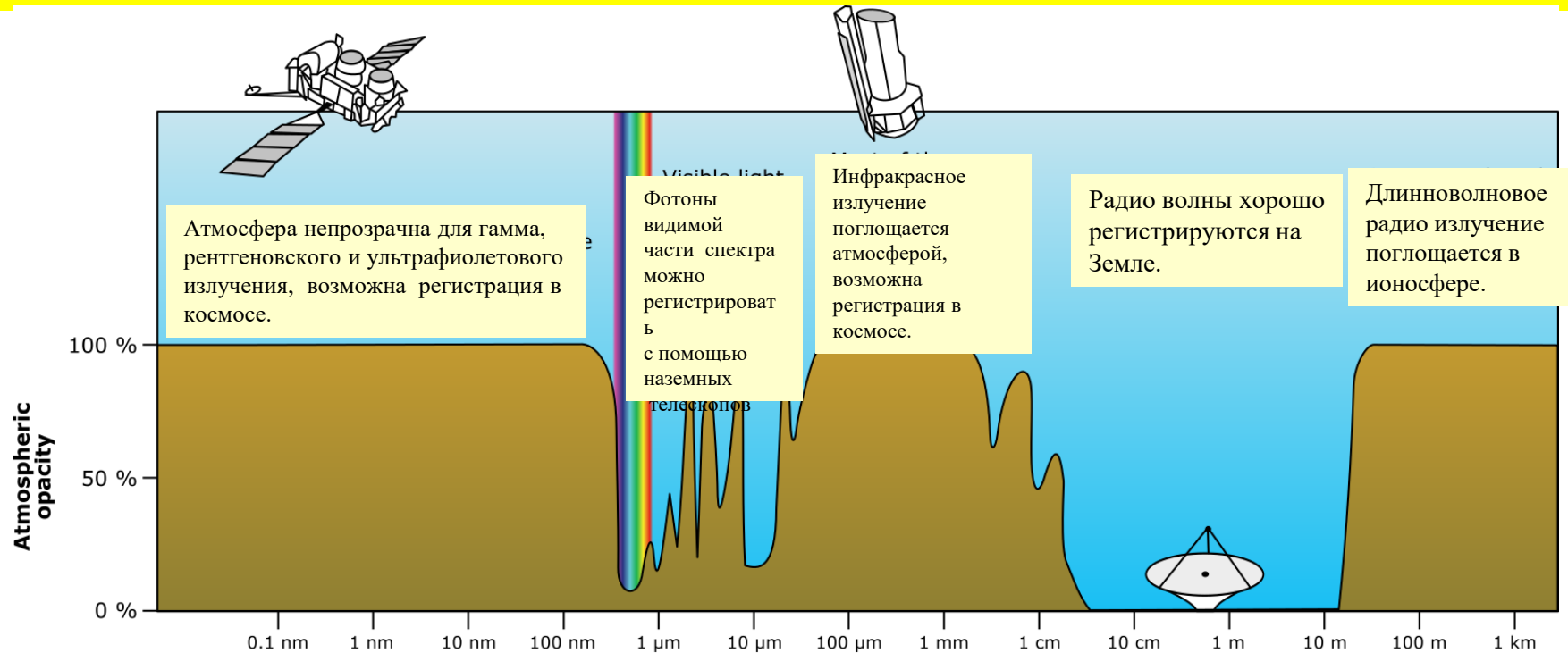


Астрофизика Высоких Энергий в Байкальском регионе.

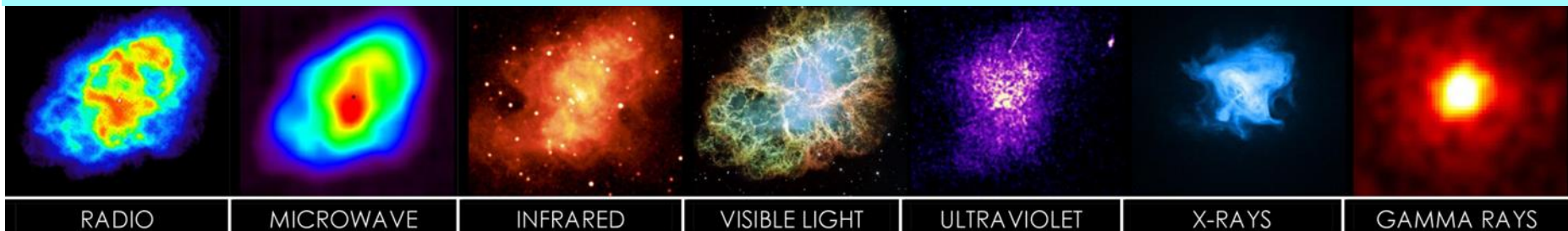


Н.Буднев, Иркутский государственный университет

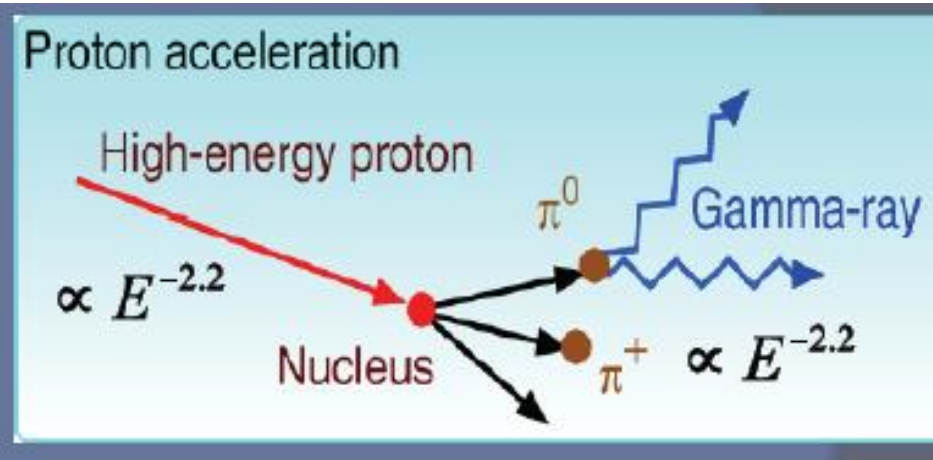
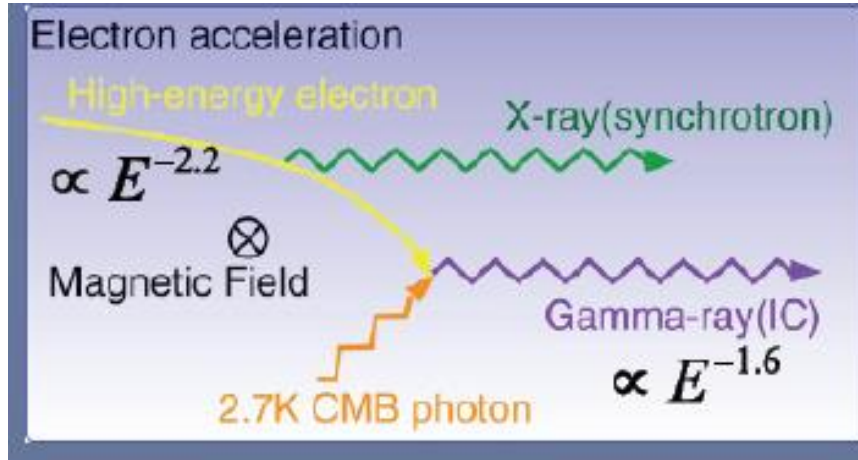
Традиционная астрономия основана на регистрации фотонов очень узкой видимой части спектра



• Крабовидная туманность (остатки ближайшая к Земле Сверхновой, взорвавшейся 4 июля 1054 года) в разных диапазонах длин волн (энергий) фотонов.



Основные механизмы генерации гамма-квантов высоких энергий

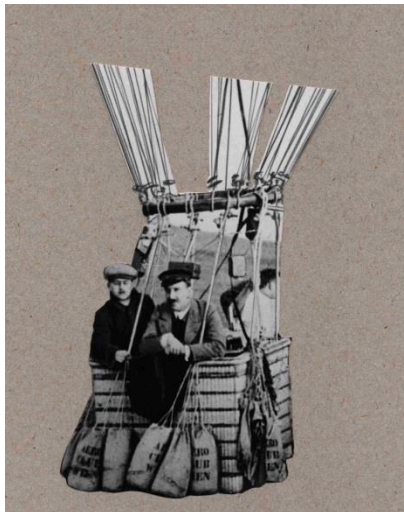
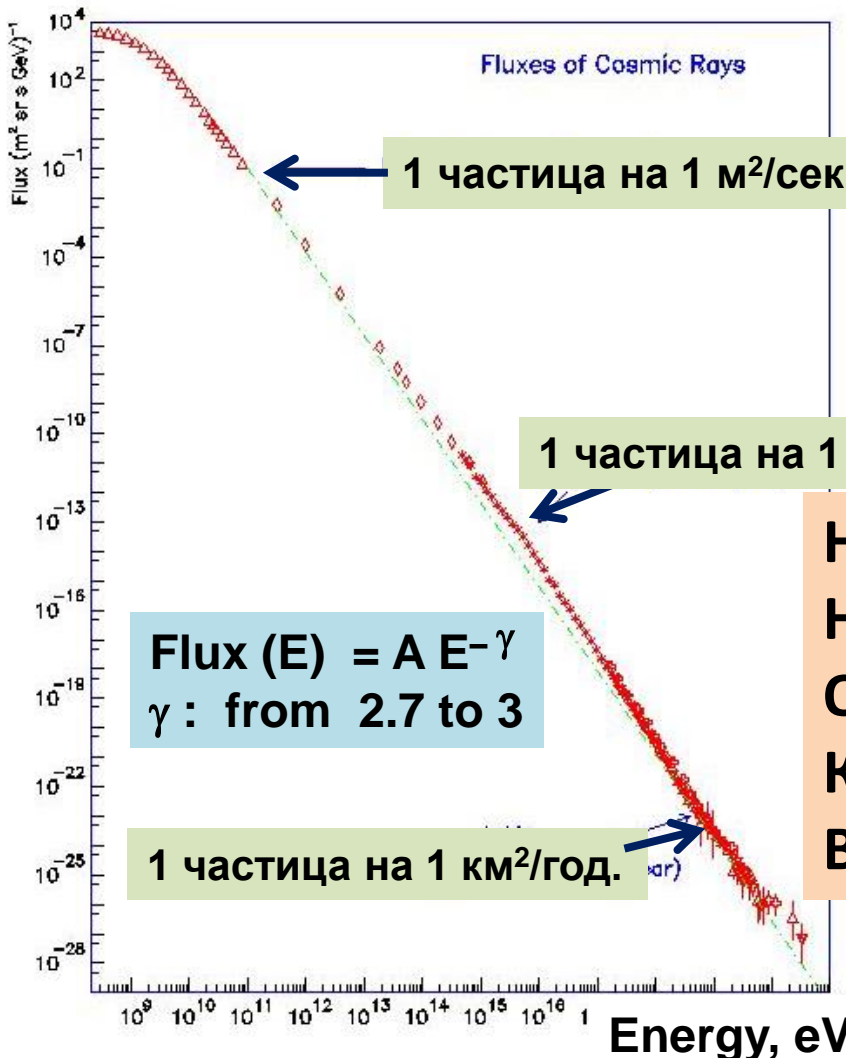


Высокоэнергичные гамма-кванты также могут быть и результатом взаимодействий и распадов гипотетических частиц реликтовой темной материи оставшихся от большого взрыва

(A. de Angelis, M. Roncadelli, O. Mansutti 2007, *Phys. Rev. D*, 76, 121301)

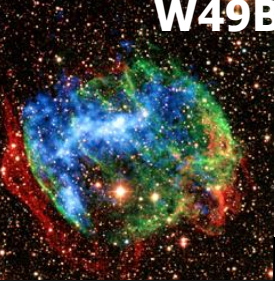
17 апреля 1912 года поднявшись на аэростате на высоту 5000м австрийский ученый **Victor Hess** доказал факт существования приходящего из космоса ионизирующего излучения.

Flux Энергетический спектр



Но до сих пор
 Не найдено ни
 Одного источника
 Космических лучей
 Высоких энергий





W49B

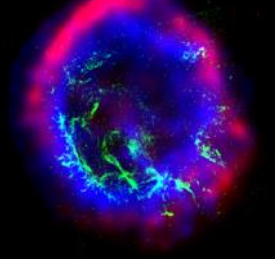
SN 0540-69.1



Crab

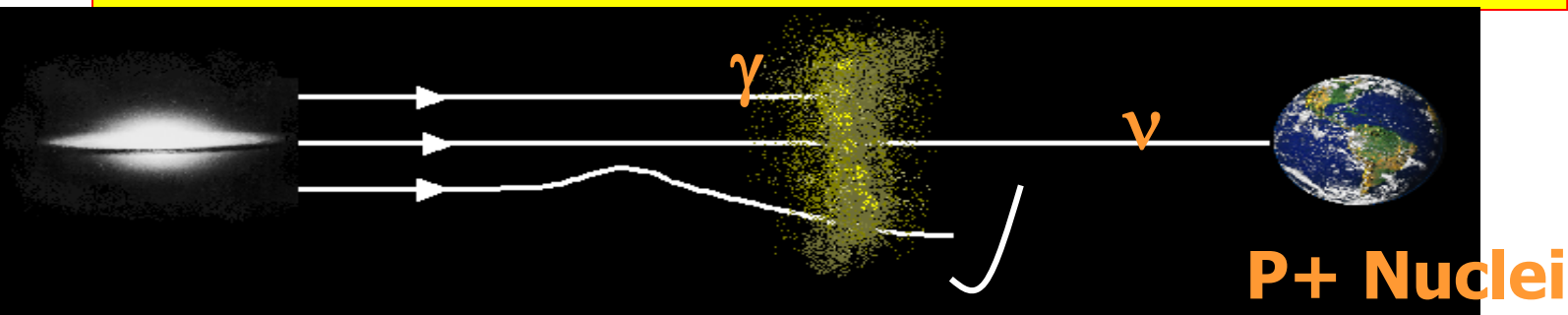


Cas A



E0102-72.3

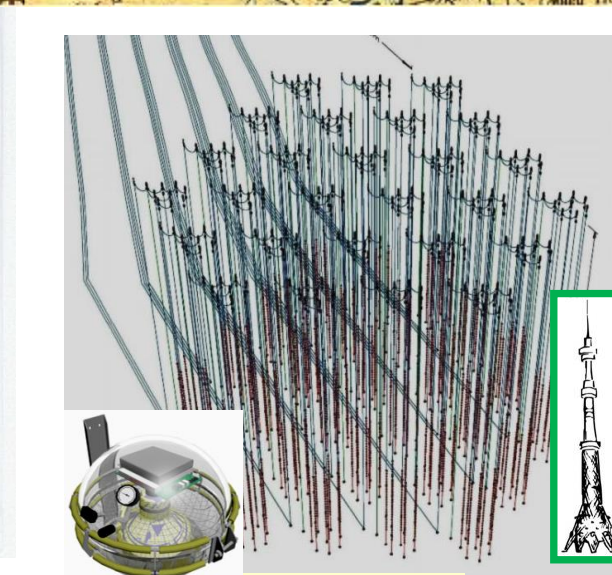
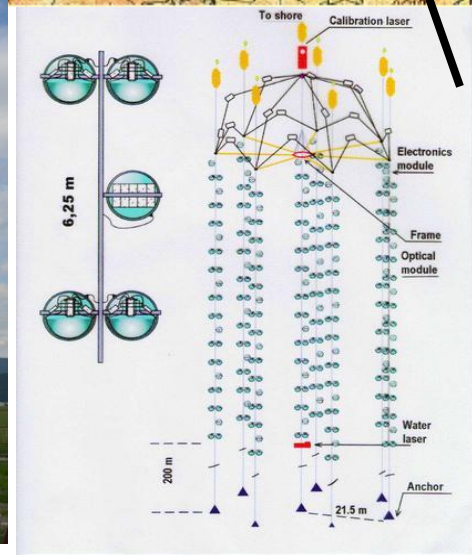
Три типа носителей информации о Вселенной Высоких Энергий



- Фотоны, в том числе высоких энергий (гамма-кванты), не могут проходить через плотные слои материи, но сохраняют направление на источник.
- Протоны и ядра – обладают большей проникающей способностью, но теряют направление на источник и-за действия магнитных полей.
- Нейтрино – способны проходить гигантские расстояния без поглощения, сохраняя направление на источник, но их очень трудно регистрировать.

- **Для понимания фундаментальных законов формирования и эволюции Вселенной и природных механизмов генерации сверхвысоких энергий необходимы гигантские установки для регистрации гамма-квантов, ядер и нейтрино в широком диапазоне энергий.**

Прибайкалье – единственное место на Земле с благоприятными природными условиями для создания крупнейших комплексов для регистрации всех трех носителей информации о Вселенной Высоких Энергий.



Гамма-обсерватория TAIGA

NT-200

Baikal-GVD

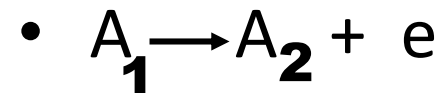
Нейтринная астрофизика высоких энергий

Для объяснения особенностей радиоактивных распадов В. Паули сформулирован гипотезу о существовании «невидимой» частицы – **нейтрино**.



- Радиоактивный распад ядер

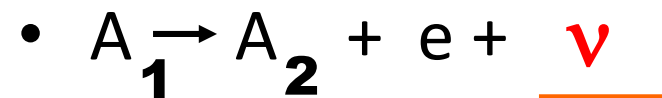
- до 1930



$$u_e m_e = v_n M_n$$

$$E_{0n}^0 = E_n^0 + M_n v_n^2 / 2 + E_e^0 + m_e u_e^2 / 2$$

- после 1930



Теперь мы знаем, что:

- **Нейтрино** – стабильные, электрически нейтральные элементарные частицы с очень малой массой, очень слабо взаимодействующие с веществом.
- **Нейтрино** рождаются в ядерных реакциях, а также при взаимодействии и распадах элементарных частиц.

Как зарегистрировать нейтрино высокой энергии?

- Зарегистрировать нейтрино означает зарегистрировать результат его взаимодействия с веществом:

$$\nu_e + N \rightarrow e(\nu_e) + X$$

$$\nu_\mu + N \longrightarrow \mu(\nu_\mu) + X$$

$$\nu_\tau + N \rightarrow \tau(\nu_\tau) + X$$

$$\nu_e + e \rightarrow X$$

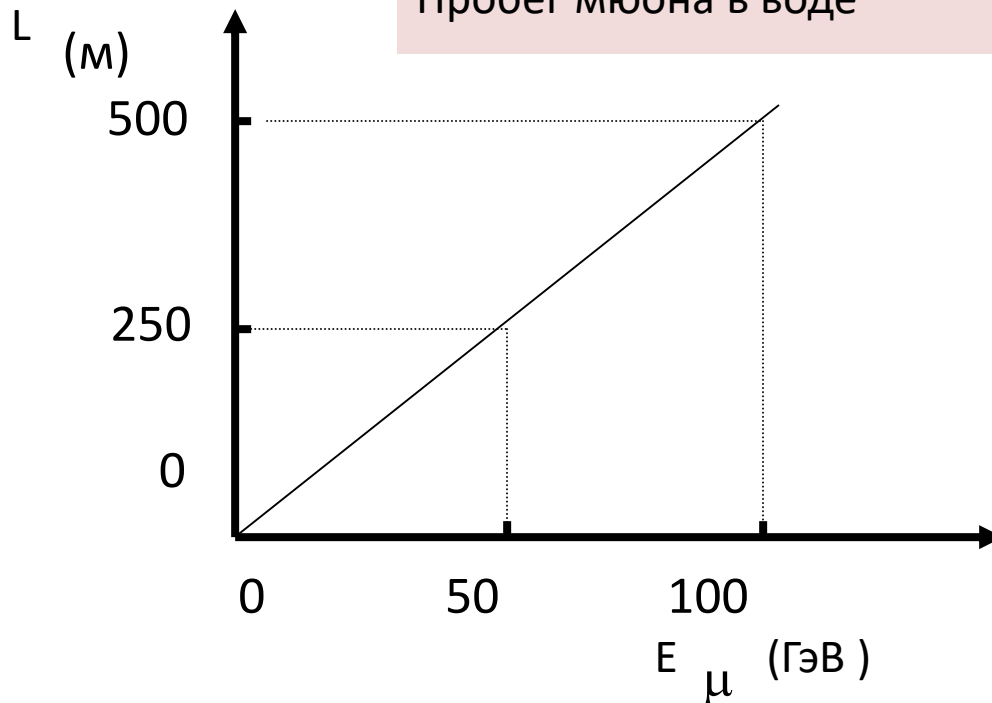
МЮОН

Масса мюона примерно в 200 раз больше массы электрона (105 МэВ)

Время жизни 2.2 мкс

Мюон - длиннопробежная частица

Пробег мюона в воде



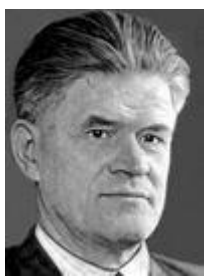
1 МэВ = 10^6 эВ

1 ГэВ = 10^9 эВ

1 ТэВ = 10^{12} эВ

1 ПэВ = 10^{15} эВ

1 ЕэВ = 10^{18} эВ

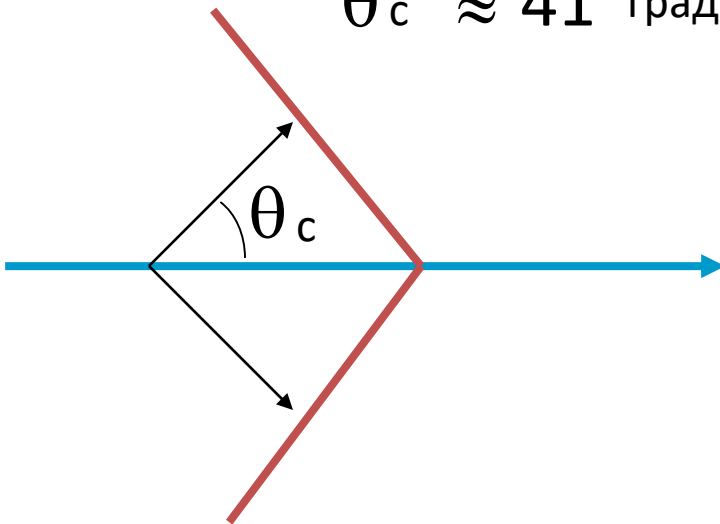


Черенковское излучение (П.А.Черенков, 1934)

Заряженные частицы, движущиеся со скоростью больше, чем фазовая скорость света ($V_{\phi} = c / n_{\text{среды}}$), излучают свет.

Для воды:

$$\theta_c \approx 41 \text{ град.}$$



θ_c — Черенковский угол

При $V_{\phi} > c$

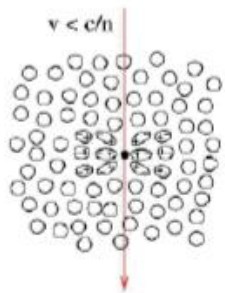
$$\cos(\theta_c) = \frac{1}{n}$$

n — показатель преломления

Интенсивность излучения в воде
200 фотонов/см

≈

Cherenkov Effect

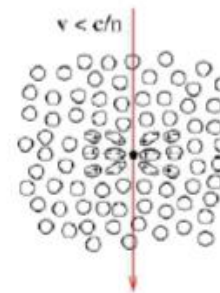


Medium, refractive index n

Charged particle with $v < c/n$ traverses medium
 \Rightarrow local, shorttime polarization of medium

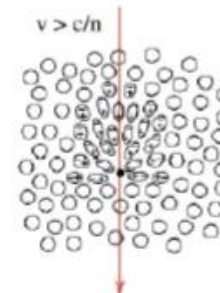
Reorientation of electric dipoles results in (very faint) isotropic radiation

Cherenkov Effect

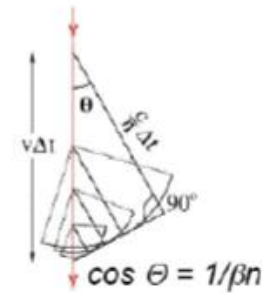


$v > c/n$

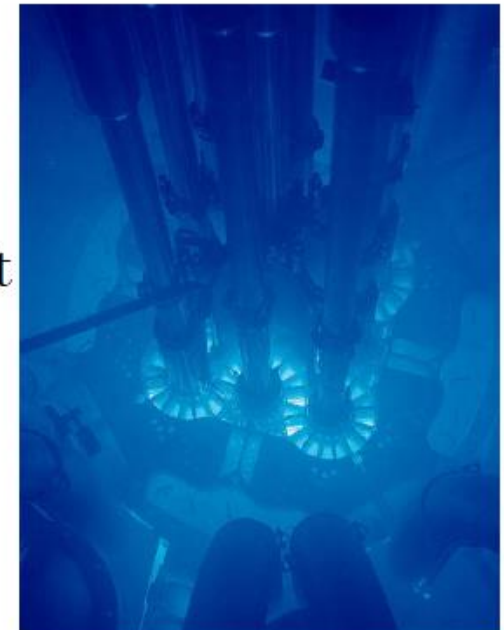
\Rightarrow radiation from different points along the trajectory arrive **in phase** within narrow light-cone at the observer \Rightarrow **bright light**



Similar to sonic boom if $v > c_{\text{acoustic}}$



- Initially complaining about his boss: he had to spend >1-1,5 hours in a dark, cold cellar, for accomodating his eyes
- He noticed that the emission is not chaotic, but is related to the track of moving particle.
- 1934-1938 conducting a series of brilliant expeirments.
- Obtained doctorate in 1940

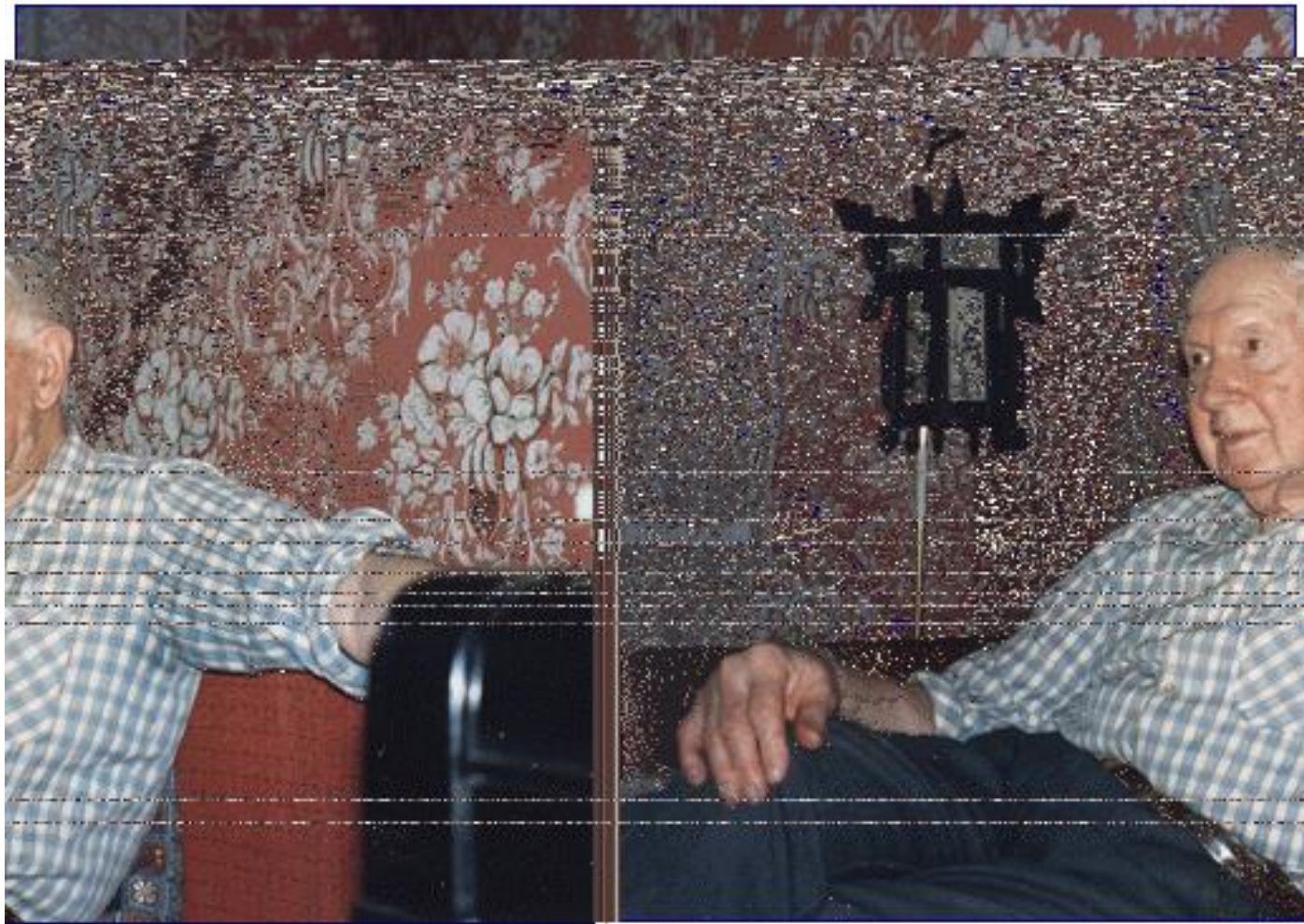


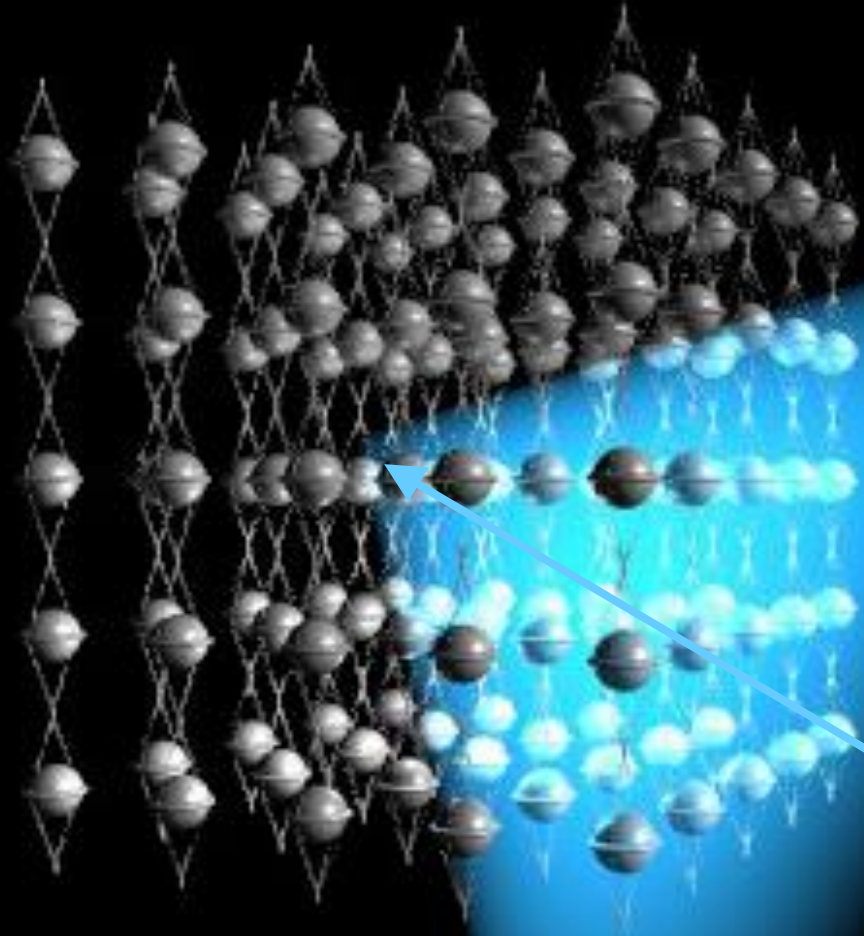
Cherenkov, Tamm and Frank awarded Nobel Prize in 1958



- S. I. Vavilov has passed away in 1951 (after ~10 heart attacks).
- Nobel prize is awarded only to scientists who are alive

**В 1960 году академик М.А.Марков предложил
создать нейтринный телескоп в океане.**





Мюоны высоких энергий
Могут проходить в воде
Путь длиною в
Несколько километров! ...

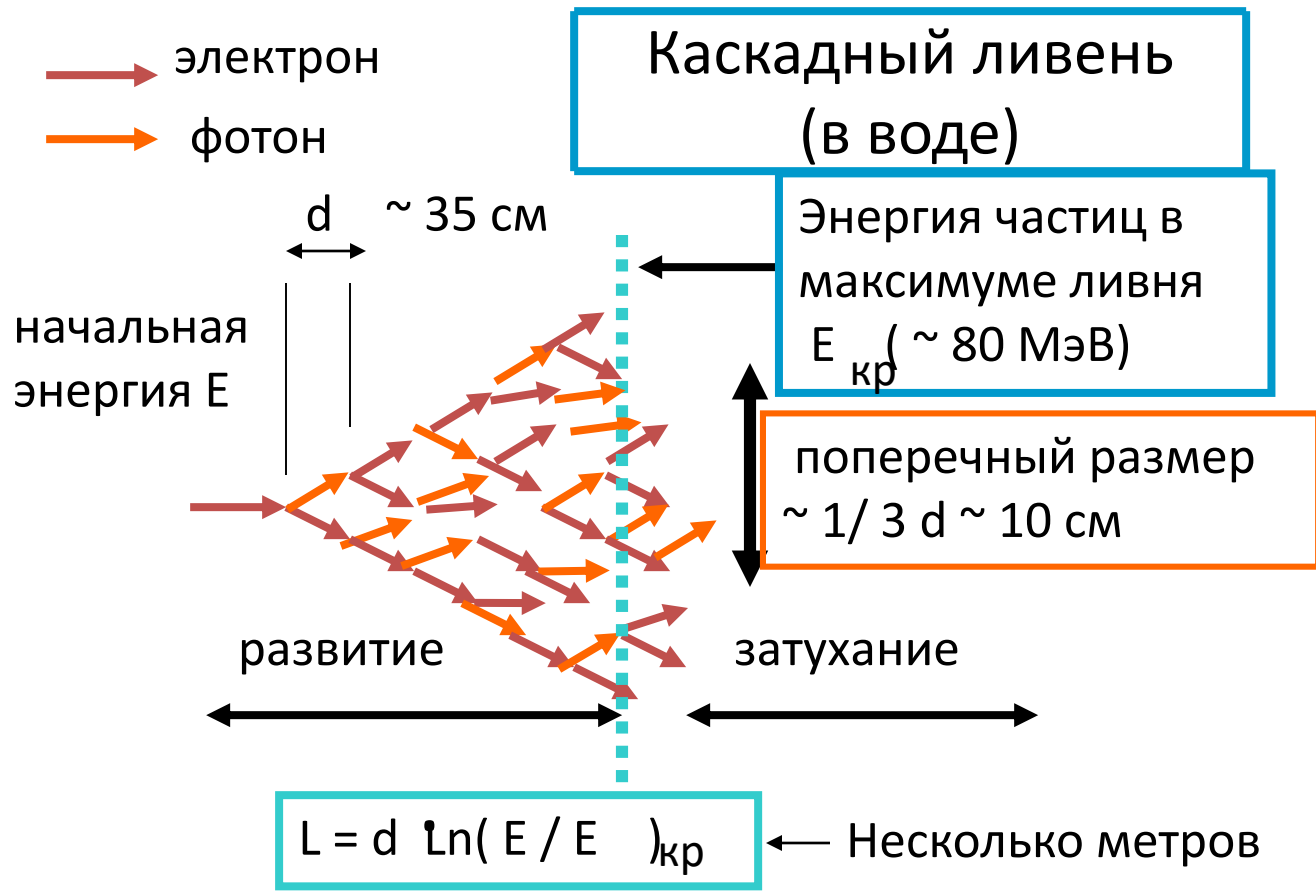
Детектор

Мюон



Нейтрино





$E = 10 \text{ ТэВ}$

Полное число частиц в максимуме ливня

$N_{max} \sim 10^4$

Число черенковских фотонов

$N = 200 (E / 2 \text{ МэВ})$
 $\sim 10^8$

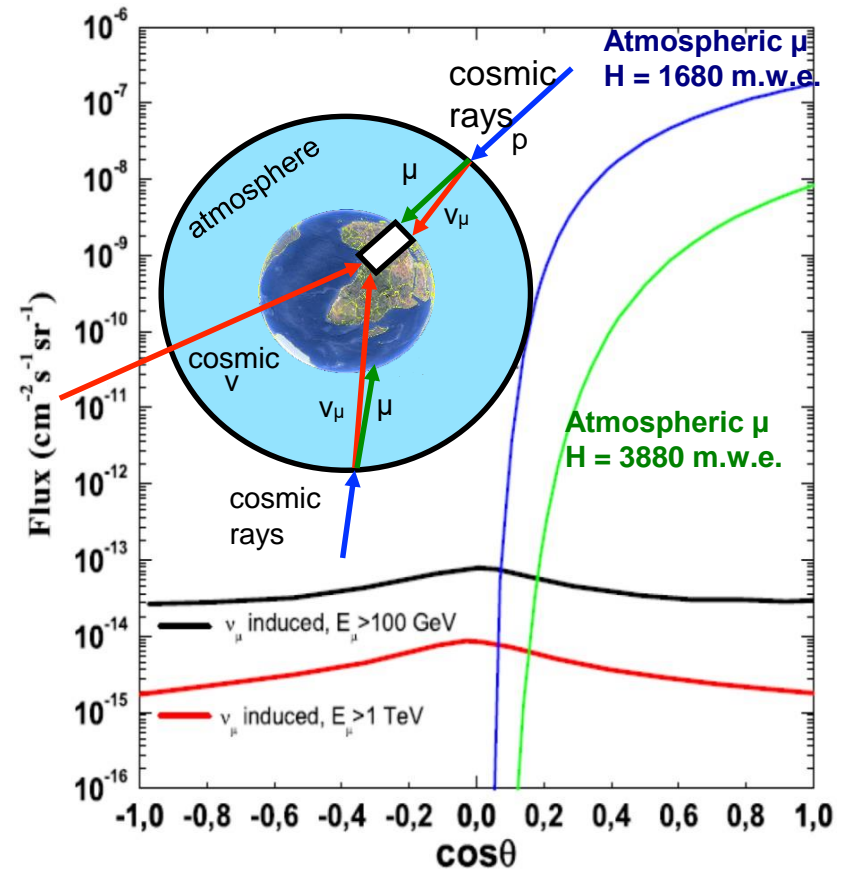
Источники ливней

ν_e	→ электрон + адроны	→ ливень
ν_μ	→ мюон + адроны	→ ливень

Каскадный ливень высокой энергии можно зарегистрировать с расстояний $\sim 100 \text{ м}$

Backgrounds

- Atmospheric neutrinos
 - quasi-irreducible background (for downgoing events, sibling atmospheric muons can be used as veto)
- Atmospheric muons
 - Downgoing only (Earth acts as filter)
- Environmental background light:
 - natural radioactivity (K), bioluminescence, chemiluminescence
 - Limits low energy sensitivity



Проект DUMAND – нейтринный телескоп около Гавайских островов (1978 год)

Высокая прозрачность среды
Небольшой световой фон
Простое и дешевое развертывание
Достаточная глубина

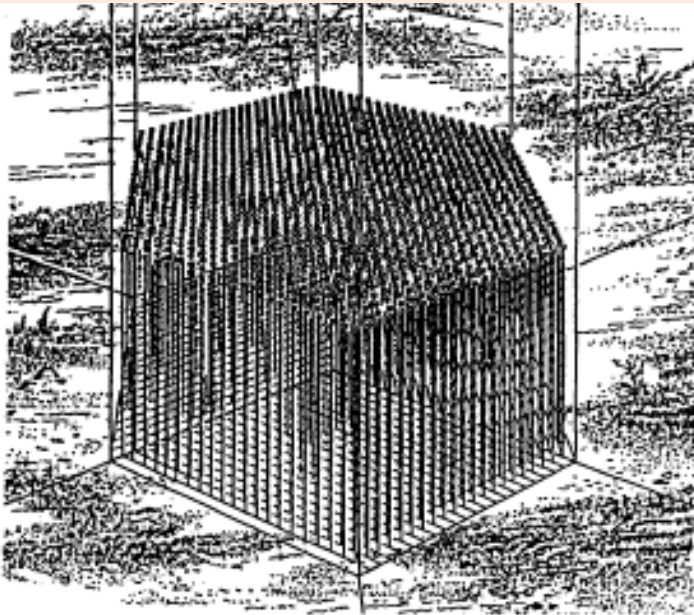


FIG. 9. The first DUMAND array: DUMAND G, the 1978 model. See text for details (Roberts and Wilkins, 1978).



Проект был закрыт в
девяностые годы после
нескольких неудач с
развертыванием.

Байкальский нейтринный проект

Основные требования к месту создания нейтринных телескопов а природной среде:

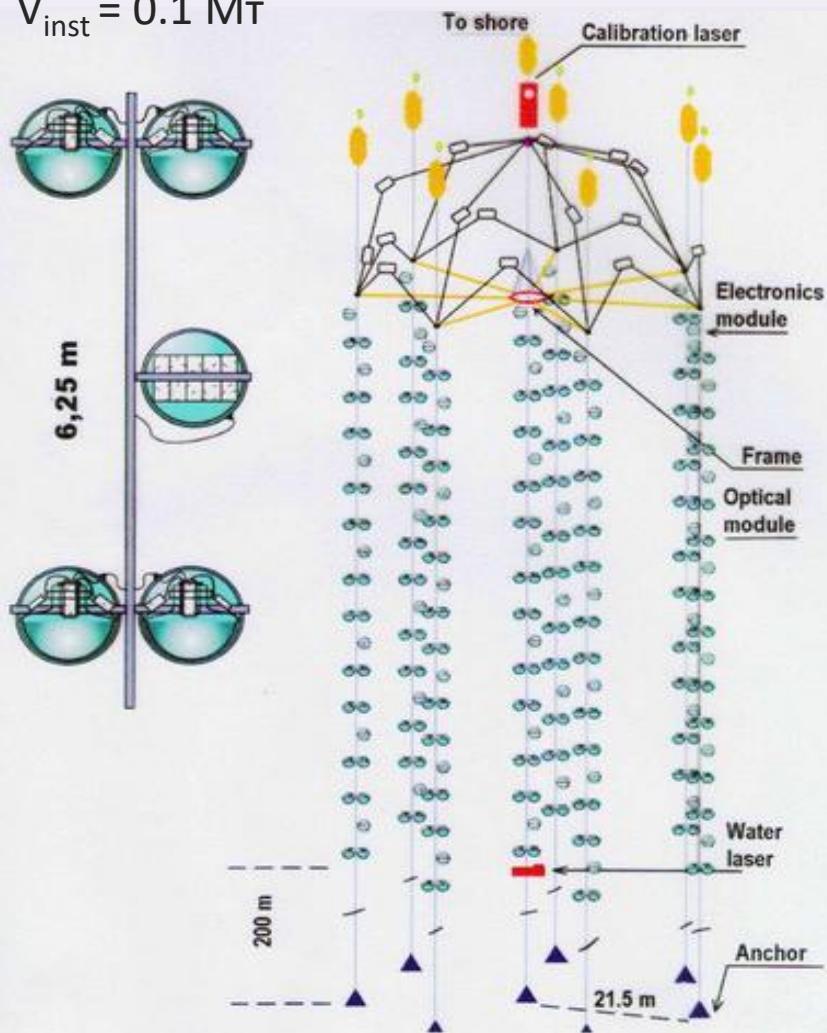


В 1980 году А.Е.Чудakov предложил использовать ледовый покров озера Байкал для методических экспериментов, чтобы получить опыт регистрации черенковского излучения релятивистских частиц в воде.

Нейтринный телескоп НТ200(1998)

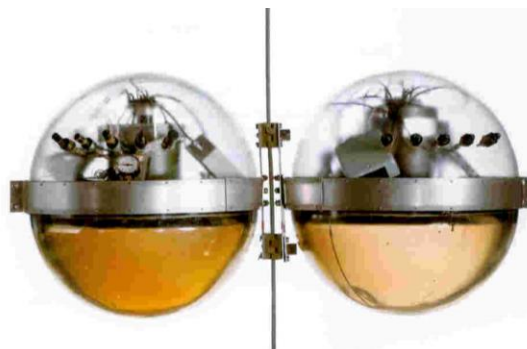
1. НТ200: Высота = 70м, Диаметр = 42м

$V_{inst} = 0.1 \text{ Мт}$

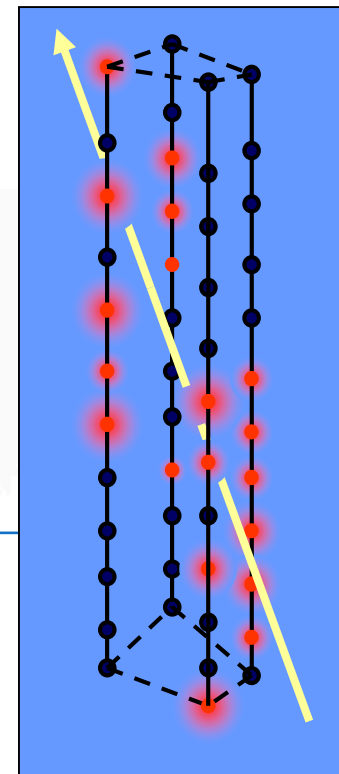


2. НТ200+ : 3 внешних гирлянды по 6
ОМ на расстоянии 100 м

Гибридный ФЭУ «Квазар»:
37см (14.6"), грибовидная



- 8 гирлянд оптических модулей
- 192 оптических модуля
- = 96 измерительных каналов
- регистрация времени прихода черенк. излучения и заряда
- $\sigma_T \sim 1 \text{ нс}$



Энерг. порог: $\sim 15 \text{ ГэВ}$

Эфф. площадь: $\sim 2000 \text{ м}^2$ (1 ТэВ)

Эфф. объем: $\sim 0.2 \text{ Мт}$ (10 ТэВ)

$\sim 1 \text{ Мт}$ (1 ПэВ)







The neutrino telescope world map 2020



ANTARES
Deep water
0.02 km³
2008 –



KM3NeT
Deep water
1 + 0.006 km³
Construction



Baikal/GVD
Deep water
~1 km³
half-complete



ICECUBE

<u>IceCube</u>	<u>IceCube-Gen2</u>
Deep ice	Deep ice
1 km ³	~10 km ³
2011 –	2026+

These neutrino telescopes form Global Neutrino Network - see talk by Christian Spiering at yesterday's neutrino session

IceCube

IceCube Lab

IceTop air shower detector

50 meters

Completed in
2010

IceCube Array

*86 strings, 60 sensors each
5,160 optical sensors*

1 Gton

220 v / day

1,450 meters

DeepCore

*6 strings optimized
for low energies*

Threshold:

IceCube: ~ 100 GeV

DeepCore: ~ 10 GeV

2,450 meters

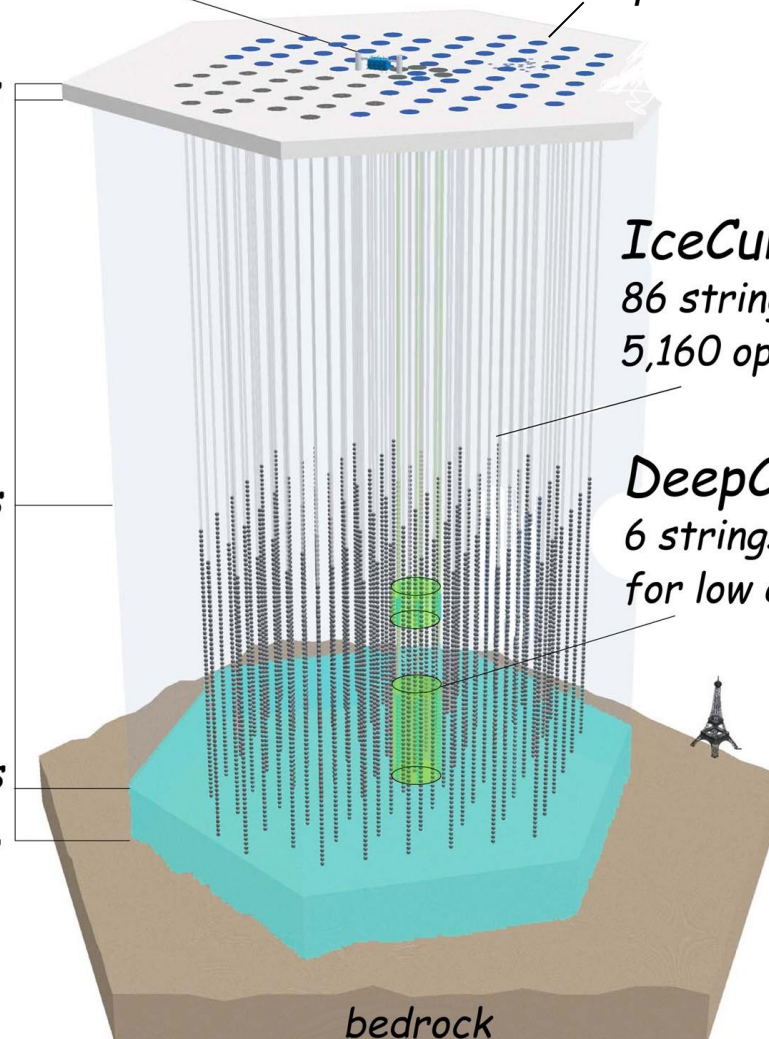
*Eiffel Tower
324 meters*

2,820 meters

bedrock

*Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos
with IceCube (Science 2013, 342, 1242856)*

*Neutrino emission from the direction of the blazar
TXS 0506+056 (Science 2018, 361, 147)*

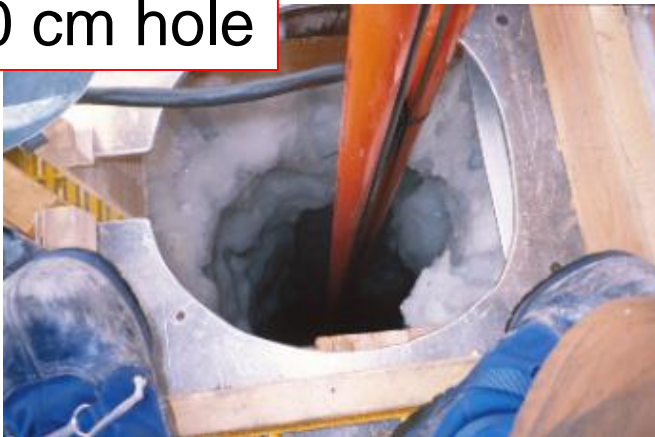


Hot water drilling



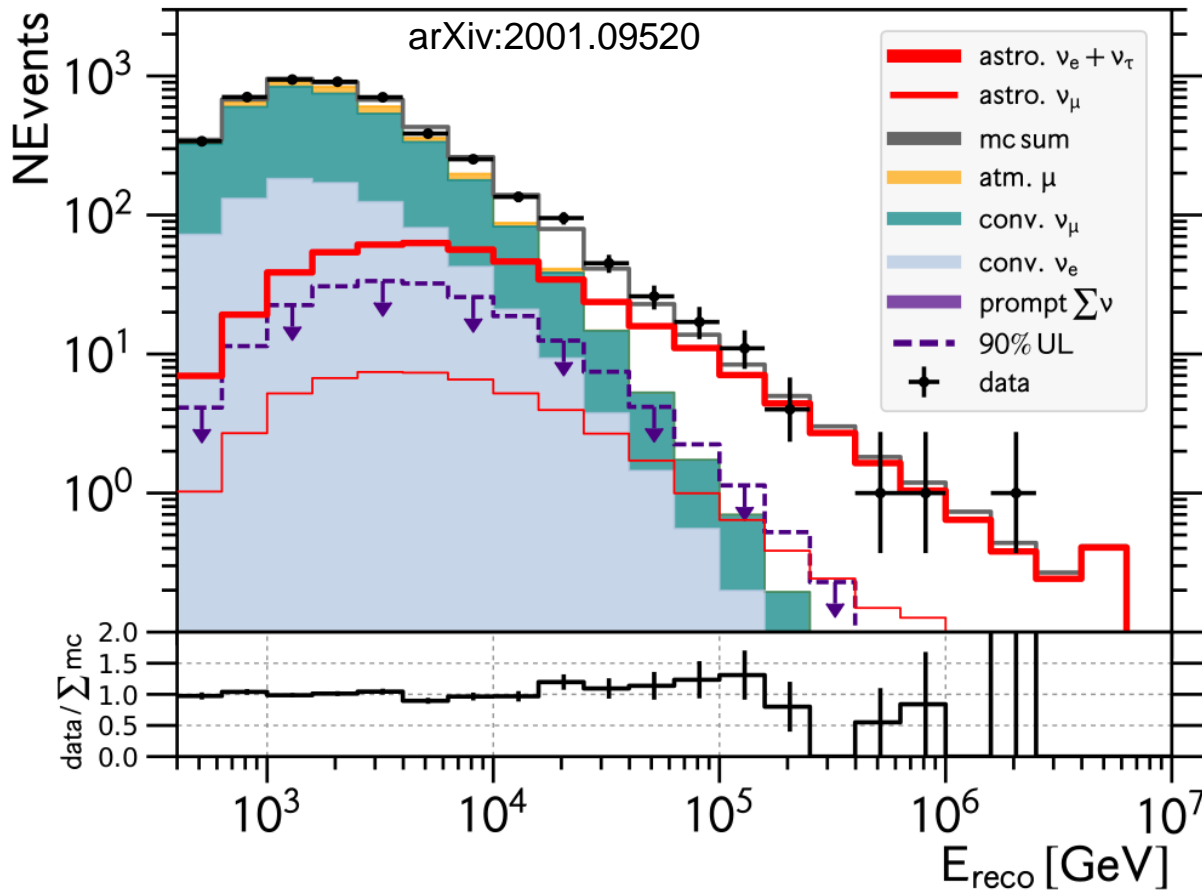
2 MW power
3-4 days / 2 km

60 cm hole



Diffuse neutrino flux observed by IceCube

Cascade



2 yrs data, 4.1σ
Science 342 (2013)

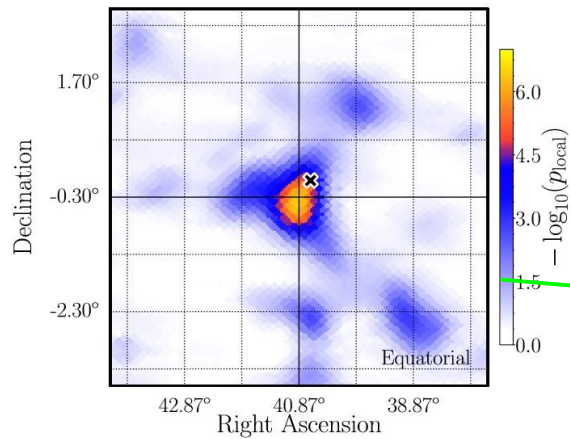
3 yrs data, 5.9σ
Phys.Rev.Lett. 113:101101
(2014)

4+2 yrs data, $\sim 10 \sigma$
Phys.Rev.Lett. 125:121104
(2020)

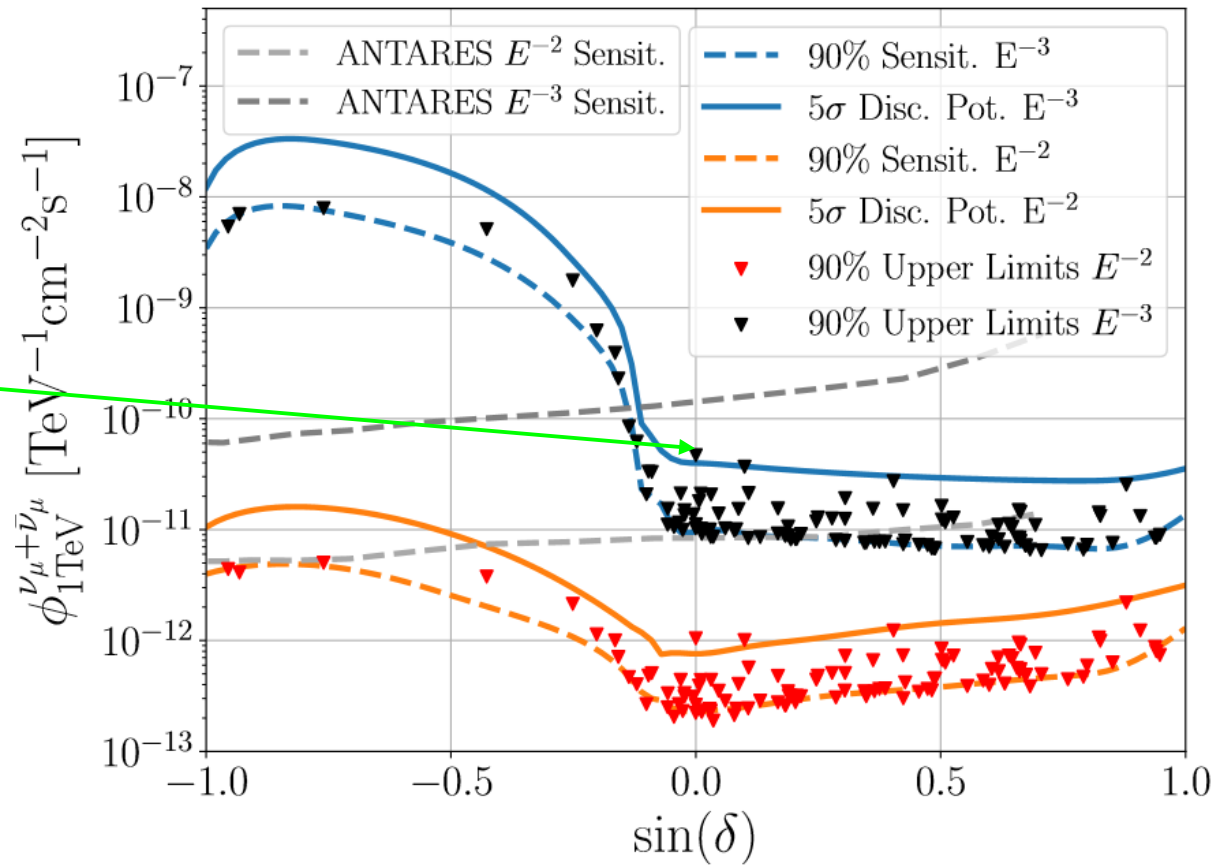
Threshold $\sim 30 \text{ TeV}$

Point-source searches

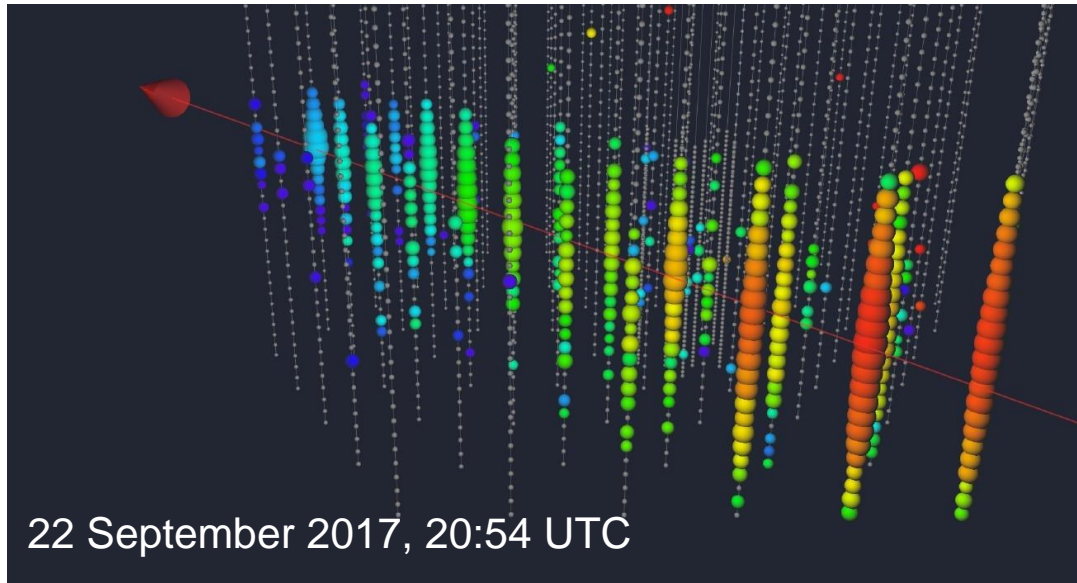
Some evidence for non-uniform skymap in 10 years of IceCube data (3.3σ). Mostly resulting from 4 extragalactic source candidates. No indications for galactic sources



Strongest excess
(2.6σ post trial) close to galaxy NGC 1068 (cross)



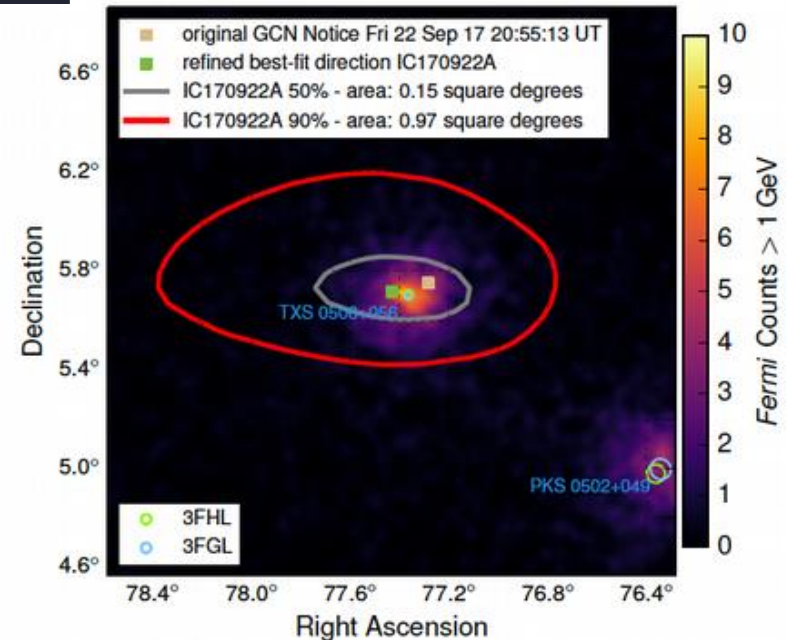
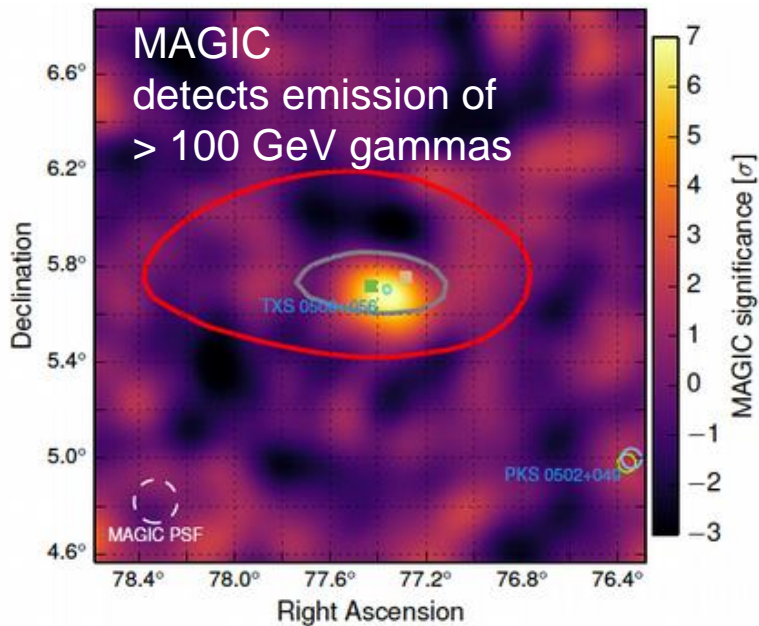
IceCube 170922 / TXS 0506+056



0.1° off the position of the known γ -ray blazar TXS 0506+056

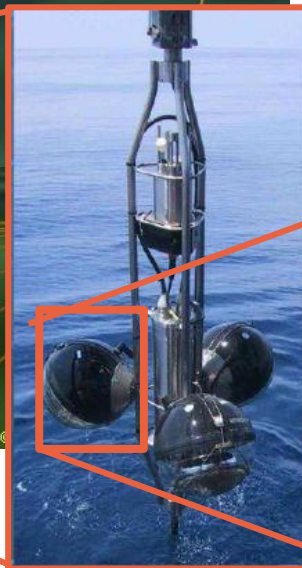
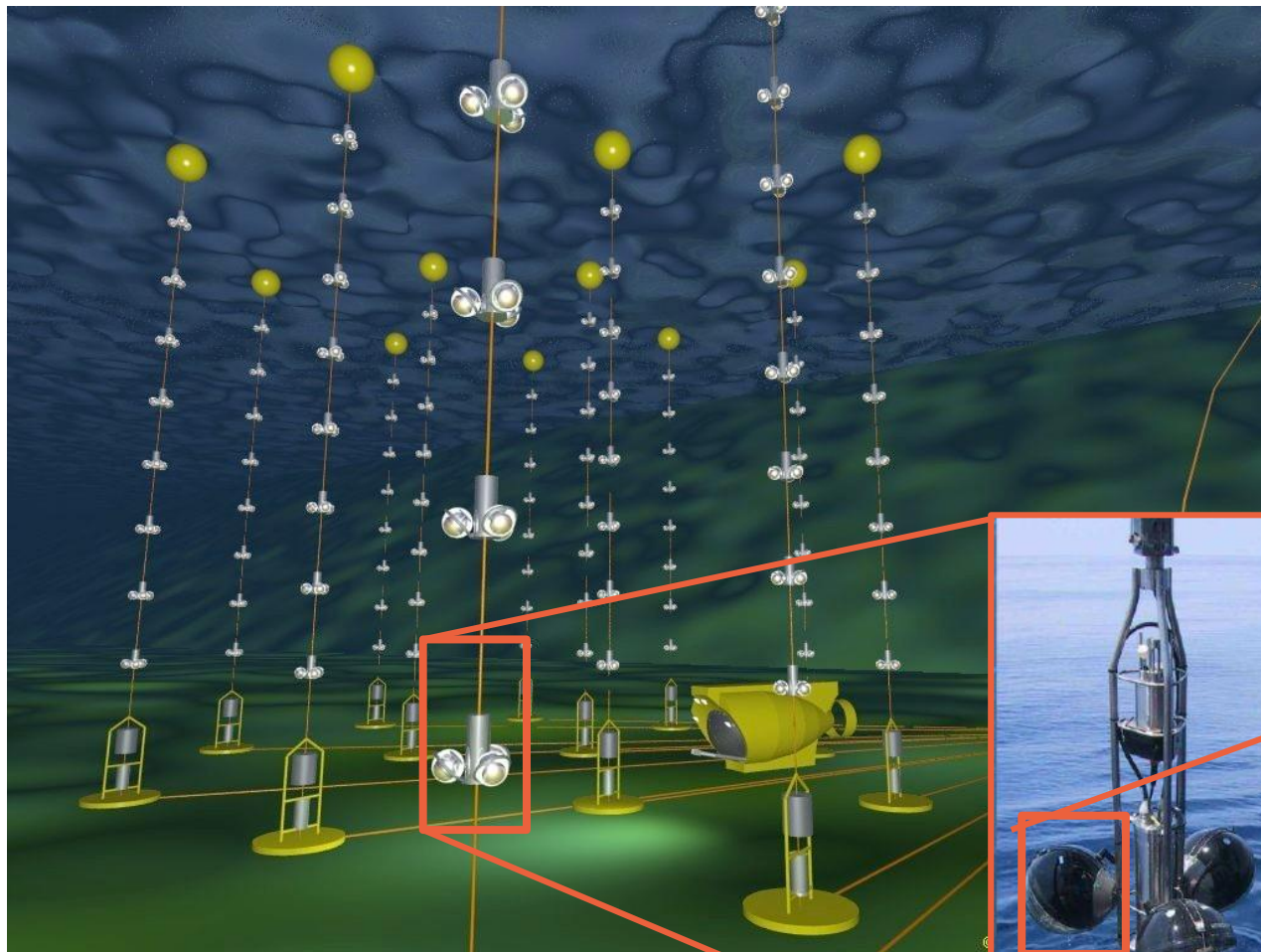
Most probable energy of the neutrino ~ 290 TeV

Fermi detects a flaring blazar within 0.06°



ANTARES

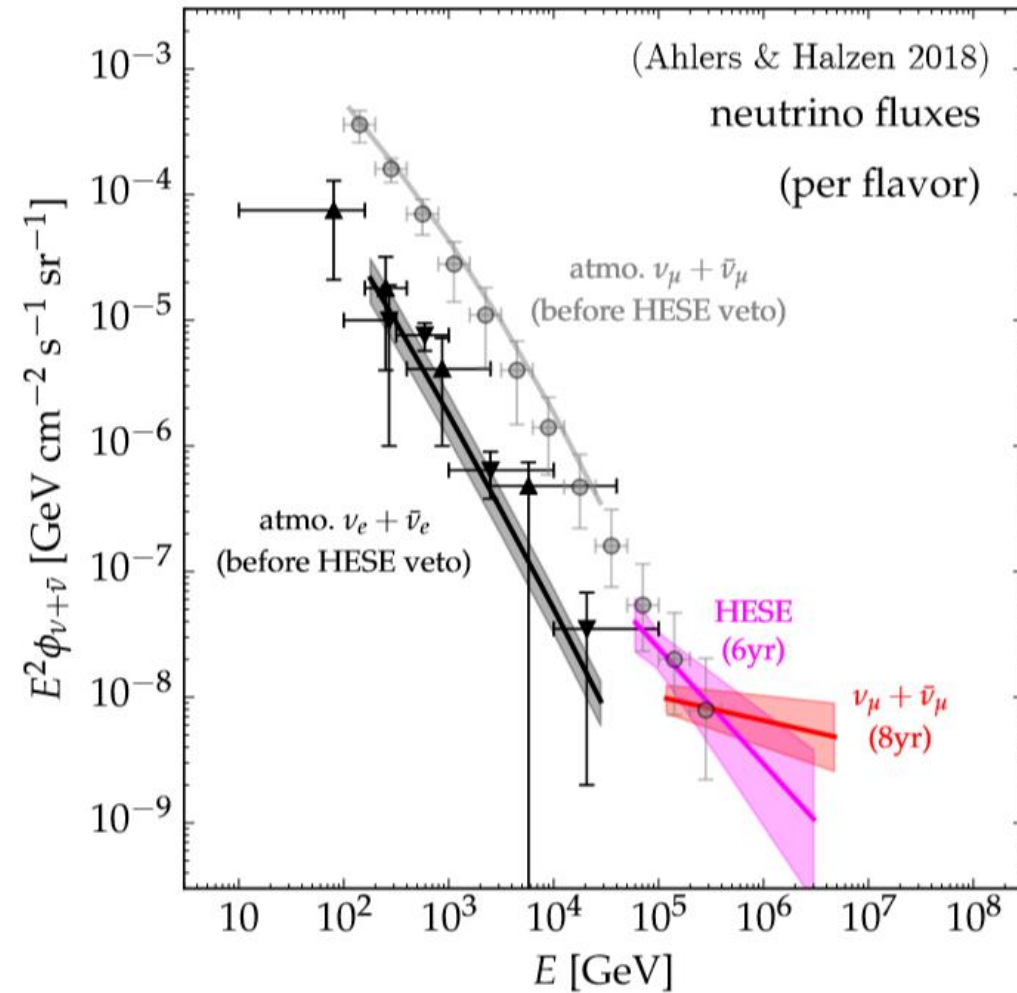
- Completed in 2008
- 12 strings
- 25 storeys per string
- 3 optical modules per storey
- ~ 12 Mton instrumented volume



885 optical modules on 12 strings
Operating for **12 yr** now

ANTARES OM:
10" Hamamatsu PMT

Diffuse neutrino flux : IceCube + ANTARES

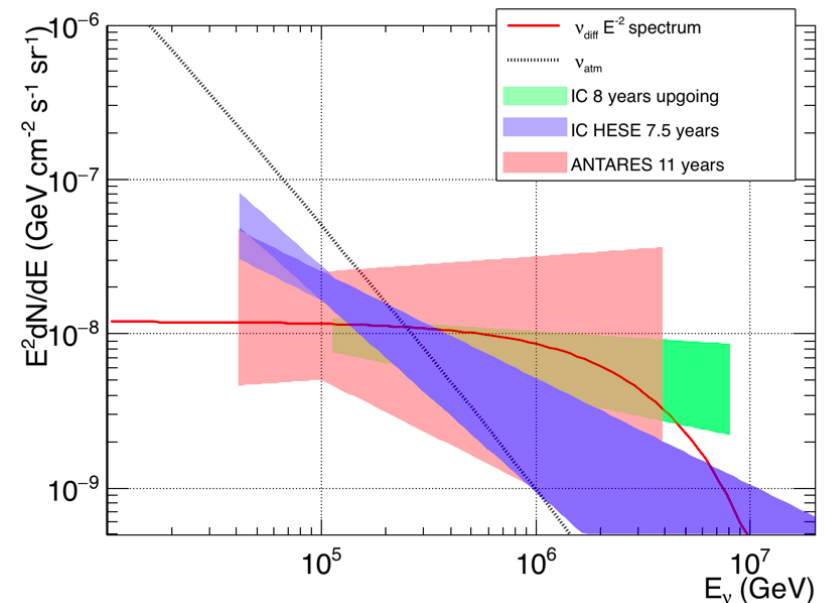


Adding ANTARES

Total: 50 events, simulation: 36.1 ± 8.7

→ 1.8 σ excess

Best fit $\Phi = 1.5 \pm 1 \cdot 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$
 $\gamma = 2.3 \pm 0.4$



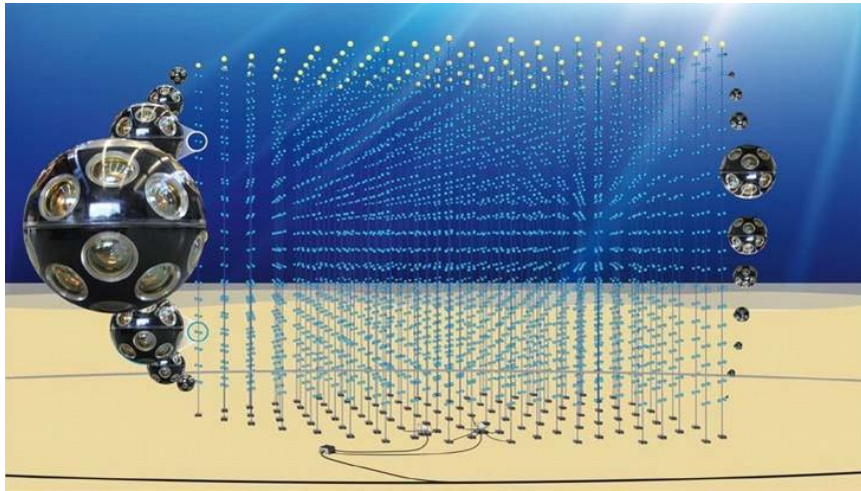
(D. Samtleben Neutrino 2020)

ApJ 853 (2018) L7

arXiv:1711.07212

KM3NeT - ARCA

Construction started



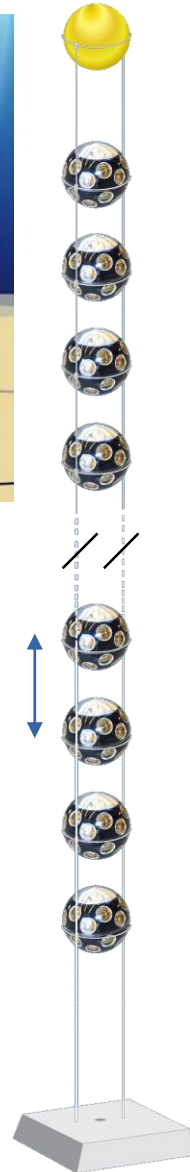
100 km offshore Sicily
Depth: 3400 m

2 x 115 strings
18 DOMs / string
31 PMTs / DOM
Total: **128 000 PMTs (3")**

Vertical spacing: 36 m
Horizontal spacing: 90 m

Volume : 1
km

36 m



Digital Optical Module



- 31 x 3" PMTs
- PMT HV
- LED & piezo
- FPGA readout
- DWDM

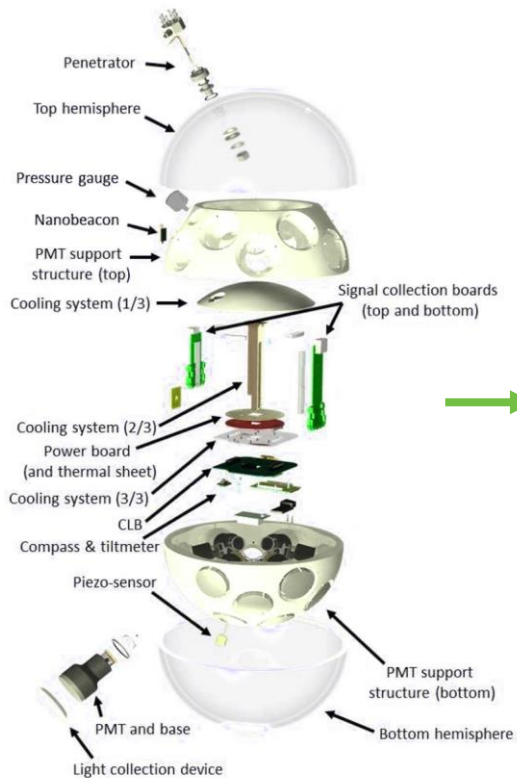
← 17" →

- ✓ Uniform angular coverage
- ✓ Directional information
- ✓ Digital photon counting
- ✓ All data to shore

photocathode
area similar to
a 17" PMT

Optical background (mainly
K): 5-10 kHz/PMT

KM3NeT assembly and deployment



DOM



DU



Watch <https://www.youtube.com/watch?v=tR8jwgG6uzk>

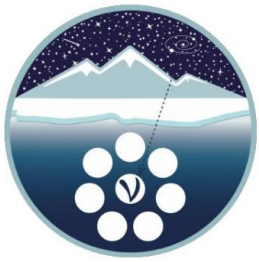
<https://youtu.be/7HKHW0hLxt4>

<https://youtu.be/g2Y0KD3kdXs>

<https://youtu.be/xTj4ILMv1Fw>

<https://youtu.be/XFPCfCoTfUg>

- Rapid deployment
- Autonomous unfurling
- Multiple DUs can be deployed in one sea operation



Baikal-GVD collaboration

10 organisations from 5 countries, ~70 collaboration members



- Institute for Nuclear Research RAS (Moscow)
- Joint Institute for Nuclear Research (Dubna)
- Irkutsk State University (Irkutsk)
- Skobeltsyn Institute for Nuclear Physics MSU (Moscow)
- Nizhny Novgorod State Technical University (Nizhny Novgorod)
- Saint-Petersburg State Marine Technical University (Saint-Petersburg)
- Institute of Experimental and Applied Physics, Czech Technical University (Prague, Czech Republic)
- EvoLogics (Berlin, Germany)
- Comenius University (Bratislava, Slovakia)
- Krakow Institute for Nuclear Research (Krakow, Poland)



Baikal-GVD site

Railway stop “106 km” of Circum-Baikal railway

Telescope is located 3.6 km away from shore

Constant lake depth:

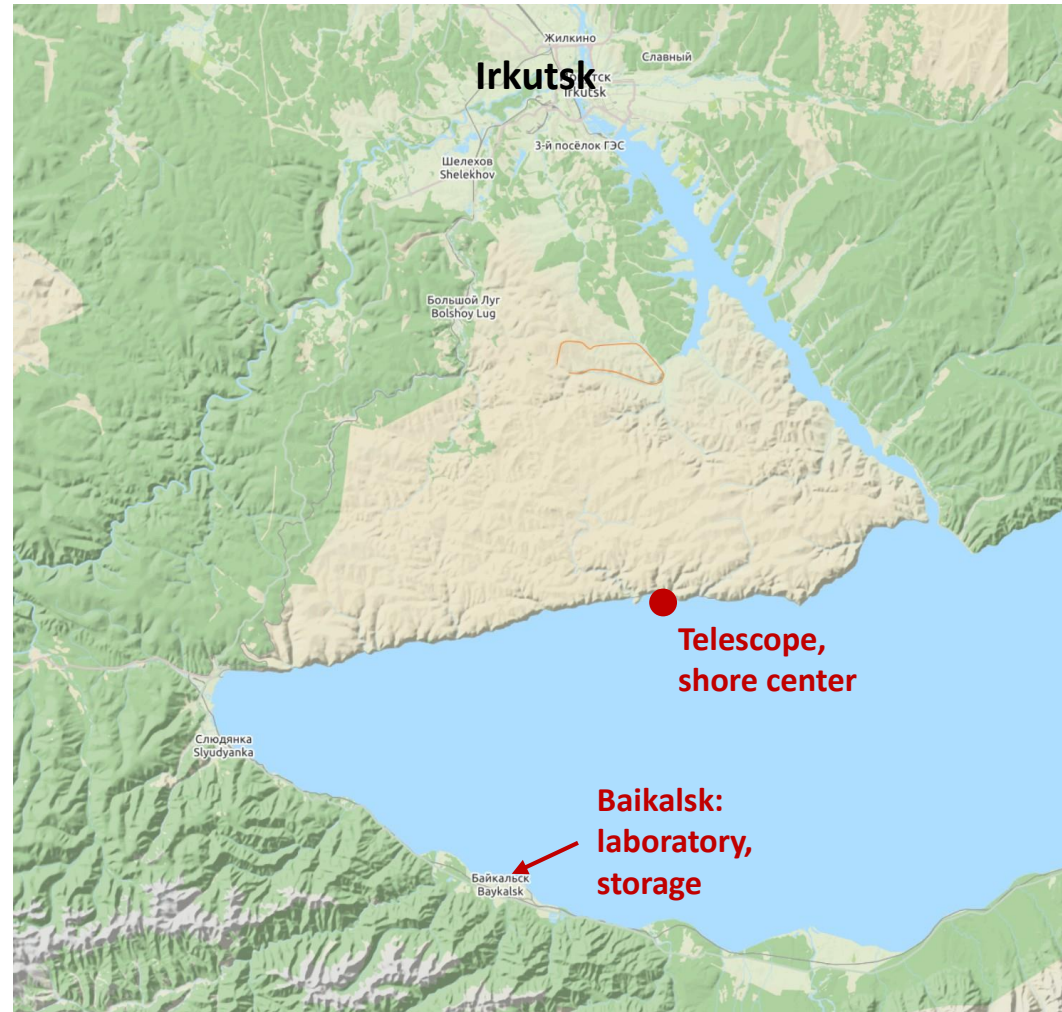
- 1366 - 1367 [m]

Water transparency:

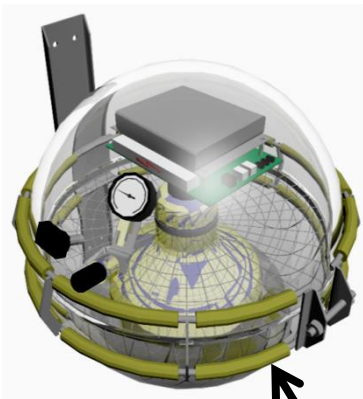
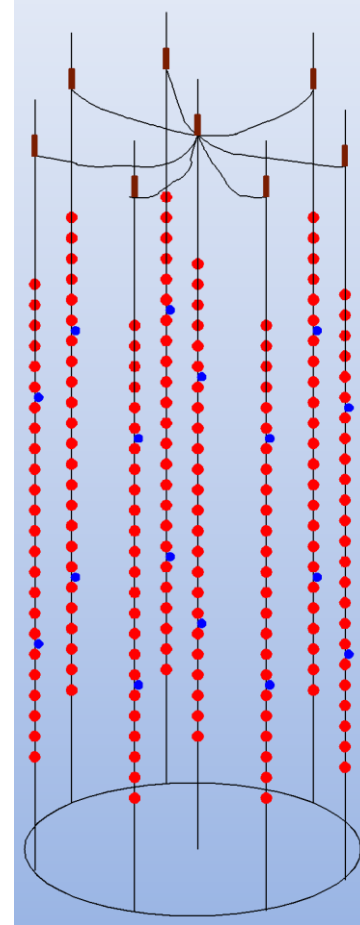
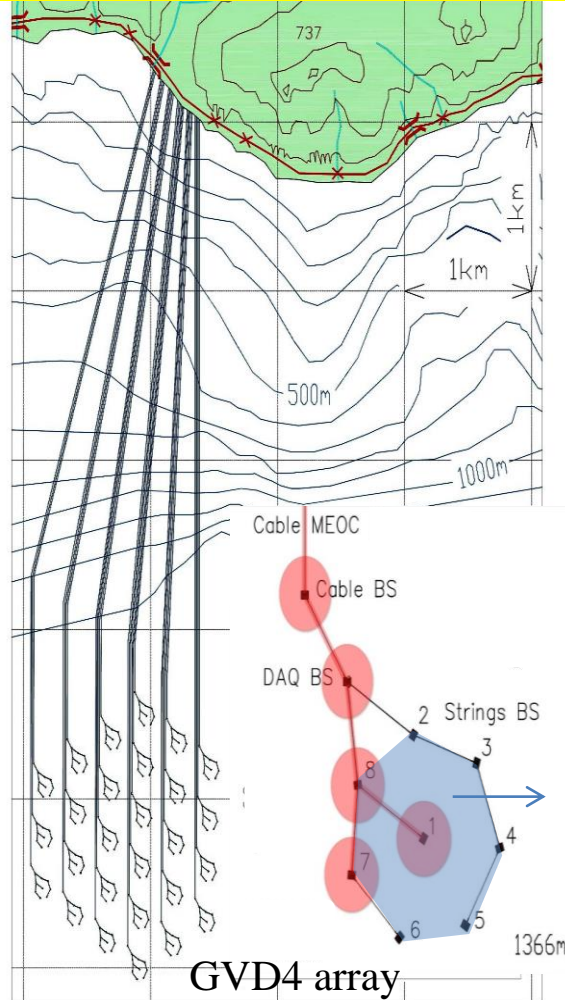
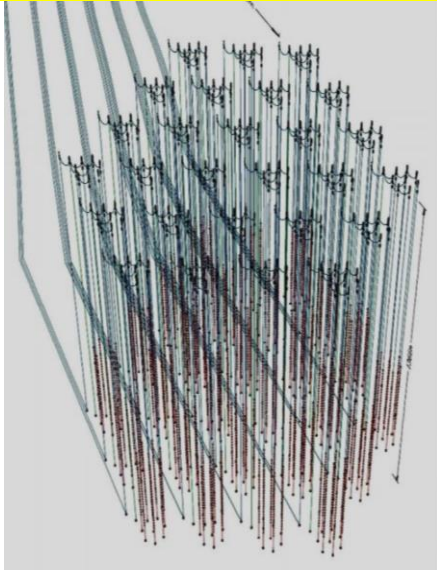
- Absorption length: 22 m
- Scattering length: 30 - 50 m

Stable ice cover for 6-8 weeks in February - April

- Detector deployment
- Maintenance



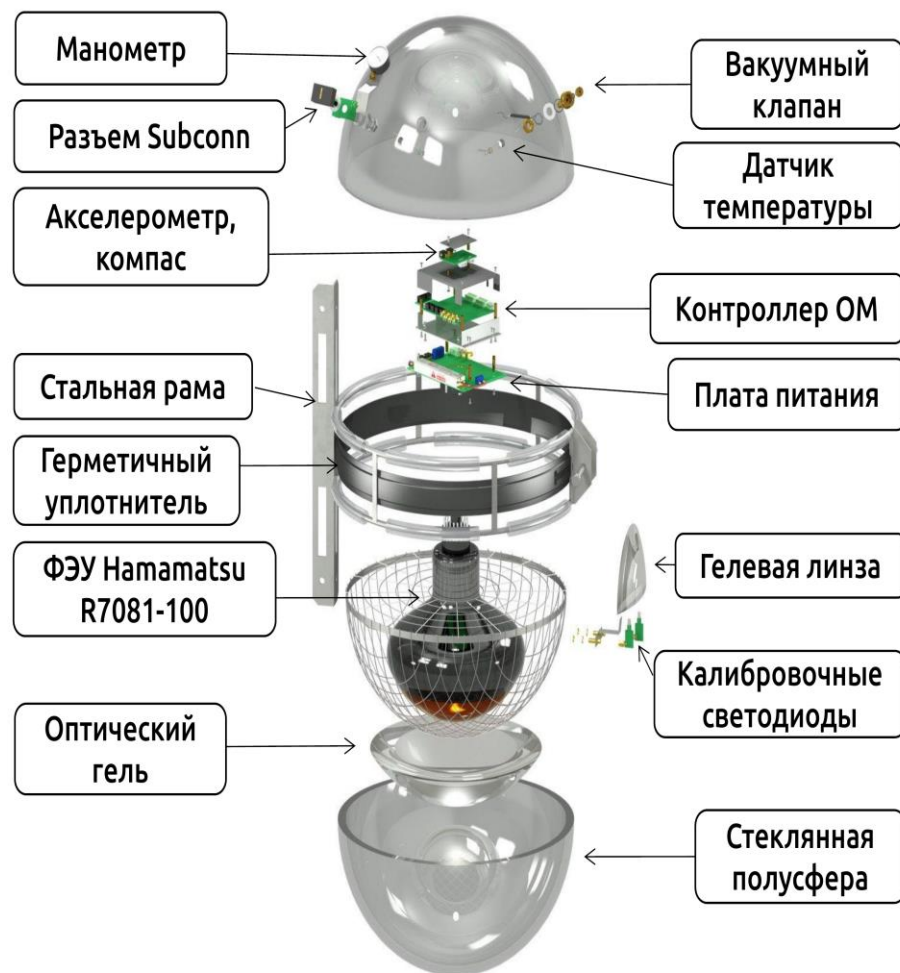
В настоящее время в развернуто семь кластеров Байкальского нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD.



10368 оптических детекторов в диапазоне глубин 600 – 1300 м объеме 1,5 км³

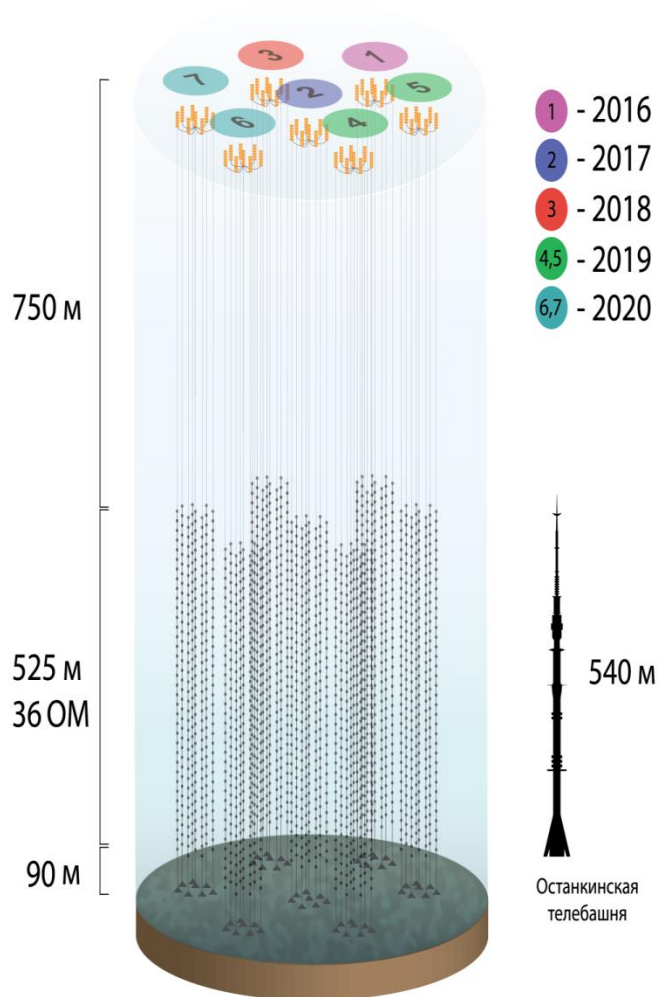
Детектор Baikal-GVD I

Чувствительный элемент телескопа: оптический модуль
По состоянию на 2020 год установлено 2016.

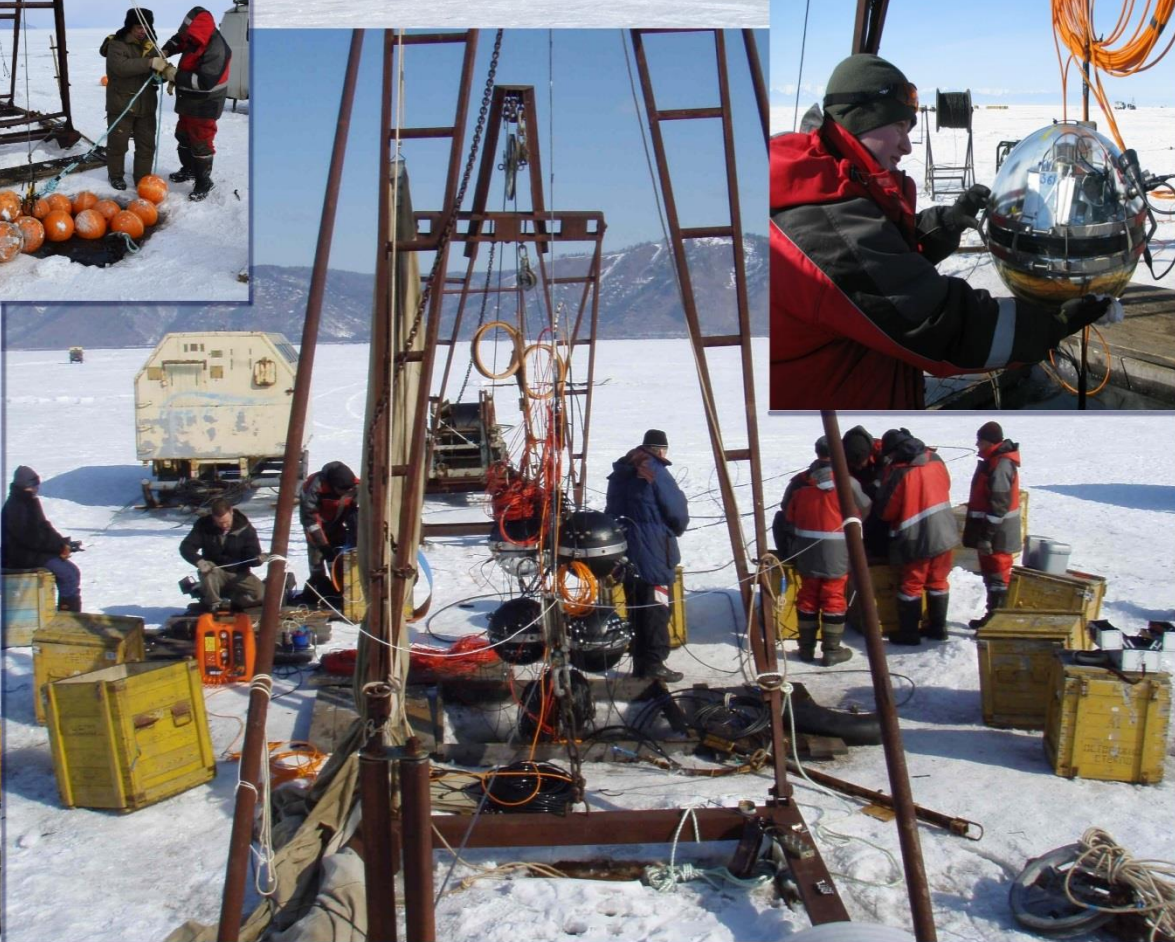
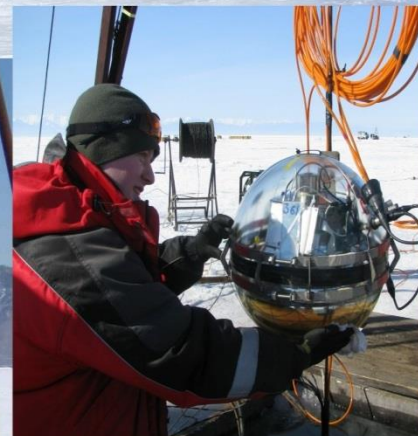


Детектор Baikal-GVD 2020

План развертывания детектора

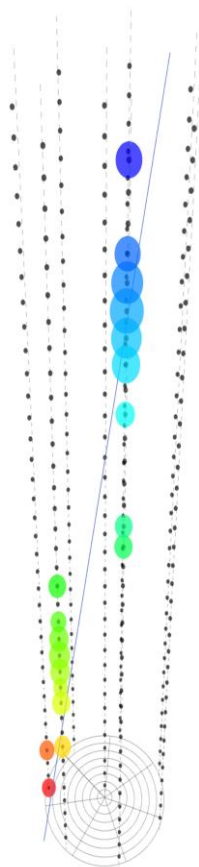


Год	Суммарное число кластеров	Число ОМ
2016	1	288
2017	2	576
2018	3	864
2019	5	1440
2020	7	2016
2021	9	2592

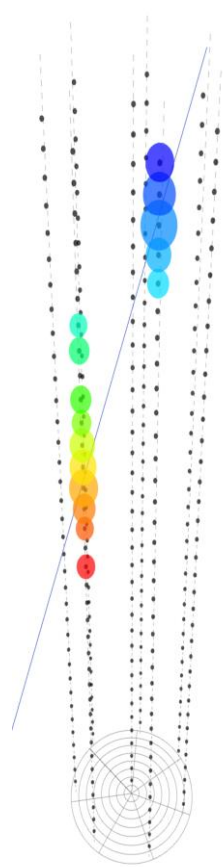




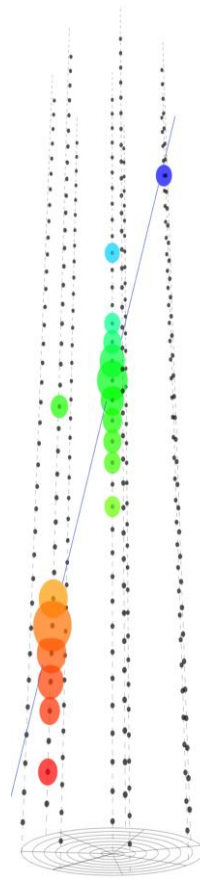
Muon neutrino candidates



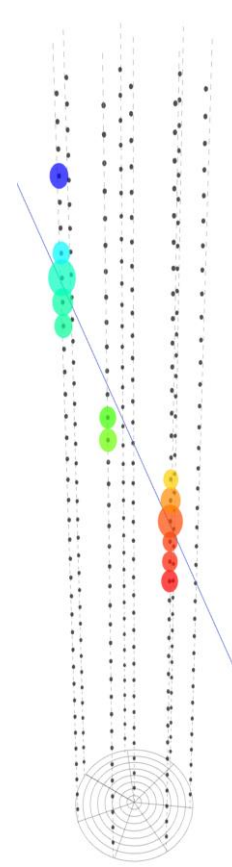
cluster 3, run
122
evt. 1549343
 $\theta_{\text{zenith}} = 169.78^\circ$
 $N_{\text{strings}} = 3$
 $N_{\text{strings}} = 19$



cluster 1, run
157
evt. 1414137
 $\theta_{\text{zenith}} = 161.78^\circ$
 $N_{\text{strings}} = 2$
 $N_{\text{strings}} = 15$



cluster 4, run 99
evt. 438088
 $\theta_{\text{zenith}} = 162.22^\circ$
 $N_{\text{strings}} = 3$
 $N_{\text{hits}} = 18$

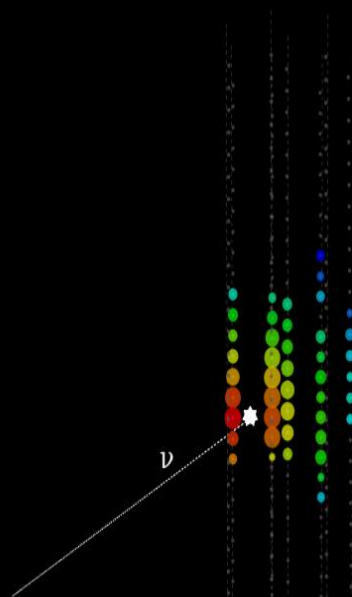


cluster 5, run
162
evt. 1939721
 $\theta_{\text{zenith}} = 148.07^\circ$
 $N_{\text{strings}} = 3$
 $N_{\text{hits}} = 13$

late



earl
y

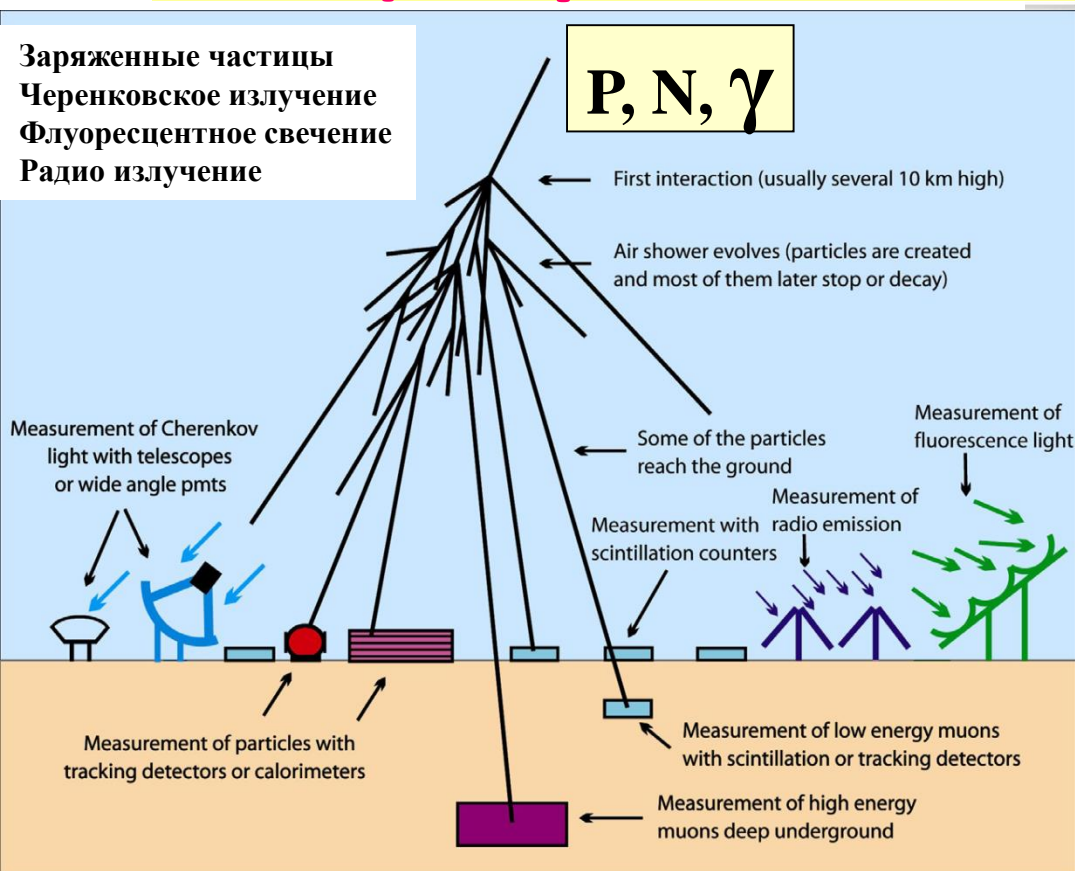


Один из первых
кандидатов на событие
от нейтрино
астрофизической
природы
Энергия 91 ТэВ. Дата
23.05.2019 год.
Первый кластер.

Исследования потоков заряженных частиц в Тункинской долине

Установка Тунка -133.

Широкие атмосферные ливни – каскады частиц в атмосфере (открыты Р. Auger в 1938 году)



Атмосфера – гигантский калориметр

EAS Energy

$$E = A \cdot [N_{ph}(200m)]^g$$

$$g = 0.94 \pm 0.01$$

Average CR mass A

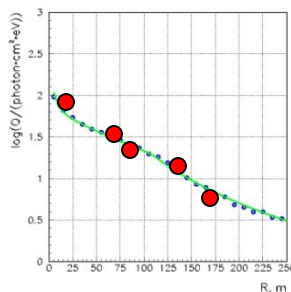
$$\ln A \sim X_{max}$$

$$X_{max} = C - D \cdot \lg \tau(400)$$

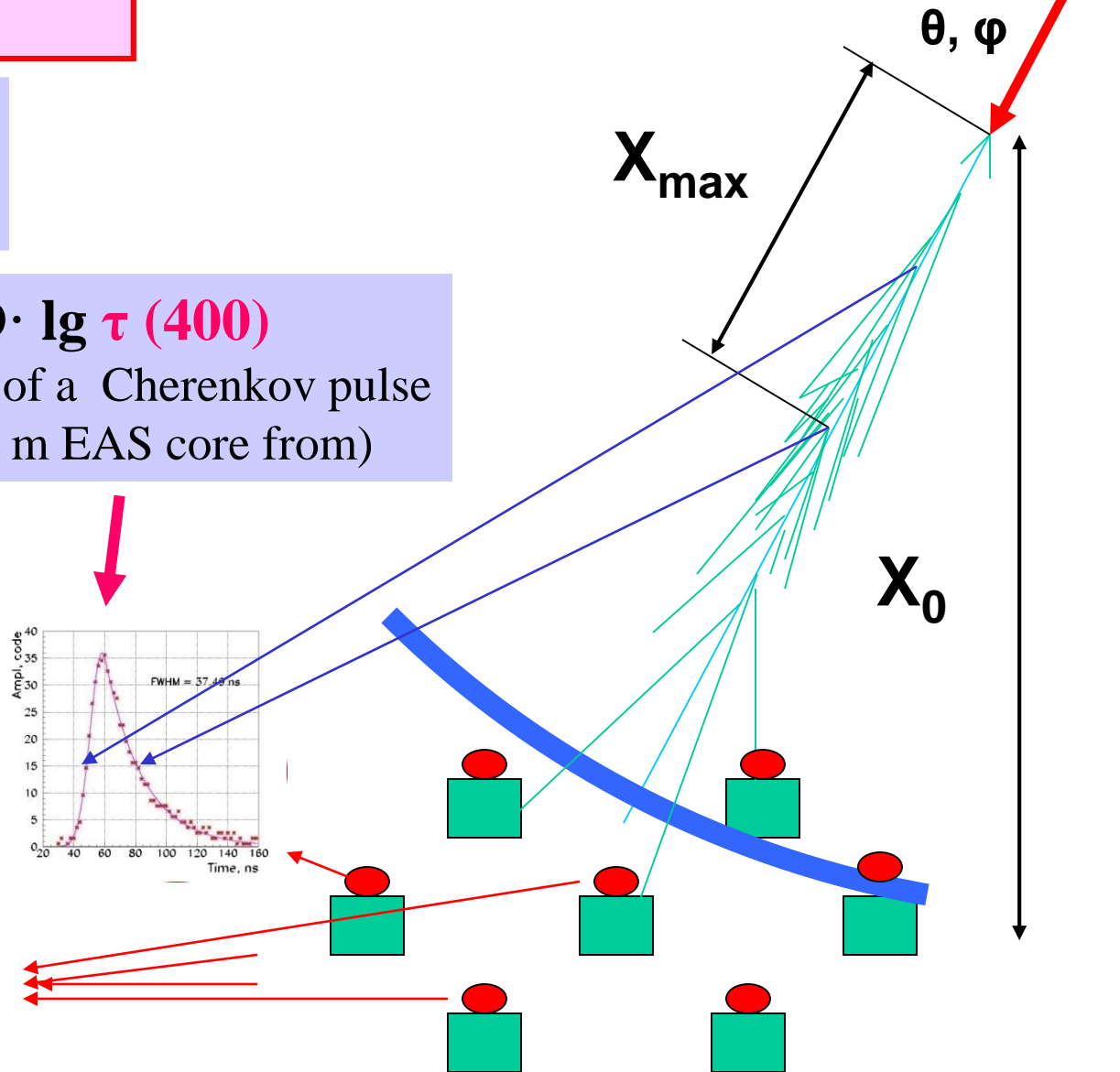
($\tau(400)$ - width of a Cherenkov pulse at distance 400 m EAS core from)

$$X_{max} = F(P)$$

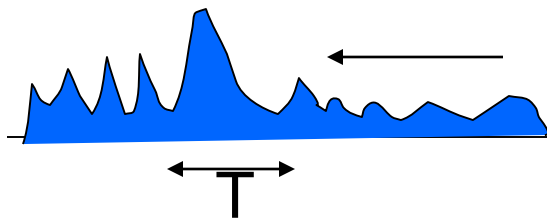
P - Steepness of a Lateral Distribution Function (LDF)



EAS Cherenkov light detection with non-imaging wide-angle detectors



Энергетический порог черенковских установок



Черенковский импульс на световом фоне
ночного неба

$$\frac{\text{Сигнал}}{\text{шум}} = \frac{S_d \cdot P_\phi \cdot \eta}{\sqrt{\Delta\Omega \cdot S_d \cdot I_\phi \eta \cdot T}} \approx 5$$

$$P_\phi \sim E - \text{энергия}$$

$$E_{\text{пор}} \sim \frac{\sqrt{I_\phi \cdot \Delta\Omega \cdot T}}{\sqrt{S_d \cdot \eta}}$$

S_d – площадь ФЭУ

η – квантовая
эффективность.

P_ϕ – поток черенковских
фотонов

T – длительность импульса
(20 – 40 нс)

$\Delta\Omega$ – угловая апертура

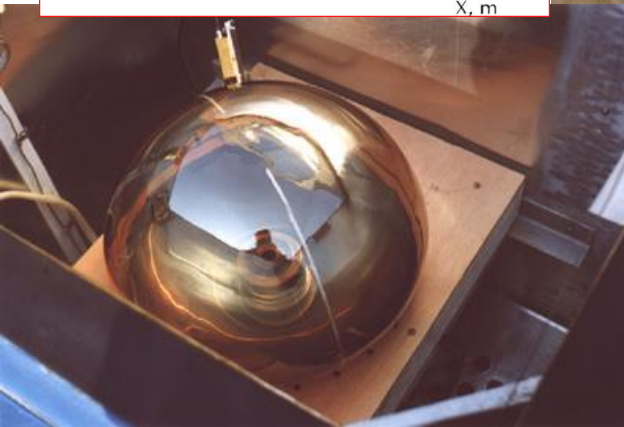
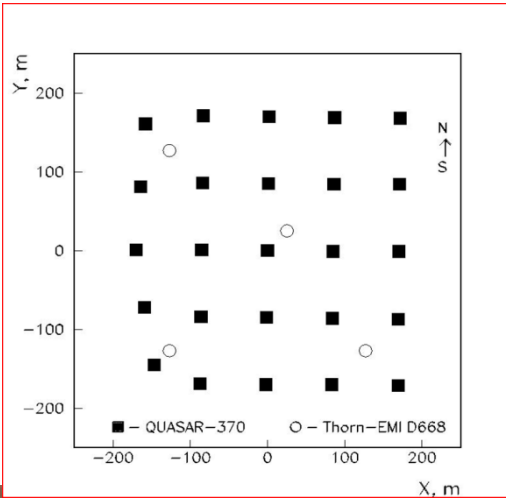
I_ϕ – фон ночного неба

$$\approx 2 \cdot 10^{12} \frac{\text{фотон}}{\text{м}^2 \text{сек}^{-1}}$$

Для $S_d \sim 0.1 \text{ м}^2$ и $\eta \approx 0.1$: $E_{\text{пор}} \approx 100 \text{ ТэВ}$

History of the EAS Cerenkov light study in the Tunka Valley

4. 1996 – 1999 – Tunka-13 – 13 QUASAR-370 PMT
5. 1998 – 2000 – QUEST (5 PMTs QUASAR-370 at EAS-TOP in LNGS).
6. 2000 – 2003 – Tunka-25, $S = 0.1 \text{ km}^2$ in the Tunka Valley –
Energy range $8 \cdot 10^{14} - 10^{16} \text{ eV}$.



Tunka Collaboration

N.M. Budnev, O.A. Chvalaev, O.A. Gress, A.V.Dyachok, E.N.Konstantinov, A.V.Korobchebko, R.R. Mirgazov, L.V. Pan'kov, A.L.Pahorukov, Yu.A. Semeney, A.V. Zagorodnikov

Institute of Applied Phys. of Irkutsk State University, Irkutsk, Russia;

S.F.Beregnev, S.N.Epimakhov, N.N. Kalmykov, N.I.Karpov E.E. Korosteleva, V.A. Kozhin, L.A. Kuzmichev, M.I. Panasyuk, E.G.Popova, V.V. Prosin, A.A. Silaev, A.A. Silaev(ju), A.V. Skurikhin, L.G.Sveshnikova I.V. Yashin,

Skobeltsyn Institute of Nucl. Phys. of Moscow State University, Moscow, Russia;

B.K. Lubsandorzhev, B.A. Shaibonov(ju) , N.B. Lubsandorzhev

Institute for Nucl. Res. of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

V.S. Ptuskin

IZMIRAN, Troitsk, Moscow Region, Russia;

Ch. Spiering, R. Wischnewski

DESY-Zeuthen, Zeuthen, Germany;

A.Chiavassa, G. Navarra

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



Anthony M. Hillas

Gianni Navarra

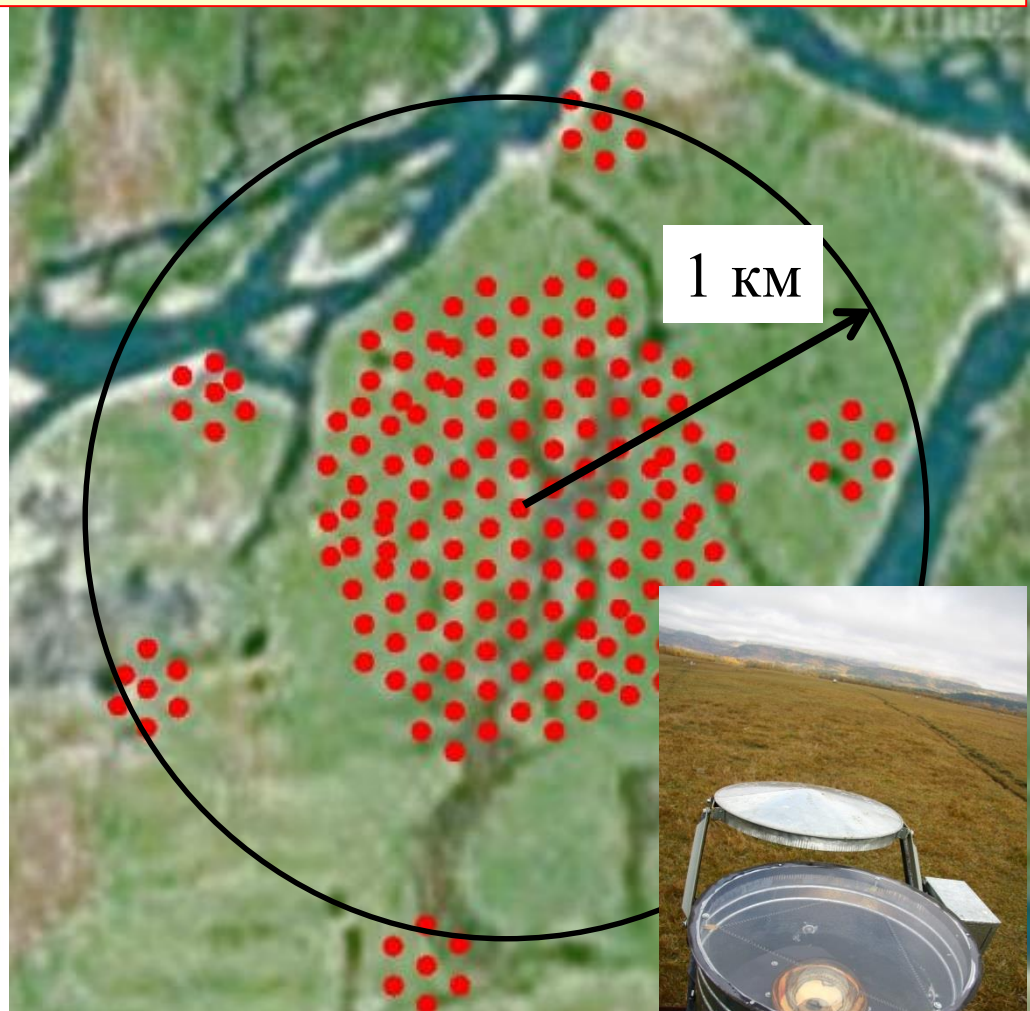


Торжественный пуск
Установки (сентябрь 2009)

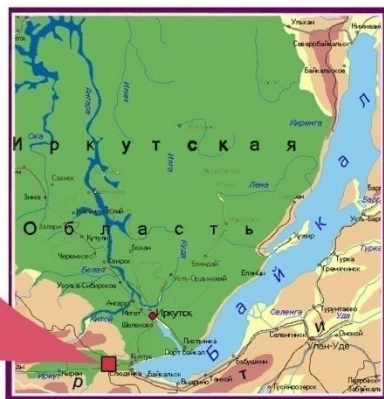
Summer 2006



Тунка-133 – крупнейшая в мире установка для исследования космических лучей Черенковским методом (2006-2012 г.)



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



50 km from Lake Baikal



Установка Тунка-133

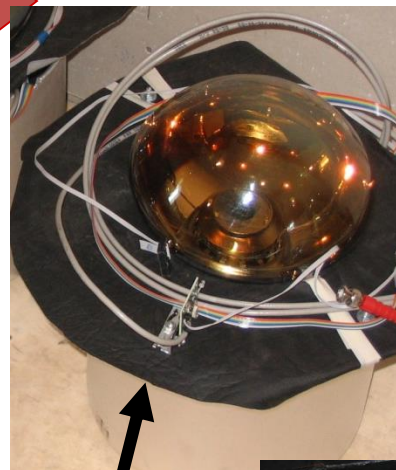
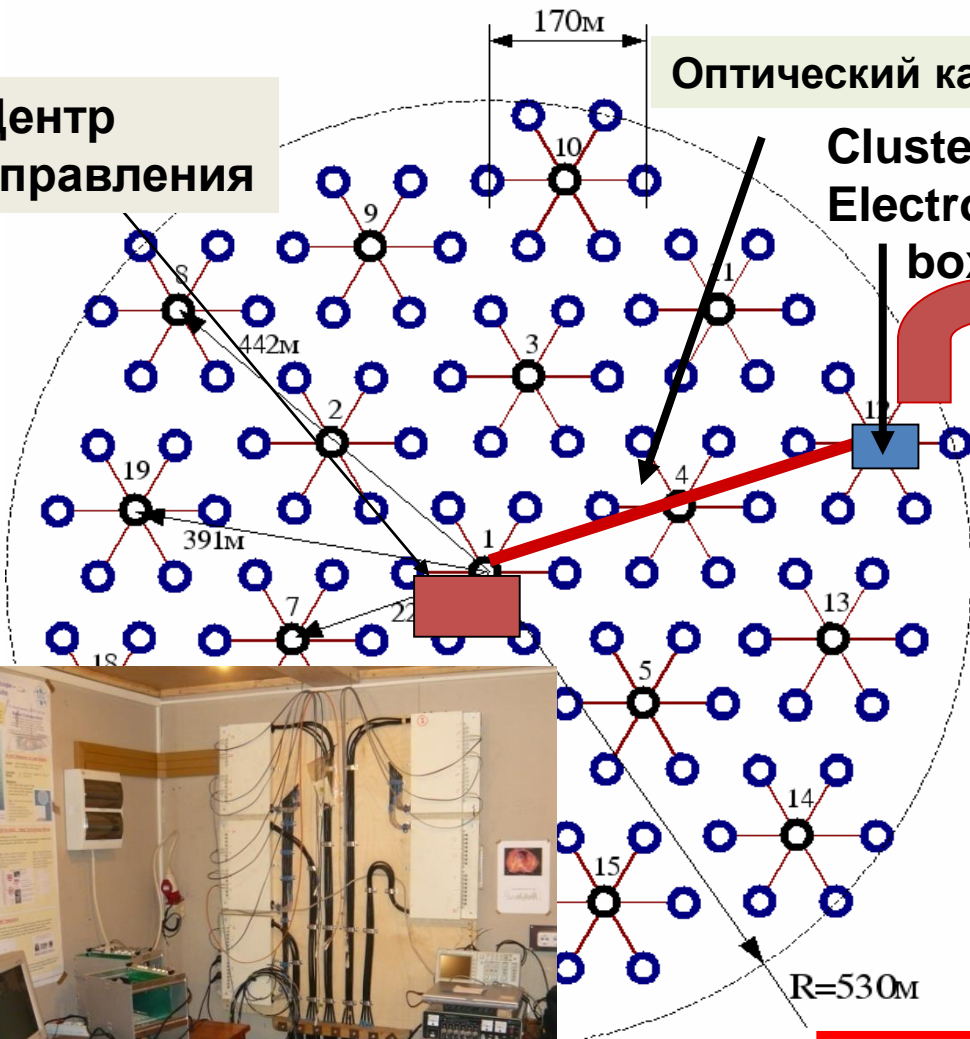
Центр управления

Оптический кабель

Cluster Electronic box

Оптический детектор

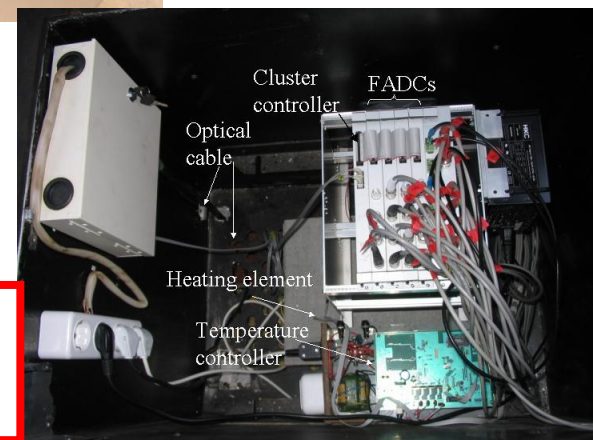
Электроника



EMI 9350
Ø 20 cm



4 channel FADC
200 MHz, 12 bit

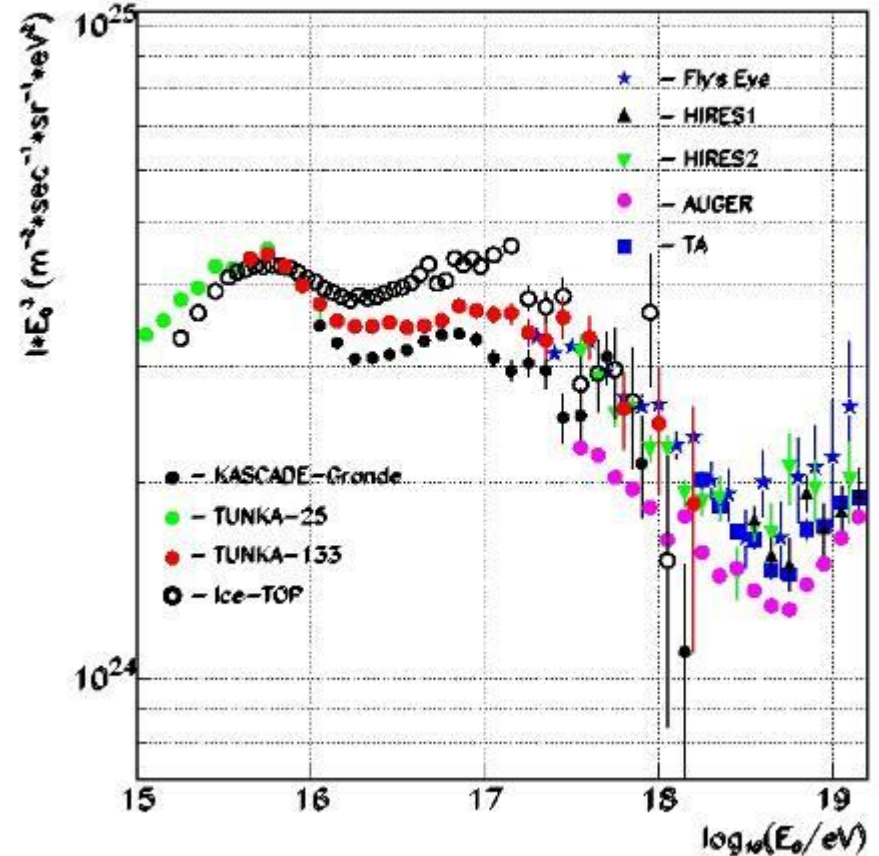
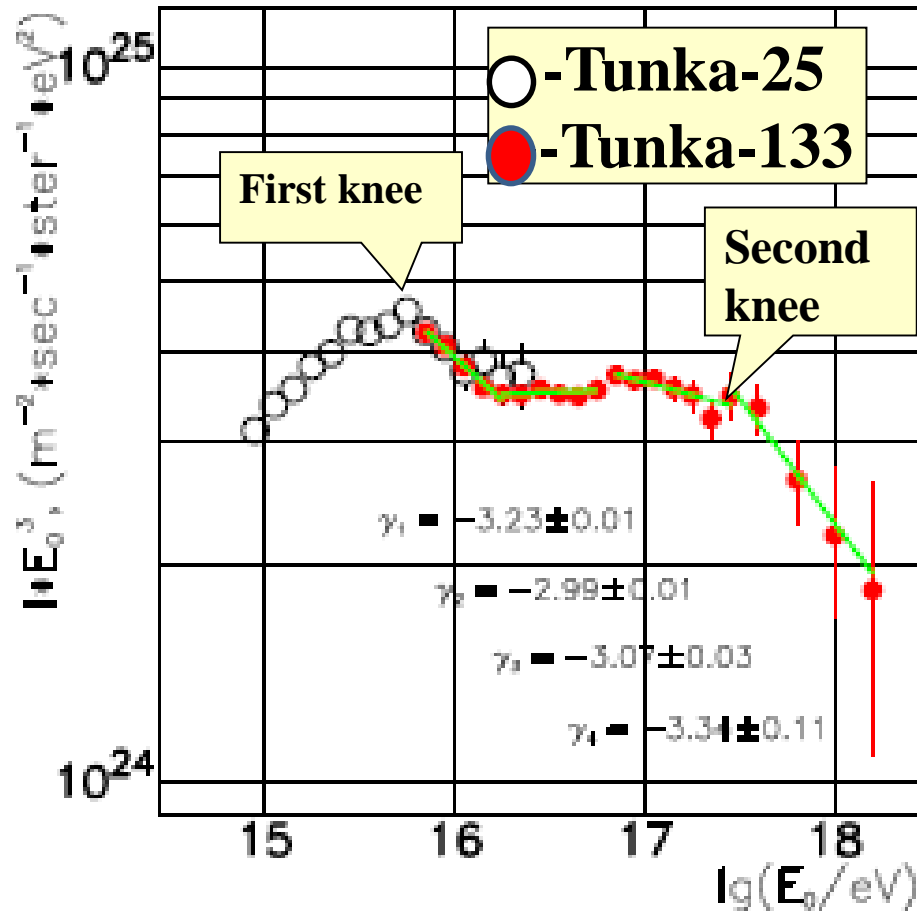


Advantage of the Tunka-133 array:

1. Good accuracy positioning of EAS core (5 -10 m)
2. Good energy resolution ($\sim 15\%$)
2. Good accuracy of primary particle mass identification (accuracy of X_{\max} measurement $\sim 20 -25 \text{ g/cm}^2$).
3. Good angular resolution (~ 0.5 degree)
4. Low cost: **the Tunka-133 – 3 km² array $\sim 10^6$ Euro**

Энергетический спектр космических лучей $I(E) \cdot E^3$

точность измерений $\sim 15\%$



1. Agreement with KASCADE-Grande, Ice-TOp and TALE (TA Cherenkov).
2. The high energy tail do not contradict to the Fly's Eye, HiRes and TA spectra..

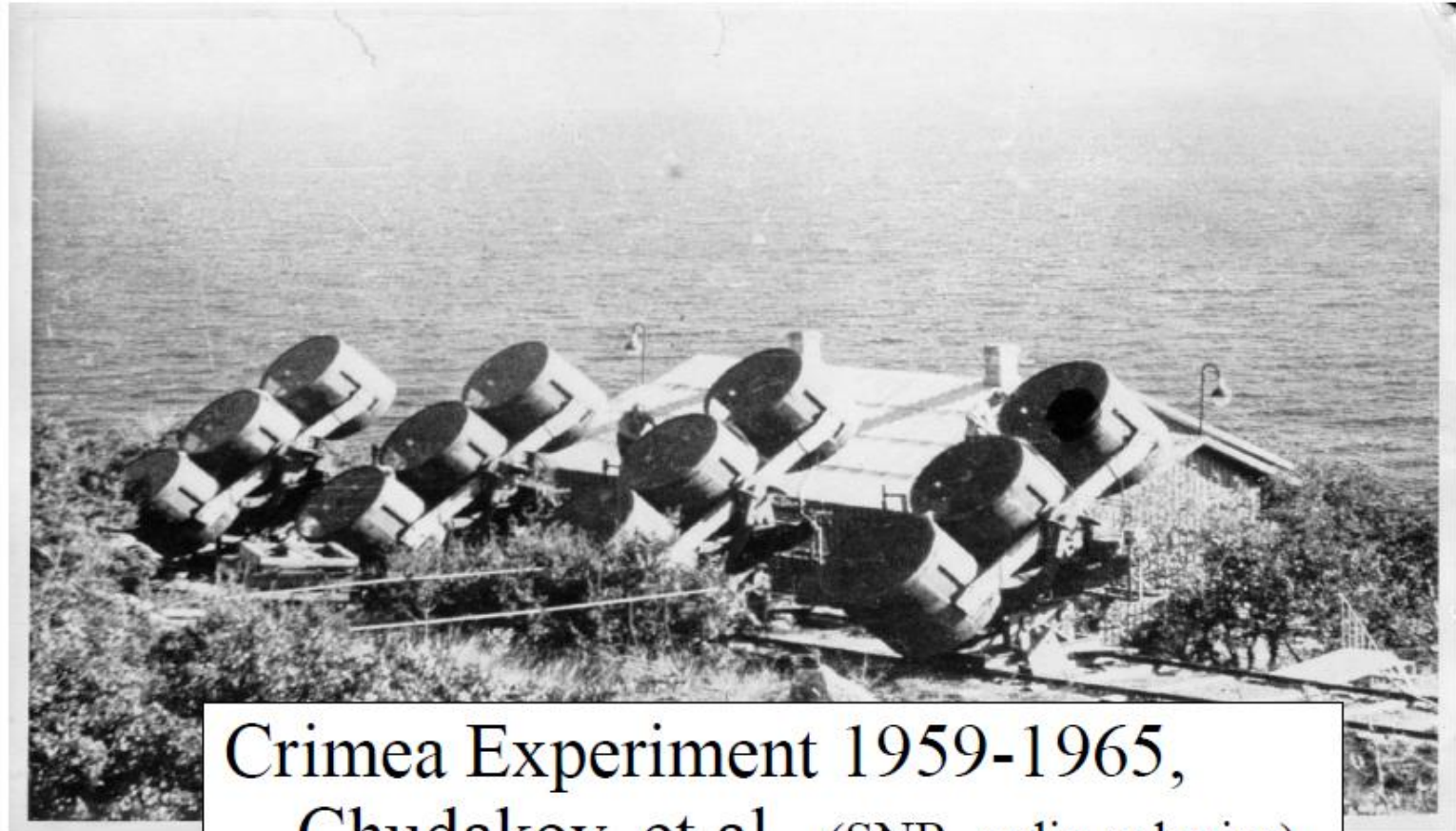
Гамма-астрономия в Тункинской долине

Гамма – обсерватория TAIGA



1921-2001

Alexander Chudakov and the Cherenkov Technique for Gamma Ray Astronomy



Crimea Experiment 1959-1965,
Chudakov, et al., (SNR, radio galaxies)

The Pioneer Trevor Weekes and his 10m Ø Whipple telescope gave birth to γ -ray astrophysics: 9σ from Crab Nebula in 1988 !

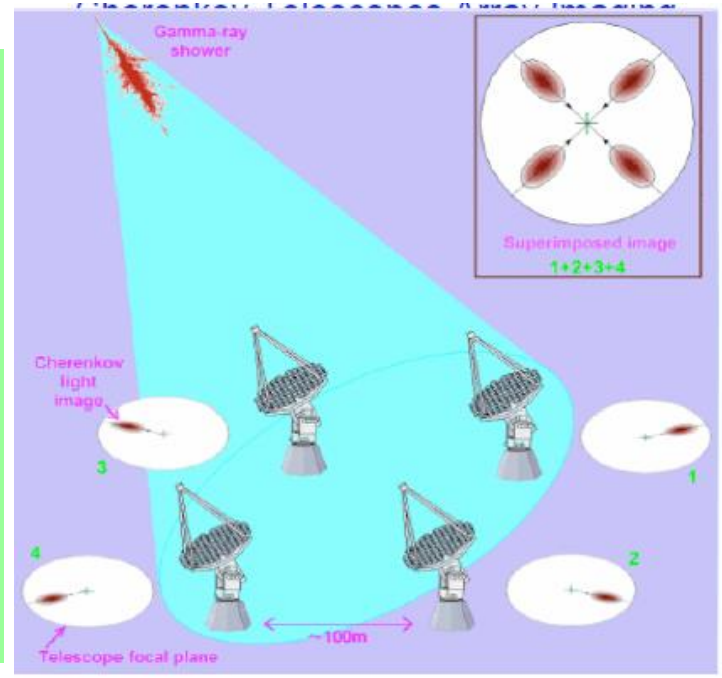


„Если телескоп может в течение нескольких секунд испарить твердый кусок стали, он также может измерять гамма-лучи“

; -)

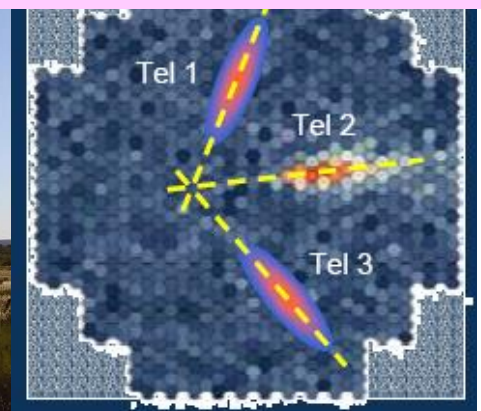
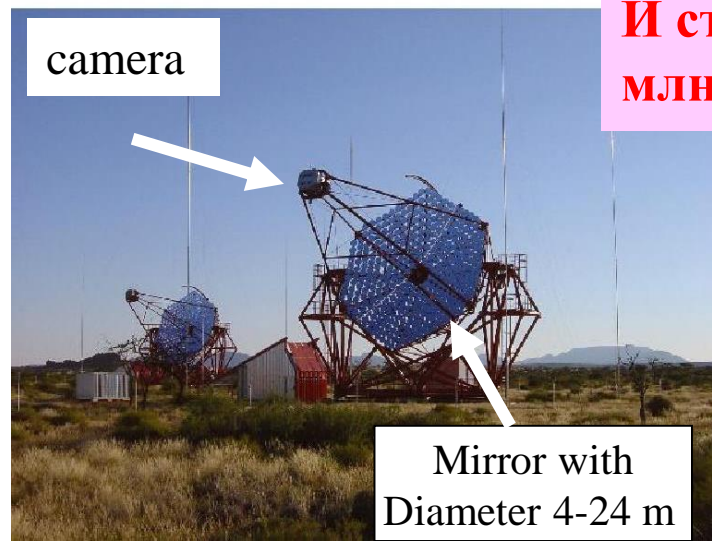
Все открытия в гамма- астрономии сделаны с помощью Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope (IACT)

HEGRA
HESS
MAGIC
VERITAS
S ~ 0.01 km²
Future Project
CTA

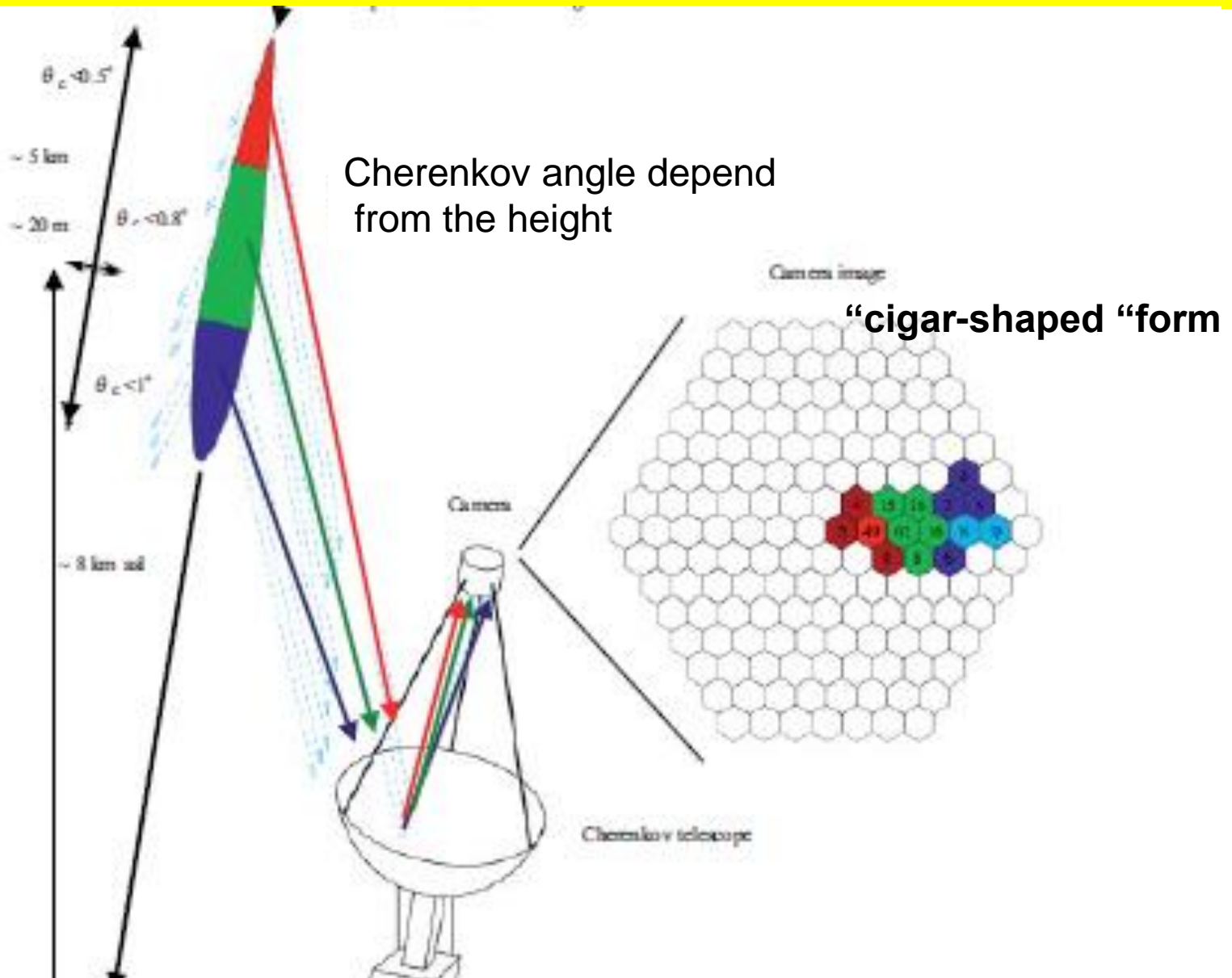


Больше 200 источников гамма-квантов с энергией выше 1 ТэВ открыто с помощью установок на базе IACT.
Но не зарегистрировано только несколько гамма-квантов с энергией выше 50 TeV.
Для этого нужны установки площадью не менее 1 km²
И стоимостью 100 млн.Евро/км²!!!!

IACT – имеют составное Зеркало диаметром 4 –24м, и многоканальную камеру, в котором фиксируется Черенковское изображение ШАЛ



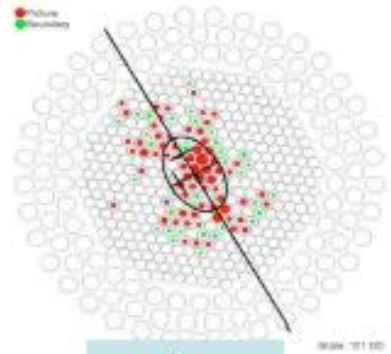
The formation of an image from EAS



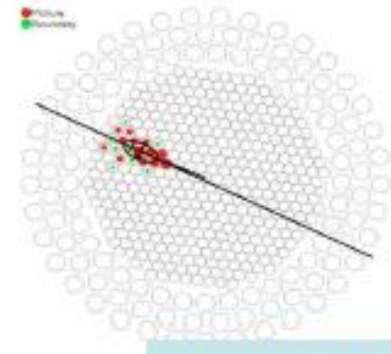


Types of images seen by atmospheric Cherenkov camera

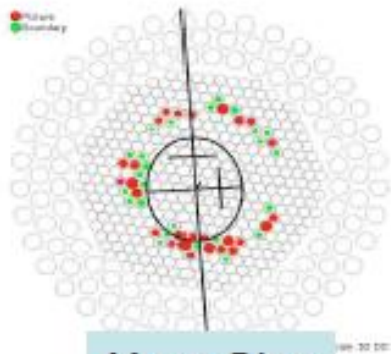
Whipple 10 m Reflector and Camera, 1984
Prototype Imaging System



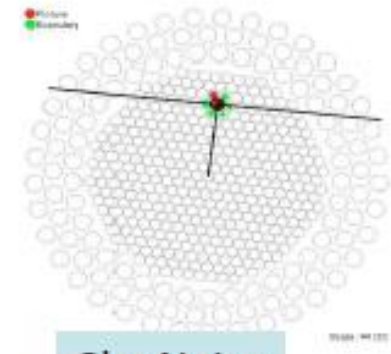
Hadron



Gamma ray

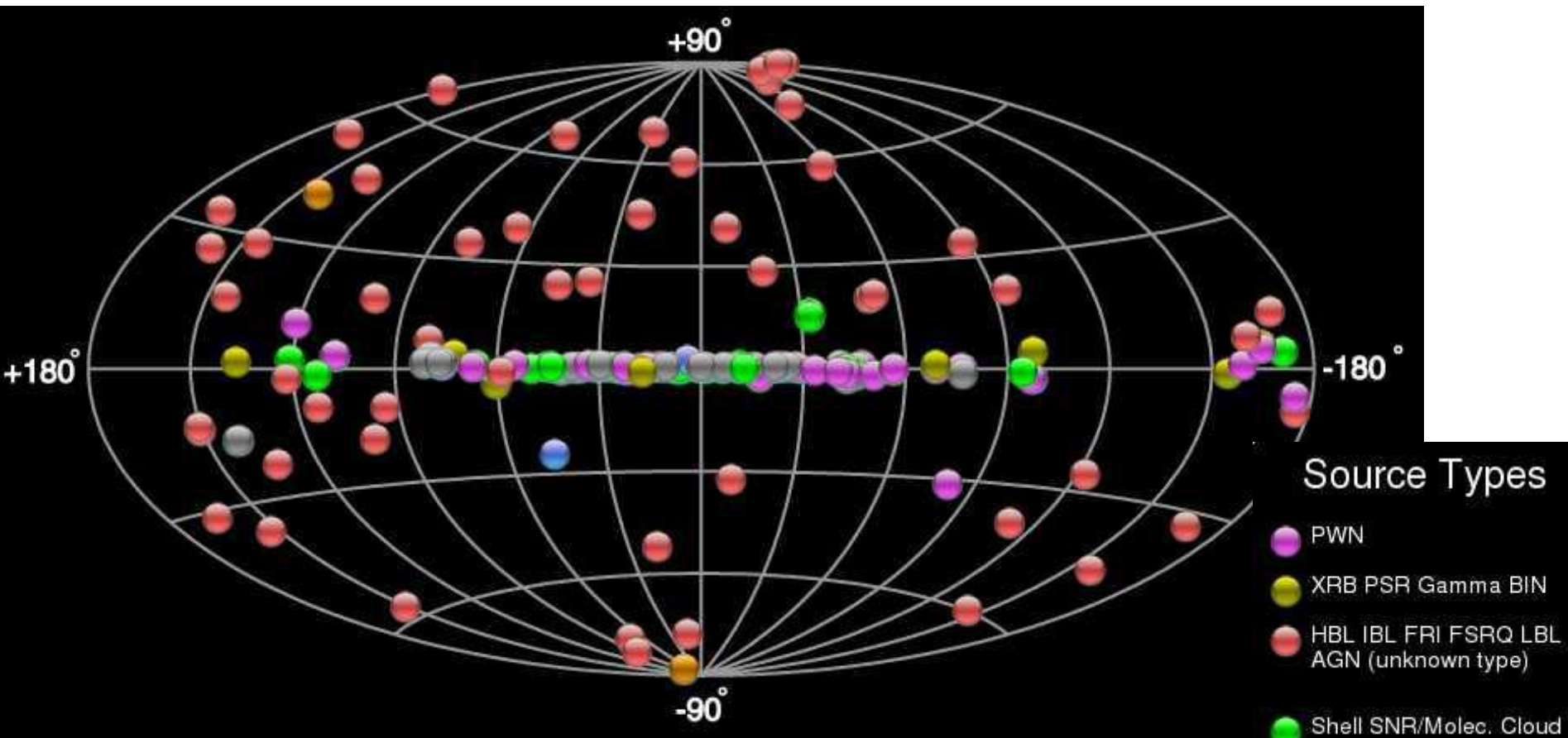


Muon Ring



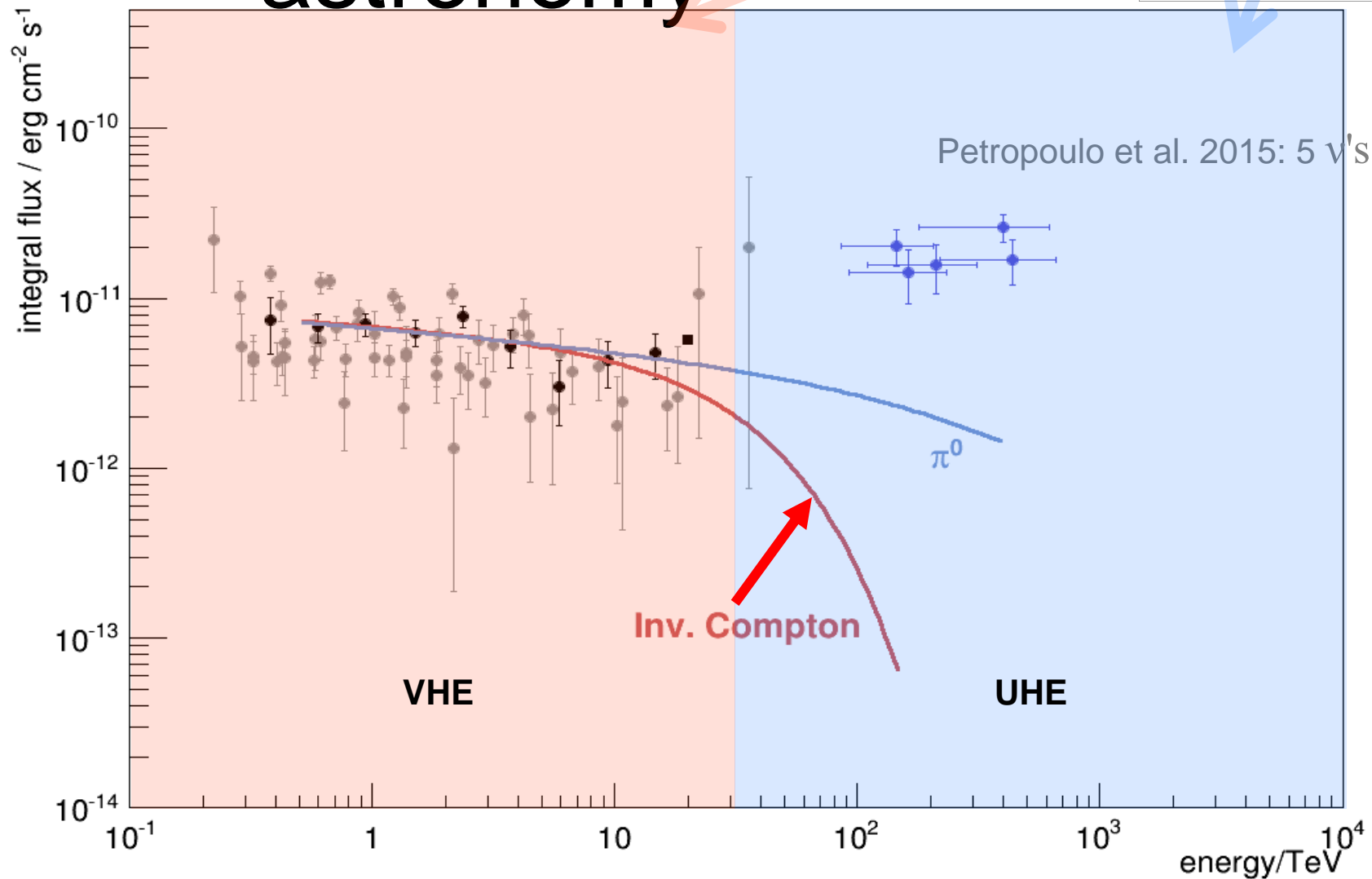
Sky Noise

Карта неба в гамма излучении с $E > 1$ ТэВ



> 200 локальных гамма источников

VHE-UHE Gamma-ray astronomy



**С помощью установки Tunka-133 показана перспективность
развитых при ее создании технологий для исследований природы
Галактических источников сверхвысоких энергий, это
стимулировало создание **TAIGA-Collaboration****

-  **Irkutsk State University (ISU), Irkutsk, Russia**
-  **Scobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Moscow State University (SINP MSU),
Moscow, Russia**
-  **Institute for Nuclear Research of RAS (INR), Moscow, Russia**
-  **Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation of RAS
(IZMIRAN), Troitsk, Russia**
-  **National Research Nuclear University (MEPhI), Moscow, Russia**
-  **Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (BINP), Novosibirsk, Russia**
-  **Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russia**

- Joint Institute of Nuclear Physics (JIRN), Dubna**
-  **Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY), Zeuthen, Germany**
-  **Institut für Experimentalphysik, University of Hamburg (UH), Germany**
-  **Max-Planck-Institut für Physik (MPI), Munich, Germany**
-  **Institut für Kernphysik, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany**
-  **Fisica Generale Università di Torino and INFN, Torino, Italy**
-  **ISS , Bucharest, Rumania**

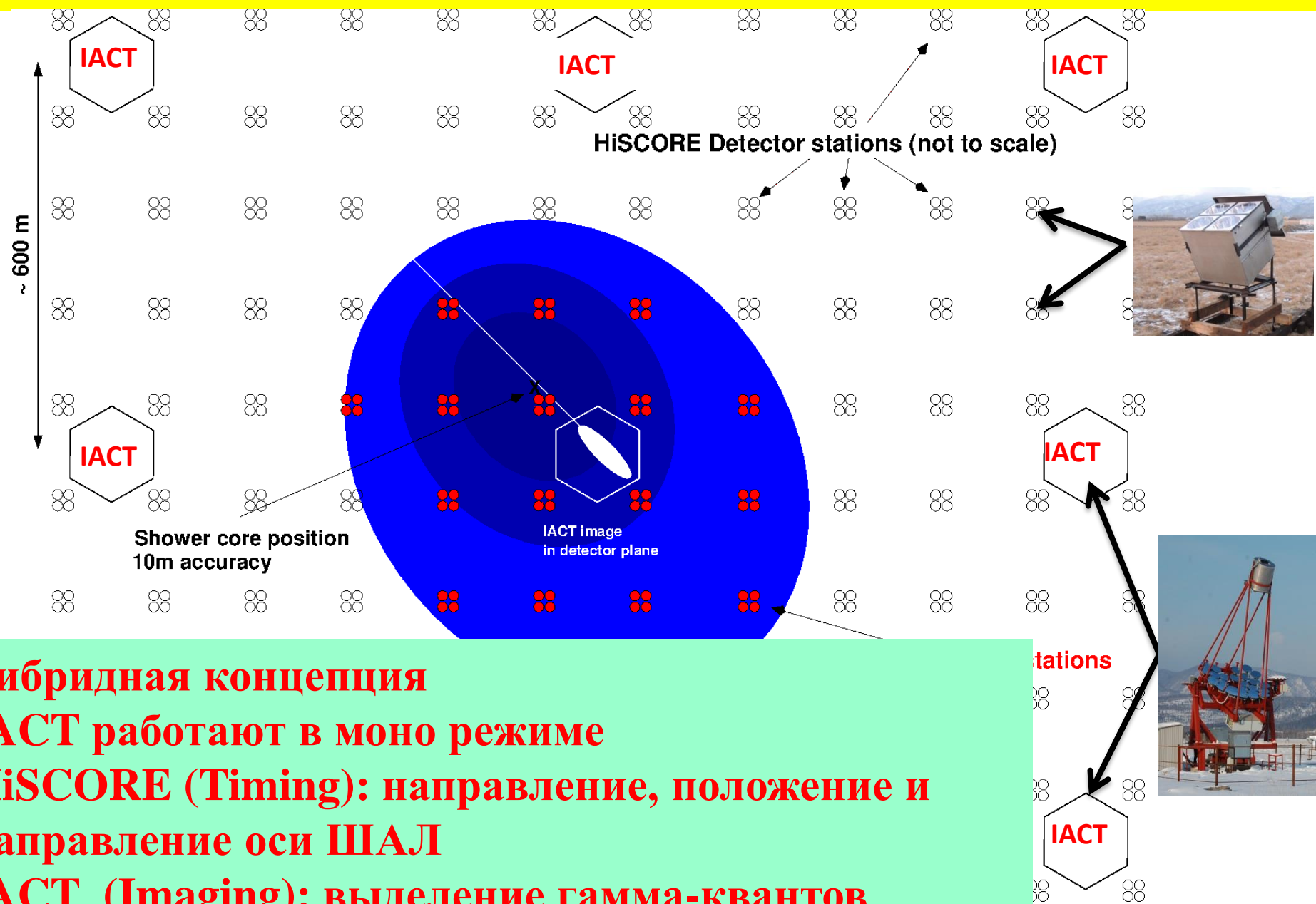
TAIGA - Collaboration



-  **Irkutsk State University (ISU), Irkutsk, Russia**
-  **Scobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Moscow State University (SINP MSU), Moscow, Russia**
-  **Institute for Nuclear Research of RAS (INR), Moscow, Russia**
-  **Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation of RAS (IZMIRAN), Troitsk, Russia**
-  **Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia**
-  **National Research Nuclear University (MEPhI), Moscow, Russia**
-  **Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (BINP), Novosibirsk, Russia**
-  **Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russia**
-  **Altay State University (ASU), Barnaul, Russia**

-  **Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY), Zeuthen, Germany**
-  **Institut für Experimentalphysik, University of Hamburg (UH), Germany**
-  **Max-Planck-Institut für Physik (MPI), Munich, Germany**
-  **Fisica Generale Universita di Torino and INFN, Torino, Italy**
-  **ISS , Bucharest, Rumania**

TAIGA: сочетание двух Черенковских технологий



Гибридная концепция
IACT работают в моно режиме
HiSCORE (Timing): направление, положение и направление оси ШАЛ
IACT (Imaging): выделение гамма-квантов

Main Topics for the TAIGA observatory

Gamma-ray Astronomy

Search for the PeVatrons.

VHE spectra of known sources:
where do they stop?

Absorption in IRF and CMB.

Diffuse emission: Galactic plane, Local
supercluster.

Charged cosmic ray physics

Energy spectrum and mass composition
anisotropies

from 10^{14} to 10^{18} eV.

10^8 events (in 1 km^2 array)
with energy $> 10^{14}$ eV

Particle physics

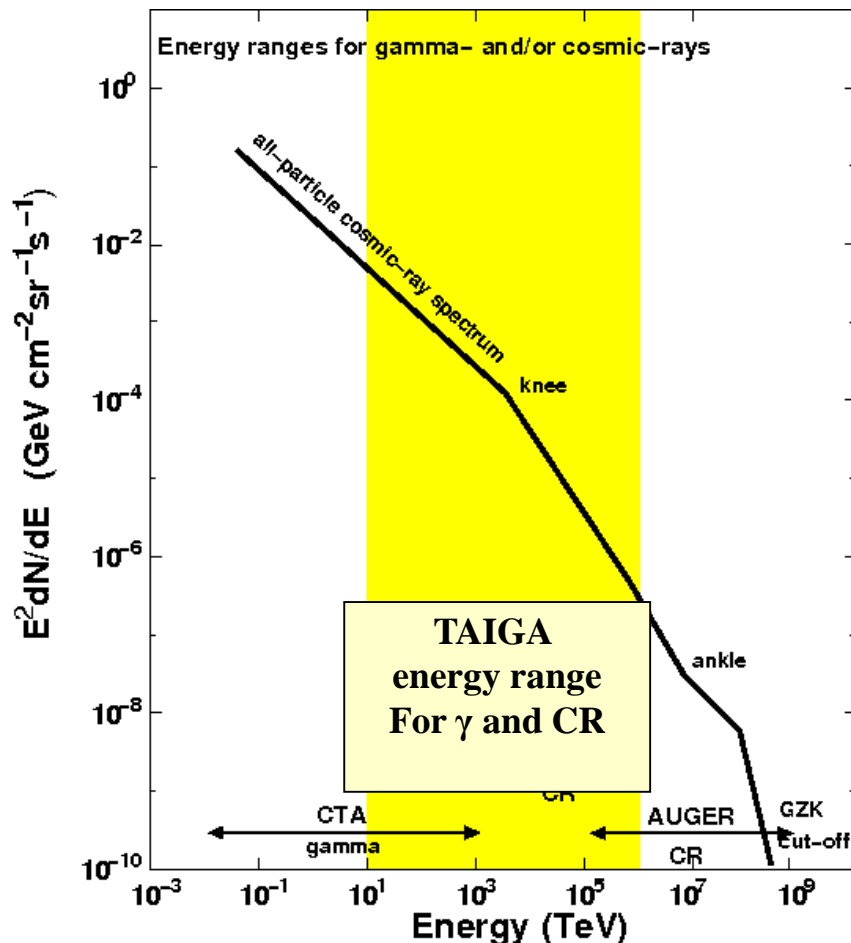
Axion/photon conversion.

Hidden photon/photon oscillations.

Lorentz invariance violation.

pp cross-section measurement.

Quark-gluon plasma.



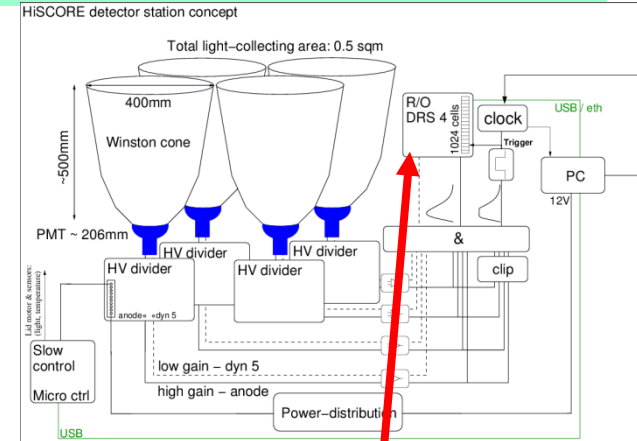
TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity Cosmic Origin Explorer)

- Wide-angle time- amplitude sampling non-imaging air Cherenkov array.
- Spacing between Cherenkov stations 80-120 m \sim 80 -150 channels / km².

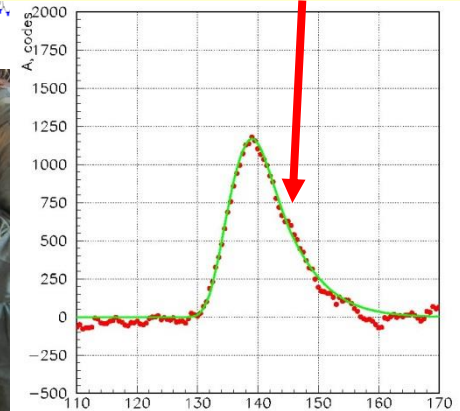
1. Accuracy positioning EAS core - 5 -6 m
 2. Angular resolution \sim 0.1 – 0.3 deg
 3. Energy resolution \sim 10 - 15%
 4. Accuracy of X_{\max} measure \sim 20 -25 g/cm²
 5. Large Field of view: \sim 0.6 sr
- Total cost \sim 2 · millions \$ (for 1 km²)**

Cosmic-ray / gamma-ray

Cherenkov light cone



DRS-4 board (0.5 ns step)

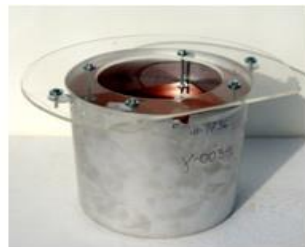


. Конструкция и элементы оптической станции установки TAIGA-HiSCORE



ФЭУ

+



**кронштейн
для ФЭУ**

+



конус Винстона

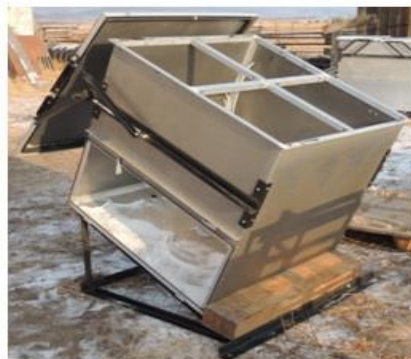
=



оптический модуль



× 4 +



**корпус оптической
станции**

=

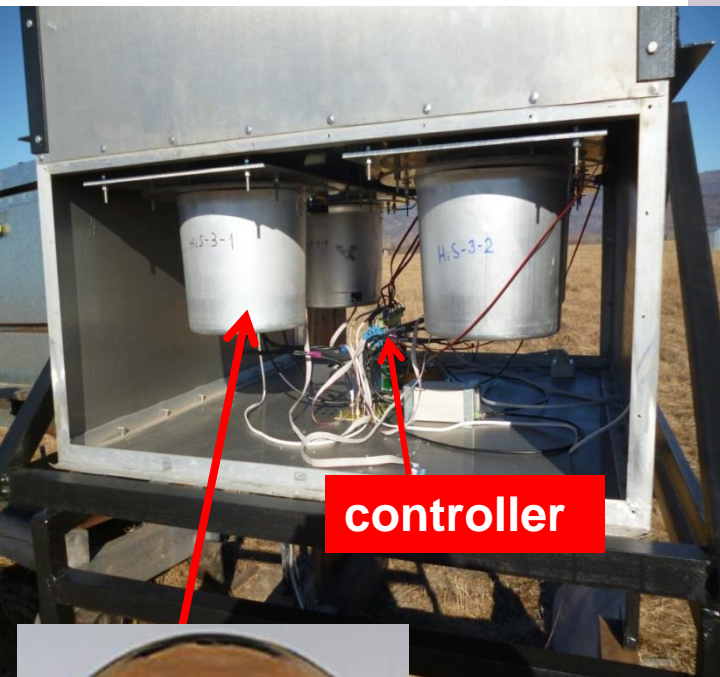


оптическая станция

Эволюция конструкции оптической станции установки TAIGA-HiSCORE



**Оптическая станция
установки
TAIGA – HiSCORE**



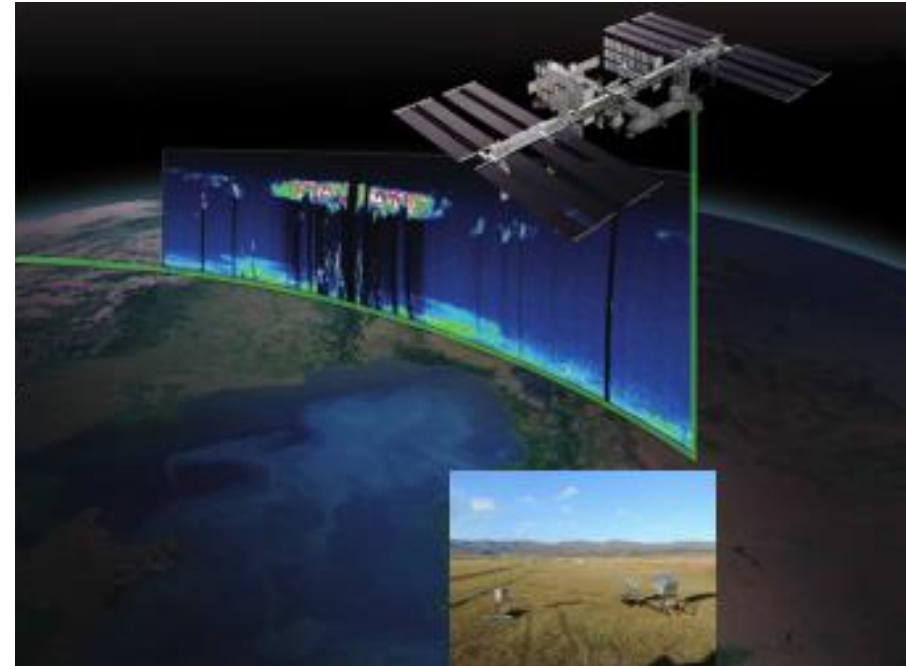
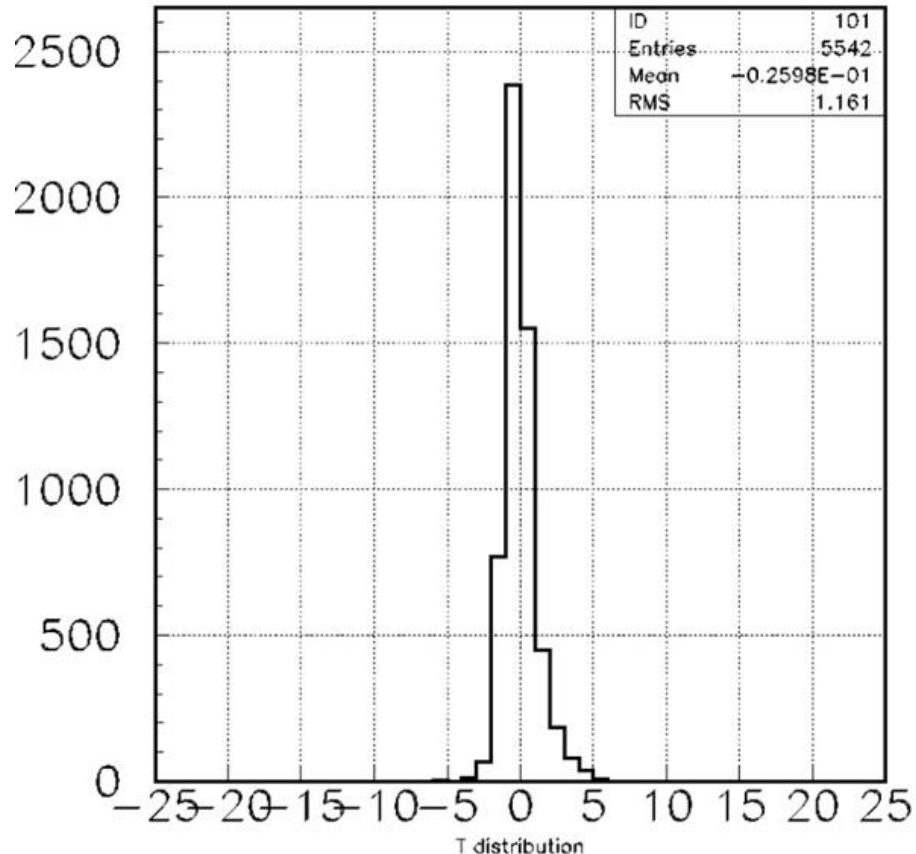
controller



PMT HAMAMTSU R5912



An accuracy of EAS axis direction reconstruction with TAIGA-HiSCORE

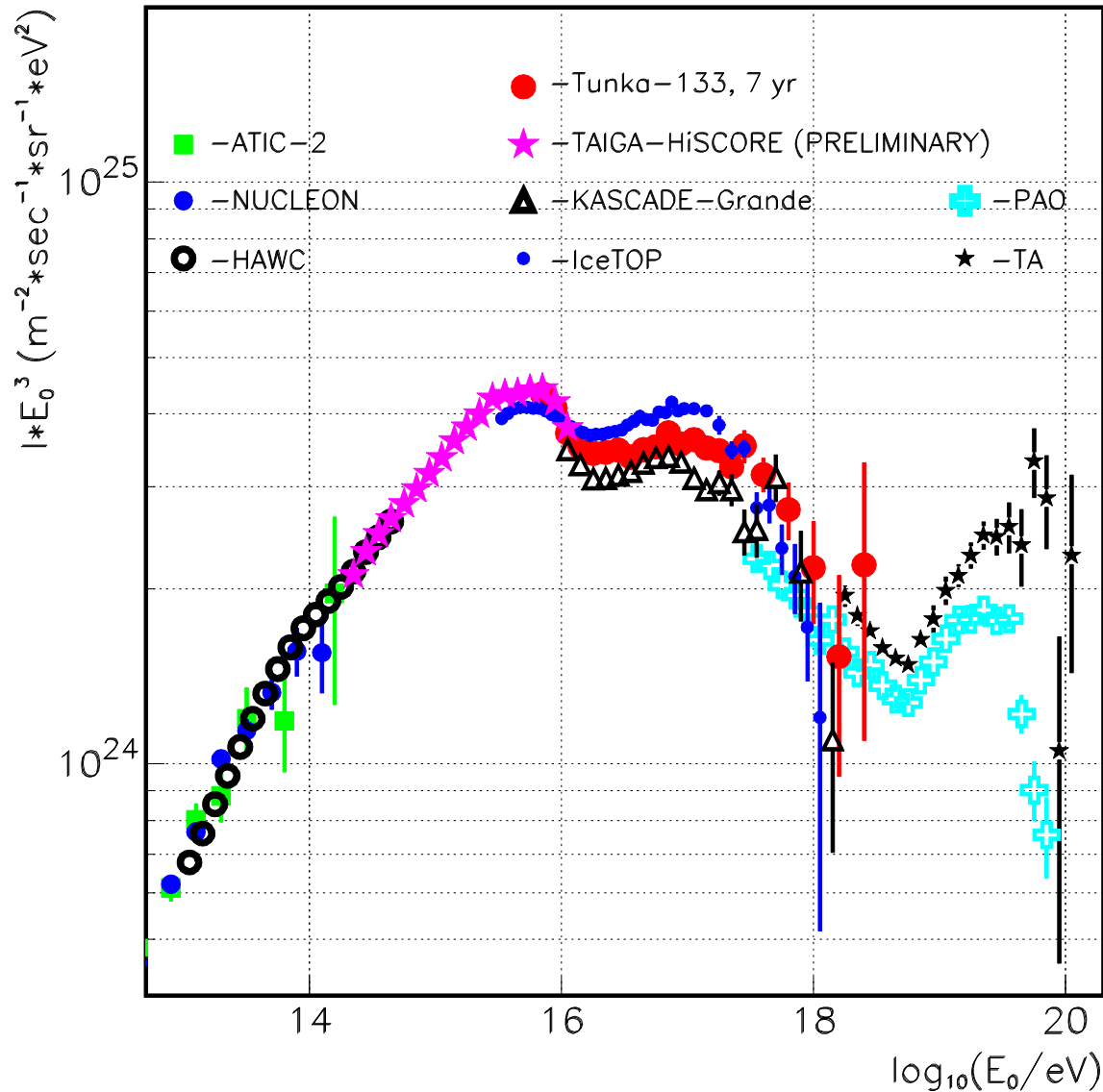


**CATS Lidar,
532 nm, 4 khz, $10^{13}y/m^2$**

The RMS=1.1 ns for TAIGA-HiSCORE provides an accuracy of an γ and CR arrival direction about 0.1 degree

Precision verification with Laser on-board International Space Station (ISS) <0.1deg

CR energy spectrum: TAIGA-HiSCORE + Tunka-133 for energy range $10^{14} - 10^{18}$ eV



The TAIGA – IACT

The TAIGA – IACT: First - 2017y, second - 2019y, third - 2020y situated at the vertices of a triangle with sides: 300 m, 400 m and 500 m about

- 34-segment reflectors (Davis-Cotton)

- Diameter 4.3 m, area $\sim 10 \text{ m}^2$

- Focal length 4.75 m –

Threshold energy $\sim 1.5 \text{ TeV}$



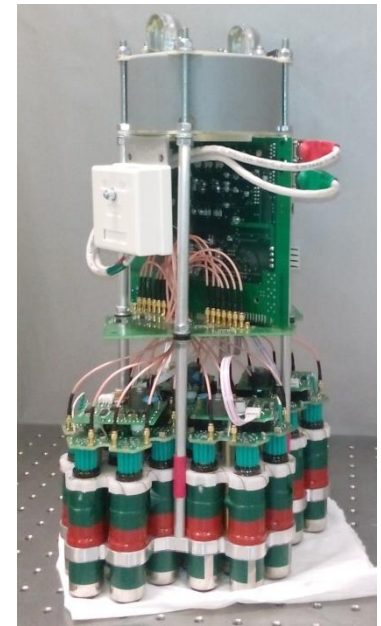
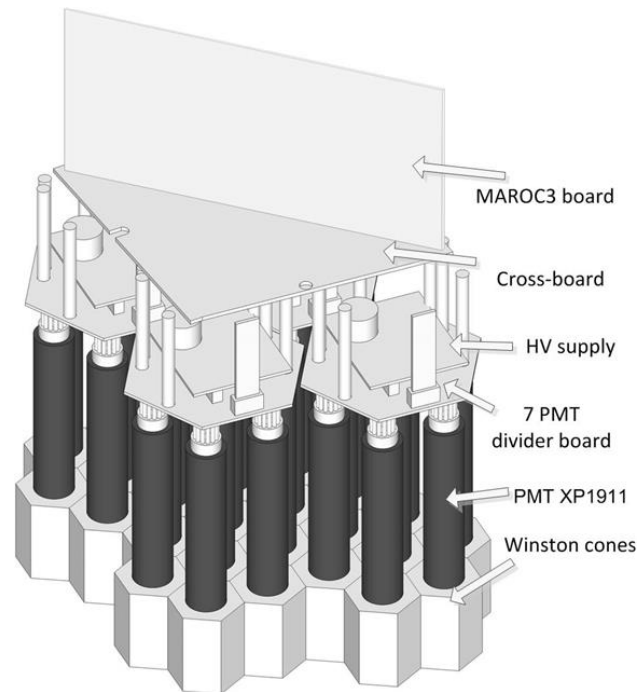
Монтаж монтировки первого телескопа



Камера телескопа TAIGA-IACT



- 560 PMTs (XP 1911) with
- 15 mm useful diameter of photocathode
- Winston cone: 30mm input size
- each pixel = 0.36 deg
- FOV 10 x 10 deg

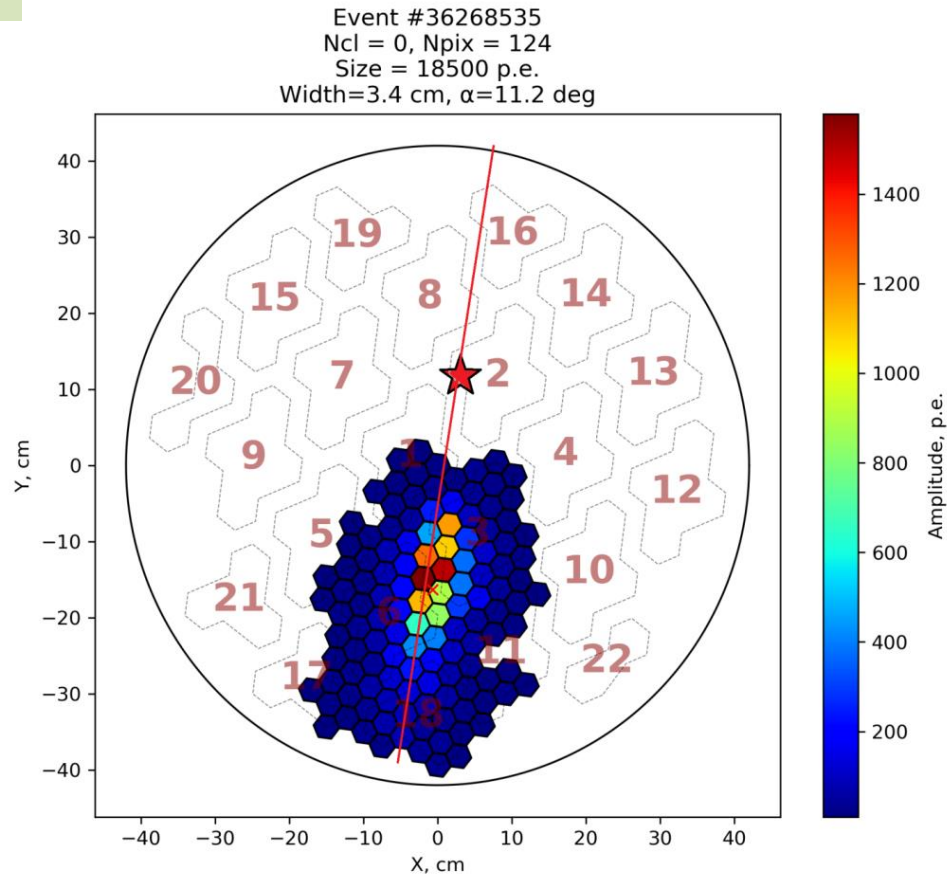
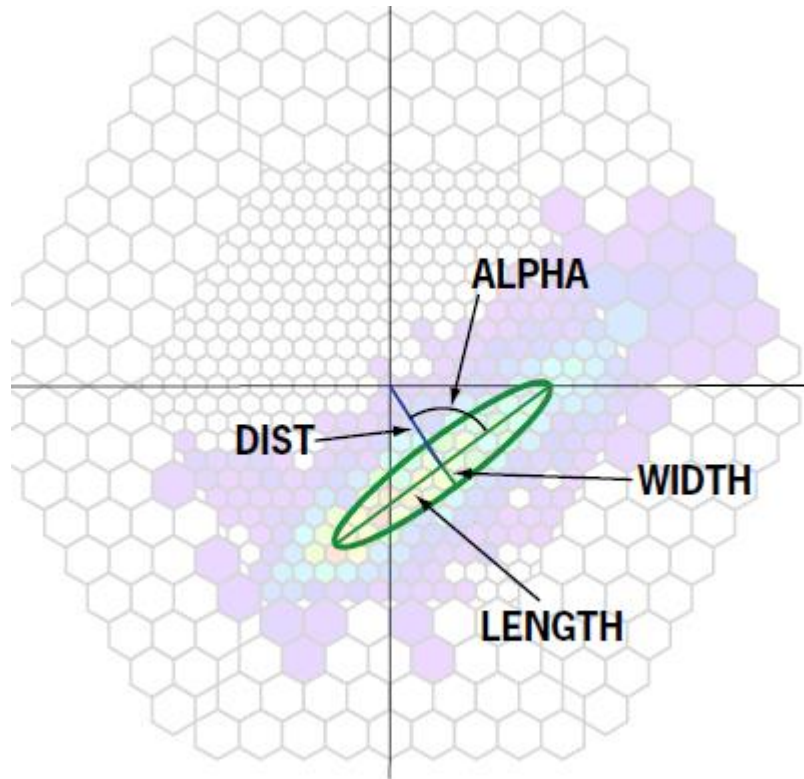


Basic cluster: 28 PMT-pixels. Signal processing:
PMT DAQ board based on MAROC3 ASIC

TAIGA-IACT and TAIGA-HiSCORE joint events.

Hillas parameters

Most of events are
“Hadron-like”
 $E = 840 \text{ TeV}$; width = 0.4°



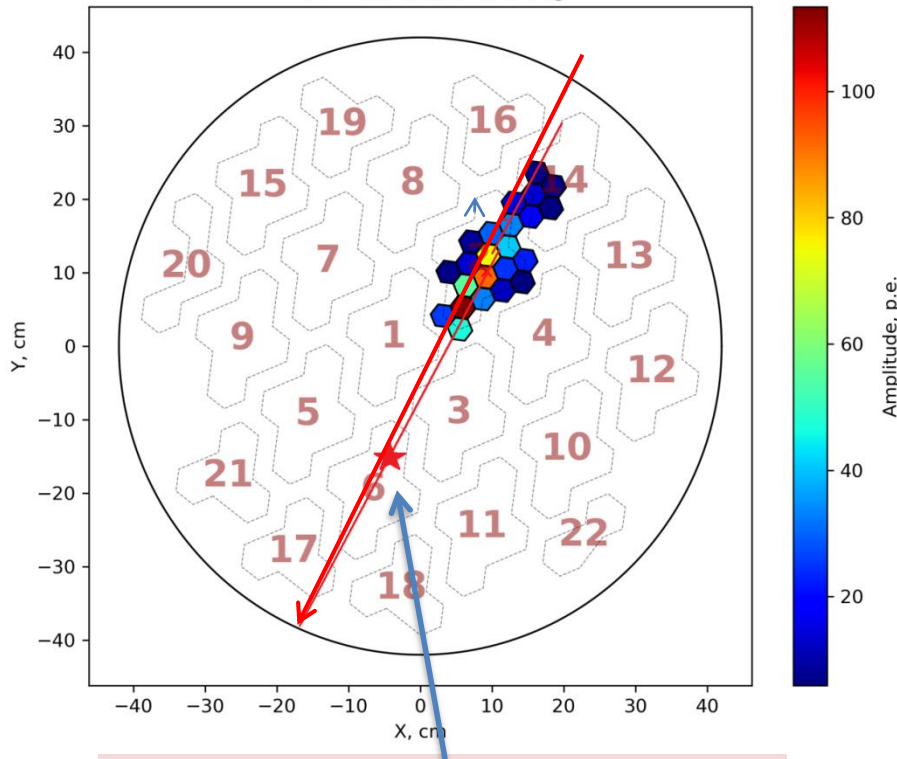
But some events looks as “Gamma-like”

TAIGA-IACT data

TAIGA- HiSCORE data

Width=0.13°, length=0.69°, alpha=8.9°, size=709p.e.

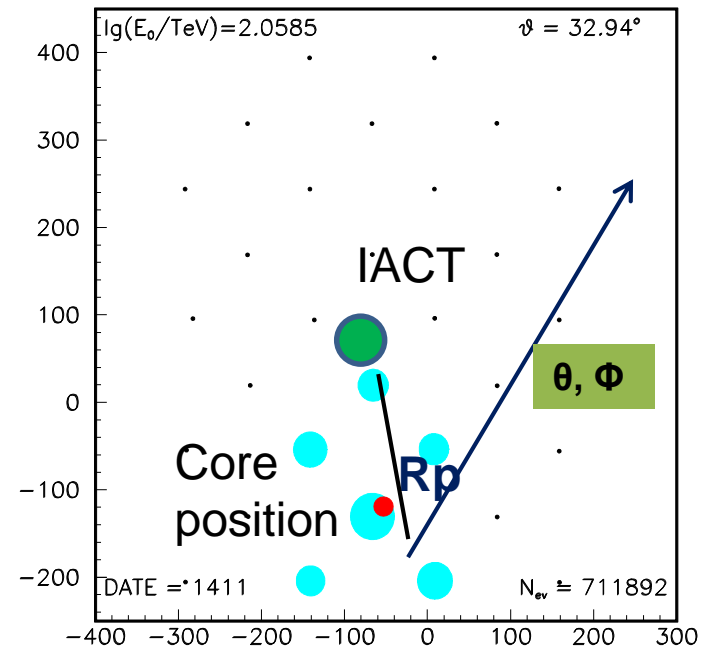
Event #6281867
Ncl = 0, Npix = 23
Size = 709 p.e.
Width=1.6 cm, $\alpha=8.8$ deg



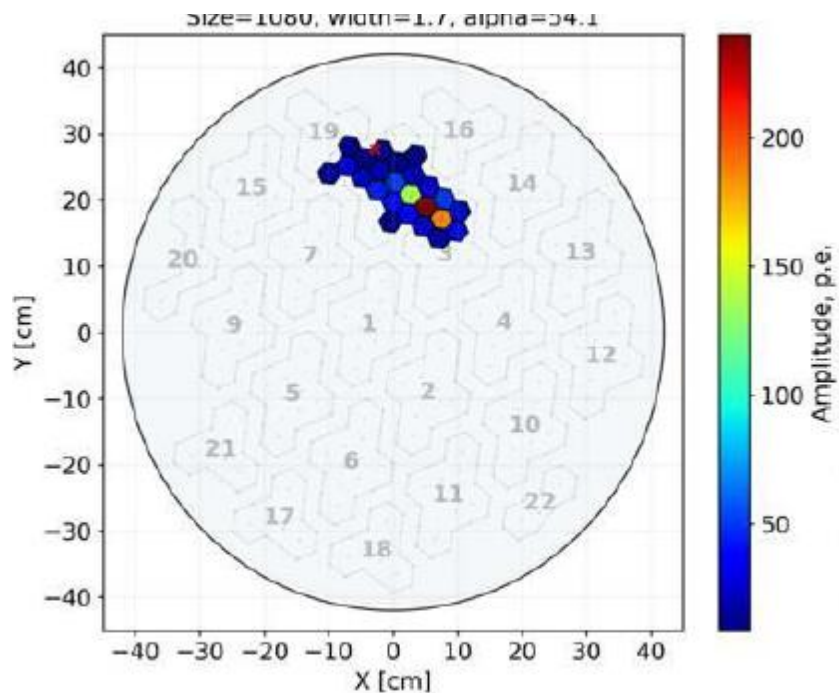
Recalculated core position in IACT plane after introduction of scaling factor $Rp' = Rp/1500$

E = 55 TeV

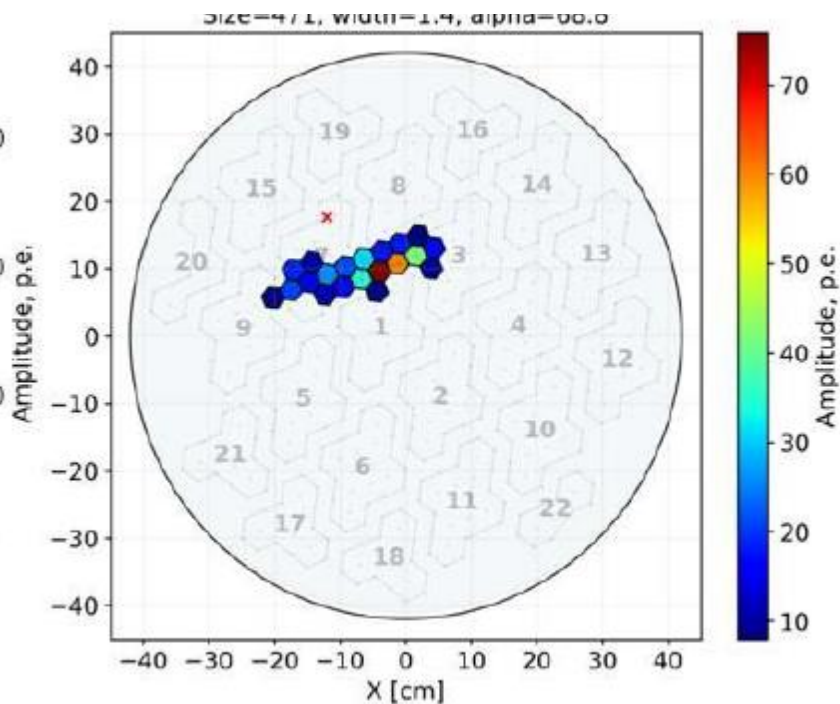
$\theta = 32.9$, $\Phi = 33.58$



EAS detection by two telescopes at a distance of 300 m - stereoscopic approach for high energies



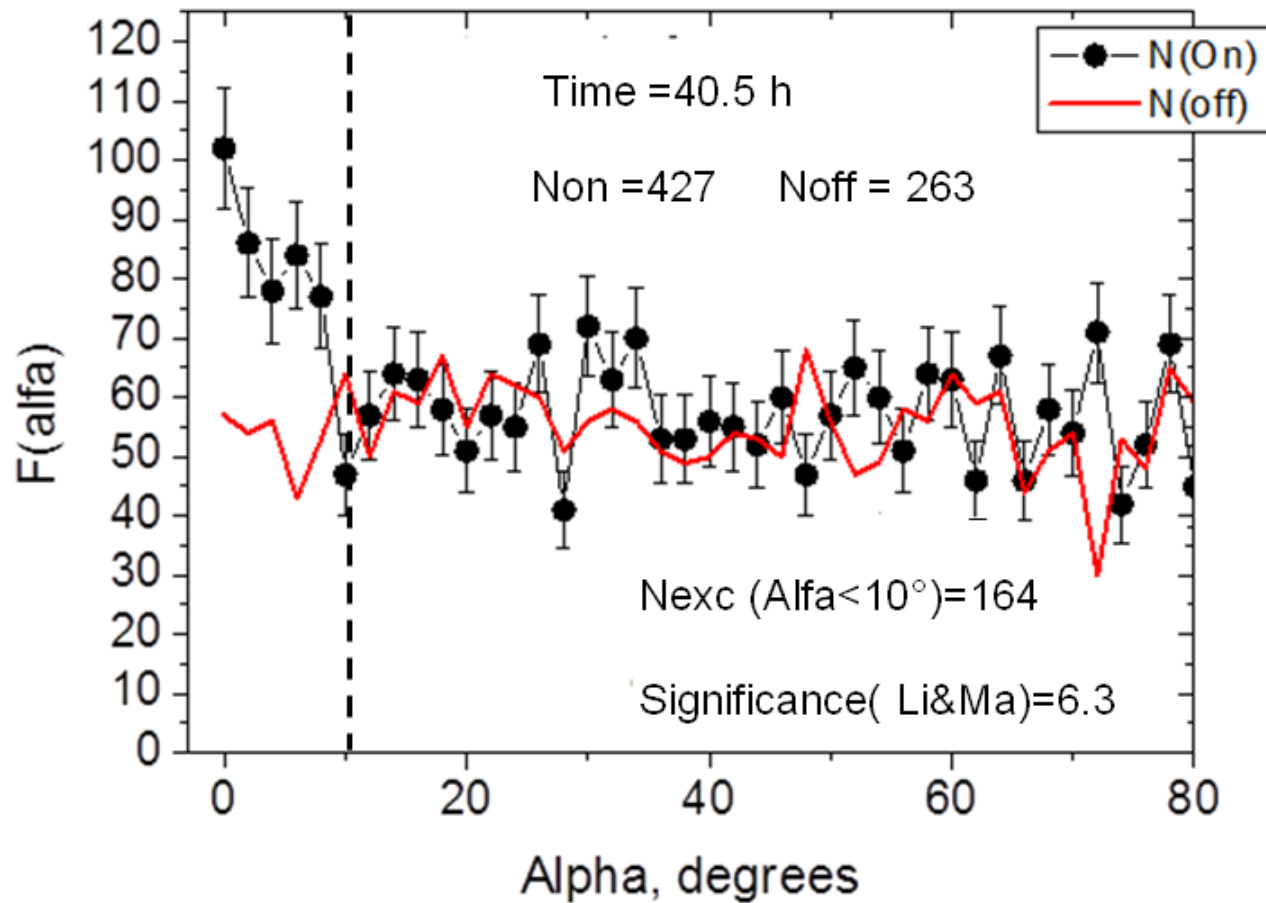
Size = 1080 pe, Width = 0.20°



Size = 471 pe, Width = 0.17°

Alfa distribution for Crab A histogram of the events distribution around direction on the Crab Nebula

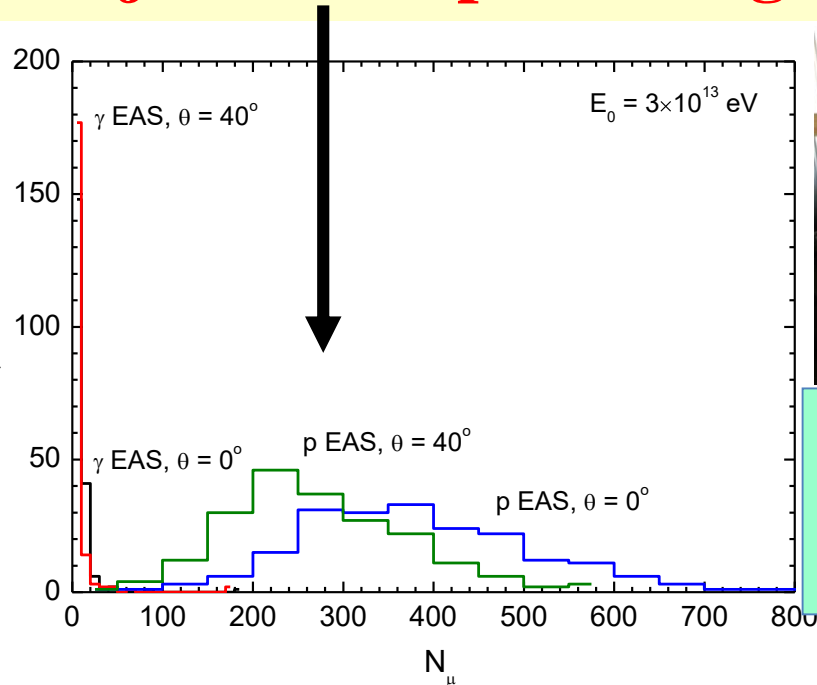
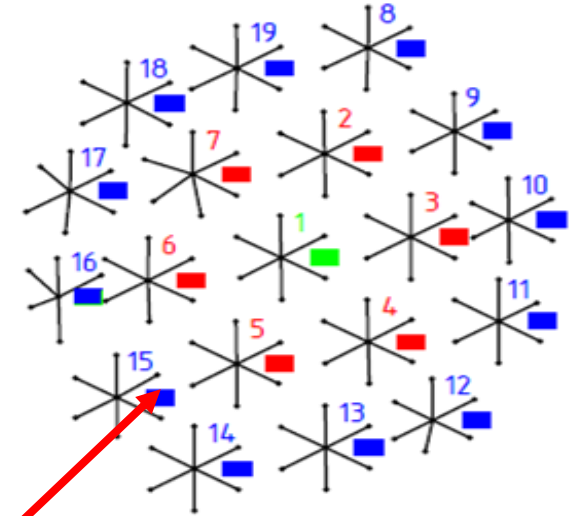
Preliminary!



The TAIGA particle detectors.

- Permanent absolute energy calibration of Cherenkov arrays Tunka-133 and TAIGA-HiSCORE.
- Round-the-clock duty cycle;
- Trigger for radio array Tunka-Rex
- Improvement of mass composition data
- **Rejection of p-N background**

The Tunka – Grande scintillation array



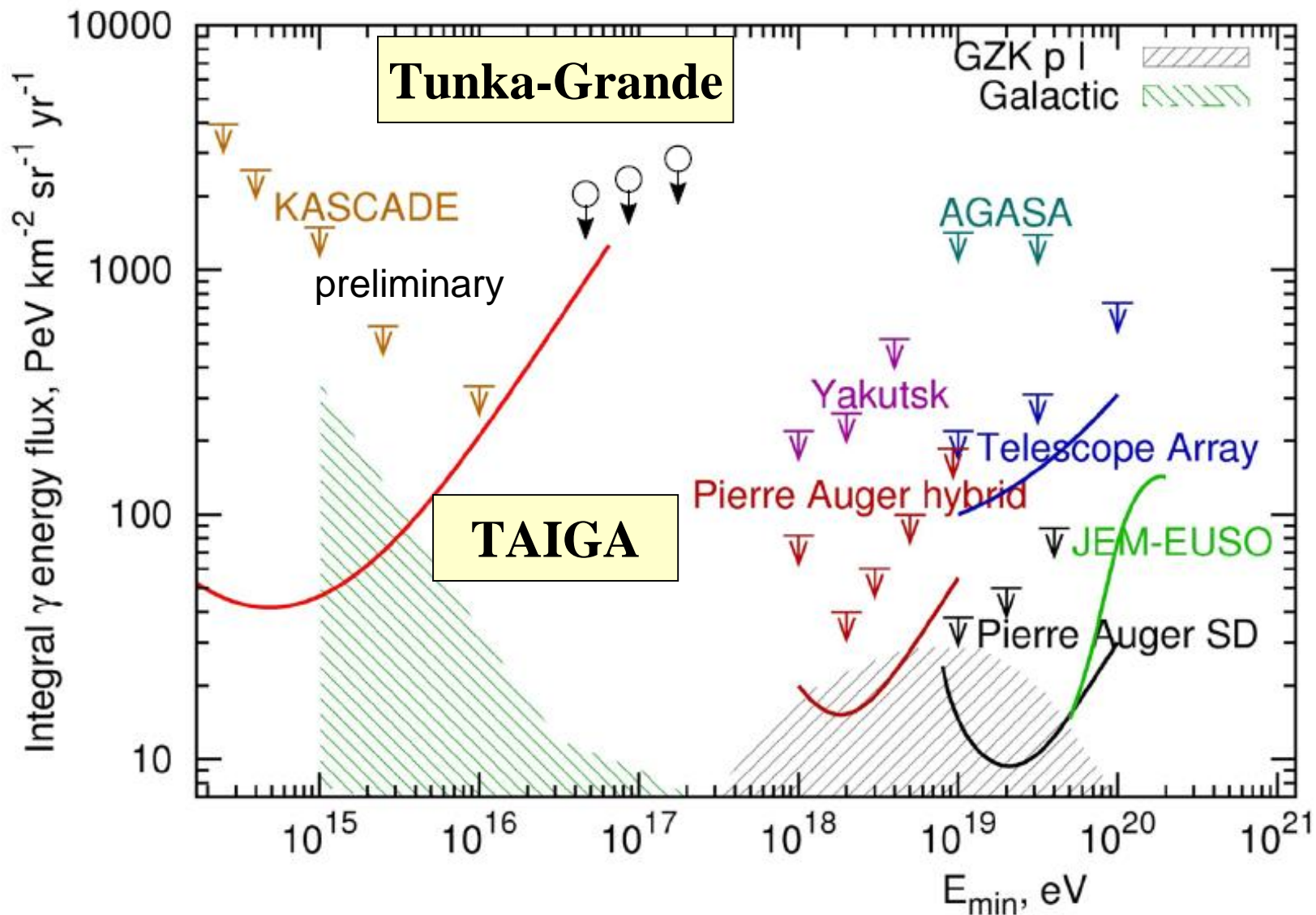
228 former KASCADE-Grande scintillation counters with $S=0.64$ m²



152 the same underground muon counters in 19 stations.

380 KASCADE-Grande scintillation counters arrived at the Tunka site





Серая область - возможный поток GZK-фотонов в Стандартной Модели для протонного первичного состава. Зеленая область — поток космогенных фотонов в одной из моделей с Лоренц-нарушением. Показаны существующие ограничения на поток фотонов.

The TAIGA-Muon scintillation array

Counter dimension
1x1 m².

Wavelength shifting
bars are used for
collection of the
scintillation light.

Mean amplitude
from cosmic muon is
23.1 p,e, with $\pm 15\%$
variation.

A clear peak in
amplitude spectrum
is seen from cosmic
muons in a self
trigger mode

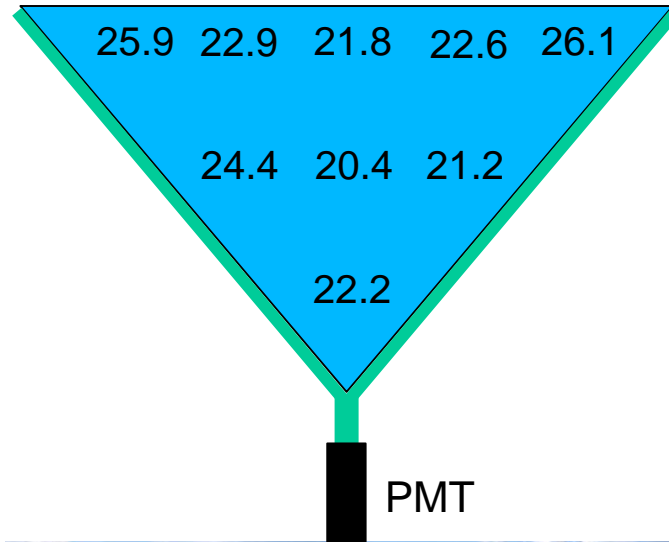
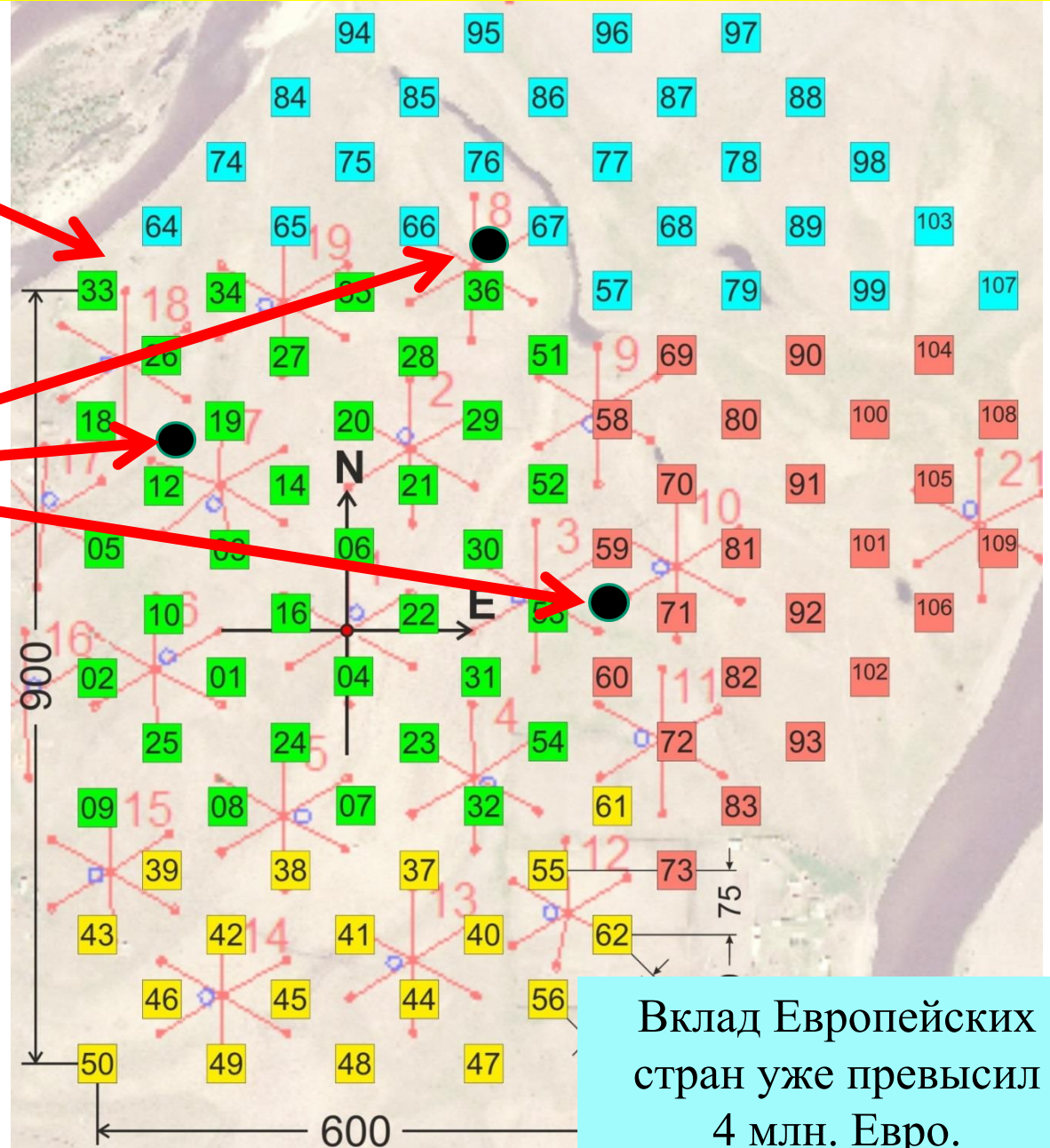
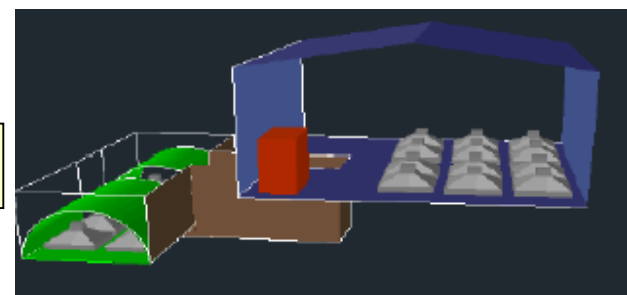
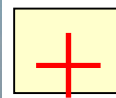


Схема гамма-обсерватории TAIGA в 2020 году (1 км²)



Вклад Европейских стран уже превысил 4 млн. Евро.

Ее цель - создание гамма обсерватории TAIGA с не имеющей аналогов в мире гибридной системой детекторов и наивысшей чувствительностью для решения многих задач астрофизики элементарных частиц и физики высоких энергий.



Установка

TAIGA-HiSCORE:

1000 широкоугольных черенковских детекторов, распределенных на площади 10 km²

Установка

TAIGA-IACT

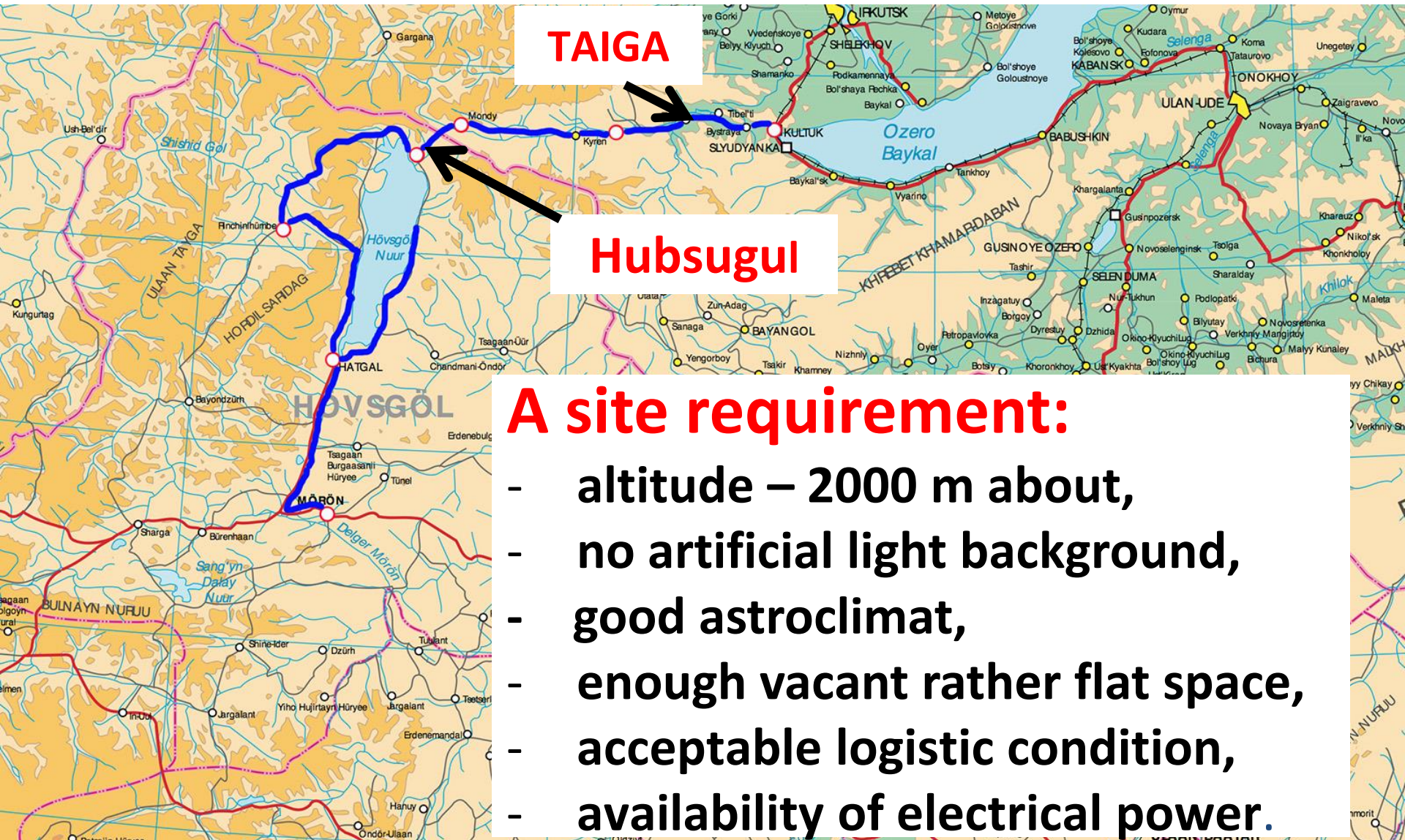
16 Атмосферных черенковских телескопа с зеркалами диаметром 4.3 м.

Установка

TAIGA-Muon

3000 кв. метров подземных детекторов заряженных частиц.

Hubsugul – a 10 square kilometer scale array with hybrid detector system



A site requirement:

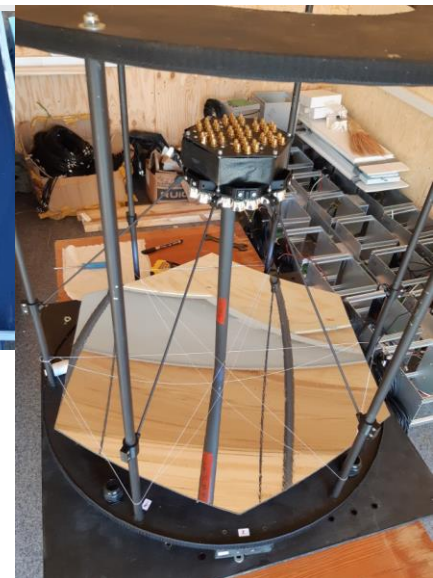
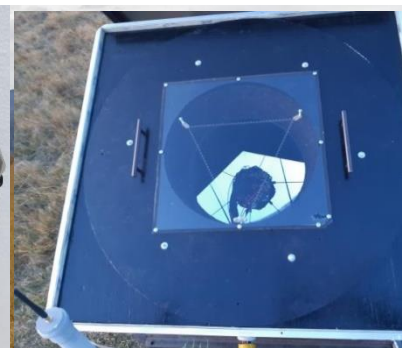
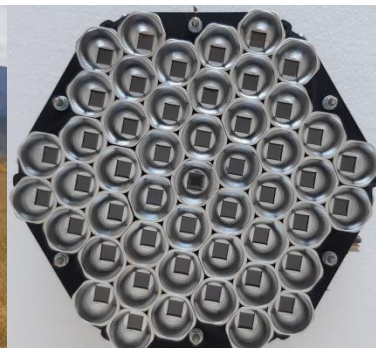
- altitude – 2000 m about,
- no artificial light background,
- good astroclimat,
- enough vacant rather flat space,
- acceptable logistic condition,
- availability of electrical power.

A compact-size wide Field of View IACT with a SiPM-based camera for energies above 10 TeV.

FoV of TAIGA-HiSCORE detectors is 60° but TAIGA-IACT – 10° as a result we have only 4% of joint events.

To study the gamma-ray with energy above 30 TeV we started off a development of a Small Image Telescopes (SAT) with a SiPM-based camera with a FoV up to 60° and an effective recording area of 1m^2 . We intend to test 3 variants of the SAT optical system: spherical mirror, a system of Fresnel lenses, combination of the two mentioned technologies.

Prototype SIT (FOV $\sim 20^\circ$, S $\sim 0.1\text{ m}^2$, 49 SiPM SensL MicroFC-60035-SMT, $6 \times 6\text{ mm}^2$) was installed in the Tunka Valley for operation together with the TAIGA-HiSCORE array in September 2019.



Examples of detected events by the SIT prototype



Спасибо за внимание!



16.10.2020