

Гамма-астрономия ультравысоких энергий и проект TAIGA-100

Кузьмичев Л.А

4.07

План доклада

1. Гамма-астрономия ультравысоких энергий
- 2 Действующие установки и проекты
3. проект TAIGA100

Гамма-астрономия ультравысоких энергий

1. 1- 100 ГэВ – гамма-астрономия высоких энергий

Детекторы на спутниках, $S \sim 1 \text{ m}^2$, $\Omega \sim 1 \text{ str}$

Открыто более 2000 источников



2. 100 ГэВ – 100 ТэВ – гамма-астрономия очень высоких энергий (VHE)

Атмосферные черенковские телескопы

$S \sim 10^4 - 10^5 \text{ m}^2$ $\Omega \sim 0.01 \text{ str}$

открыто более 200 источников



3. Выше 100 ТэВ – гамма- астрономия ультравысоких энергий (UHE)

Высокогорные установки ШАЛ

$S \sim 10^4 - 10^6 \text{ m}^2$ $\Omega \sim 1 \text{ str}$

открыто более 40 источников



Какие астрофизические источники могут ускорять космических лучи до ПэВных энергий? Как это подтвердить?

1. Остатки сверхновые звезды (SNR)
2. Пульсарные туманности (PWN)
3. Пульсары в двойных системах и микроквазары
4. Области активного звездообразования
5. Черная дыра в центре Галактики и галактики Андромеда
6. Гамма-всплески

Правило Хилласа

$$E_{\max} = v/c \times Ze \times B \times L \times \eta$$

Ze – заряд ядра

B – магнитное поле

L – размер источника

$\eta = 0.05-1$

Гамма-кванты от Крабовидной туманности

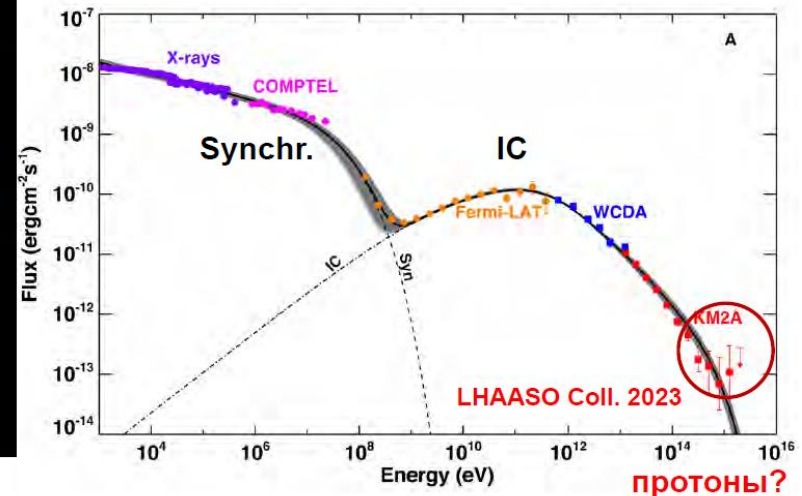
Источник энергии – вращающаяся нейтронная звезда

Излучаемая энергия – $dE/dt = 10^{35} - 10^{39}$ эрг/сек

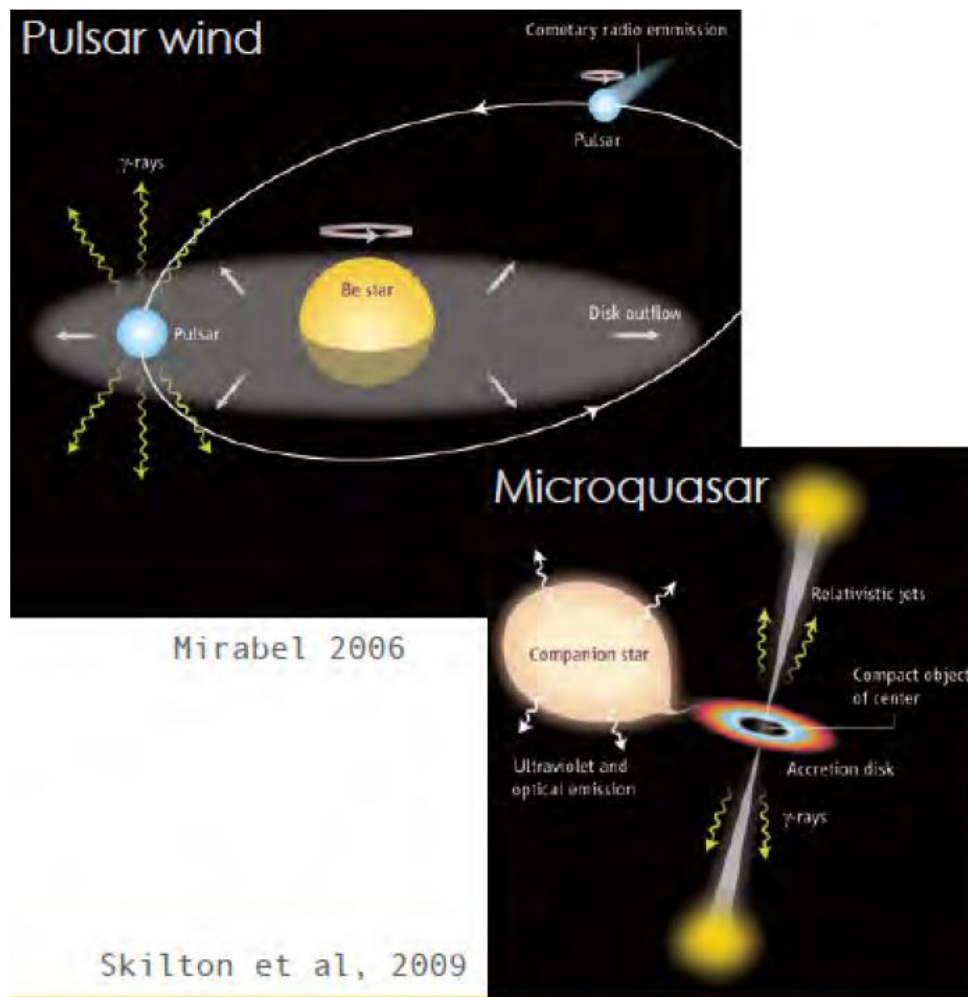
$$E_{\max} = 2 \text{ ПэВ} \times Z \times \eta \times (dE/dt / 10^{36} \text{ эрг/сек})^{1/2}$$

η – «эффективность» пульсара – 0.1 -1

**E max для протона может достигнуть ~ 60 ПэВ
для электрона ~ 5-10 ПэВ**



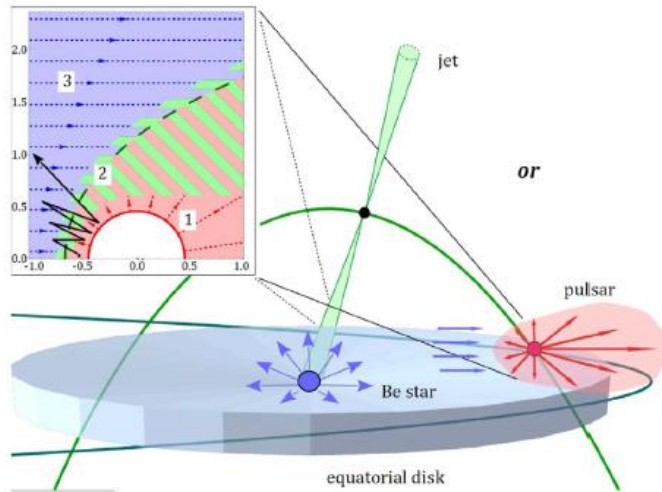
Гамма-излучение от тесных двойных звезд и микроквазаров



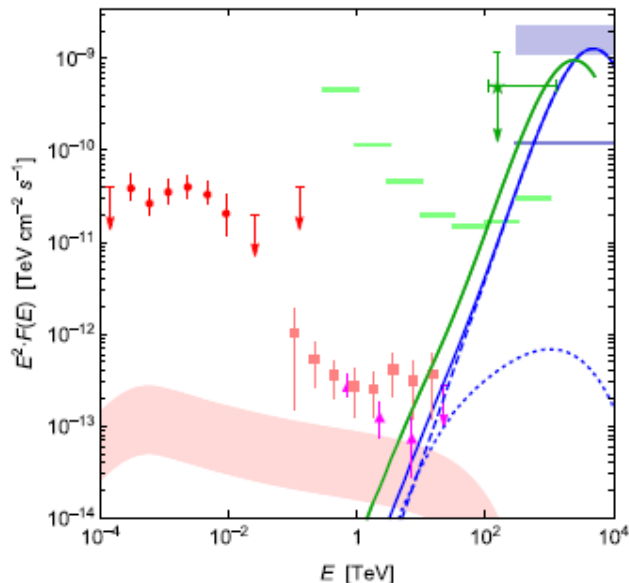
микроквазар
в центре черная дыра
с массой 3-5 массы
солнца.
открыто около 20,
возможно много
больше

Пульсары в двойных системах

Bykov et al.

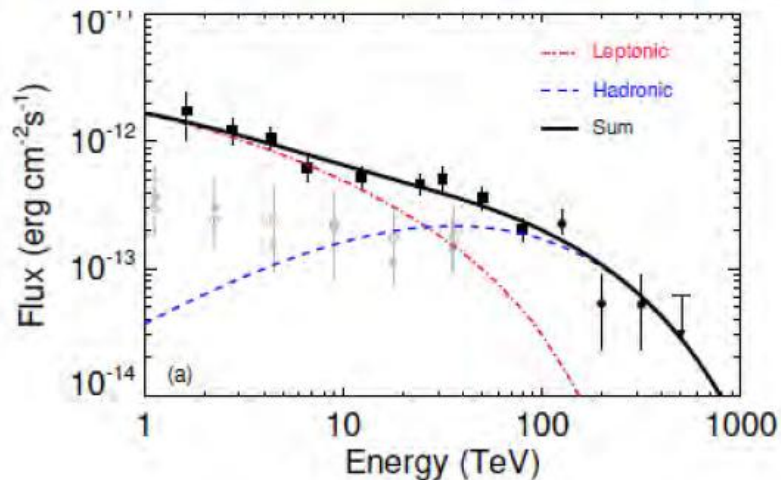


Пульсарный ветер сталкивается со звездным ветром массивных горячих звезд (ОВ- звезды)
Протоны могут ускоряться до 10 ПэВ
(Bykov et al 2021. 2024)

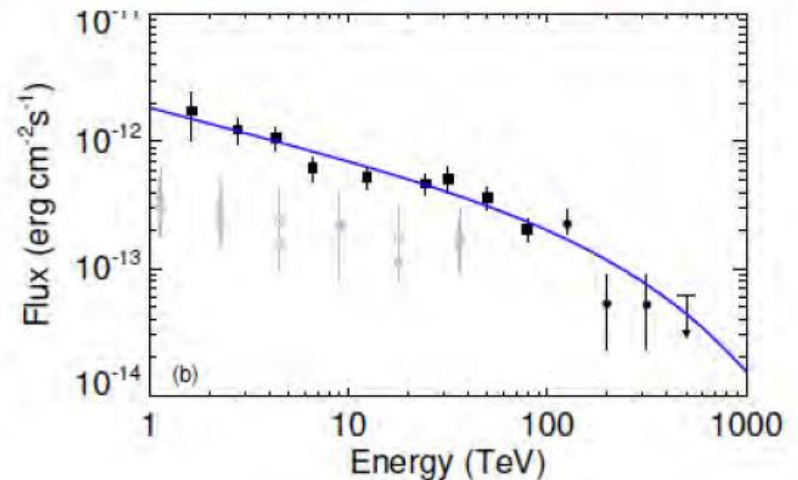


Возможно такой механизм рождения
Пэвного фотона зарегистрированный LHAASO от
источника J2032+4127, возможно гамма-кванты
от этого источника видели на установке Ковер-2

Поток гамма квантов от микроквазара SS433



Модель предполагает мощность ускорителя лептонов с энергией выше 1 ТэВ $> 6 \times 10^{35}$ эрг/с, для ПэВ протонов порядка 10^{38} эрг/с.



Полная светимость SS 433 $> 10^{39}$ эрг/с (сверх-эддингтоновская)

Требуется примерно 10 таких источников для объяснения спектра космических лучей при энергии ~ 1 ПэВ

Действующие установки и
проекты

Атмосферные черенковские гамма-телескопы

(IACTs – Imaging Atmospheric Cherenkov telescopes)

Камера телескопа
500-1000 пикселей



Гамма –квант (>50 ТэВ)



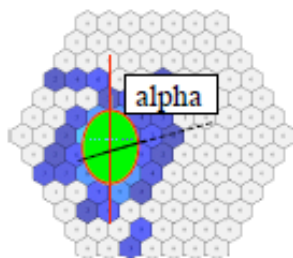
Режекция событий от
космических лучей на
уровне 10^{-4} по форме
изображения в камере

Эффективная площадь= 10^5 м²

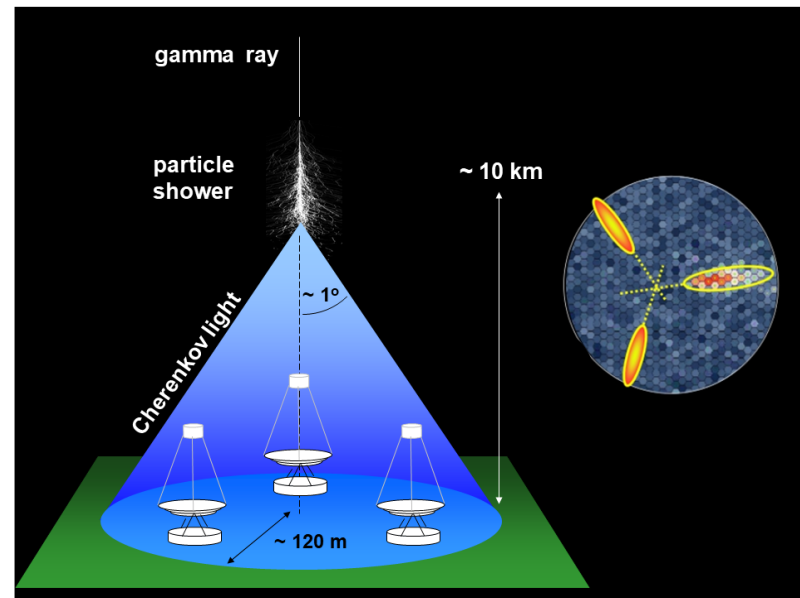
Черенковский телескоп
(IACT – Imaging Atmospheric
Cherenkov Telescope)

ШАЛ от гамма- кванта

ШАЛ от протона



Стерео метод



Энергетический порог $\sim 1 / (\text{площадь зеркал})$

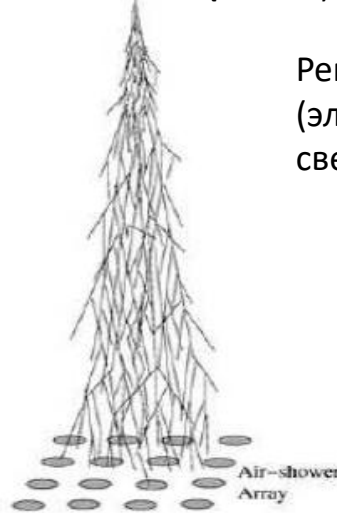
10 м² $\rightarrow$ 1 ТэВ

200 м² $\rightarrow$ 50 ТэВ

Установки, регистрирующие заряженную компоненту ШАЛ

Энергетический порог:
для высоты 4000 м ~ 1 ТэВ
для уровня моря ~ 1 ПэВ

Гамма –квант (>1 ТэВ)



Регистрация заряженных частиц ШАЛ (электроны и мюоны) и черенковского света системной разнесенных детекторов

«Компактность»
Установка HAWC

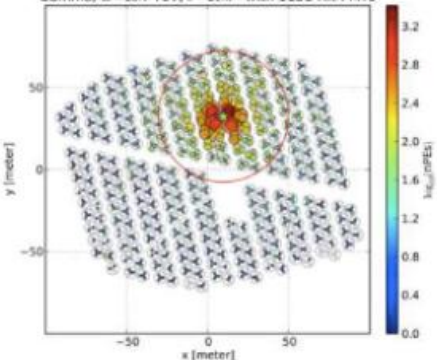
Режекция ШАЛ от протонов

малое число мюонов.
В протонном ШАЛ мюонов в 10 раз больше, чем в ШАЛ от гамма

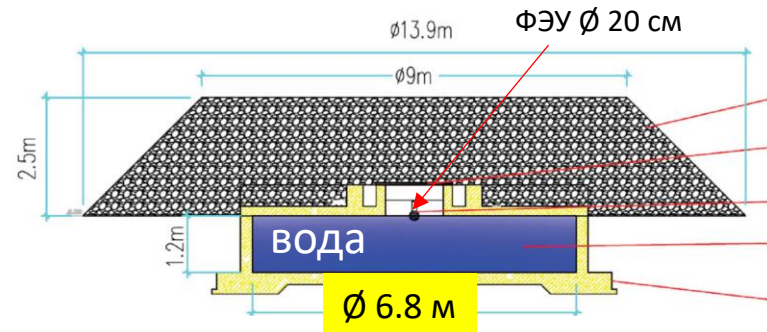
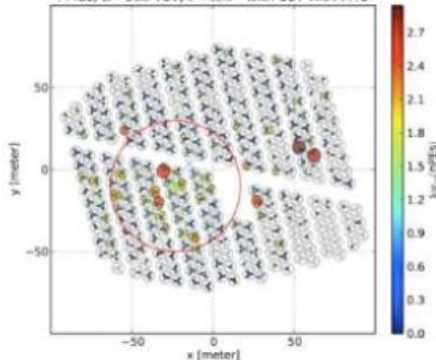
$E_\gamma = 20 \text{ TeV}$

$E_p = 20 \text{ TeV}$

Gamma, $E=20.7 \text{ TeV}$, $\theta=21.0^\circ$ with 1131 Hit PMTs



PPi.us, $E=24.0 \text{ TeV}$, $\theta=43.5^\circ$ with 837 Hit PMTs



В установке LHAASO 1100 мюонных детекторов

Высокогорные установки

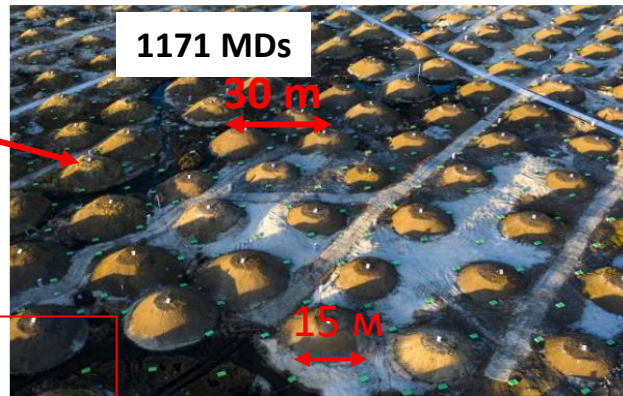


LHAASO : 1 km^2 , 5200 сцинтилляционных детекторов, 1200 водных мюонных детекторов

HAWC: 0.02 km^2 , 300 водных баков

Tibet : 0.06 km^2 , 64 водных мюонных детекторов ($1/20$ LHAASO)

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



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

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

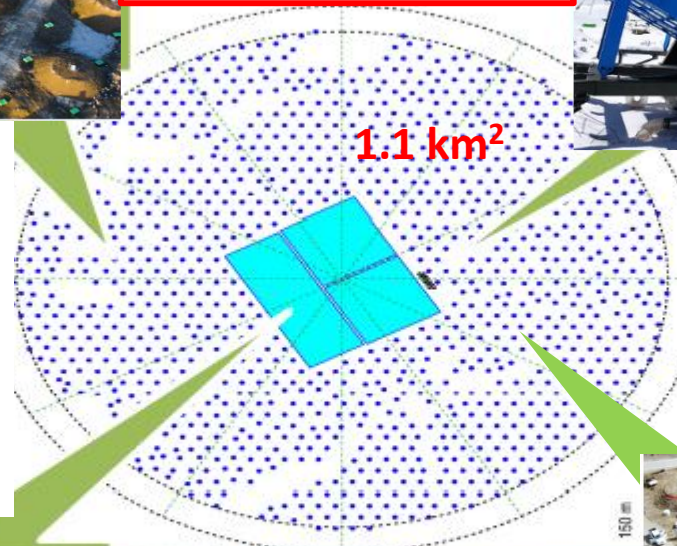
Мюонные
детекторы
4% от полной
площади установки

Угловое разрешение:
 0.25°
Энергетическое
Разрешение: 20%



Телескопы
для исследования
массового состав
КЛ

5216 SD
 $S = 1 \text{ m}^2$

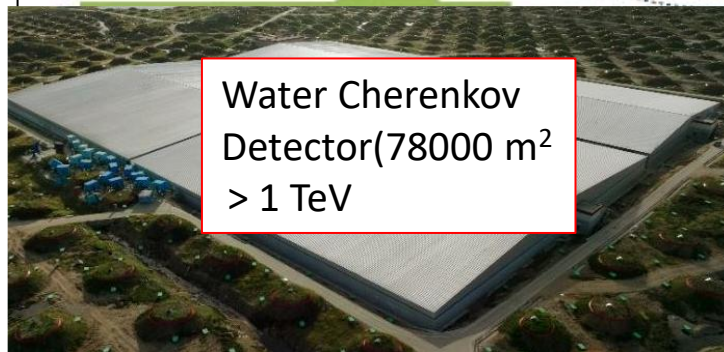


ENDA -400



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

Water Cherenkov
Detector (78000 m²
> 1 TeV



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

Проекты в области гамма-астрономия
ультравысоких энергий:

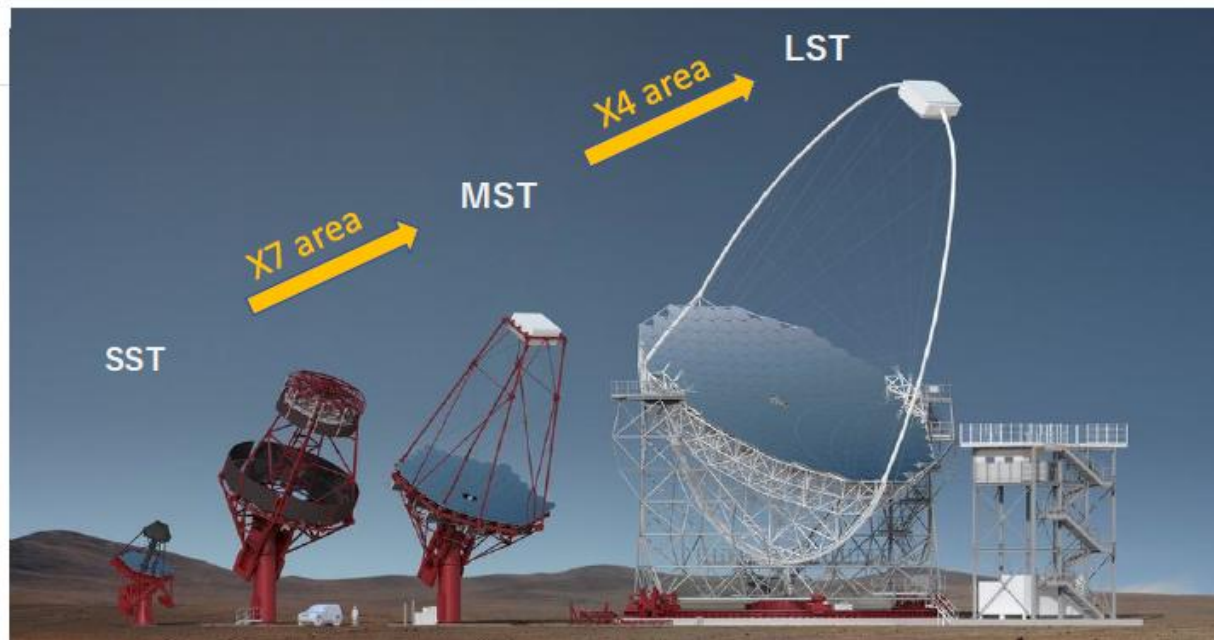
Черенковская обсерватория СТАО

Высокогорная обсерватория SWGO

Гибридная установка TAIGA-100

Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO)

1000 участников из 28 стран. Начало обсуждения ~ 2005 год



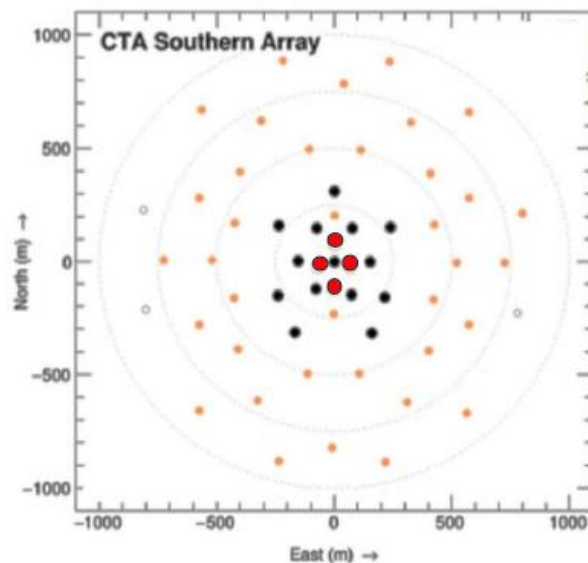
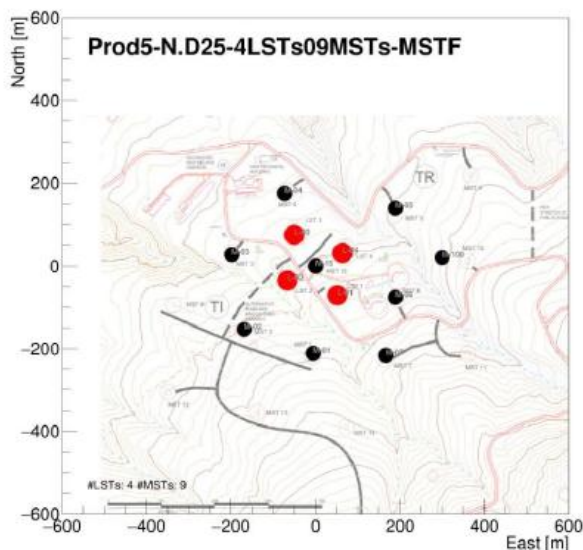
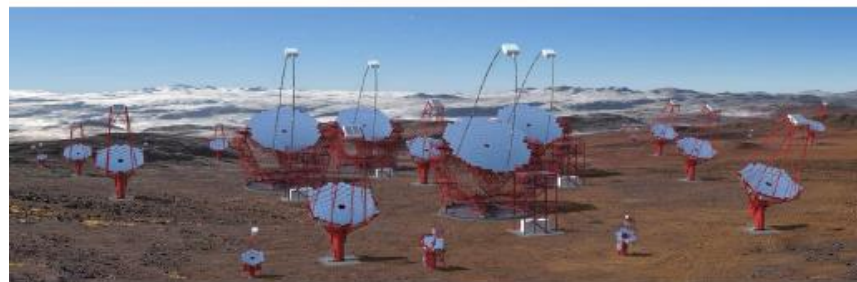
	SST	MST	LST
FoV and Sensor :	10.5 ° , SiPM	7.5 ° , PMT	4.3 ° , PMT
Diameter	4.3 m	11.5 m	23 m

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-filed Gamma-ray Observatory (SWGGO)

Система больших водных баков на площади до 4 км²

Возможное положение:

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

Высота: от 4.400 до 4850 м.

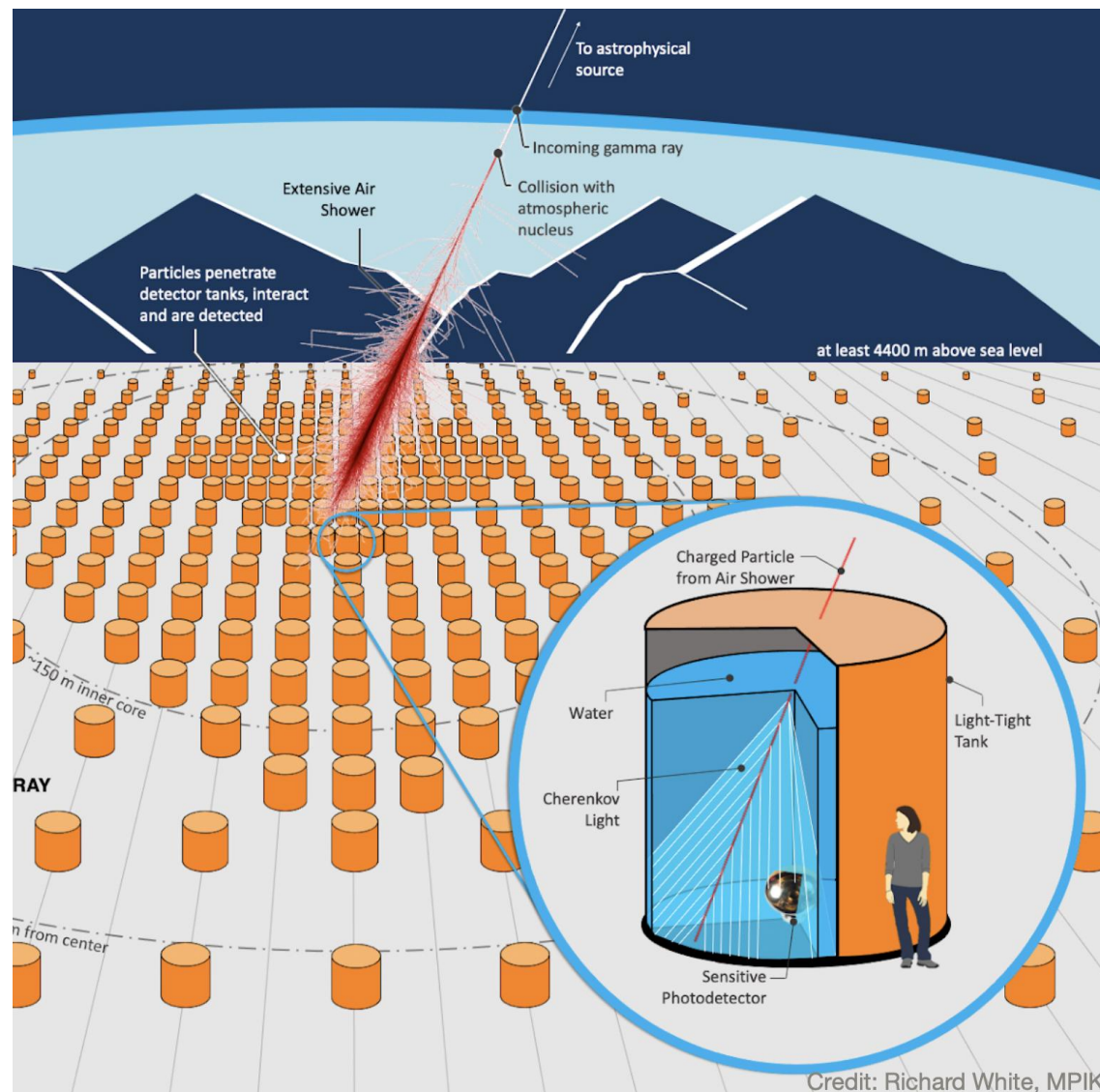
Энергетический диапазон:
100 ГэВ – 1 ПэВ

Планы

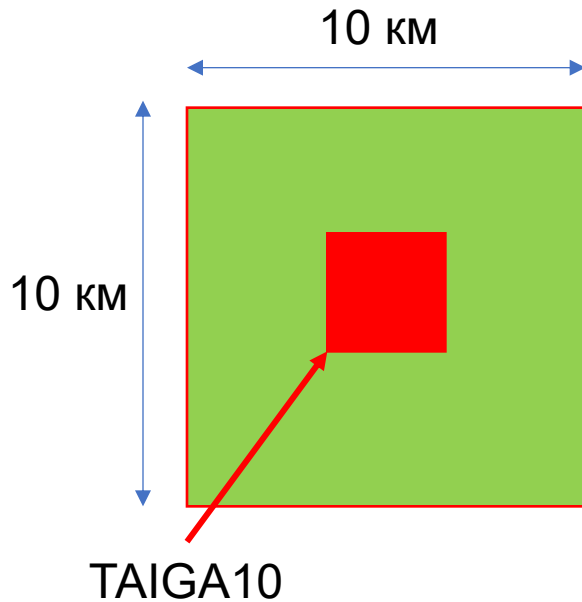
2025 – выбор места

2026 – создание прототипа

2027 – начало строительства



TAIGA100 – возможность изучать область энергий выше 1 ПэВ



~ 3500 широкоугольных черенковских детекторов:
1 ФЭУ, FoV ~ 2 стер.

~3500 мюонных водных мюонных детекторов,
площадью 40 м².

6-7 IACTs, диаметр зеркал 4 м (от установки
TAIGA-1)

1-2 IACTs, диаметр зеркала 10 м (мини
ALEGRO)

1-2 малых флюоресцентных телескопов

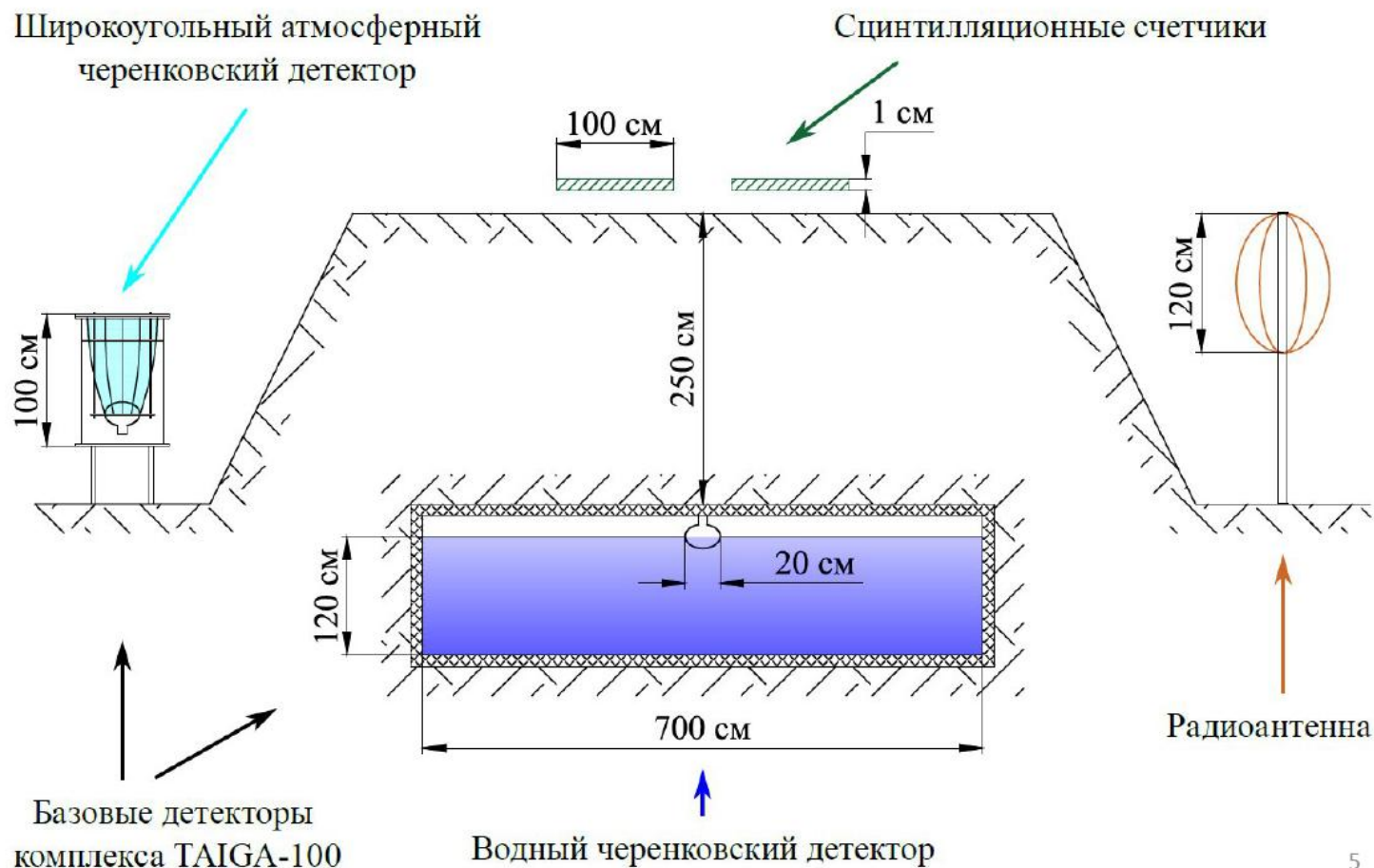
Одна супер станция (СС):
черенковский детектор
мюонный детектор
сцинтилляционный
детектор (1-2 м²)
радио антенна

Для TAIGA10 – расстояние между СС- 100м
Порог ~200 ТэВ 600 станций

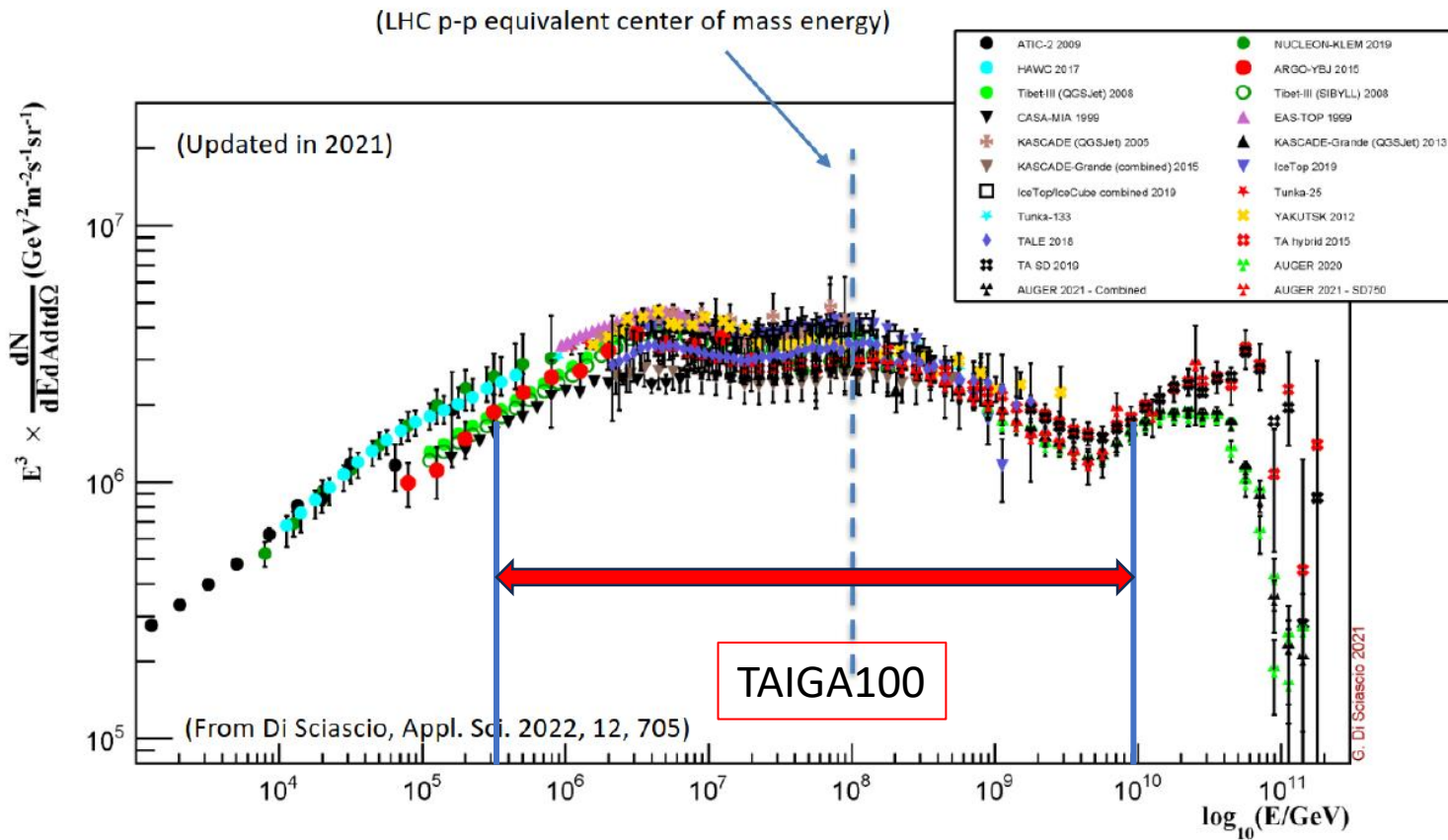
Для TAIGA100 – расстояние между СС- 150 м
Порог ~400 ТэВ

3000 станции

Станция установки



Научная программа

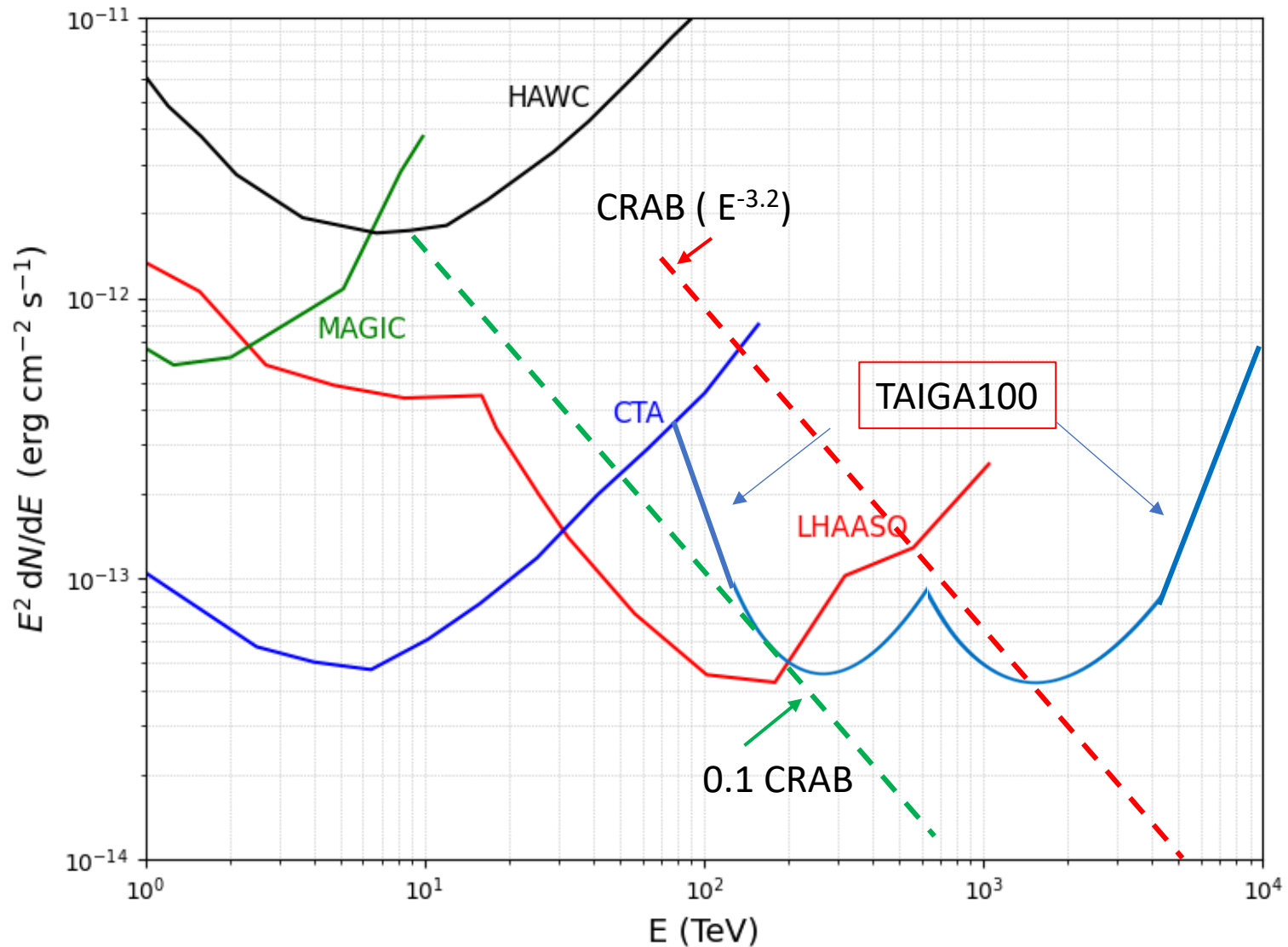


1. Какие источники космических лучей в этой области энергий?
2. Почему такая форма спектра?
3. Какой и почему такой массовый состав космических лучей?

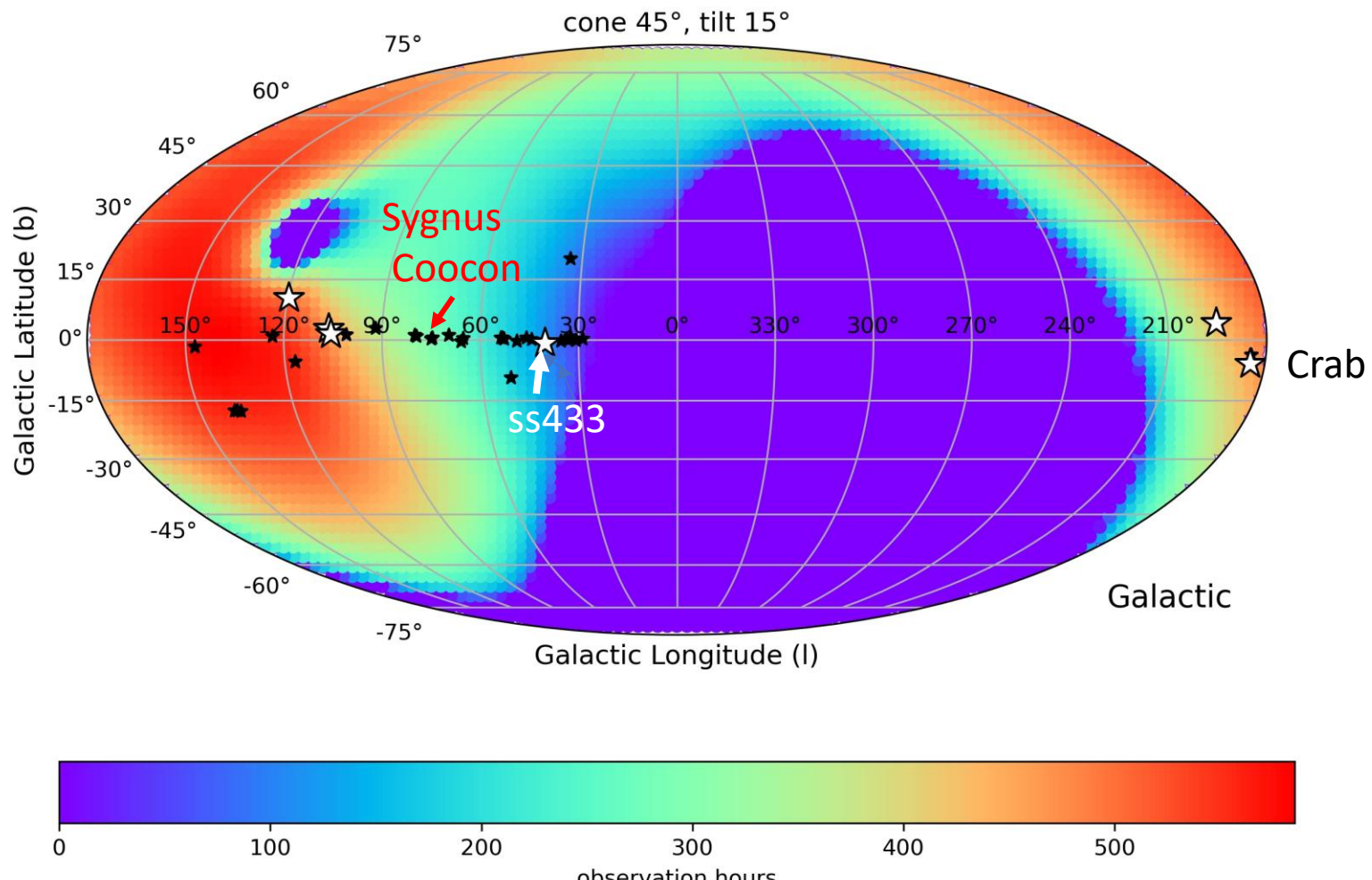
Научная программа

1. Гамма астрономия ультравысоких энергий.
Диффузное гамма- излучение в диапазоне 1 – 10 ПэВ
2. Космические лучи в диапазоне
 10^{14} - 10^{19} эВ . 10^6 событий в год с энергией 10^{17}
возможностью выделять протоны
3. Поиск фотонов в диапазоне 10^{17} - 10^{18} эВ
4. Транзиентные явления и гамма-всплески
5. Горизонтальные ливни и ливни от нейтрино
масса воздуха над установкой 10^9 тонн. Искать ШАЛ с углом
большим 60 градусом с большим числом электронов
6. Экзотика (темная материя, нарушение Лоренц инвариантности,
странглеты и т.д)
7. Геофизика – грозы и ШАЛы

Дифференциальная чувствительность (4 бина на порядок)
5сигма или 10 событий



Время наблюдения за год
(с 22.07 по 22.05 (след. год))



Выбор места развертывания установки



Астроклимат

до безоблачных ночей, прозрачность атмосферы, антропогенная засветка и т.д.

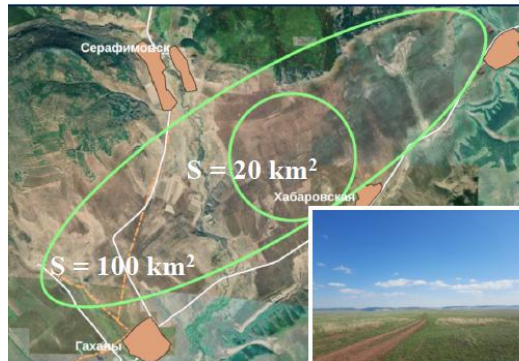
Инфраструктура

Выбор места развертывания установки

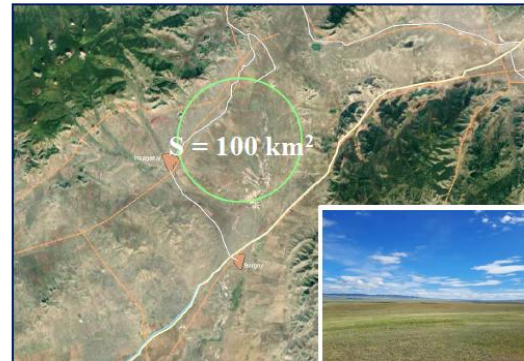
53.11° N., 104.91° E.

600 – 700

Vicinity of Gakhany village (Irkutsk region)



Borgoy Steppe (Buryatia Republic)

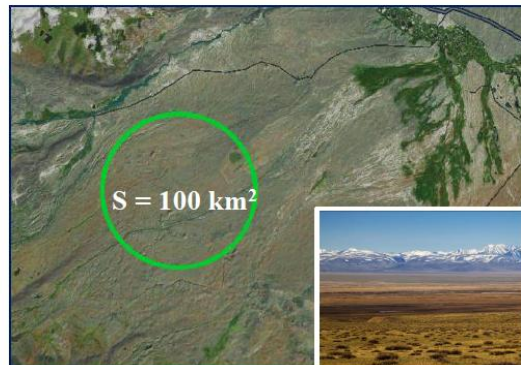


Постер
А.Ивановой и др.
(НИИПФ ИГУ)

50.84° N., 105.81° E.

700 – 800

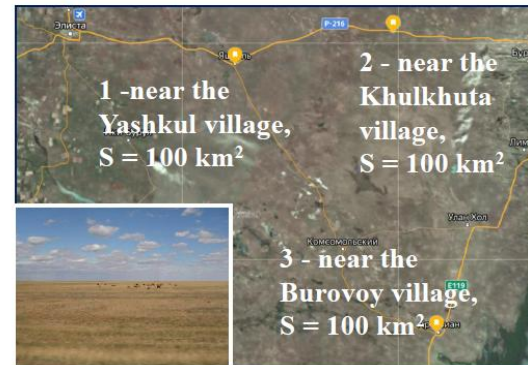
Chuya Steppe (Altai Republic)



49.89° N., 88.22° E.

1700 – 1800

Kalmykia Republic (3 potential sites)



46.17° N., 45.34° E. (1)

46.32° N., 46.37° E. (2)

44.95° N., 46.65° E. (3)

Анализ астроклиматических и топографических особенностей площадок *

Параметр	п. Торы	с. Гаханы	Боргойская степь	Чуйская степь	Республика Калмыкия
Годовое количество осадков, мм	300 – 350	250-300	< 250	< 200	200-340
Глубина снежного покрова, см / продолжительность устойчивого снежного покрова, месяцы	10-15 / 3.5 - 4	9-12 / ~ 3	2-3 / ~ 2	0.01 – 2 / ~ 2	0.01 – 2 / постоянный снежный покров отсутствует
Антропогенная засветка, мкВт × м ⁻² × ср ⁻¹	~ 5	~ 5 **	< 5	< 5	< 5 (1, 2, 3)
Прозрачность атмосферы, атмосферная оптическая толщина АОТ	0.18	0.12	0.11	0.19	0.07 (1), 0.09 (2), 0.1 (3)
Количество безоблачных ночей, %	45 – 50 %	60 – 64 %	68 – 71 %	70 – 75 %	40 – 45% (1) ** 45 – 47% (2) ** 30 - 35% (3) **
Влажность (количество водяного пара в атмосфере), кг/м ²	3.0-3.2	3.4-3.5	3.1-3.3	2.2-2.5	5.4 – 5.7 (1) ** 5.6 – 5.8 (2) ** 5.8 – 6.2 (3) **
Средняя ночная температура в зимний/летний периоды, °С	-28.7	-28.8	-28.2	-28.9	~ -5
среднегодовая / минимальная среднемесячная ночная температура грунта на глубине 100 - 289 , °С ***	2. / -0.45	1. / -0.65	1.6 / -0.8	-2.4 ** / -13.5 **	> 0 / > 0

Детекторы установки

1. Широкоугольные черенковские станции
2. Водные черенковские мюонные детекторы
3. Атмосферные черенковские телескопы
4. Сцинтилляционные детекторы
5. Флюоресцентные телескопы
6. Радиоантенны

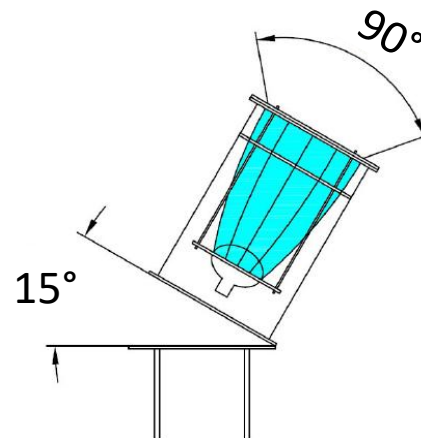
Широкоугольные черенковские детекторы

Оптическая станция установки
TAIGA-HiSCORE комплекса
TAIGA-1



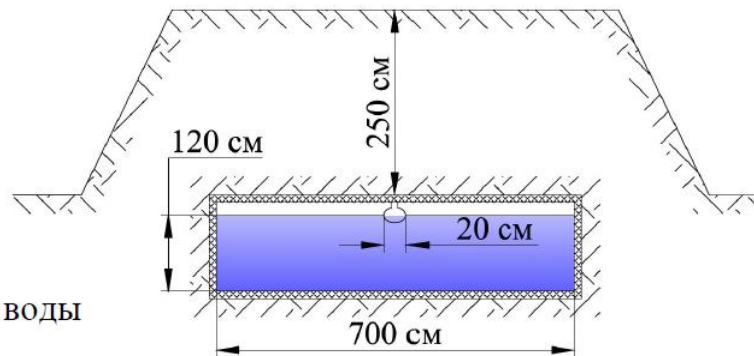
Диаметр
20 см

Детектор TAIGA-100

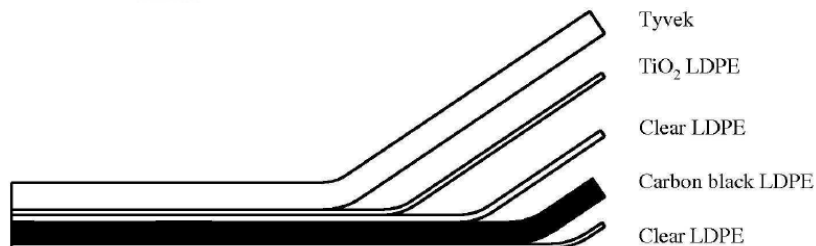


Водный черенковский детектор

- ФЭУ диаметром ~ 20 см
- Площадь детектора ~ 40 м²
- Прозрачность воды ≥ 30 м
- Динамический диапазон $\sim 10^4$ частиц
- Диффузный отражатель
- Коэффициент отражения $\geq 95\%$
- Отсутствие подогрева и системы очистки воды



Мешок для воды должен быть полностью герметичен, очищен от бактерий и грибов, волос и остатков пищи. В воду возможно на добавить немного хлора

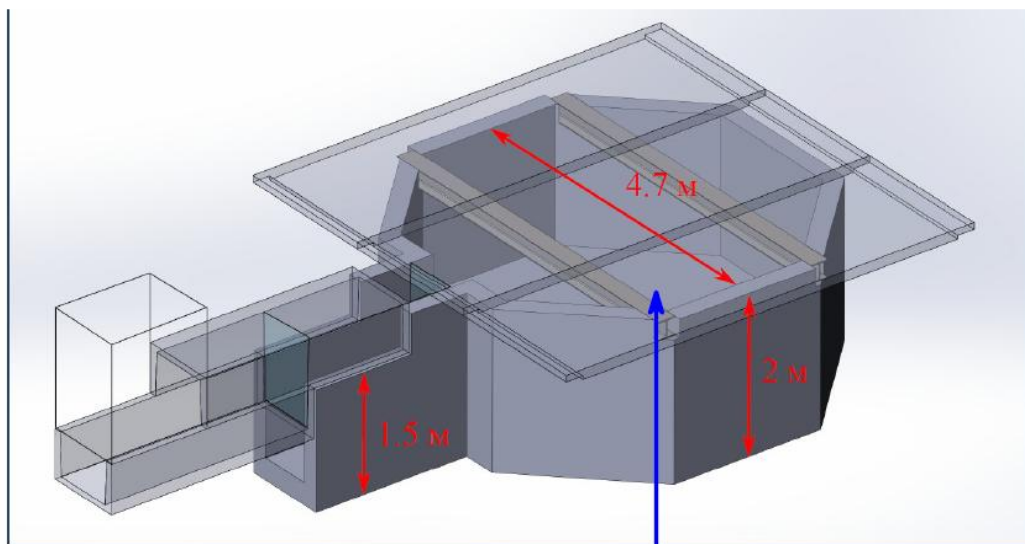


Испытание мешка



Прототип водного детектора

- Ж/б конструкция
- Заглубление ~ 1.5 м
- Толщина насыпи ~ 2.5 м
- Объем воды ~ 4 м³
- Система термодатчиков



В составе комплекса TAIGA-1



Вопросы методики & machine learning

1. Улучшить выделение событий от ШАЛ в оптической станции на фоне светового фона
- увеличение числа станций в событии – улучшение угловой точности и понижение энергетического порога
2. Разделение событий ШАЛ от гамма квантов от ШАЛ от протонов и ядер по форме сигналов в станции и топологии сработавших станций
3. Адрон- гамма разделение по топологии сработавших мюонных детекторов и числу мюонов
4. Восстановление массового состава космических лучей – по числу мюонов и распределению света от оси ШАЛ

Заключение

TAIGA-100 открывает уникальные возможности не для решения задач гамма-астрономии ультравысоких энергий и космических лучей сверхвысоких энергий и исследования многих других астрофизических объектов и явлений

Основные детекторы установки (черенковские водные мюонные детекторы и широкоугольные черенковские детекторы) основаны на проверенной методике и успешно реализованы в установках Auger, LHAASO, TAIGA-1 и могут быть созданы из доступных комплектующих