

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:

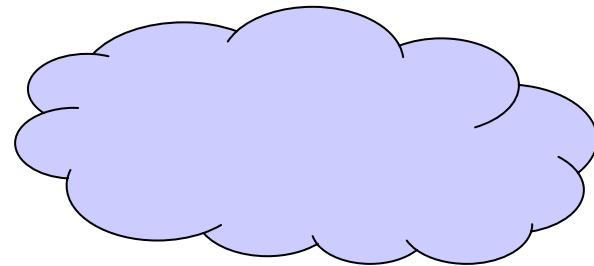
10^{12} эВ - 1 ТэВ

10^{15} эВ - 1 ПэВ

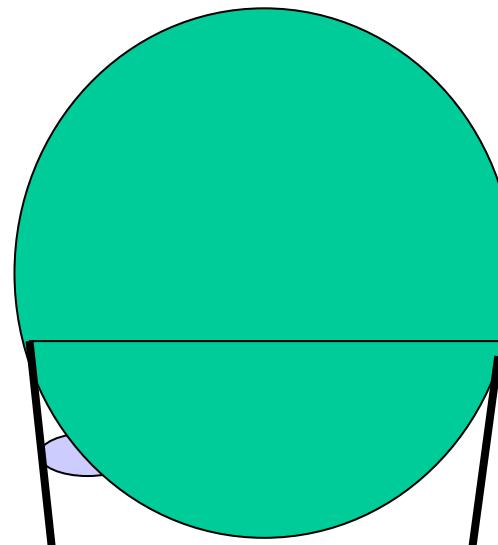
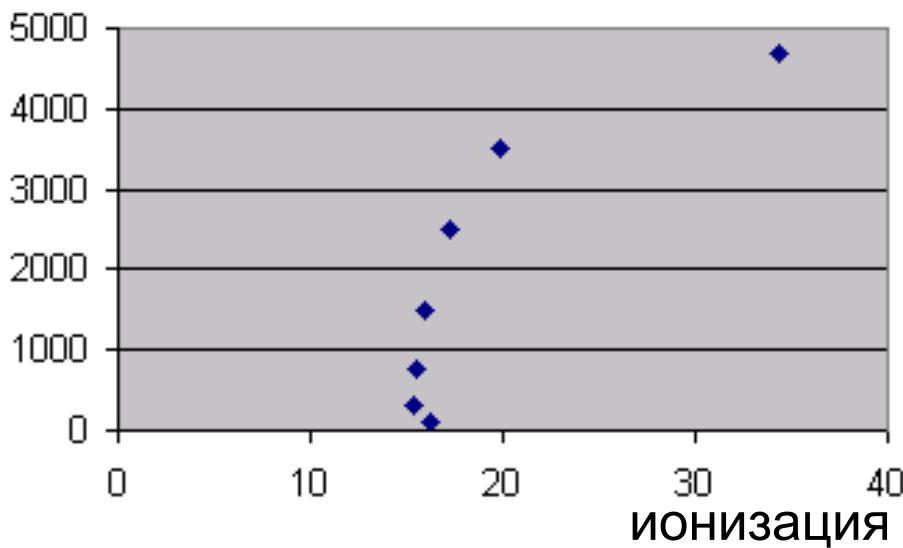
10^{18} эВ - 1 ЕэВ

10^{21} эВ - 1 ЗэВ

Открытие космических лучей

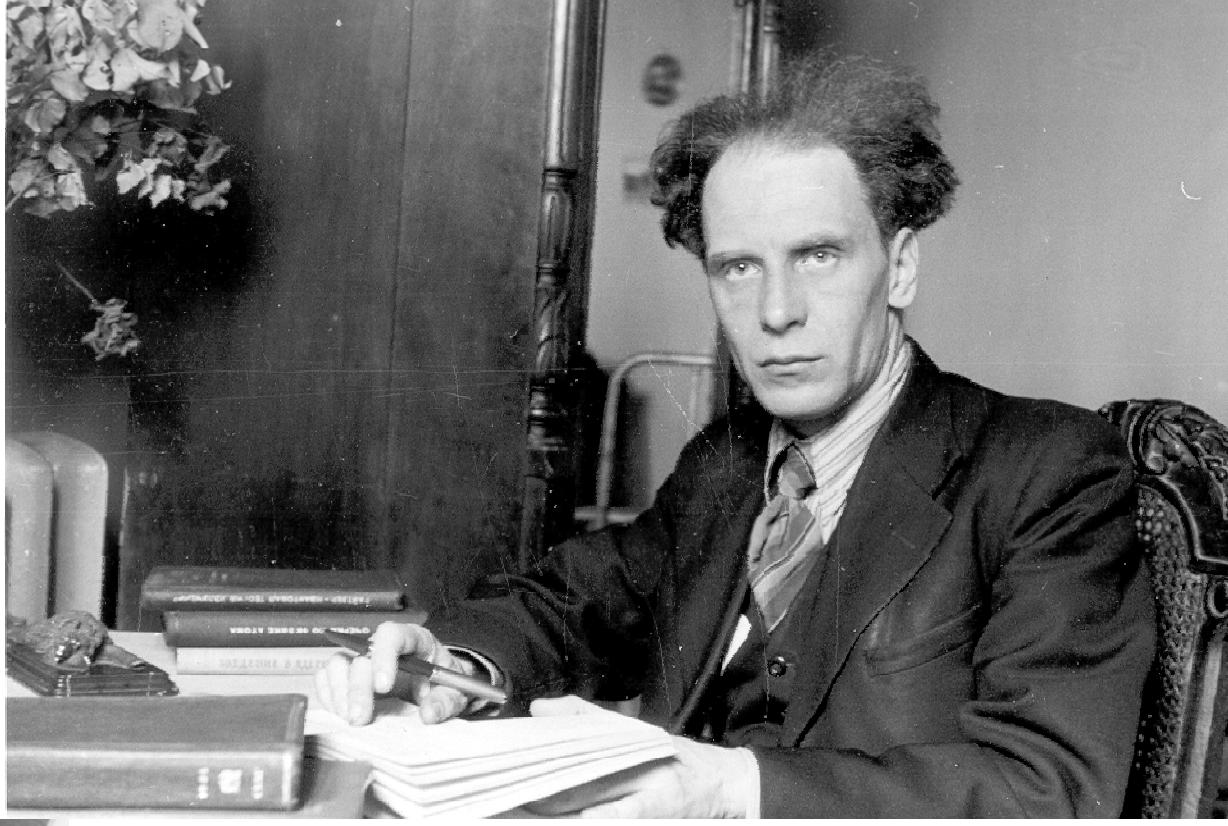
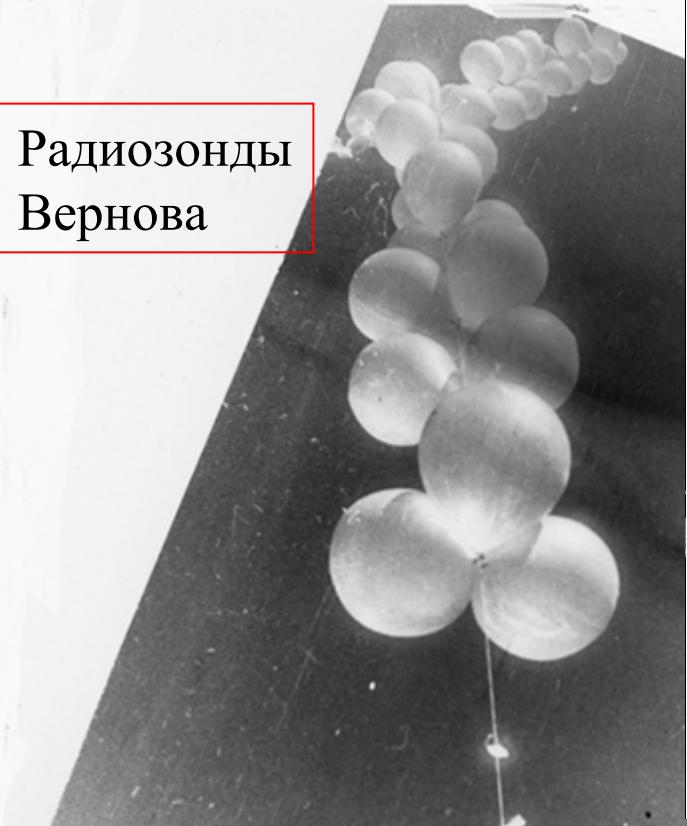


Высота (м)



Виктор Гесс
(Нобелевская премия
1936)

Радиозонды
Вернова



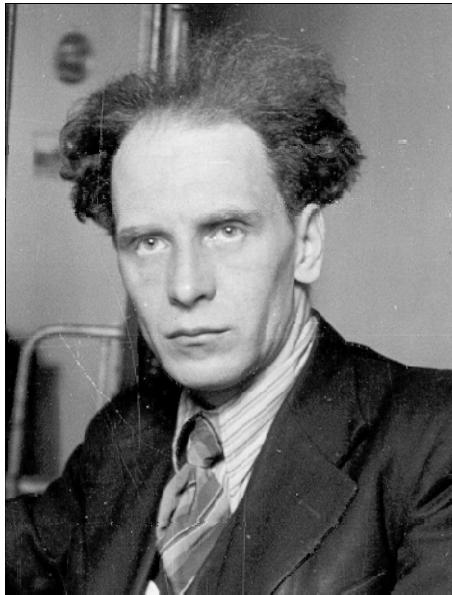
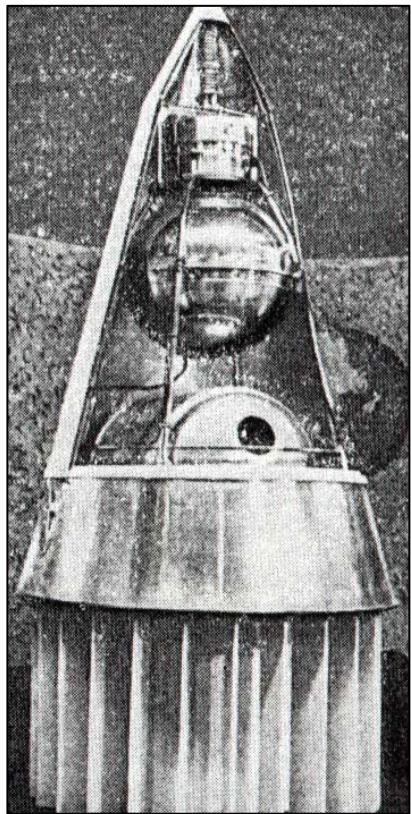
С.Н.Вернов

1912-2012

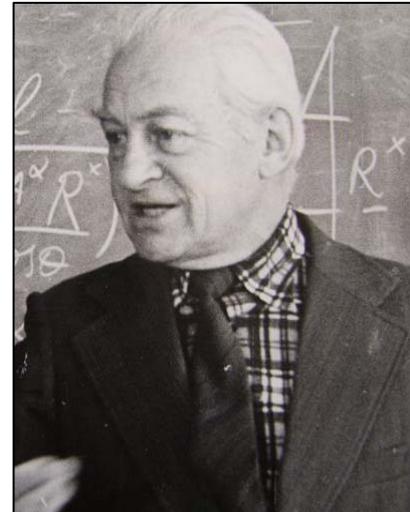
Директор НИИЯФ МГУ
1960-1982
Зам.директора 1946-1960

Первый физический эксперимент в космосе (ноябрь, 1957)

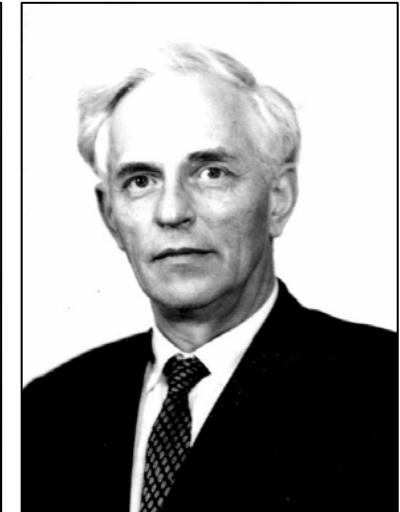
Scientists from Moscow State University
provided the first space physics experiment in space



S. N. Vernov



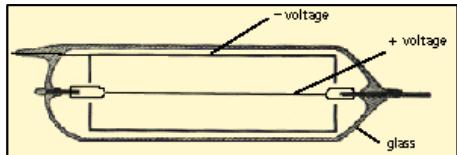
N.L. Grigorov



A.E. Chudakov



Yu. I. Logachev



GM - tube

Космические лучи (V.Hess, 1912)

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

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

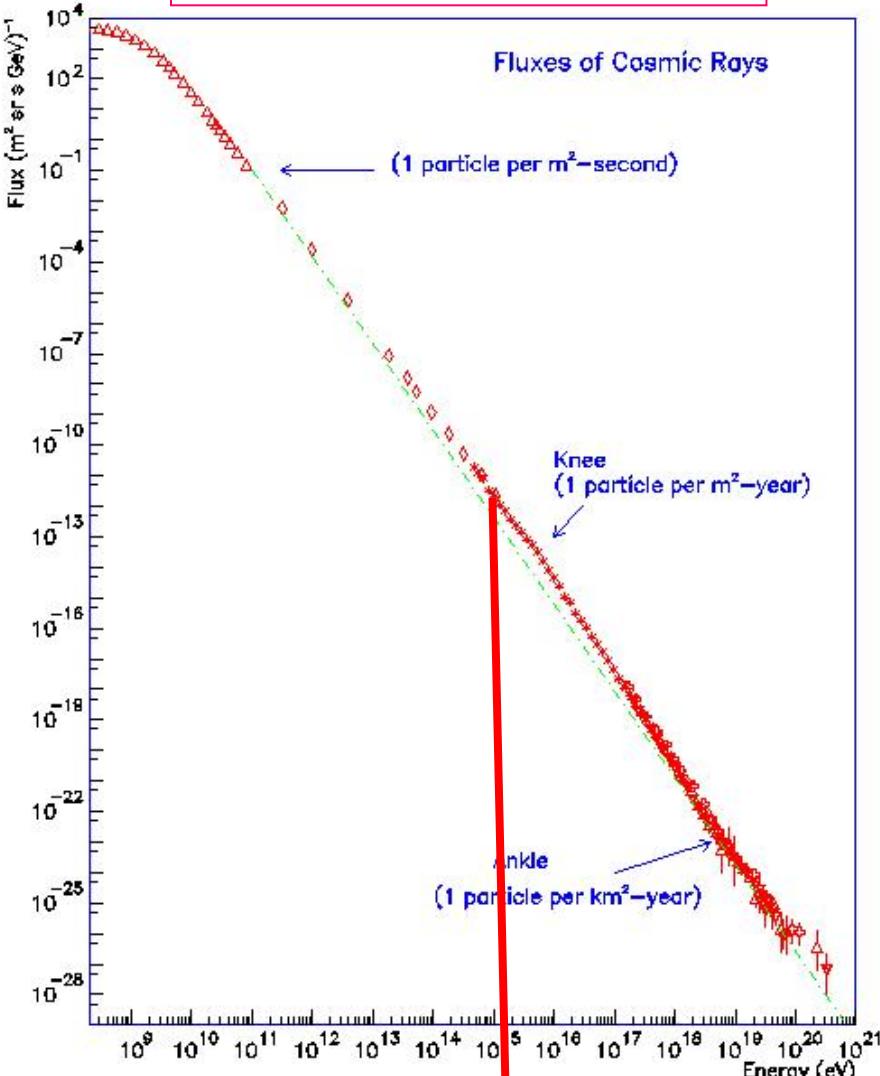
20 порядков !

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

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

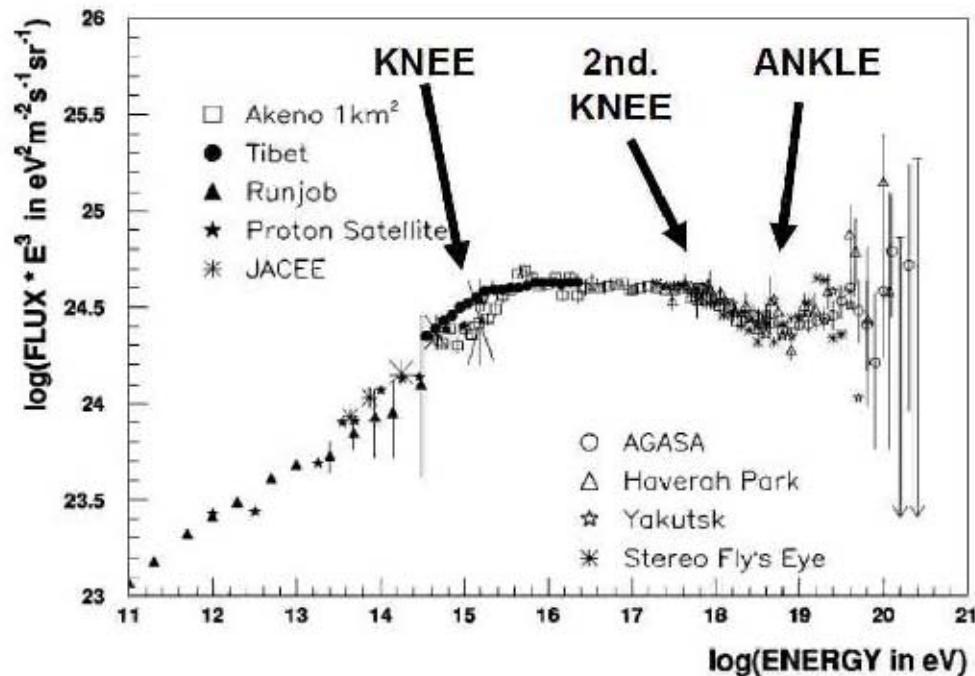
High energy physics : Study of interaction at UHE and search
for new particles

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



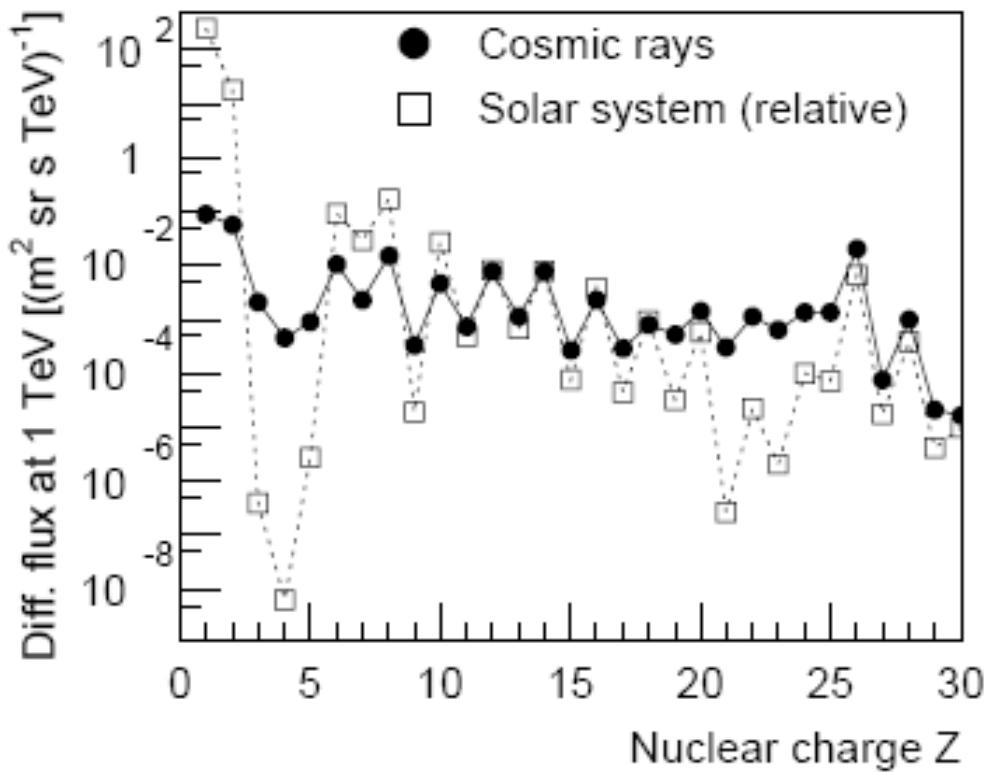
γ : от 1.7 до 2

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



«Прямые» методы
Метод регистрации широких
атмосферных ливней (ШАЛ)

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 $E \approx 1$ ГэВ) - (в 10^5 раз больше чем в звездах) $\sim E^{-0.7}$

$$\begin{array}{c} n \quad \sigma_{in} \quad L = 0.3 \\ \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \\ \text{Концентрация} \\ \text{вещества} \\ \text{В Галактике} \\ \approx 1 \text{ см}^{-3} \end{array}$$

путь

$$\begin{array}{c} \\ \uparrow \\ \text{Сечение} \\ \text{расщепления} \\ \approx 8 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2 \end{array}$$

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

$$\text{Диаметр Галактики} = 3 \cdot 10^4 \text{ парсек}$$

$$\text{Время жизни} = L / c \approx 4 \cdot 10^6 \text{ лет}$$

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

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.

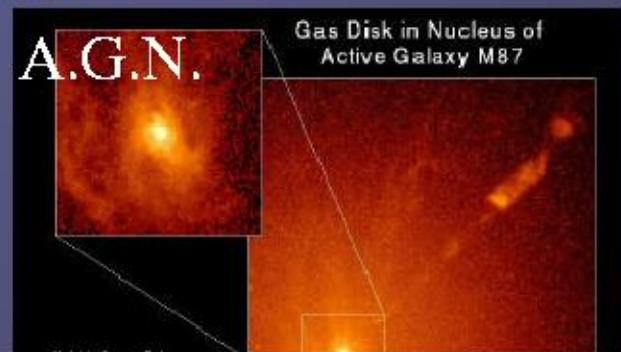
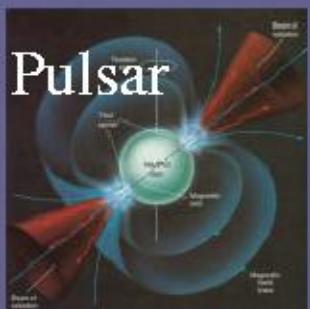
Какие источники? Есть ли обрезание спектра на реликтовом излучении? Нужна ли новая физика (нарушение Лоренц-инвариантности, сверхтяжелые частицы, топологические дефекты) для объяснения экспериментальных данных

Требования к источникам космических лучей

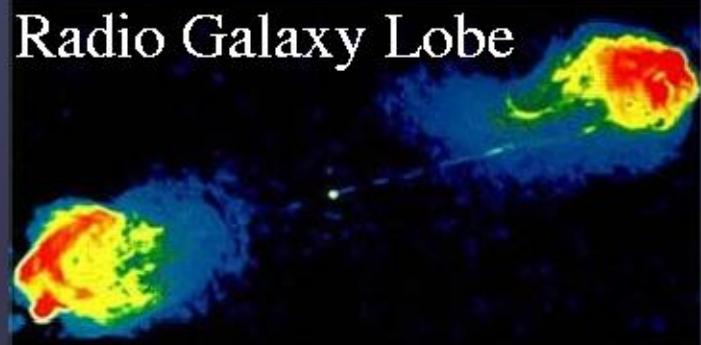
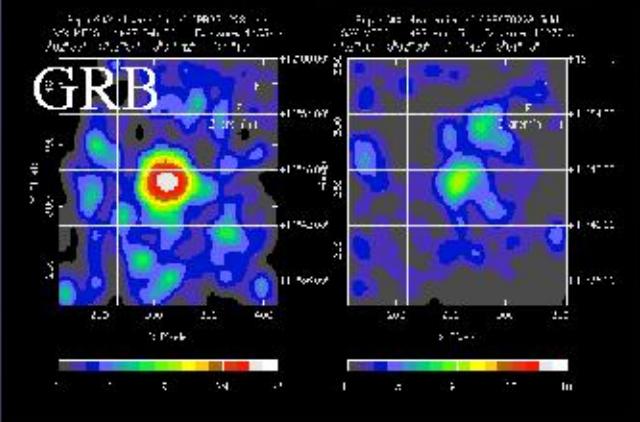
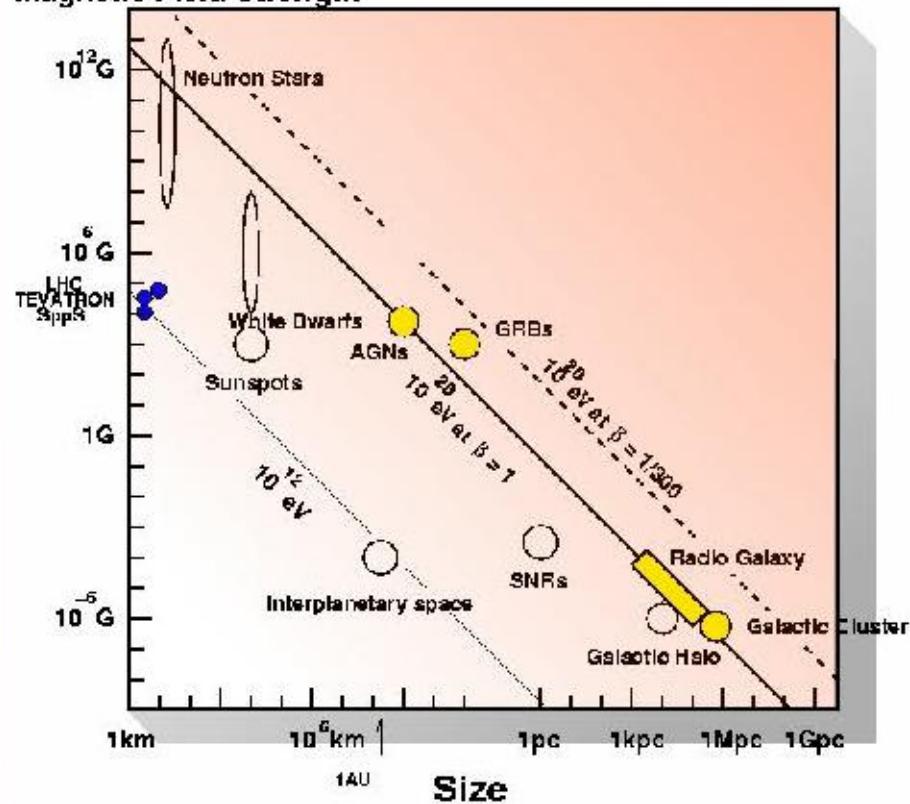
1. Возможность ускорение космических лучей до высоких энергий
 $E_{\max} \sim Z \cdot H \cdot L$ (правило Хиллоса)
(Z – заряд, H – магнитное поле, L- размер источника)
2. Обеспечить экспериментально наблюдаемую интенсивность космических лучей:
плотность энергии $\sim 1 \text{ эВ/см}^3$ (в Галактике)
 $\sim 5 \cdot 10^{40} \text{ эрг/сек}$

тепп генерации $E^2 \frac{dn}{dE}$ ($10^{19} - 10^{21} \text{ эВ}$) $\sim 10^{44} \frac{\text{эрГ}}{\text{Мпс}^3 \text{ год}}$

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 $\gamma = 2$

Максимальная энергия E_{\max} :

Крымский 1977;
Bell 1978

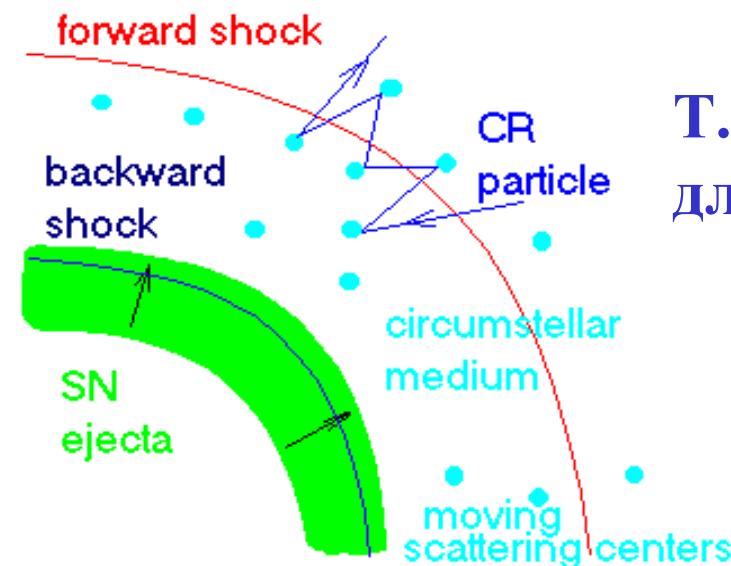
Спектр в источнике:

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

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

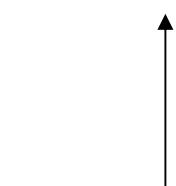
Т.е. необходимо усиление магнитного поля для ускорения до 10^{15} эВ

Механизм Бела – усиление магнитного поля космическими лучами



Спектр космических лучей у Земли

$$P(E) \sim Q(E) \tau(E) \propto E^{-2} E^{-0.7} = E^{-2.7}$$



Спектр в
источнике

Наблюдаемый
спектр

Модель

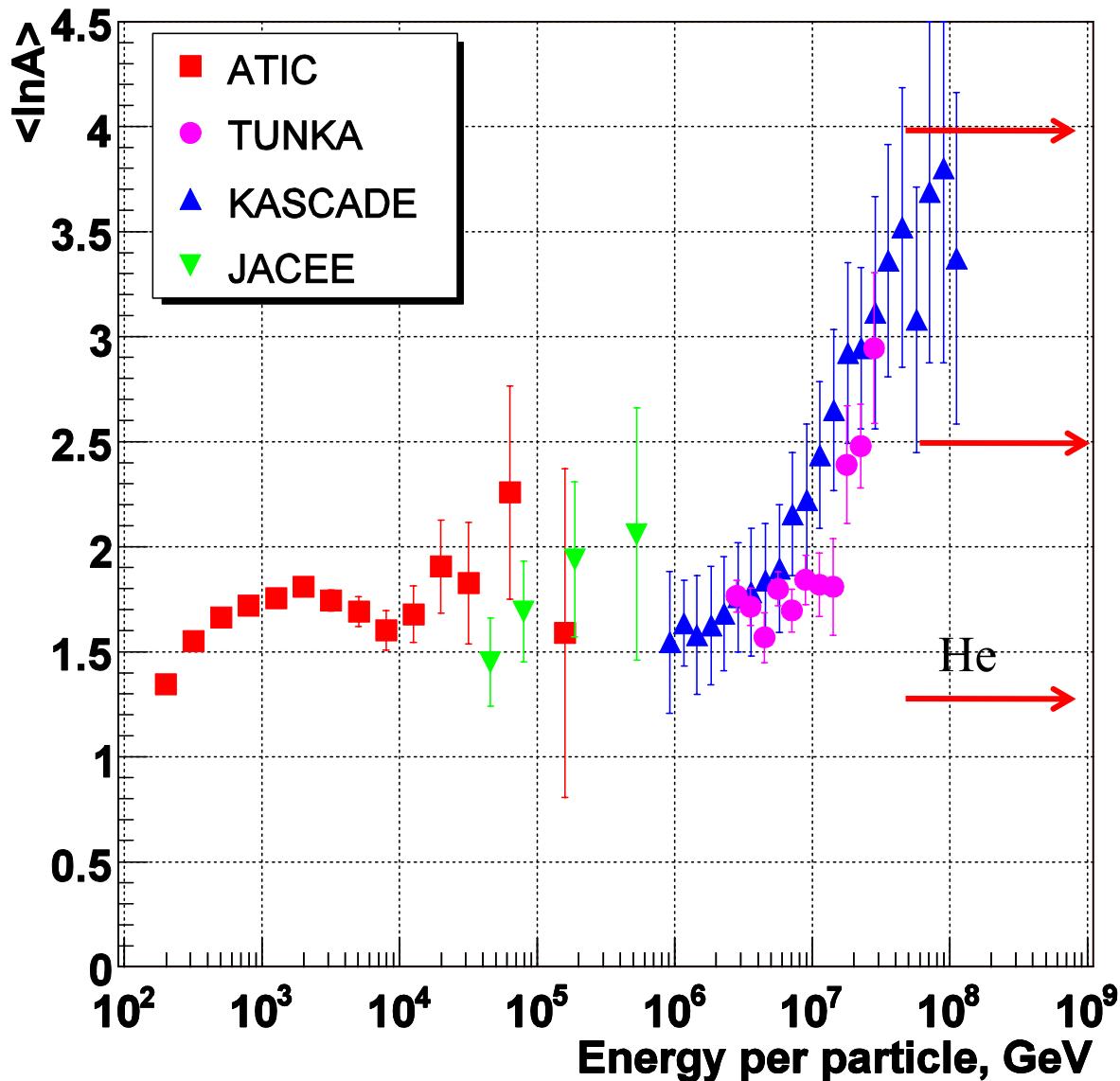
“Дырявой коробки”

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

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} □ Z B L

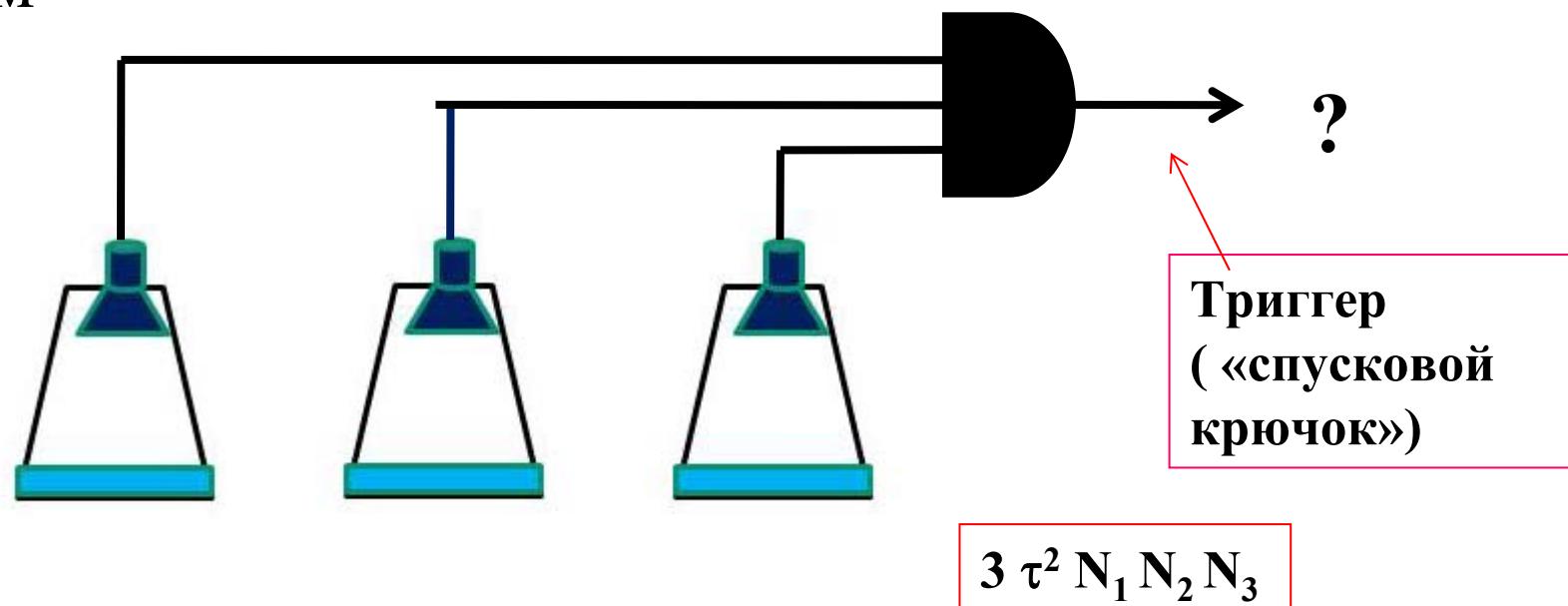
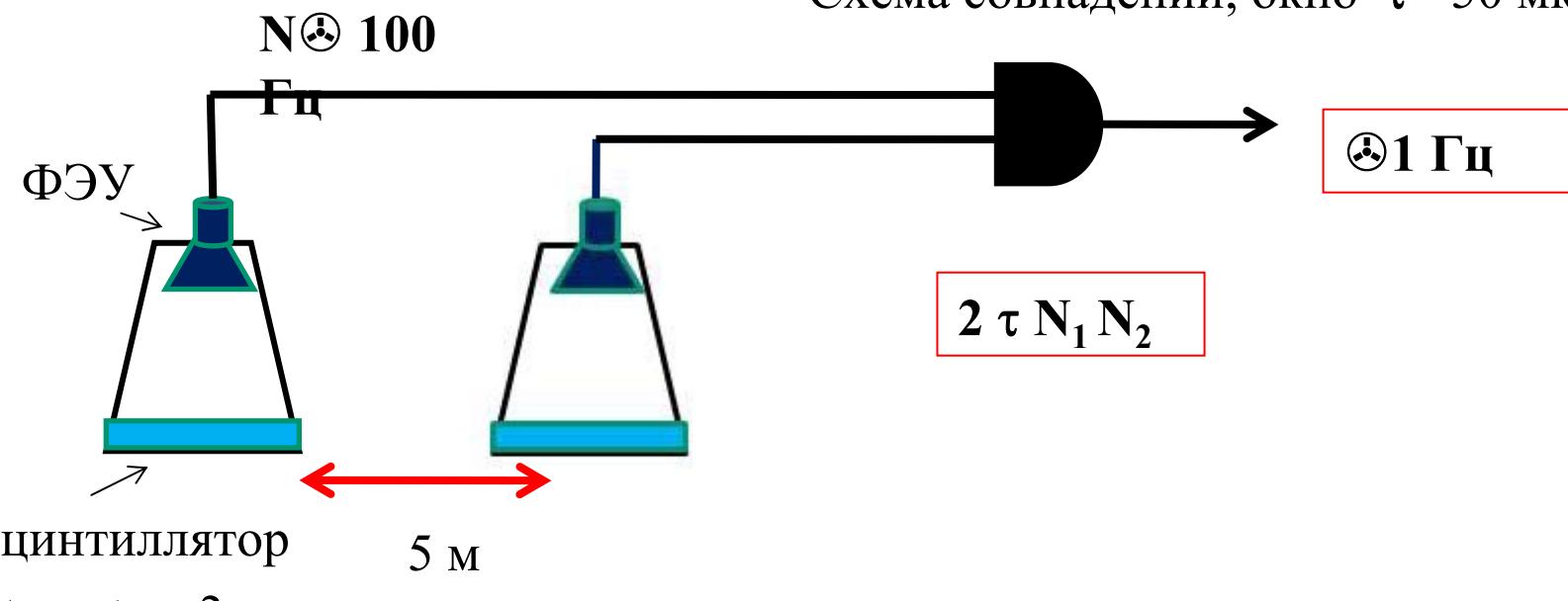
С увеличением энергии
происходит утяжеление
массового состава

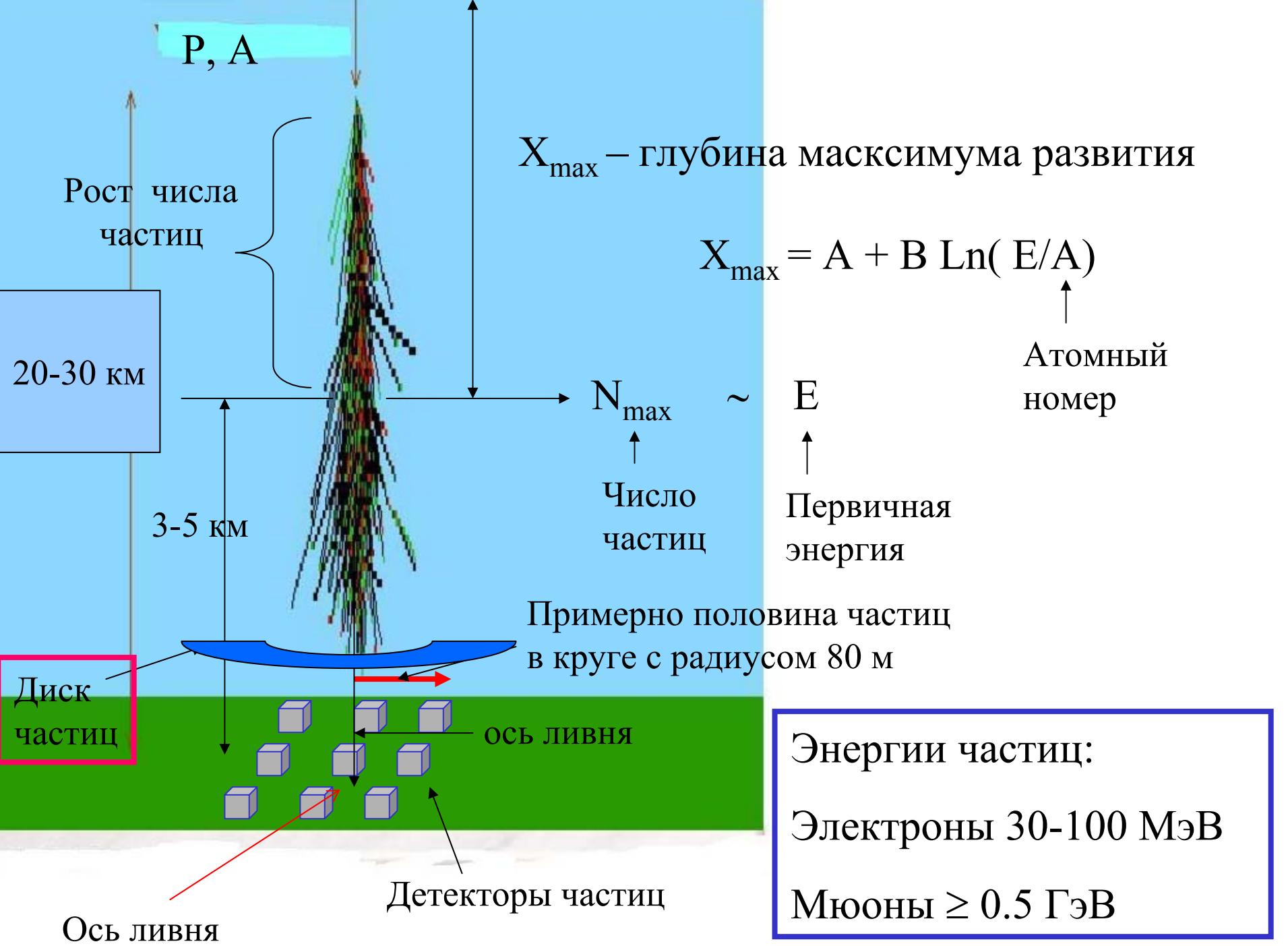
Эксперимент и теория
указывают, что в диапазоне
 $10^{17} - 10^{18}$ эВ может
происходить переход от
галактических к
метагалактическим
космическим лучам

Широкие атмосферные ливни: открытие и методы регистрации

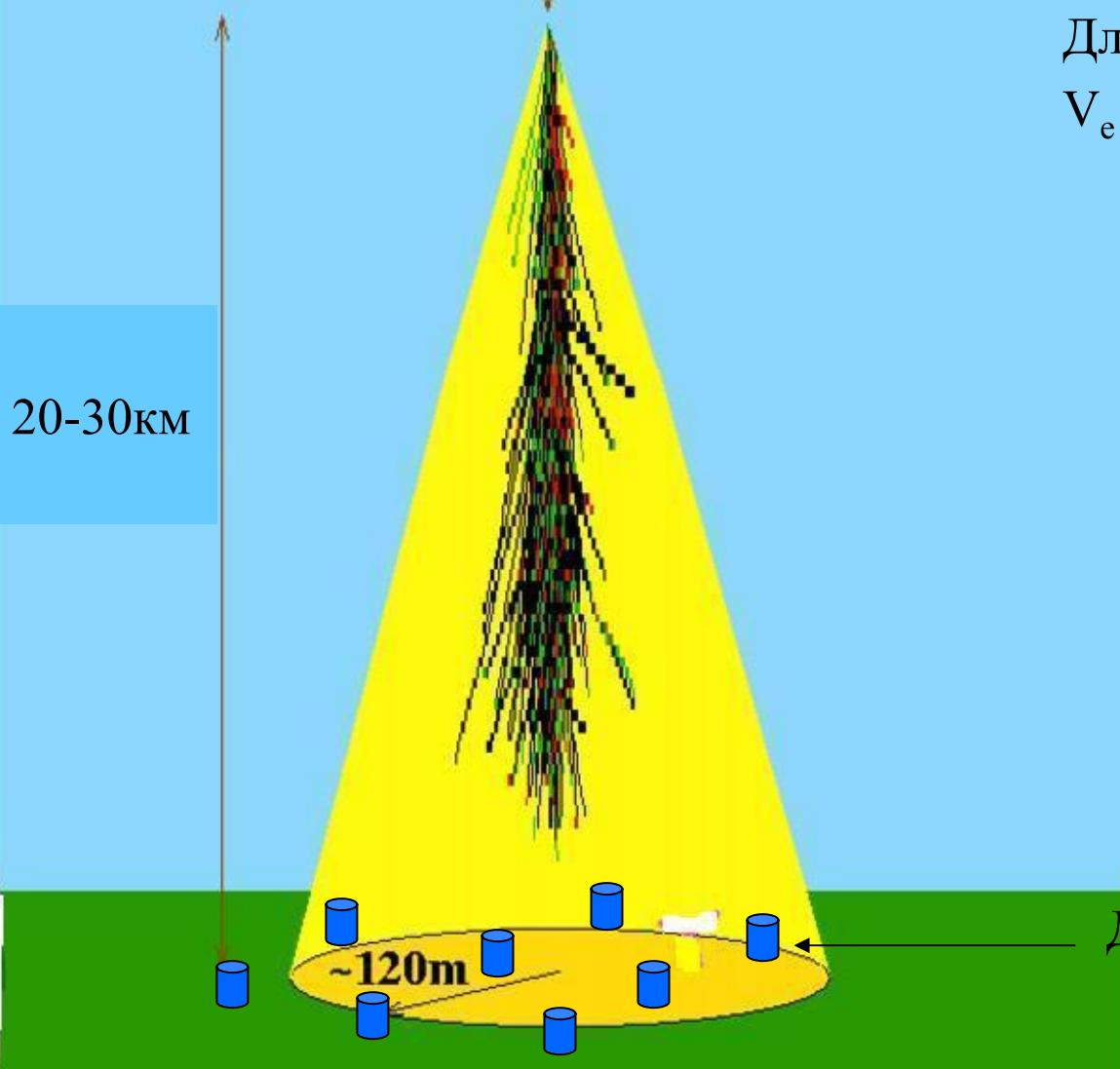
Открытие:
Пьер Оже (1938)
1889 - 1993

Схема совпадений, окно $\tau = 50$ мкс





P, A



Регистрация черенковского света

Для $E_e > 25$ МэВ

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



Черенковский свет

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

Детекторы фотонов

Что можно измерить с помощью черенковского света?

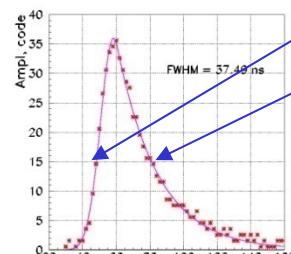
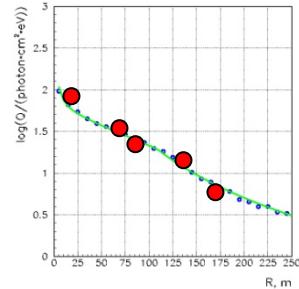
Энергию первичной частицы E_0
(относительная точность 15%
систематическая погрешность < 10%)

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

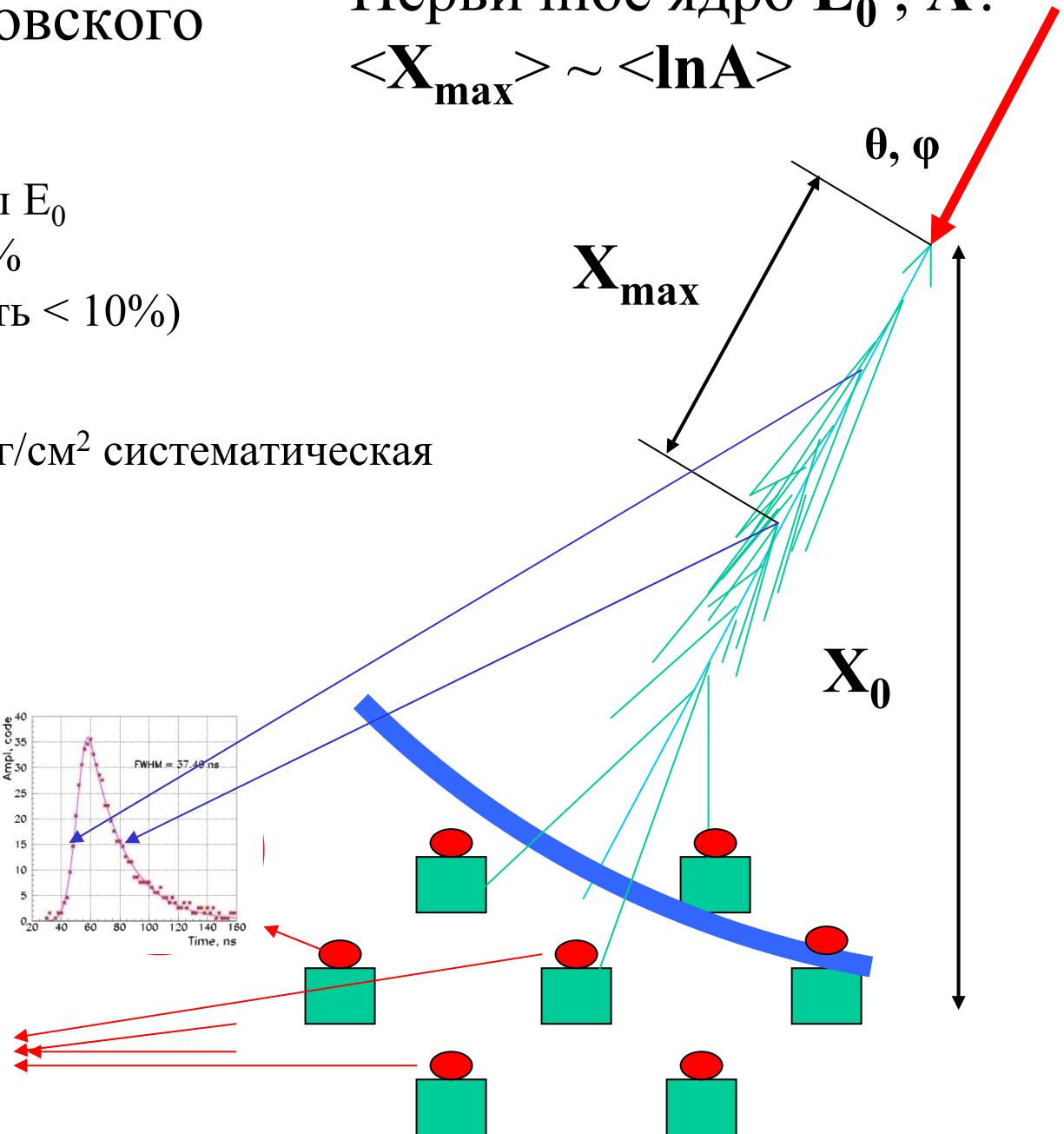
$$\text{FWHM} \sim \Delta X \text{ г/см}^2$$

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

Крутизна
ФПР



Первичное ядро E_0 , А?
 $\langle X_{\max} \rangle \sim \langle \ln A \rangle$



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



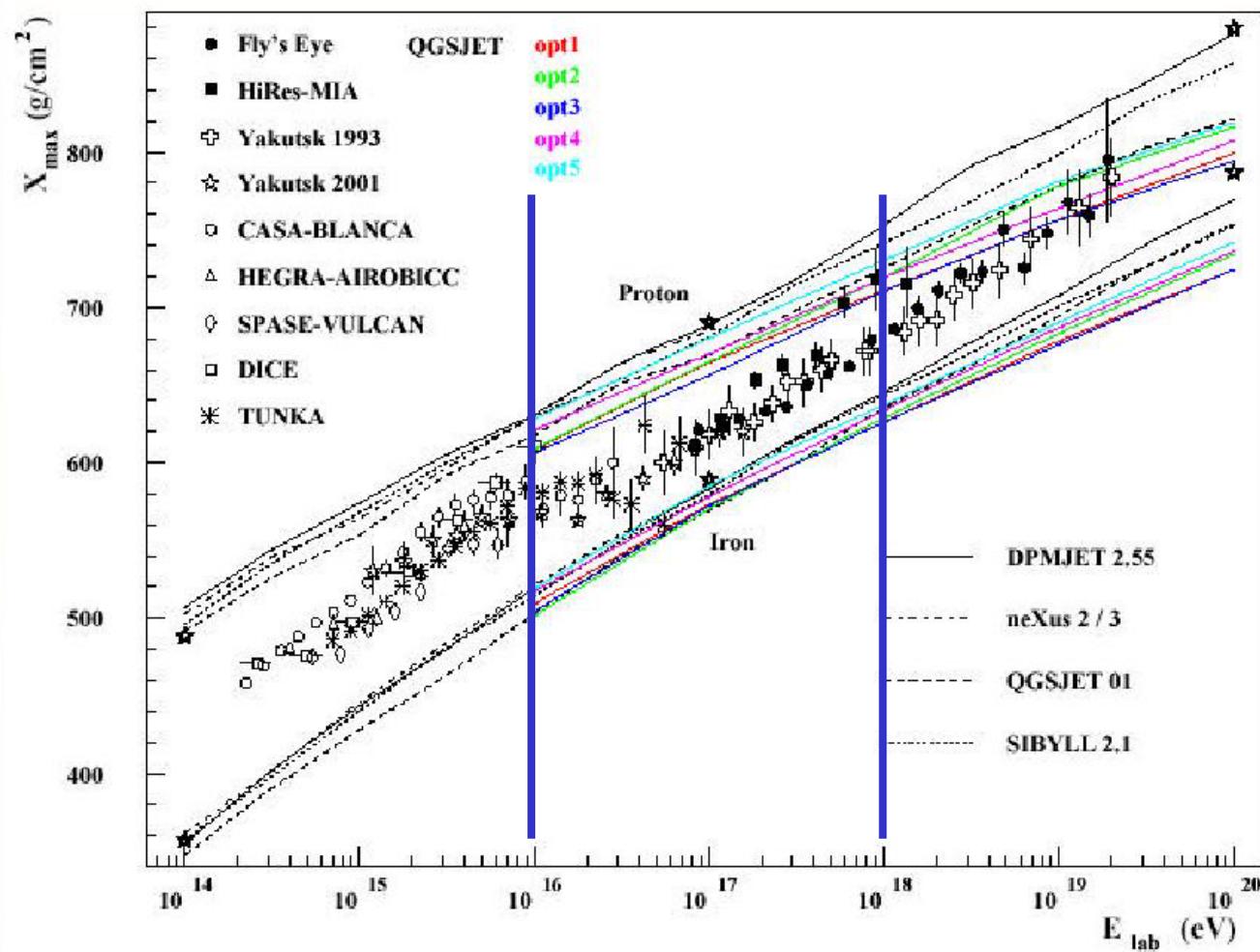
Средняя глубина
максимума развития
ШАЛ в атмосфере

Атомный
номер
ядра

Распределение
по X_{\max}

Широкое для
“легкого” состава

Узкое для
“тяжелого”
состава

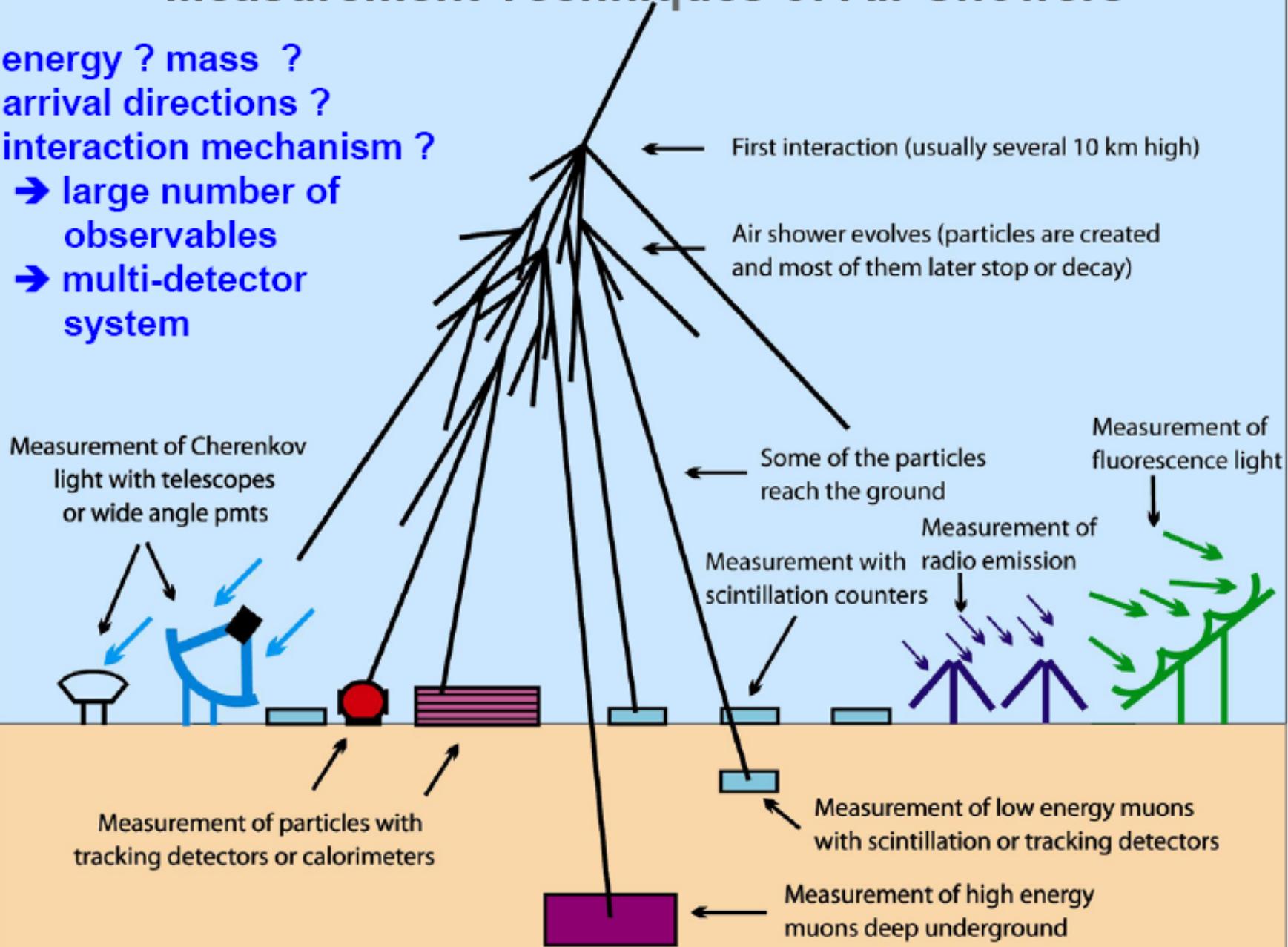


Методы регистрации ШАЛ

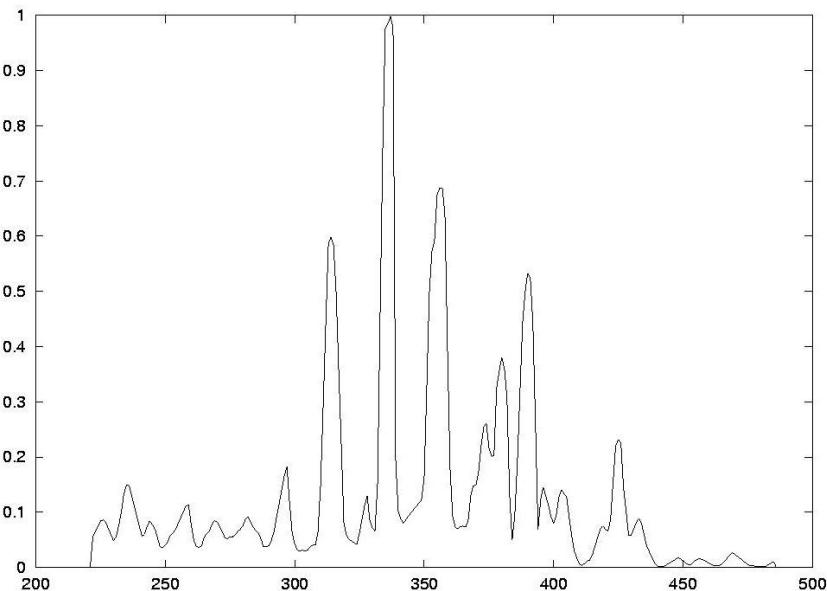
1. Регистрация заряженных частиц ШАЛ
2. Регистрация черенковского света
3. Регистрация флюоресцентного света
4. Регистрация радиоизлучения

Measurement Techniques of Air Showers

- energy ? mass ?
- arrival directions ?
- interaction mechanism ?
- large number of observables
- multi-detector system



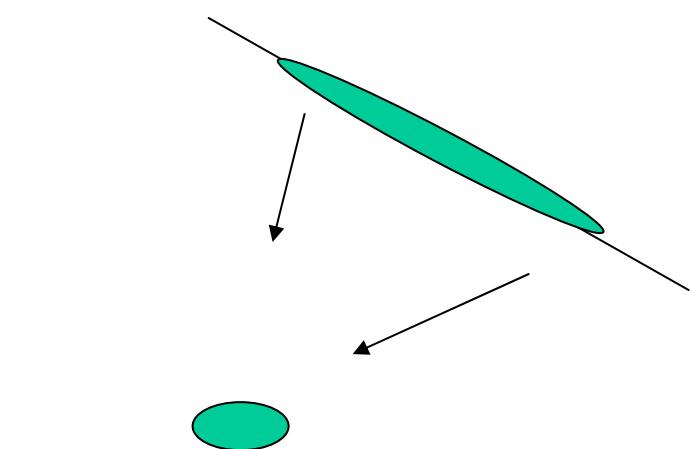
Флюоресцентное излучение заряженных частиц



Спектр излучения азота

Излучение изотропное

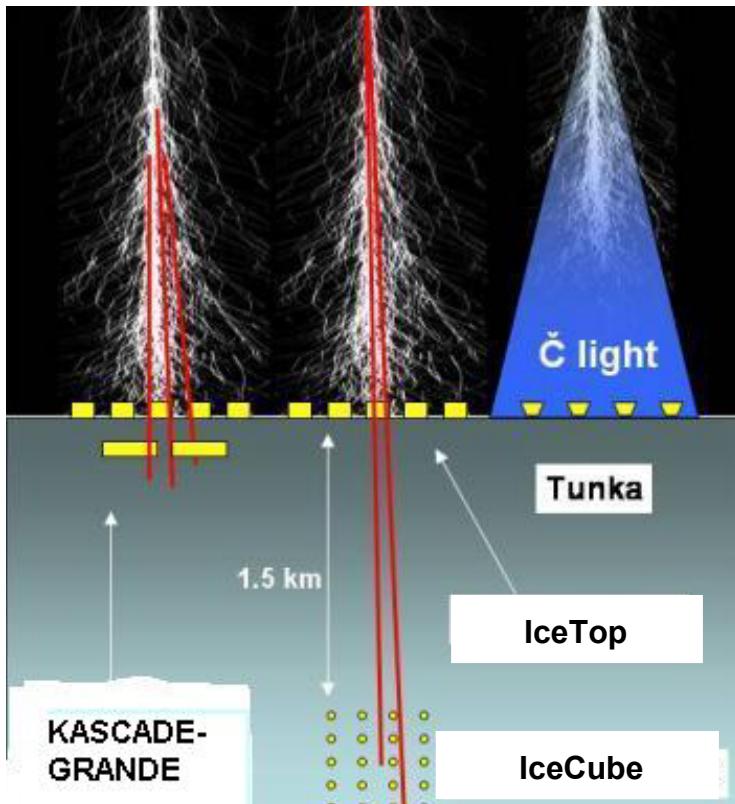
4-5 фотонов/ метр,
практически не зависит от
плотности



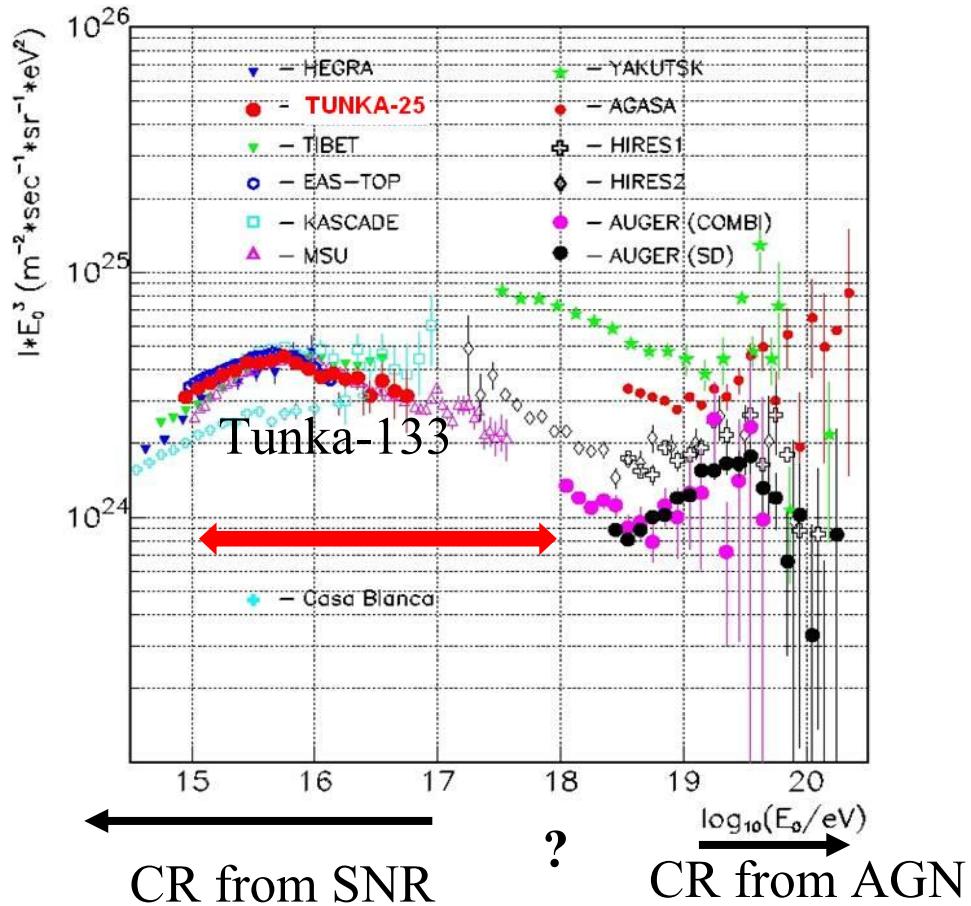
Мушиный глаз
(Flys Eye)

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

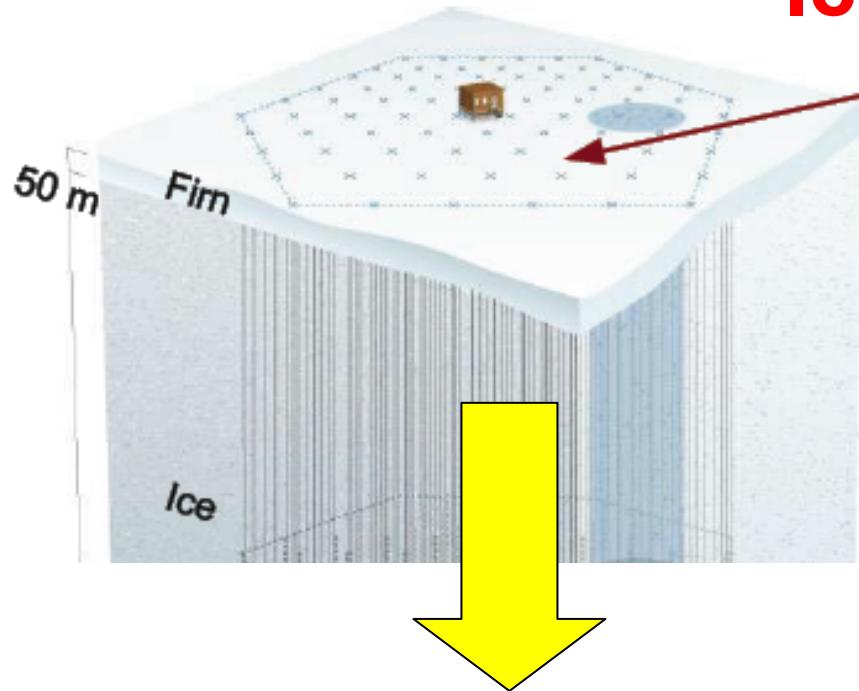
Современные установки для области выше 10^{16} эВ площадь $\cong 1\text{ км}^2$



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



Ice Cube/Ice Top

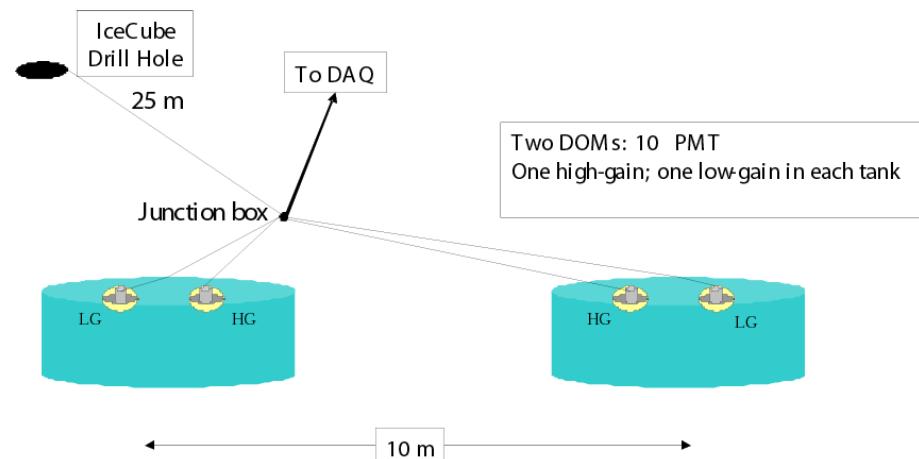
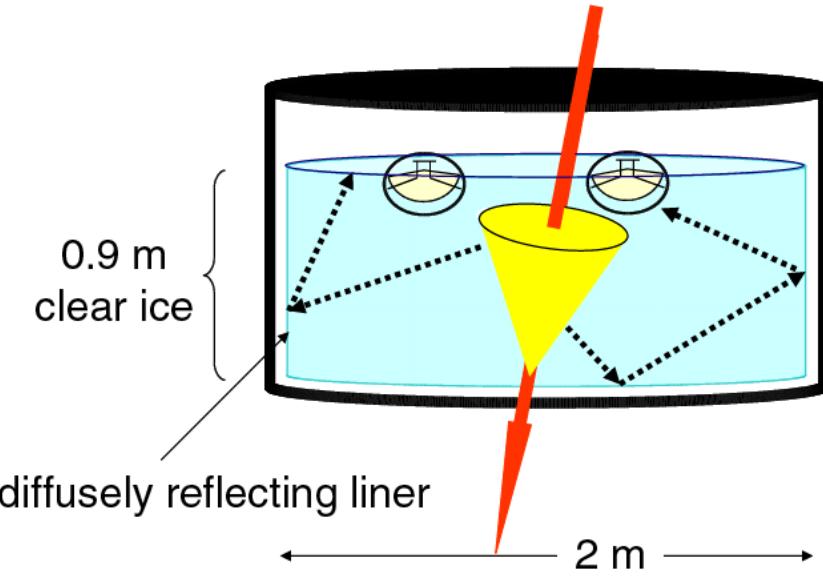


IceTop: air shower array

- ✓ 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

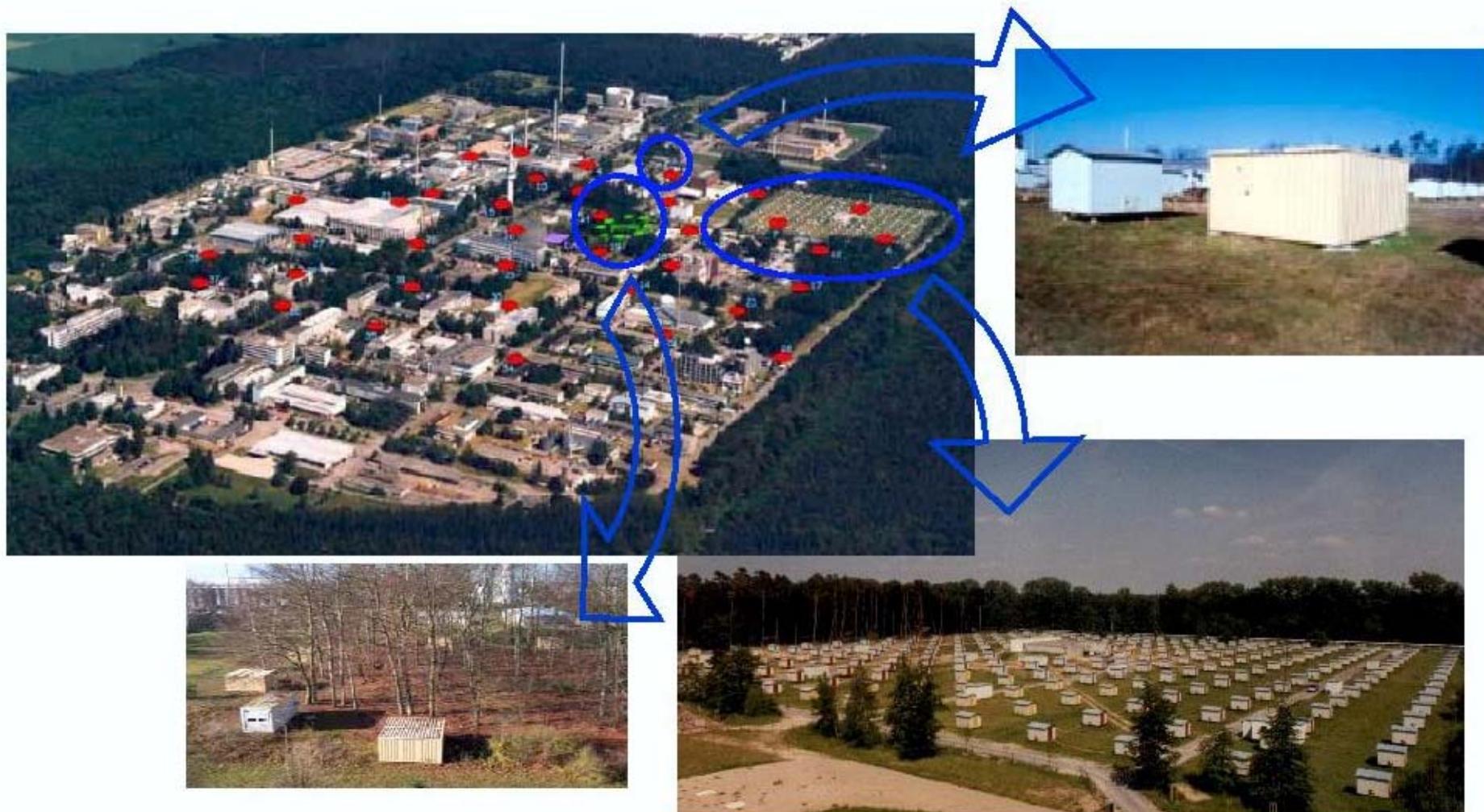


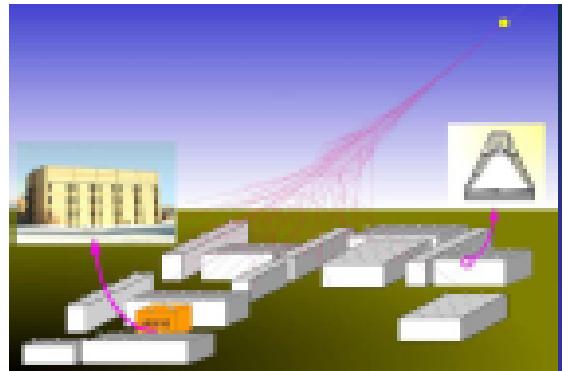
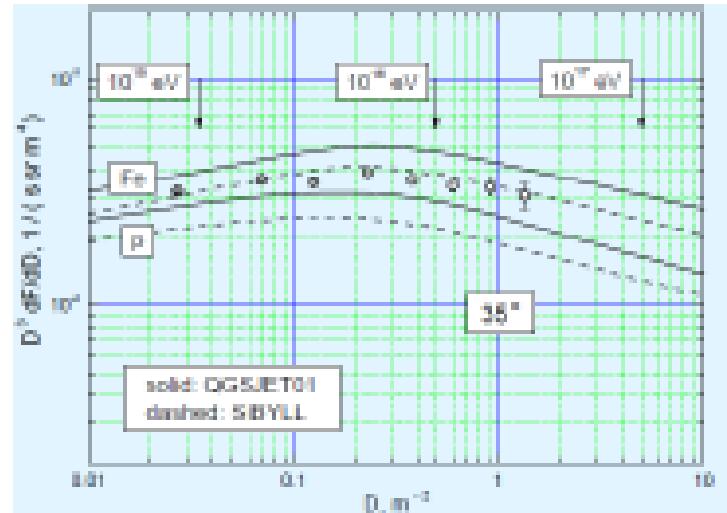
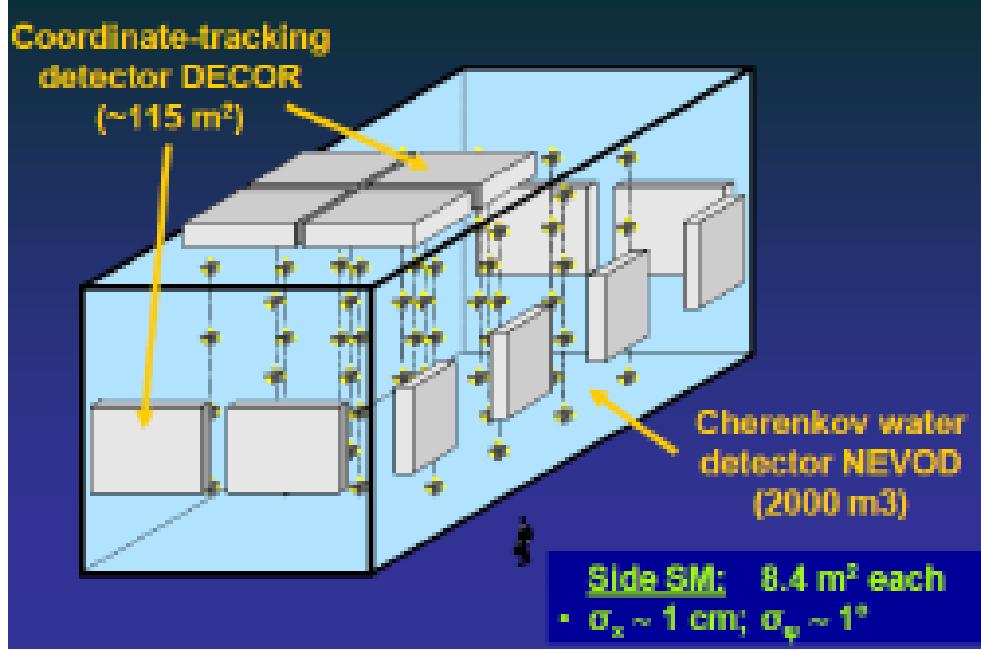
F

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 >30TeV**
 - **1 km² scintillation detector array**
 - **40k m² μ detector array**
 - **28 C-telescopes**
 - **1k m² burst detector**
- **90k m² water Cerenkov detector for $\gamma > 100$ GeV**
- **Two Magic-type telescopes**

LHAASO Project: γ astronomy and origin of CR

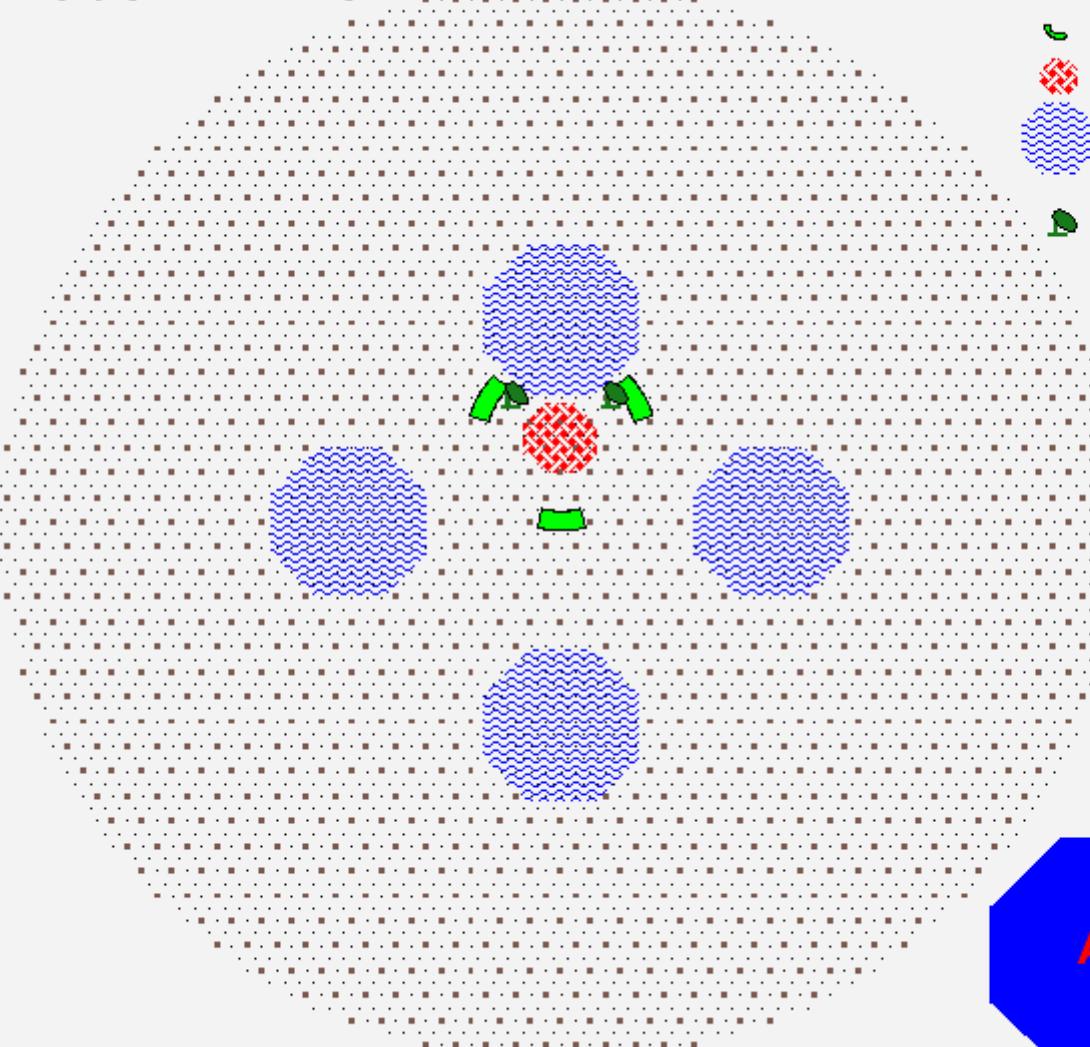
Charge
Particle
Array
 μ detector
Array

Water C
Array

Wide FOV
C-Telescope
Array
&
Core Detector
Array

Large High Altitude Air Shower Observatory

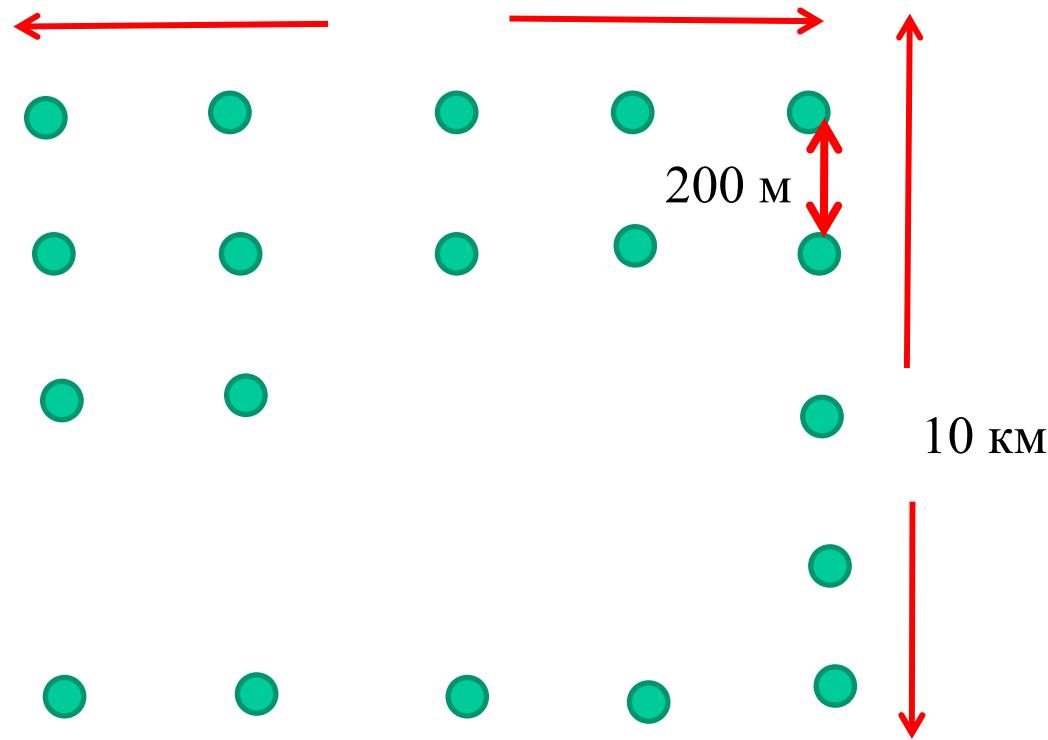
Yangbajing, 4300m a.s.l., 606g/cm^2



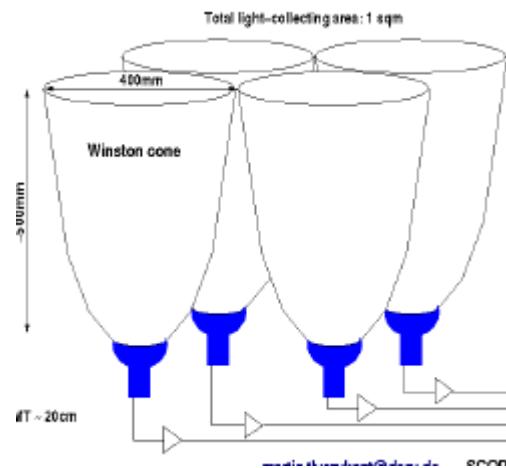
- ED: 5137, 1m \times 1m \times 2cm
15m spacing
- MD: 1161, 6m \times 6m \times 2cm
30m spacing
- WFCA: 3 \times 8, 16 \times 16pixels
130m spacing
- SCDA: 5000m 2 (Φ 80m)
- WCDA: 4 \times 900
 Φ 170m \times 4m
300m spacing
- IACT: 2
100m spacing

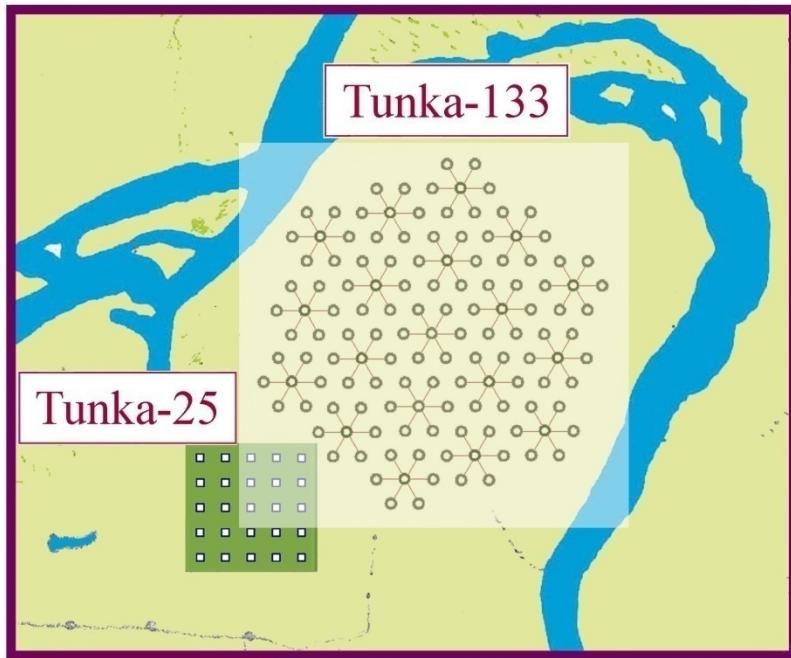
Проект SCORE – широкоугольный гамма-телескоп площадью 100 км² с порогом \square 30 ТэВ (M.Tluczykont et al , ArXiv: 0909.0445)

10 км

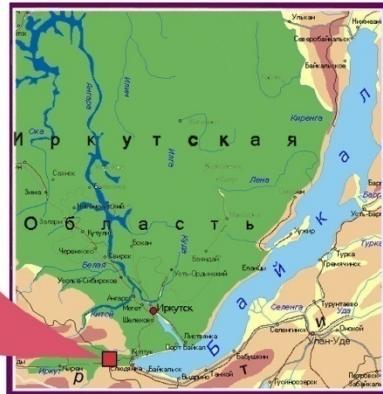


Прототип установки
площадью 0.1 -0.2 км²
в Тунке.





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



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

Energy threshold $\sim 10^{15}$ eV
Statistics for one winter (400 hours):

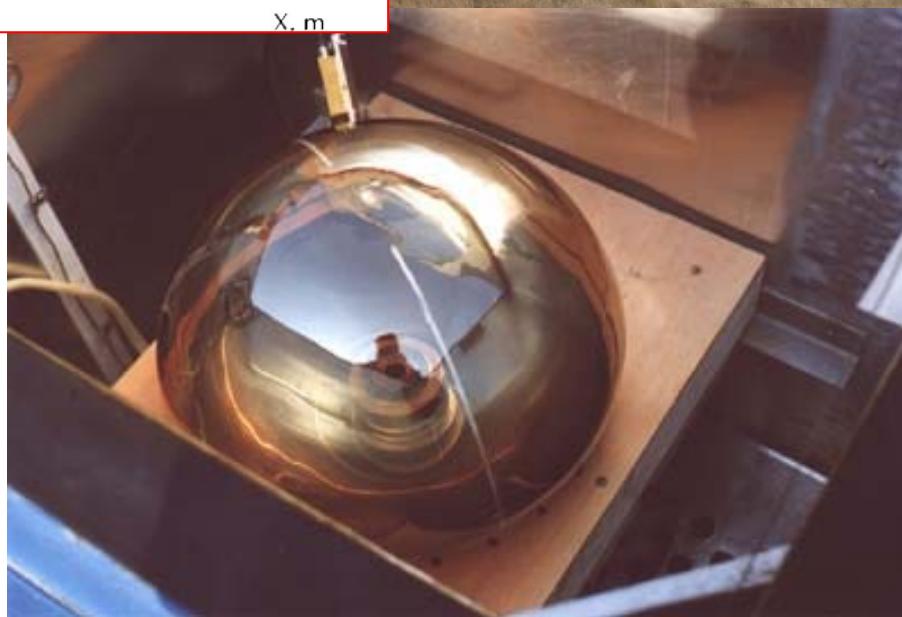
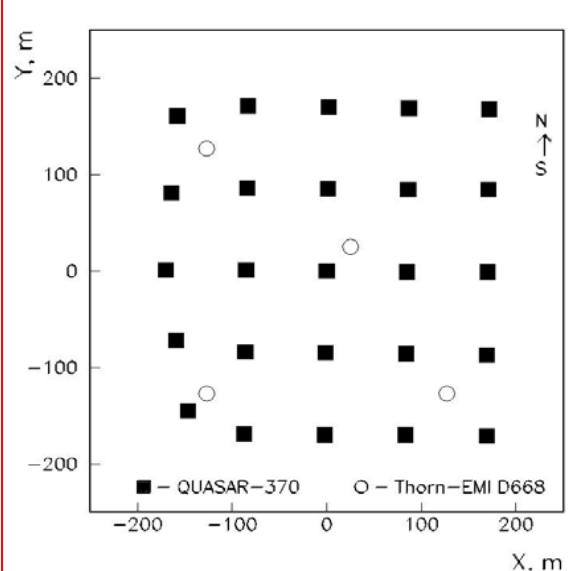
$> 3 \cdot 10^{15}$ eV – $5 \cdot 10^5$ events
 $> 10^{17}$ eV – ~ 300 events

Accuracy: core location ~ 6 m
energy resolution $\sim 15\%$
 $\delta X_{\max} < 25$ g·cm⁻²

$$S\Omega \text{ (Tunka-133)} = 30 \bullet S\Omega \text{ (Tunka-25)}$$



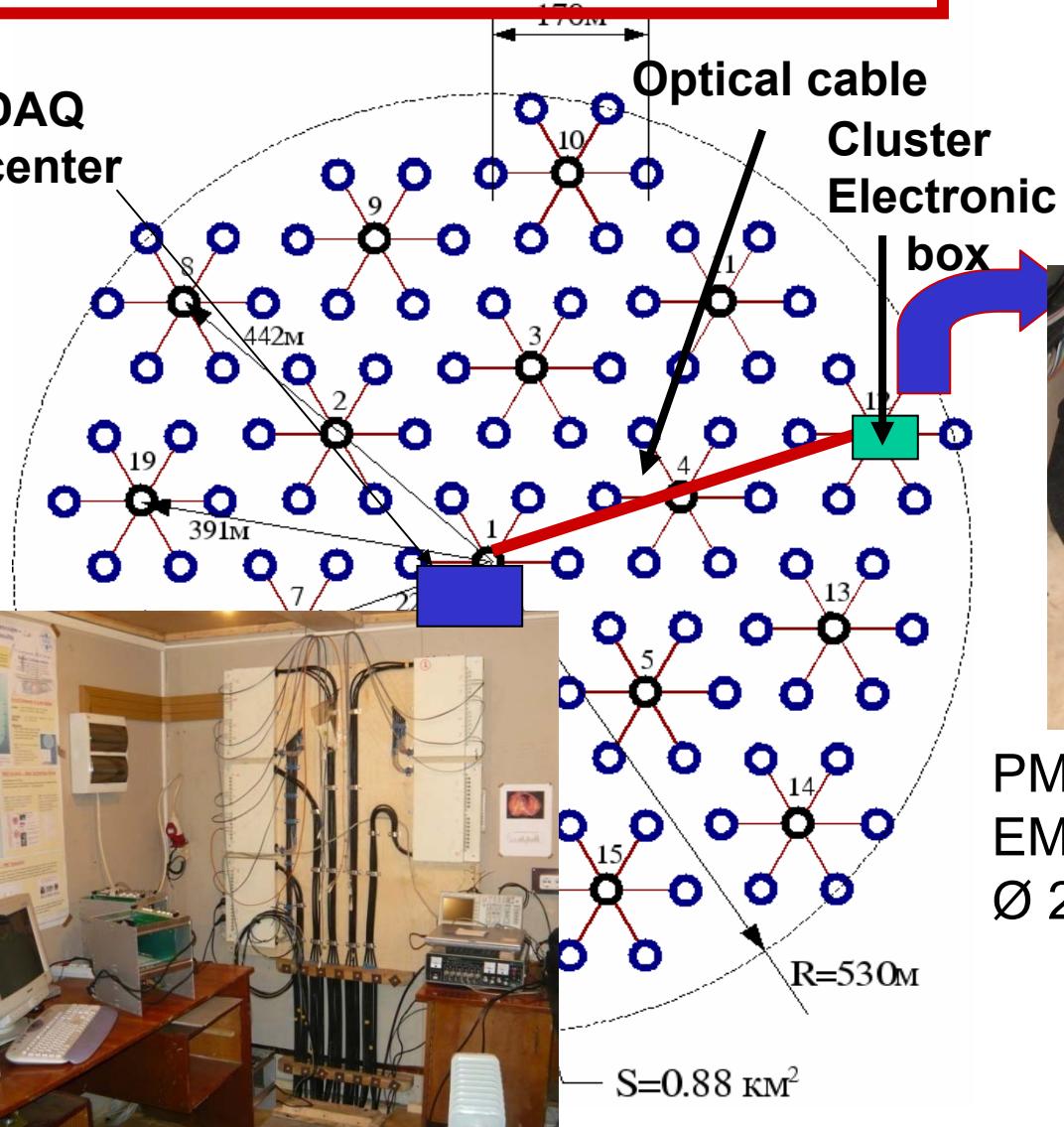
Tunka-25 (2000 -2005)



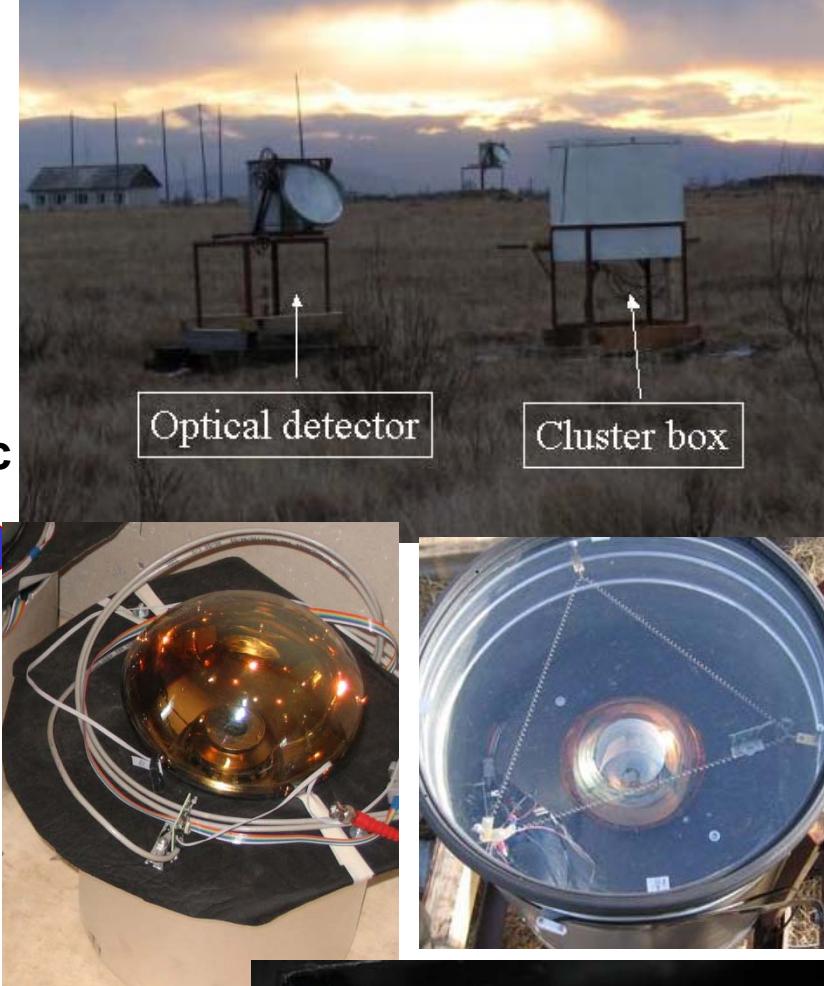
PMT QUASAR-370
(37 cm photocathode
Diameter)

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

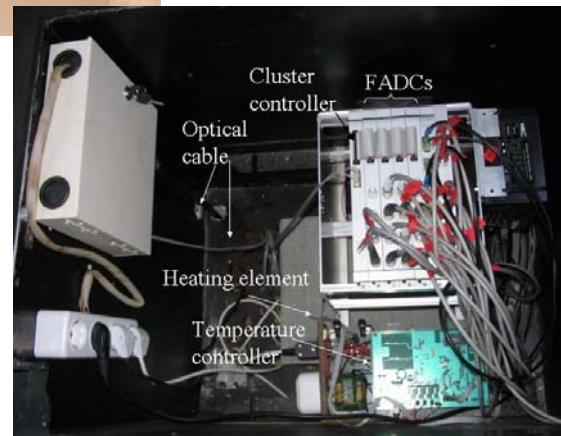
DAQ
center

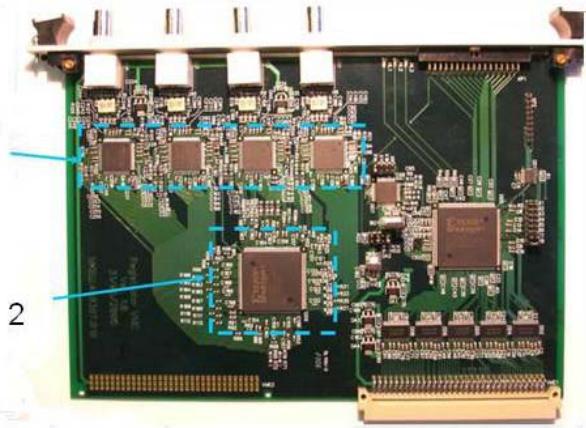


Optical cable
Cluster
Electronic
box

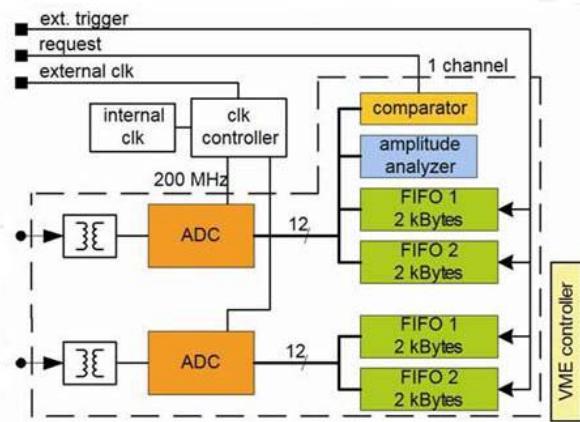


PMT
EMI 9350
 $\varnothing 20\text{ cm}$



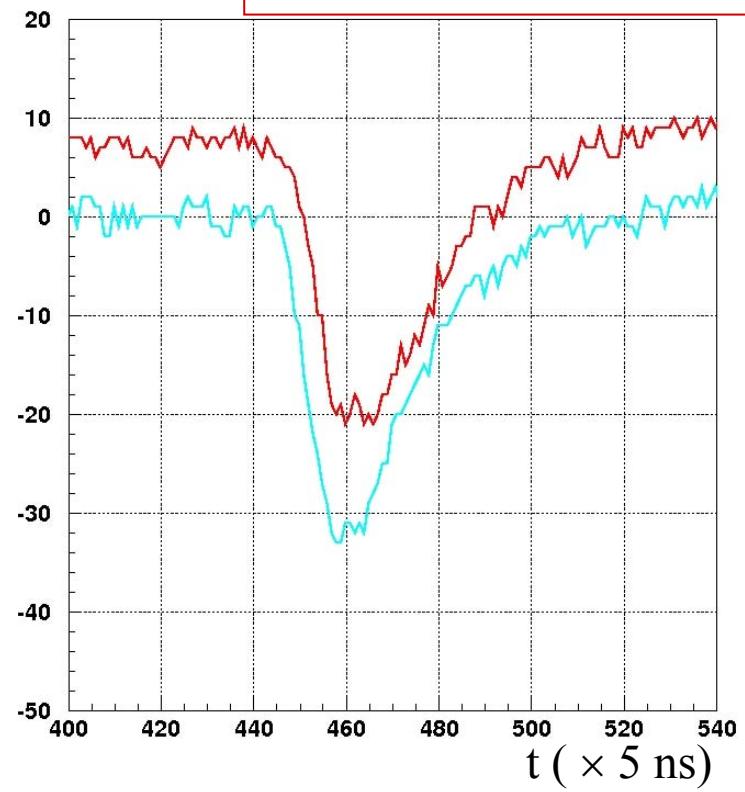
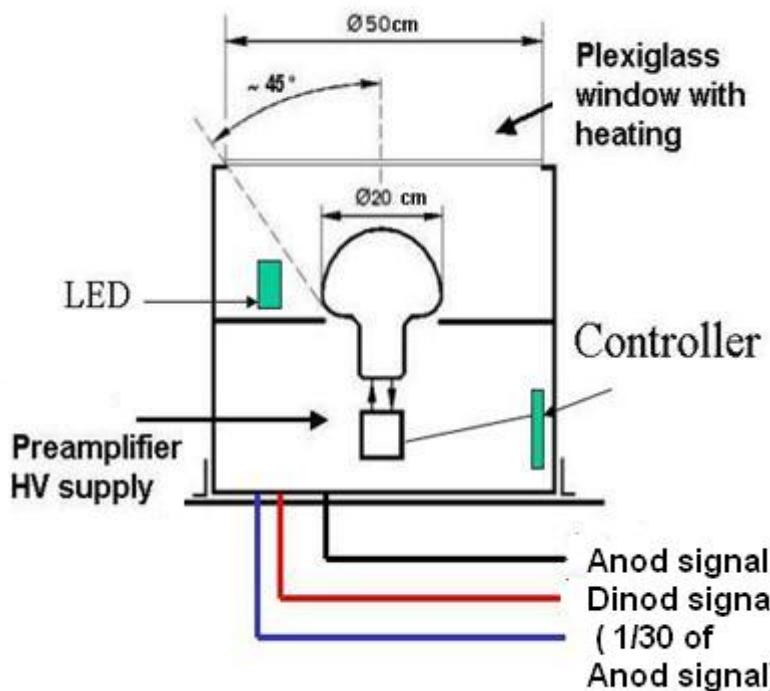


1. ADC AD9430, 12 bit, 200 MHz
2. FPGA XILINX Spartan-3



4 channel FADC

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





14-4

Развертывание установки

Оптические кабели



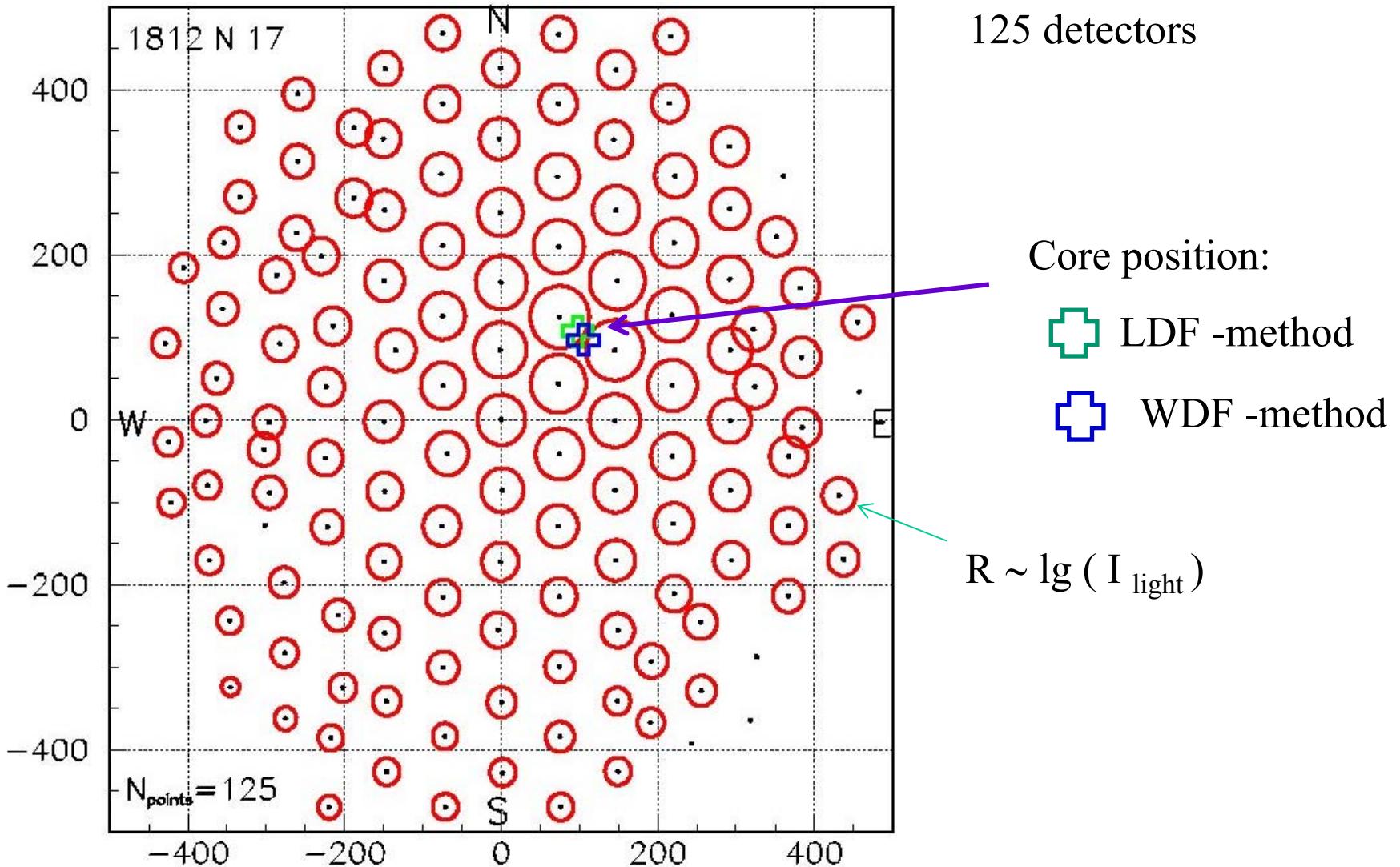
Установка детекторов



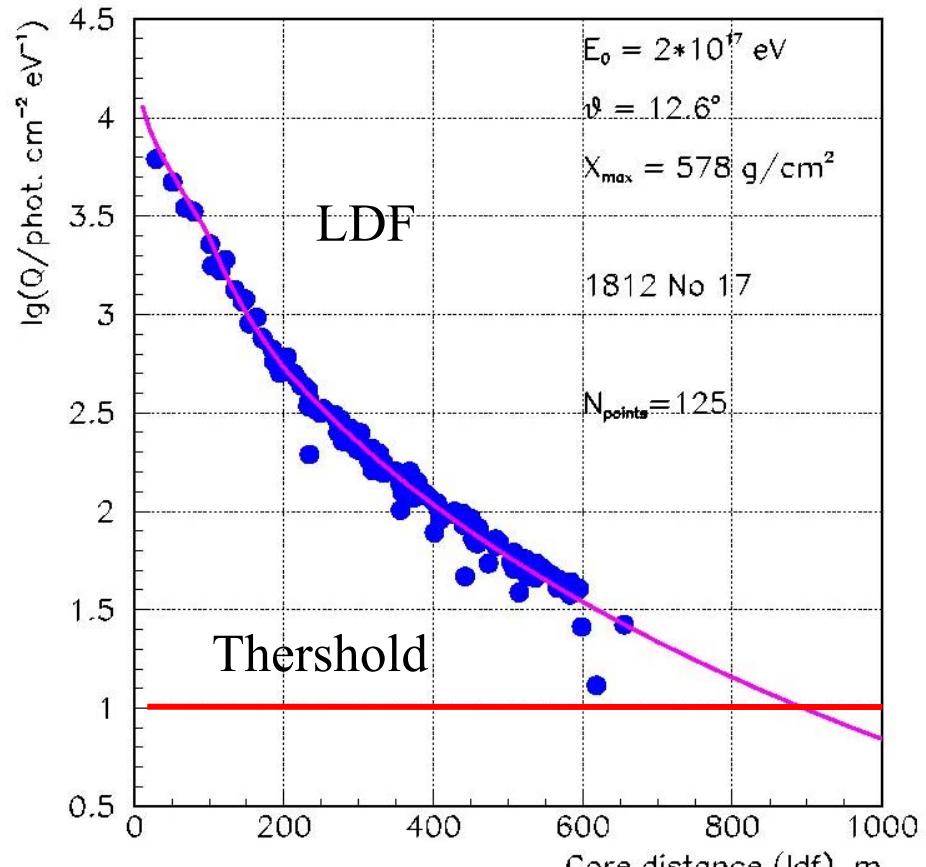
Подготовка ФЭУ

Example of event

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

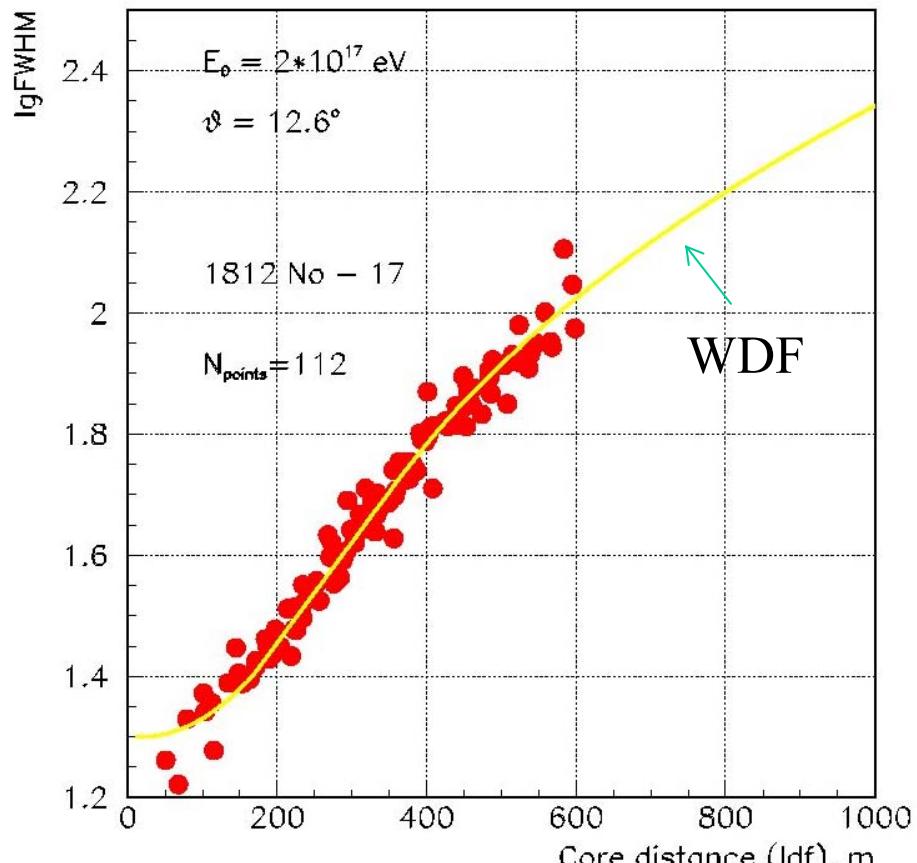


$\text{Lg Q}_{\text{exp}}(R)$



A

$\text{Lg } \tau(R)$

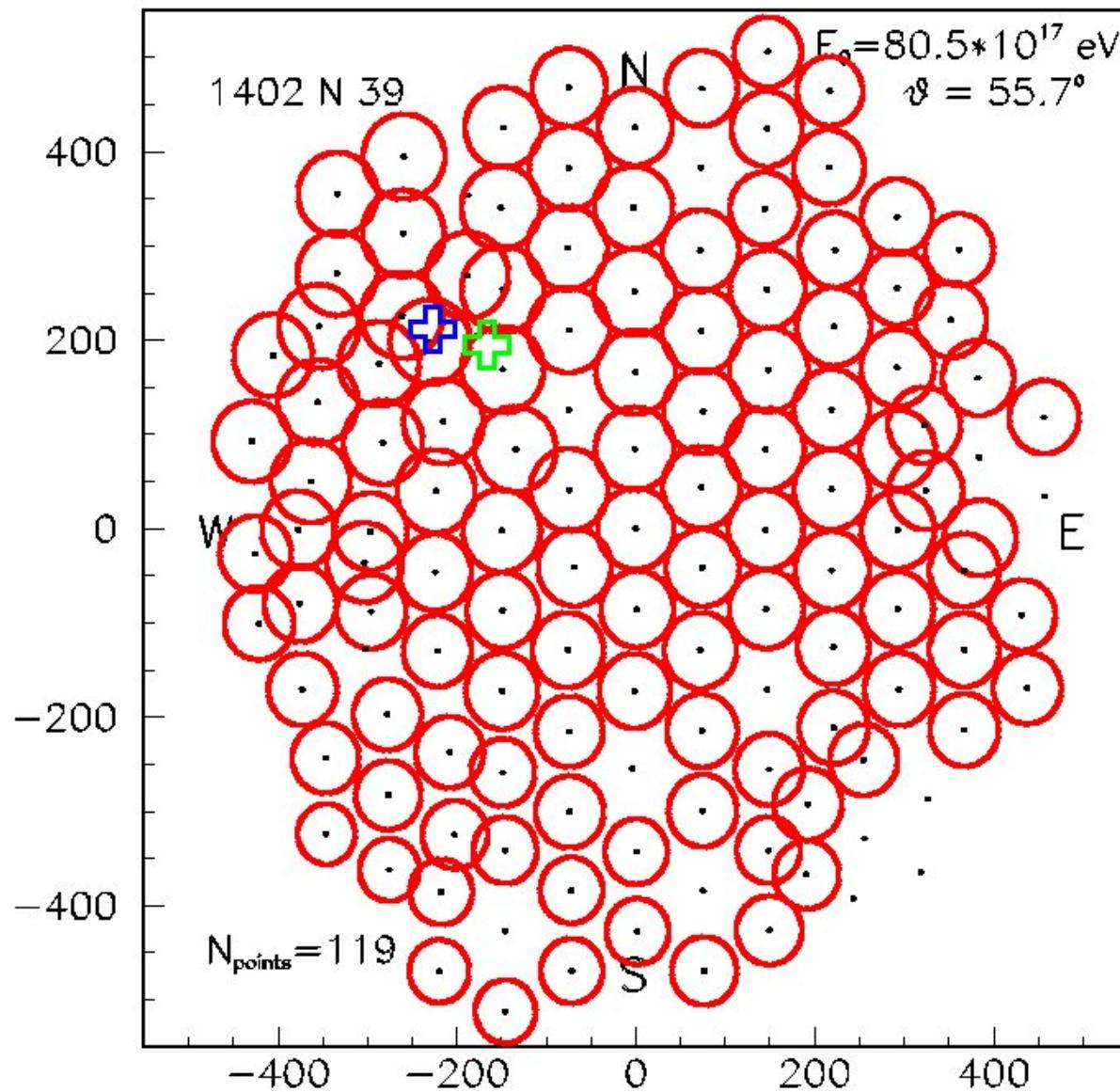


B

A – Fitting experimental points with LDF

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

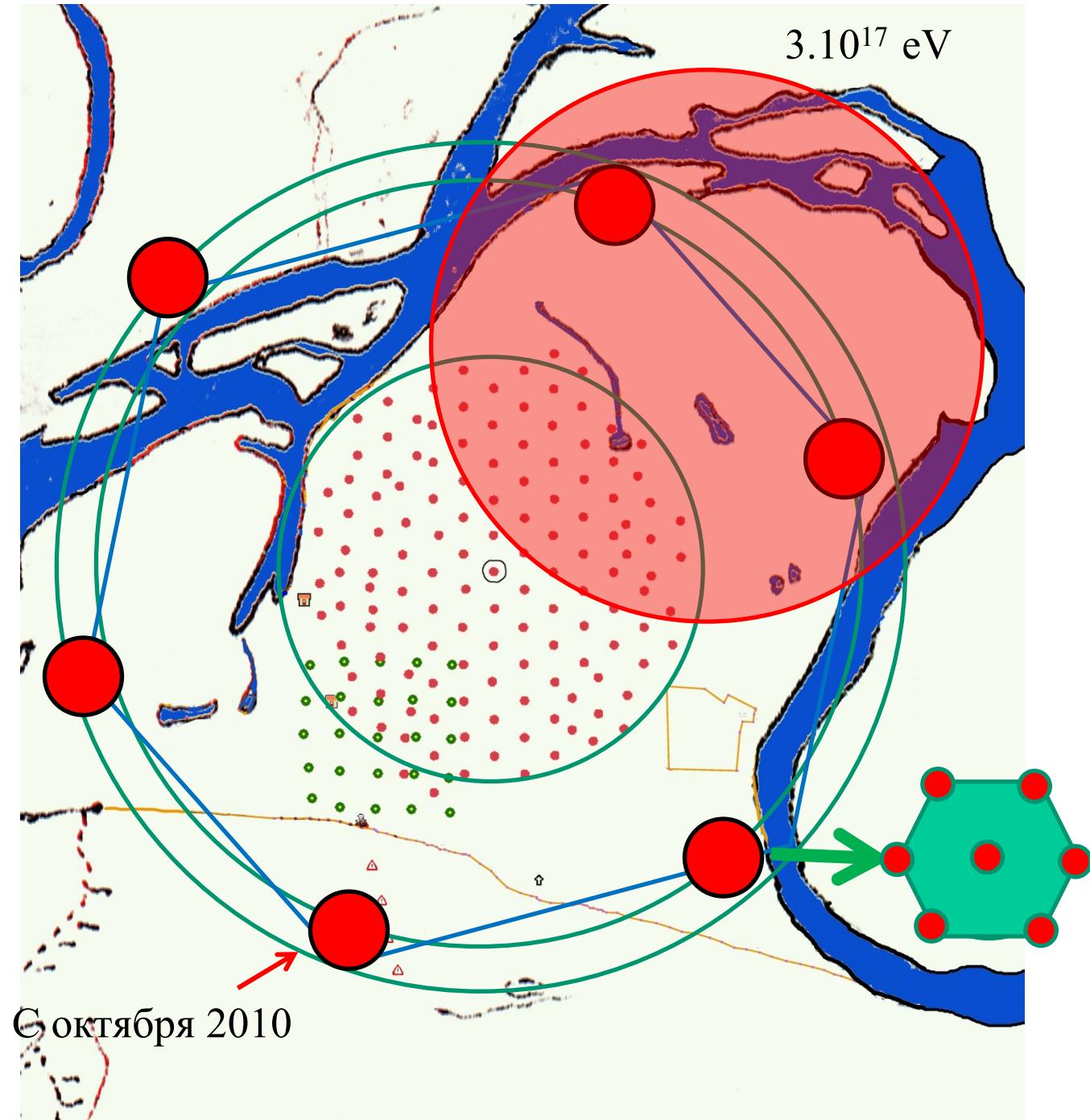
Событие с самой большой энергией – около 10^{19} эВ

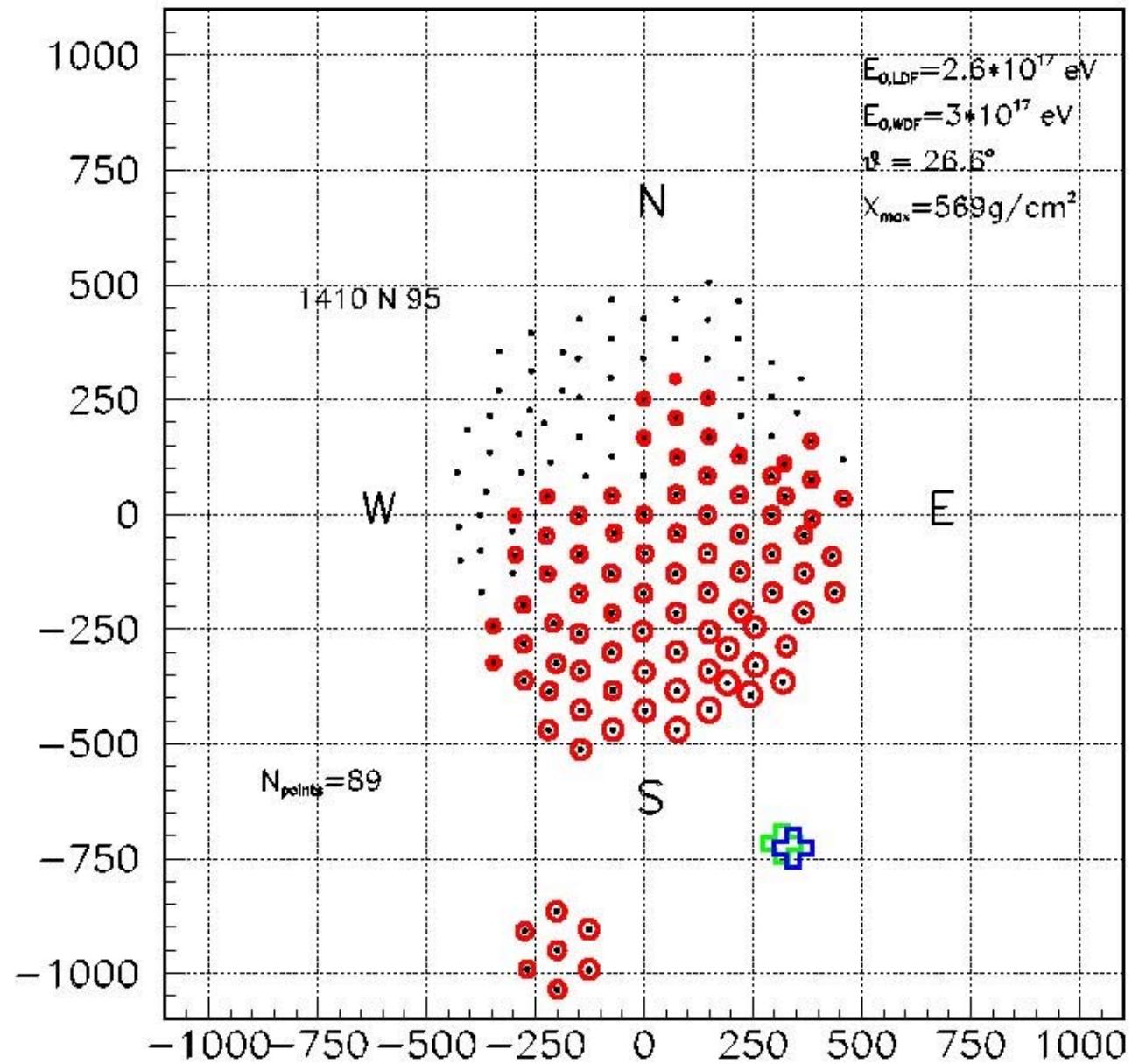


6 дальних
кластеров
(42 детектора)



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



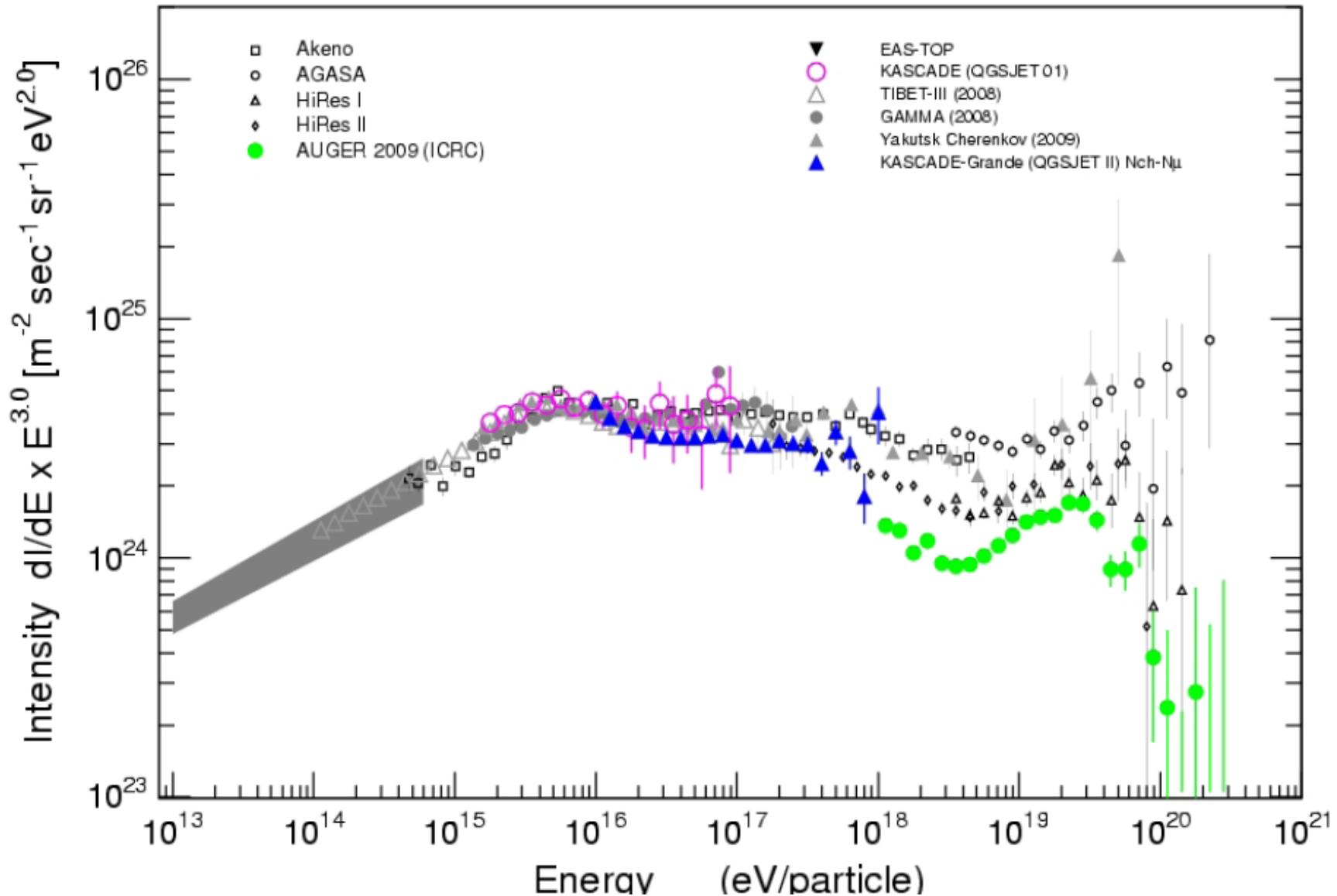


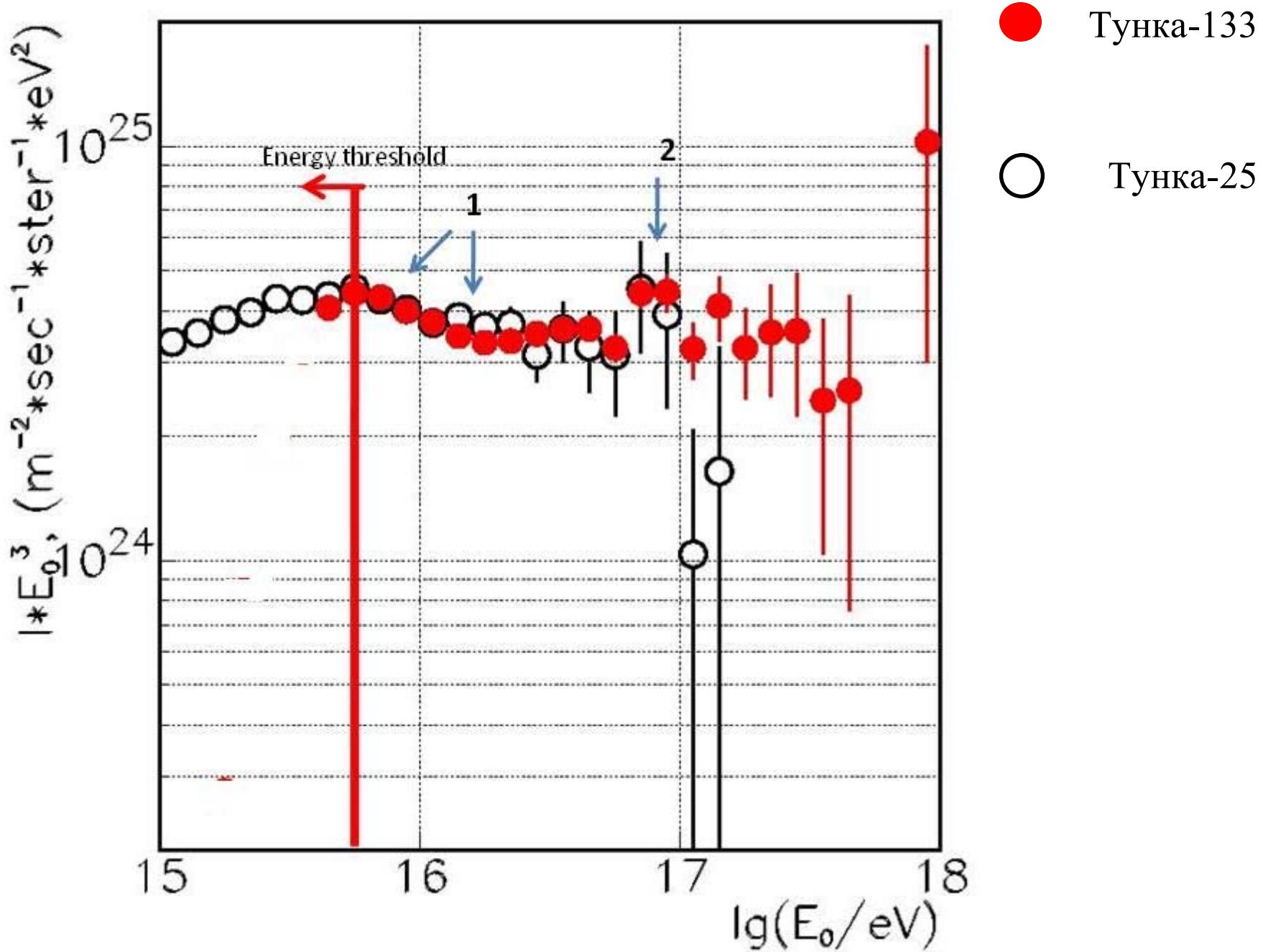
Результаты последних лет

KASKADE-Grande

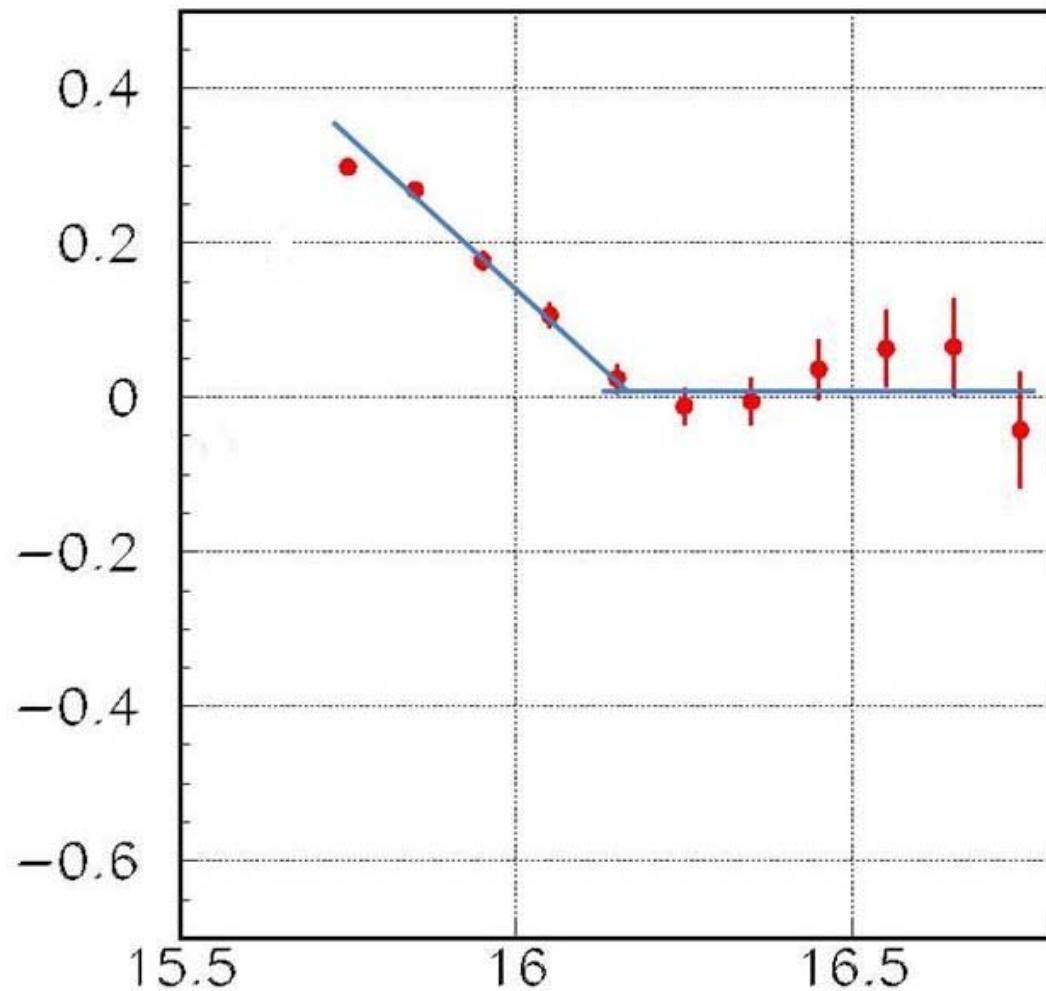
Тунка-133

ГАММА



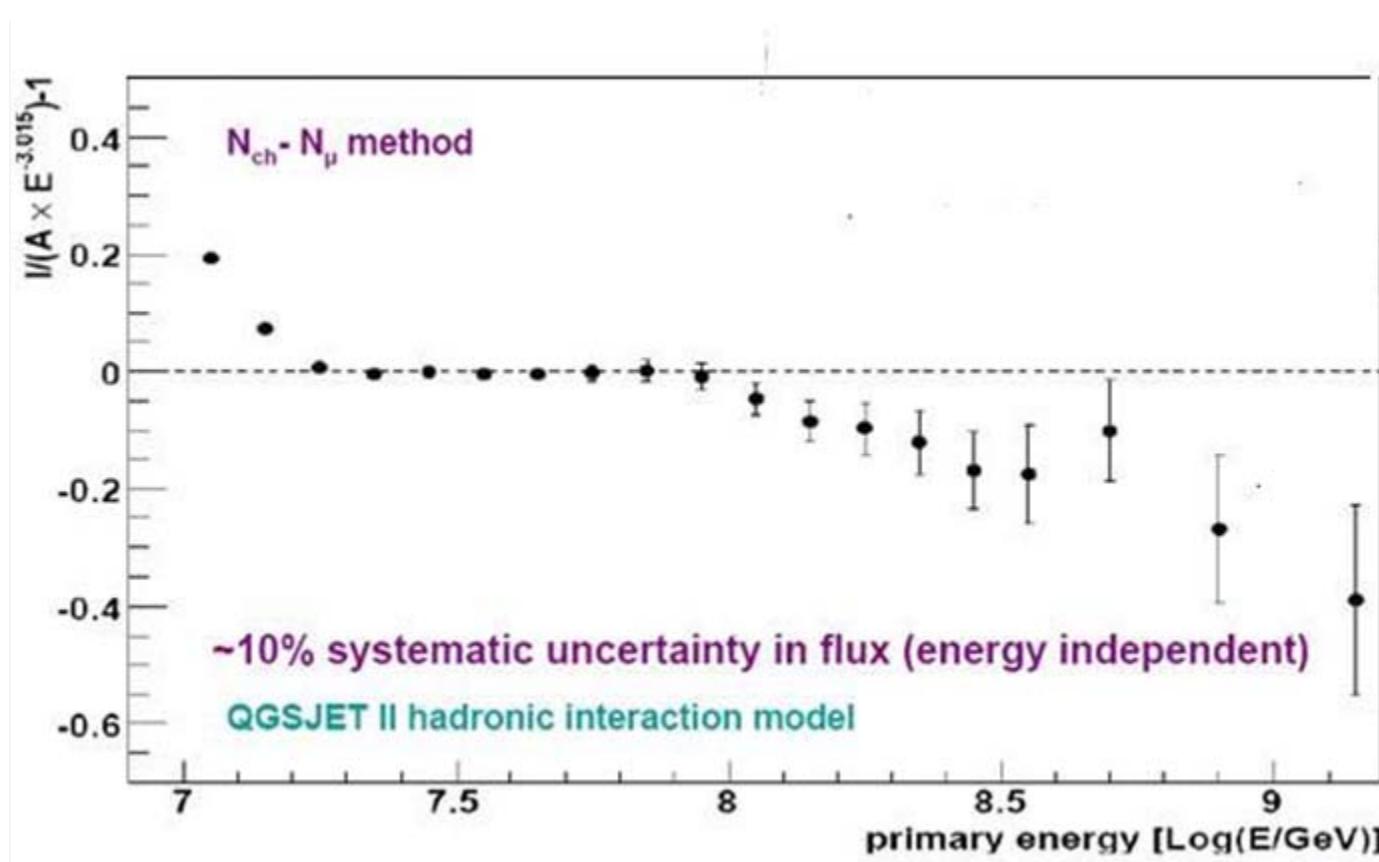


$I / A E^3 \cdot 1$



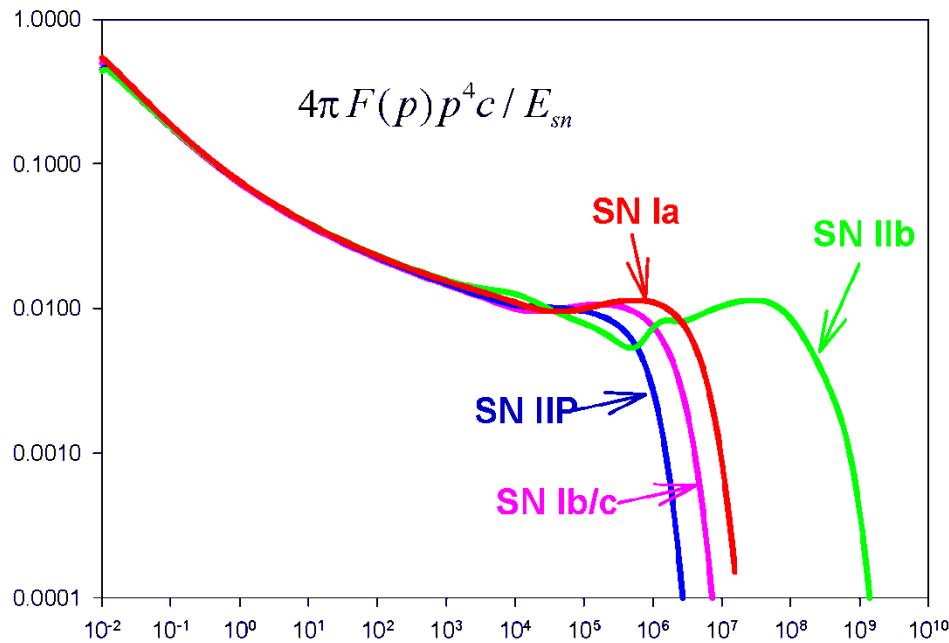
$\text{Log } E / 1 \text{ eV}$

KASKADE -Grande



Energy spectrum

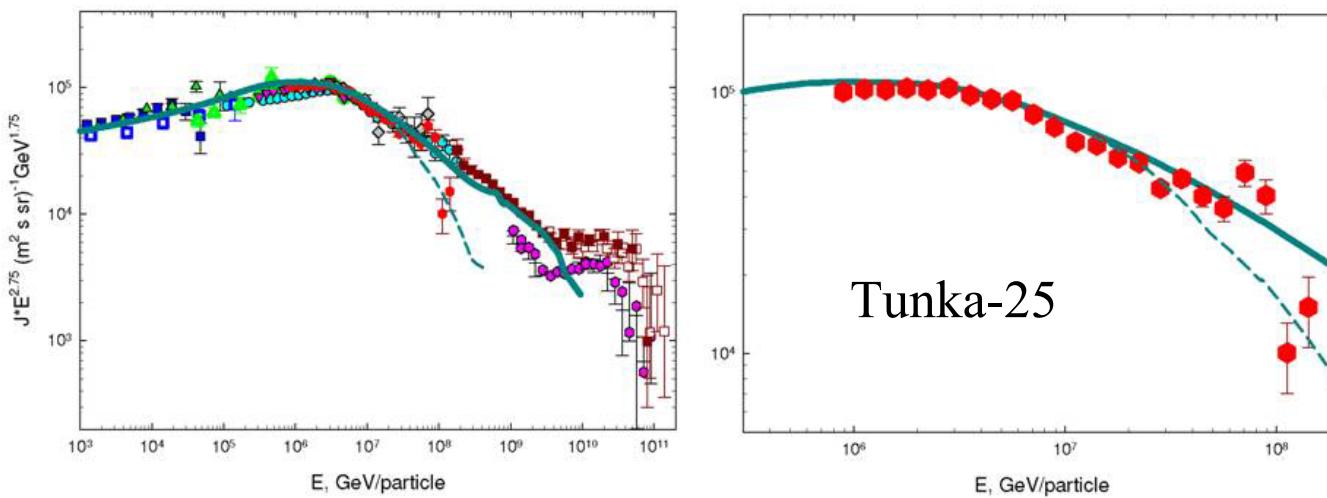
$$E_{\max} = 1.1 \times 10^{15} (E_{51})^{1/6} (M_{ej})^{-2/3} \text{ eV}$$



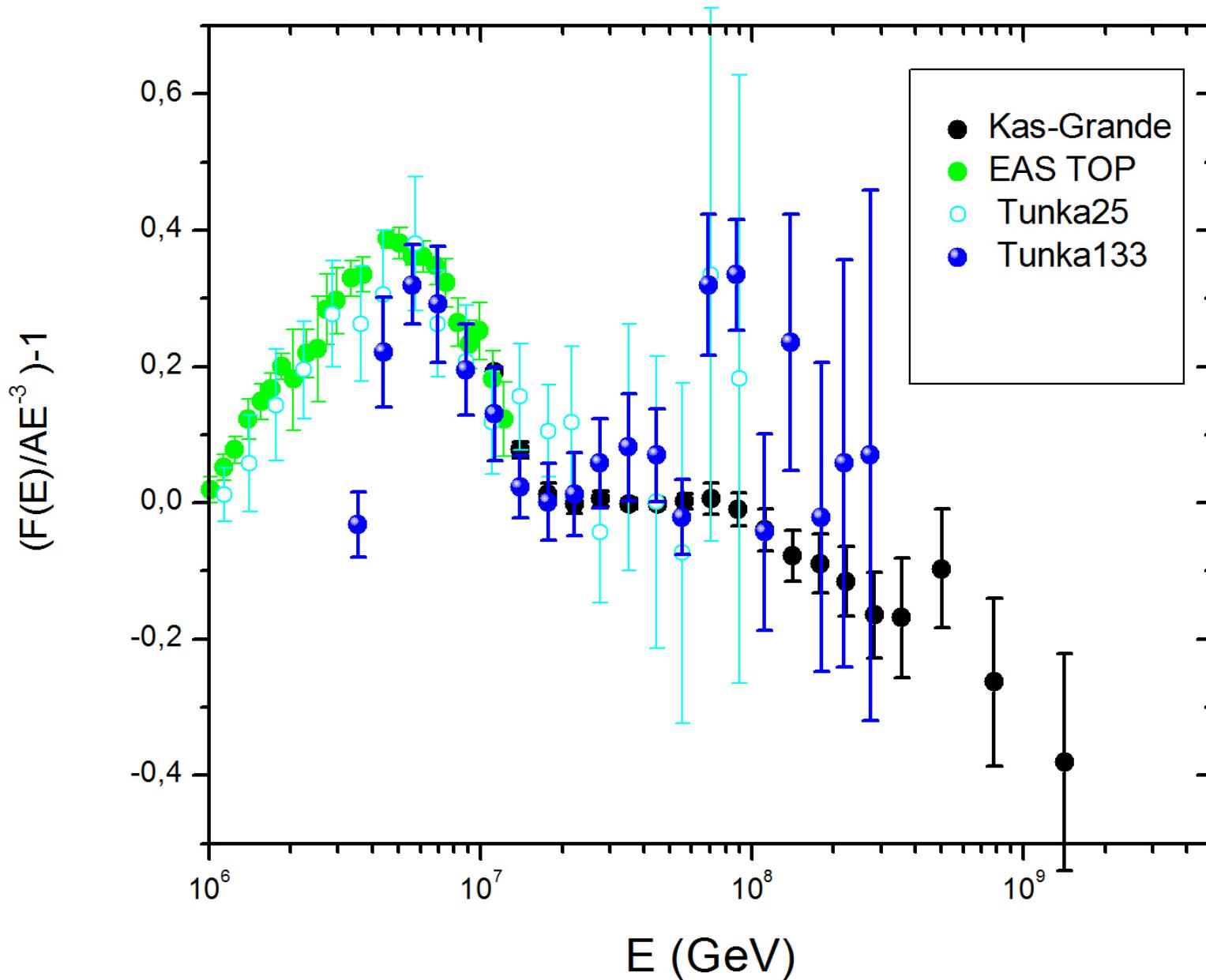
E_{51} – energy of explosion $\geq 10^{51}$ erg
 M_{ej} – mass of remnant $\geq M_\odot$

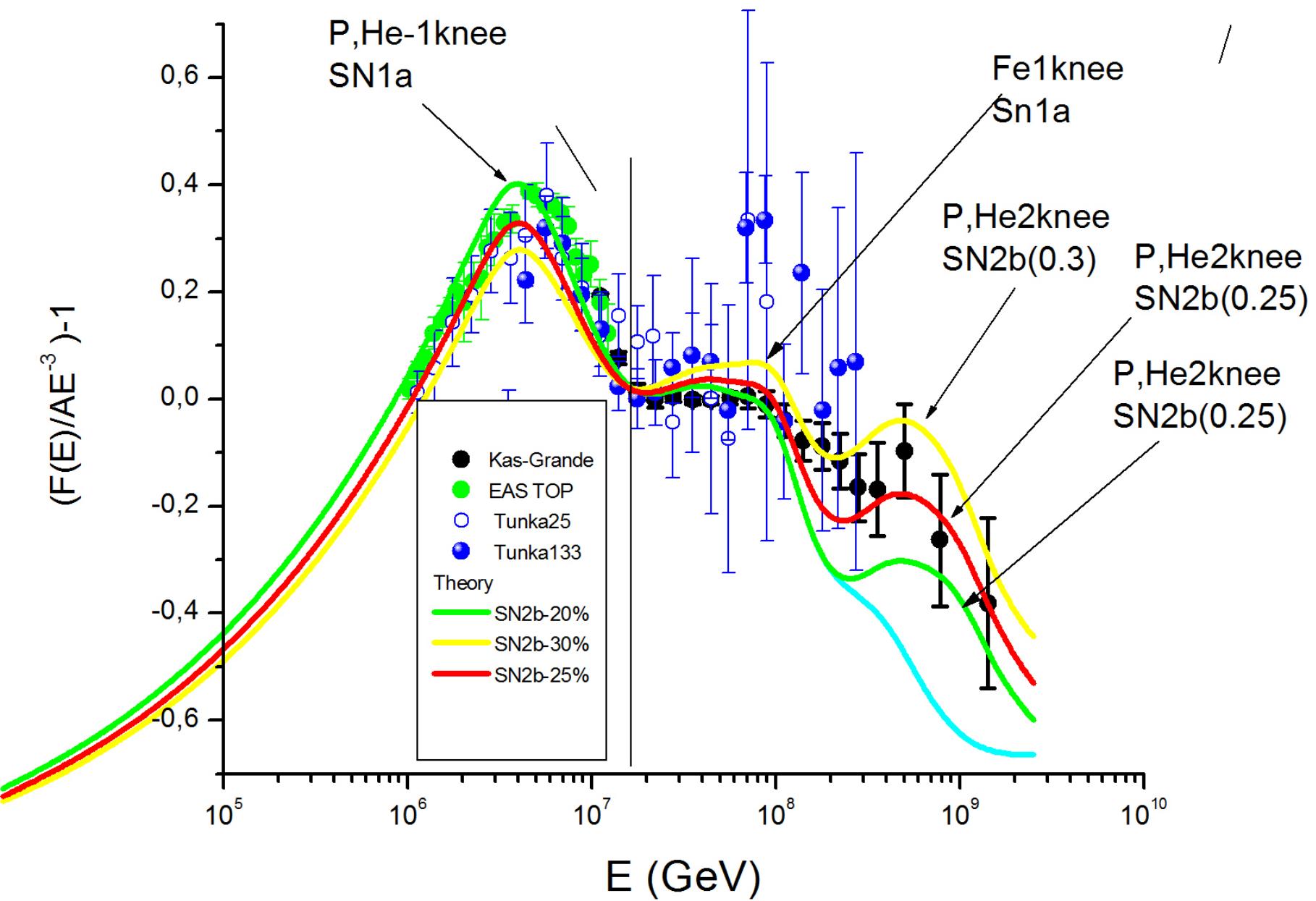
Ia - 30%
IIP - 44%
Ib/c - 22%
IIb - 4%

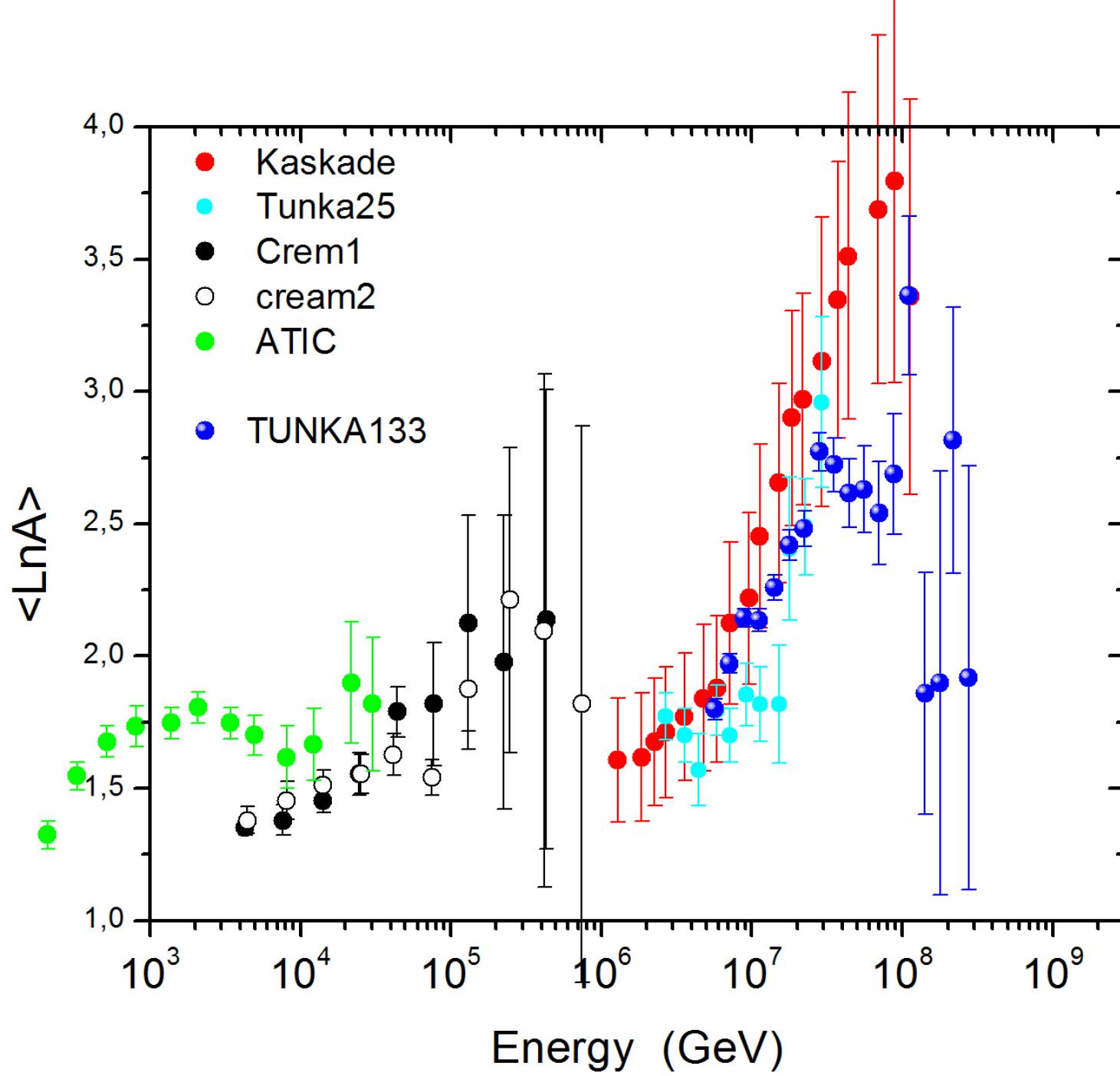
Normalization at 1 TeV

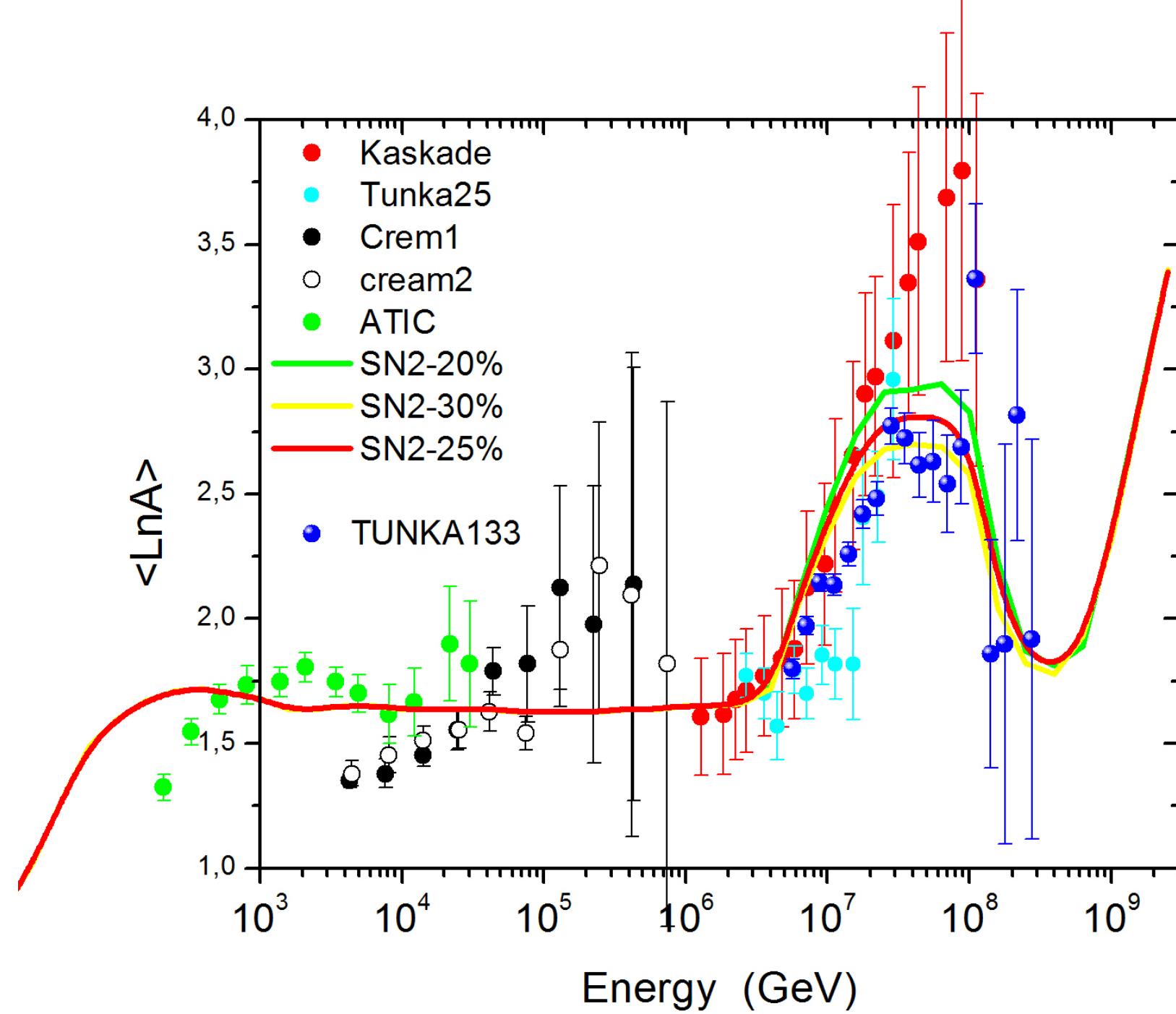


Ptuskin,
Zirakashvili
arXiv:
0912.5172

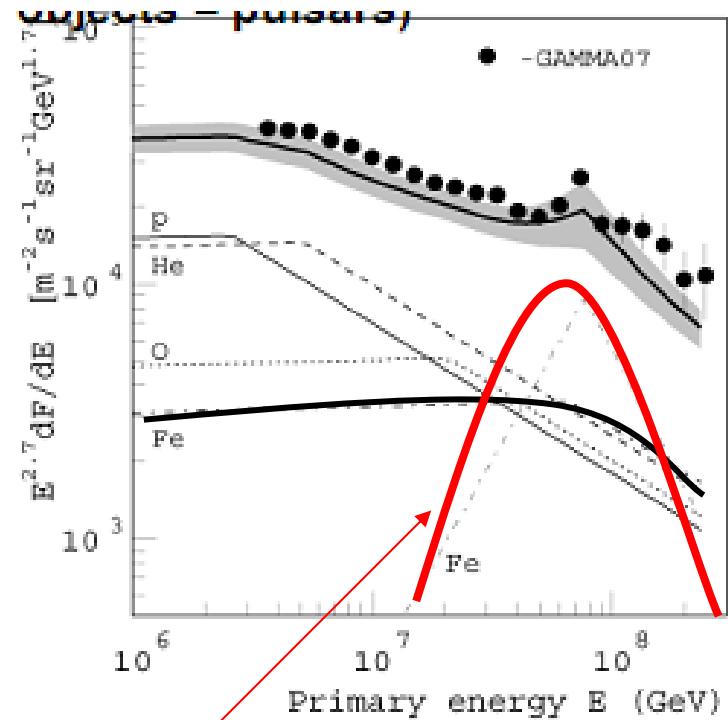
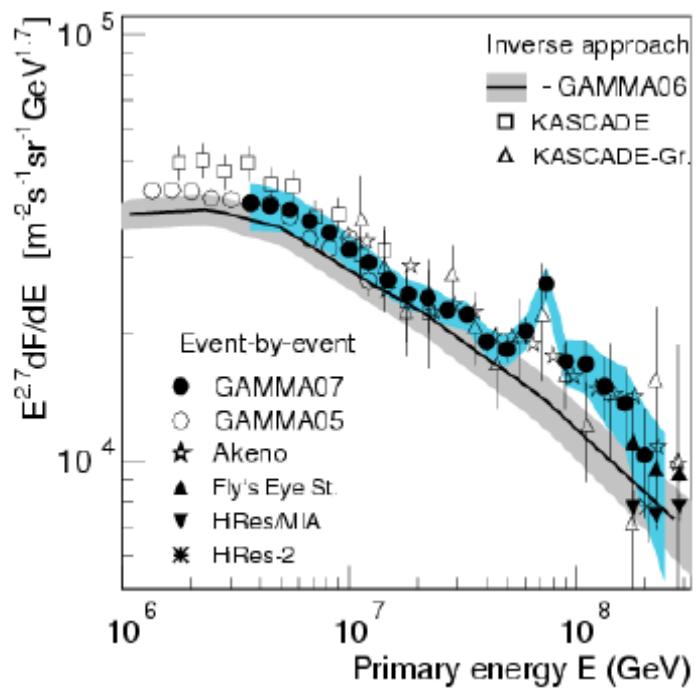




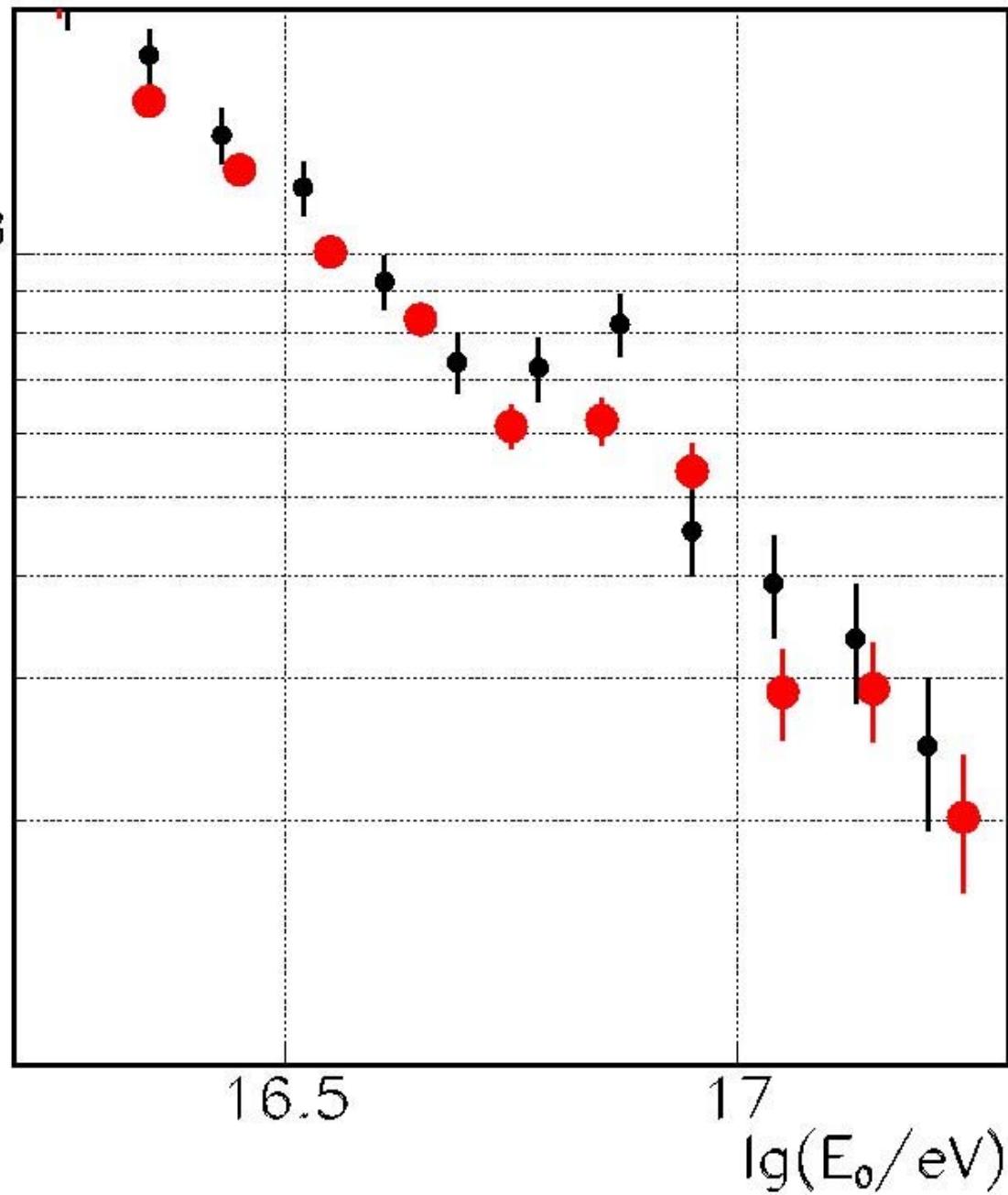




«Пик» в спектре – результат установки ГАММА



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 км²) - в работе
2. AGASA (Япония, 100 км²) – закрыта 2003 году
3. Auger-South (Аргентина, 3000 км²)
4. Telescope Array (USA, 750 км²)
5. Auger –Nord (USA, 20000 км²) - проект

Регистрация со спутника (10 % времени наблюдений) _

1. ТУС (Россия) – 10000 км² запуск в 2011 году
2. EUSO (Европа-Япония) – 100000 км²

Cut-off on relic photons

Greizen, Zatsepin and Kuzmin (GZK) 1966



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

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

$$E = E_0 \exp(-1/L) \quad L \approx 15 \text{ Mpc}$$

Auger observatory

1600 баков, заполненных водой (10 м²) на площади 3000 км².

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

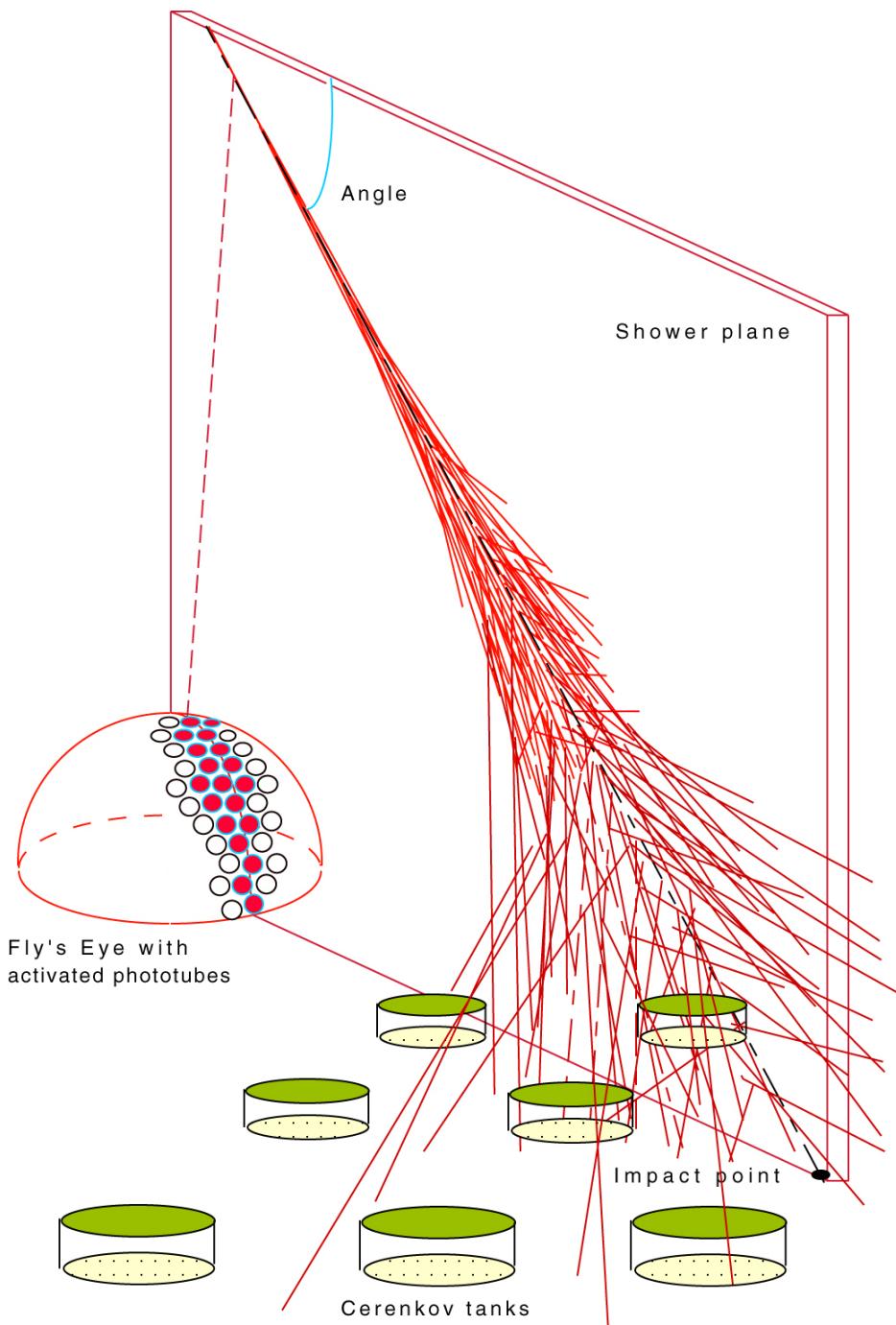
Строительство Auger (S) закончено в 2008 г

.

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

Two techniques:

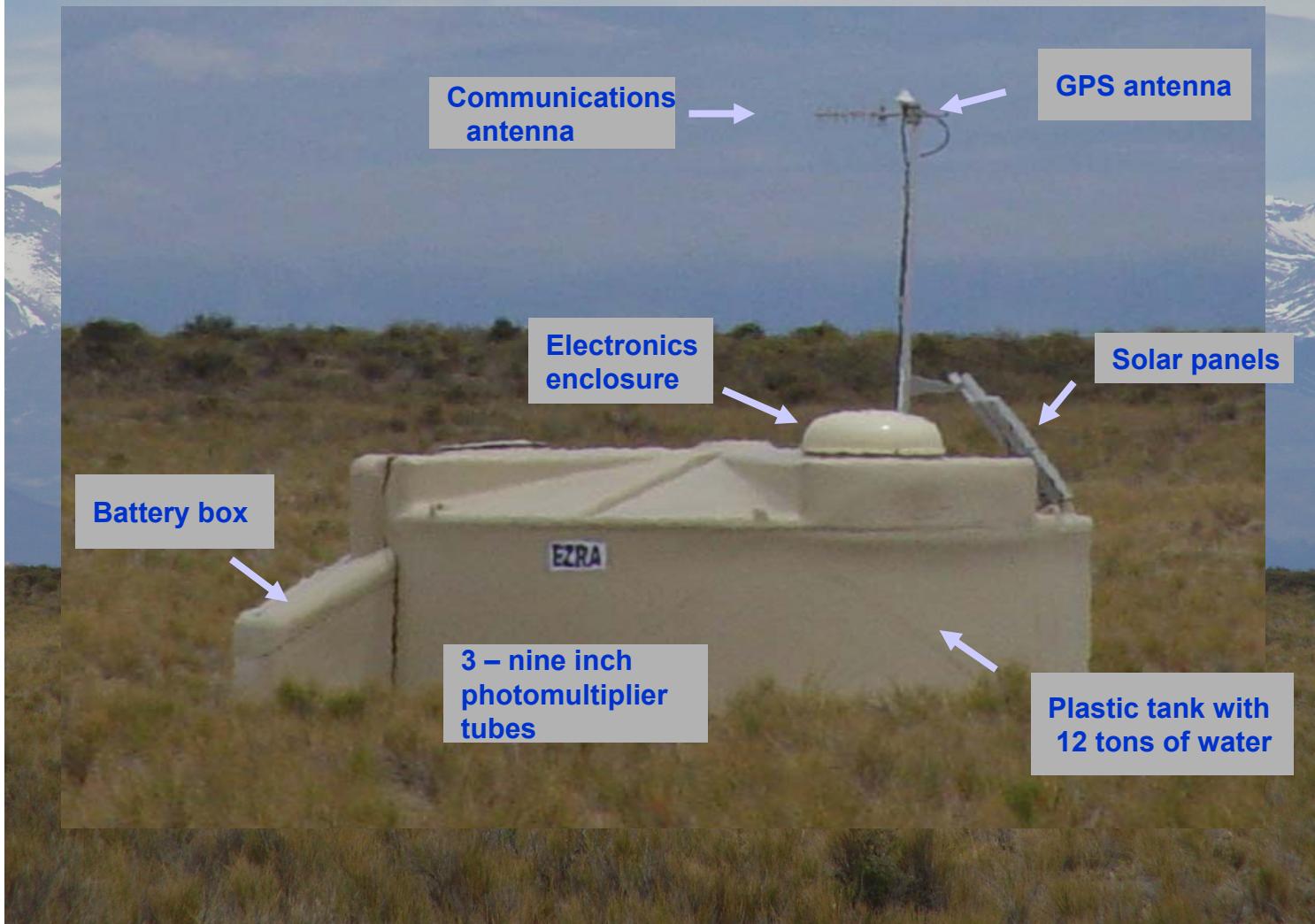
- detect shower particles on the ground
- detect air fluorescence produced by shower particles



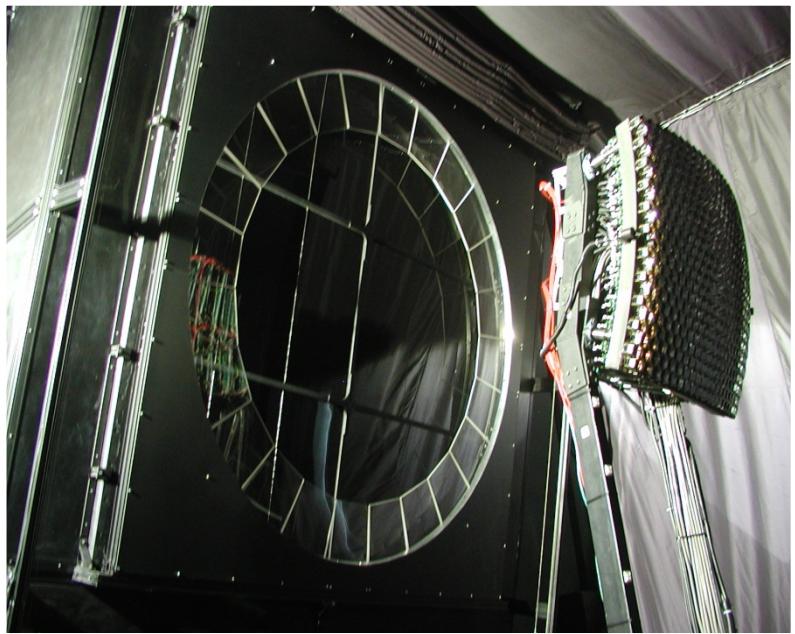
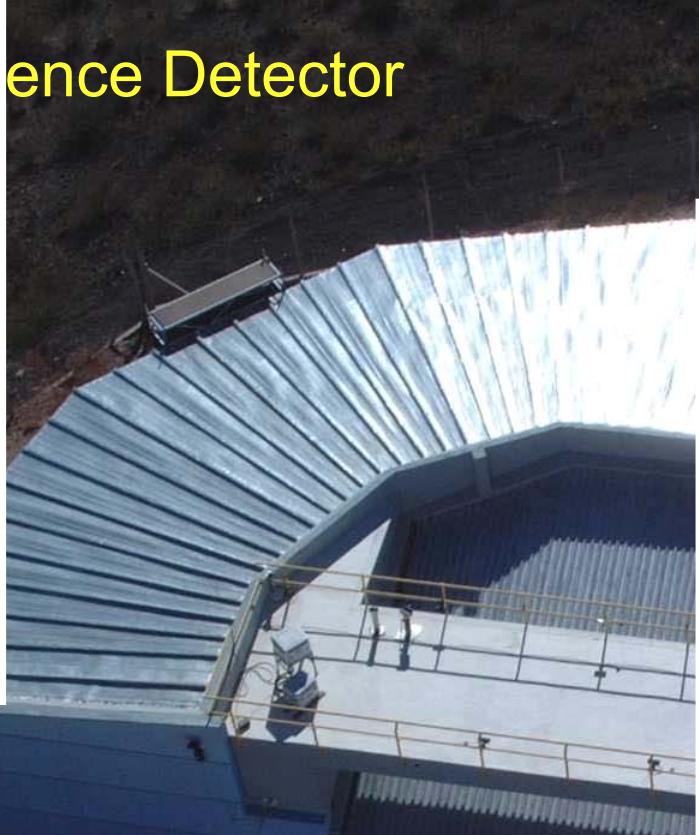


The Surface Array

Detector Station



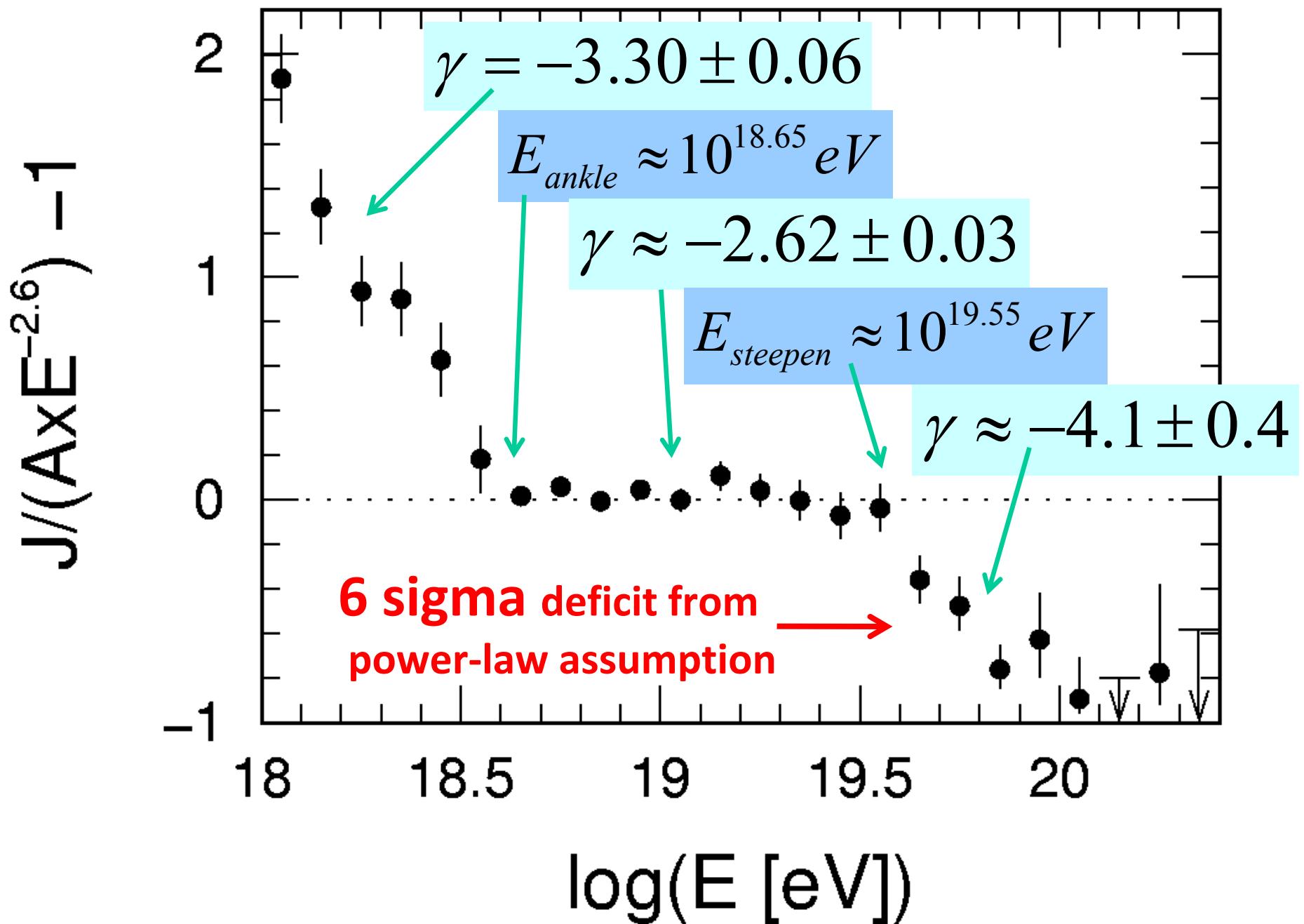
Fluorescence Detector



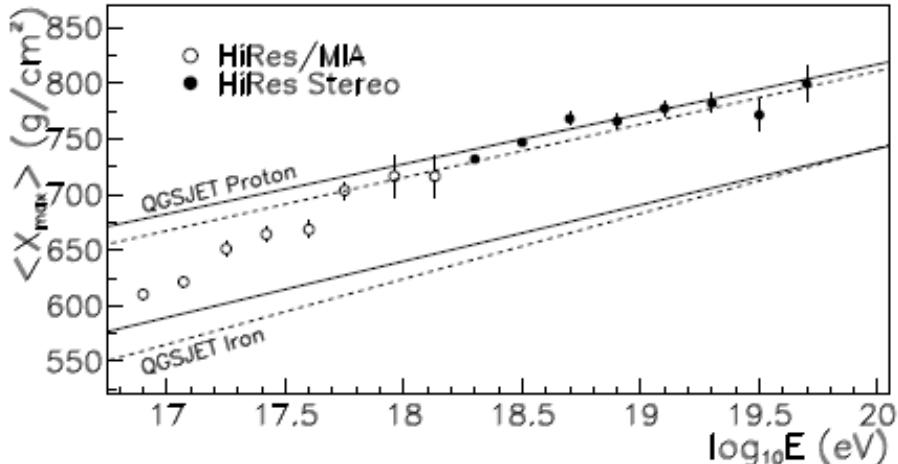
Fluorescence telescopes:

Number of telescopes: 24

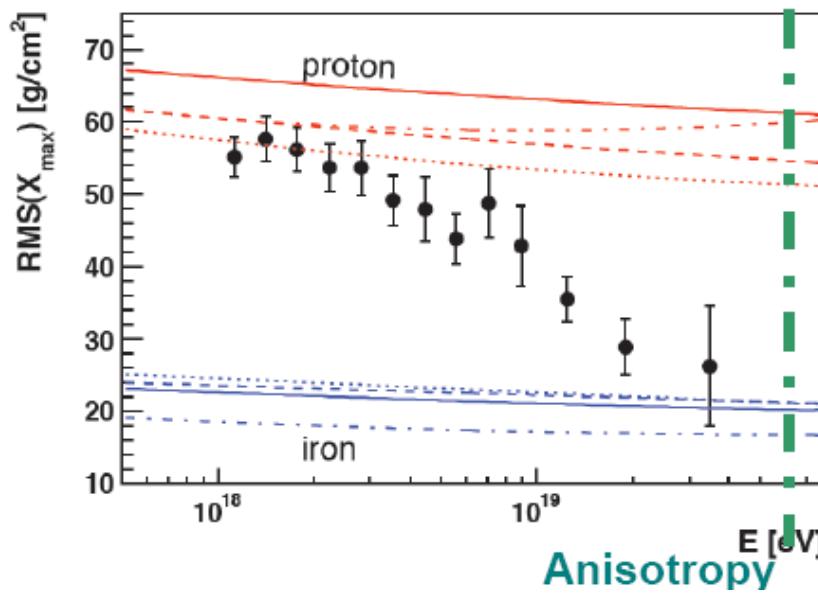
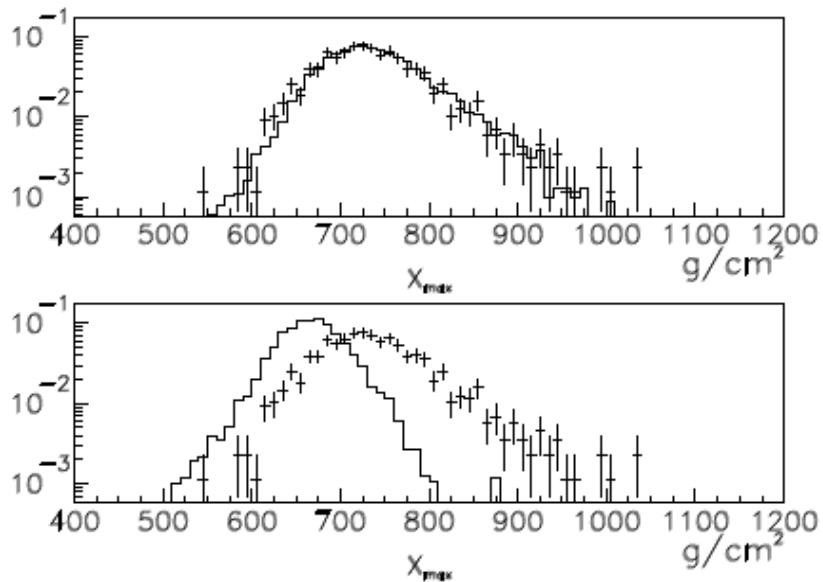
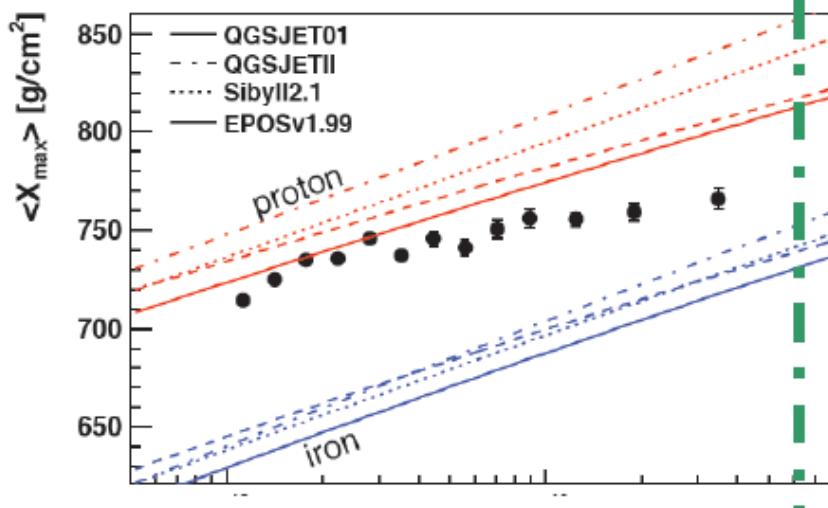
Mirrors: 3.6 m x 3.6 m with field of view 30° x 30°, each telescope is equipped with 440 photomultipliers.



HiRes



Auger



Anisotropy

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.