

# **Проект Тунка- HiSCORE: гамма-астрономия сверхвысоких энергий**

Кузьмичев Л.А. (НИИЯФ МГУ)  
от коллаборации Тунка-HiSCORE

Черенковские чтения,  
ФИАН, 9 апреля 2013

## **План доклада**

- 1. Гамма астрономия: результаты и новые проекты**
- 2 От установки Тунка-133 к гамма-телескопу Тунка-HiSCORE.**
- 3. Основные направления исследований.**
- 4. Методика регистрации и реконструкции событий.**
- 5 Конструкция установки.**
  - Оптическая станция.
  - Система сбора.
  - Узкоугольный черенковский детектор.
  - Мюонный детектор.
- 6. Первые результаты**
- 7. Этапы развертывания и оценка стоимости**

# Гамма-астрономия высоких энергий

132 ТэВных источника

1873 ГэВных источника

Работающие установки:

1. VERITAS

2. HESS

3. MAGIC

4. Fermi

5. Argo-YbJ

6. Tibet-III

Satellites  
(Agile, CGRO,  
Fermi, ...)

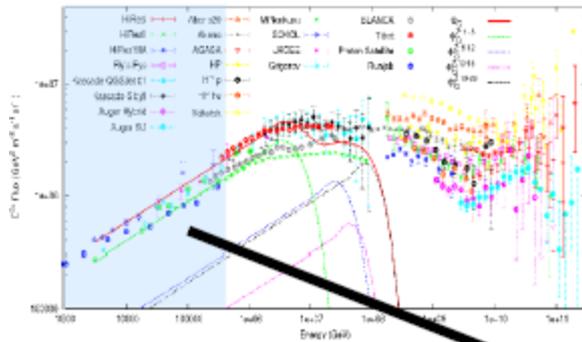


Imaging Air Cherenkov Technique  
(CANGAROO, HESS,  
MAGIC, VERITAS, ...)

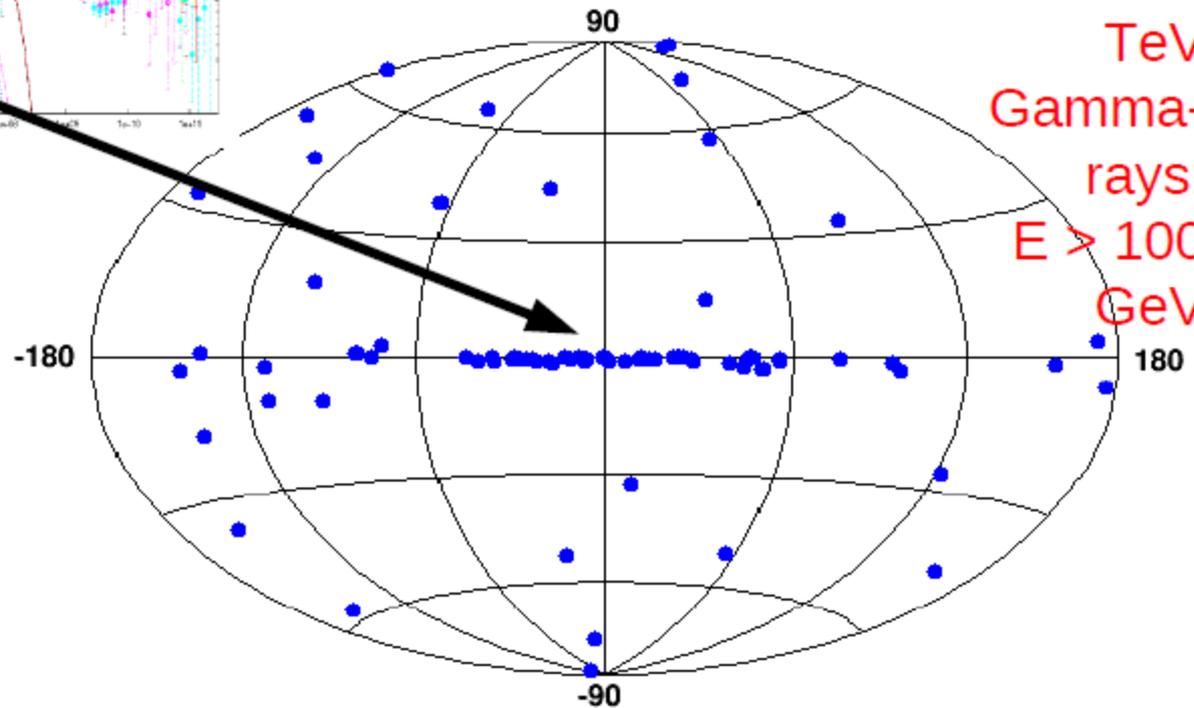
Particle Detector Arrays  
(ARGO-YBJ, HAWC, Milagro, Tibet AS,



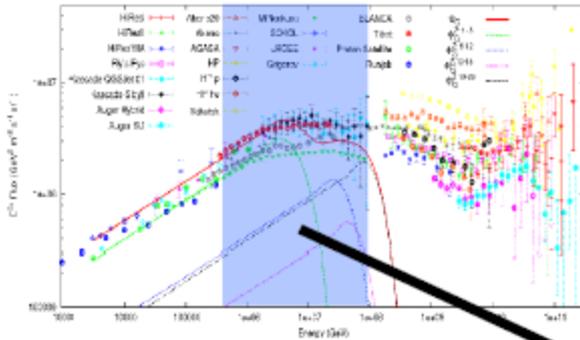
# Tevatron sky



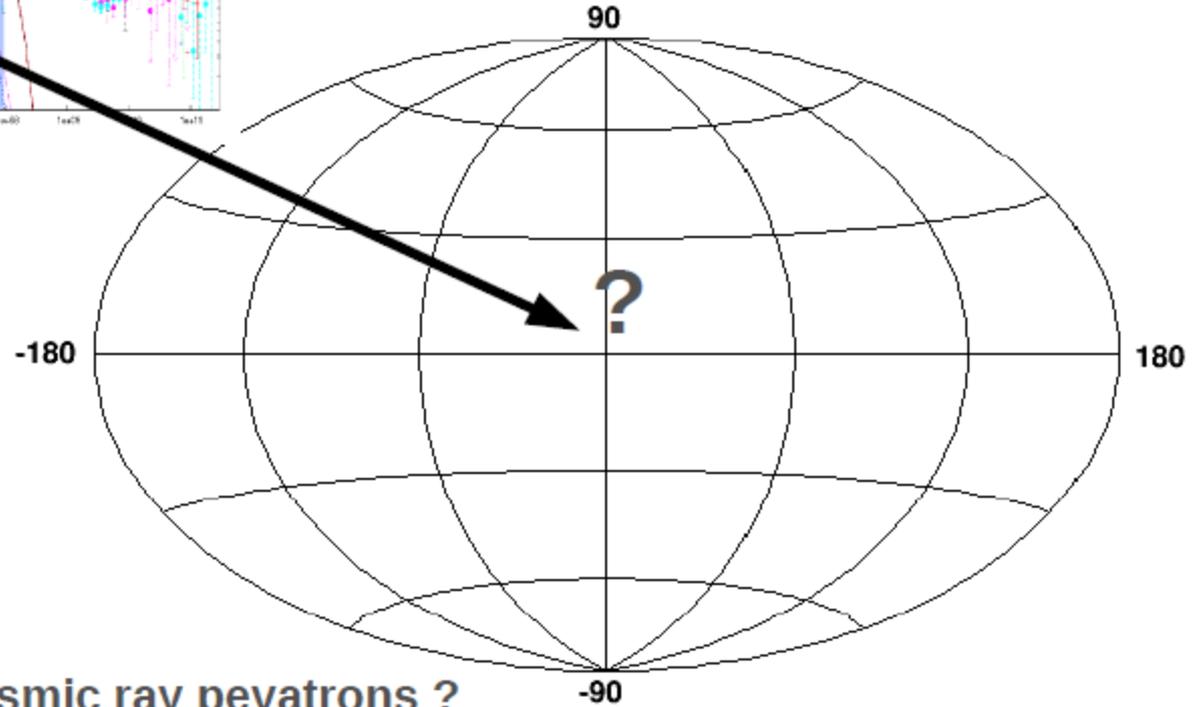
VHE gamma-ray sky 2009



# Pevatron sky

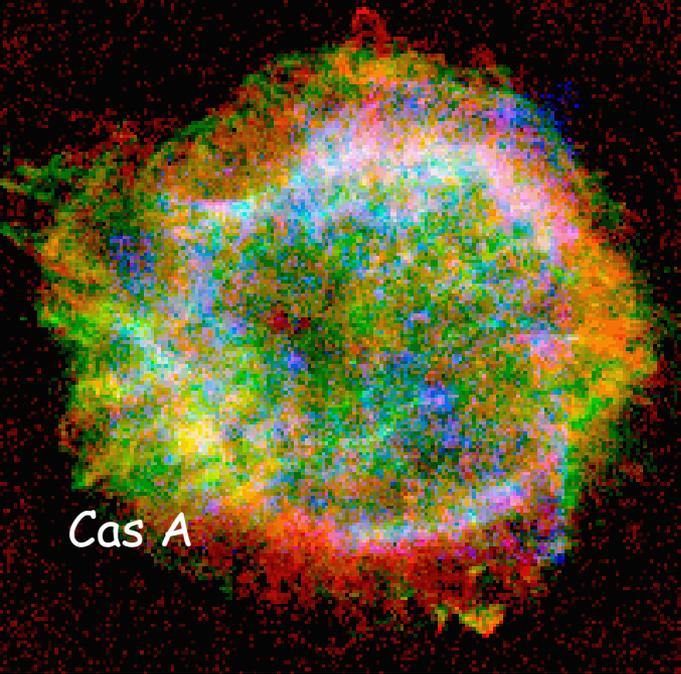


HE Gamma-Ray Sky ( $S > 5\sigma$ ,  $E > 100$  TeV), September 2009



Where are the cosmic ray pevatrons ?

## Оболочки сверхновых – главные источники галактических космических лучей



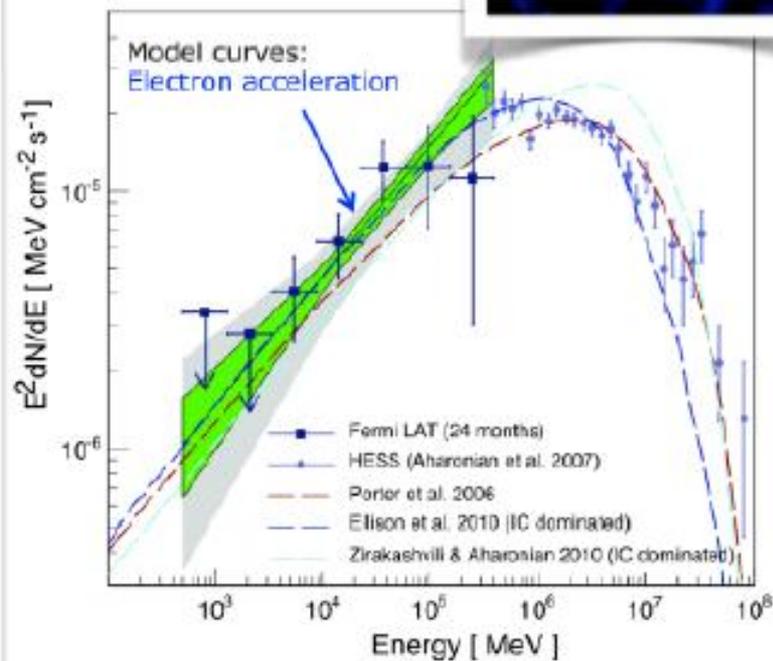
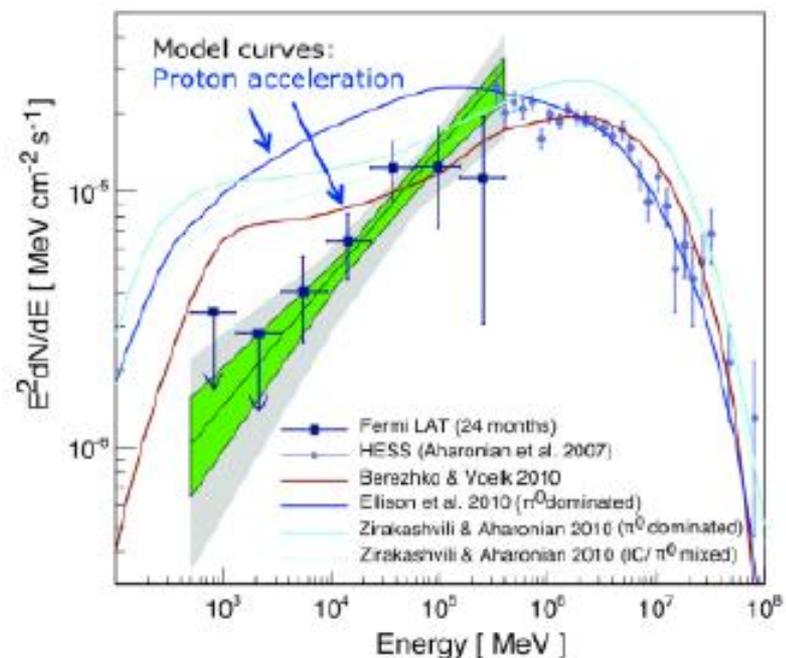
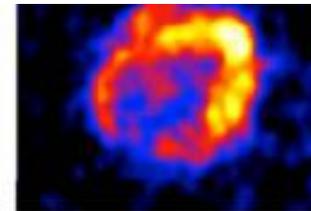
Cas A

radio polarization in red (VLA),  
X-rays in green (CHANDRA),  
optical in blue (HST)

**Но до сих пор этому нет  
надежного экспериментального  
доказательства**

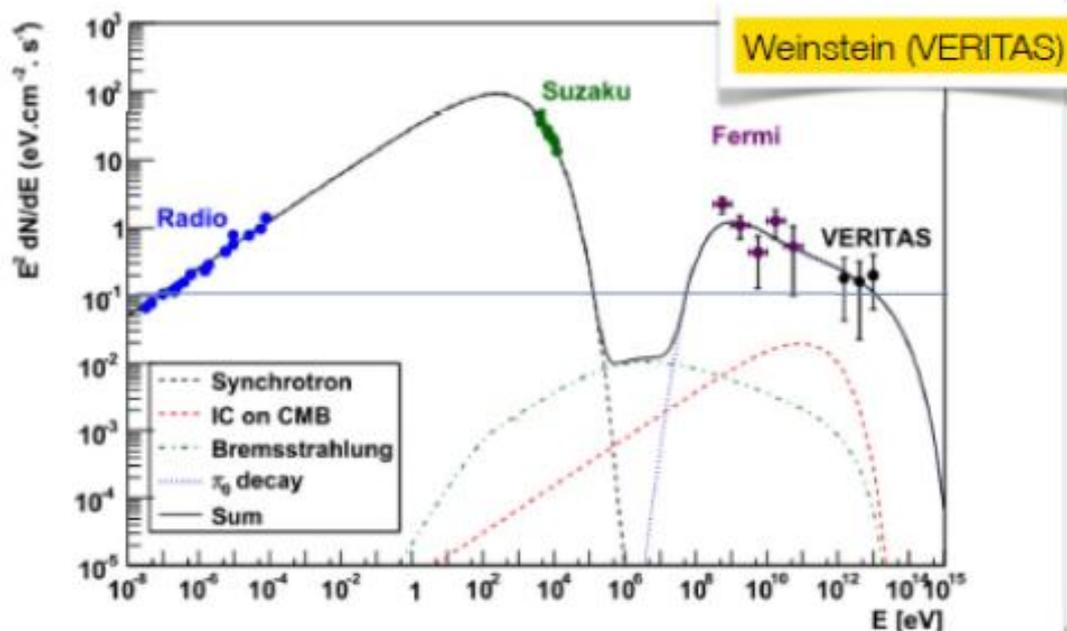
1. 1933 – Бааде и Цвикки – Взрывы Сверхновых – источник космических лучей
2. 1949 – Ферми – теория ускорения космических лучей
3. 1963 – Гинзбург, Сыроватский – переход 10% кинетической энергии оболочек в энергию КЛ достаточен для объяснения галактических КЛ
4. 1977 – 1978 -Крымский, Белл и др – теория ускорения на ударных волнах
5. 1993-1996 – Бережко и др. – нелинейная теория ускорения на ударных волнах.
6. 2003-2005 – Белл, Бережко и Фельк, Птускин и Зиркашвили – усиление магнитного поля на фронте ударной волны –  $E_{\max} \sim Z \cdot 10^{15} \text{ eV}$

# The best candidate? RX J1713.7-3946



# Tycho SNR might now be the best case

- Tycho detected with both Fermi-LAT and VERITAS
- Leptonic model strongly disfavored
- No cutoff in VERITAS → acc time = SNR age → max proton energy > 300 TeV
- But beware drawing strong conclusion from spectral modeling. Also very weak source, both in Fermi-LAT and in VERITAS



Case	$E_{p,max}$ (TeV)	Distance (kpc)	$E_{SNR}$ (erg)
"near"	340	2.78	$10^{51}$
"far"	540	3.58	$2 \times 10^{51}$

Half a pevatron?

# Проекты (высокие энергии)

Международные:

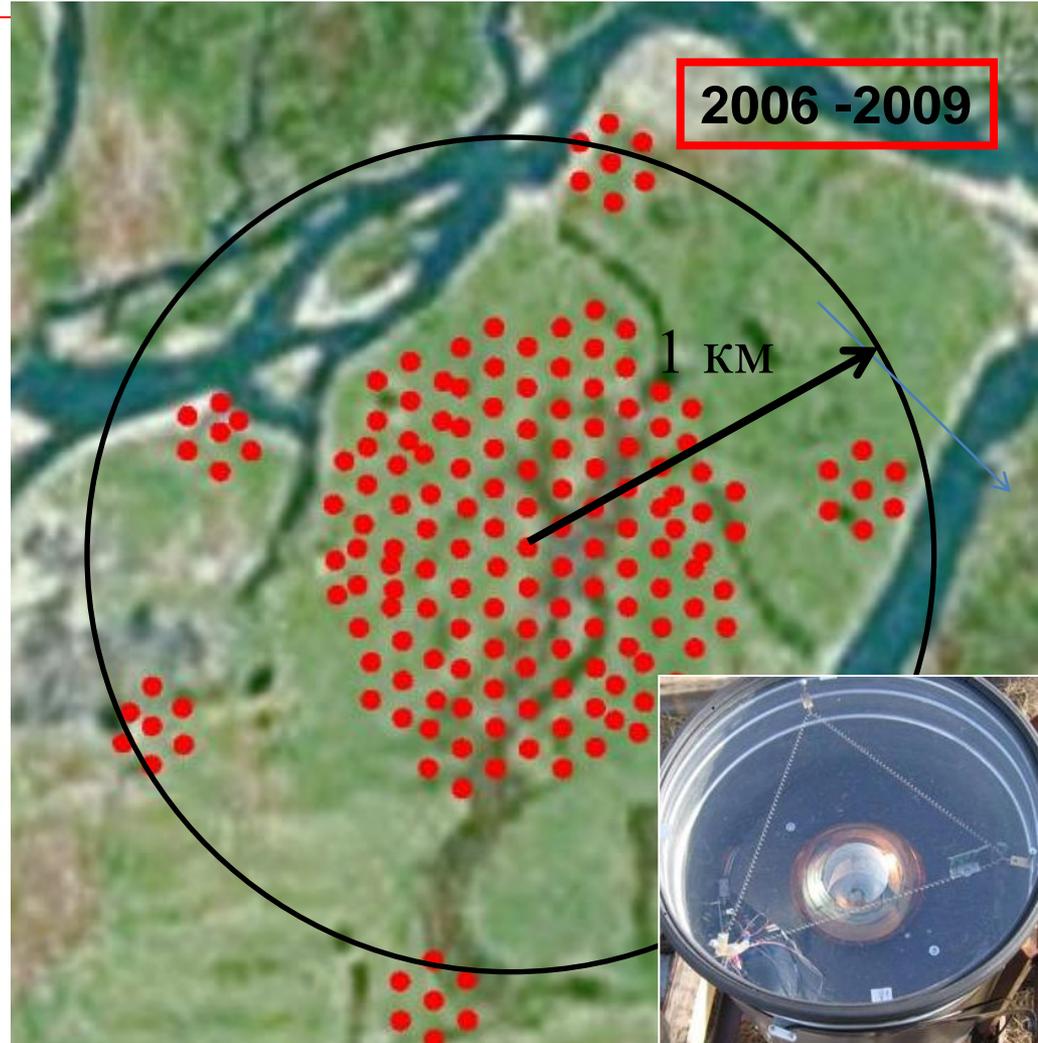
1. СТА (2017-18) - ~150 млн. Евро (?)
2. HAWC (2014) - ~30 млн. долларов
3. LHAASO (2013-2018) ~150 млн. долларов

Российские:

1. Тунка- HiSCORE
2. 5@5 (А.М.Быков и др.)

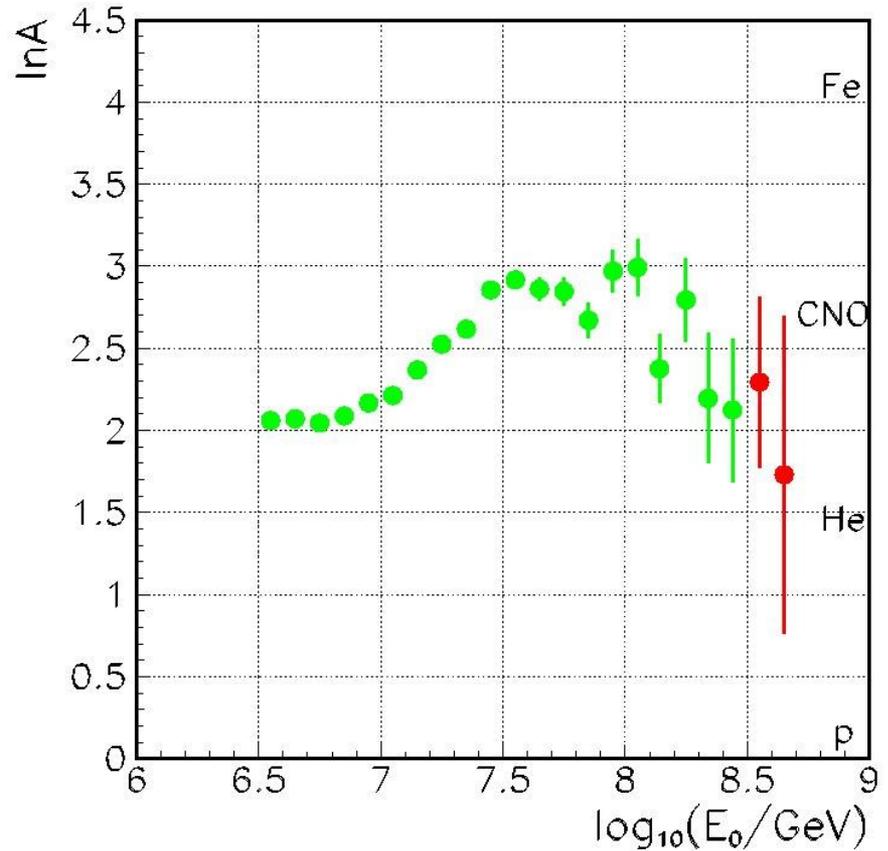
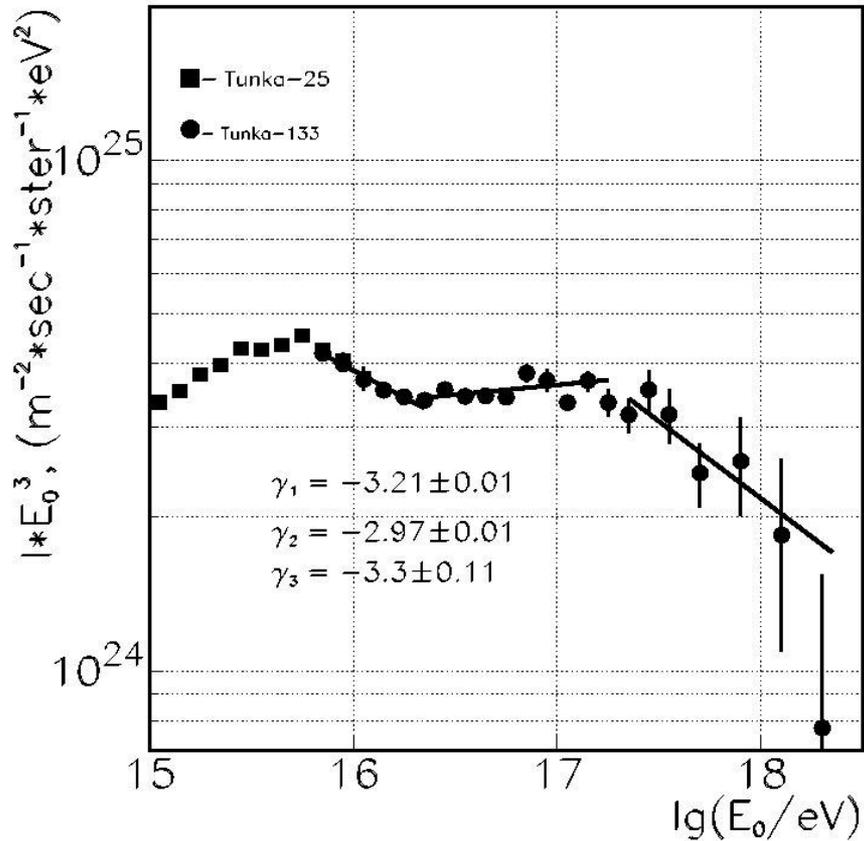
Для исследования диапазона энергий  $>20-30$  ТэВ нужны широкоугольные установки с площадью  $10-100$  км<sup>2</sup>. Проект Тунка- HiSCORE показывает как можно сделать такую установку в разумное время и за разумные деньги

# Установка Тунка-133: 175 оптических детектора на 3 км<sup>2</sup>



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





Поведение энергетического спектра и массового состава указывает на переход от галактических космических лучей к внегалактическим при энергии выше  $10^{17}$  эВ.

## Статус 2013 года

**Сцинтилляционные  
станции установки  
KASCADE-Grande  
В Москве**



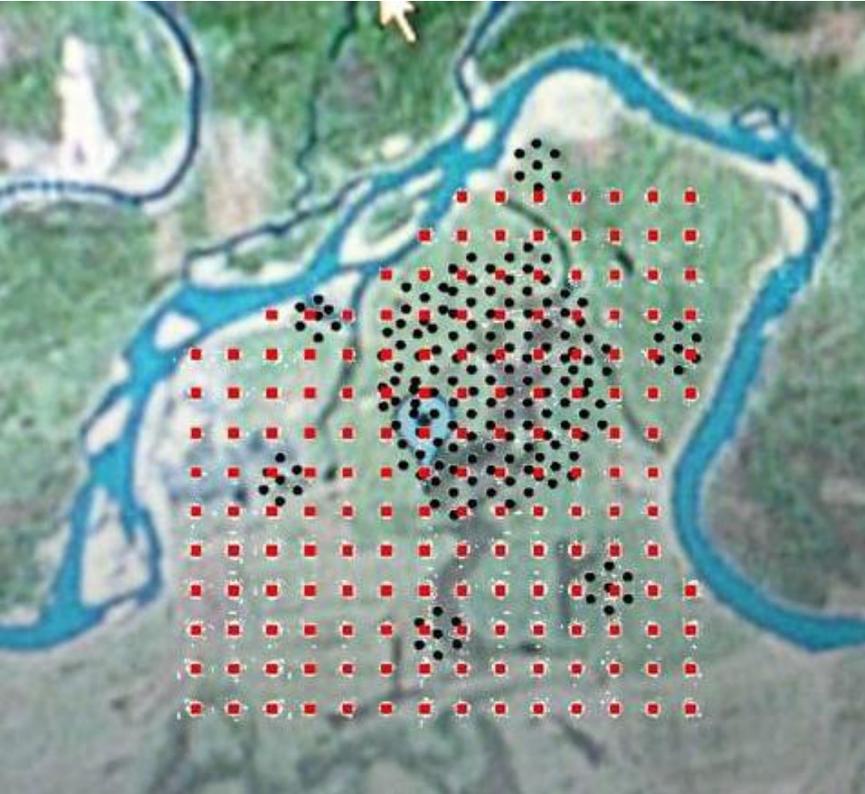
**Установлены  
20 радиополн для  
регистрации ШАЛ**



**Начато создание  
Гамма-телескопа**



# Tunka-HiSCORE : wide-angle Cherenkov gamma-observatory



**HiSCORE – Hundred\* i Square-km Cosmic Origin Explorer**

**Area : from 1 to 100 km<sup>2</sup>**

**FOV ~ 0.6 ster ( 30 )**

**Energy threshold ~ 20 TeV**

**Total cost ~ 50 · 10<sup>6</sup> Euro**

# Collaboration

## Tunka-HiSCORE

### Germany

Hamburg University(Hamburg)  
DESY (Zeuthen)  
MPI (Munich)

### Russia

MSU( SINP)( Moscow)  
ISU (API) (Irkutsk)  
INR RAS (Moscow)  
IZMIRAN (Troitsk)  
JINR (Dubna)  
MEPHI (Moscow)  
ASU (Barnaul)  
IKFIA(Yakutsk)

# Main Topics

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

$10^7$  events (in  $1 \text{ km}^2$  array) with energy  $> 10^{14}$  eV per one season (400 hours).

## Particle physics

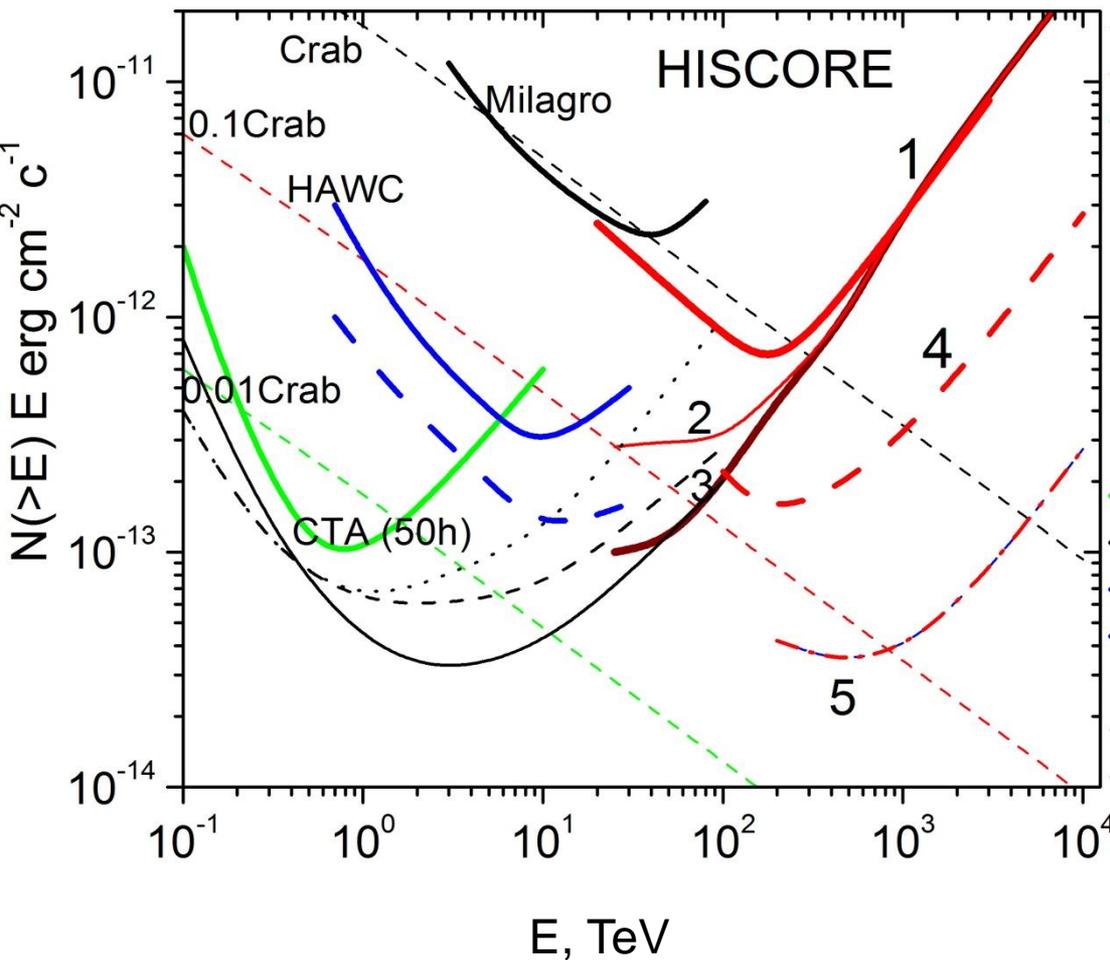
Axion/photon conversion.

Hidden photon/photon oscillations.

Lorentz invariance violation.

pp cross-section measurement.

Quark-gluon plasma.



**50 events or 5 RMS,  
T = 500 hours**

Этапы развертывания  
установки

**1 – 1 km<sup>2</sup>, 4 PMTs per station ( 8'' PMT)**

**2 – 1 km<sup>2</sup>, 4 PMTs per station (12'' PMT)**

**2' – mounting of matrix in each mirror  
+ net of mirrors  
(S = 2 m<sup>2</sup>, 7-10 FOV, with imaging)  
(not yet simulated)**

**3 – 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup> muon detectors**

**4 – 10 km<sup>2</sup>, 4 PMTs per station ( 8' PMT)  
for 12'' PMT (not yet simulated)**

**5 – 100 km<sup>2</sup> (8'' PMT)**

# What we can see with 1 km<sup>2</sup> array (short list)

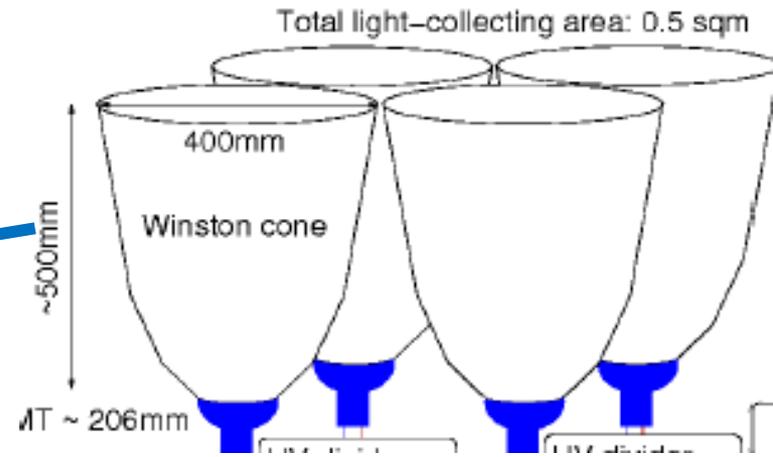
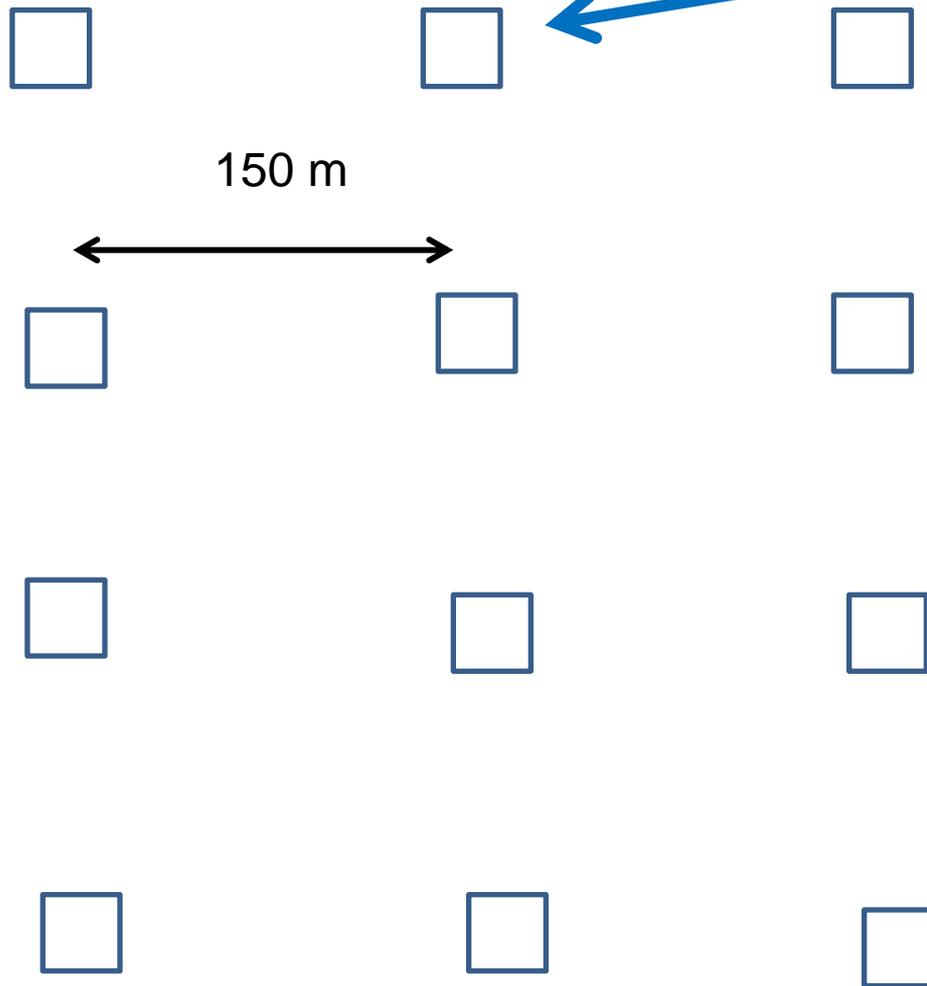
Name	RA degrees	Decl	Flux F at 1 TeV, 10 <sup>-12</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> TeV <sup>-1</sup> Γ	Flux F at 35 TeV, 10 <sup>-17</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> TeV <sup>-1</sup> (from Milagro)	Time of observation per one year (x 0.5- weater factor)	Number of events per one season E> 20 TeV
Tycho SNR (J0025+641)	6.359	64.13	0.17 0.05 Γ=1.95 0.5		236h	88
Crab	83.6329	22.0145	32.6 9.0 Γ=2.6 0.3	162.6 9.4	110h,	680
SNR IC443 (MAGIC J0616+225)	94.1792	22.5300	0.58 0.12 Γ=3.1 0.30	28.8 9.5	112h,	2 –(from MAGIC) 50 ( from Milagro)
Geminga MGRO C3 PSR	98.50	17.76		37.7 10.7	102h,	80
M82 (Starburst Galaxy)	148.7	69.7	0.25 0.12 Γ=2.5 0.6 0.2		325h,	22
Mkn 421 (BL, z=0.031 Variable)	166.114	38.2088	50-200 Γ=2.0-2.6		140h	20 - 1000
SNR 106.6+2.7 (J2229.0+6114)	337.26	61.34	1.42 0.33 0.41 Γ=2.29 0.33 0.30	70.9 10.8	167h	140 ( from VERITAS) 235 ( from Milagro)
Cas A (SNR, G111.7-2.1)[6]	350.853	58.8154	1.26 0.18 Γ=2.61 0.24 0.2		177h	40
CTA_1(SNR,PWN)	1.5	72.8	1.3 Γ=2.3		266 h	200

# Методика регистрации и реконструкции событий

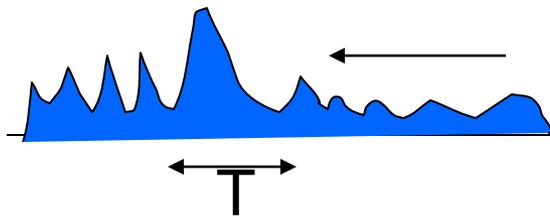
# Methodical approaches for 3 stages

1. Shower front and LDF sampling technique (at the first stages).  
Angular resolution – 0.1 deg,  
 $X_{\max}$  measurement for hadron rejection.
2. Using of small mirrors net with cheap matrix of PMTs for imaging technique.
3. Using of large area muon detectors for hadron rejection.

# Tunka-HiSCORE – 1 km<sup>2</sup> 1 stage



# Энергетический порог черенковских установок



Черенковский импульс на световом фоне  
ночного неба

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

$P_\phi \sim E$  - энергия

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

$S_d$  – площадь ФЭУ

$\eta$  - квантовая  
эффективность.

$P_\phi$  – поток черенковских  
фотонов

$T$  - длительность импульса

$\Delta\Omega$  - угловая апертура

$I_\phi$  – фон ночного неба

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

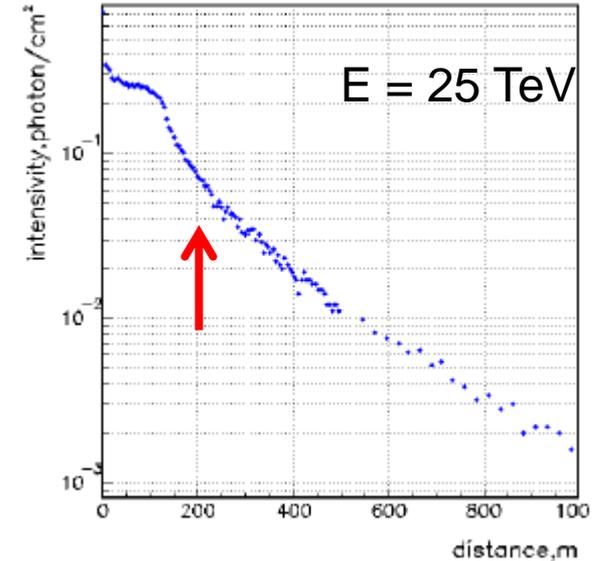
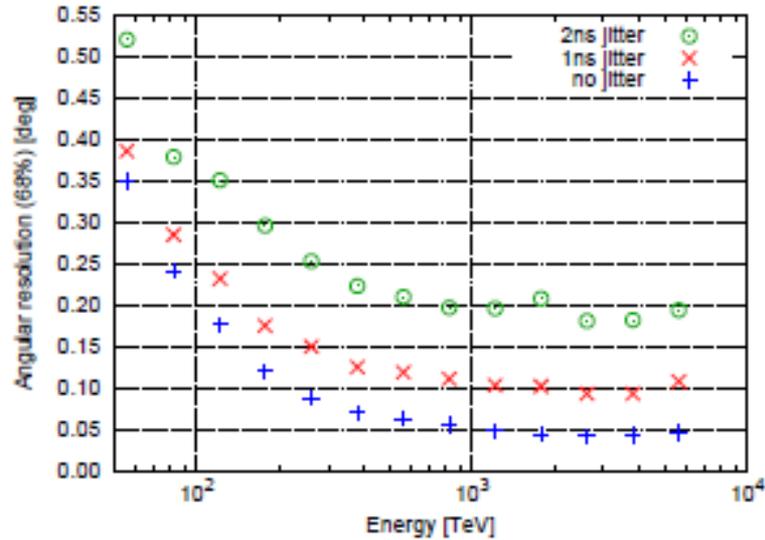
Для  $S_d \sim 0.1 \text{ м}^2$  и  $\eta \approx 0.1$  :  $E_{\text{пор}} \approx 100 \text{ ТэВ}$

# Пути понижения порога

$$E_{th} \sim (S_{det.} \eta)^{-1/2} (T_{signal})^{1/2}$$

1. Использование конусных светосборников - площадь ФЭУ увеличивается в 4 раза (  $K = 1/\sin^2(\text{tet})$  tet=30 -  $K=4$  )
2. Аналоговое суммирование сигналов в одной станции  $S$  увеличивается в  $n$  раз (  $n$  – число ФЭУ в станции)  $n=4$
3. Уменьшение  $T_{signal}$  до 7-10 нс
4. QE max = 35-40%
5. Увеличение чувствительности ФЭУ к ультрафиолетовому свету - покрытие шифтерами - в 1.5 -2 раза.

# Угловое разрешение



**Джиттер в 1 нс – 0.1 град ( база в 150 м)  
для плоского фронта**

**Фронт – конусный – угол раствора  
179 град – без определения оси  
ливня точность около 1 град.**

Восстановление угла только по временам при  
фиксированном угле конуса ( установка Themistocle)  
по 5 детекторам.

# Узкоугольный ( FOV -0.05 стер) черенковкий детектор

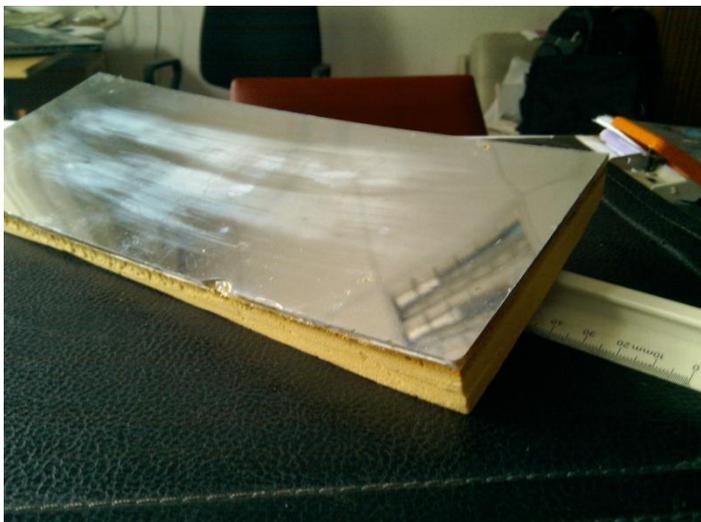


Один ФЭУ (20 см диаметра) или  
Матрица ФЭУ

Угол обзора 7-10 градусов



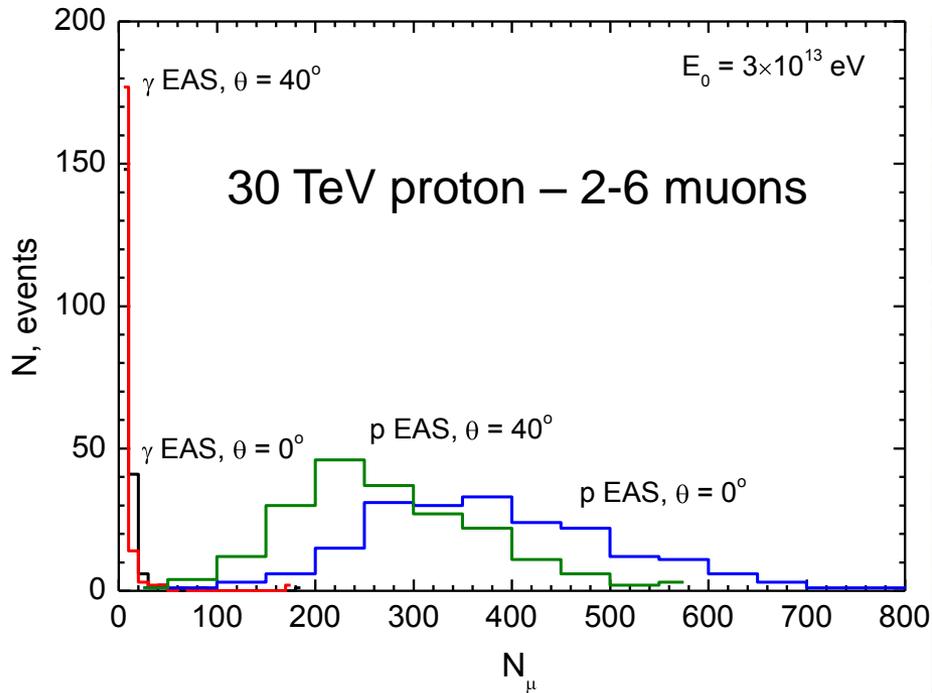
Зеркало, площадь 2 м<sup>2</sup>



Ожидаемая  
стоимость: ~ 0.5 млн.  
руб за станцию  
(зеркало + механика  
слежения)

Фрагмент зеркала на основе  
пенополиуретана для детектора (ОИЯИ)

**Tunka-HiSCORE – 1 km<sup>2</sup>  
stage 3: 10000 m<sup>2</sup> muon detectors  
(1% of array area)**



Rejection of hadron background  
by 10 times at 20-30 TeV

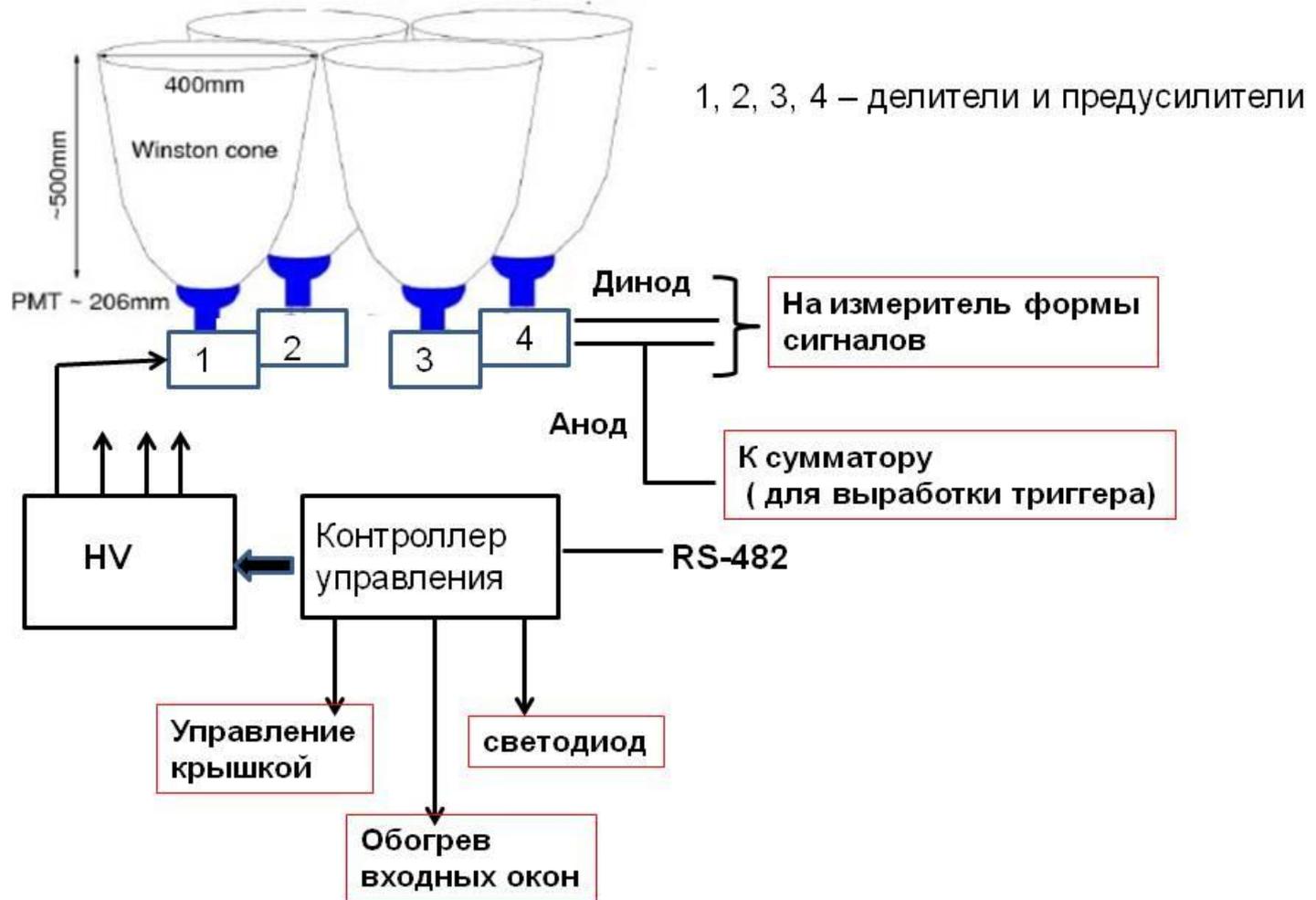


Scintillation detectors developed in Mephi

# Конструкция установки

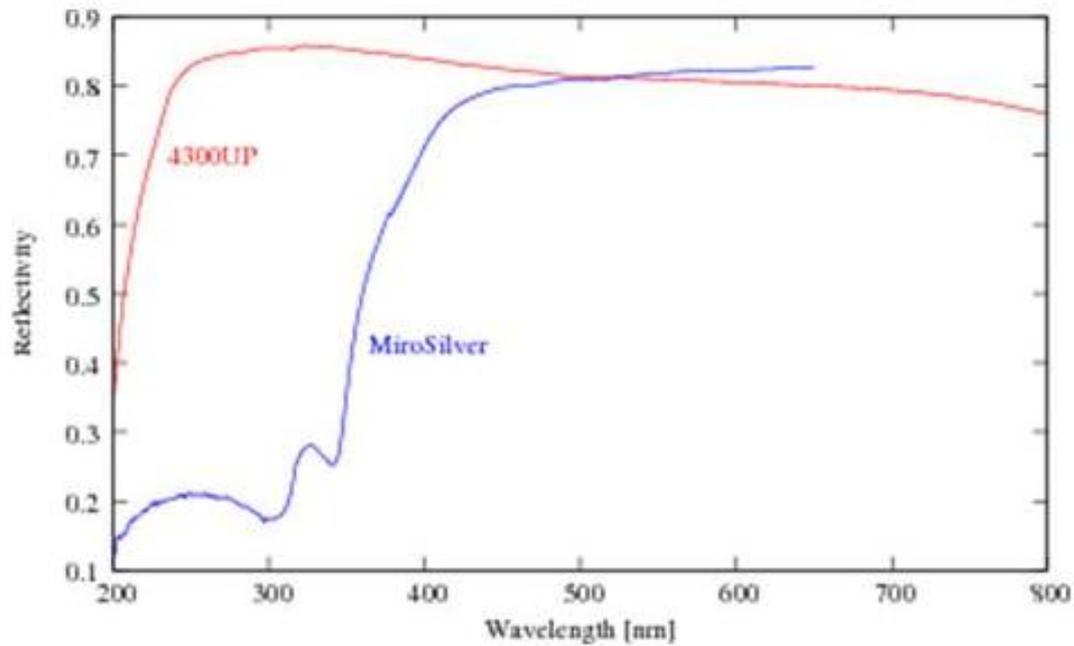
1. Оптическая станция
2. Система сбора

# Оптическая станция гамма-телескопа

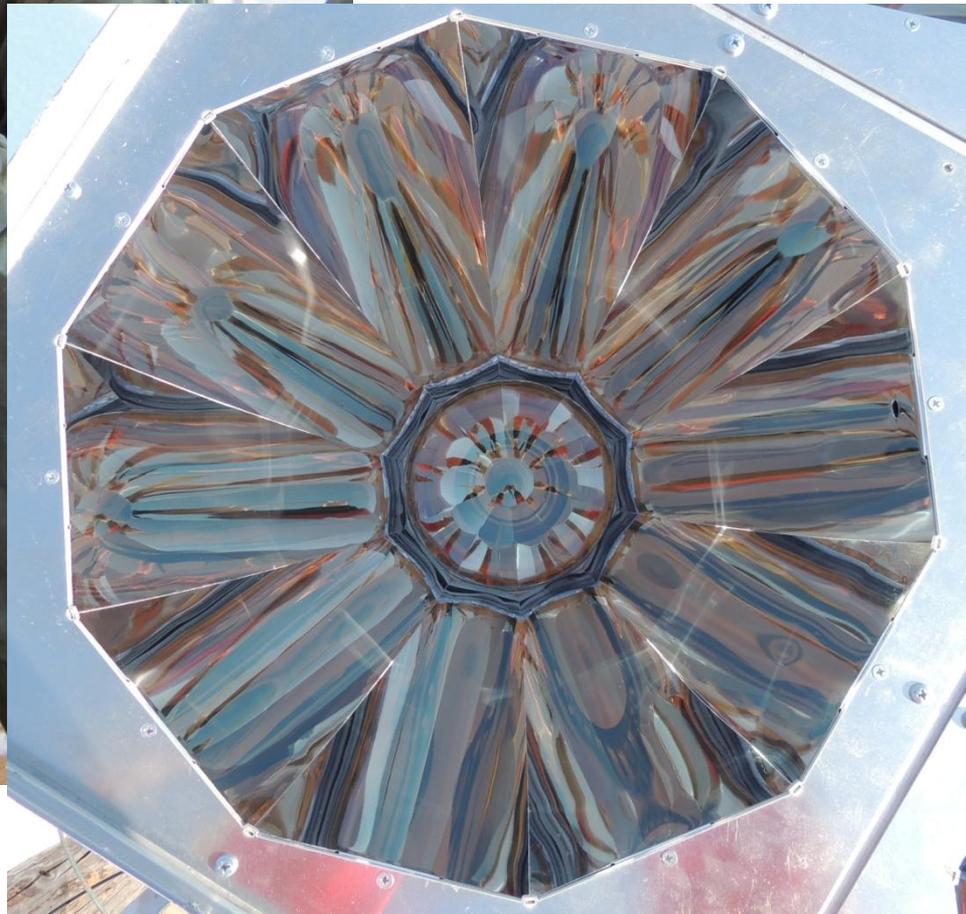


## Материал для конусов

Alanod-4300

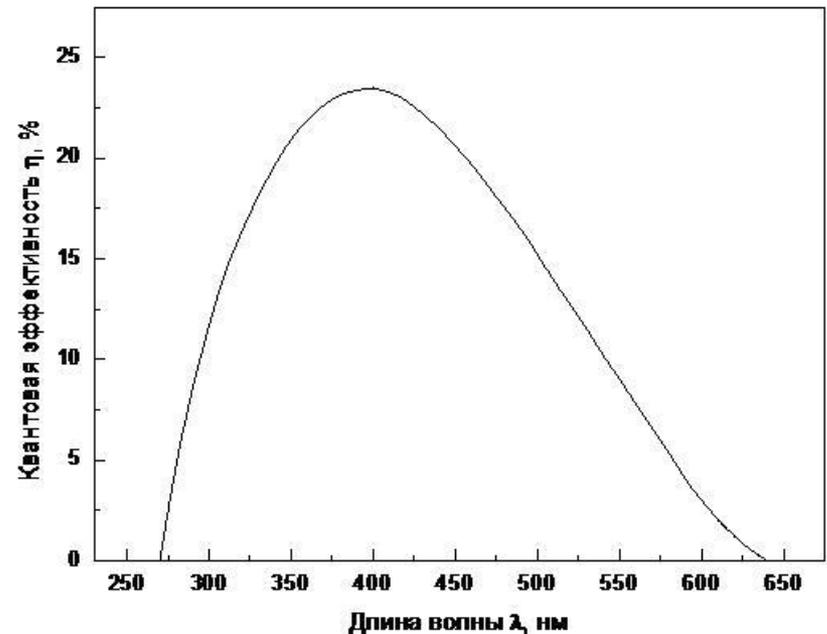


**Зависимость коэффициента отражения для материала конусов от длины волны**

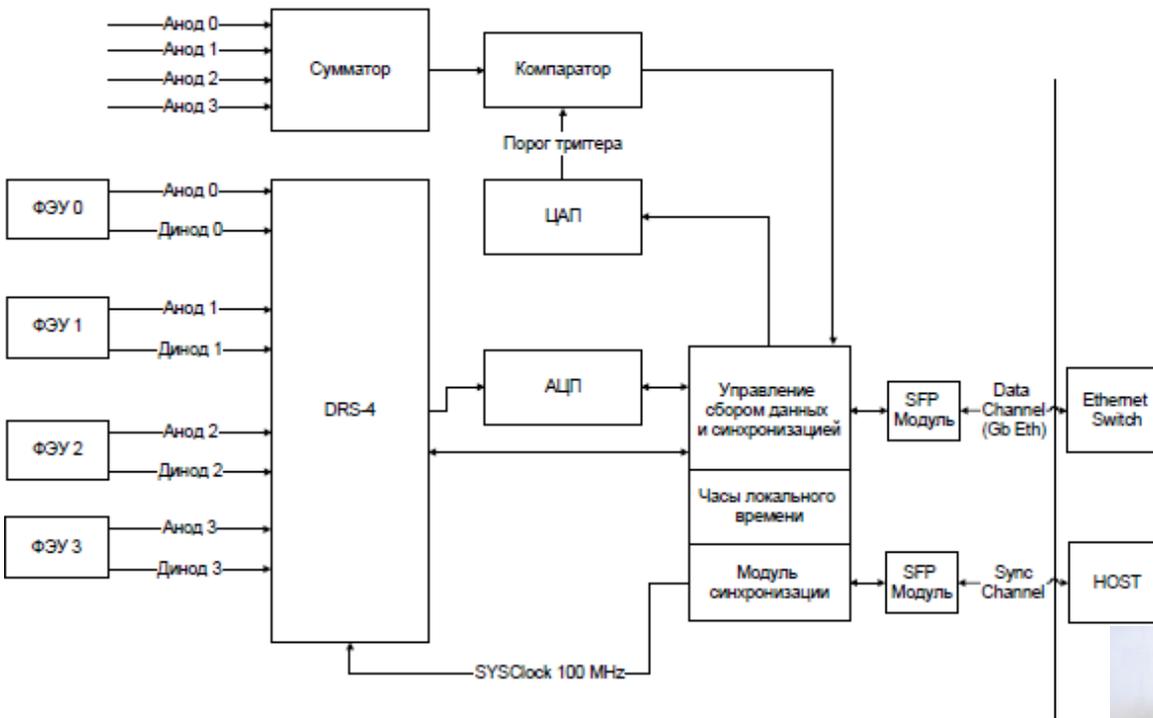


# Фотоумножитель

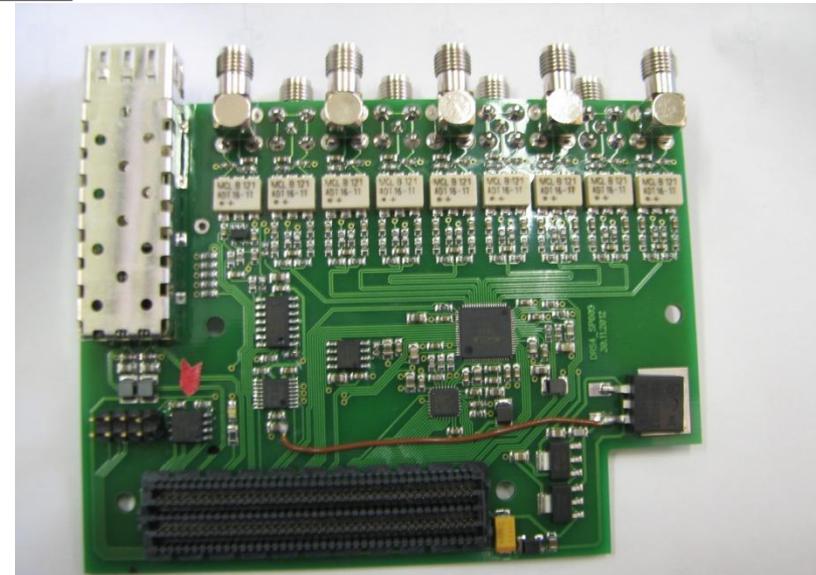
1. R5912 (Hamamatsu) ( 8" )  
QE max - 23-25%
2. 9352 KB (Electron Tube) (8" )  
6 динодов  
Диноды из CuBe  
Цена 1300 евро, 1000 ФЭУ в год
3. R7081 (10" ) QE max - 35-40%  
5000 евро
4. R11780 ( 12" ) QE max - 35-40%  
сейчас – 10000 евро , будет  
снижена до 5000 евро
5. В настоящее время обсуждается  
также возможность производства  
фотоумножителя с полусферическим  
фотокатодом большой площади  
на предприятии МЭЛЗ-ФЭУ в Москве.



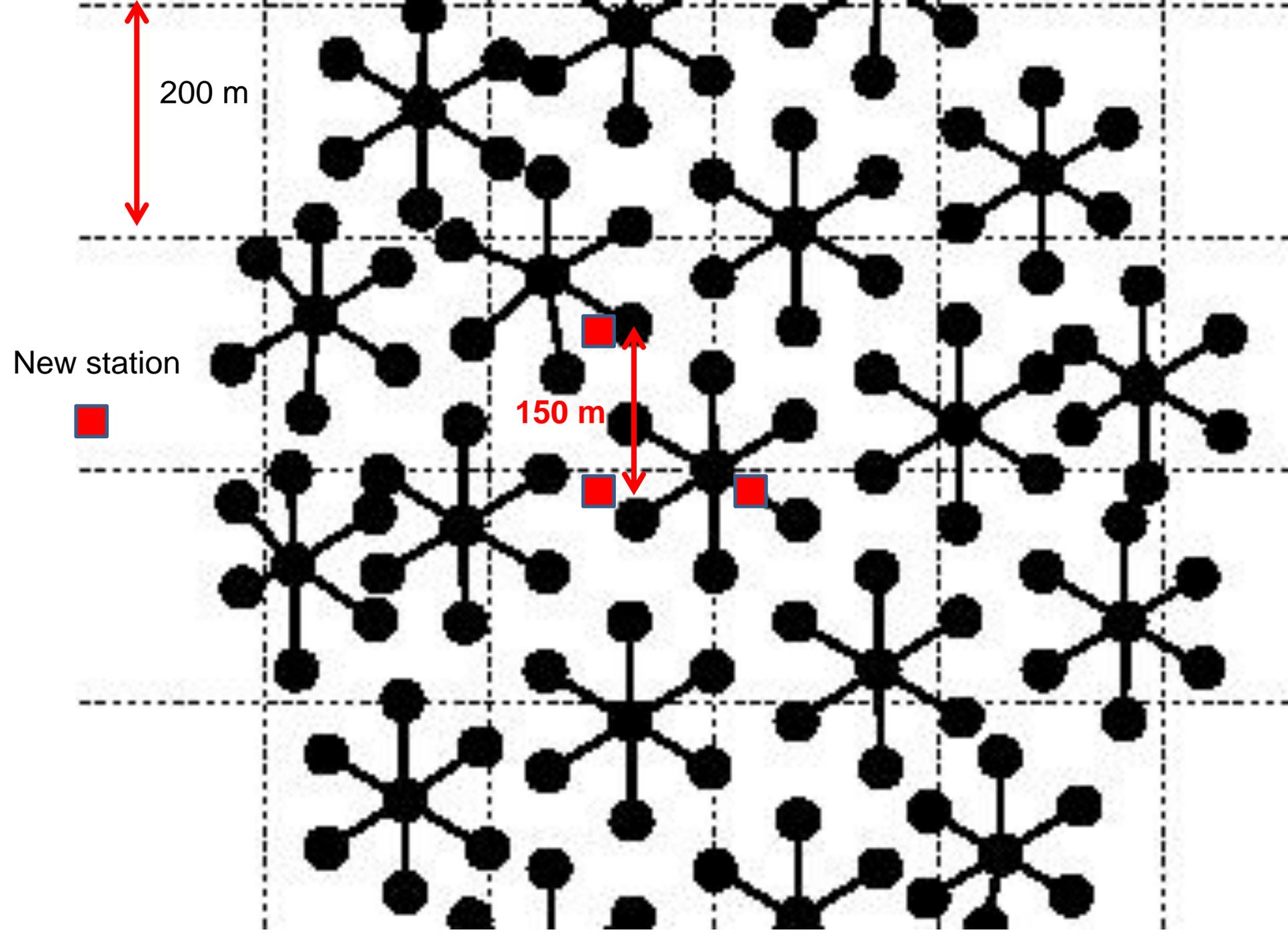
# Система сбора станции

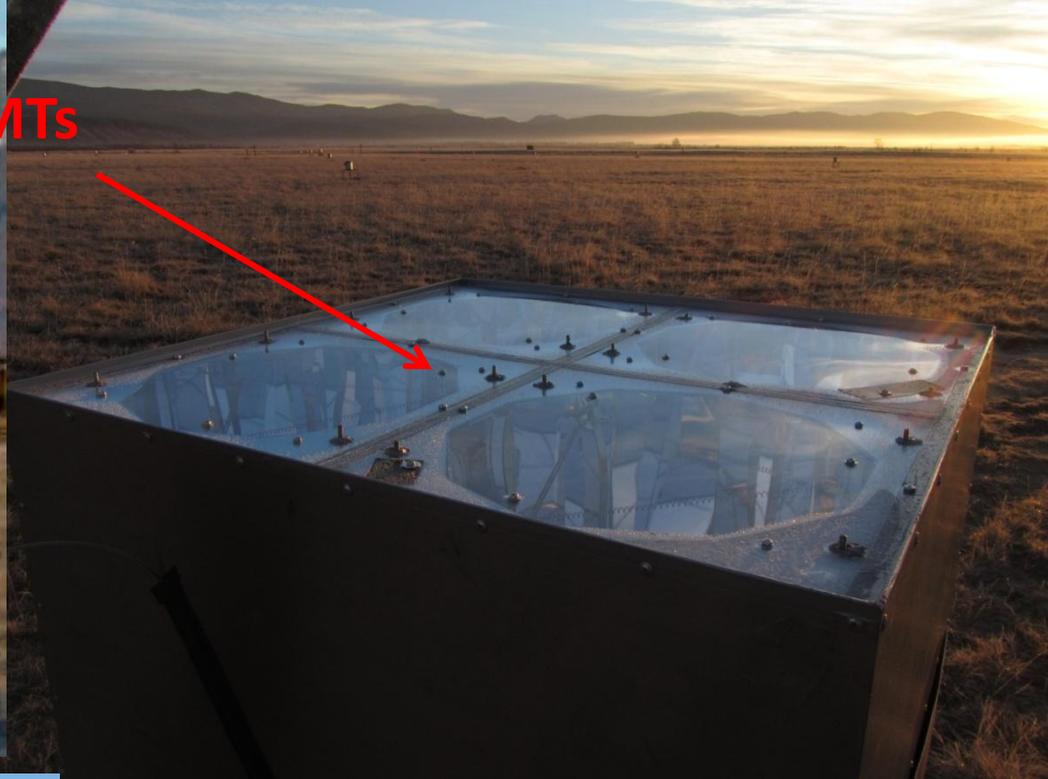
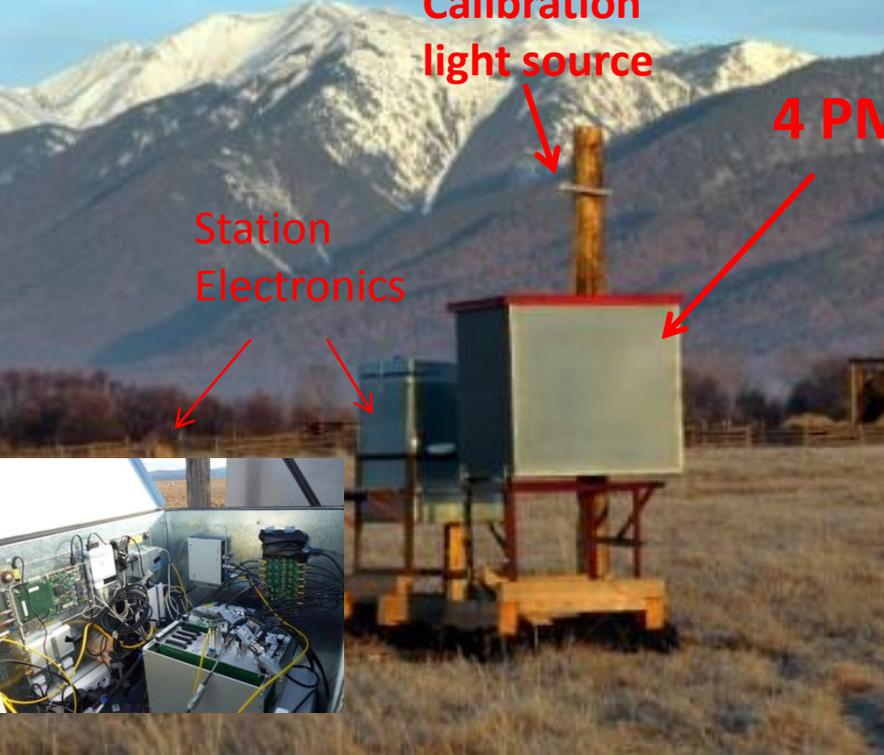


DRS-4 - DRS ( Domino Ring Sampler) 4 – это 9-входовой оцифровщик формы сигнала с шагом до 0.2 нс в 1024 точках  
Стоимость – 80 евро.



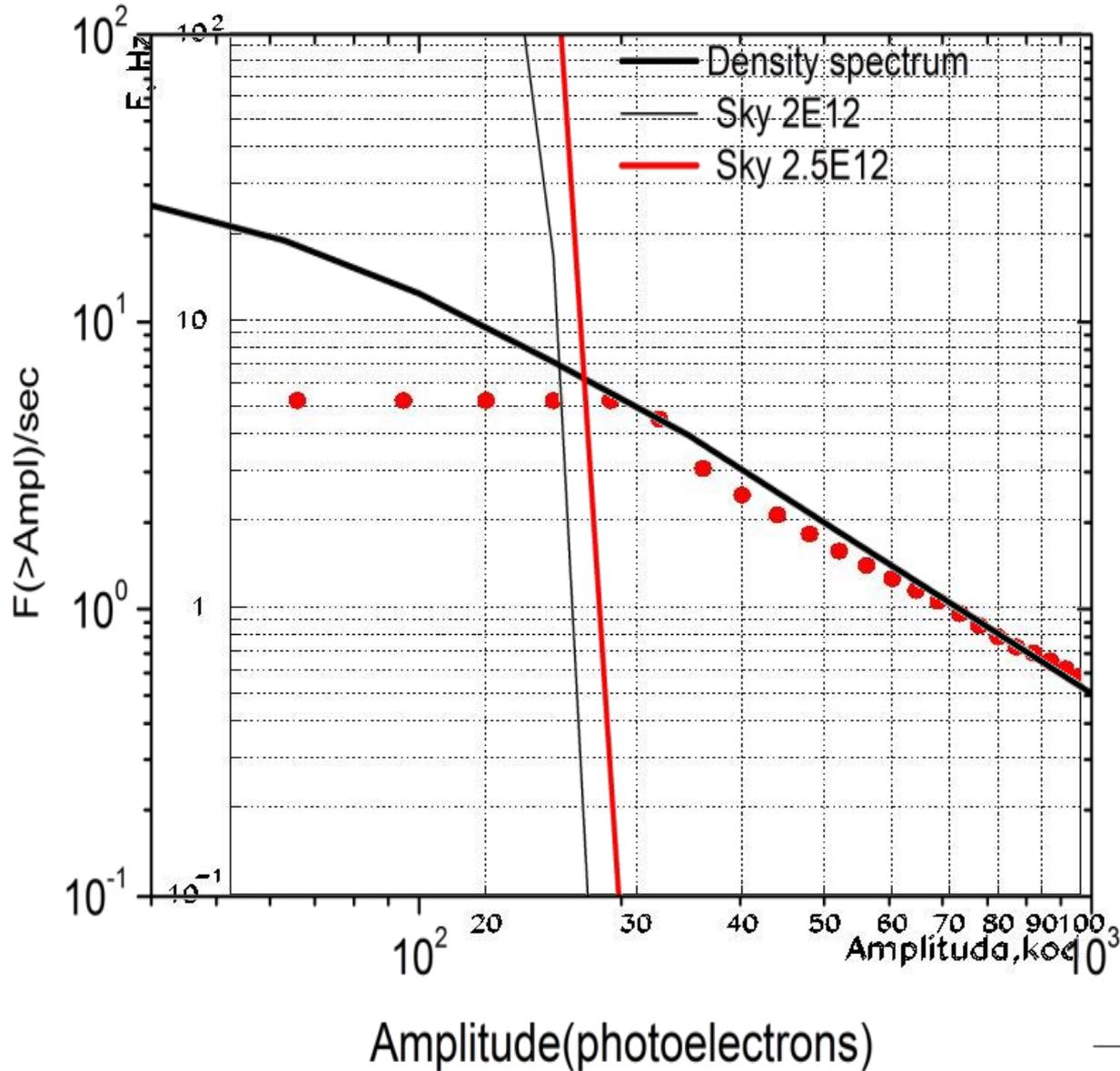
# Современное состояние 3 станции с осени 2012





5Hz

Интегральный темп счета станции : 5 Гц



Расчет :

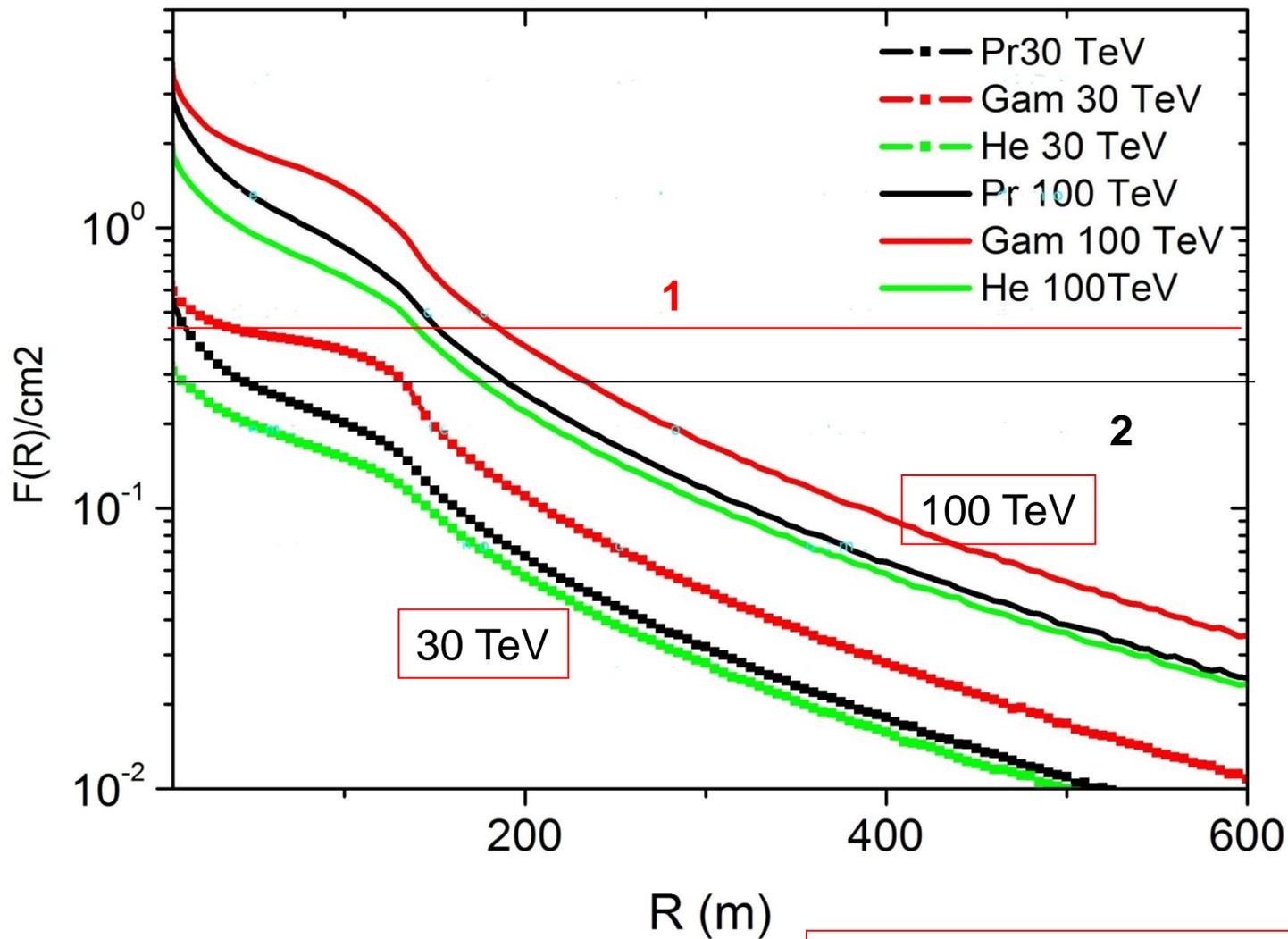
$Q_{eff} = 0.07$

$T = 25 \text{ нс}$

$Q_{eff} = 0.07$



$Q_{max} = 0.16$

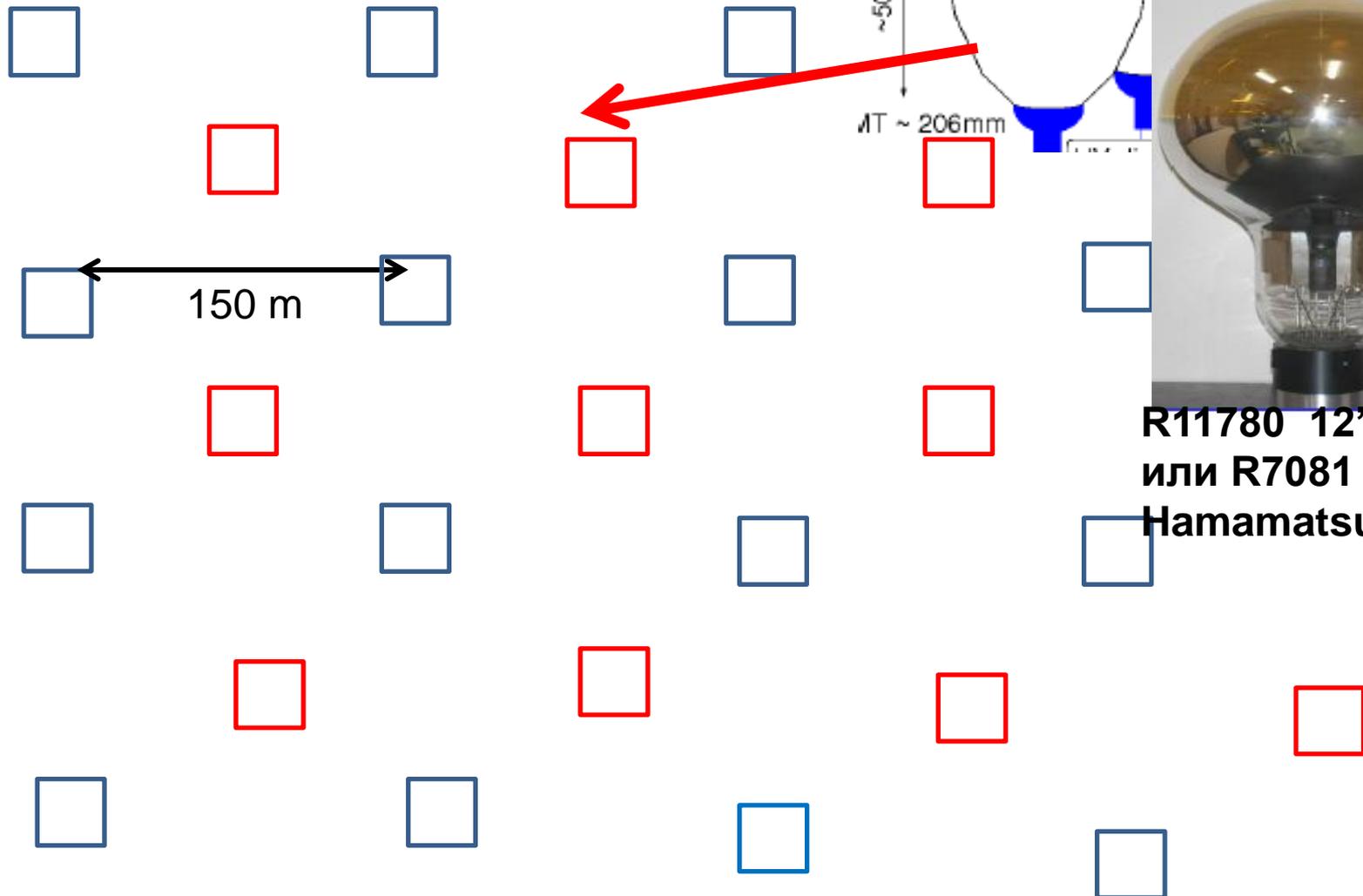


**1 : Q eff = 0.07    T = 25 ns**

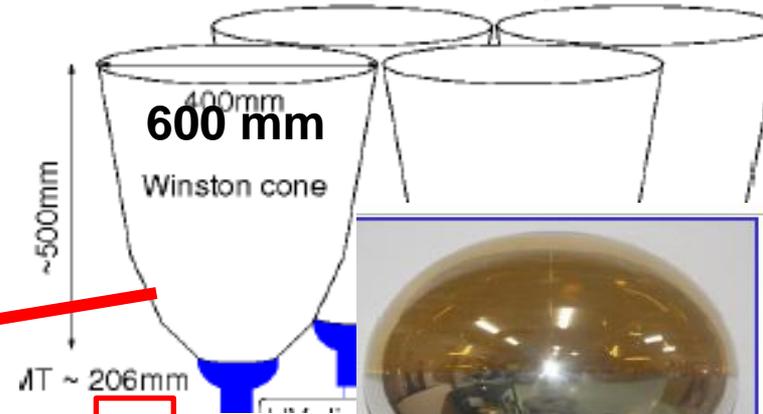
**2 : Q eff = 0.10    T = 10 ns**

# Tunka-HiSCORE – 1km<sup>2</sup>

2 stage

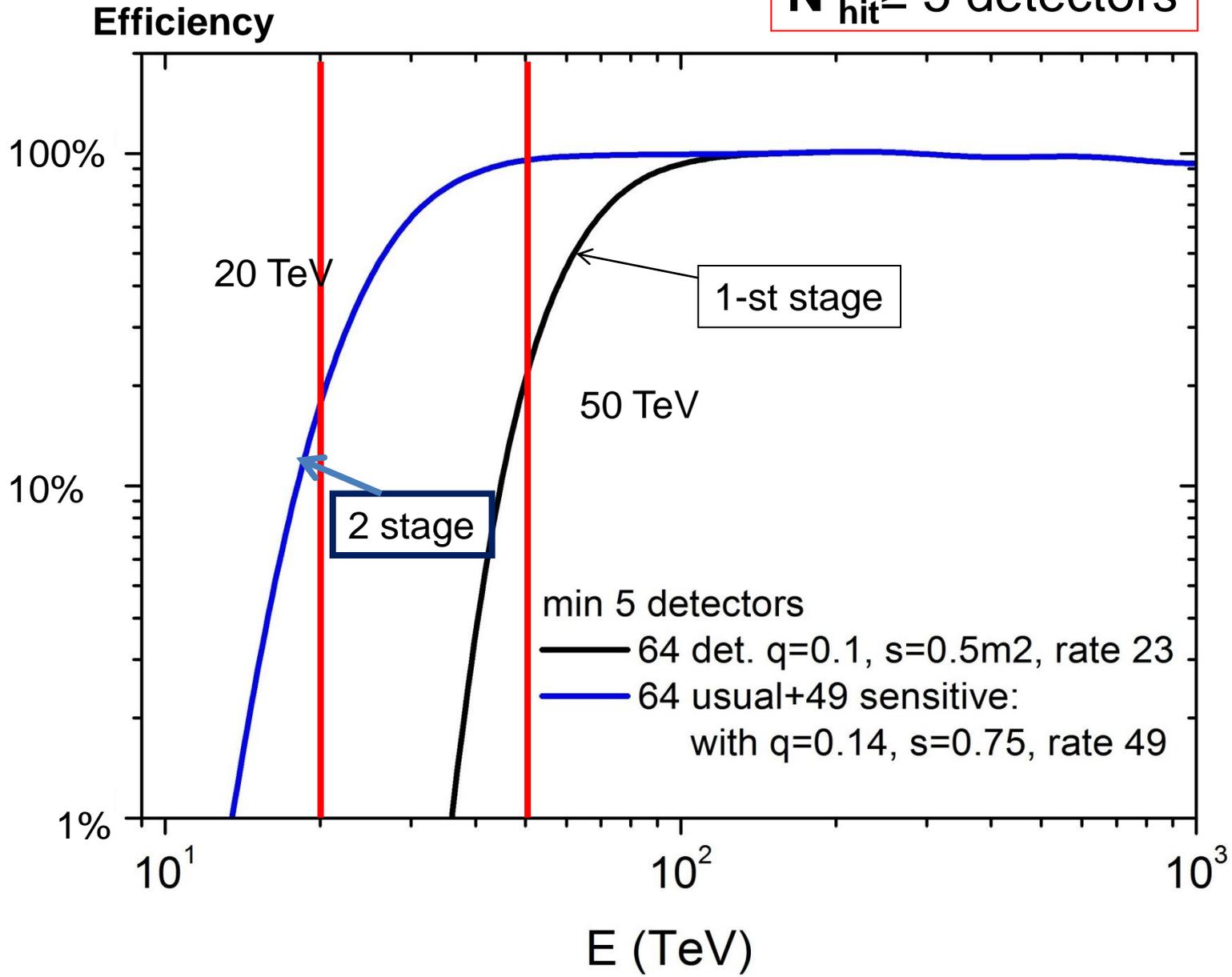


Total light-collecting area: 0.5 sqm



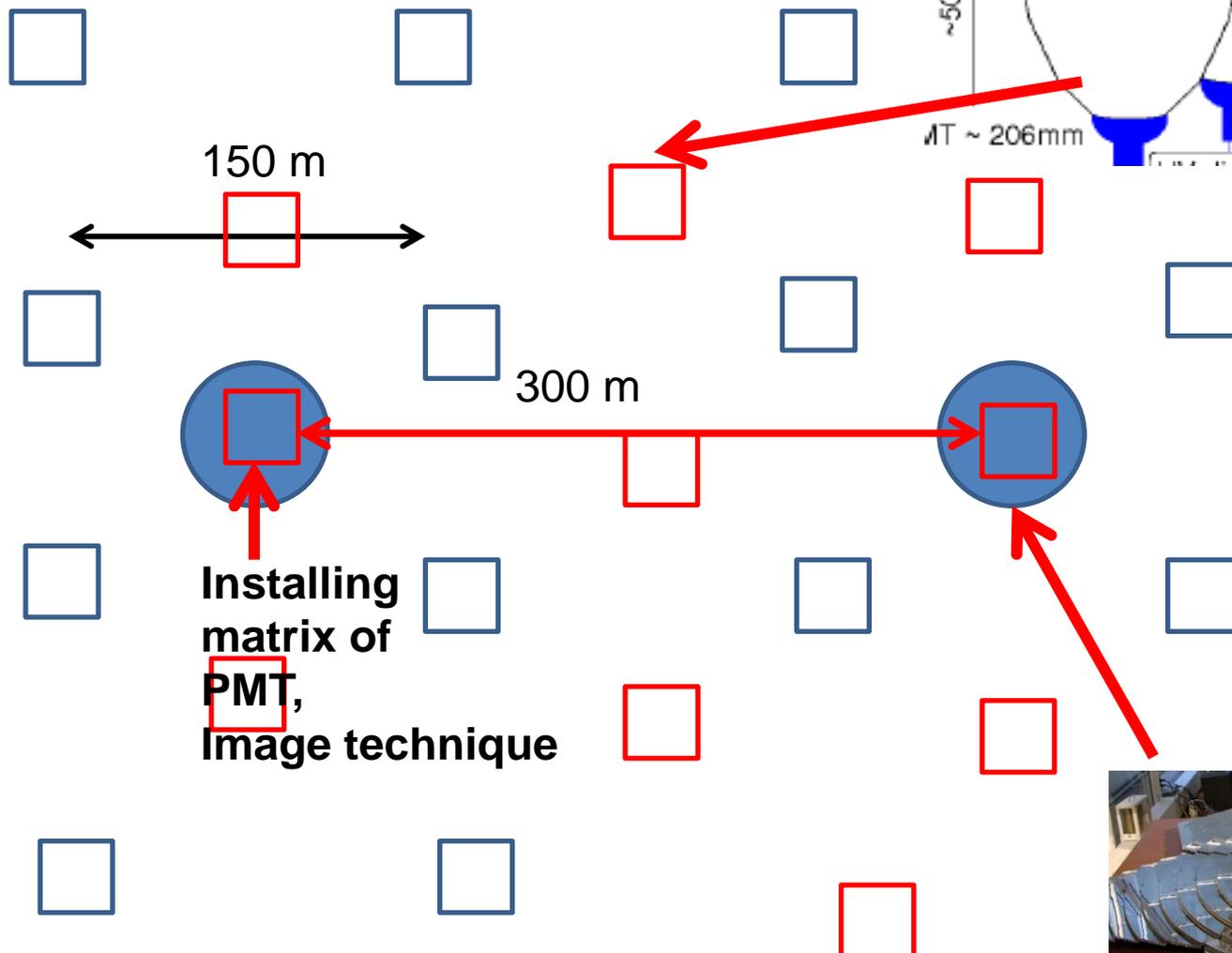
R11780 12"  
или R7081 10"  
Hamamatsu

$N_{hit} \geq 5$  detectors

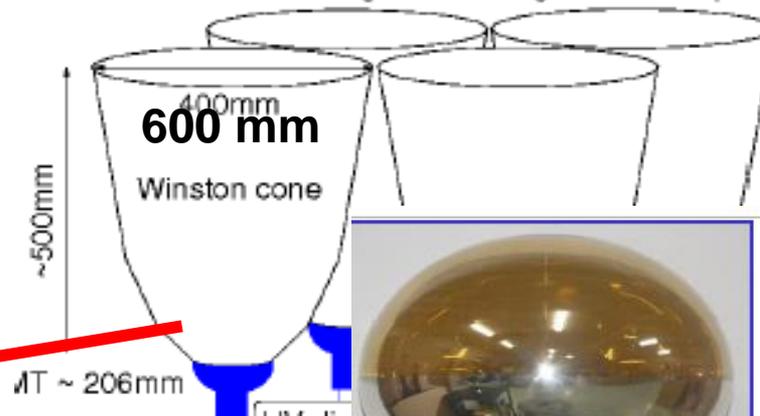


# Tunka-HiSCORE – 1km<sup>2</sup>

2' stage

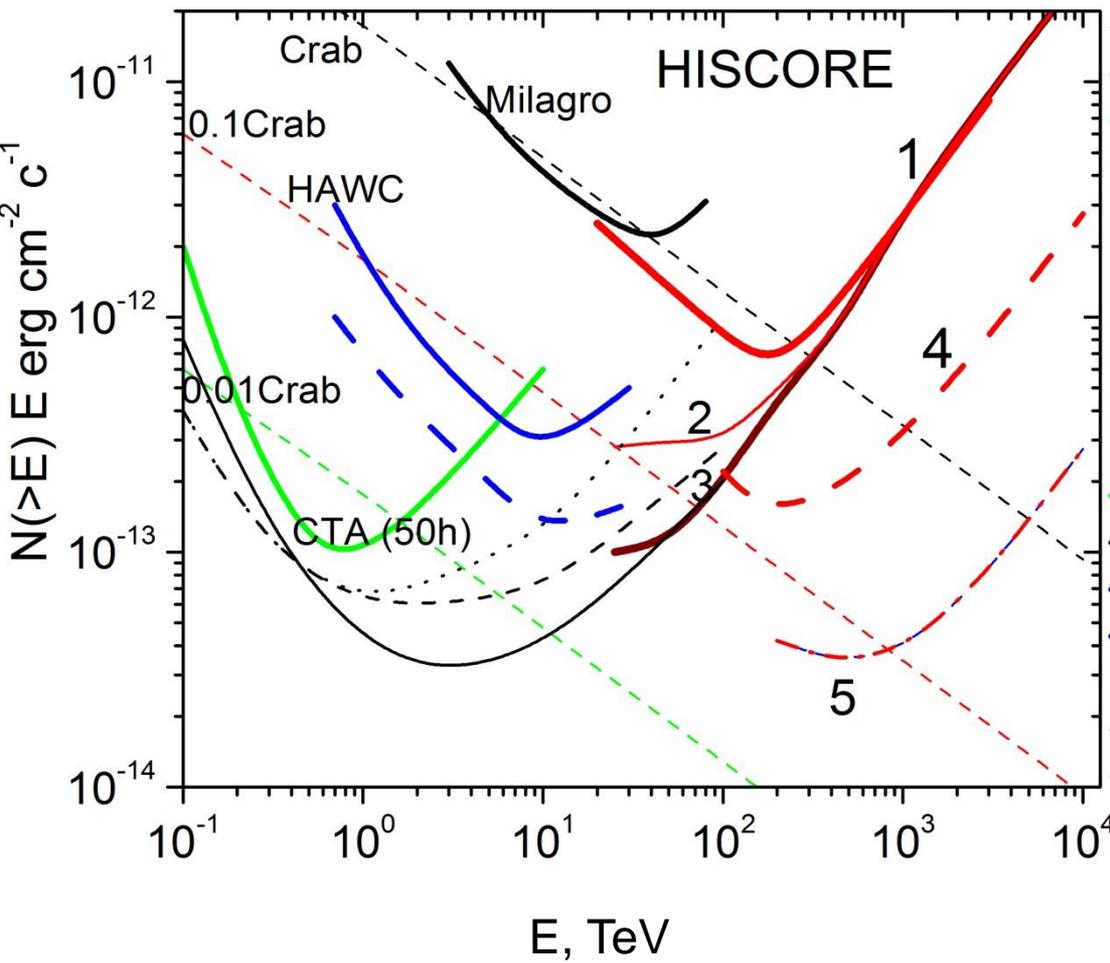


Total light-collecting area: 0.5 sqm



2 m<sup>2</sup> mirror,  
7° FOV,





**50 events or 5 RMS,  
T = 500 hours**

- 1 – 1 km<sup>2</sup>, 4 PMTs per station ( 8'' PMT)**
- 2 – 1 km<sup>2</sup>, 4 PMTs per station (12'' PMT)**
- 2' – mounting of matrix in each mirror (not yet simulated)**
- 3 – 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup> muon detectors**
- 4 – 10 km<sup>2</sup>, 4 PMTs per station ( 8' PMT) for 12'' PMT (not yet simulated)**
- 5 – 100 km<sup>2</sup> (8'' PMT)**

## 3 stations in October 2012

**S=1 km<sup>2</sup>, 60 stations, 150 m step, 240 PMTs (150 PMTs are available),  
1 M Euro, 2012 – 2014**

Decreasing of  
energy threshold

S = 1 km<sup>2</sup>, 60 station with  
240 PMT (10'') + 15 mirrors  
( S = 2 m<sup>2</sup> )  
- Without matrix of PMTs  
- With matrix of PMTs  
Cost: 5 M Euro.

10000 m<sup>2</sup> scintillation detectors  
(1% of the whole area)  
– 2-5 muons from 25 TeV protons  
Cost: 20-25 M Euro.

Increasing of  
area of array

S = 10 km<sup>2</sup>, 225 station ,  
200 m step, 1000 PMT,  
5-6 M Euro.

**Choose new  
Place for deployment**

S = 100 km<sup>2</sup>, 2000 station,  
**1 PMT in station**  
10-12 M Euro



Спасибо за  
внимание