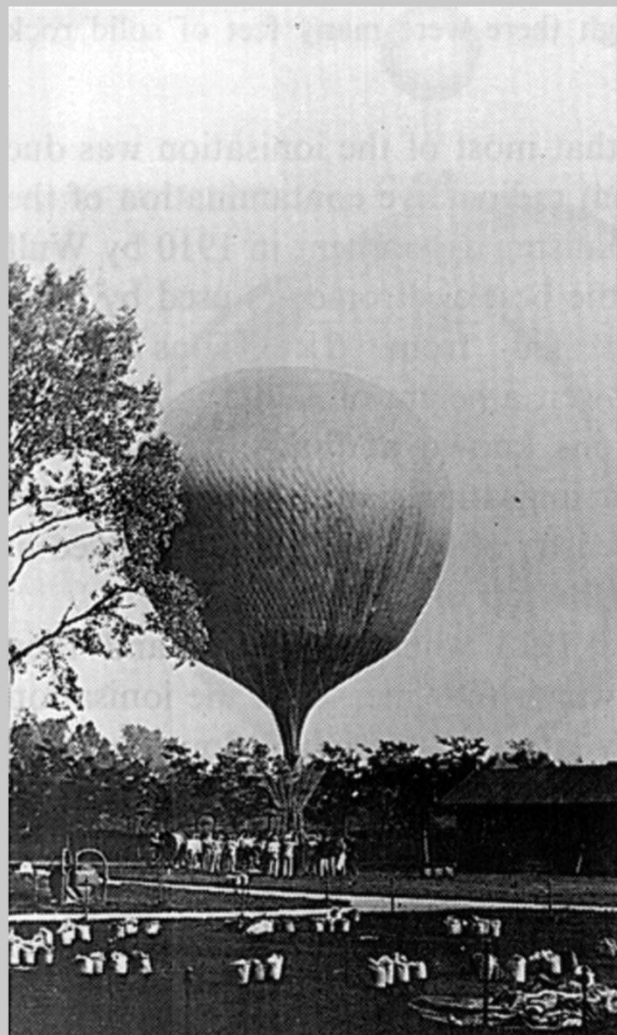


Эксперимент Тунка: статус и перспективы

Б.К.Лубсандоржиев



Виктор Гесс 1912 г. - открытие космических лучей



Происхождение космических лучей? - Загадка 20-21 века

Откуда? - Энергетика?

Где? - Источники?

Как? - Механизмы ускорения?

Коллаборация Тунка

С.Ф.Бережнев, С.Н.Епимахов, Н.Н.Калмыков, Н.И.Карпов, Е.Е.Коростелева, В.А.Кожин, Л.А.Кузьмичев, М.И.Панасюк, Е.Г.Попова, В.В.Просин, А.А.Силаев, А.В.Скурихин, Л.Г.Свешникова, И.В.Яшин
НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

Н.М.Буднев, О.А.Гресс, А.М.Дьячек, А.В.Загородников, Е.Н.Константинов, А.В.Коробченко, Р.Р.Миргазов, Л.В.Паньков, Ю.А.Семеней, О.А.Чвалаев
НИИПФ ИГУ, Иркутск, Россия

Б.К.Лубсандоржиев, Б.А.Шайбонов (Мл.), Р.В.Полещук, Н.Б.Лубсандоржиев, А.Н.Тарасов
ИЯИ РАН, Москва, Россия

В.С.Птускин
ИЗМИРАН, Троицк, россия

Ch. Spiering, R. Wischnewski
DESY-Zeuthen, Zeuthen, Germany;

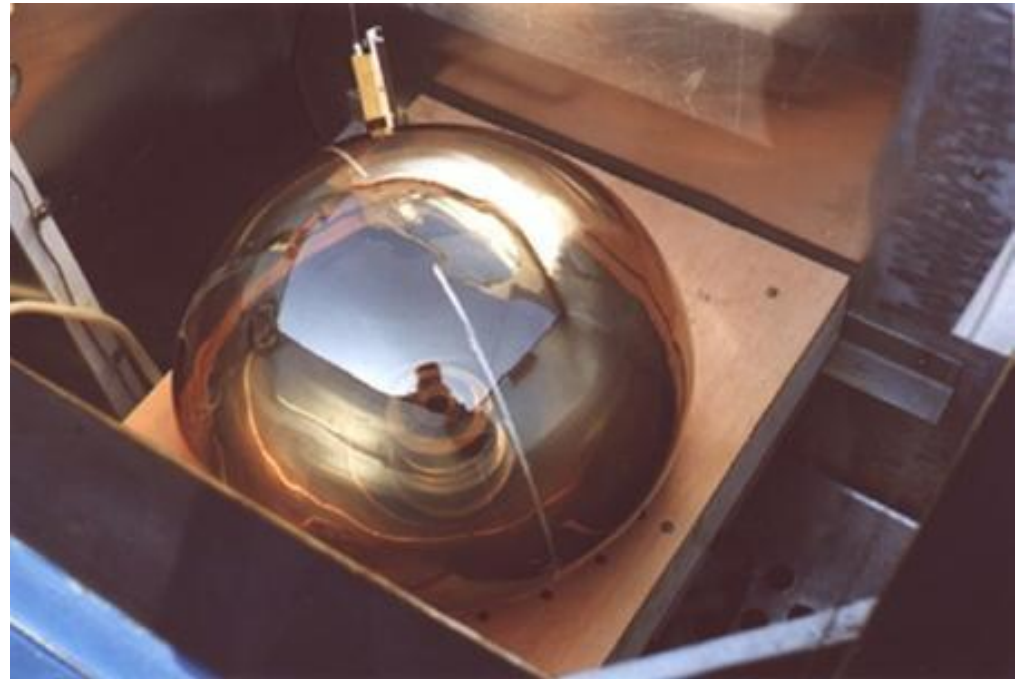
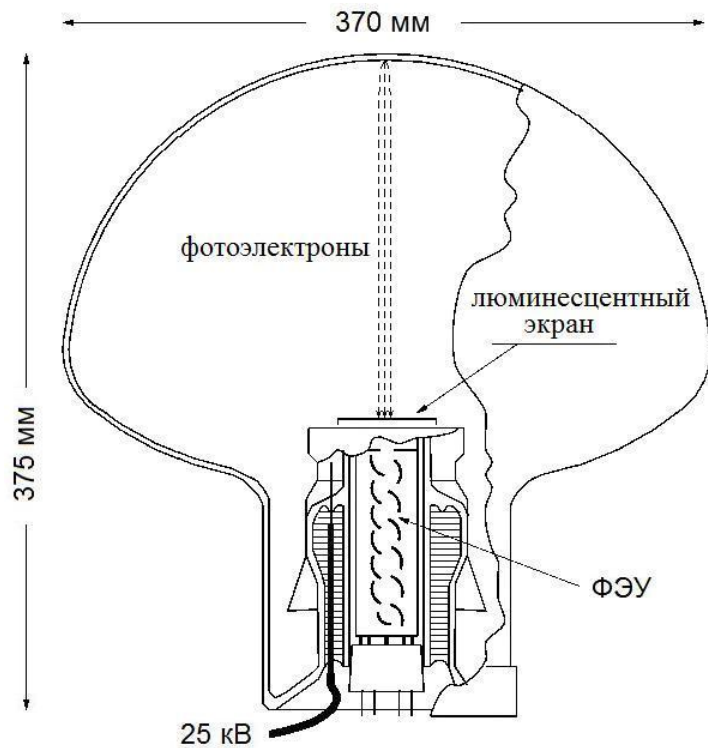
A. Chiavassa
Dip. di Fisica Generale Universita' di Torino and INFN, Torino, Italy.

A. Haungs, F. Schroeder
Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

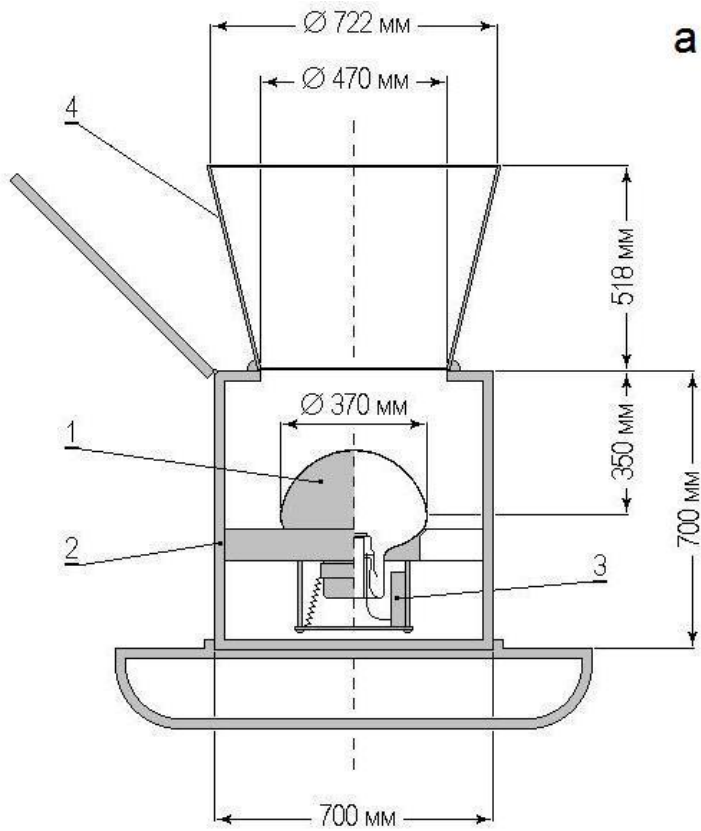
D. Besson, J. Snyder, M. Stockham
Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, USA

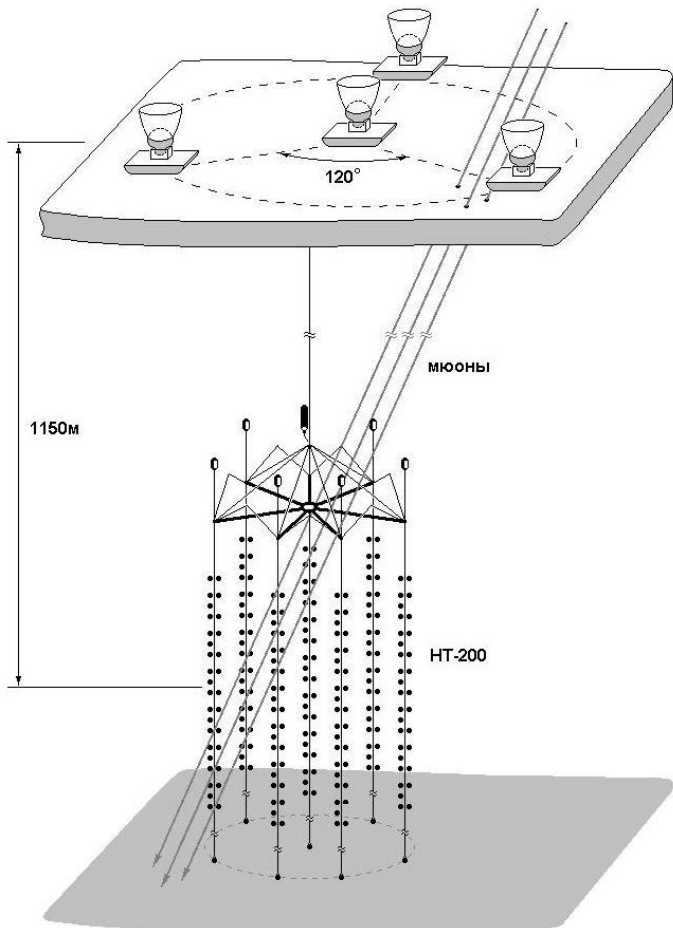
1991-1992: первые эксперименты на льду оз. Байкал с фотодетекторами КВАЗАР-370 (Безруков, Кузьмичев, Лубсандоржиев, Гресс)

1993г. - Перенос эксперимента в Тункинскую долину.
(Безруков, Буднев, Кузьмичев, Лубсандоржиев, Похил и др.)

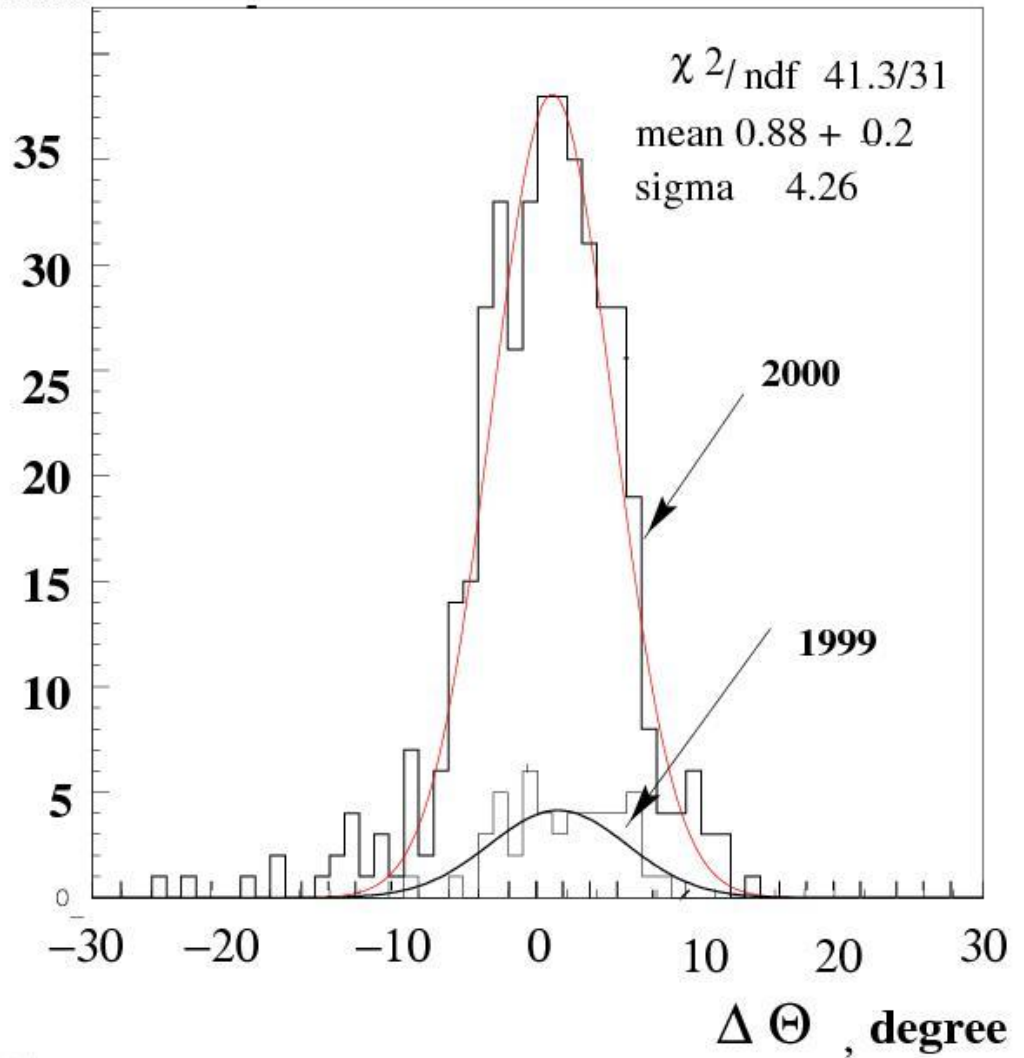


SMECA: Surface Mobile Eas Cherenkov Array



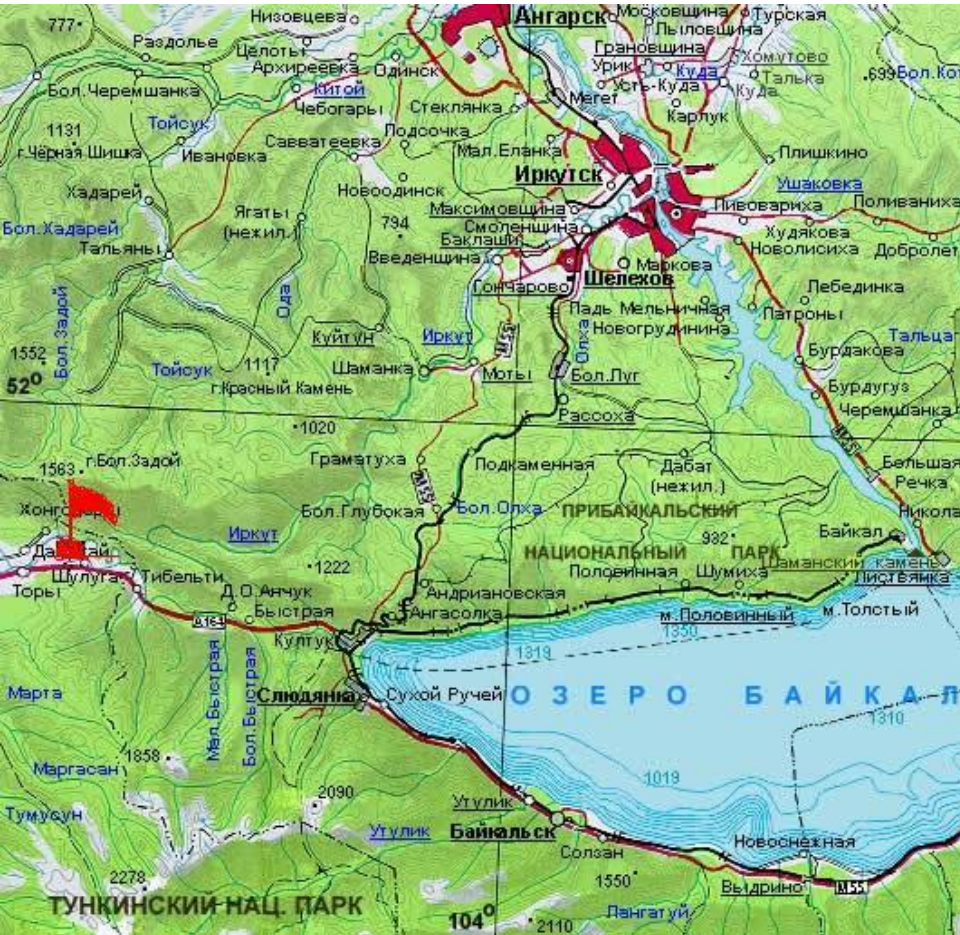


Events



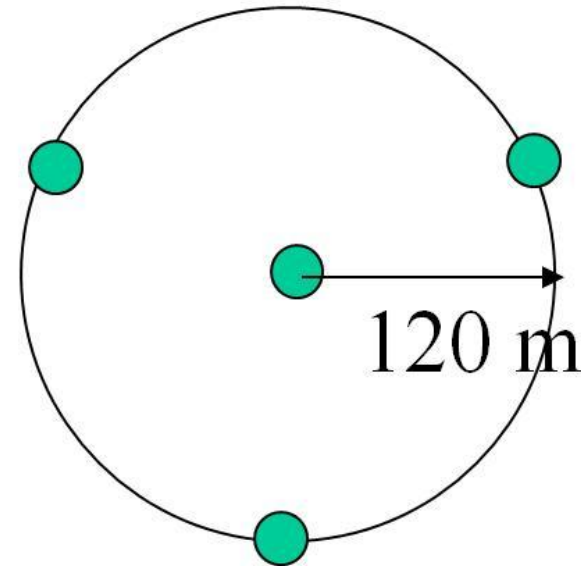


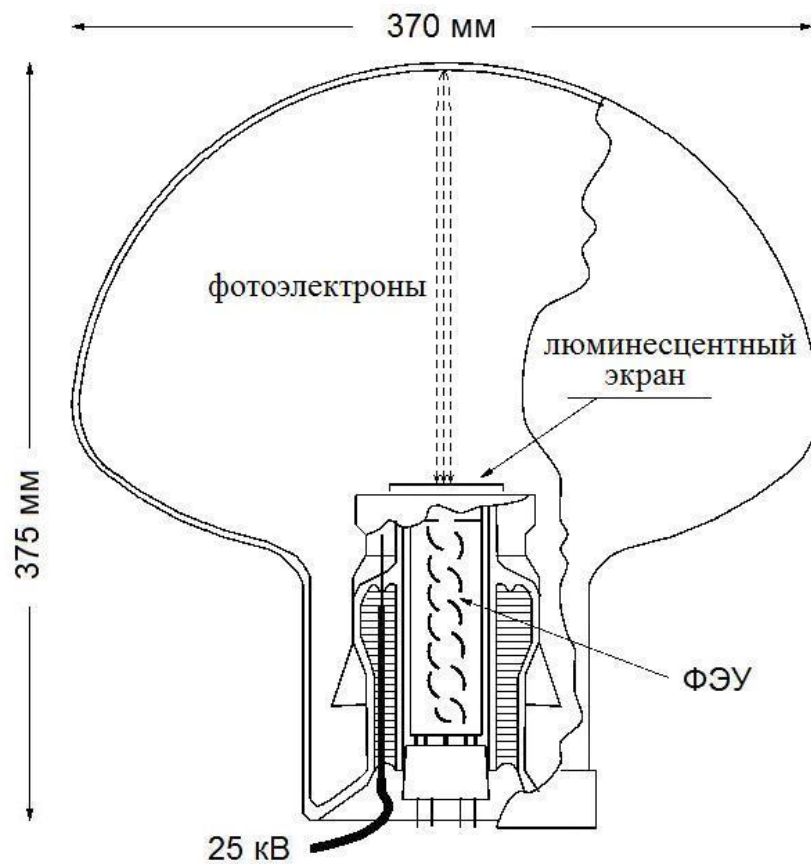
п. Торы, Тункинский р-он, Республика Бурятия



Тунка-4

4 фотодетектора КВАЗАР-370G

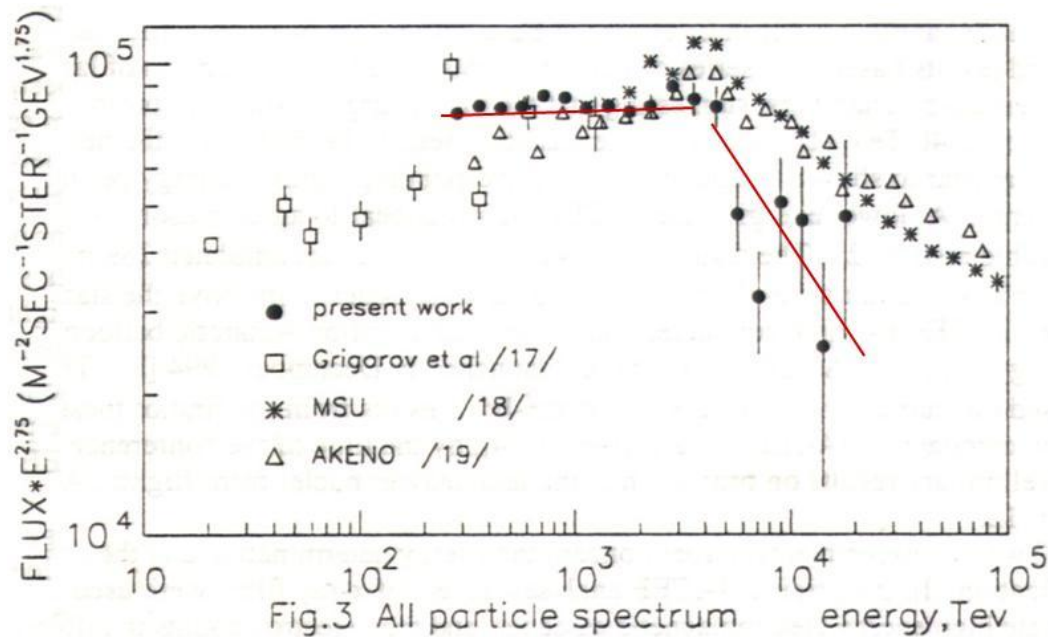




Разработка специализированного фотодетектора КВАЗАР-370G для черенковских детекторов ШАЛ Тунка
Безруков, Лубсандоржиев, Похил, Путилов, Степаненко. ИЯИ РАН – ОКБ КАТОД



Разработка серии специализированных быстродействующих ФЭУ для фотодетектора КВАЗАР-370G, максимальный DC анодный ток – ~200 мкА!
Безруков, Глуховской, Лубсандоржиев, Похил. ИЯИ РАН - МЭЛЗ



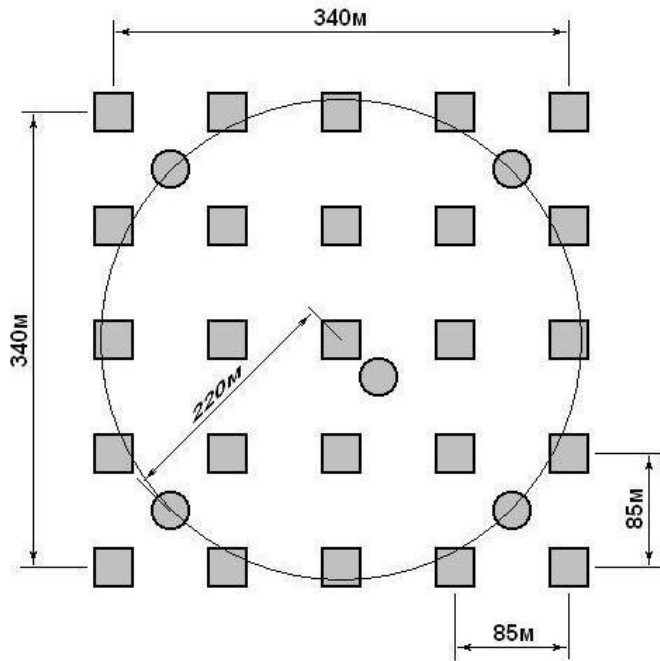
Bezrukov, Kuzmichev, Lubsandorzhev, Poxil et al. 24th ICRC 1995 Rome.

“Колено” в спектре космических лучей при 3×10^{15} эВ.

Тунка-25

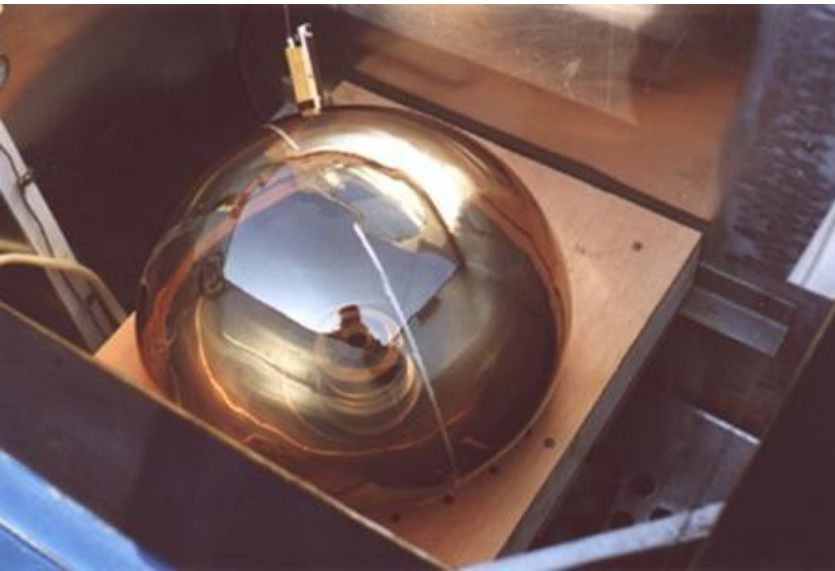
25 фотодетекторов КВАЗАР-370G
+4 детектора формы импульса ШАЛ

$S \sim 0.1 \text{ km}^2$; $E_{\text{th}} \sim 0.5 \text{ PeV}$; $\theta \sim 0.5^\circ$

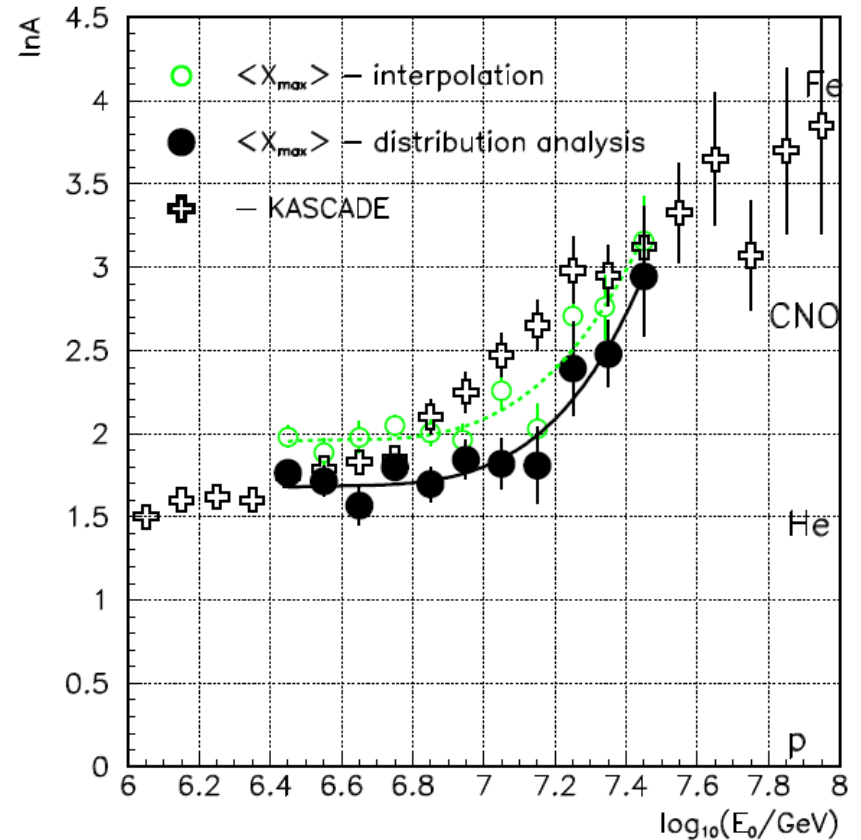
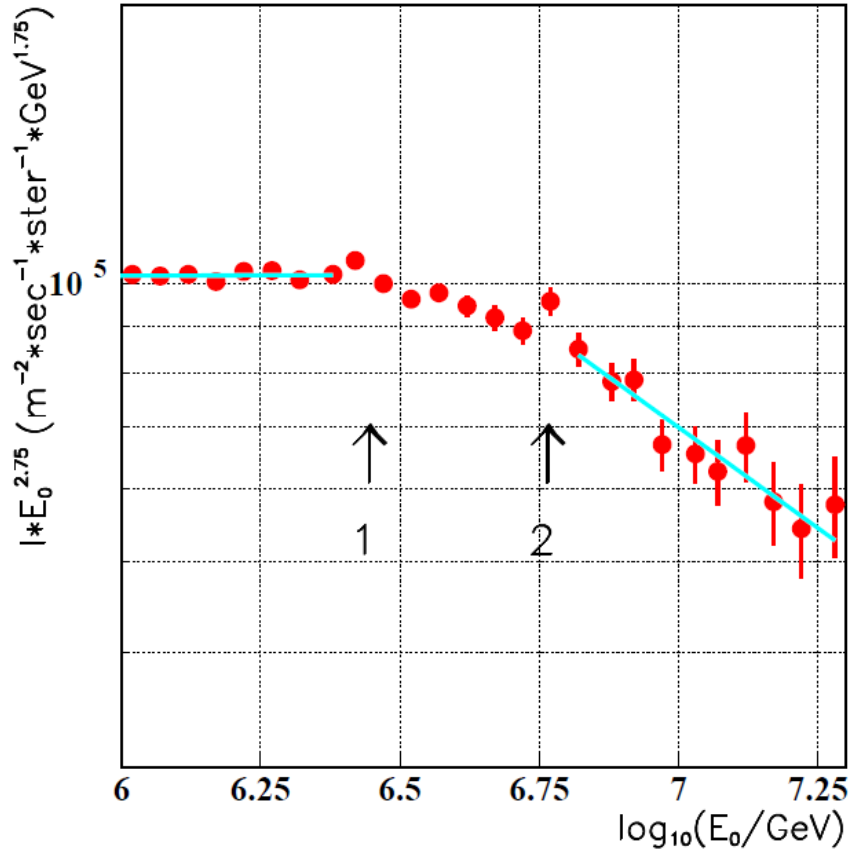


■ – основной оптический пункт на базе фотодетектора КВАЗАР-370G

● – дополнительный оптический пункт на базе ФЭУ Thorn-EMI D688



Основные результаты детектора ТУНКА-25



Энергетический спектр и массовый состав ПКИ в диапазоне энергий 10^{15} - 2×10^{16} эВ.

ИЯИ РАН: Тунка-4; Тунка-13; Тунка-25

Разработка специализированного фотодетектора КВАЗАР-370G

Безруков, Лубсандоржиев, Путилов, Похил, Степаненко

Разработка серии специализированных быстродействующих ФЭУ для фотодетектора КВАЗАР-370G

Безруков, Глуховской, Лубсандоржиев

Разработка калибровочной системы для Тунка-4; Тунка-13 и Тунка-25

Васильев, Вятчин, Лубсандоржиев, Похил

Выравнивание одновременности срабатывания оптических пунктов детекторов Тунка-4; Тунка-13 и Тунка-25 с точностью ~ 350 пс

Васильев, Вятчин, Лубсандоржиев, Похил .

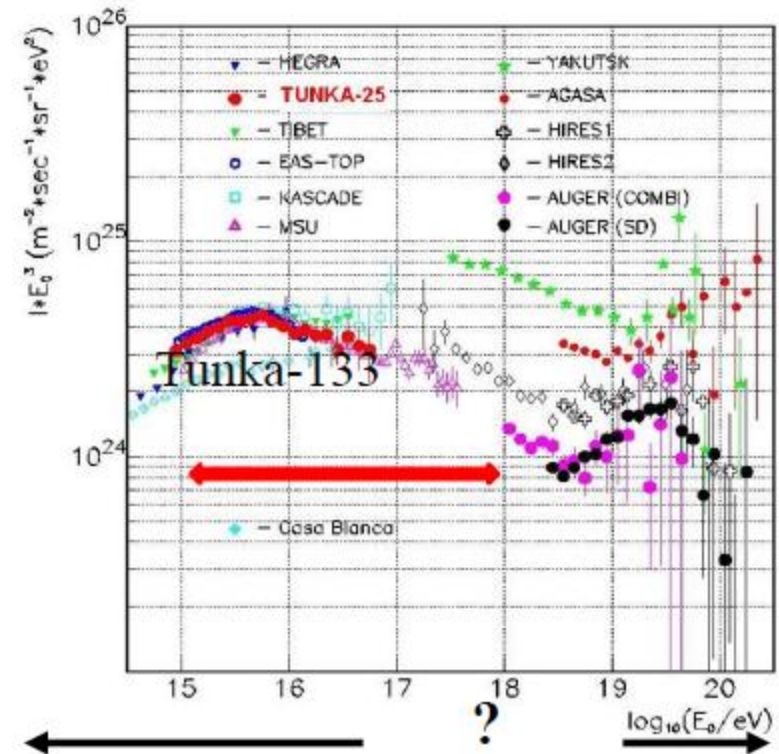
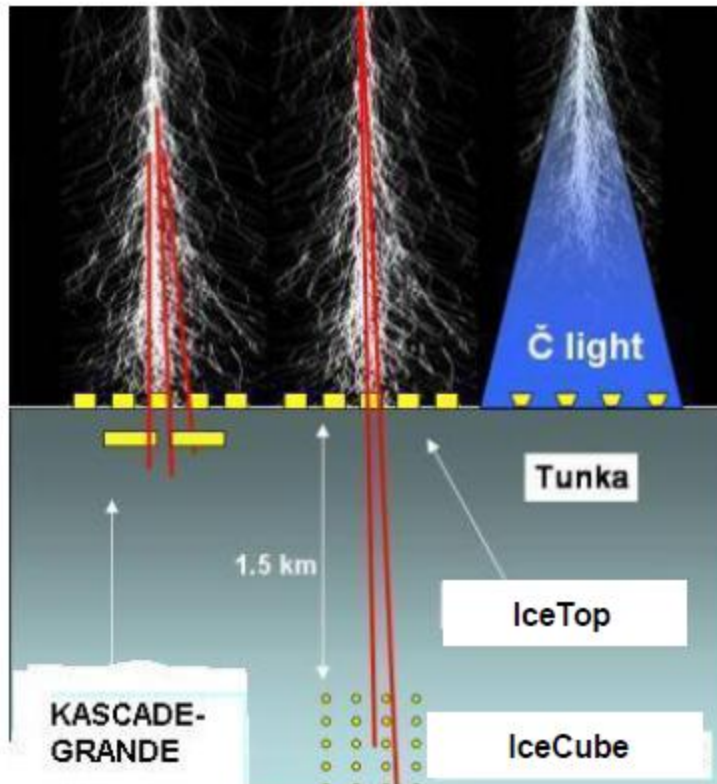
Точность временных измерений в эксперименте ТУНКА – определение углового разрешения всей установки

Васильев, Вятчин, Лубсандоржиев, Похил.

Search for the Acceleration Limit of Galactic Sources

- Energy range 10^{16} - 10^{18} eV demands:
- 1 km² with spacing smaller than that at Auger
- complementary techniques

- KASCADE-Grande *terminated*
- IceTop/IceCube *in operation*
- Tunka-133 (calorimetric) *in operation*
- NEVOD-DÉCOR *in operation*
- Auger low energy extension *in operation*
- **HISCORE** *planned*
- **LHAASO** *planned*



CR from SNR

CR from AGN

P, A

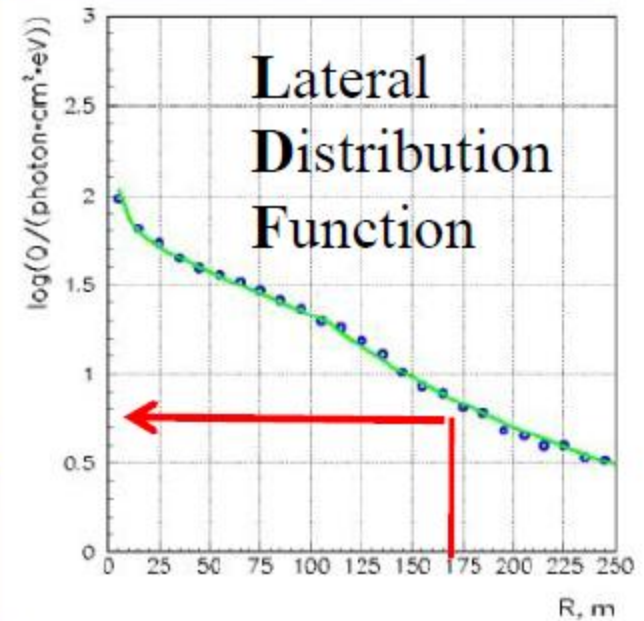
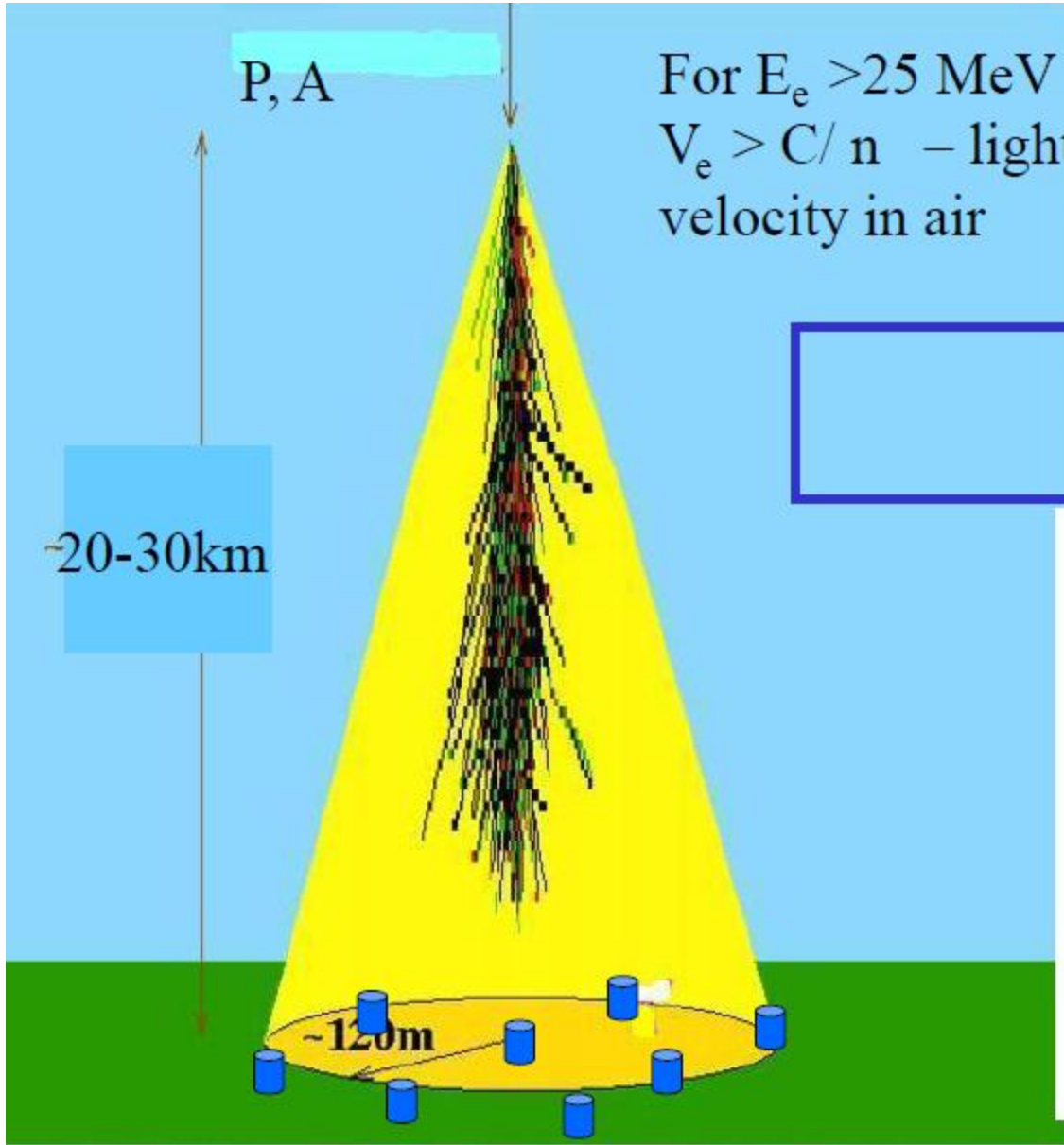
For $E_e > 25 \text{ MeV}$
 $V_e > C/n$ – light
velocity in air

Atmosphere as
a huge calorimeter

Cherenkov light

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

~20-30km



Photons detectors

$$E (\text{PeV}) = 0.4 Q(175) \text{ ph} \cdot \text{eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

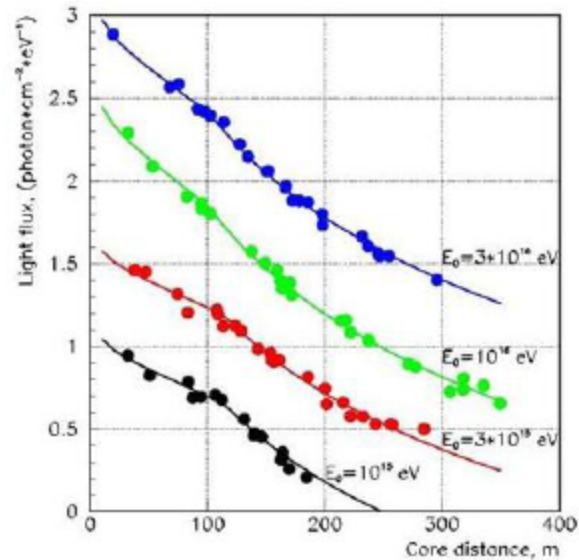
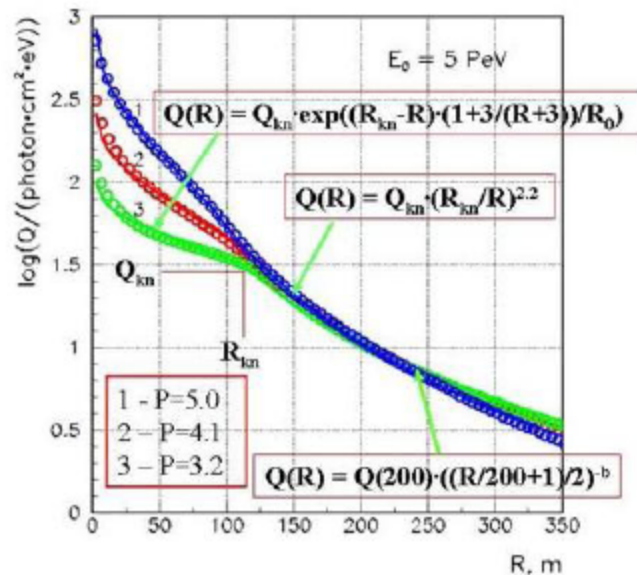
Advantage of Cherenkov Technique:

1. Good energy resolution - up to 15%
2. Good accuracy of X_{\max} - 20 -25 g/cm²
3. Good angular resolution - 0.1 – 0.3 deg
4. Low cost – Tunka-133 – 1 km² array:
0.5 10⁶ Eur (construction and deployment)
+
0.2 10⁶ Eur(PMTs)
100 km² array - 10⁷ Eur

Disadvantage:

1. Small time of operation (moonless, cloudless nights) – 5-10%

Usage of Cherenkov Light Lateral Distribution Function (LDF) for the Reconstruction of EAS Parameters



LDF from CORSIKA

Experimental data fitted with LDF

$Q(R) = F(R, p)$ (only one parameter)



steepness of LDF



light flux at core distance 175 m - $Q_{175} \sim \text{Energy}$

$$P = Q(100)/Q(200) \rightarrow X_{\max}$$

Primary energy reconstruction

$$E = A \cdot Q_{175}^g$$

EAS Cherenkov light flux at core distance 175 m

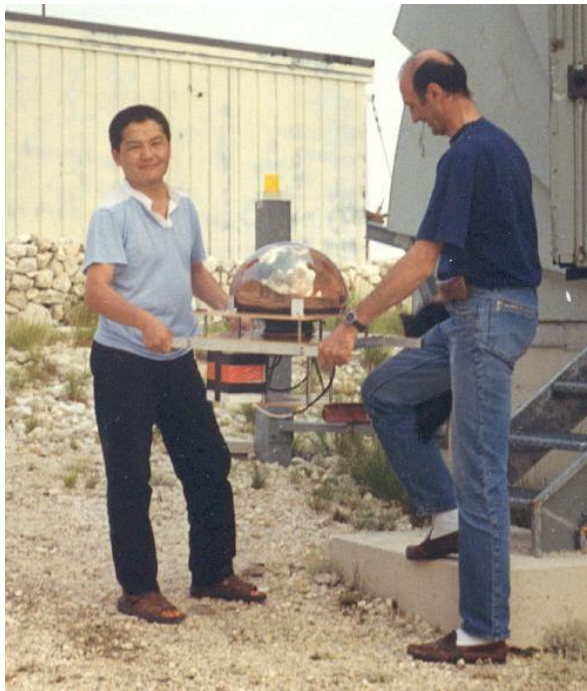
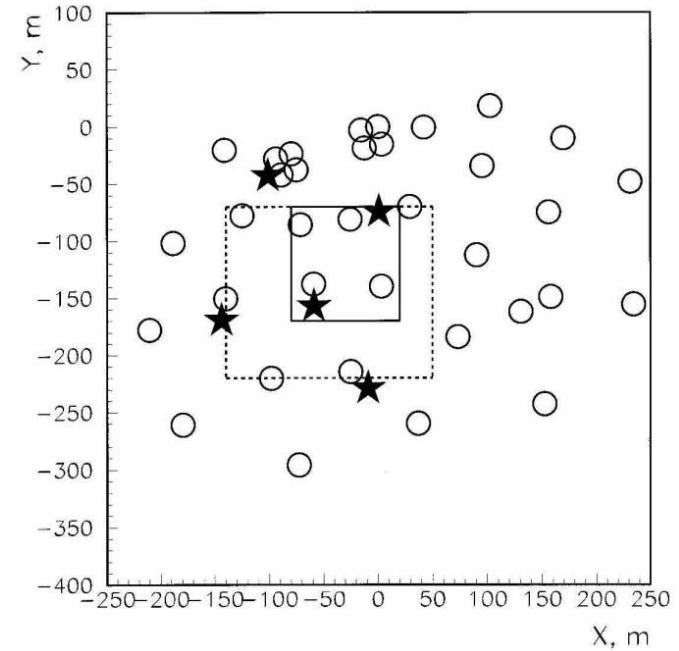
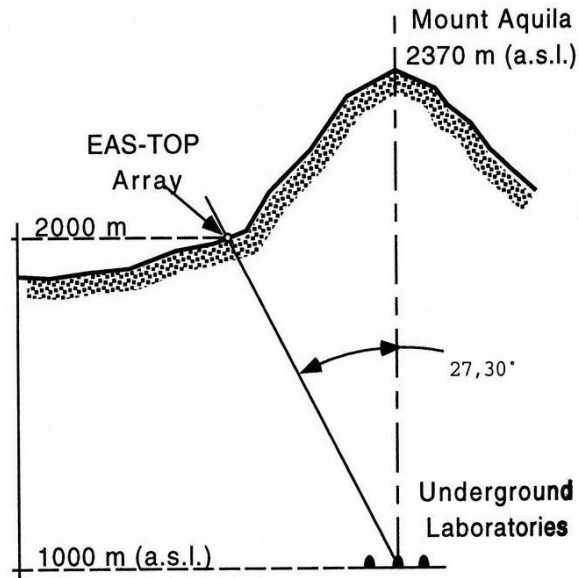
For $10^{16} - 10^{17}$ eV

$g = 0.93 \pm 0.02$ (CORSIKA)

0.95 for light composition,

0.91 for heavy composition

Эксперимент QUEST (QUasars at EaS-Top)

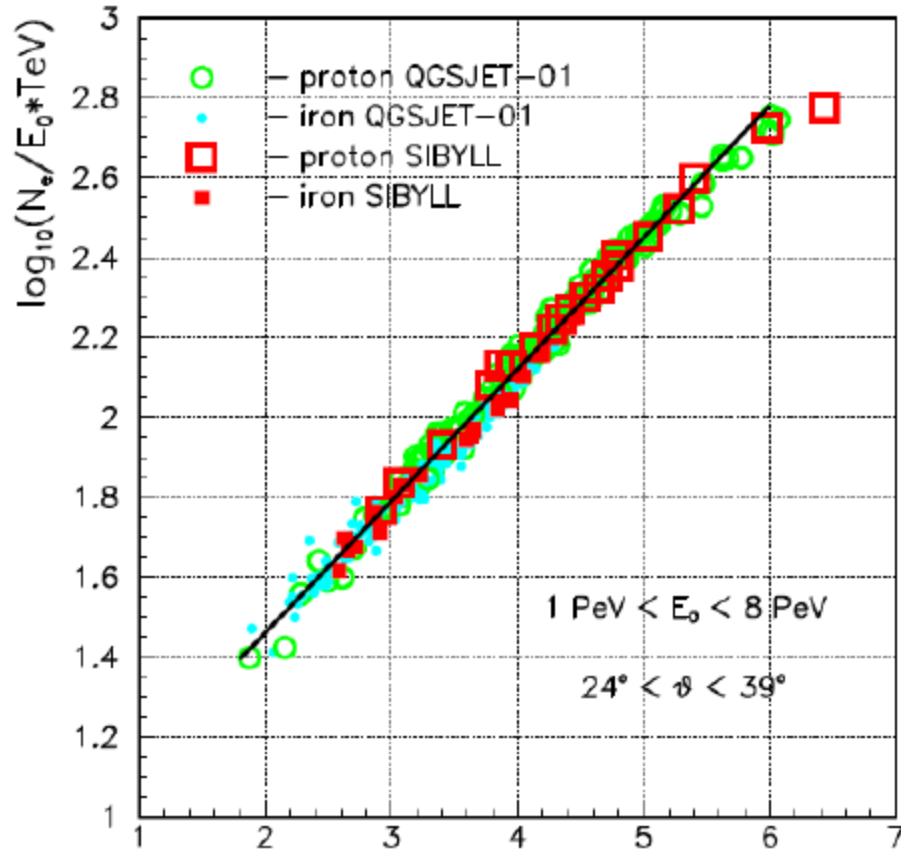


- ★ - широкоугольные черенковские детекторы ;
- - сцинтилляционные детекторы

5 фотодетекторов КВАЗАР-370G



Absolute energy calibration : QUEST experiment (Cherenkov detectors at EAS-TOP)

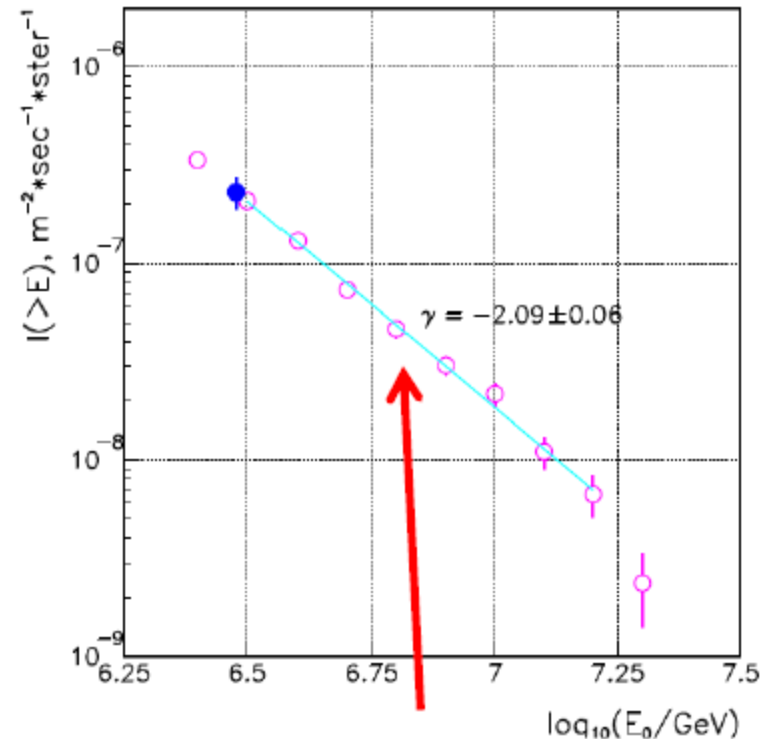


P

$$E_0 [\text{eV}] = 1.59 \cdot 10^{11} N_e / \exp(0.76P)$$

P – steepness of LDF (Lateral Distribution Function)

Integral spectrum



**Normalization
point for Tunka-133**

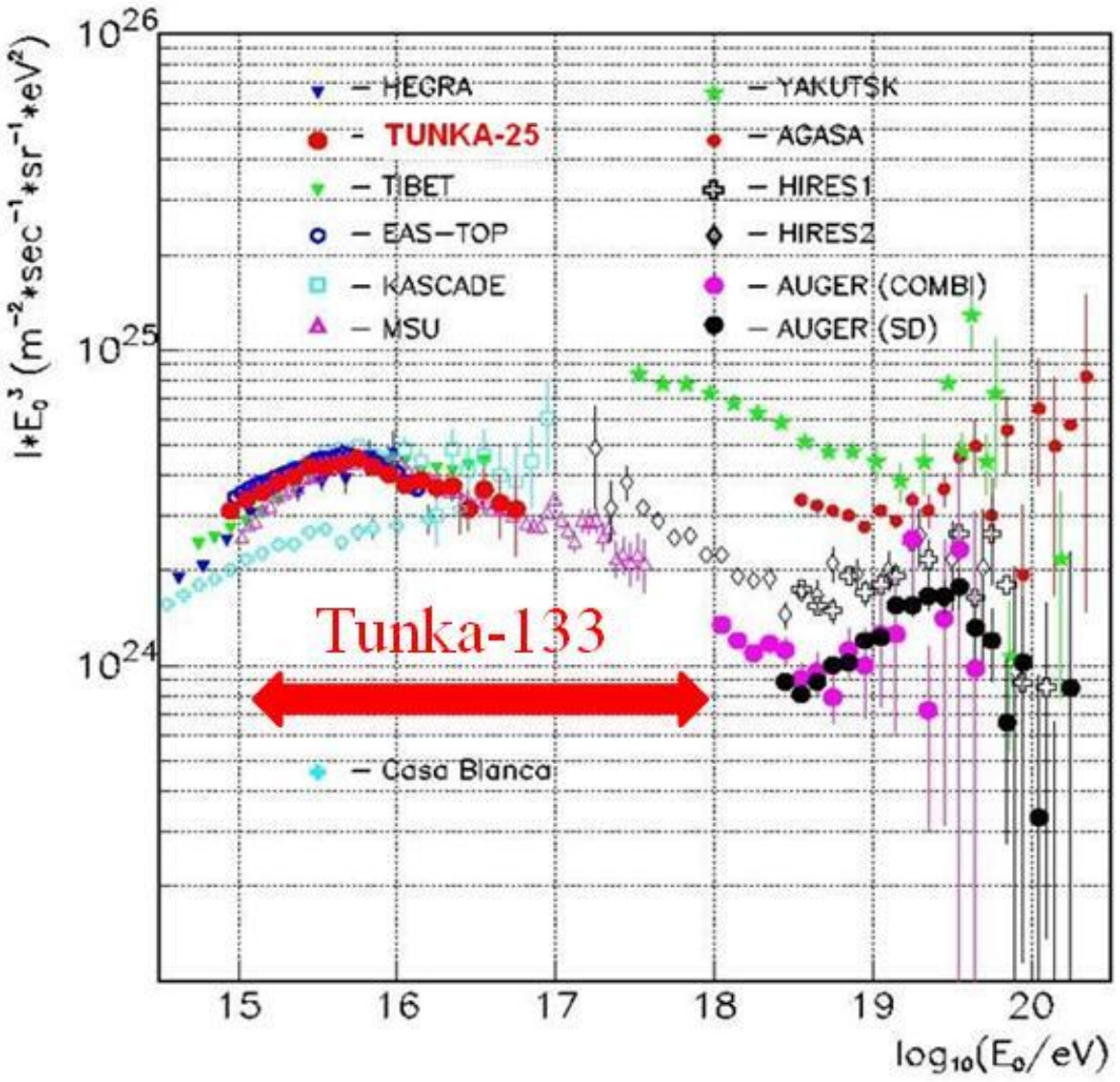
QUEST: Абсолютная калибровка эксперимента Тунка

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

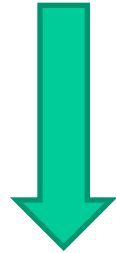
X_{max} determination

1. Steepness of LDF: $X_{\text{max}} = F(P)$
2. Width of signal : $X_{\text{max}} = F(\tau)$
3. Shape of Cherenkov front : $X_{\text{max}} = F(R)$
(not used up to now)

Космические лучи в энергетическом диапазоне $10^{15} - 10^{18}$ эВ



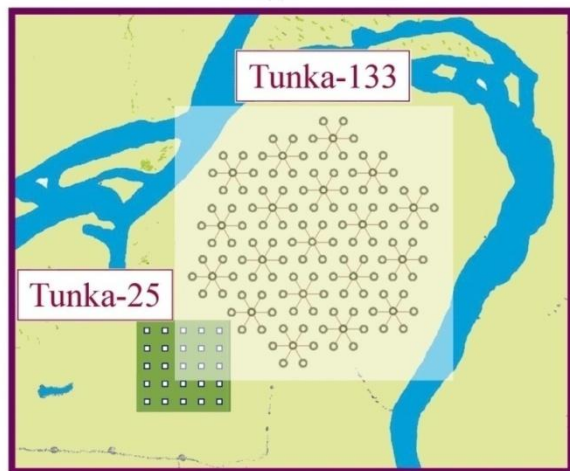
$S \sim 1 \text{ km}^2;$
 $r \sim 80-100 \text{ m};$
 $s(\varnothing) \geq 20 \text{ cm}$



Тунка-133

Тунка-133

Изучение ПКИ в энергетическом диапазоне $10^{15} - 10^{18}$ эВ



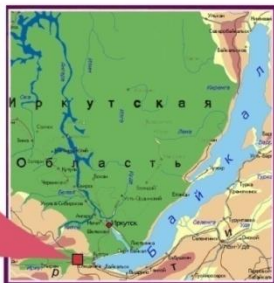
$S \sim 1 \text{ км}^2$; $E_{\text{th}} \sim 10^{15} \text{ эВ}$;

Точность локации оси ливня – 10 м;

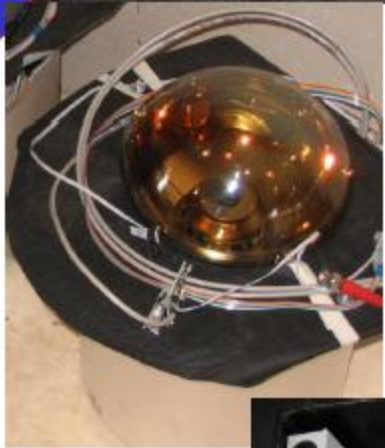
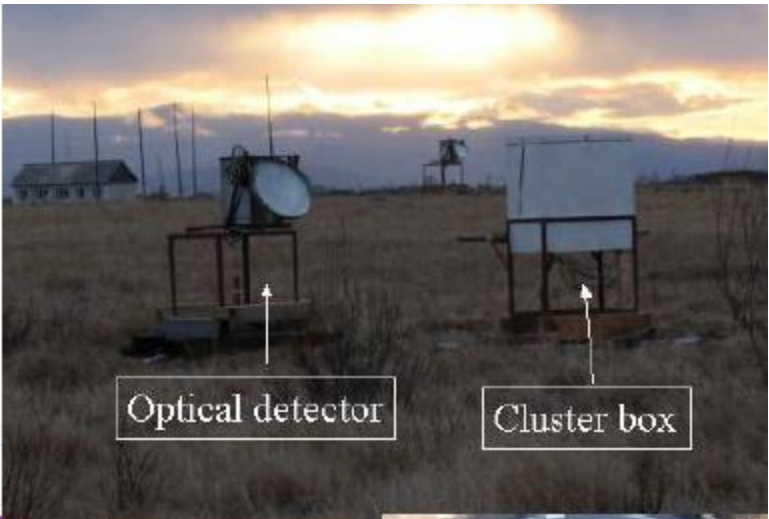
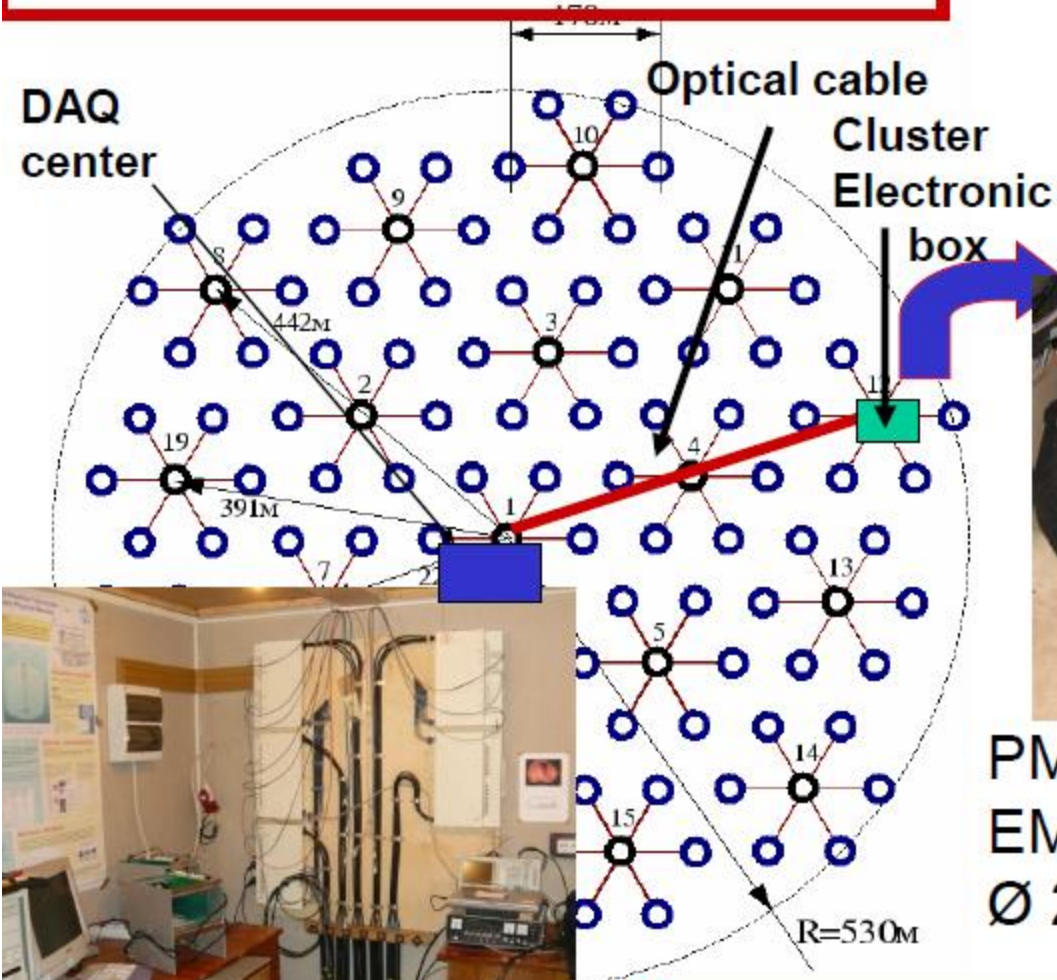
Энергетическое разрешение – 15%;

Точность определения X_{max} - 25 g/cm²

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

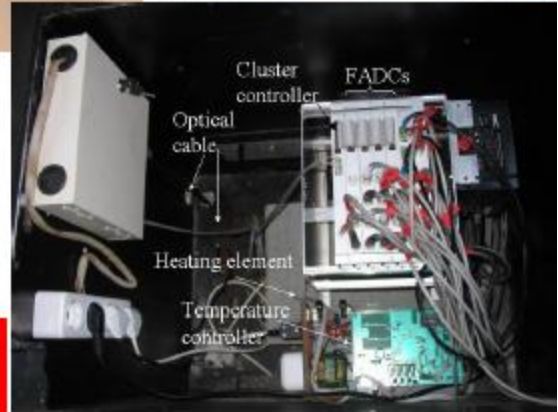


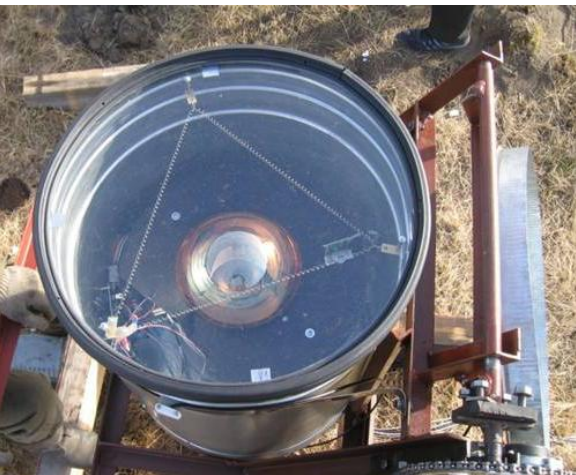
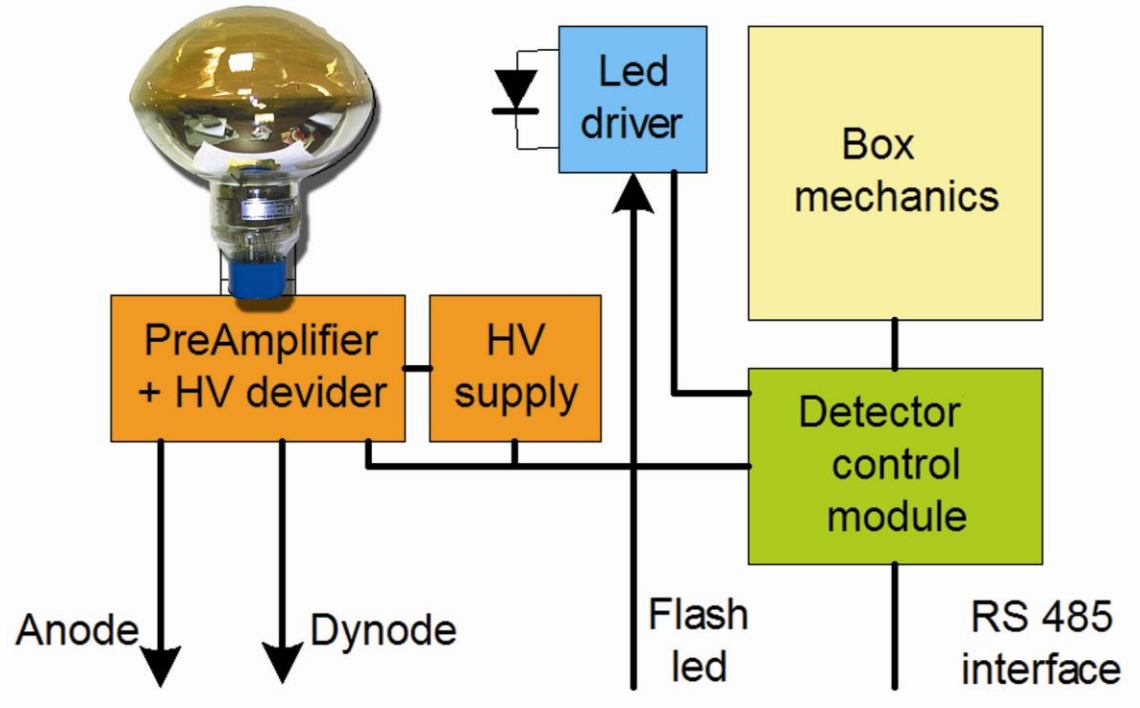
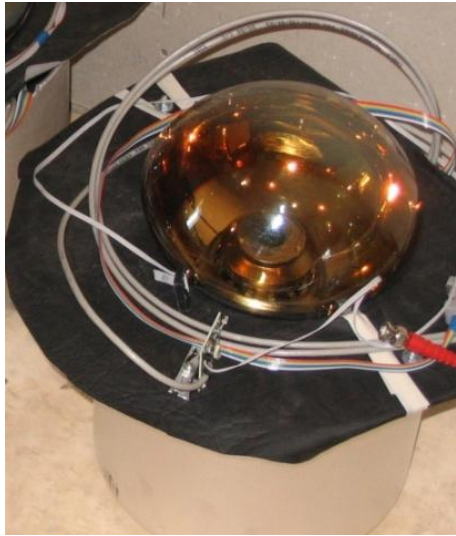
Tunka-133: 19 clusters, 7 detectors in each cluster



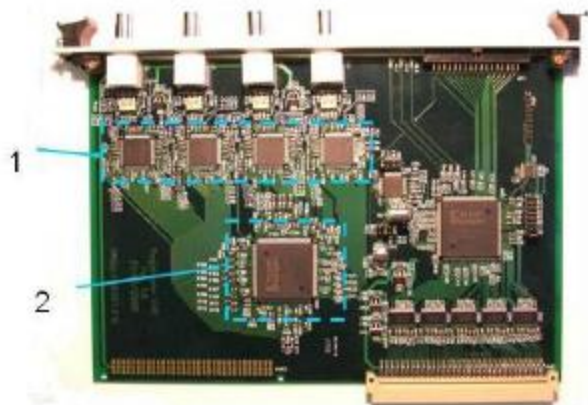
PMT
EMI 9350
Ø 20 cm

**4 channel FADC boards
200 MHz, 12 bit**

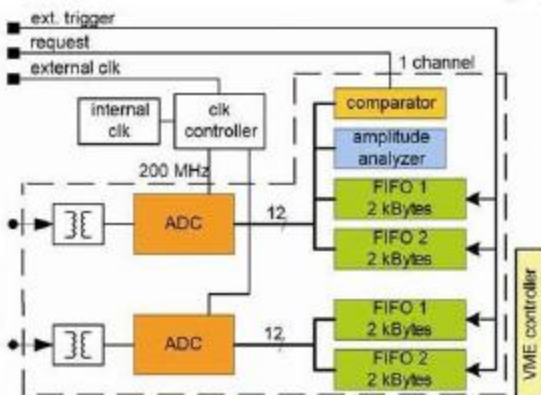




8 inch EMI9350 PMT from MACRO
A/D=30, high linearity ($>10^5$ pe)
Fast LED driver with high dynamic range

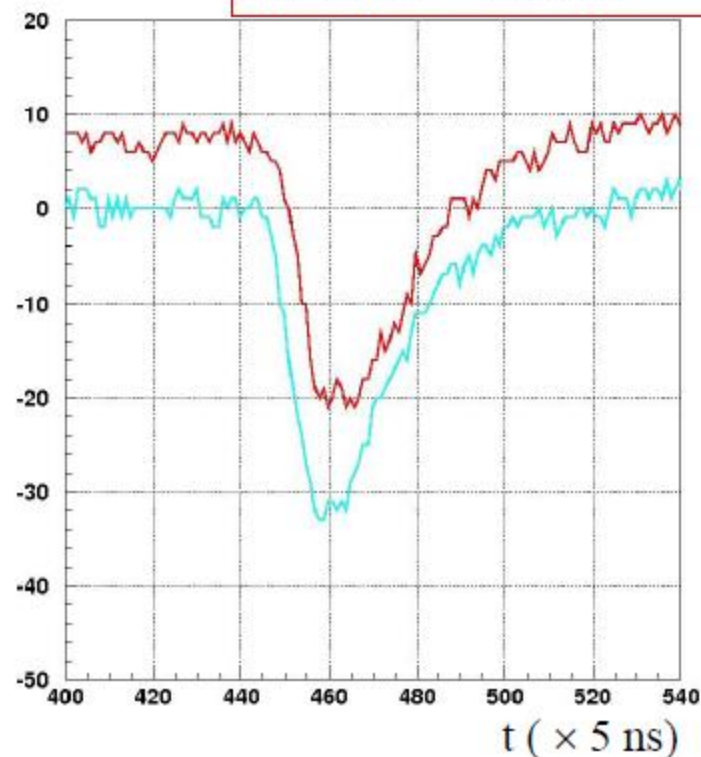
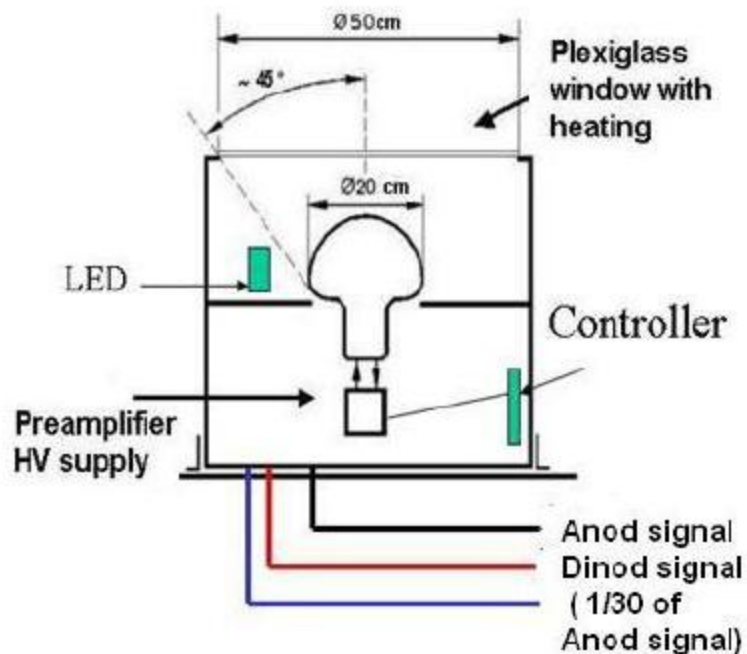


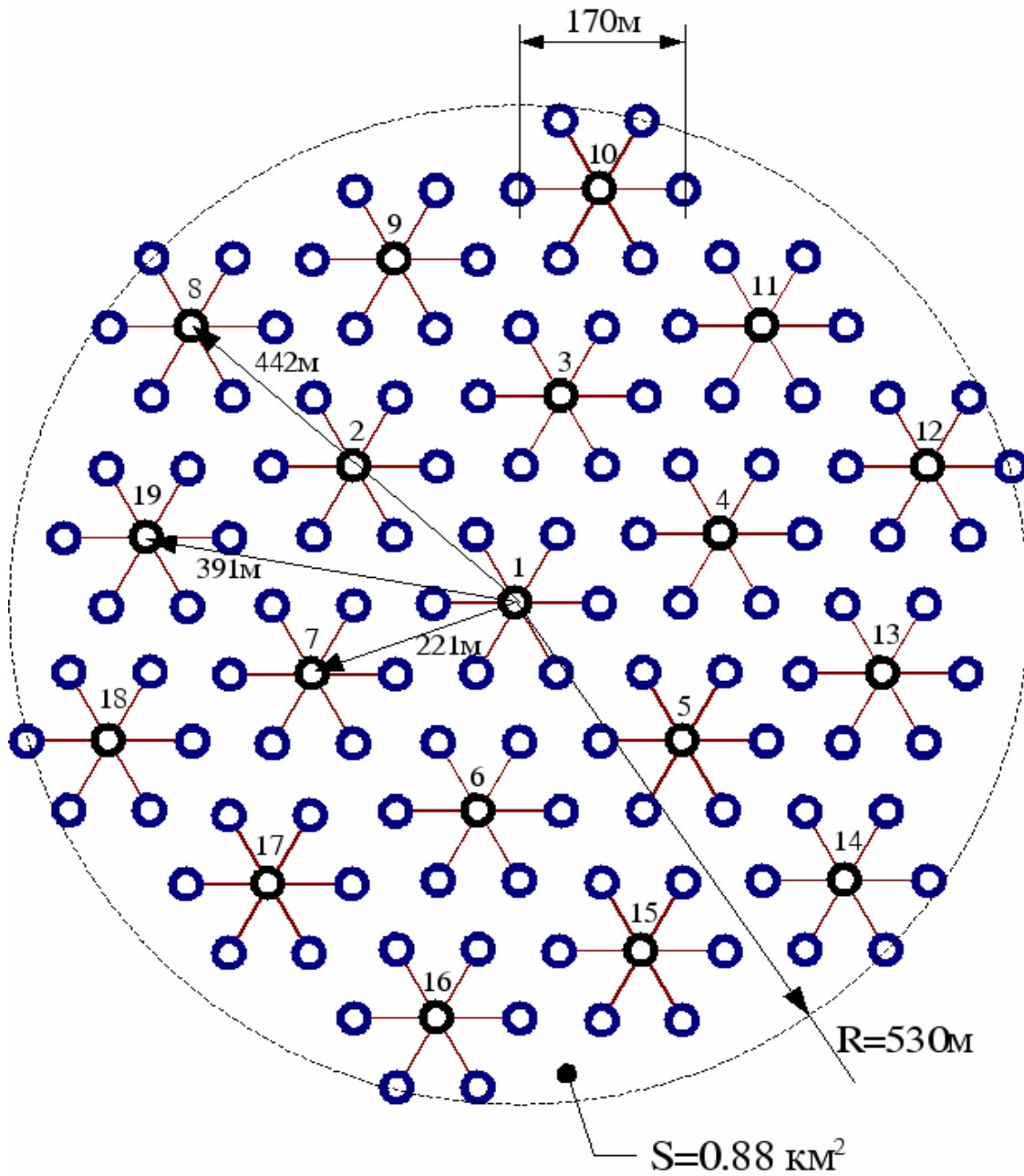
1. ADC AD9430, 12 bit, 200 MHz
2. FPGA XILINX Spartan-3



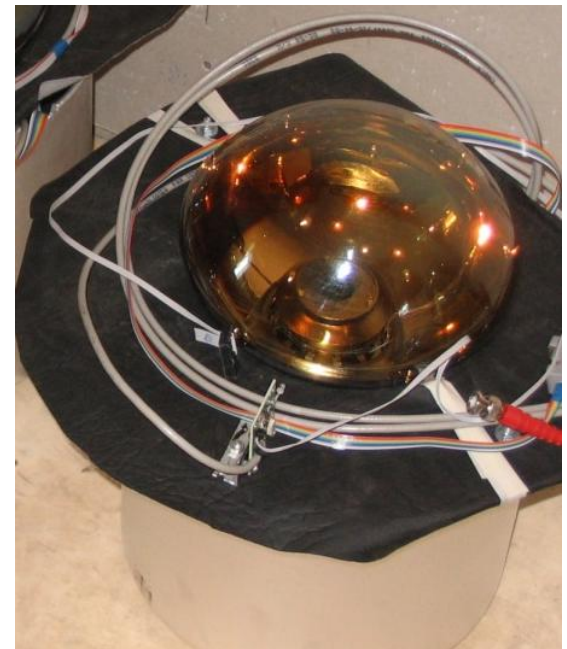
4 channel FADC

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

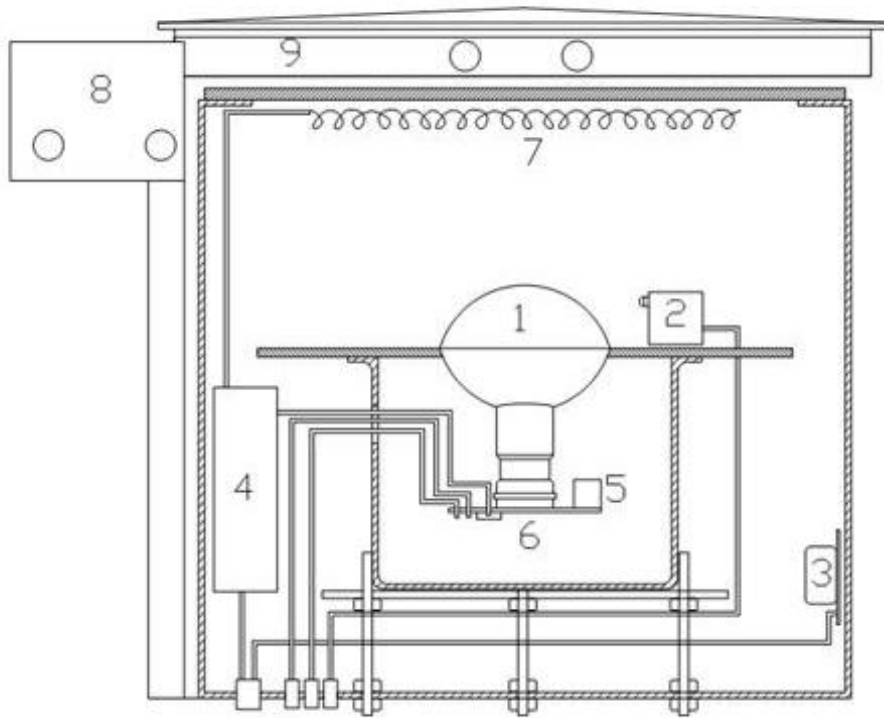




19 кластеров, 7 оптических пунктов в кластере



Фотодетектор ЕМІ9350 (8")

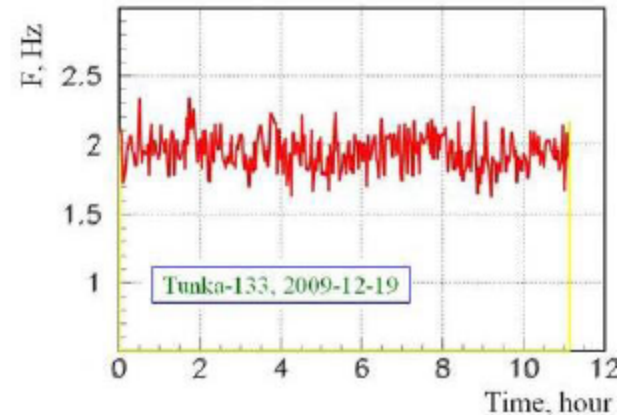




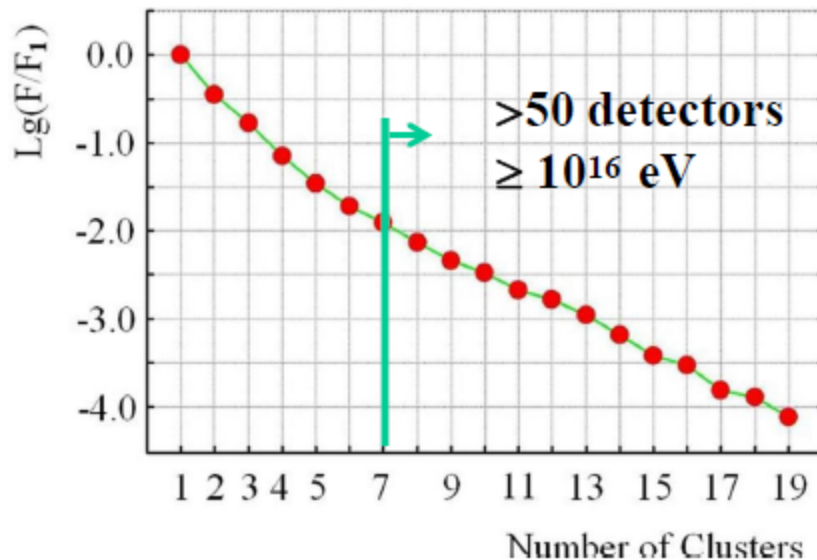


Two seasons of array operation

2009 - 2010 : 286 hours of good weather .
2010 - 2011: 270 hours of good weather.
> $4 \cdot 10^6$ events with energy $\geq 10^{15}$ eV.



Trigger counting rate during one night .

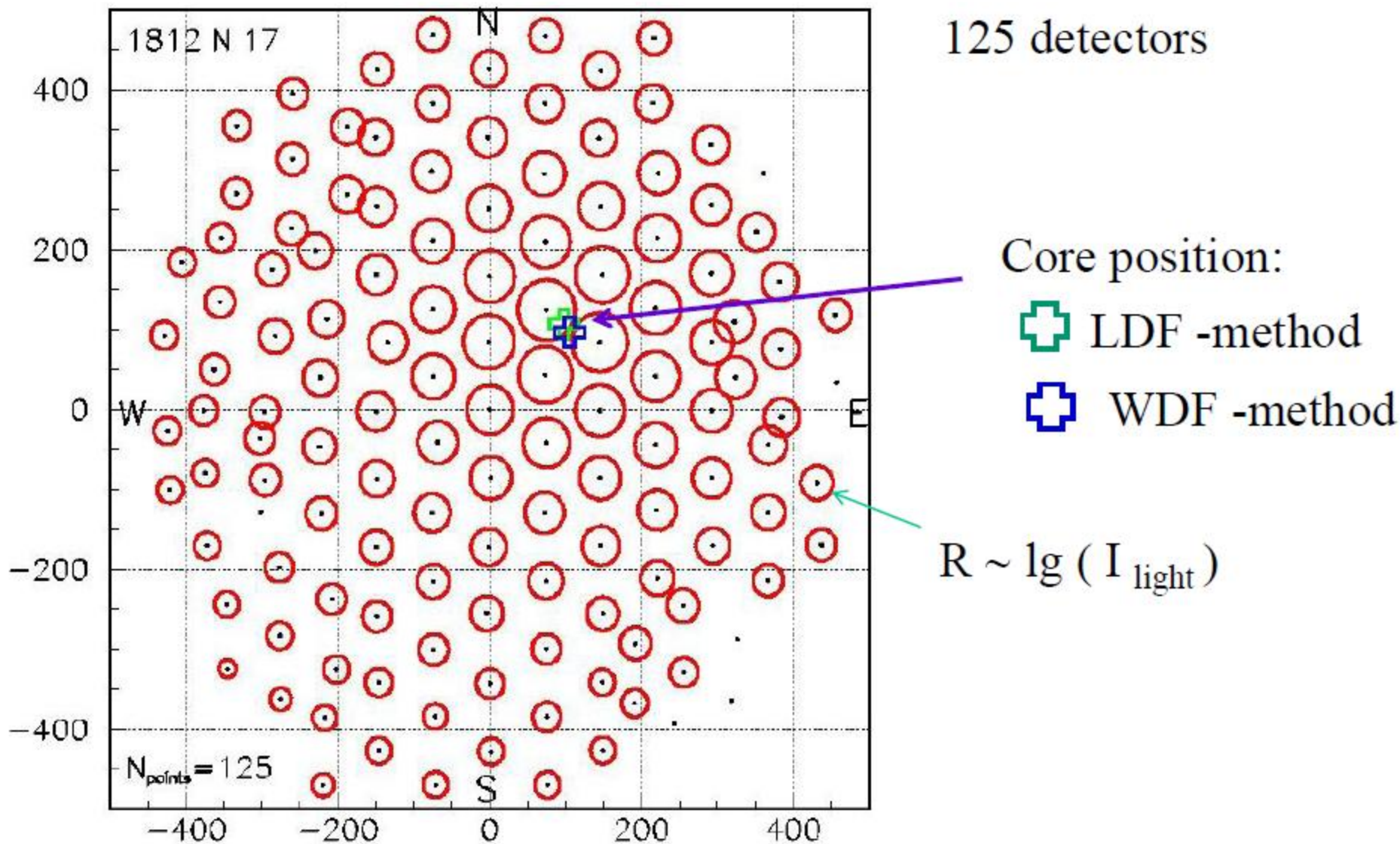


>10 events during every night with number of hitted detectors more than 100.

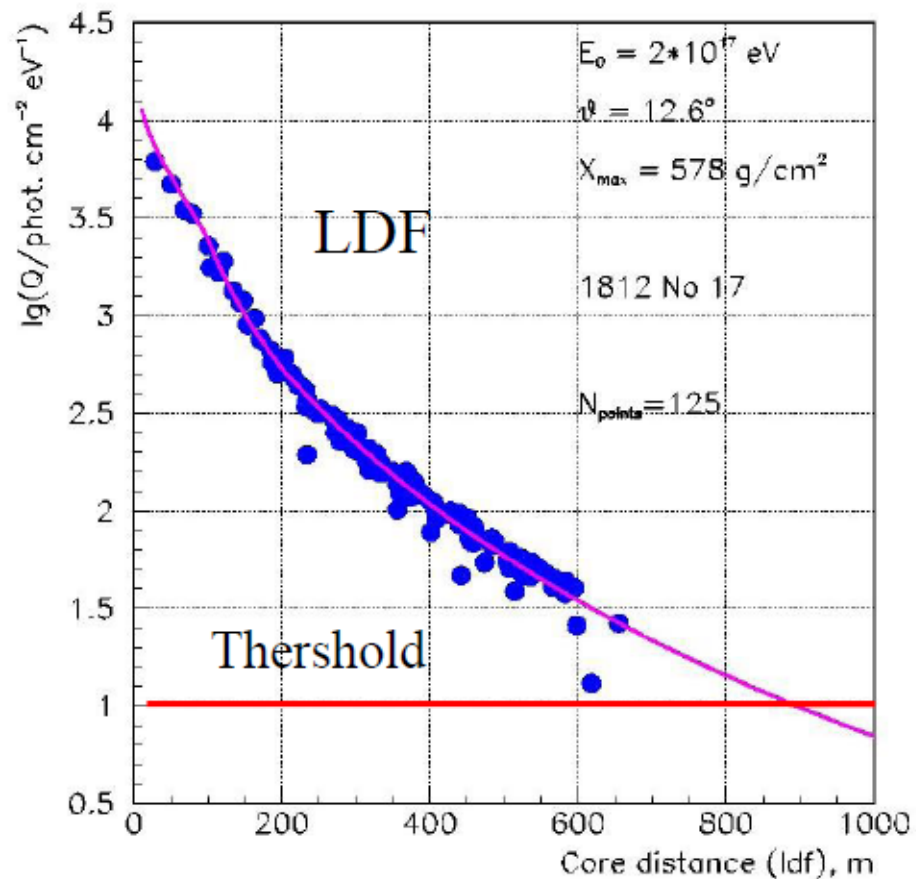
Distribution of the number of hitted clusters in one event.

Example of event

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

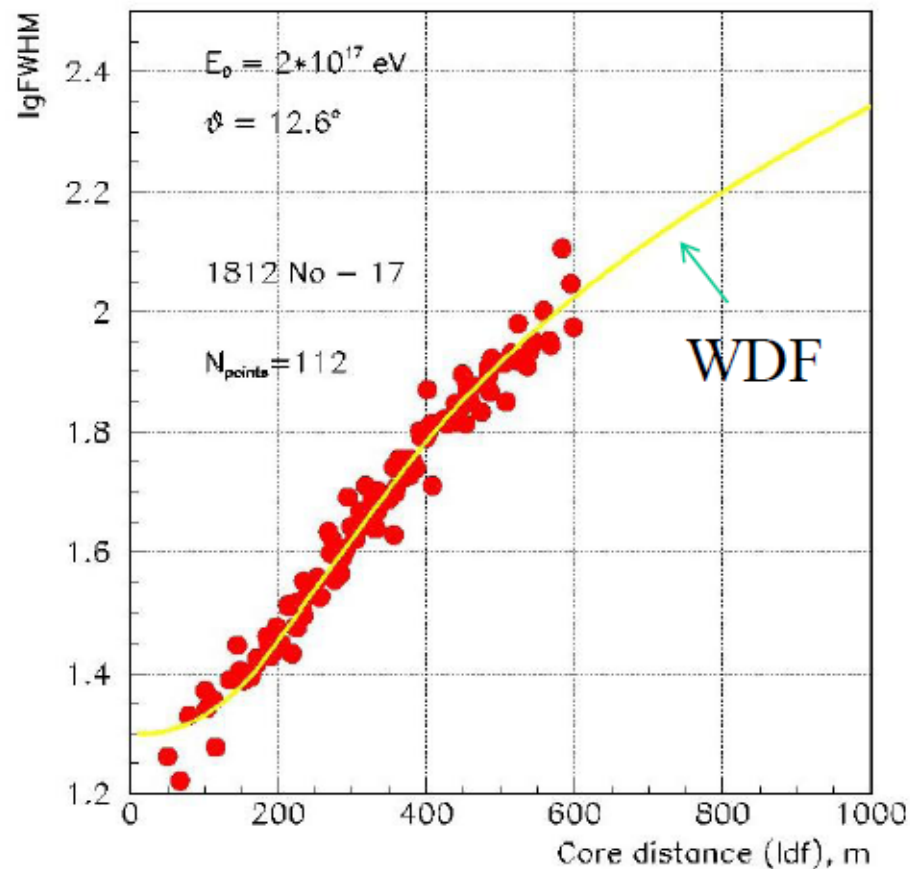


$\text{Lg } Q_{\text{exp}} (R)$



A

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



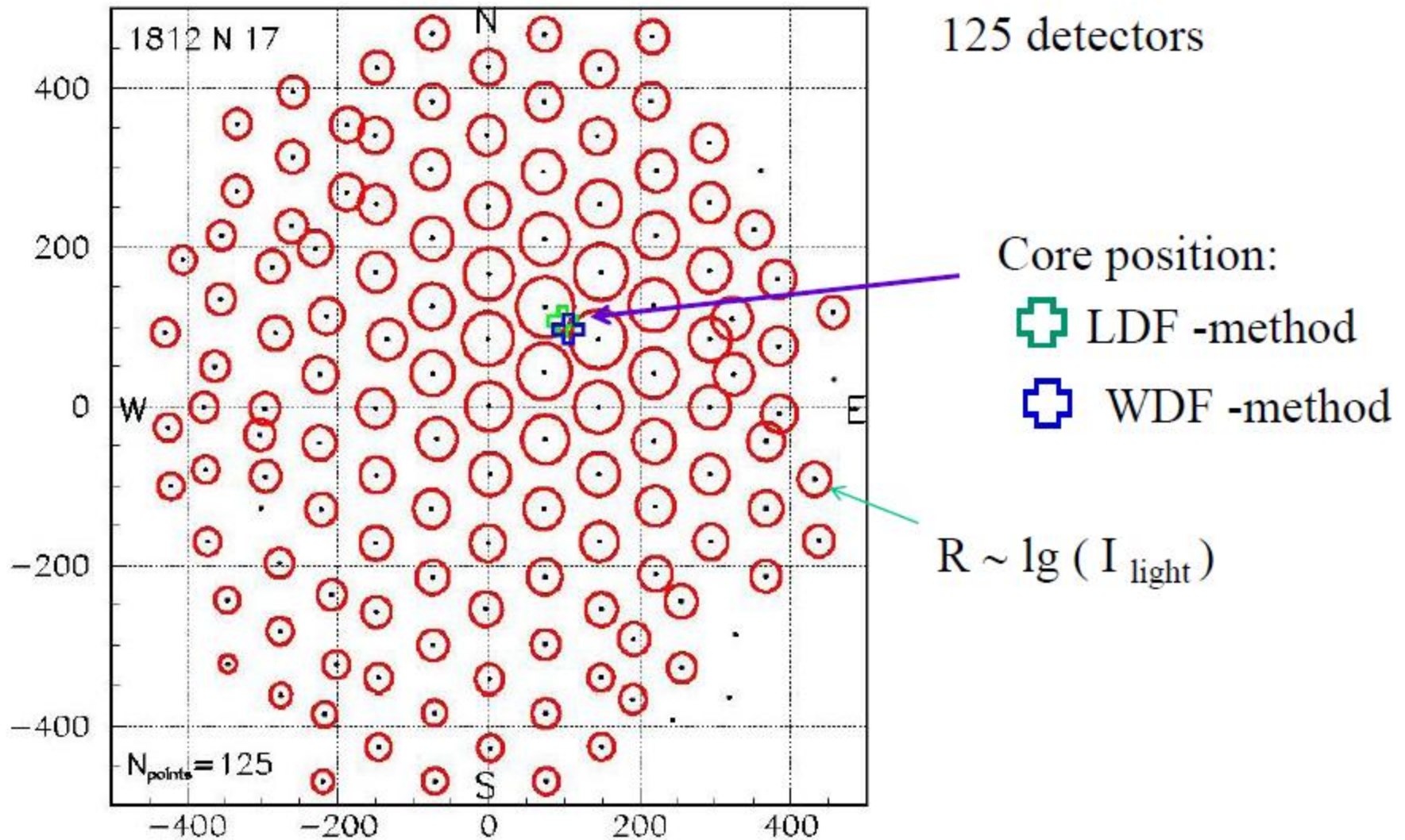
B

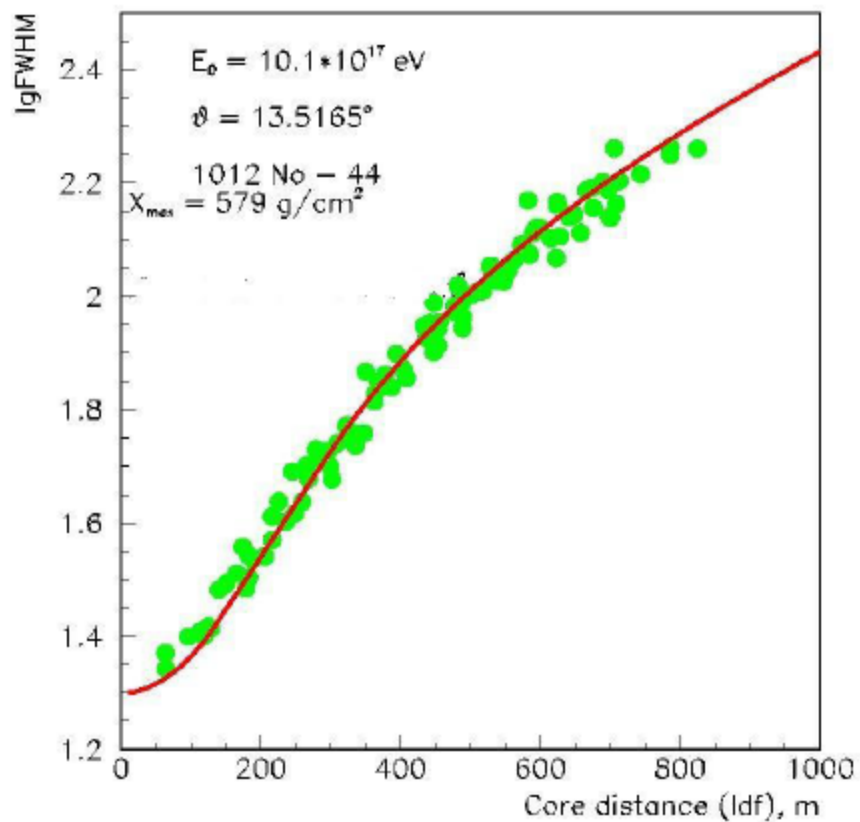
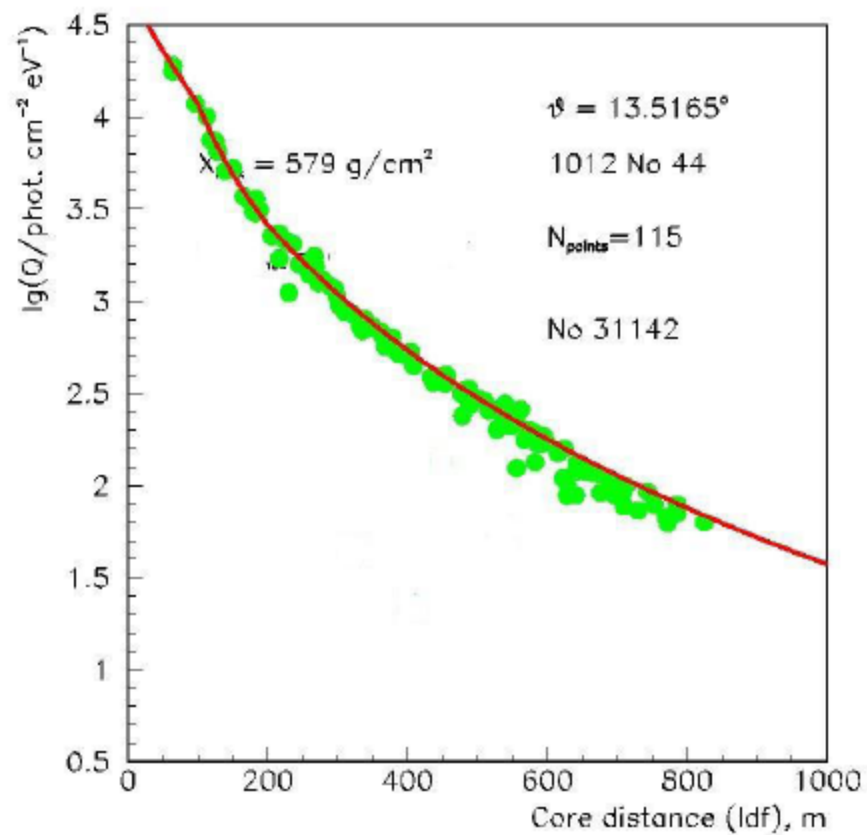
.A– Fitting experimental points with LDF

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

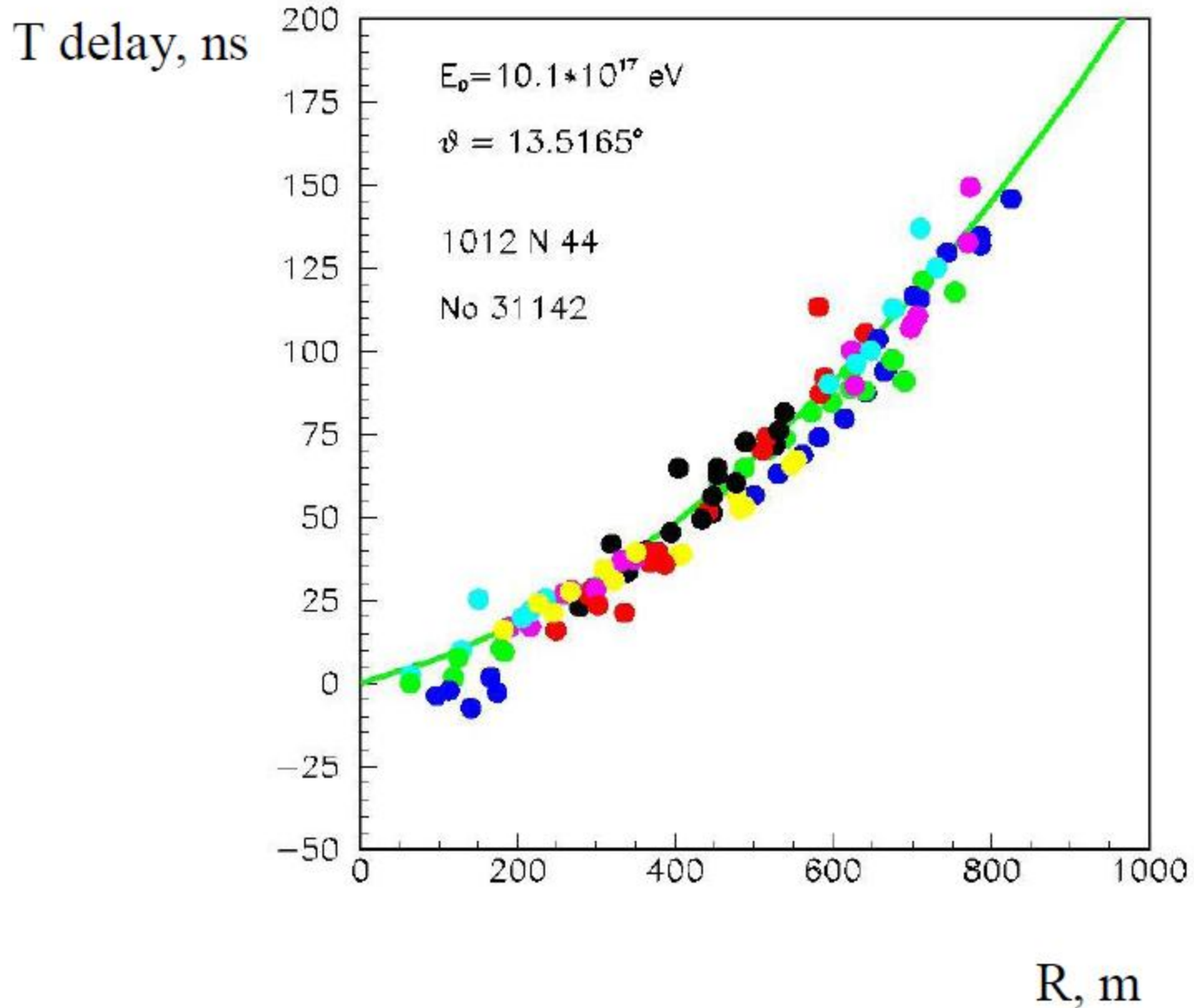
Example of event

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

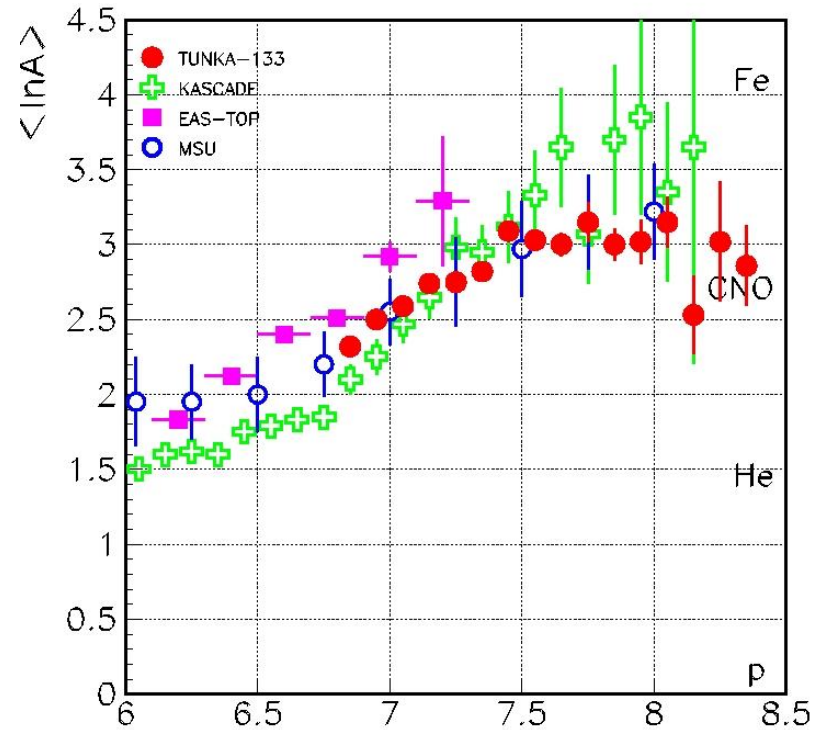
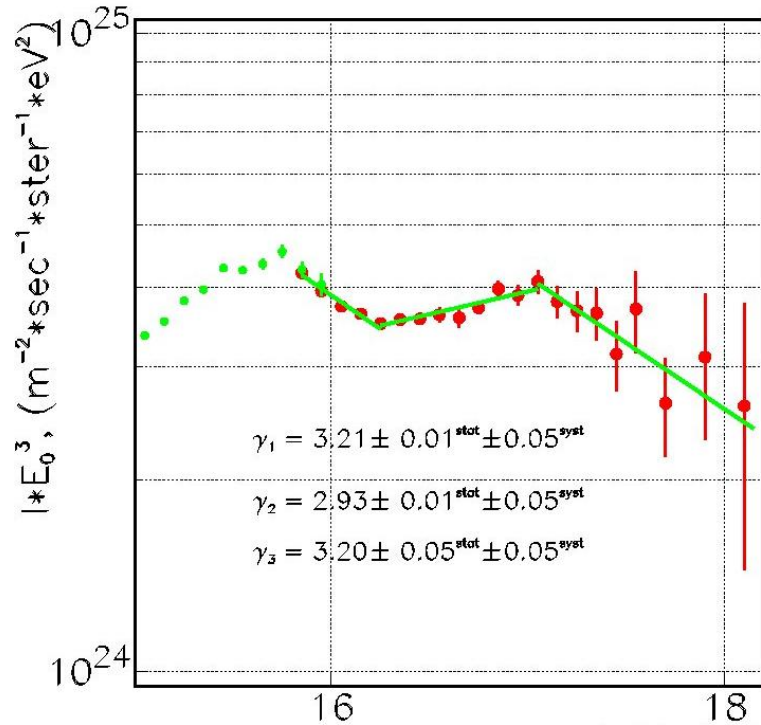




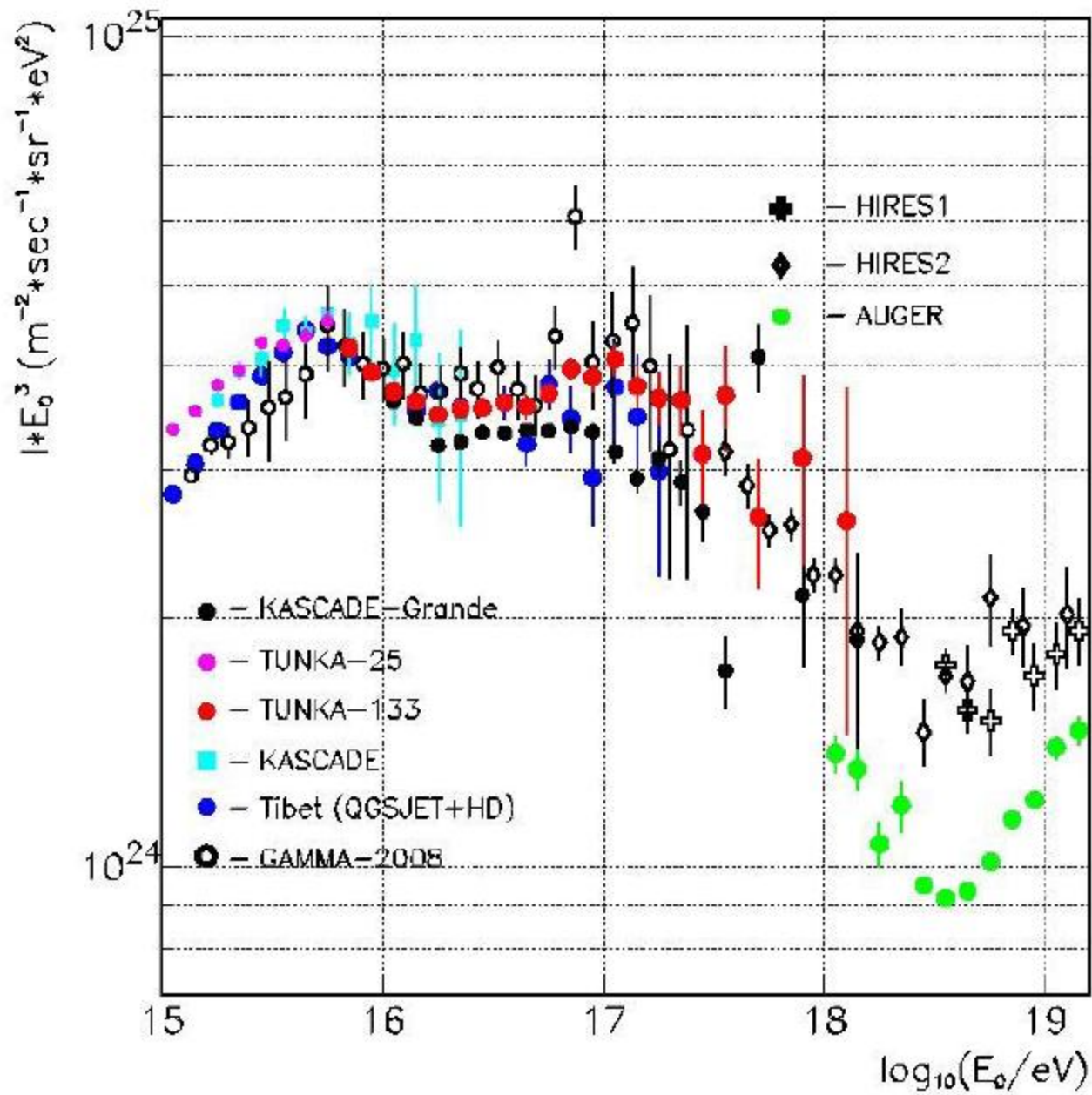
Shower front



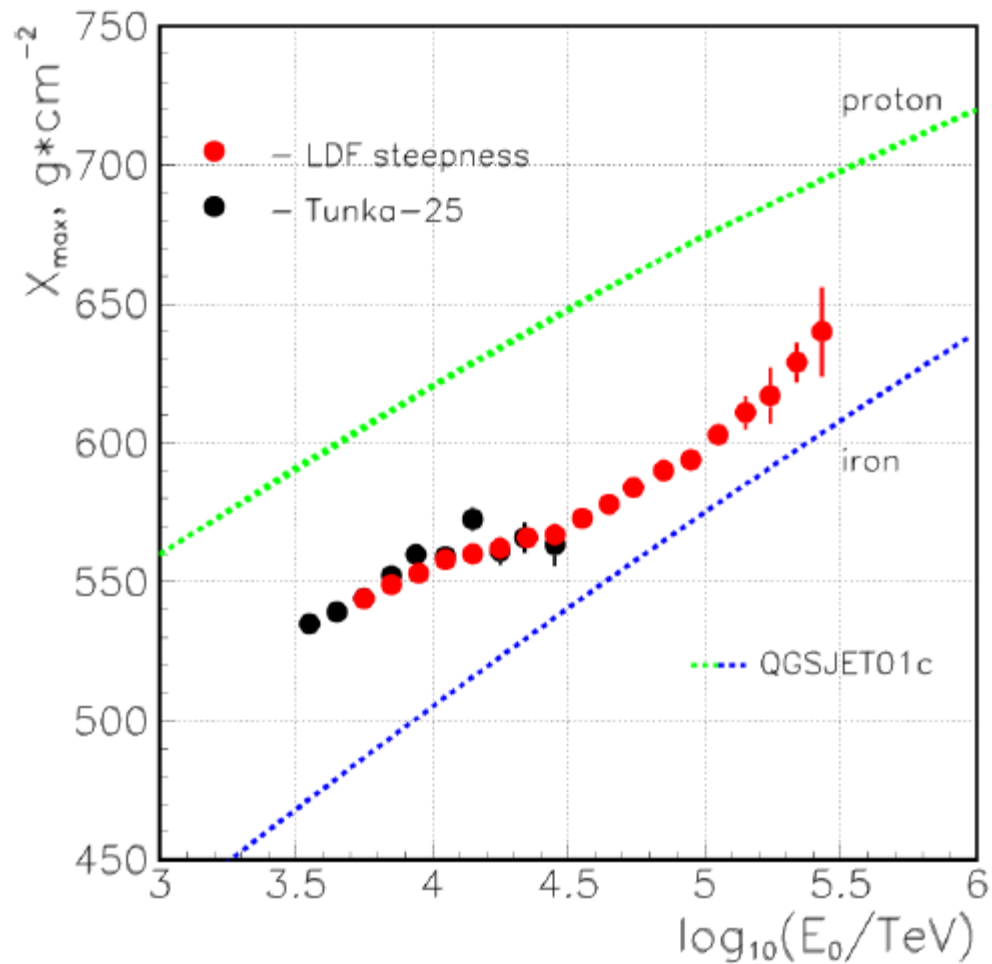
Первые результаты Тунка-133



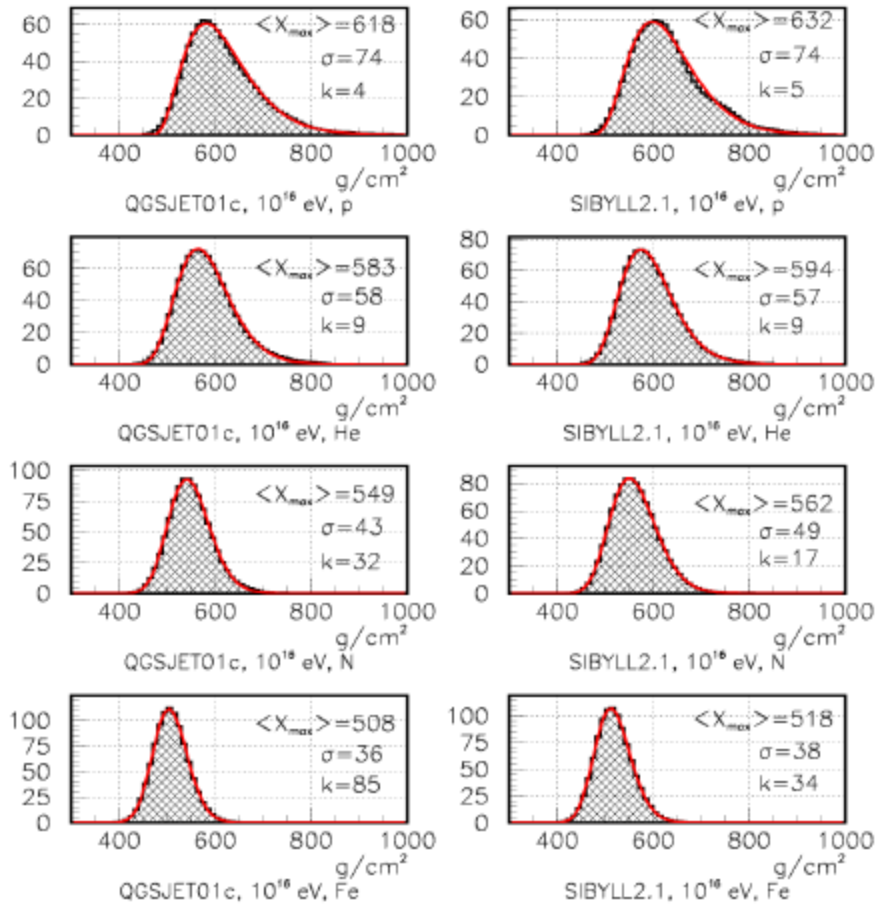
Необходимо расширить установку для улучшения статистики событий с $E \geq 10^{18} \text{эВ}$

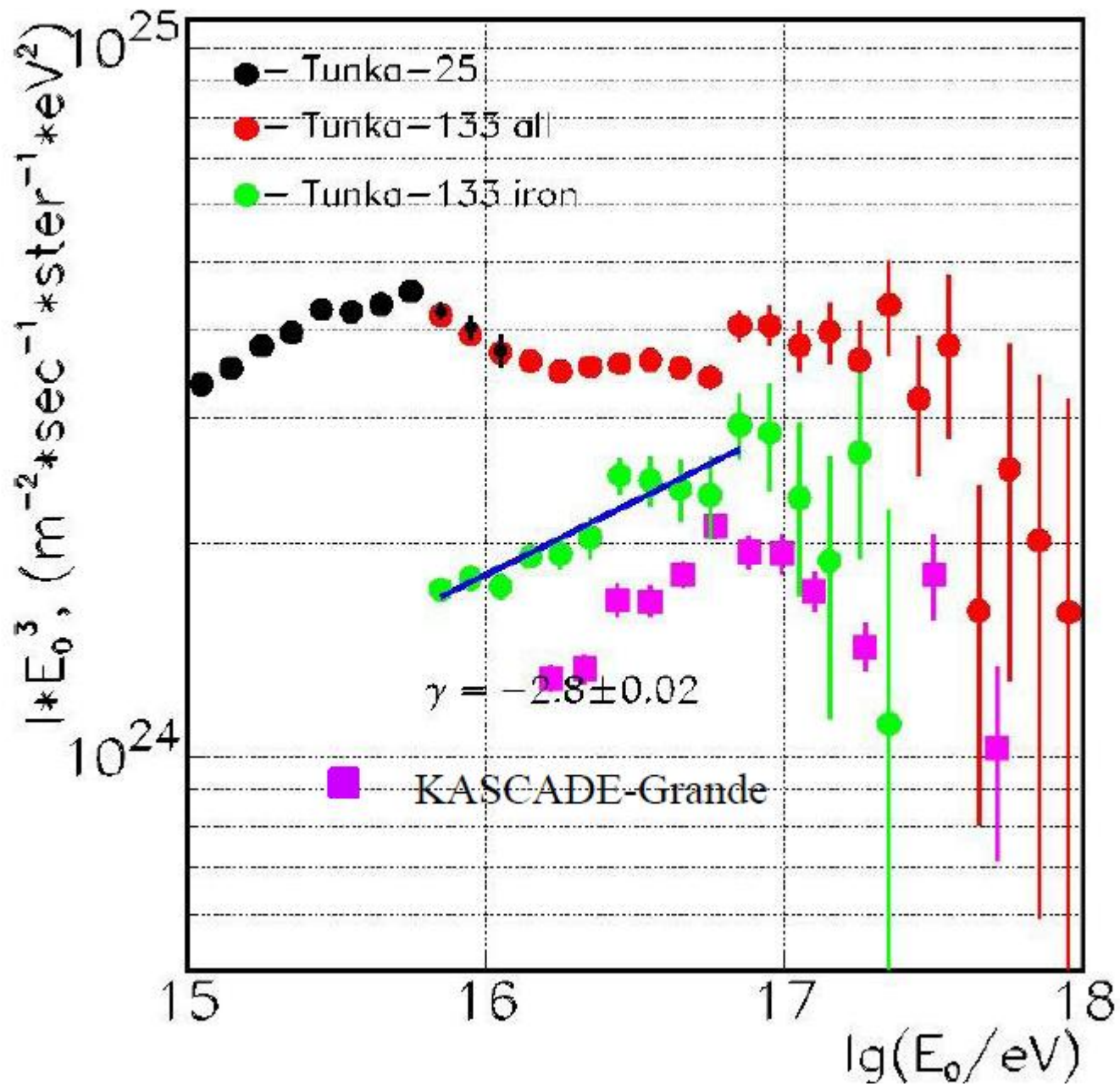


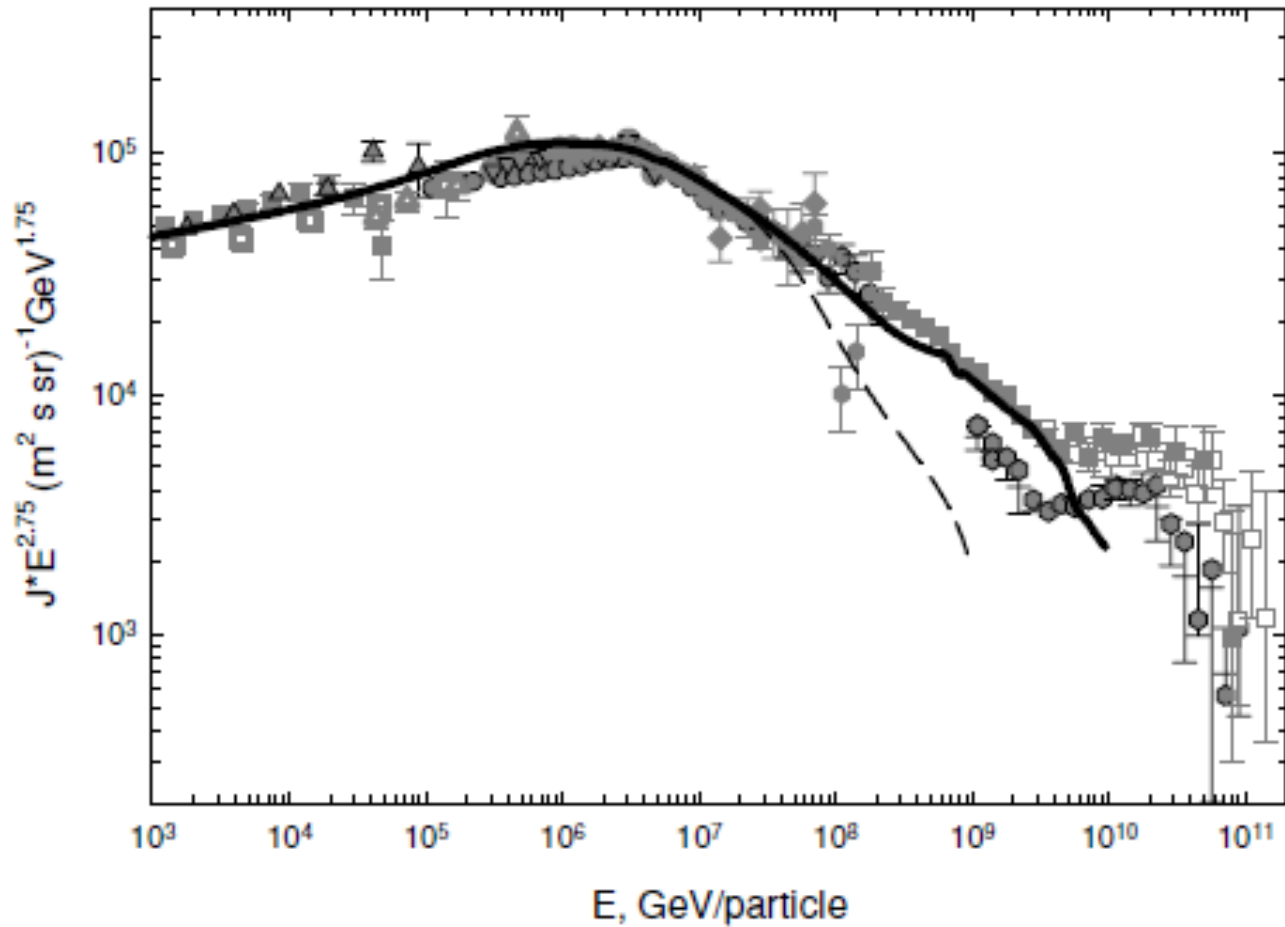
$\langle X_{\max} \rangle$



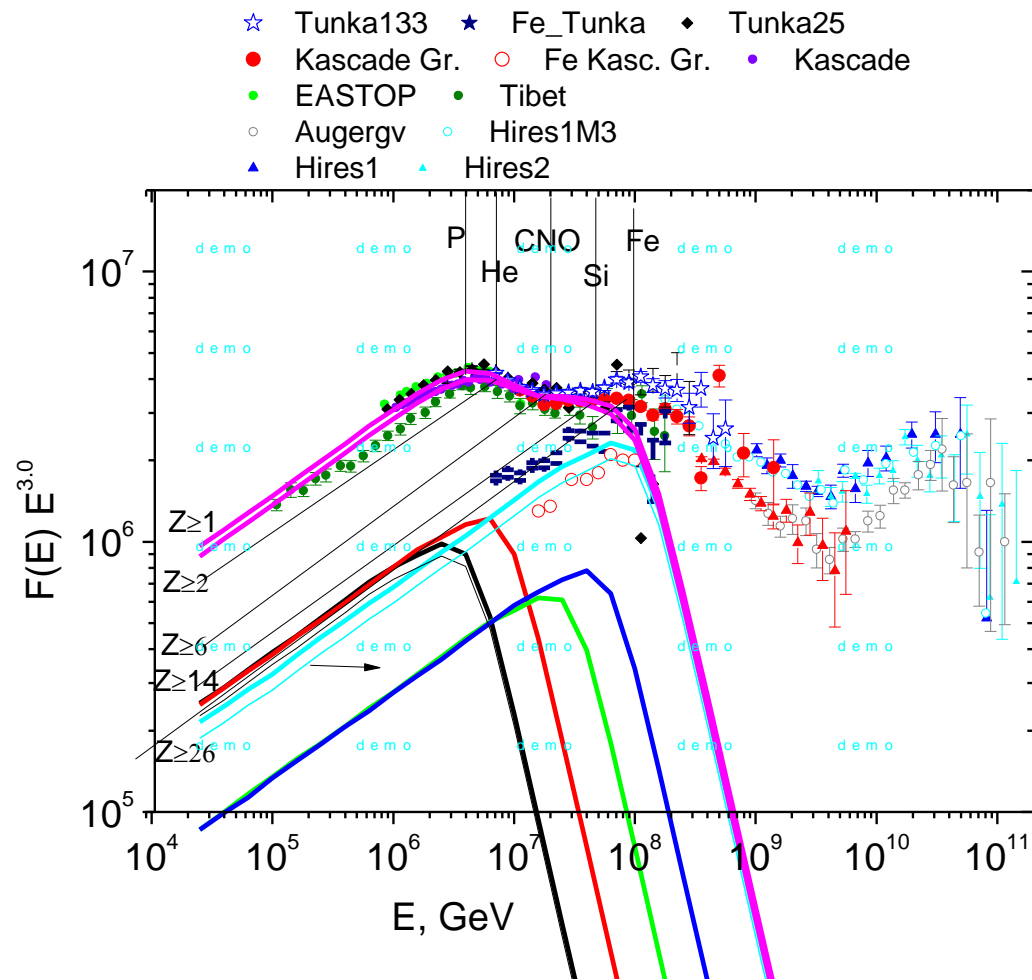
X_{\max} distributions (simulation + apparatus errors)







Энергетические спектры всех частиц и теоретические кривые с суммарным вкладом многих типов сверхновых (Птускин и др.)



Спектр всех частиц, полученные в экспериментах TUNKA -25, 133 и KASCADE и KASCADE GRANDE, Тибет, EAS TOP, Auger, Hires, и отдельно спектр ядер железа, полученный в экспериментах TUNKA -133 и KASCADE GRANDE. Линии – модель источников КЛ, в которых Сверхновые Ia являются абсолютно доминирующими источниками космических лучей в области 10^{15} - 10^{18} эВ с химическим составом ускоренных КЛ лучей (28% Pr, 28 % He, 10 % CNO, 10% Si, (20-25) % Fe при 1 ПэВ).

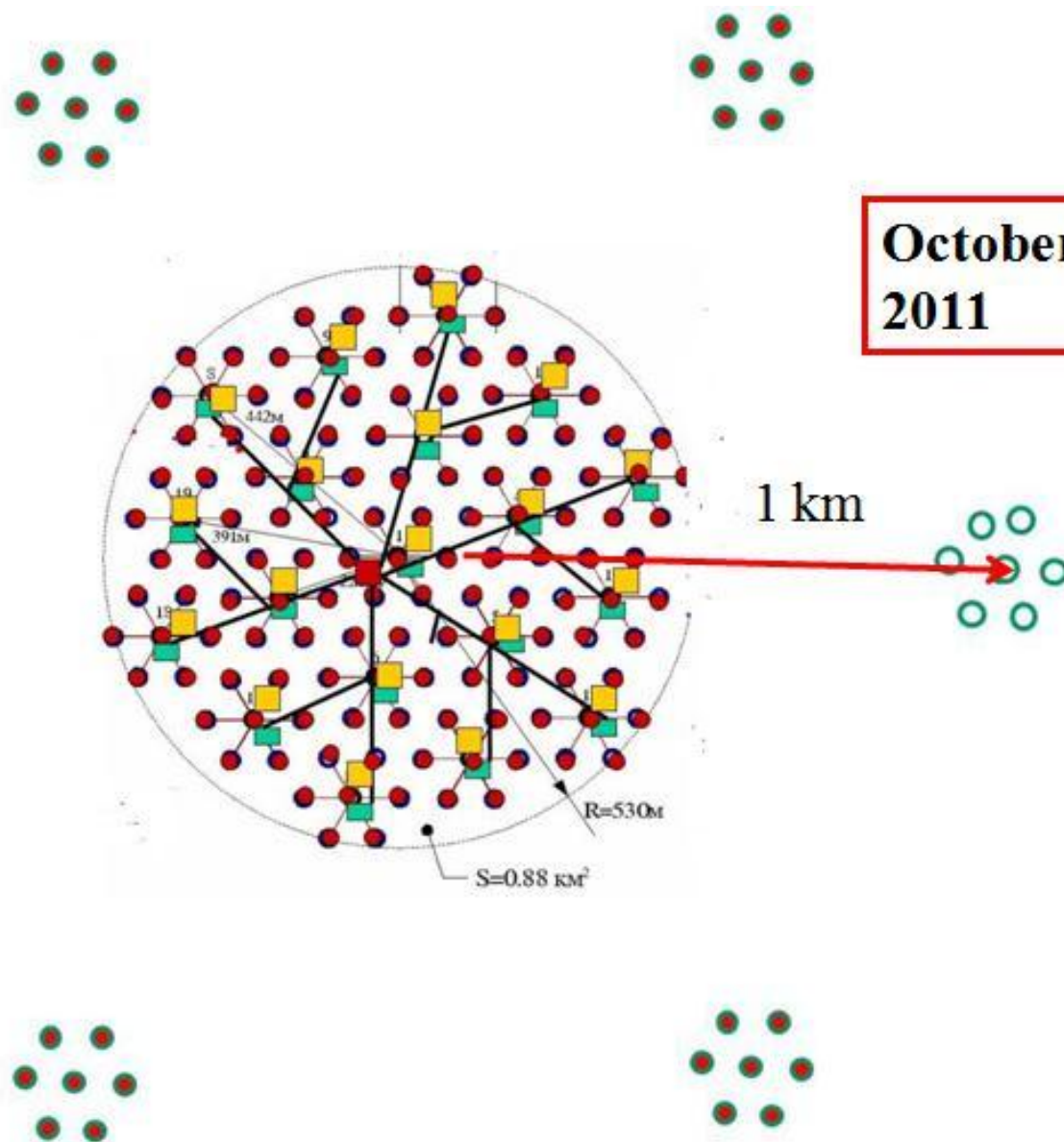
Расширение Тунка-133

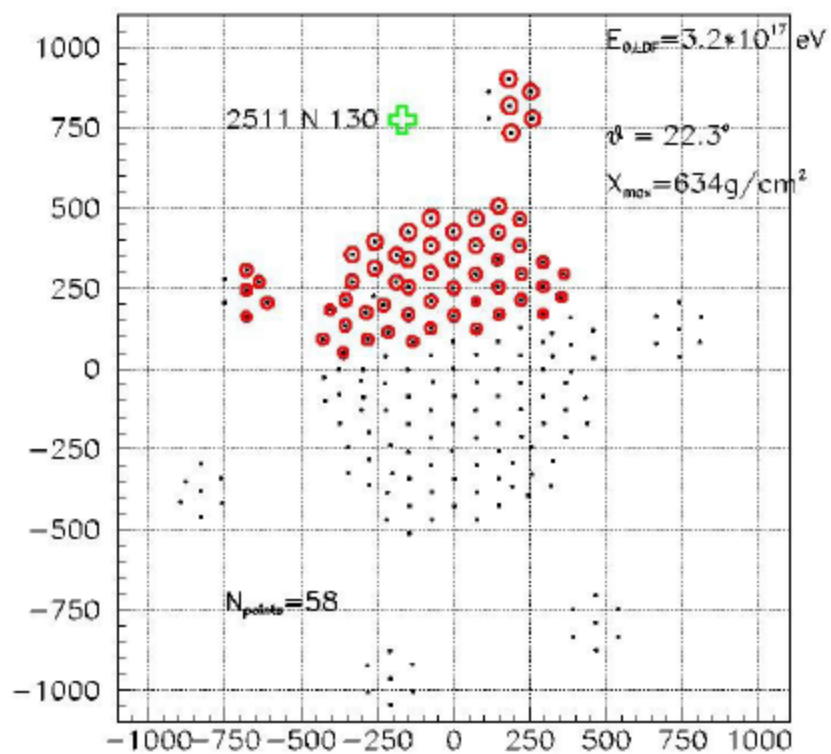
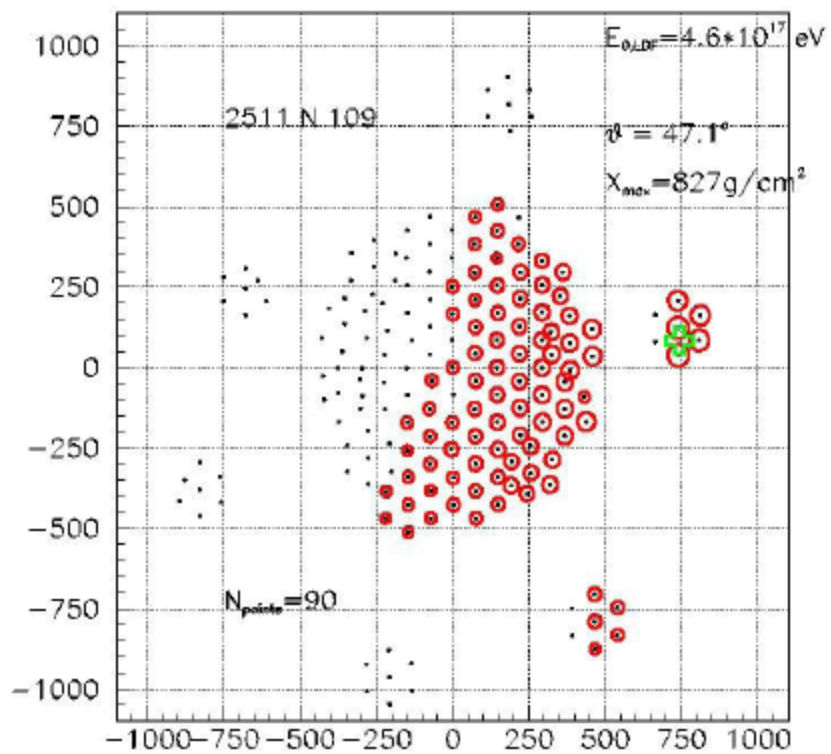
**6 additional
clusters
(42 detectors)**



**Increasing
Effective
Area in
4 times
for energy
more than
 $6 \cdot 10^{16}$ eV**

**October
2011**

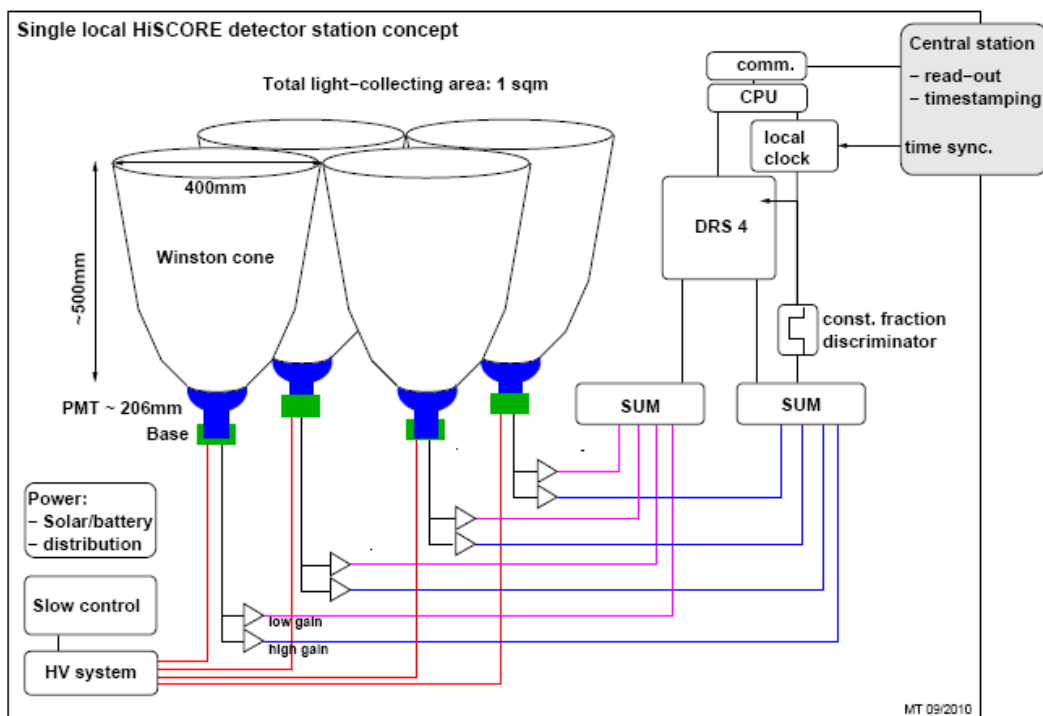




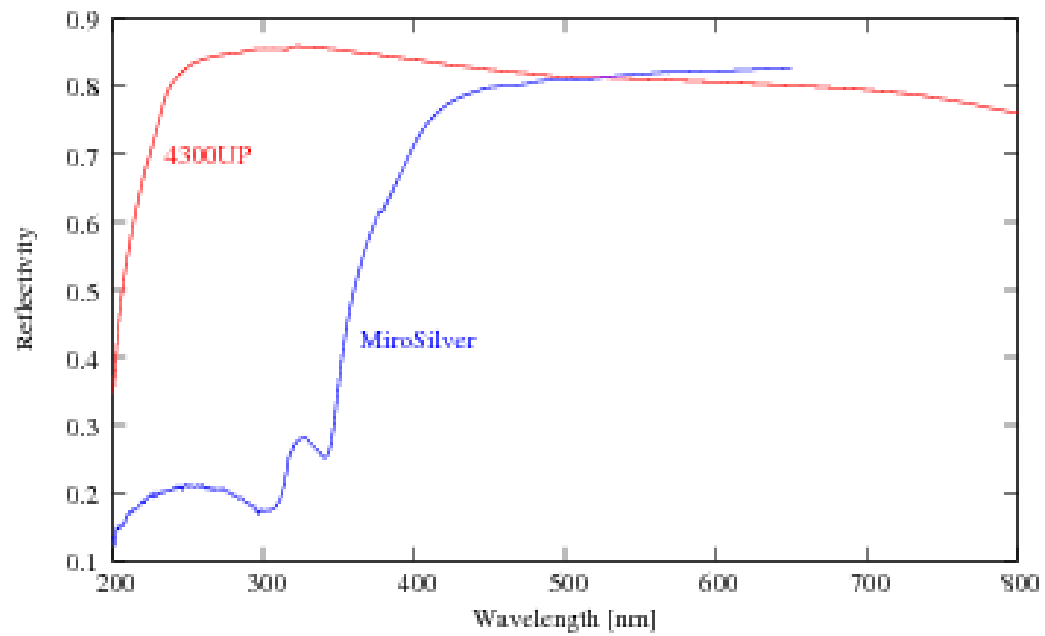
Тунка-HiSCORE

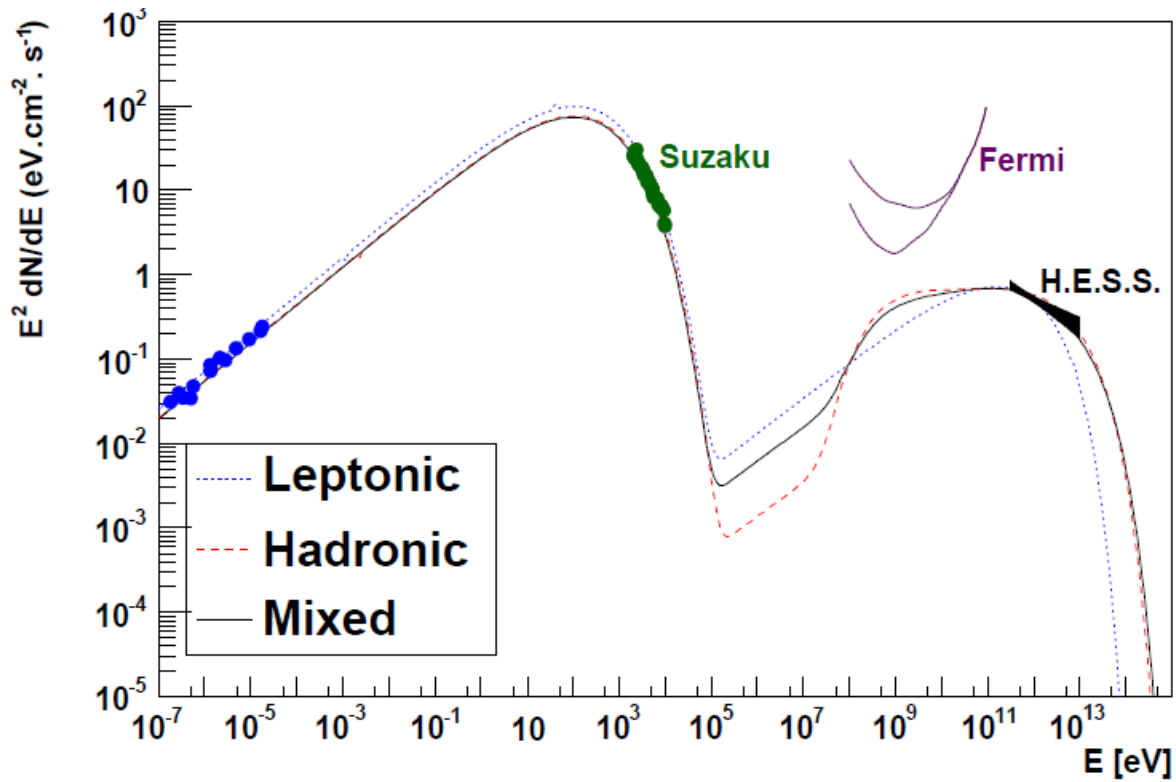
Проект HiSCORE – проект широкоугольного гамма-телескопа площадью 100 km^2 и порогом 20 ТэВ (M. Tluczykont et al, ArXiv: 0909.0445)

Прототип HiSCORE ($S \sim 2.5 \text{ км}^2$) в Тунке - 1600 ФЭУ



Грант фонда им.Гельмгольца: совместный проект DESY-ИЯИ РАН
(Рубцов Г.И. ТО ИЯИ РАН)

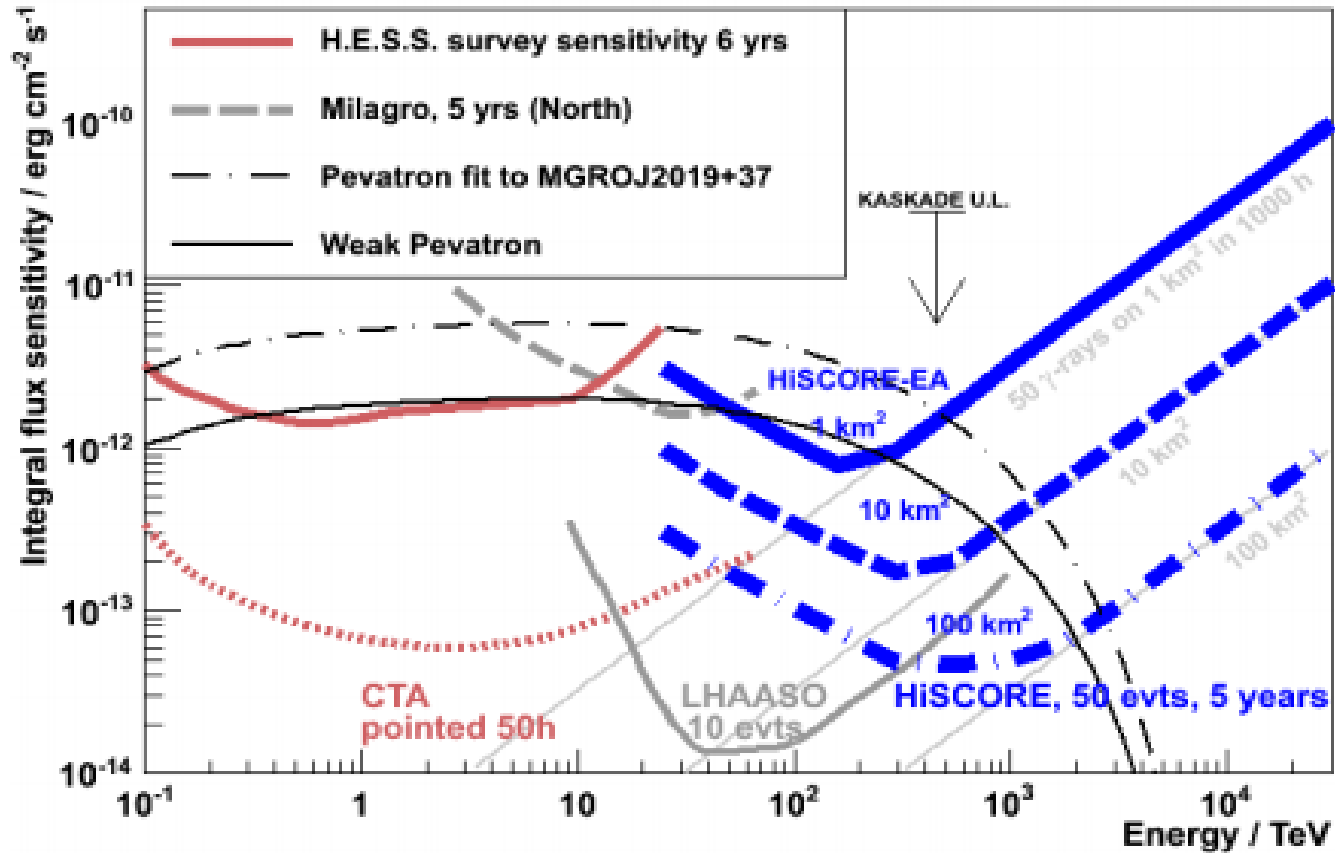




SN1006

IACTs don't give an unambiguous answer

Чувствительность Тунка-HiSCORE



Источники, которые мы как то можем видеть.

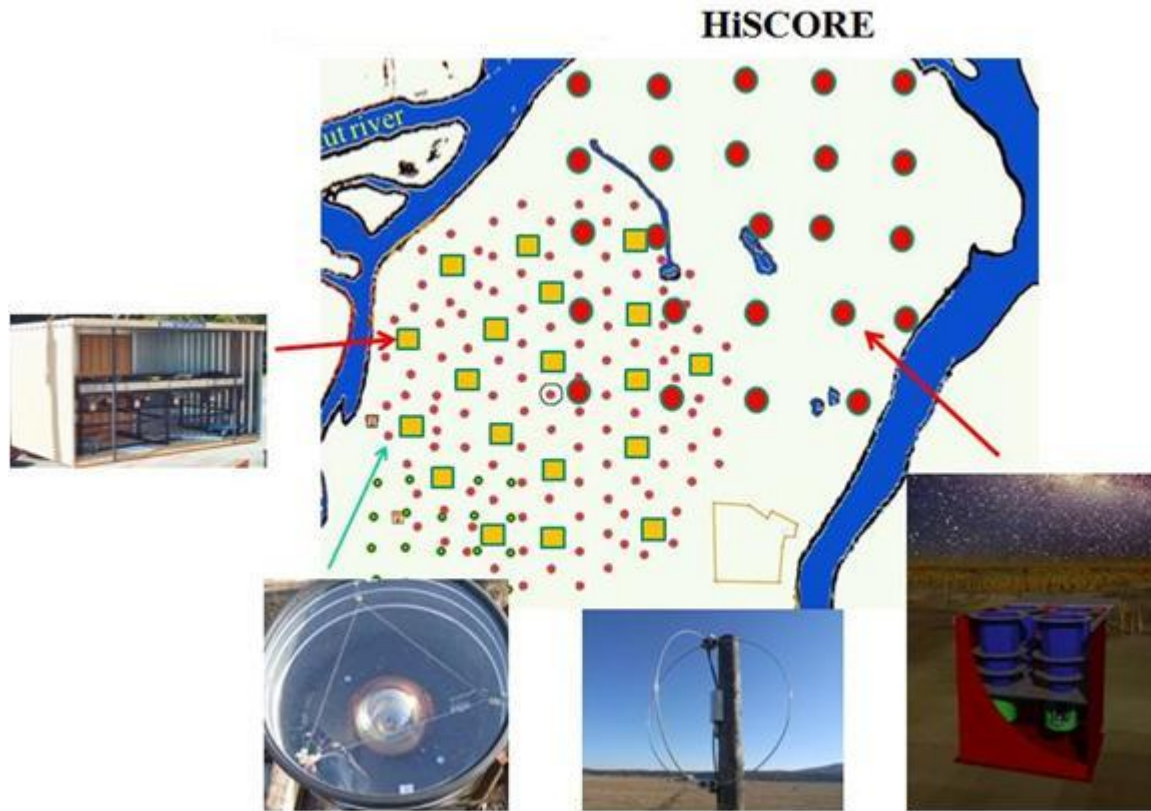
Красный цвет – есть ТэВ-ное излучение;

синий цвет -ожидаемое время наблюдения и число событий > 20 ТэВ

Name	R	lon	lat	Ra	del	Tnabl	(N>20 TeV)			
12	Cygnus		0.58	74.0	-8.5	20.8	30.7	Ver	100 h	1000 cob.
13	DR4		1.5	78.2	2.1	20.4	40.4			
14	HB21		0.8	89.0	4.7	20.8	50.7			
15	DA 530		2.0	93.3	6.9	20.9	55.4			
16	CTB104		1.5	93.7	-0.2	21.5	50.8			
17.	Boomerang			106.3	2.7	22.5	60.8		270	500 cob
18	Cas		3.4	111.7	-2.1	23.4	58.8		300	180 cob
19			0.7	114.3	0.3	23.6	61.9			
20			1.6	116.5	1.1	23.9	63.2			
21	CTB 1		1.6	116.9	0.2	24.0	62.5			
22	CTA 1		1.4	119.5	10.2	0.1	72.8	Ver 4%	300	500-800
23	Tycho		2.2	120.1	1.4	0.4	64.1	Ver	360	120-180 cob.
24	R5		1.20	127.1	0.5	1.5	63.1			
25	3C58		2.6	130.7	3.1	2.1	64.8			
26	HB3		2.2	132.7	1.3	2.3	62.5			
27	HB9		0.8	160.9	2.6	5.0	46.2			
28	S147		0.8	180.0	-1.7	5.7	28.0			
29	Crab		2.0	184.6	-5.8	5.6	22.0	Ver	100 h	5000 cob.
30	IC443		1.5	189.1	3.0	6.3	22.5	Mil		

$$S = 2.5 \text{ km}^2$$

Расширение установки 2013

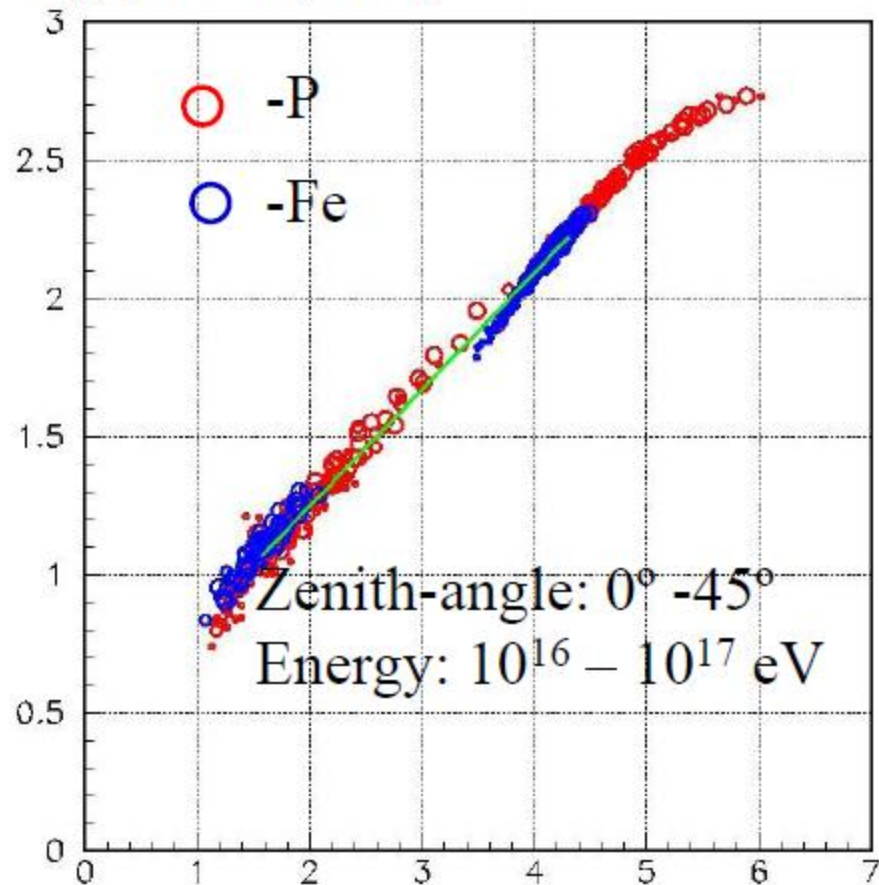


20 щ. детекторов, 10 м^2 каждый -
проведение абсолютной энергетической калибровки, как в эксперименте
QUEST (*Кузьмичев, Коростелева, Лубсандоржиев, Просин 1998-2001.*)

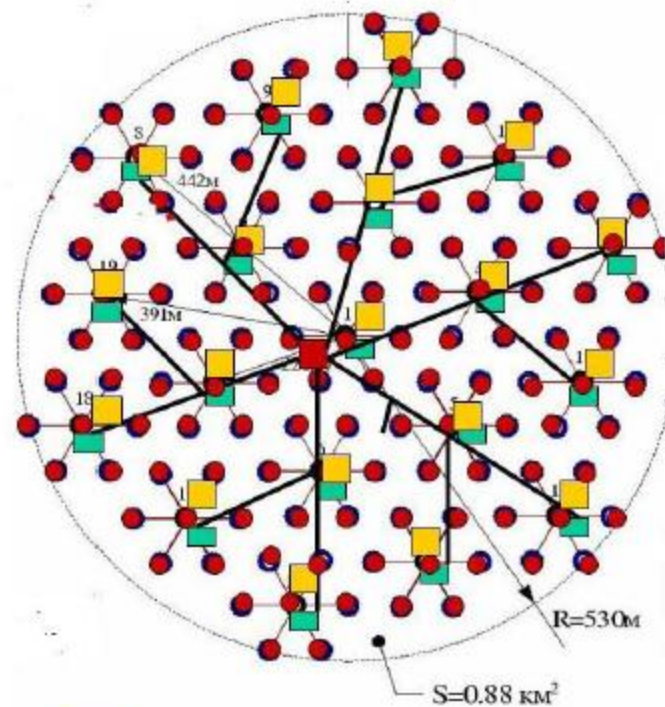
Радиоантенны +2; HiSCORE – 1-2 станции?

Absolute energy calibration experiment. Repeating the “QUEST” at 10^{16} - 10^{17} eV

Lg (Ne / E, Tev)



P – steepness of LDF



■ -20 scintillation counters, 10 m^2

2000 events with $E > 3 \cdot 10^{16}$ eV
per season

Cross calibration of Cherenkov light and fluorescent light methods.

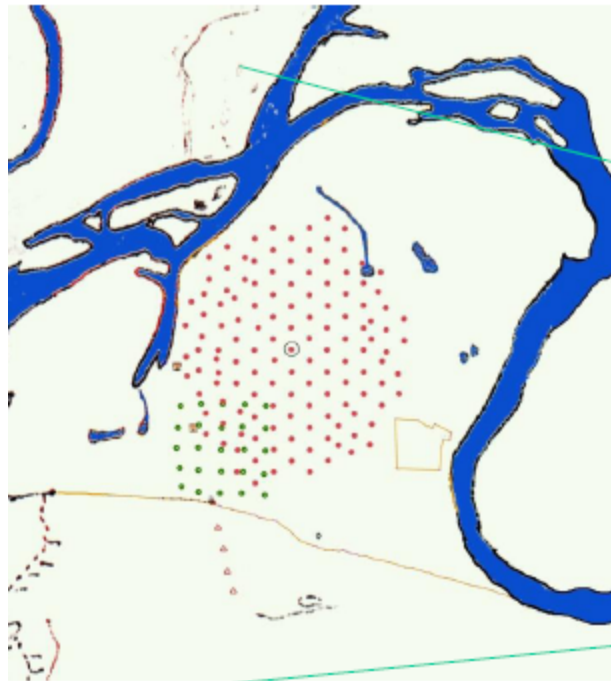


Image detector
from TUS
experiment



Участие ИЯИ РАН в работах по расширению Тунка-133:

Разработка фотоумножителей совместно с МЭЛЗ +Hamamatsu+ ET;
(Тунка-133; Тунка-HiSCORE)

Тестирование и отбор фотоумножителей
(Тунка-133; Тунка-HiSCORE)

Разработка калибровочной системы
(Тунка-133; Тунка-HiSCORE)

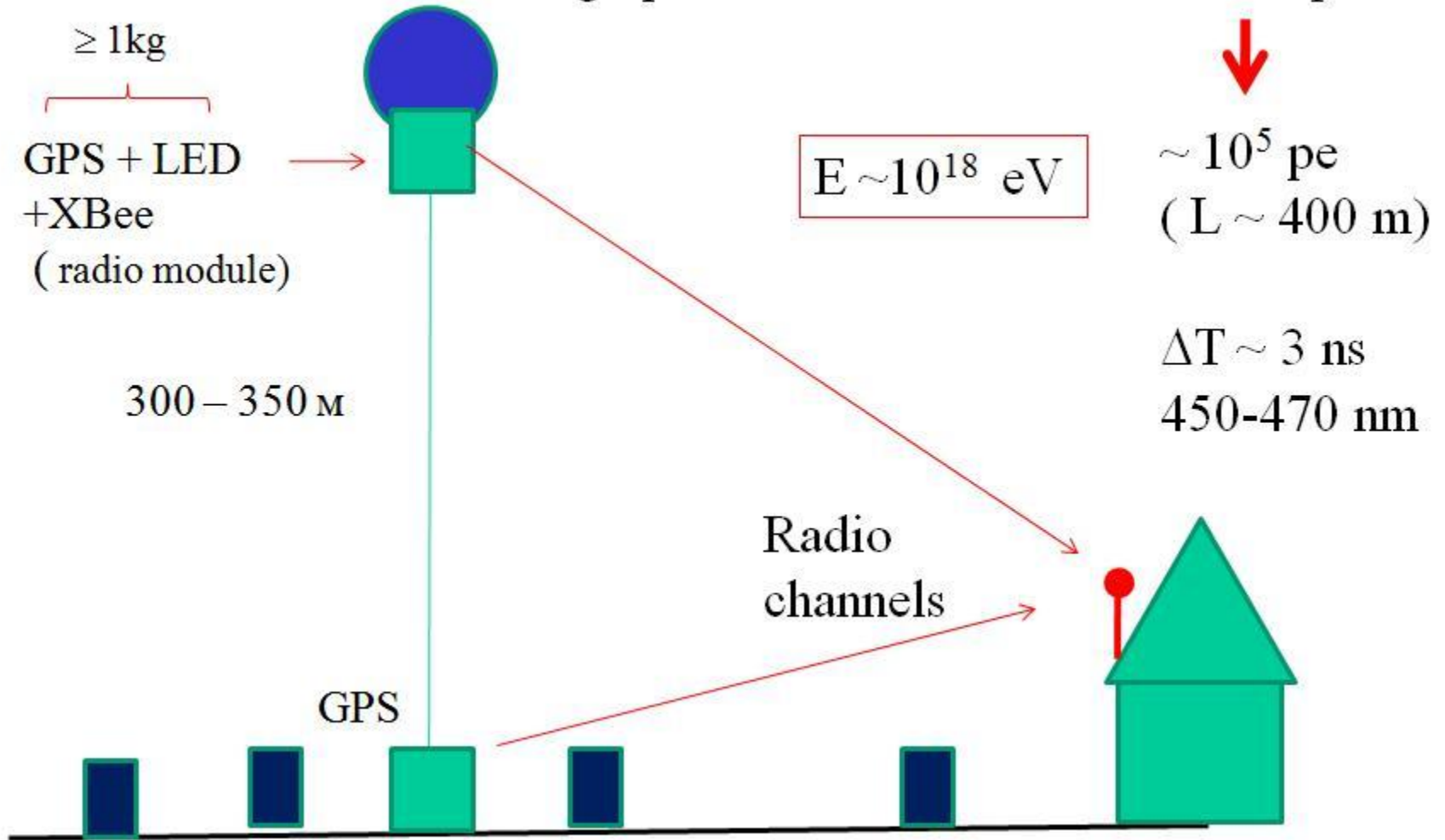
Разработка тонкопленочных шифтеров для повышения чувствительности
фотодетекторов к черенковскому свету – понижение порога регистрации ШАЛ
(Тунка-HiSCORE)

Разработка сцинтилляционных детекторов для мюонного детектора
(Тунка-133; Тунка-HiSCORE)

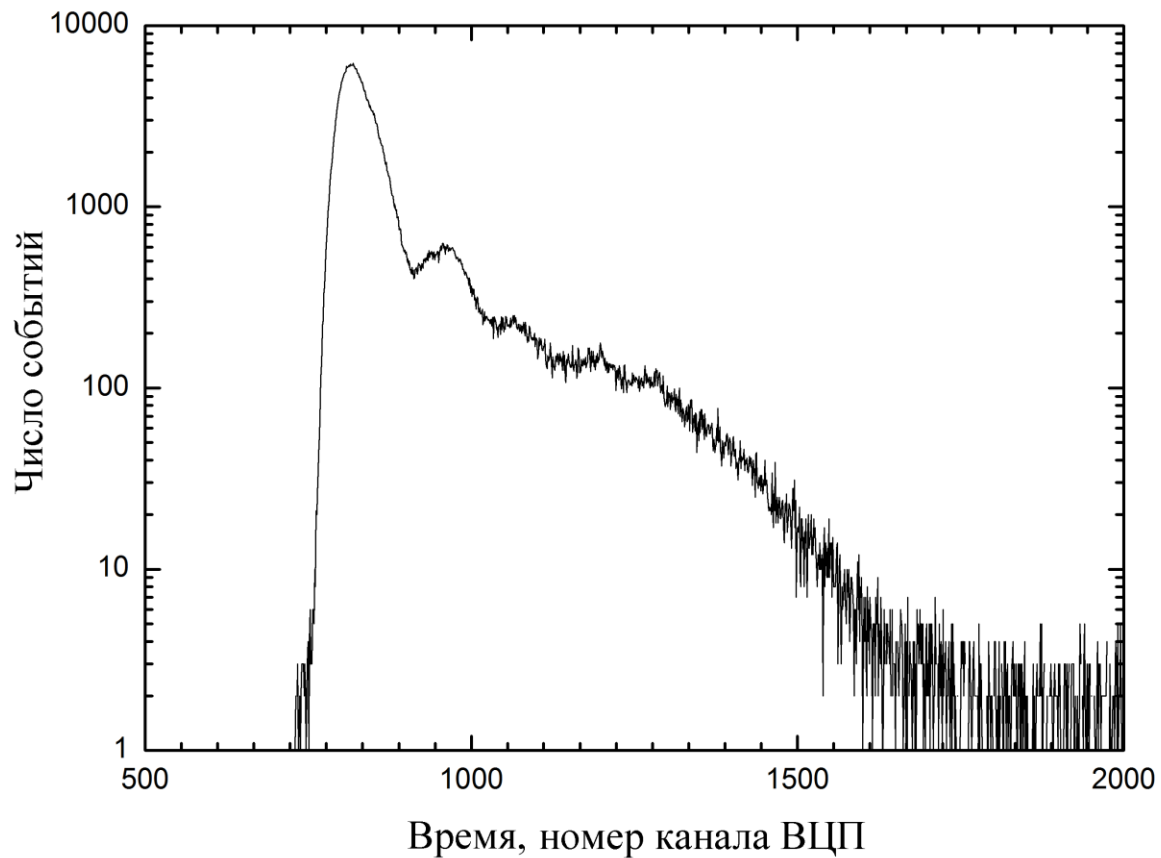
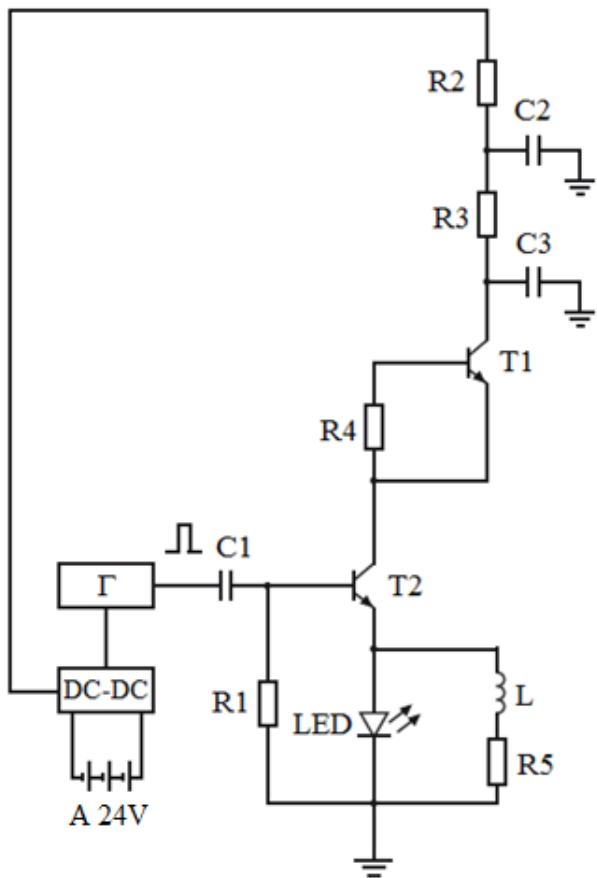
Разработка методов увеличения динамического диапазона измерения амплитуды
событий

Tunka-133 calibration system

High power LED source with $\sim 10^{12}$ photons



Лубсандоржиев, Шайбонов и др.



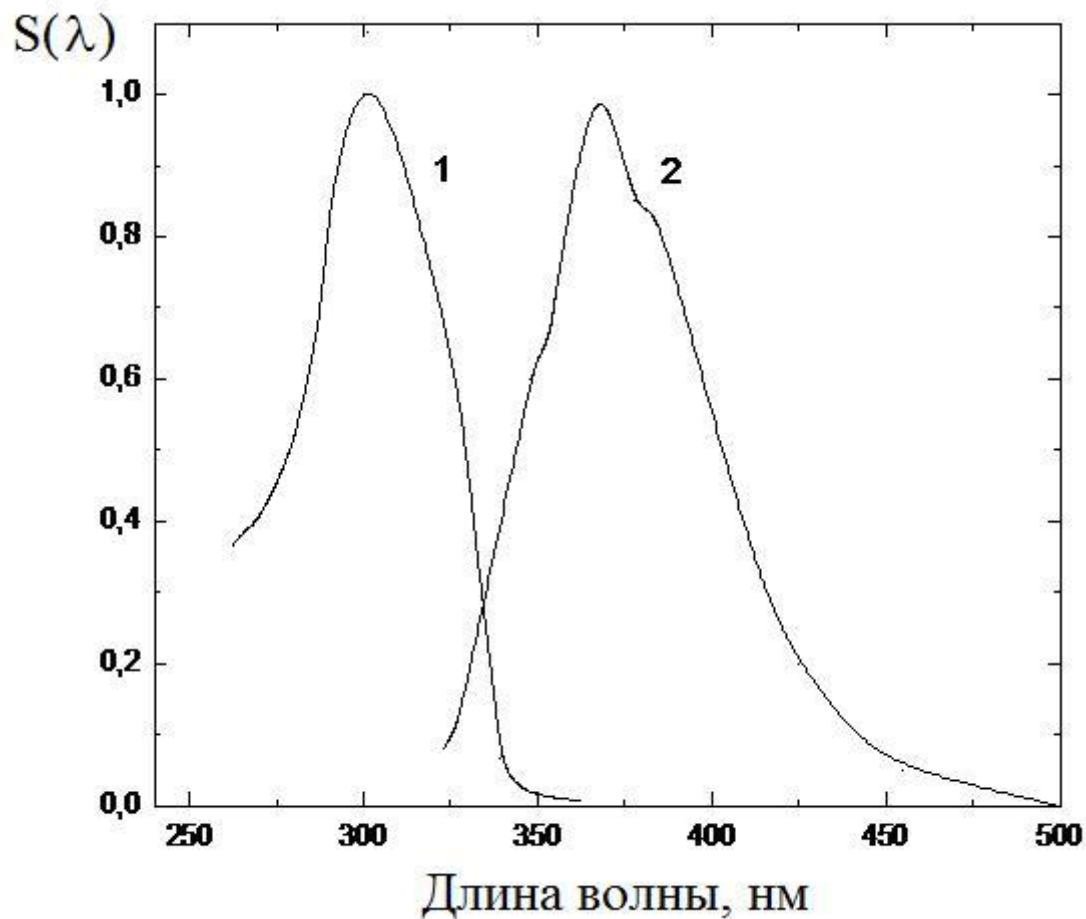
1 светодиод высокой мощности, $\sim 10^{12}$ фотонов в импульсе, 3 нс (FWHM)



Тонкопленочные сместители спектра (шифтеры)

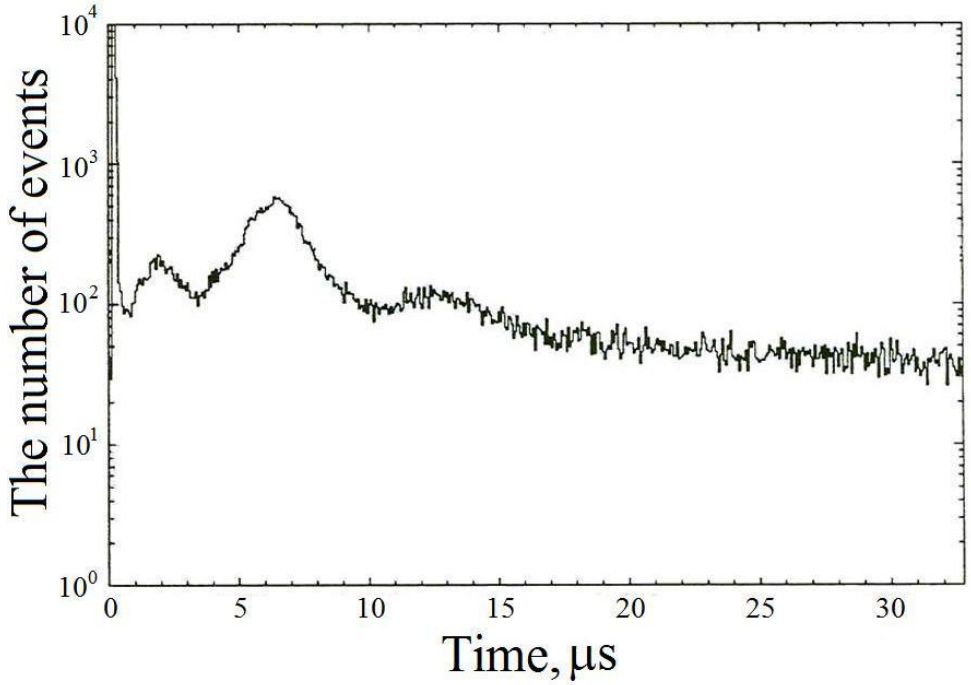
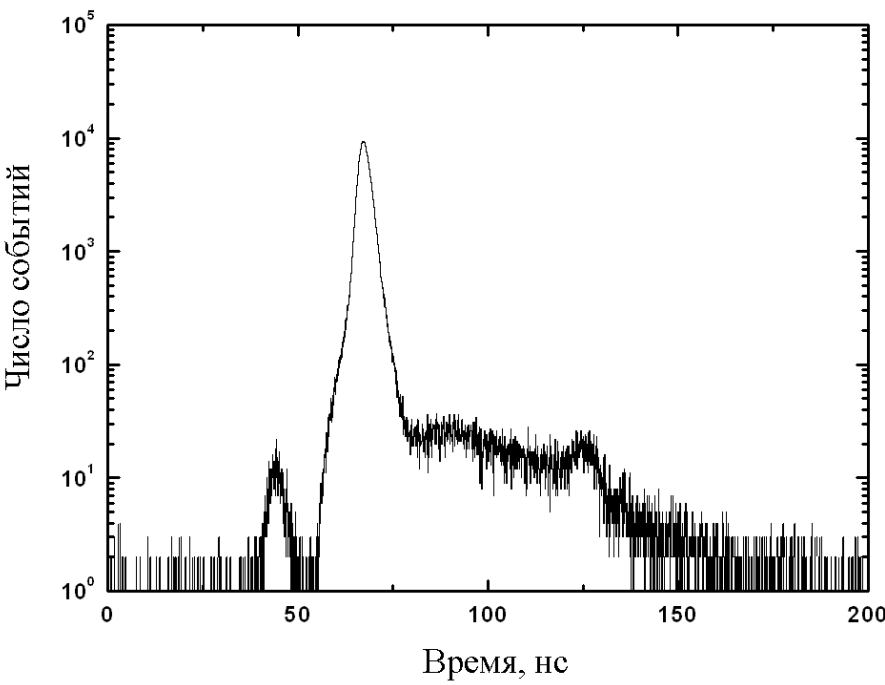
Люминофор	λ_{amax} , нм	$\Delta\lambda_a$, нм	λ_{emax} , нм	$\Delta\lambda_e$, нм	ξ , %	t_b , нс
PPO	310	80	360	70	2-3	1.4
PTP	275	50	340	55	5	1.0
PQP	295	60	360	60	11	0.8
BBD	315	80	380	80	0.3	-
TMI	295	60	375	70	11	6.5
Butyl-PBD	302	60	368	60	5	0.8
Bis-MSB	350	75	415	80	8	1.4
POPOP	358	75	410	80	6.5	1.5
PBD	302	60	360	60	4	< 1
Нафталин	275	40	325	40	-	~100
BMQ	275	70	357	70	9	0.9
DPS	340	70	406	70	11	1.2
QUI*	310	65	390	70	11	-
TBS*	320	60	390	60	11	1.8

Butyl-PBD

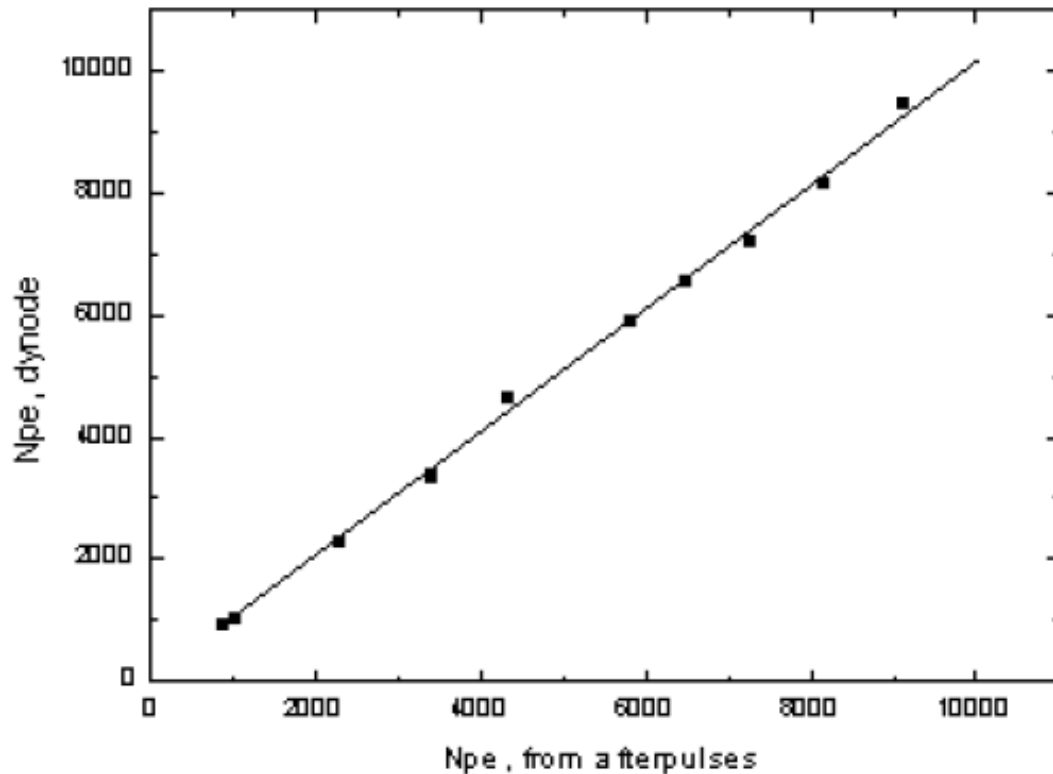


Увеличение чувствительности к черенковскому свету в воздухе в
~ 2 раза (Лубсандоржиев, Spiering, Кузьмичев)

Разработка методов увеличения динамического диапазона измерения амплитуды событий. (Лубсандоржиев, Полещук)



Для оценки числа фотоэлектронов в сильно насыщенном анодном сигнале можно использовать предимпульсы, задержанные импульсы и послеимпульсы



Preliminary

ET9350

peaks at $\sim 1.2, 2.4, 5-6 \mu s$

$1.2 \mu s$ - 2.3%
($\sim 200 ns$ width)

- N_{pe} , dynode - the number of pe measured from 8th dynode
- N_{pe} , afterpulses - the number of pe evaluated from afterpulses measurements.

Разработка фотодетекторов для расширения эксперимента Тунка
(МЭЛЗ + Hamamatsu + ET) – ФЭУ традиционного типа

Полусферический фотокатод - $\varnothing \geq 20$ см

Работа в условиях фона ночного неба – 2×10^8 фотонов/см²×с
(~30-40 мкА анодный ток)

6 каскадов усиления

1 динод – напыленный (CsSb) с высоким σ

Последующие – сплавные (CuBe)

4-6 диноды – увеличенной площади

Динамический диапазон – $> 10^5$

Измерения сигналов – 10^6 фотоэлектронов

Быстрый временной отклик – $t_r \sim 3$ нс (улучшенная эл. оптика)



ET9352 - 6 stages, up to 50 mA DC anode current

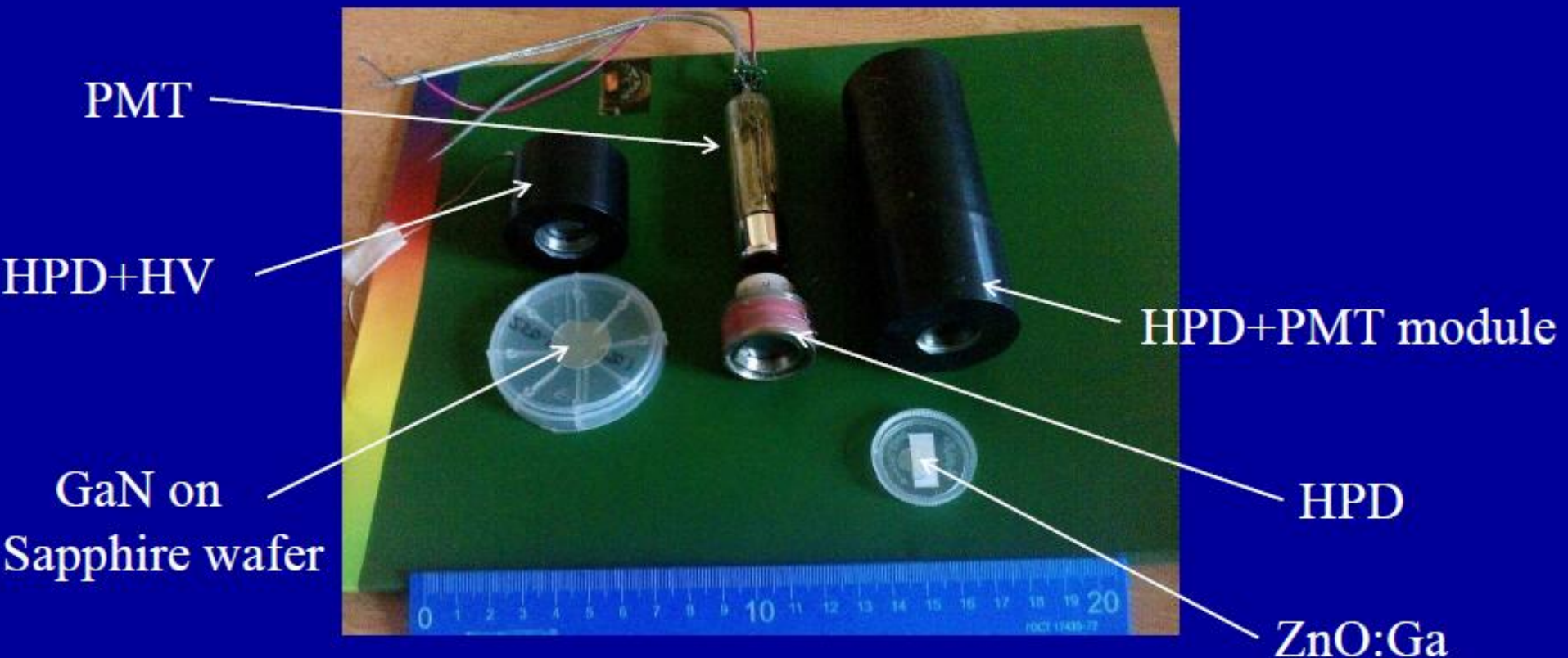


Hamamatsu “R5912-TUNKA” - 10 stages, 50 mA DC anode current

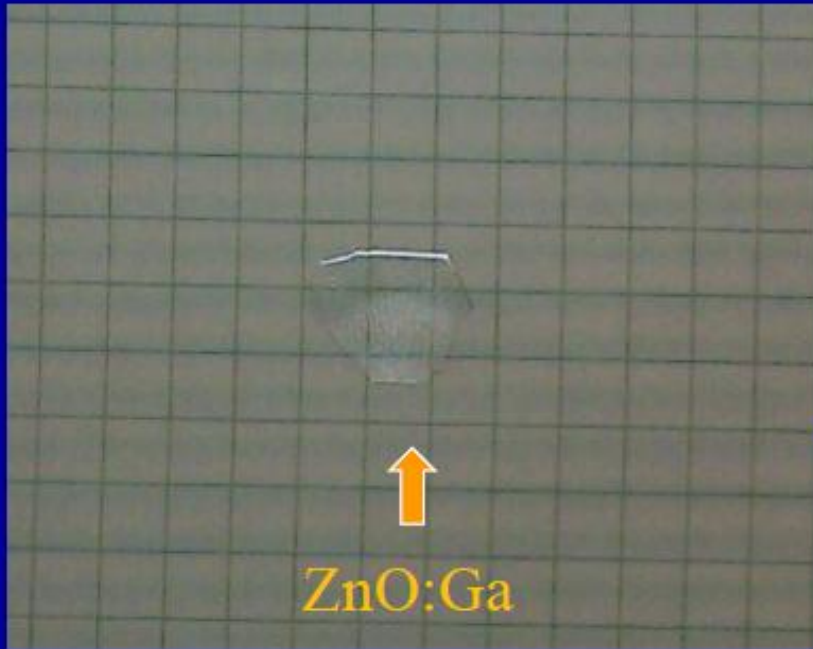
Hybrid photodetector (like Quasar-370)

MELZ, ET,

MELZ - Pilot sample of HPD with ZnO:Ga crystal based on image intensifier



ZnO:Ga crystals from Cermet Inc. Atlanta, GA, USA

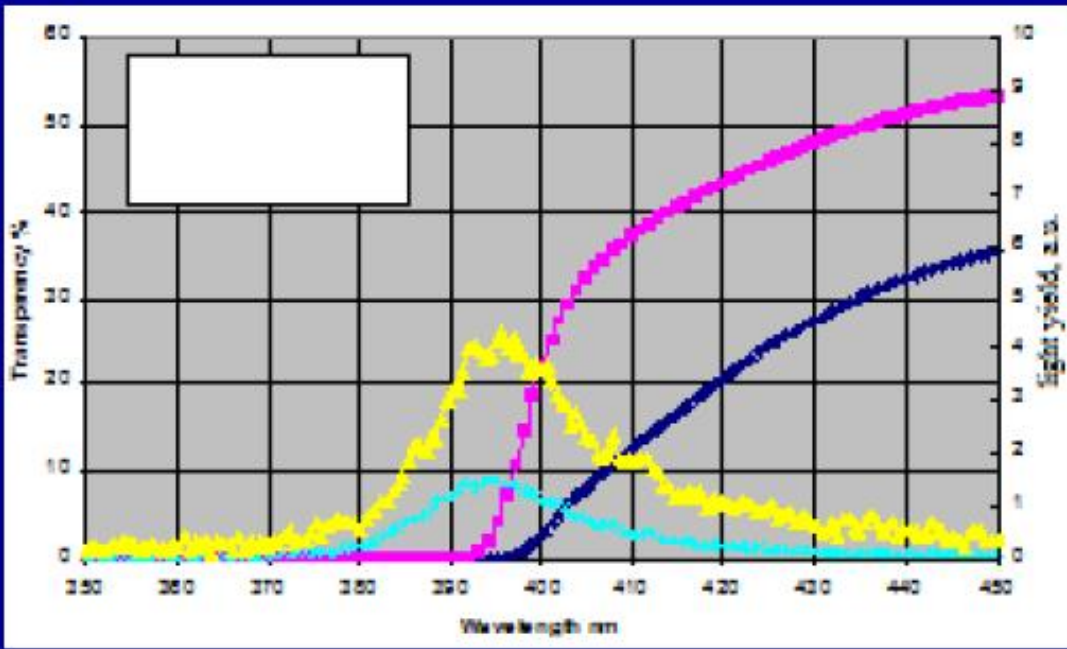


ZnO:Ga

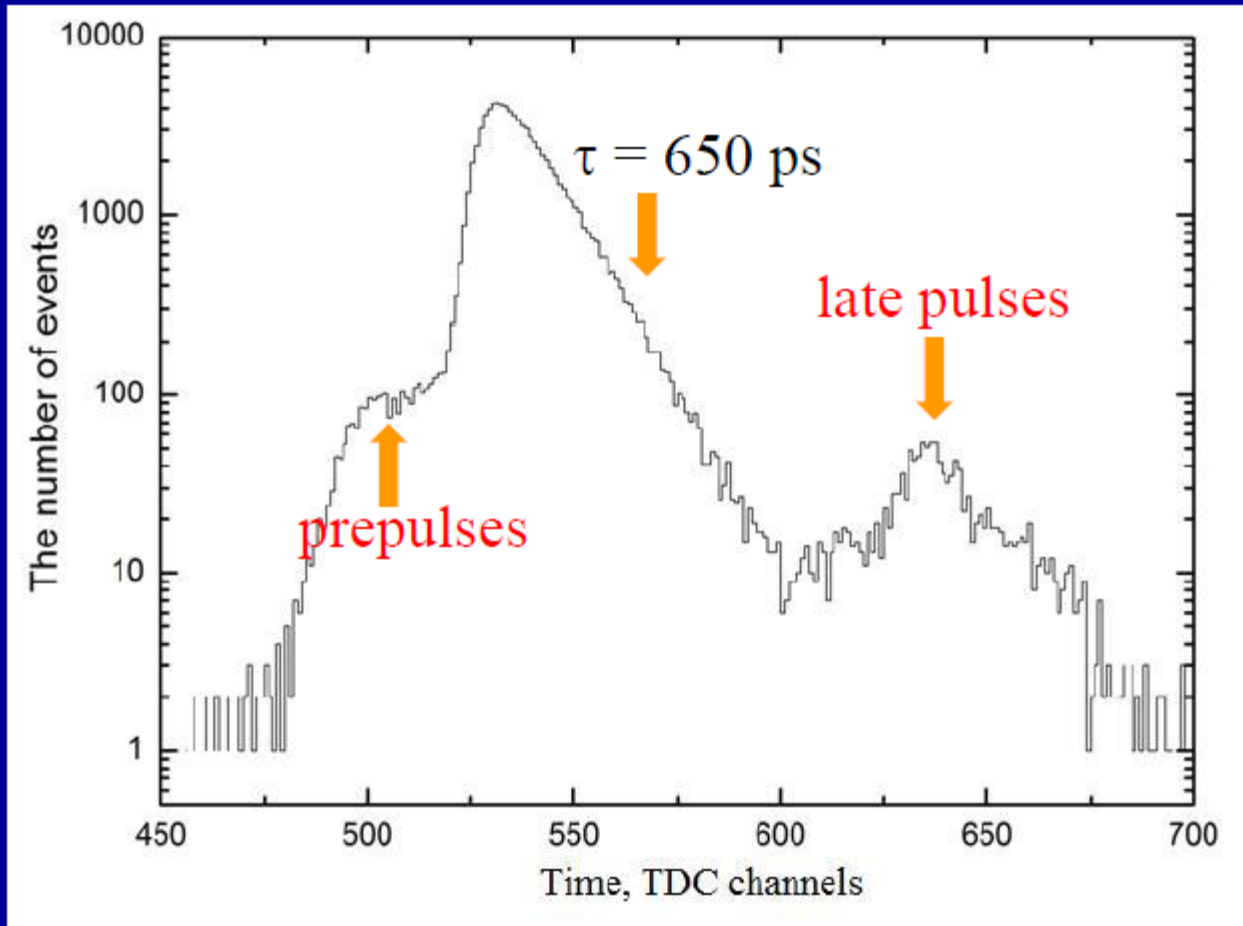
$\lambda_{\text{max}} \sim 390 \text{ nm}$

$\sim 300 \mu$ thickness

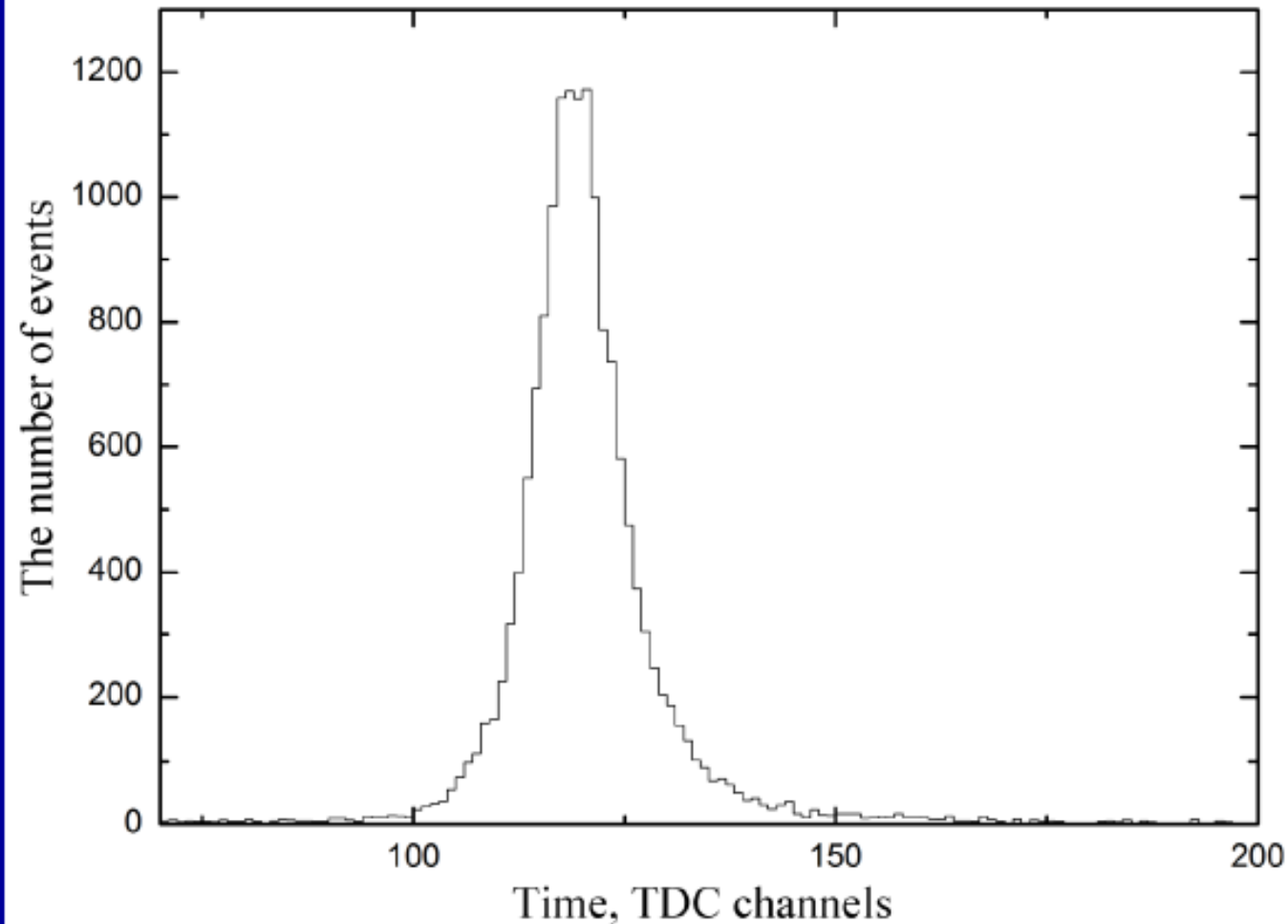
$\sim 1 \text{ cm}^2$ area



$\tau \sim 650$ ps, light yield ~ 1200 γ /MeV



Jitter (TTS)



$\Delta t_{\text{hpd}} \sim 750 \text{ ps (FWHM)}$; $\Delta t_{\text{LED}} \sim 700 \text{ ps}$

Проблемы:

Цена – <1000 US\$?

Стекло

Joint R&D project ASPERA+RFBR

Эксперимент Тунка – кандидатские диссертации в ИЯИ РАН:

1. Похил П.Г. “Фотодетекторы Байкальского нейтринного телескопа НТ-200 и черенковского детектора ШАЛ ТУНКА”. 2004г.

научный руководитель: Лубсандоржиев Б.К.

2. Васильев Р.В. “Точность временных измерений в экспериментах с вакуумными фотодетекторами в нейтринной астрофизике высоких энергий и физике космических лучей”. 2005г.

научный руководитель: Лубсандоржиев Б.К.

3. Вятчин Е.Э. “Наносекундные источники света для калибровочных измерений в черенковских и сцинтилляционных детекторах”, 2006г.

научный руководитель: Лубсандоржиев Б.К.


4. Шайбонов Б.А., “Детекторы фотонов и калибровочные системы экспериментов GERDA и ТУНКА”, 2011г.

научный руководитель: Лубсандоржиев Б.К.

Эксперимент Тунка - в дорожной карте европейской стратегии развития Astroparticle Physics
(European Roadmap for Astroparticle Physics)

Эксперимент Тунка: от Тунка-4 к Тунка-133 и Тунка-HiSCORE
и еще дальше к детектору с $S \sim 100 \text{ км}^2$?

Решение вековой проблемы происхождения космических лучей?



Забайкалье – хороший регион для размещения черенковских детекторов ШАЛ
большой площади

Огромные степные просторы

Большое количество безоблачных ночей

Достаточно развитая инфраструктура

Дружелюбное местное население

“...от Байкала начинается сибирская поэзия, до Байкала же была проза”

А.П.Чехов





Спасибо!

