

# Крупномасштабные детекторы для исследований космических излучений

Л.Кузьмичев (НИИЯФ МГУ)

Сессия Секции Ядерной Физики

К 70 летию В.А.Рубакова

21.02 2025

1. Крупномасштабные детекторные комплексы: краткий обзор.
2. Методы исследования космических излучений.
3. Детекторные комплексы и запланированная модернизация.
4. Проекты новых установок для исследования космических излучений.

# Крупномасштабные детекторные комплексы первой четверти 21 века

2000

2010

2020

2030

2040

**Космические  
лучи предельно  
Высоких энергий**

**Наземные:** P.Auger Observatory (PAO) TA, TA×4, GCRO

**Космические:** TUC, EUSO, KLPVE (POC) ZEVS, POEMMA

**Гамма-  
астрономия**

**Телескопы:** HESS, MAGIC, VERITAS, CTAO

**Установки ШАЛ :** HAWC, LHAASO, SWGO, TAIGA-100

**Нейтринная  
астрофизика**

**Глубоководные:** IceCube, Baikal-GVD, KM3-NeT, IceCube-Gen2, P-one. HUNT, TRIDENT

**Радио детекторы:** ANITA, ARA, GRAND, RNO-G

# Методы исследования космических излучений

1. Широкие атмосферные ливни (ШАЛ)
2. Регистрация заряженных частиц ШАЛ
3. Черенковское излучение
4. Флюоресцентное излучение
5. Радиоизлучение
6. Детектирование нейтрино высоких энергий

# Методы изучения ШАЛ

Что регистрируем:

$e^+$  и  $e^-$   $\gamma$ -кванты – МэВ

Мюоны ( $\geq 0.5$  ГэВ)

Фотоны (300 – 600 нм)

Радио (20 – 100 МГц)

Что хотим восстановить:

Энергию

направления прихода

Тип частицы

$$X_{\max} \propto \lambda \ln[E_0/(A E_c)]$$

Черенковское излучение

мюоны,  
нейтрино

Флюоресцентное  
излучение

e, гамма

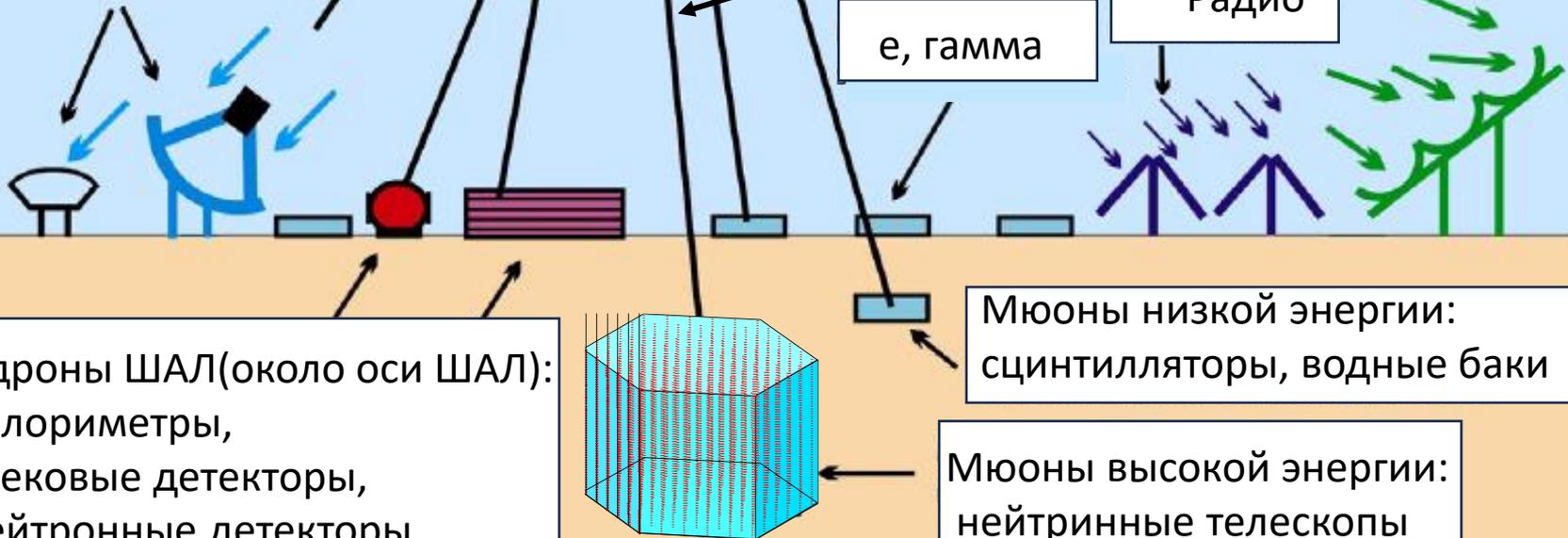
Радио

Адроны ШАЛ(около оси ШАЛ):  
калориметры,  
трековые детекторы,  
нейтронные детекторы

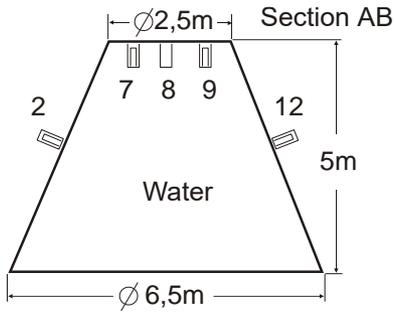
Мюоны низкой энергии:  
сцинтилляторы, водные баки

Мюоны высокой энергии:  
нейтринные телескопы

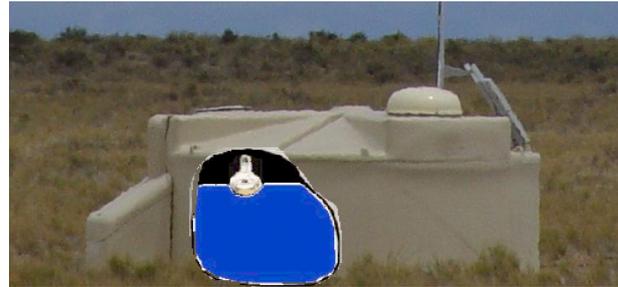
P, A



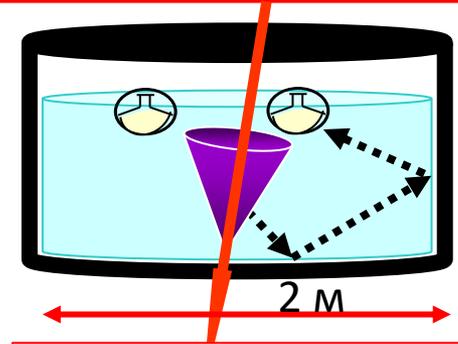
# Водные черенковские детекторы для регистрации заряженных частиц ШАЛ



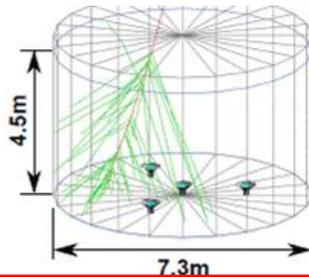
Водный детектор А.Е. Чудакова, 1959 год . 100 т воды



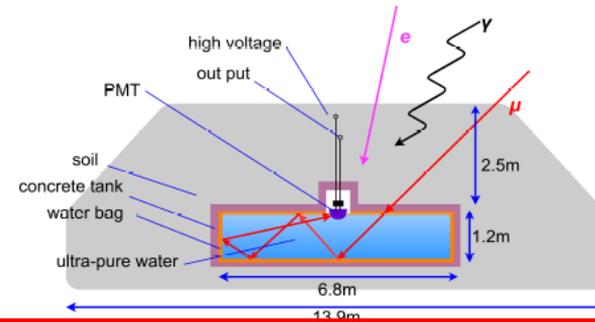
Водный детектор частиц Обсерватории P.Auger ( PAO). 12т воды.



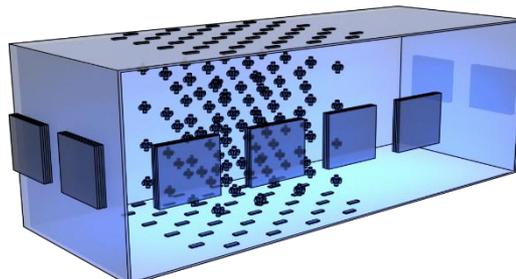
Ледяной детектор установки Ice-Тор на Южном полюсе



Водный детектор частиц гамма-обсерватории HAWC, 200 т воды. Всего 300 баков



Водный детектор мюонов установки LHAASO, 45 т воды. Площадь ~ 40 м<sup>2</sup> .В установке 1100 детекторов.

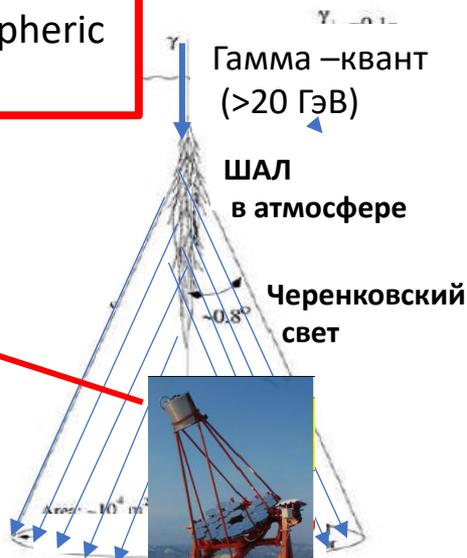


НЕВОД, 2100 т воды  
Площадь – 230 м<sup>2</sup>

# Регистрация черенковского излучения ШАЛ

Черенковский телескоп  
(IACT – Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope)

Камера телескопа  
500-1000 пикселей



Широкоугольные  
черенковские детекторы

Цель установок: спектр и массовый состав космических лучей.

Угол обзора  $\sim 1$  -2 стерадиан.

Точность восстановления направления прихода ШАЛ 0.1 -0.3 град.

Энергетическое разрешение  $\sim 20$  %

Возможность восстановления глубины максимума ШАЛ ( $X_{\max}$ ) – ключ к массовому составу.

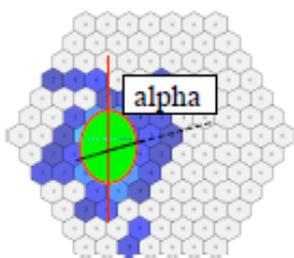
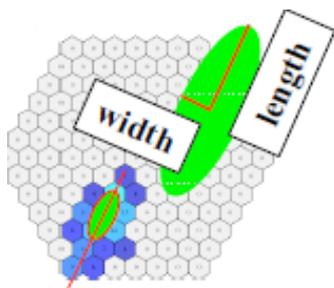
Режекция событий от космических лучей на уровне  $10^{-4}$  по форме изображения в камере

Угол обзор: 3 -10 град.

Энергетический порог от 20 ГэВ до 3 ТэВ

ШАЛ от гамма- кванта

ШАЛ от протона



Тунка-133

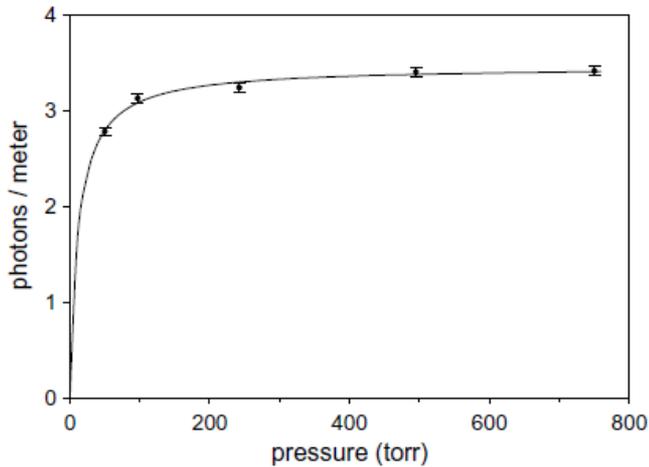
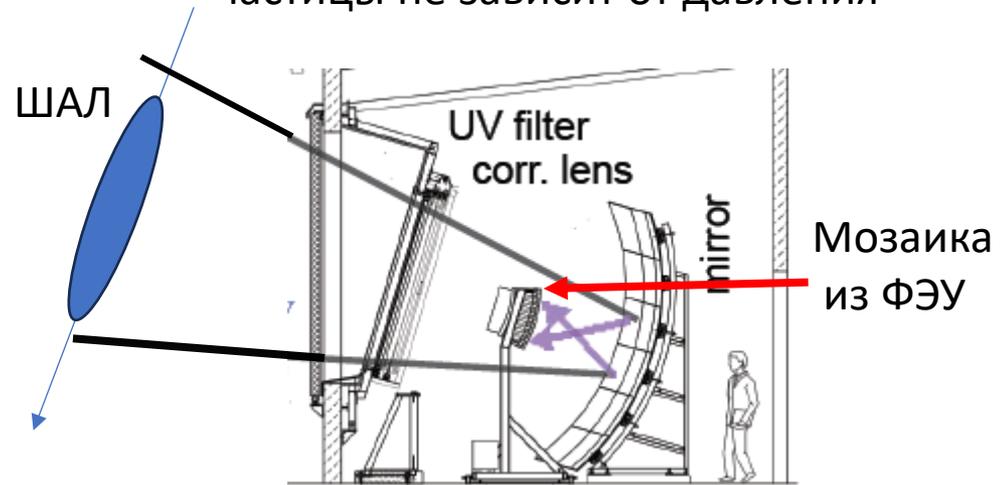
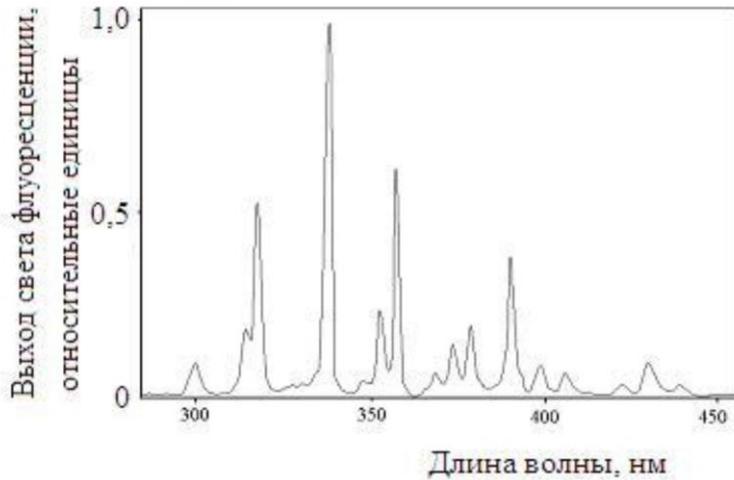


# Флюоресцентное излучение от ШАЛ

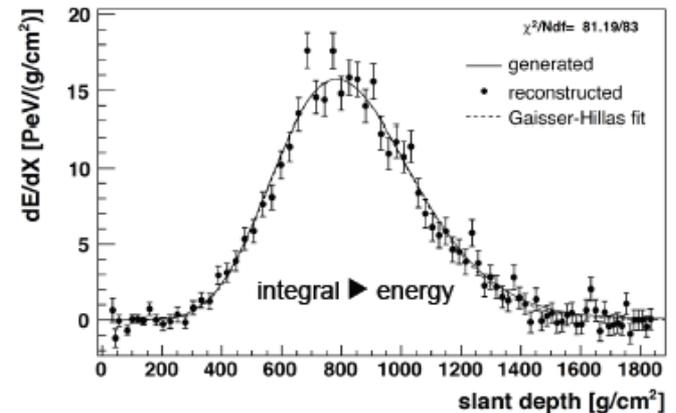
Метод предложен А.Е. Чудаковым в 1962  
Излучение от возбужденных молекул азота

Главные характеристики излучения

1. Диапазон- 300 – 400 нм
2. Излучение изотропно
3. Число фотонов от заряженной частицы не зависит от давления



Зависимость числа фотонов/метр  
от заряженной частицы от давления



# Радиоизлучение ШАЛ

Предсказание: Г.Аскарьян, 1962. Открытие: Jelley, 1965 Геомагнитное излучение: Kahn 1966

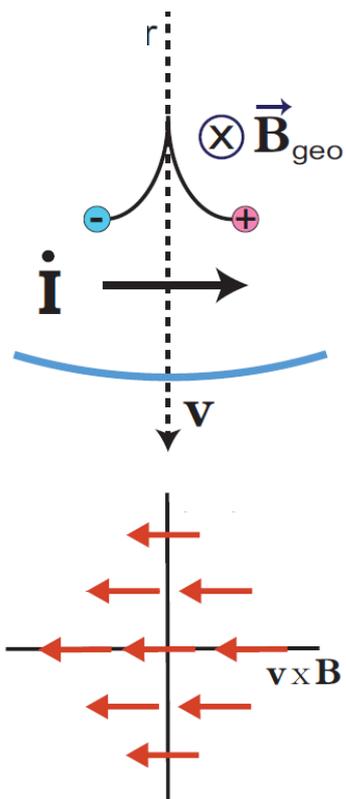
Геомагнитное излучение

Излучение избытка электронов (Аскарьян)

Доминирует  
в воздухе

Угловое  
Распределение:  
< 1 град.

Частотный  
диапазон:  
20-100 МГц  
Длина волны  
больше  
толщины  
диска ШАЛ



Фронт ШАЛ :

Поляризация

Энергетический порог  
 $\sim 10^{17}$  эВ

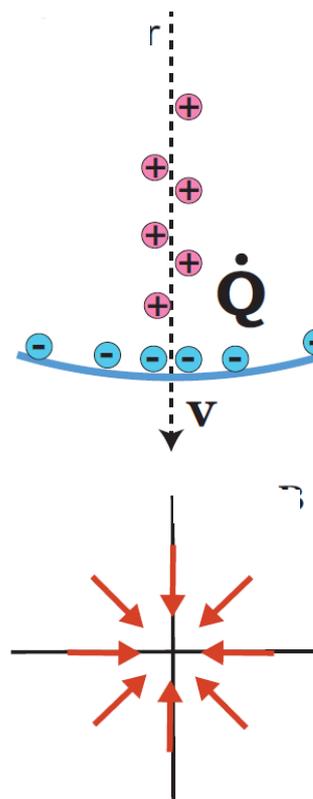
Электроны,  
выбиваемы из  
атомов воздуха

$$Q \sim 0.2 N_{\text{tot}}$$

Доминирует в твердых  
средах ( лед, соль, лунный  
грунт)

Угловое распределение:  
< 56 град ( глубинный лед)

Частотный диапазон:  
0.1 - 1 ГГц

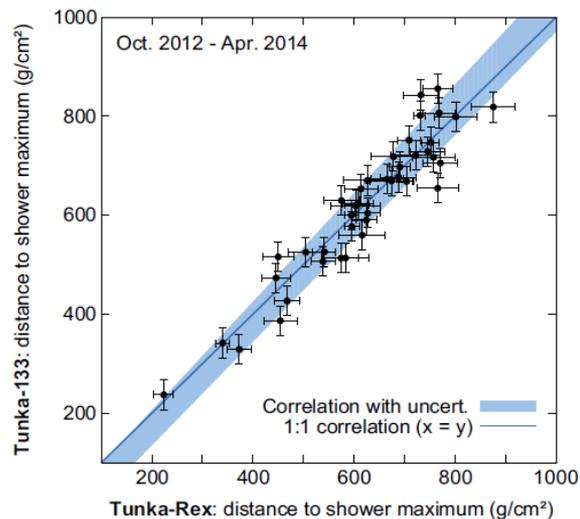
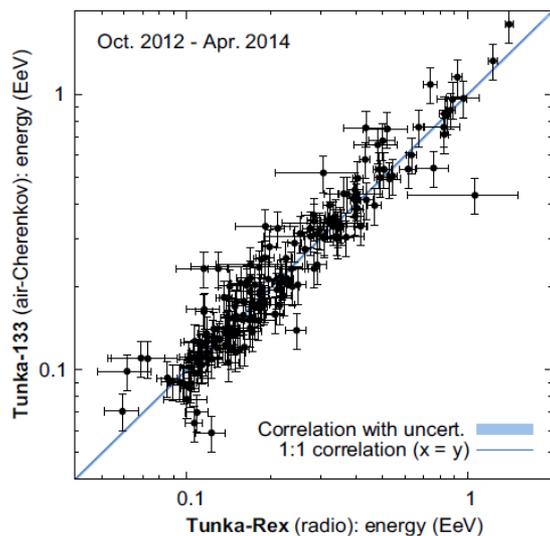


# Черенковское излучение & радиоизлучение

время наблюдения: 5%-10%

90% -95%

Tunka-133 ( черенковское излучение) & Tunka-REX ( радио)



Tunka-REX:

~40 антенн на площади  
1 км<sup>2</sup>

Антенны подключены  
к системе сбора  
установки Тунка-133.



Tunka\_REX

Энергетическое разрешение ~ 20%

Глубина максимума X<sub>max</sub> ~ 30 g/cm<sup>2</sup>

# Детектирование нейтрино высоких энергий

## треки мюонов

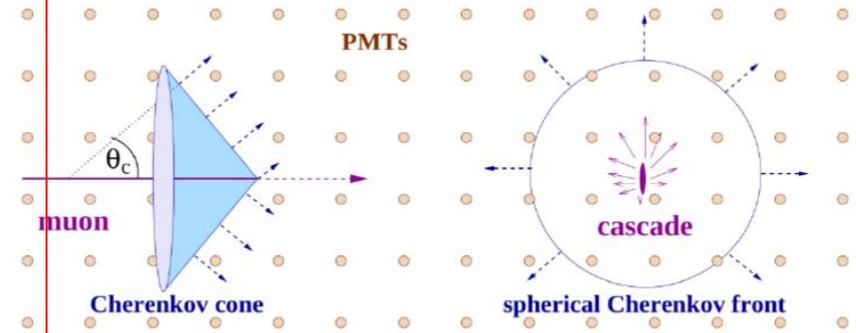
$\nu_\mu + N \rightarrow \mu + \text{адроны}$

Угловое разрешение:  $0.3^\circ - 0.5^\circ$

Энергетическое разрешение:  $\sim 300\%$

для  $E = 1$  ПэВ длина трека  $\sim 15$  км

$E \nu_{\text{max}} : 220 \text{ ПэВ} \quad (110 - 700 \text{ ПэВ})$



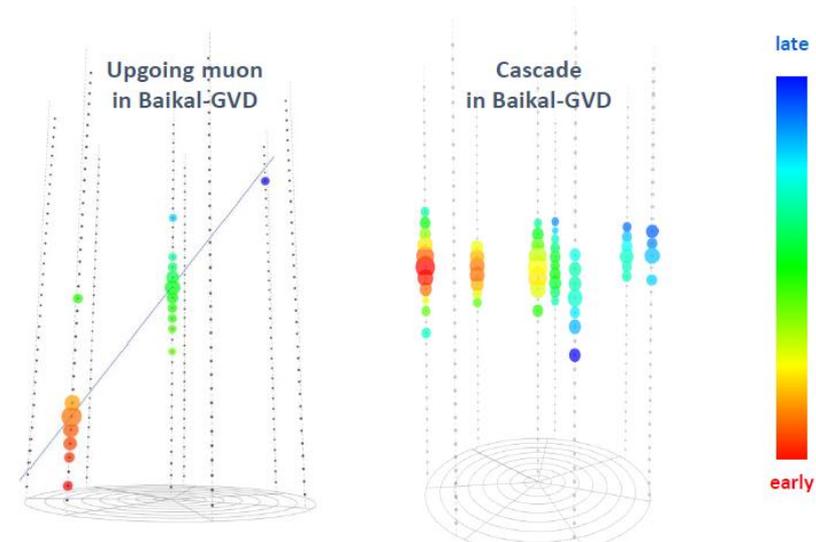
## Каскады

$\nu_e + N \rightarrow e + \text{адроны}$  (электромагнитный и адронный каскад)

Угловое разрешение  $\left\{ \begin{array}{l} 3^\circ - 10^\circ \text{ (Baikal -GVD)} \\ 10^\circ - 15^\circ \text{ (IceCube)} \end{array} \right.$

Энергетическое разрешение: 10- 15%

$E_{\text{max}} \sim 6 \text{ ПэВ}$



# Детекторные комплексы и их развитие

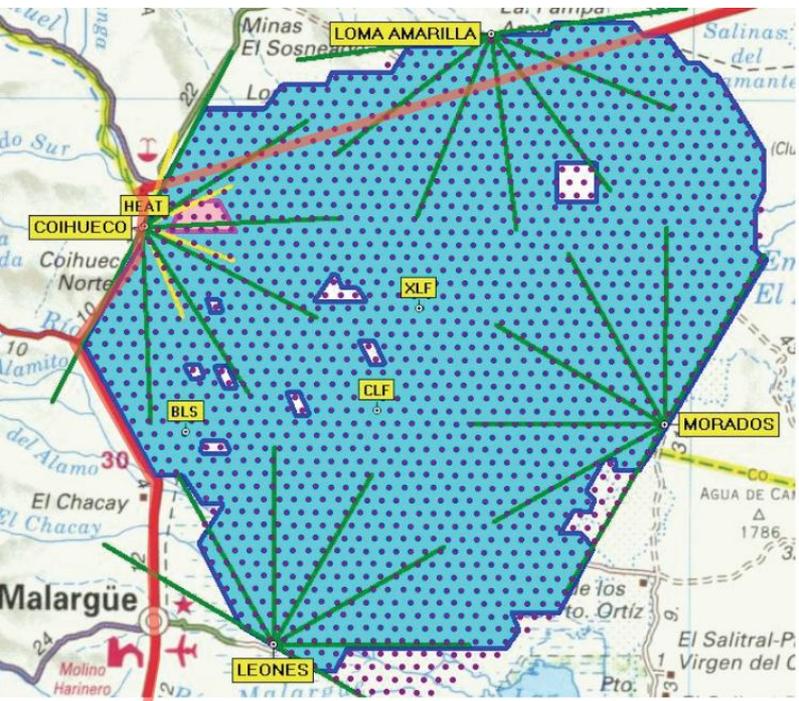
1. P. Auger Observatory (PAO)

2. Черенковский телескоп MAGIC

3. Высокогорная установка LHAASO

4. Нейтринный телескоп Baikal - GVD

# P. Auger Observatory (PAO)



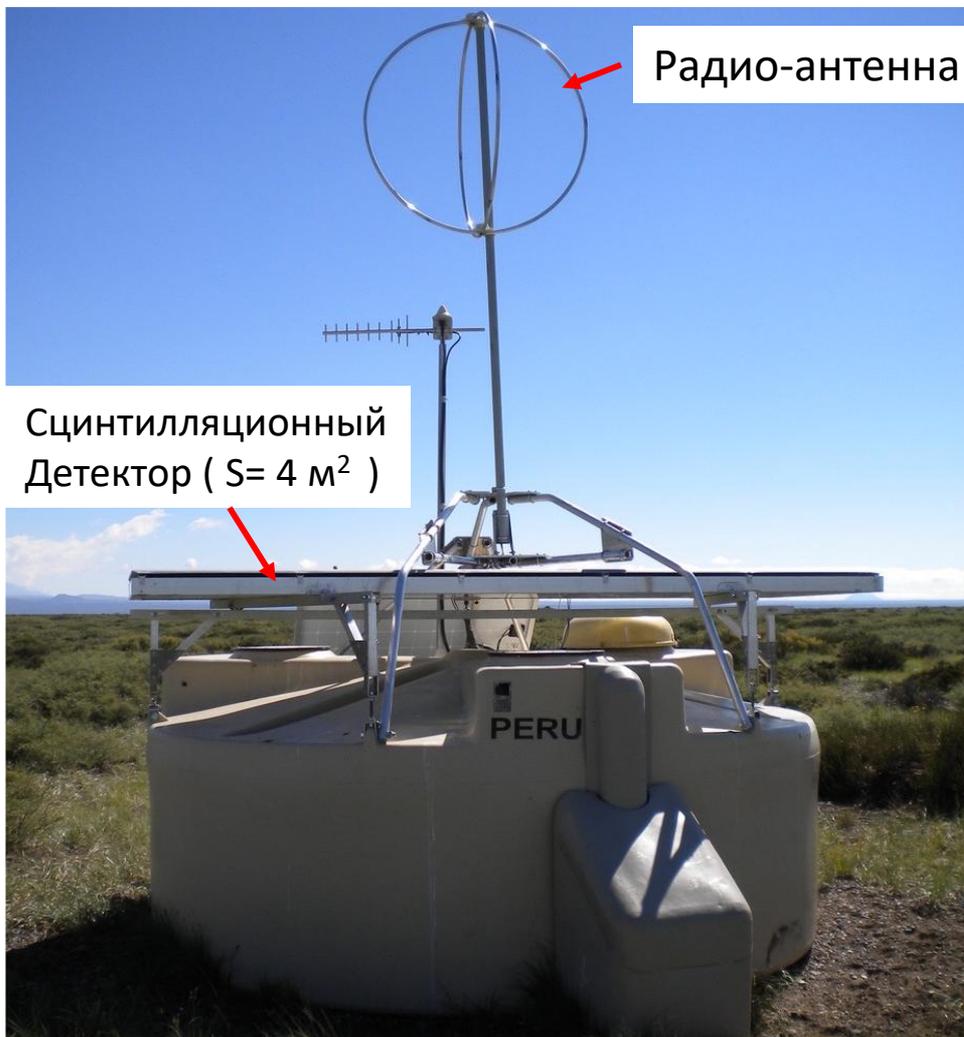
1660 водных детекторов ( $S=10 \text{ m}^2$ ,  
12 тонн воды) на  $3000 \text{ km}^2$

4 × 6 флуоресцентных телескопов



# AugerPrime

улучшение точности восстановления числа мюонов и энергии горизонтальных ливней



Радио-антенна

Сцинтилляционный Детектор (  $S= 4 \text{ м}^2$  )

## Модернизация

1. Добавление ФЭУ с диаметром фотокатода 2.5 см – расширение диапазона линейности.
2. Добавления сцинтилляционного детектора ( $4\text{м}^2 \times 1 \text{ см}$ )  
– улучшения точности определения числа мюонов( массовый состав)
3. Добавление радио- антенны-  
- восстановление энергии горизонтальных ливней ( $>60^\circ$ )  
- отношение числа мюонов к энергии ( «мюонная загадка» )  
- выделение ШАЛ от протонов- «протонная астрономия» -

Получено финансирование на 10 лет эксплуатации

# Global Cosmic Rays Observatory (GCRO)

Площадь -  $60000 \text{ км}^2 \sim 250 \times 250 \text{ км}$  ( в 20 раз больше PAO)

Число станций Auger-like - 18000 ( в новых нейтринных телескопах планируется больше 20000 оптических модулей)

Начало работы (?) -конец 30 годов

Проект сравним по стоимости с стоимостью новых нейтринных телекопов и орбитальной обсерватории РОЕММА

# Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescope (MAGIC). ( La Palma, Канарские острова.)



Камера:  
FoV – 3.6°  
1000 ФЭУ

Мозаика из  
1000 зеркал  
D = 17 м

F = 17 м

MAGIC I  
MAGIC II  
85 м

Оптический кабель  
для передачи сигналов  
с ФЭУ

Каркас из  
углепластика

Моторы азимутальных  
поворотов 7град/сек

MAGIC I и MFGIC II на  
расстоянии 85м.

2200 м на уровне  
моря

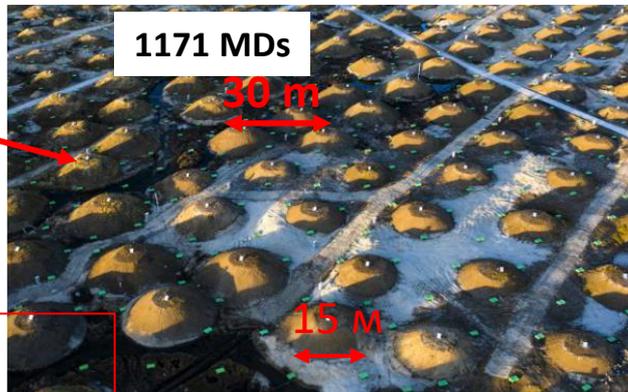
Площадь зеркала  
240 м<sup>2</sup>

Энергетический порог  
25 ТэВ

Вес – 40 т

Время направления  
в любую точку  
неба < 22 сек

# Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO), 4410 м над уровнем моря, Тибет



1171 MDs

$$S_{md} = 36 \text{ m}^2$$

$$S_{tot} = 40000 \text{ m}^2$$

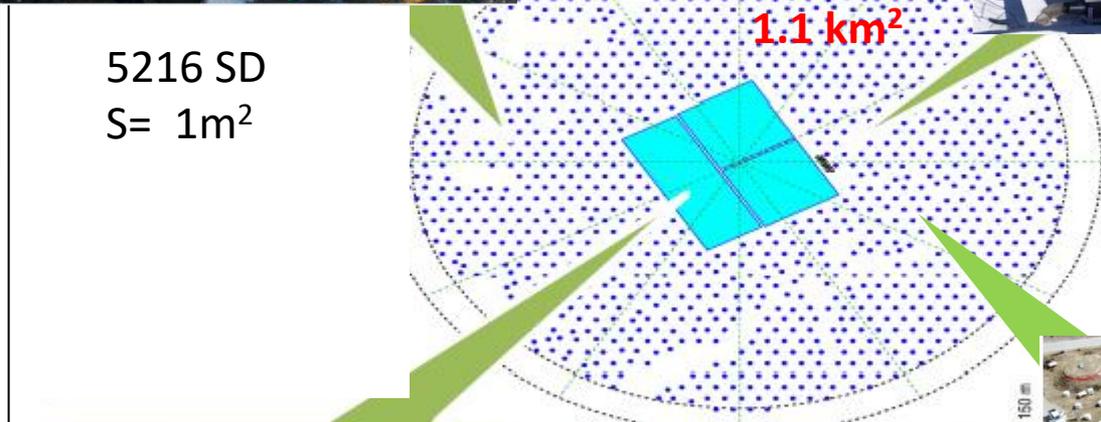
Мюонные детекторы  
4% от полной площади установки

Угловое разрешение:  
0.25°  
Энергетическое  
Разрешение: 20%



18 telescopes  
FoV=16°×16°

Телескопы для исследования  
массового состав  
КЛ



5216 SD  
S= 1m²

1.1 km²

Очень хорошее  
Гамма-адронное  
разделение при  
энергии выше  
30 ТэВ  
Время наблюдения  
источников >1000 ч.  
в год!



Water Cherenkov  
Detector (78000 m²  
> 1 TeV



ENDA -400

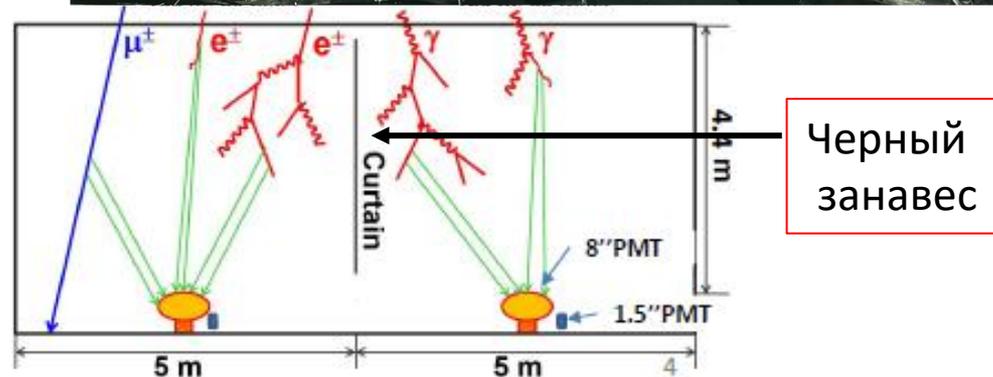
Система электронных-  
нейтронных детекторов для  
изучения адронов ШАЛ  
( в развертывании)

# Water Cherenkov Detector Array (WCDA)

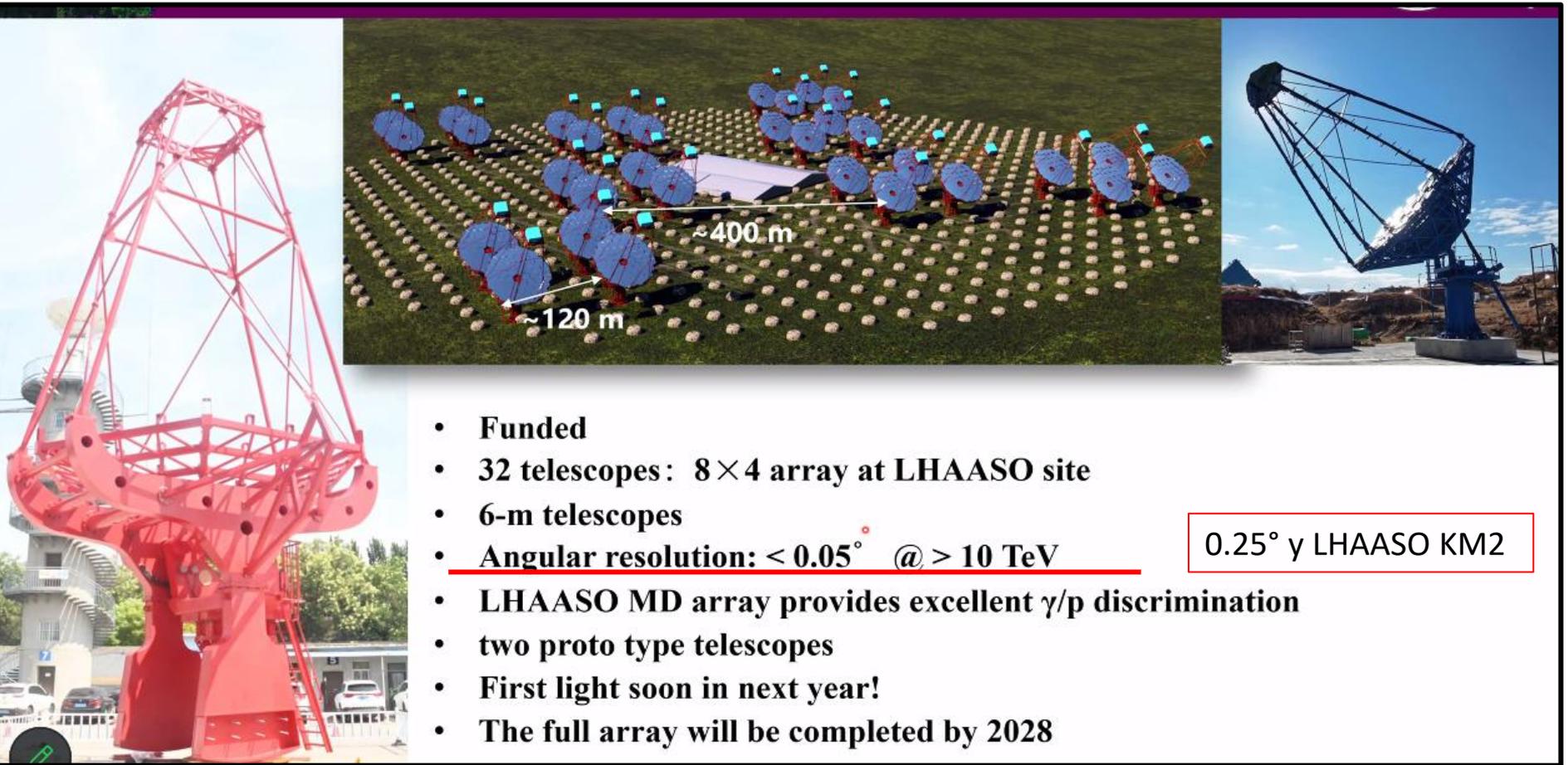
Энергетический порог: 0.2 ТэВ, угловое разрешение  $1^\circ$  при 0.6 ТэВ  
Гамма-адронное разделение по топологии сработавших ячеек.



- Total area:  $78,000m^2$
- Total units: 3,120
- Unit size:  $5m \times 5m \times 4.4m$
- Two type of PMTs in first pool:
  - 8 inches
  - 1.5 inches: extend the energy to 10PeV



# Large Array of Cherenkov Telescopes (LACT)

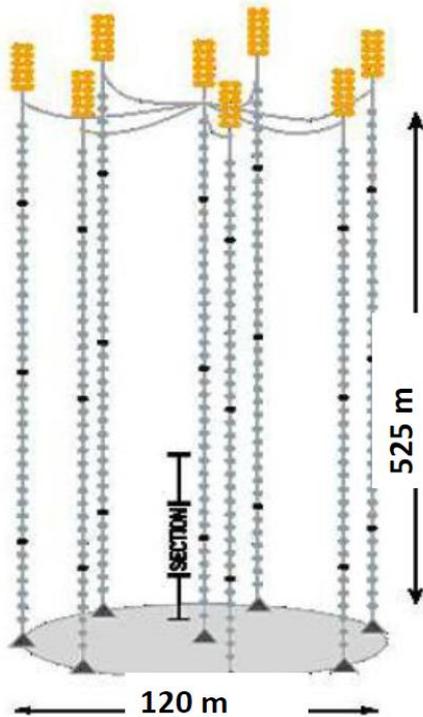


- Задачи: 1) Исследование источников с высоким угловым разрешением  
2) Наблюдение источников при зенитных углах больших  $50^\circ$

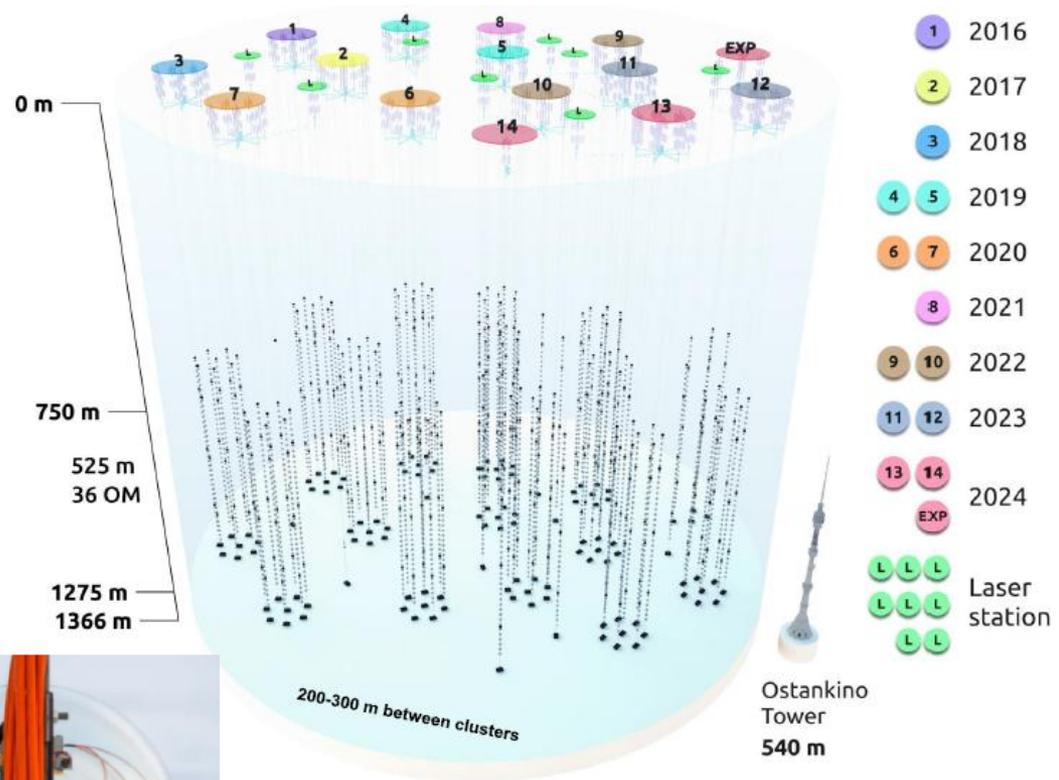
# BAIKAL-Giga Volume Detector (GVD)

Кластер

Статус 2024 - 13 кластеров, 4000 OM  $V \sim 0.7 \text{ км}^3$



8 стрингов, 288 OM  
ФЭУ: НАМАМАТСУ  
R7081-100  
Ø фотокатода 25 см



# План развития эксперимента

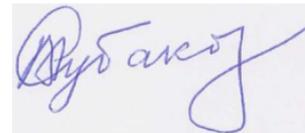
**Baikal-GVD Scientific Advisory Committee online meeting, January 28, 2022**

## **Report and recommendations**

The first phase of Baikal-GVD is scheduled to be completed in 2026, with at least 16 clusters and a volume on the cubic kilometer scale. The SAC considers this milestone extremely important. The SAC appreciates the plans toward GVD Phase II which envisages a detector on the 10 km<sup>3</sup> scale. We note that this is the right time to start serious consideration of such a future detector.

Chair of the Baikal-GVD Scientific Advisory Committee

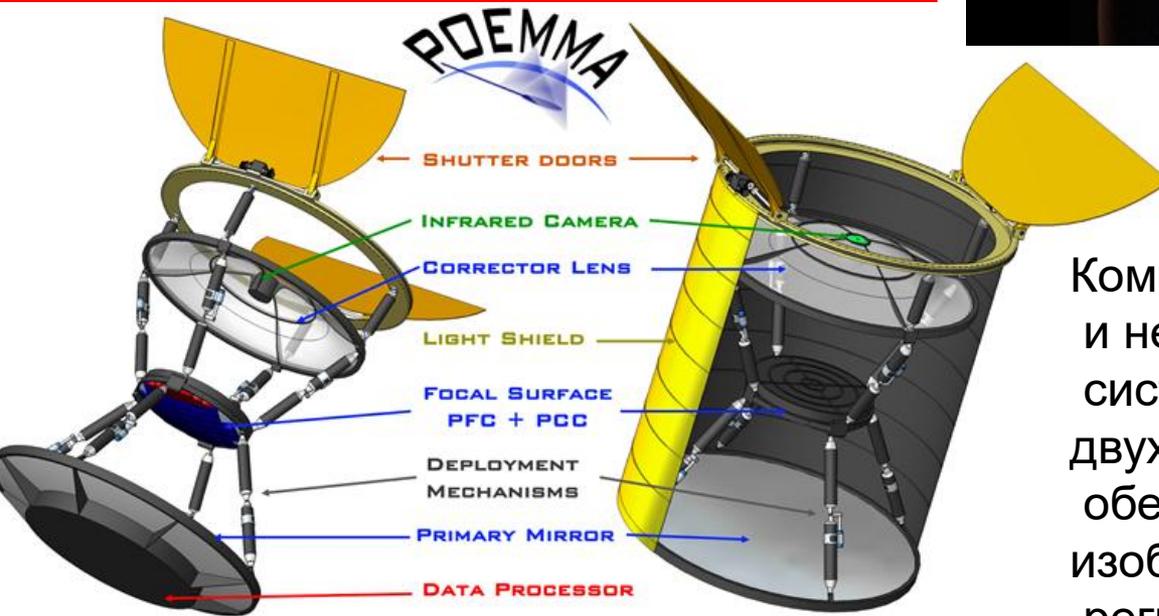
Valery Rubakov



# Проекты новых крупных детекторных комплексов

1. Космические лучи : орбитальный эксперимент РОЕММА
2. Гамма астрономия: обсерватория СТАО, SWGO, TAIGA-100
3. Новое поколение нейтринных телескопов

# POEMMA: Probe of Extreme Multi- Messenger Astrophysics



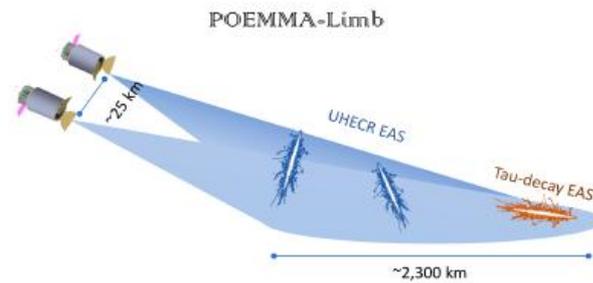
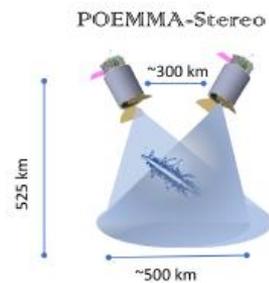
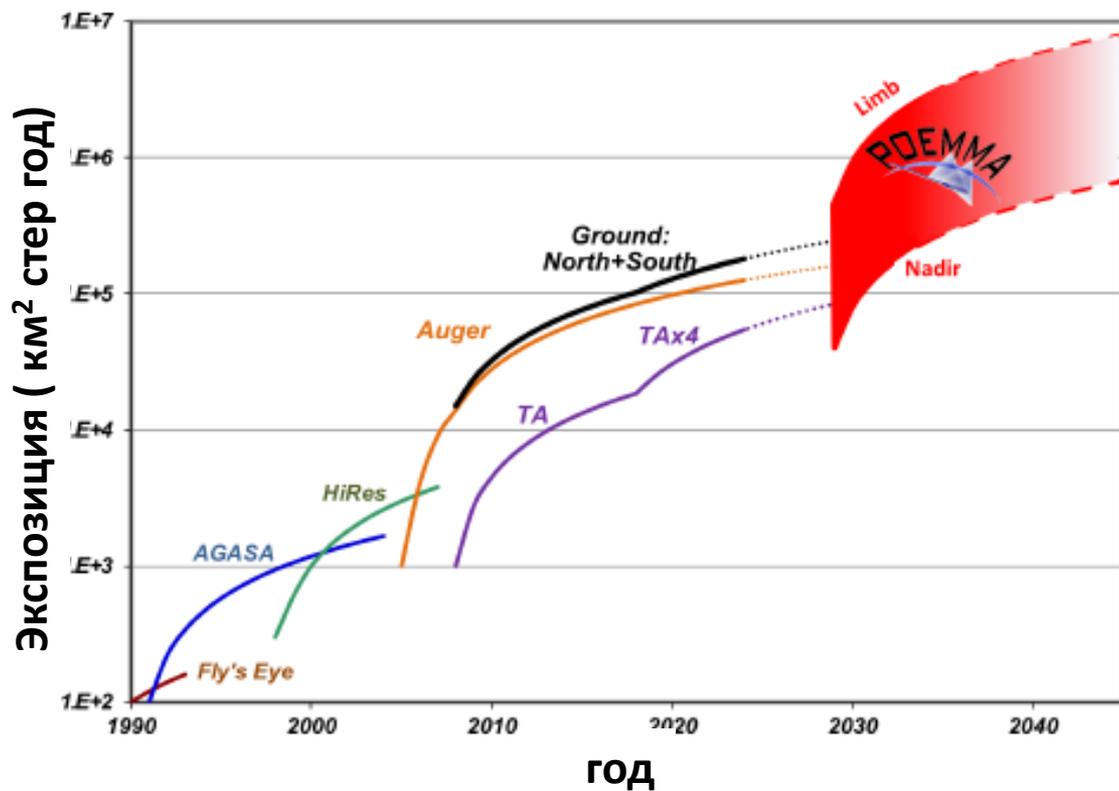
Комплекс для регистрации КЛ ПВЭ и нейтрино высоких энергий ( $> 20 \text{ EeV}$ ) систему двух телескопов на двух космических аппаратах, обеспечивающих стереоскопическое изображение трека ШАЛ и регистрацию прямого черенковского свечения от восходящих ливней энергичных нейтрино.

FoV =  $45^\circ$

$S_{\text{зеркала}} = 6 \text{ м}^2$

Энергетический порог  $2 \cdot 10^{19} \text{ эВ}$ .

# Ожидаемая экспозиция эксперимента РОЕММА



Гамма-астрономия:

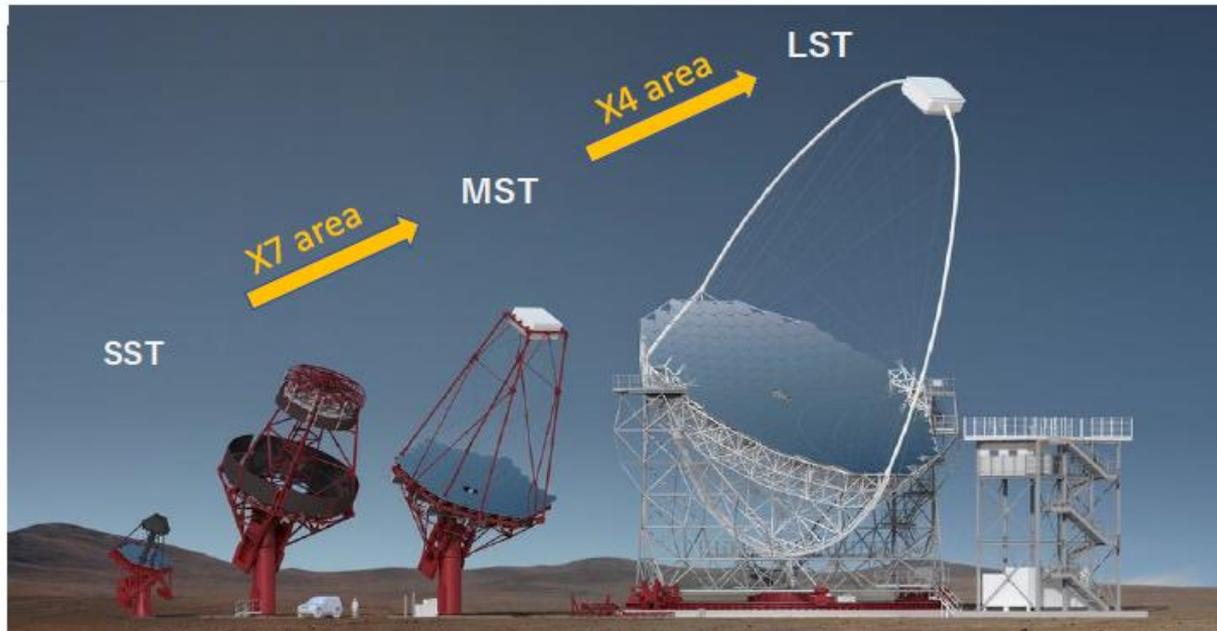
Черенковская обсерватория СТАО

Высокогорная обсерватория SWGO

Гибридная установка TAIGA-100

# Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO)

1000 участников из 28 стран. Начало обсуждения ~ 2005 год



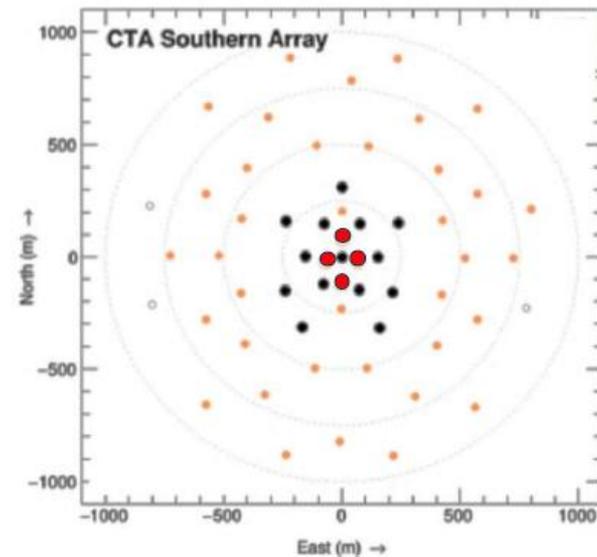
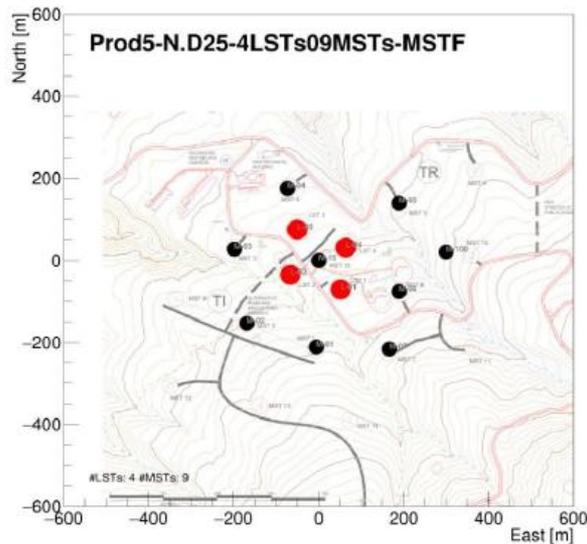
	SST	MST	LST
FoV and Sensor :	10.5 ° , SiPM	7.5 ° , PMT	4.3 ° , PMT
Diameter	4.3 m	11.5 m	23 m

# Alpha Configuration of CTAO (это планы)

CTA –North (La Palma)



CTA- South (Chili)



- LST - 4 ( в 2026)
- MST – 9

Развертывание  
к ~2030 -2035

- LST-4
- MST -14
- SST - 37 ( на площади 2× 2 км)

# The Southern Wide-field Gamma-ray Observatory (SWGGO)

Система больших водных баков на площади до 4 км<sup>2</sup>

Возможное положение:  
Перу, Чили, Аргентина  
(от 14° до 24° Ю.Ш.)

Высота: от 4.400 до 4850 м.

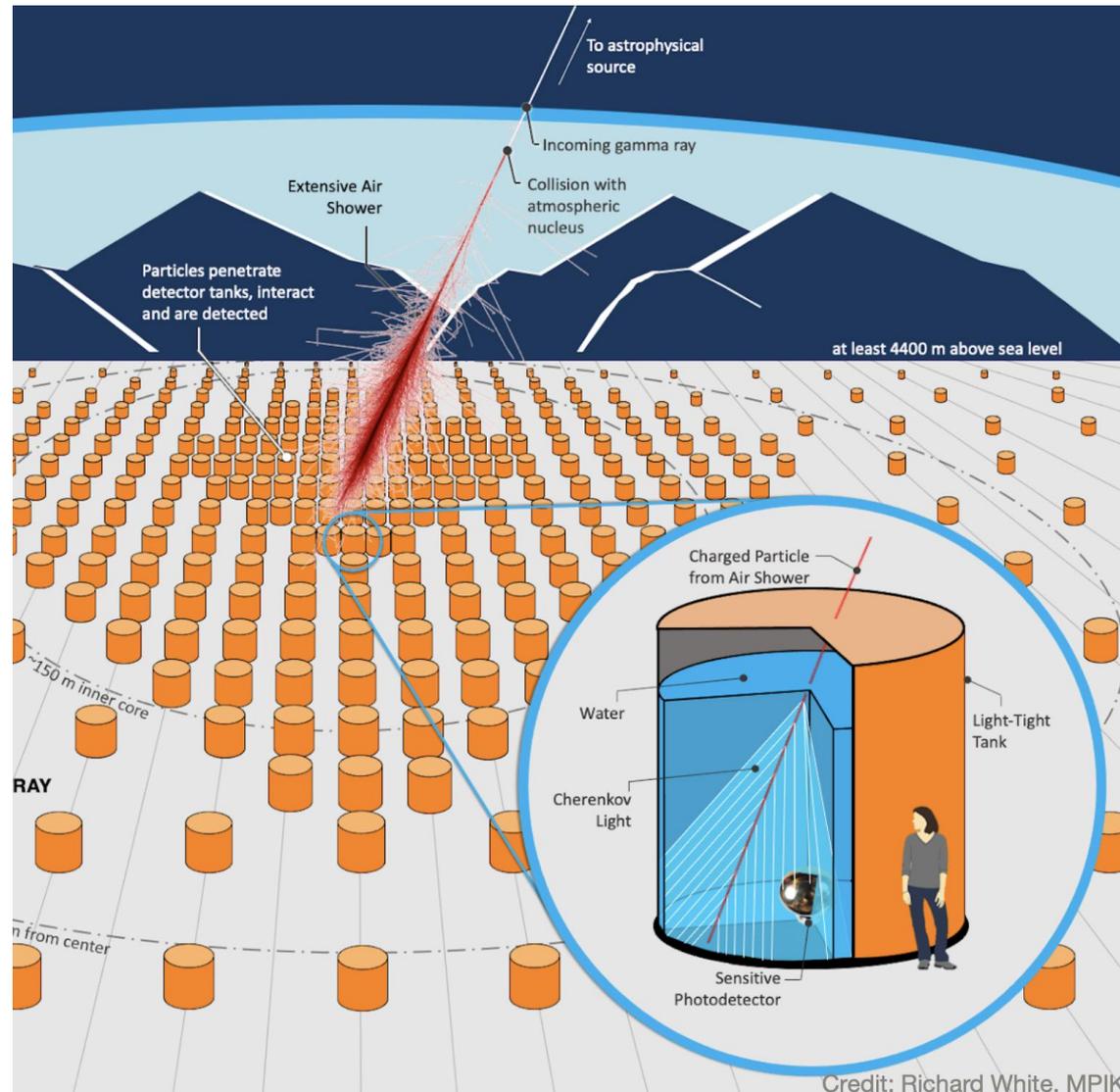
Энергетический диапазон:  
100 ГэВ – 1 ПэВ

Планы

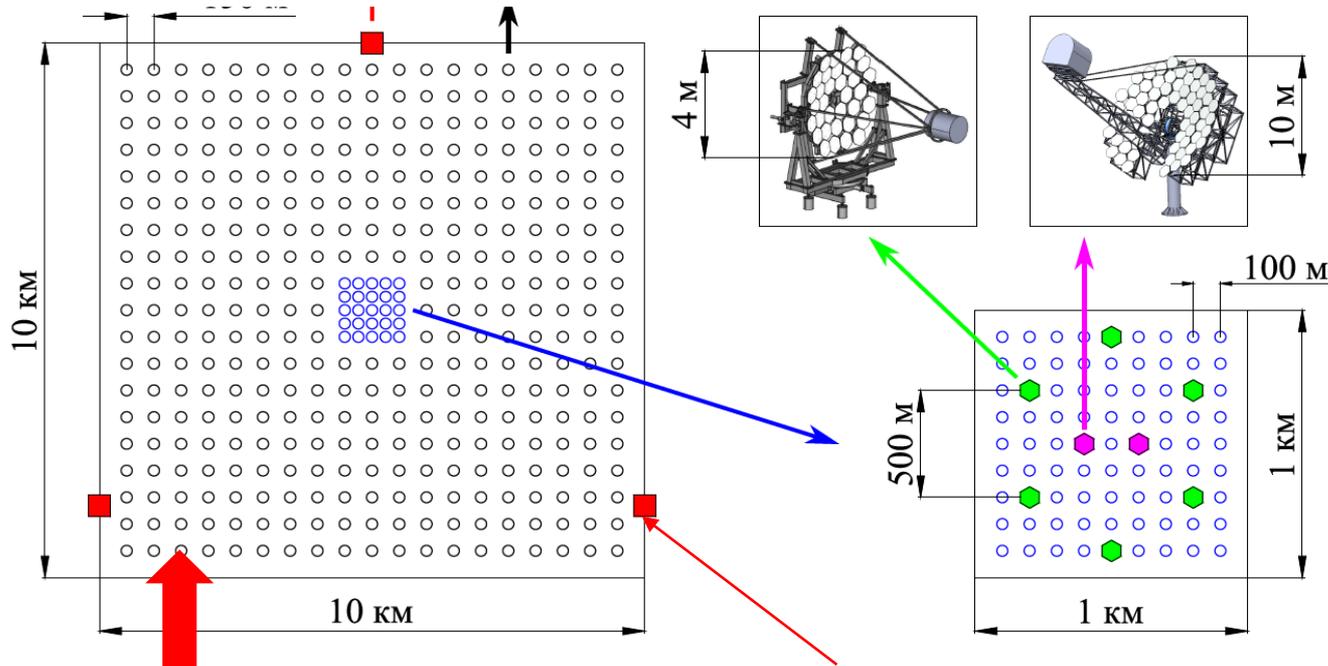
2025 – выбор места

2026 – создание прототипа

2027 – начало строительства



# Гибридная установка TAIGA-100 – гамма астрономия ПэВных энергий физика космических лучей ( $10^{15}$ - $10^{19}$ эВ)



Широкоугольный  
черенковский детектор

Водный детектор мюонов

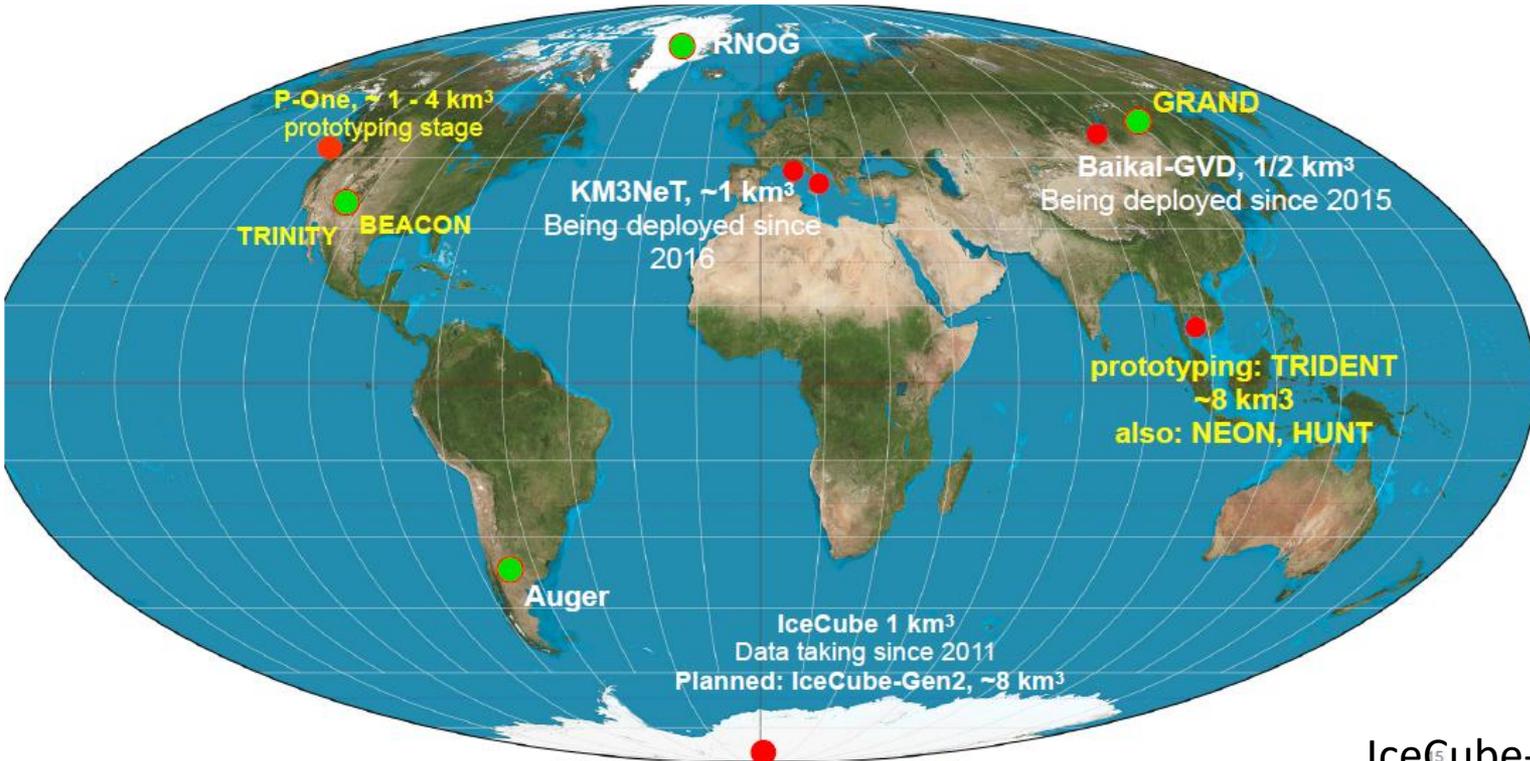
Сцинтилляционный детектор

радионенна

Флуоресценциный  
телескоп

Доклад Р.Монхоева  
В 16 часов, Секция:  
Детекторы и методы  
эксперимента

# Новое поколение нейтринных телескопов



● Глубоководный телескопы

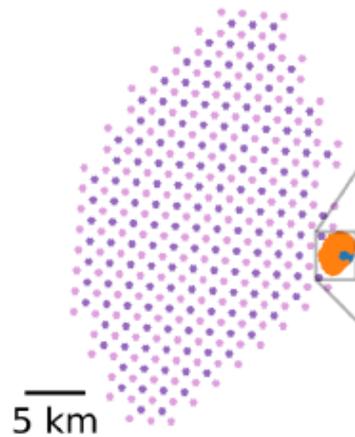
● Радиодетекторы ШАЛ и Auger

IceCube-Gen-2 } ~8 km<sup>3</sup>  
 TRIDENT }  
 NEON ~1 km<sup>3</sup>

HUNT - 30 km<sup>3</sup>  
 Huge Underwater Neutrino  
 Telescope

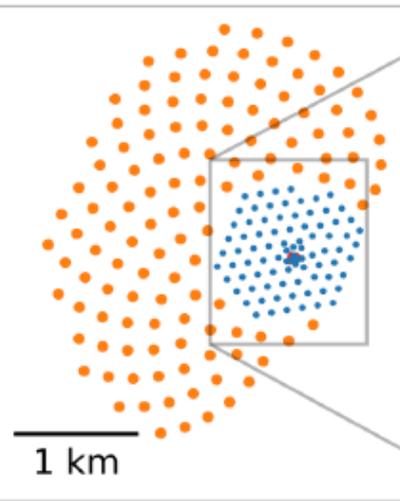
# IceCube-Gen2

IceCube-Gen2 Radio



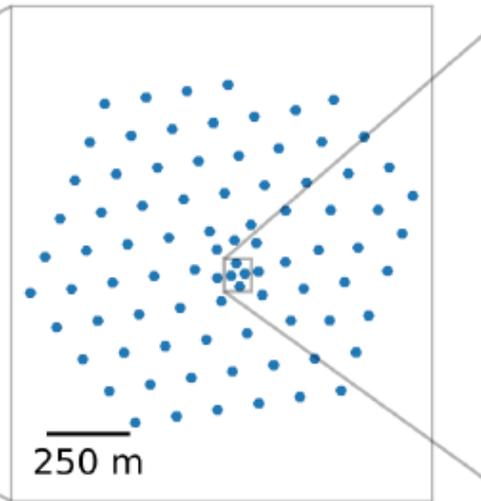
**>10 PeV**

IceCube-Gen2 Optical



**> 3 TeV**

IceCube



**>0.5 TeV**

Вмороженные в лед на глубину  $\sim 5$  м и  $\sim 150$  м Радиоантенны.

Объем для  $E_\nu = 10^{18}$  эВ  $10^2$  км<sup>3</sup>.

Регистрация ГЗК -нейтрино

120 стрингов.  
Расстояние между стрингами 250 м. (в IceCube – 125 м). 9600 OM

Объем  $\sim 8$  км<sup>3</sup>

Новый OM-16 и OM-18



4" PMTs

# TRopical DEep-sea Neutrino Telescope (TRIDENT) на дне Южно-Китайского моря.

Положение телескопа

114.0° E, 17.4° N 540 км, к югу от  
Гон-Конга, 180 км от острова  
Yongxing . Глубина 3.5 км

Хорошая прозрачность воды:

$\lambda_{\text{obs}} = 26 \text{ m}$ ,  $\lambda_{\text{sct}} = 60 \text{ m}$  ( 450 nm)

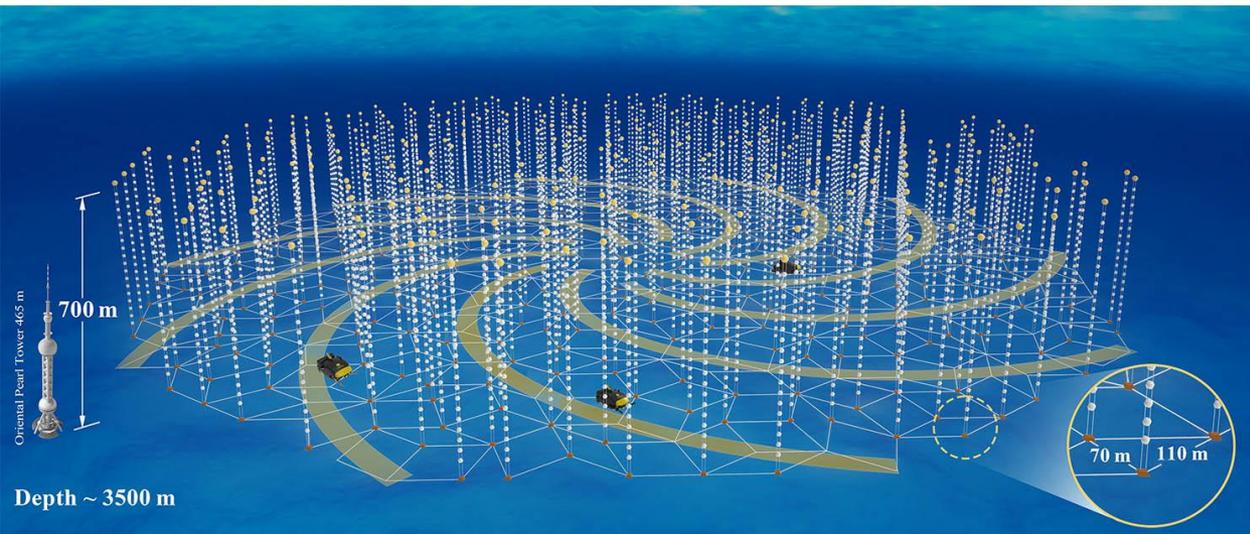
1200 стрингов , 20 ОМ/стринг

24000 ОМ !

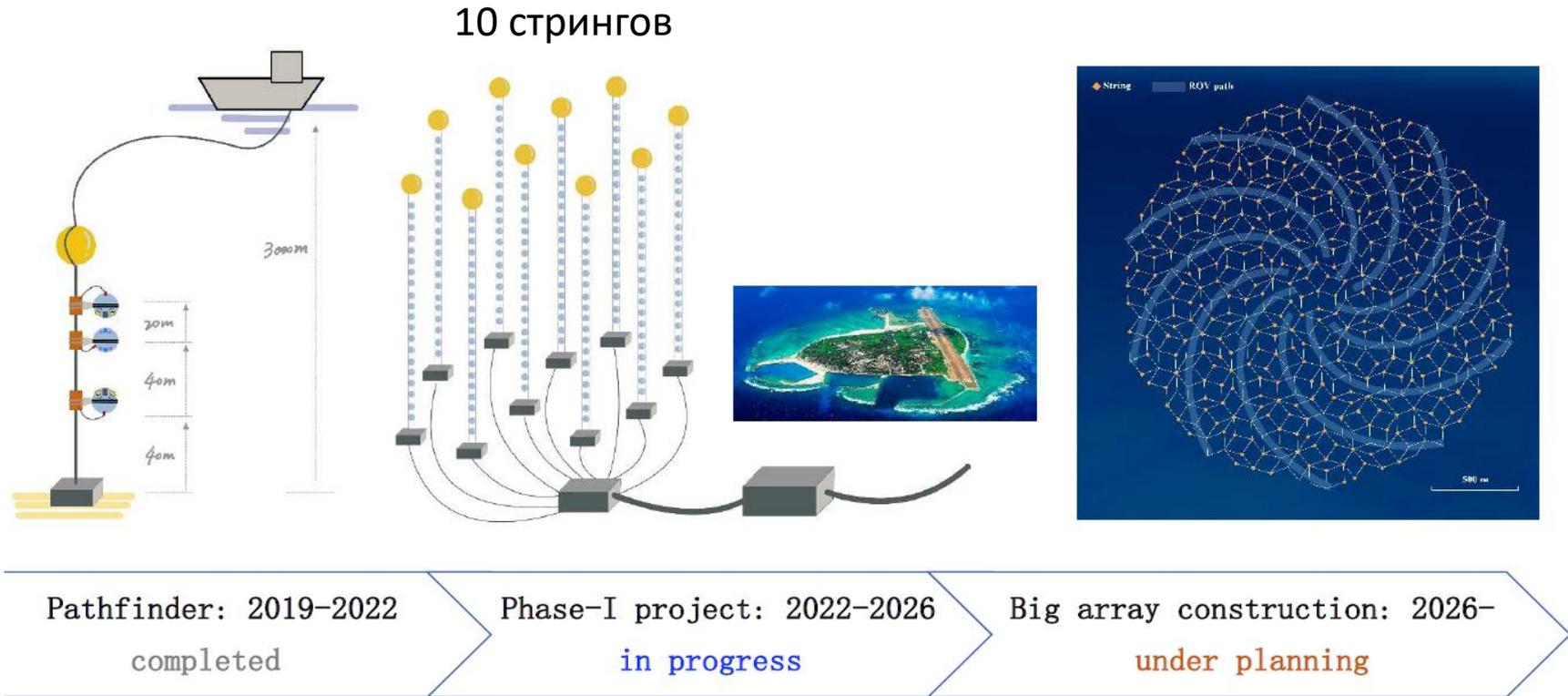
$V \sim 8 \text{ км}^3$

Расстояние между стрингами  
70 и 110 м

Нерегулярное расположение  
стрингов (нет вращательной и  
трансляционной симметрии)  
- лучшая режекция  
атмосферных мюонов

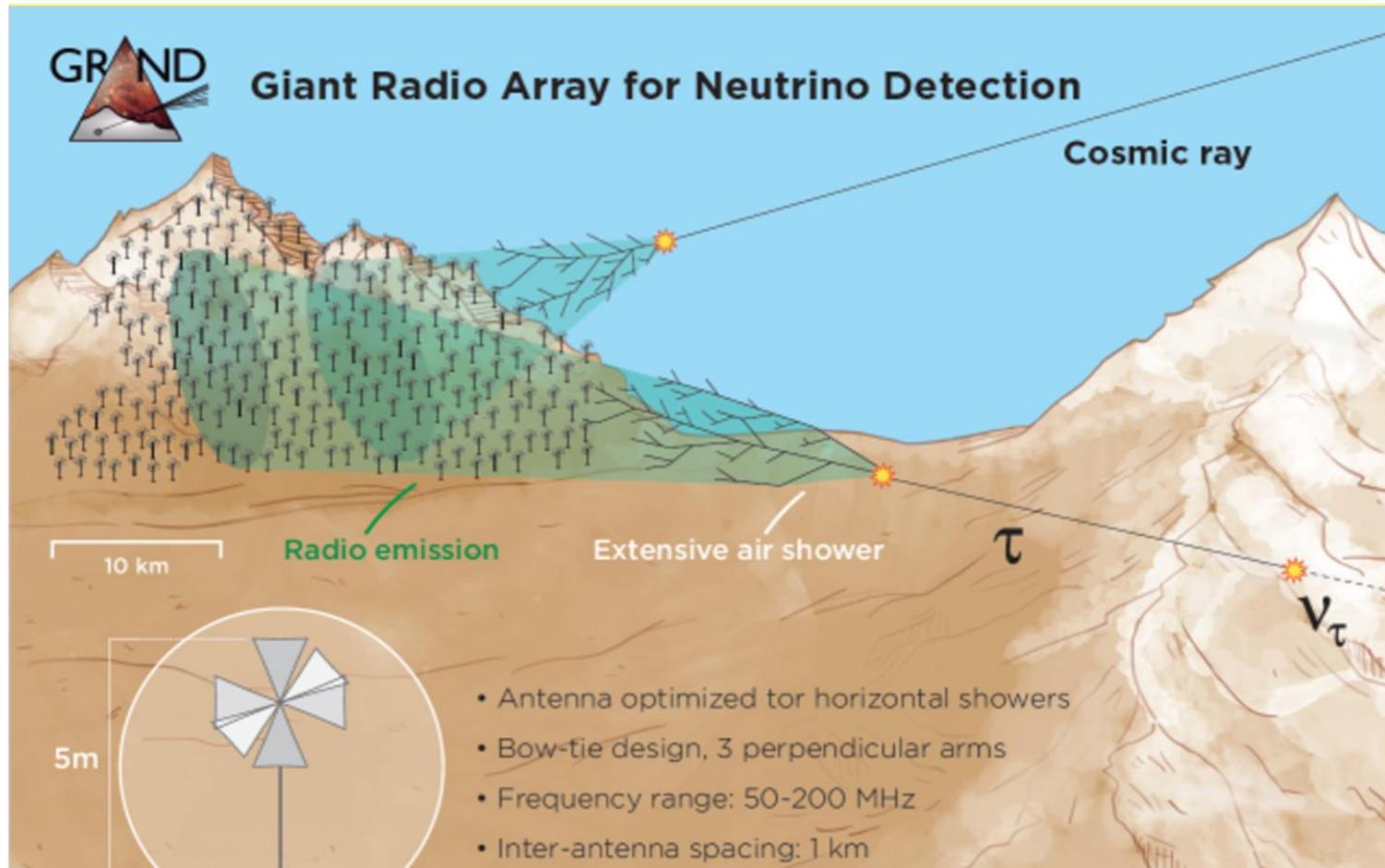


# План создания телескопа



создание первых  
ОМ, изучение оптических  
свойств воды

# GRAND



200 000 антенн на площади 200 000 км<sup>2</sup> (450 × 450 км)

# Этапы развертывания

## TREND( 2011-2014)



50 антенн на площади  
12 км<sup>2</sup>

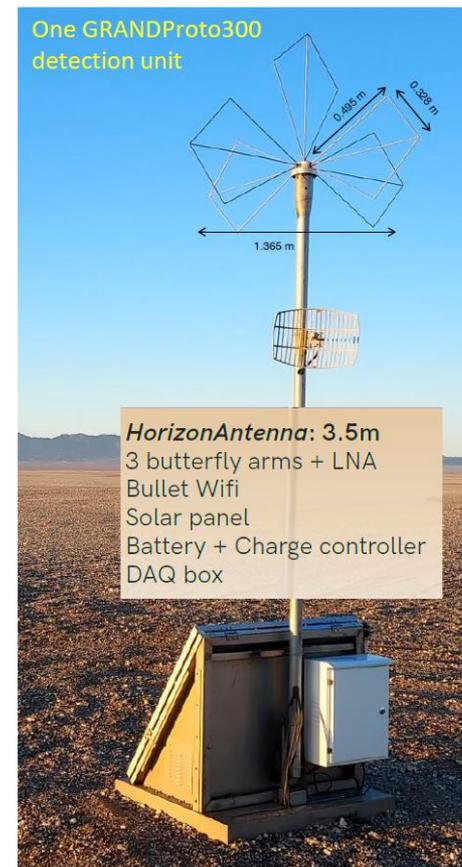
## GRAND @ Nançay (2022-2024)



4 антенны в лесу в  
радио «тихом» месте.  
Тестирование антенн и  
триггера

## GRANDProto300 (2023 – )

300 автономных антенн на площади  
300 км<sup>2</sup>. Северо-запад Китая



Сейчас  
установлено  
100 антенн

Цель –  
Исследование  
КЛ с энергией  
выше 10<sup>17</sup> эВ

## GRAND10k

10000 антенн в  
пустыне Гоби  
~ 2030

# Заключение

Во второй четверти 21 века будет много детекторных комплексов для исследования космических излучений:  
в области 1- 10 ПэВ и выше 100 ПэВ для  
гамма-астрономии

в области 1 - 1000 ПэВ для нейтринной астрофизики

в области выше  $10^{20}$  эВ для космических лучей

Спасибо за внимание.