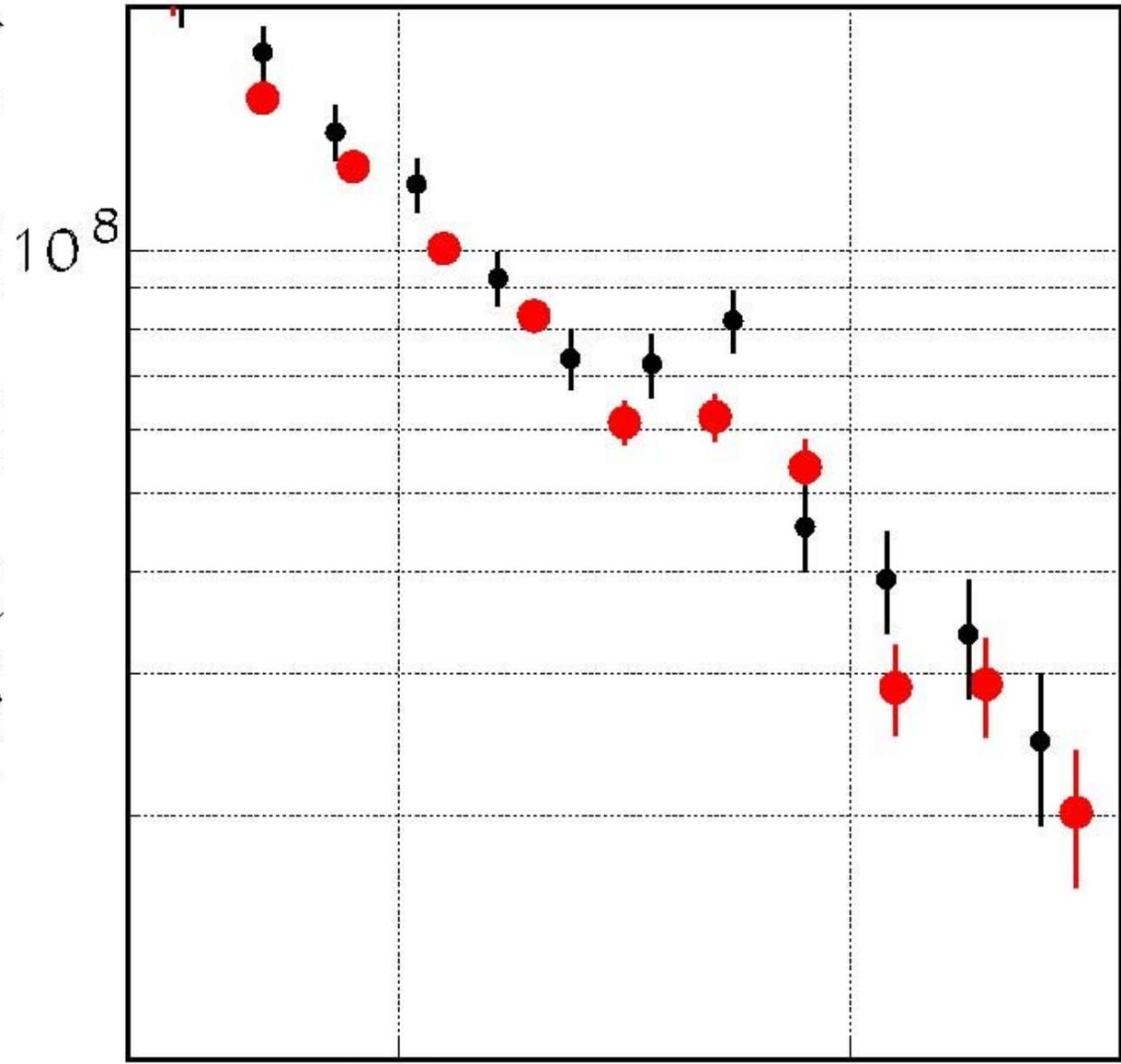


«Пик» в спектре – результат установка ГАММА



**Single source at higher energies
(e.g. iron component from compact
objects = pulsars)**

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



- Тунка-133
- Гамма

Новые экспериментальные данные указывают на более сложную зависимость интенсивности космических от энергии в диапазоне 10^{15} - 10^{18} эВ, чем раньше думали.

Открыли ли мы уже переход от галактических космических лучей к метагалактическим или видим новые галактические источники?

Нужно детальное знание зависимости массового состава от энергии.

Предельно высокие энергии (выше 10^{18} эВ)

Наземные

1. Якутская установка (12 км^2) - в работе
2. AGASA (Япония, 100 км^2) – закрыта 2003 году
3. Auger-South (Аргентина, 3000 км^2)
4. Telescope Array (USA, 750 км^2)
5. Auger –Nord (USA, 20000 км^2) - проект

Регистрация со спутника (10 % времени наблюдений)_

1. TUC (Россия) – 10000 км^2 запуск в 2011 году
2. EUSO (Европа-Япония) – 100000 км^2

Cut-off on relic photons

Greizen, Zatsepin and Kuzmin (GZK) 1966



Cross section $\sim 5 \cdot 10^{-28} \text{ cm}^2$

Energy threshold $\approx 6.8 \cdot 10^{19} \left(\frac{\varepsilon_\gamma}{10^{-3} \text{ эВ}} \right) \text{ эВ}$

$$E = E_0 \exp(-l/L) \quad L \approx 15 \text{ Мпс}$$

Auger observatory

1600 баков, заполненных водой (10 м^2) на площади 3000 км^2 .

Auger (S) – Аргентина , Auger (N) – США

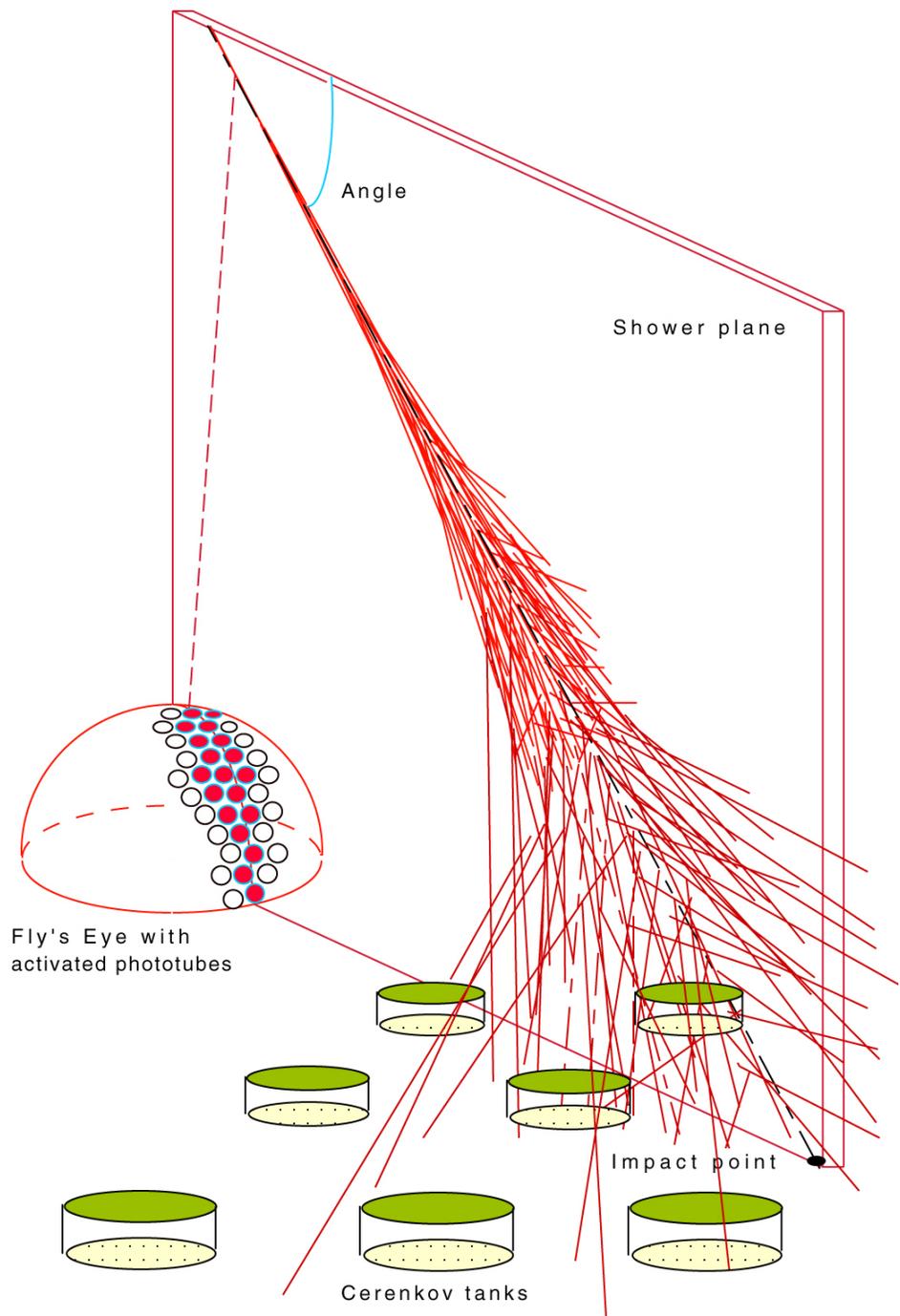
Строительство Auger (S) закончено в 2008 г

.

П. Оже (Auger) – физик, открывший широкие атмосферные ливни

Two techniques:

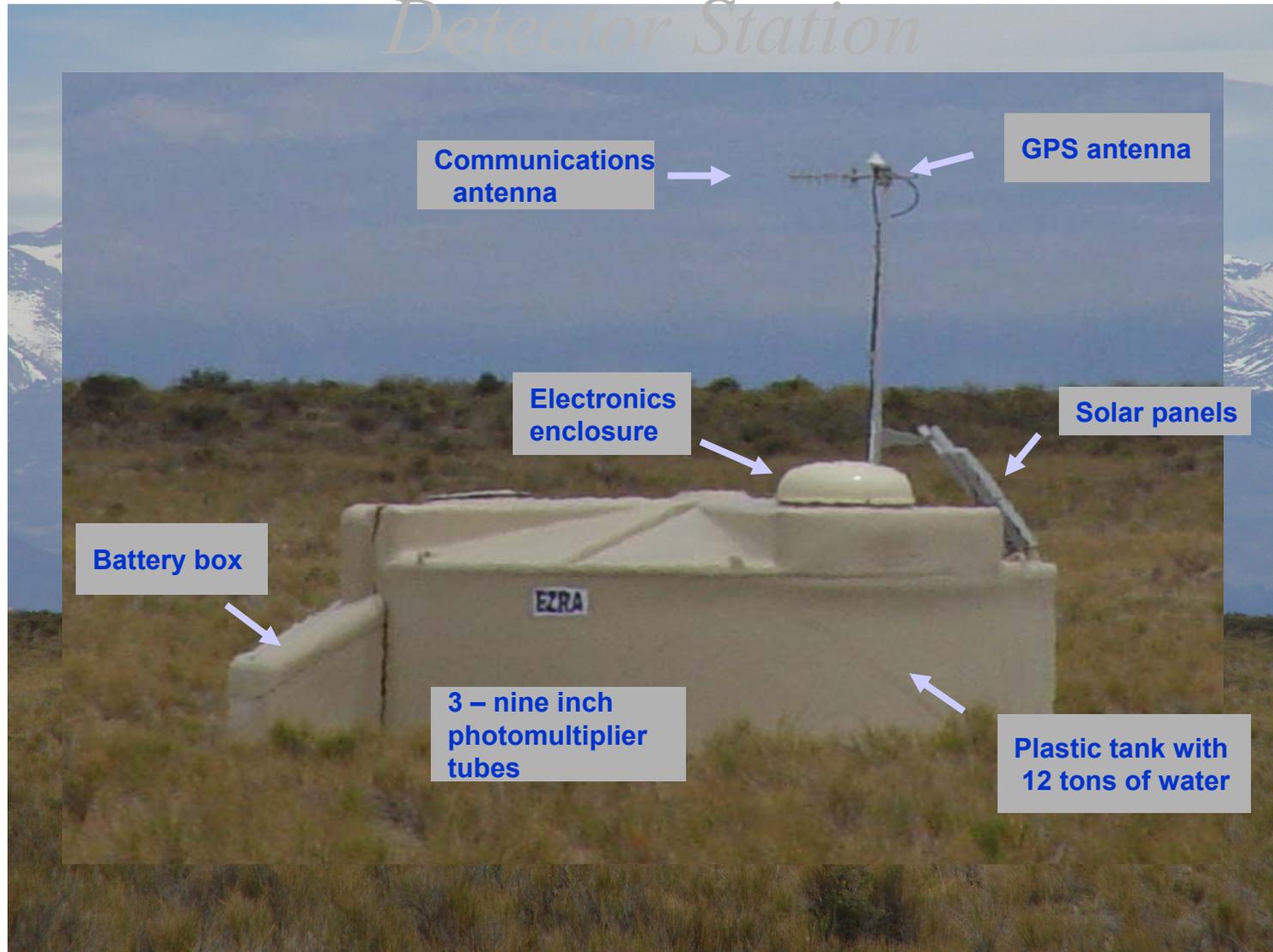
- **detect shower particles on the ground**
- **detect air fluorescence produced by shower particles**



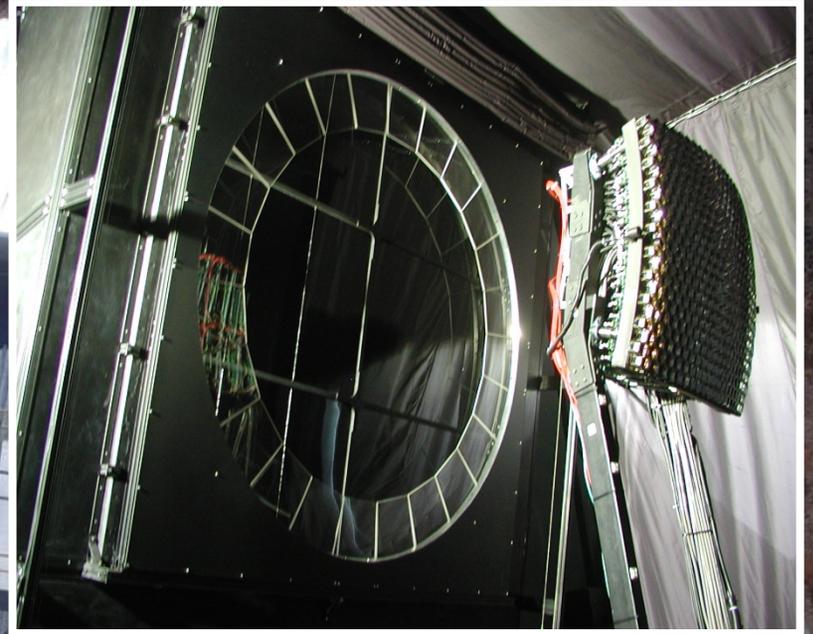


The Surface Array

Detector Station



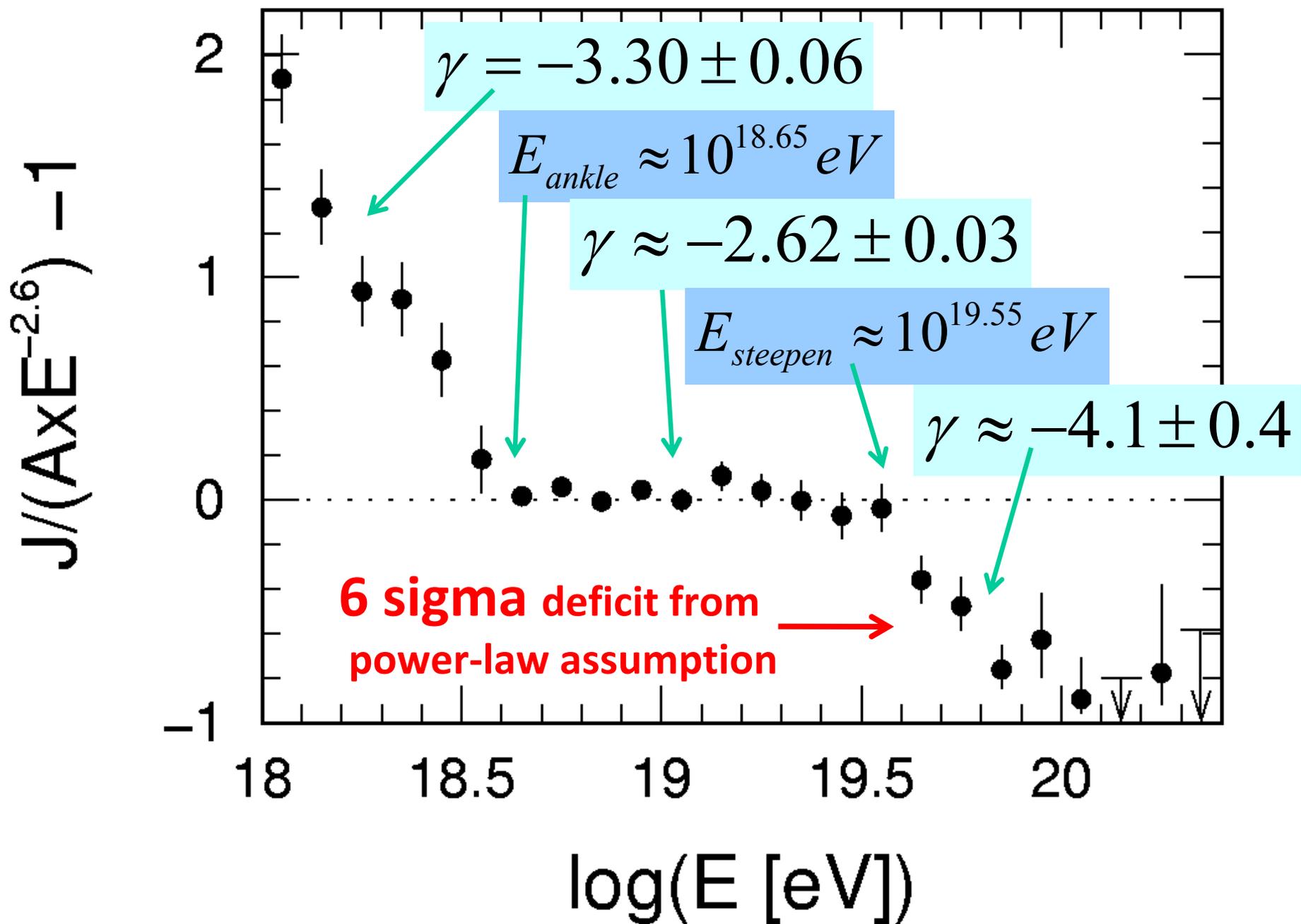
Fluorescence Detector



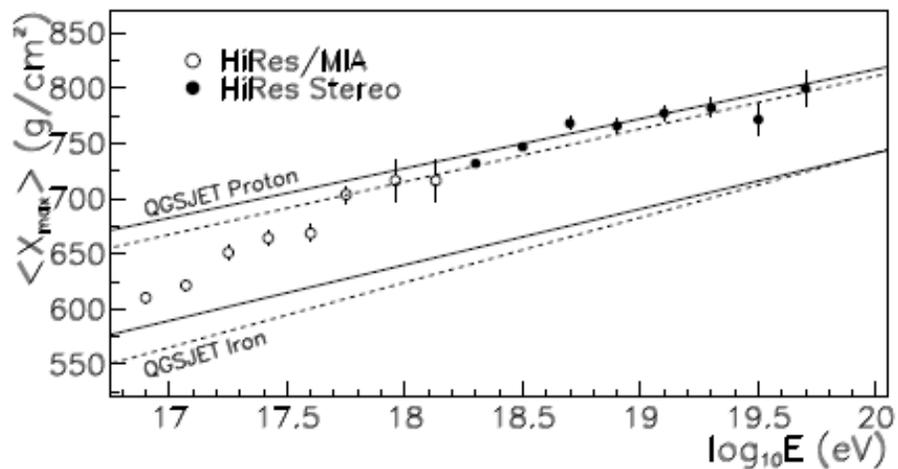
Fluorescence telescopes:

Number of telescopes: 24

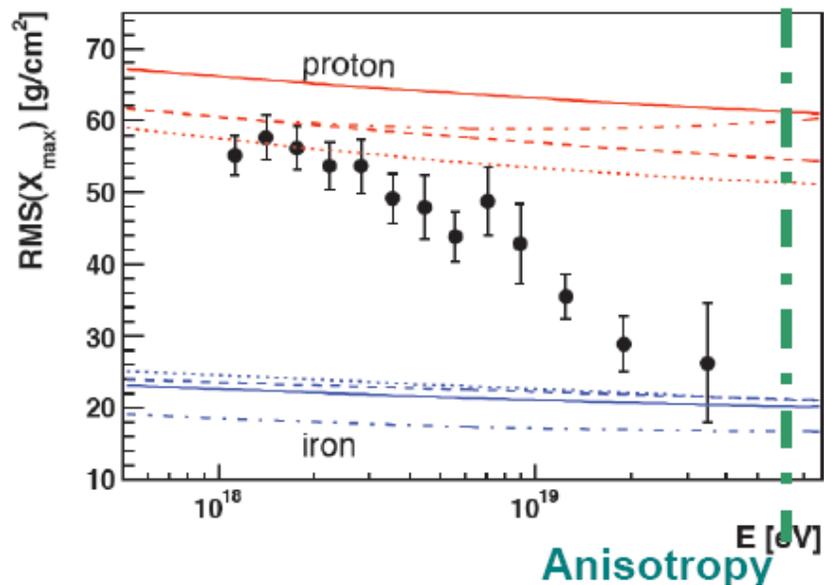
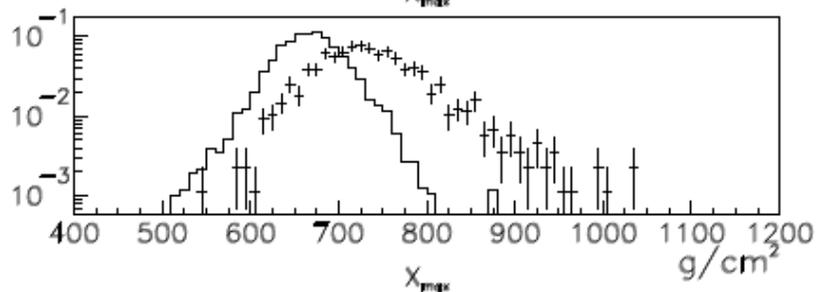
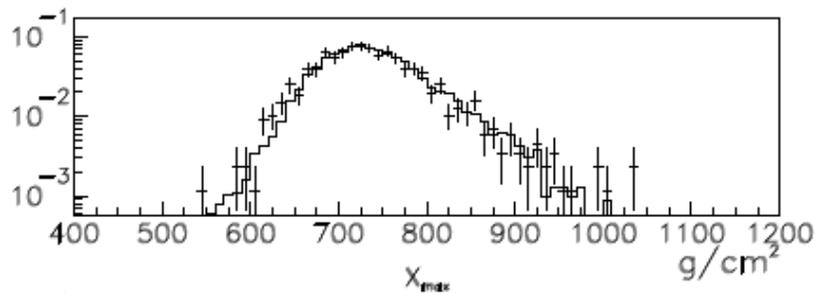
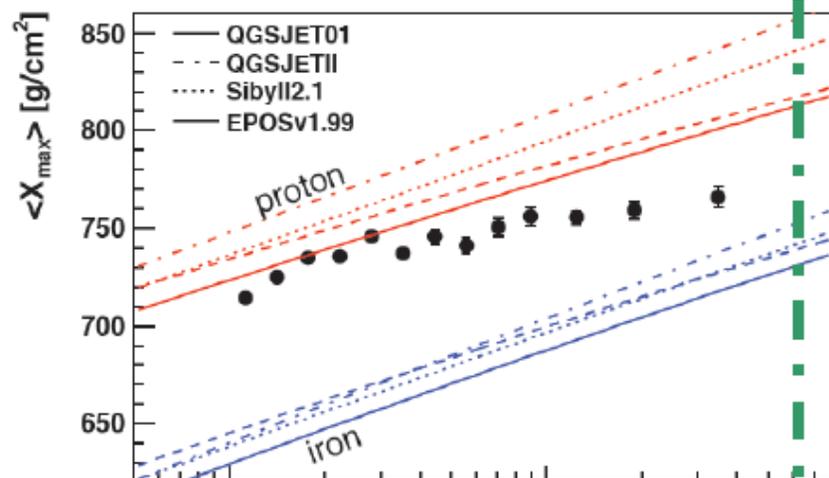
Mirrors: 3.6 m x 3.6 m with field of view 30° x 30°, each telescope is equipped with 440 photomultipliers.



HiRes



Auger



Обрыв в спектре при $5 \cdot 10^{19}$ эВ обнаружен.

Но ГЗК ли это ?



В Италии разместить большую установку сложно,
а в России?

Спасибо за внимание.