

Космические лучи – новые результаты и перспективы

П.А.Климов, Л.А.Кузьмичев, Д.М.Подорожный

Научная сессия к 75-летию НИИЯФ МГУ

15.02 2021

**Посвящается памяти
Михаила Игоревич Панасюка**



2010

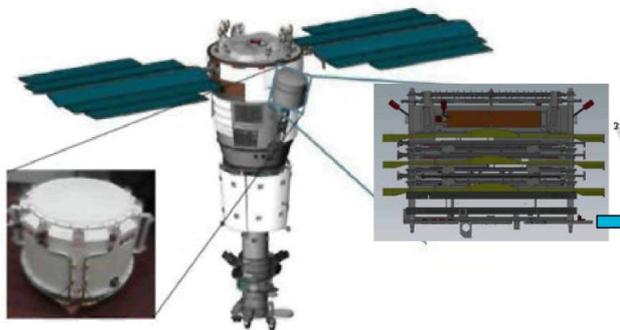


2020

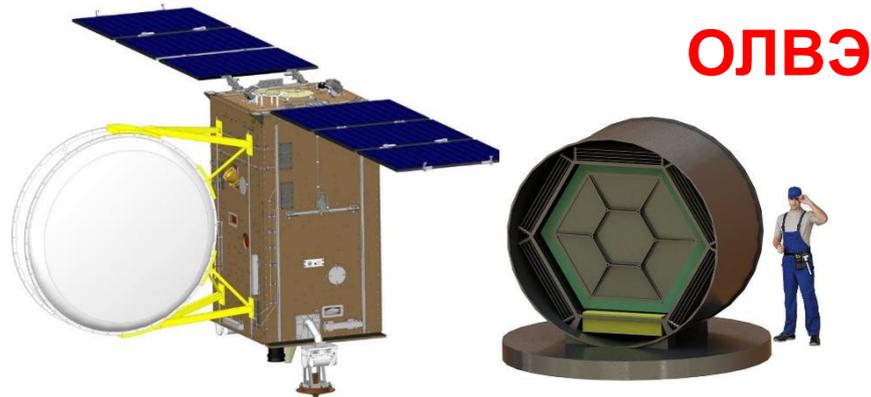


2030

НУКЛОН



**Нуклон-2
(Менделеев)**



ОЛВЭ



Tunka

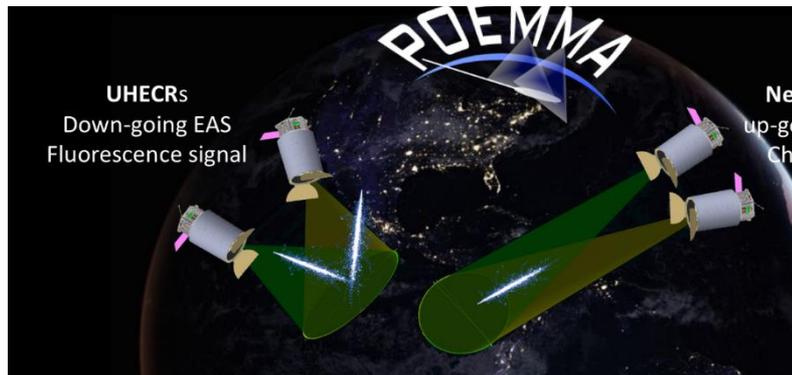
ТУНКА-133



TAIGA



**Проект «ТУС»
(Трековая
Установка)
на спутнике
Ломоносов**

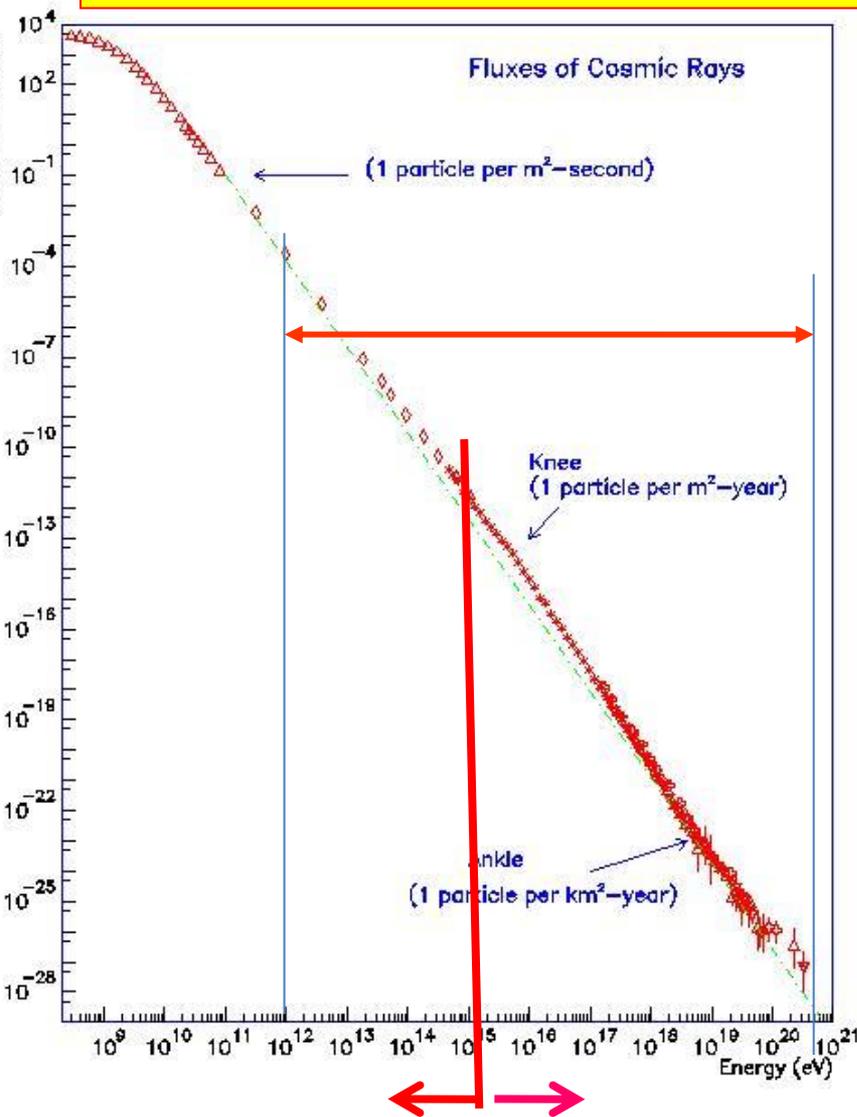


РДЕММА

UHECRs
Down-going EAS
Fluorescence signal

Neu
up-go
Che

Спектр космических лучей



$$P(E) = \Delta P / \Delta E = A E^{-\gamma}$$

γ : от 2.7 до 3

$E < Z \times 3 \cdot 10^{15}$ эВ - Галактические
космические
лучи

$E > Z \times 3 \cdot 10^{15}$ эВ - Метагалактические
космические лучи

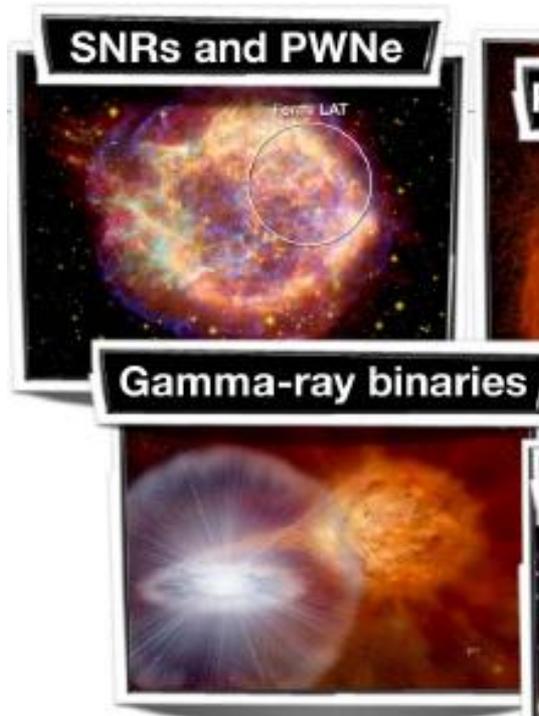
«Прямые» методы

Метод регистрации широких атмосферных
ливней (ШАЛ)

Космические ускорители

Галактические

Остатки Сверхновых
(SNR) Ia, II, Ib

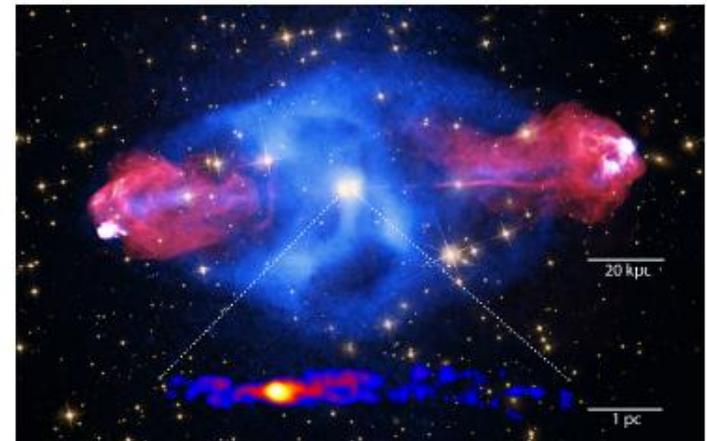


Плерионы
(PWN)

Двойные звезды

Внегалактические

Ядра активных галактик, блазары



Гамма-всплески



До каких энергий ускоряют эти источники, какие ядра ускоряются?
Может ли теория описать энергетический спектр космических лучей?

Первая особенность: 1ТэВ – 100ТэВ

Краткий обзор экспериментов
(1ТэВ – 100ТэВ)

1. НУКЛОН
2. DAMPE
3. HAWC

Краткий обзор экспериментов (1ТэВ – 100ТэВ)

1. НУКЛОН (НИИЯФ МГУ)

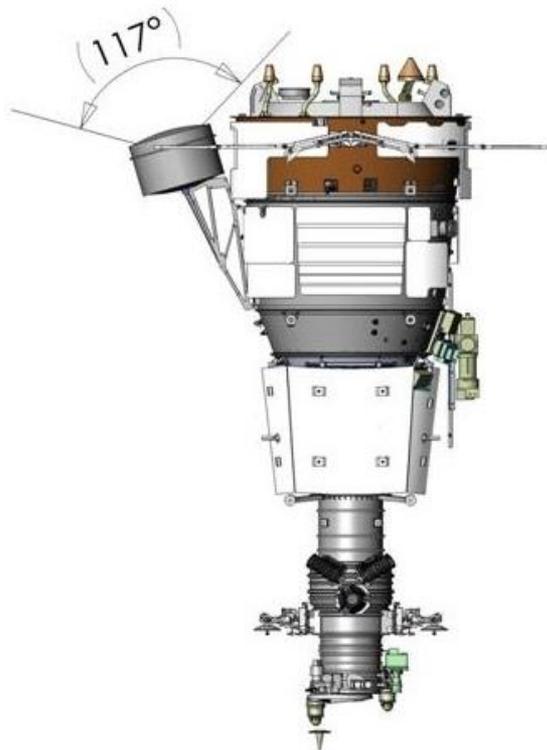
2. DAMPE

3. HAWC

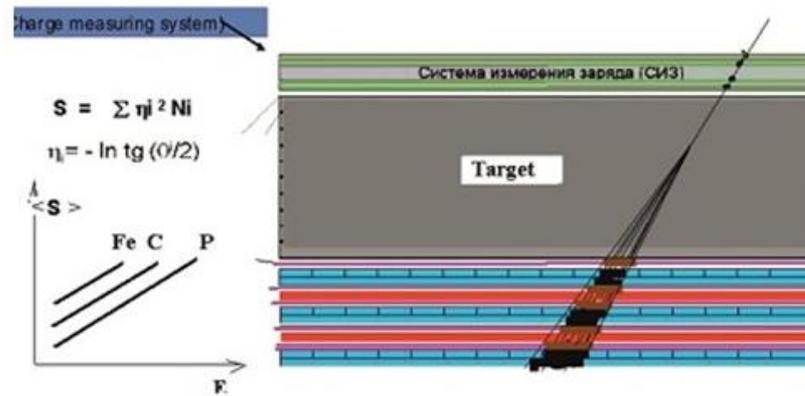
Спутник Ресурс-П

Вес – 300 кг

Геометрический фактор 0.3 м² стер



Kinematic Light weight Energy Method (KLEM)
based on the measurements of spatial density of secondary particles at several stages of development of nuclear electromagnetic cascades.



This method is a combination of Kinematic method and method of ultra-th in calorimeter

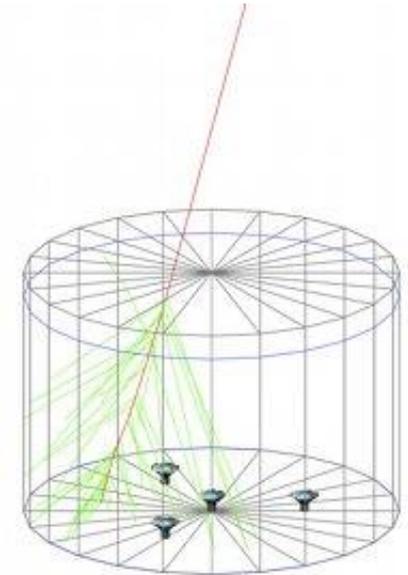
Краткий обзор экспериментов (1ТэВ – 100ТэВ)

1. НУКЛОН

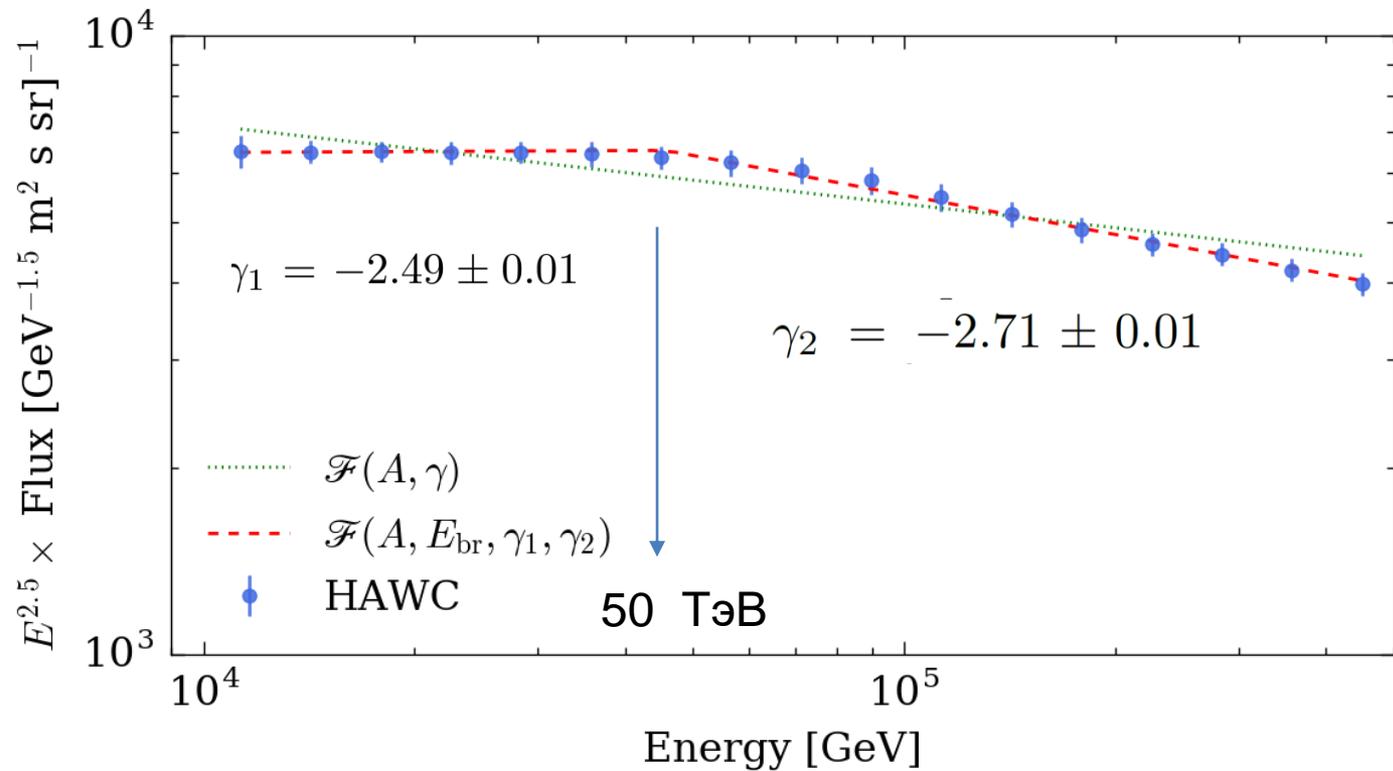
300 водных баков на
высоте 4100 м в Мексике

2. DAMPE

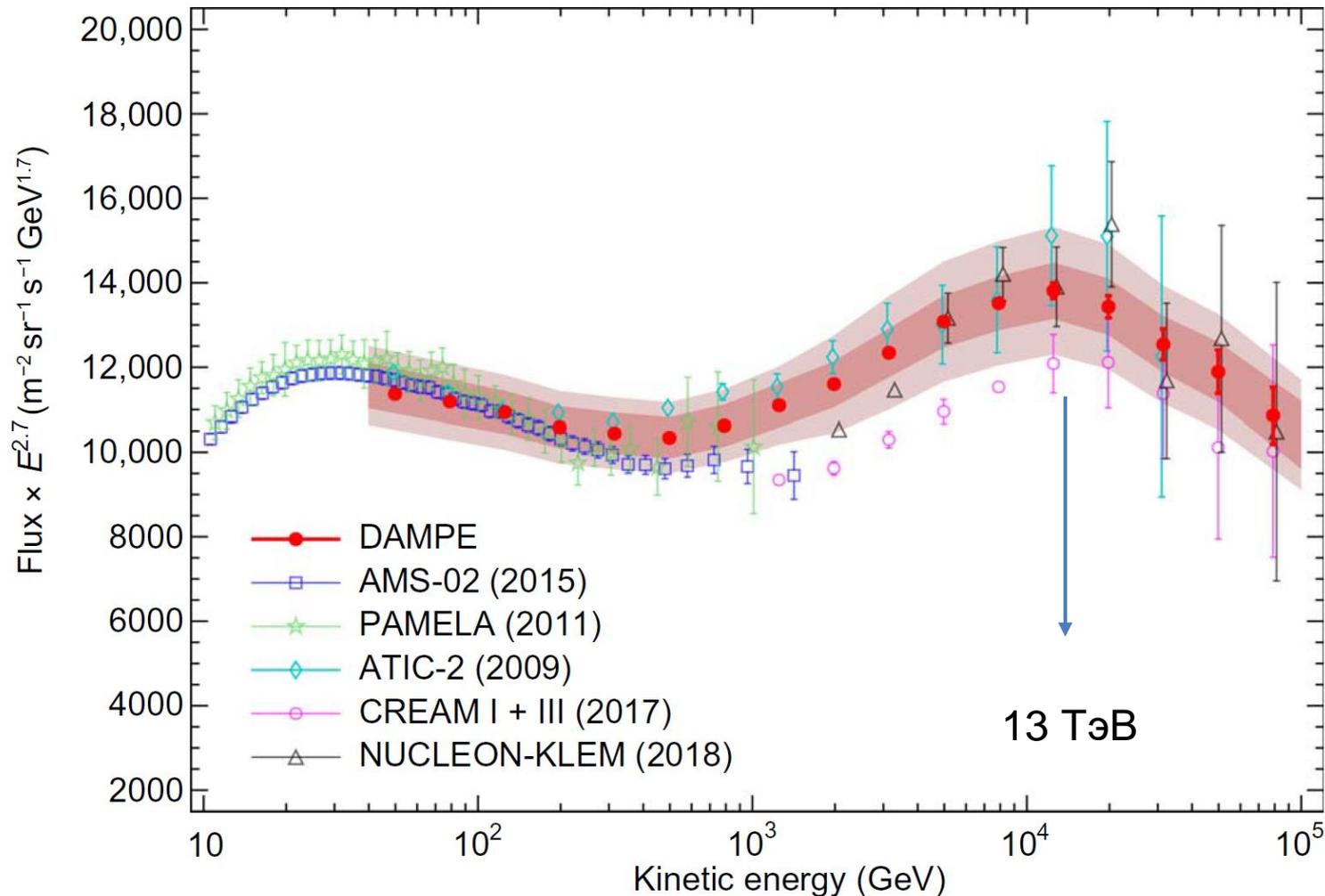
3. **HAWC**



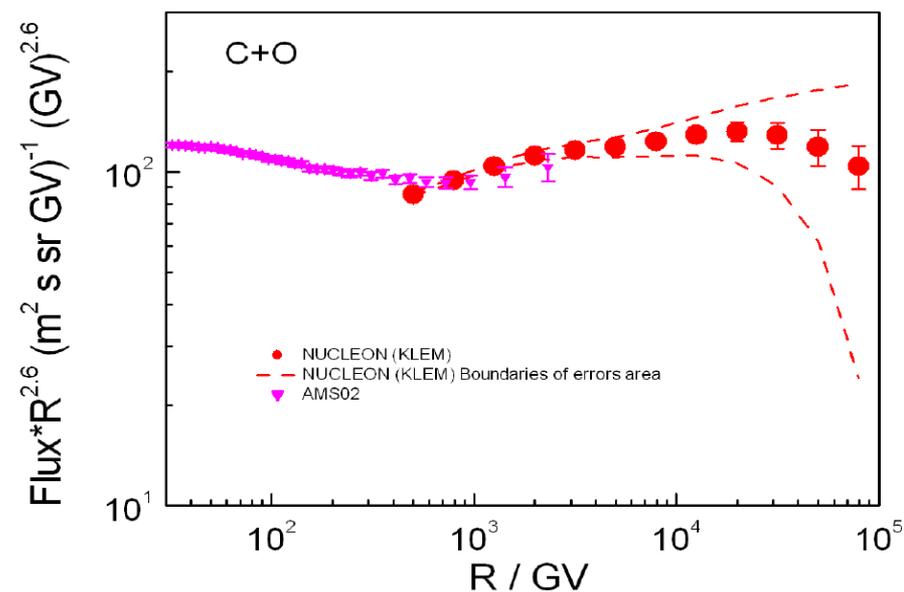
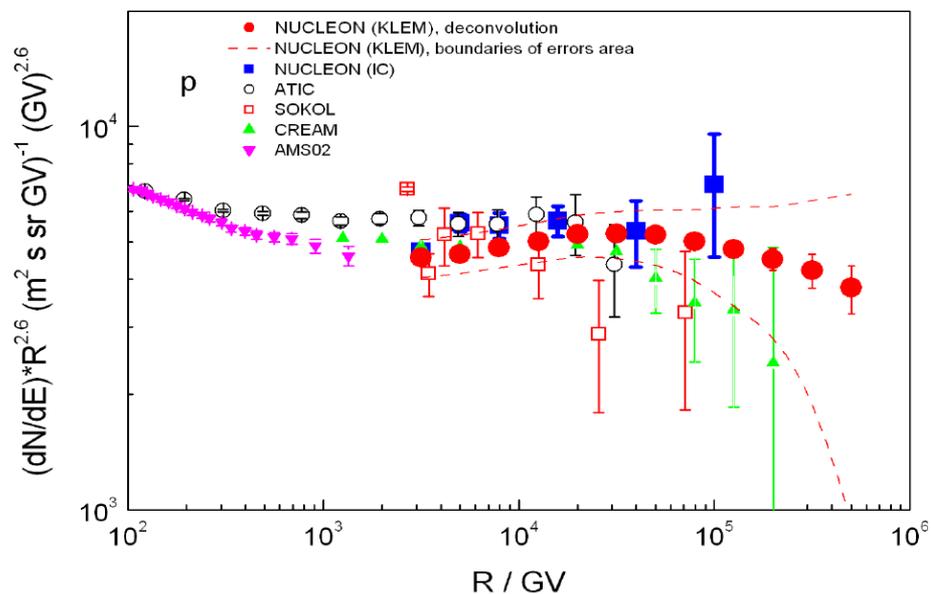
Спектр по данным HAWC



Спектр протонов по данным прямых измерений

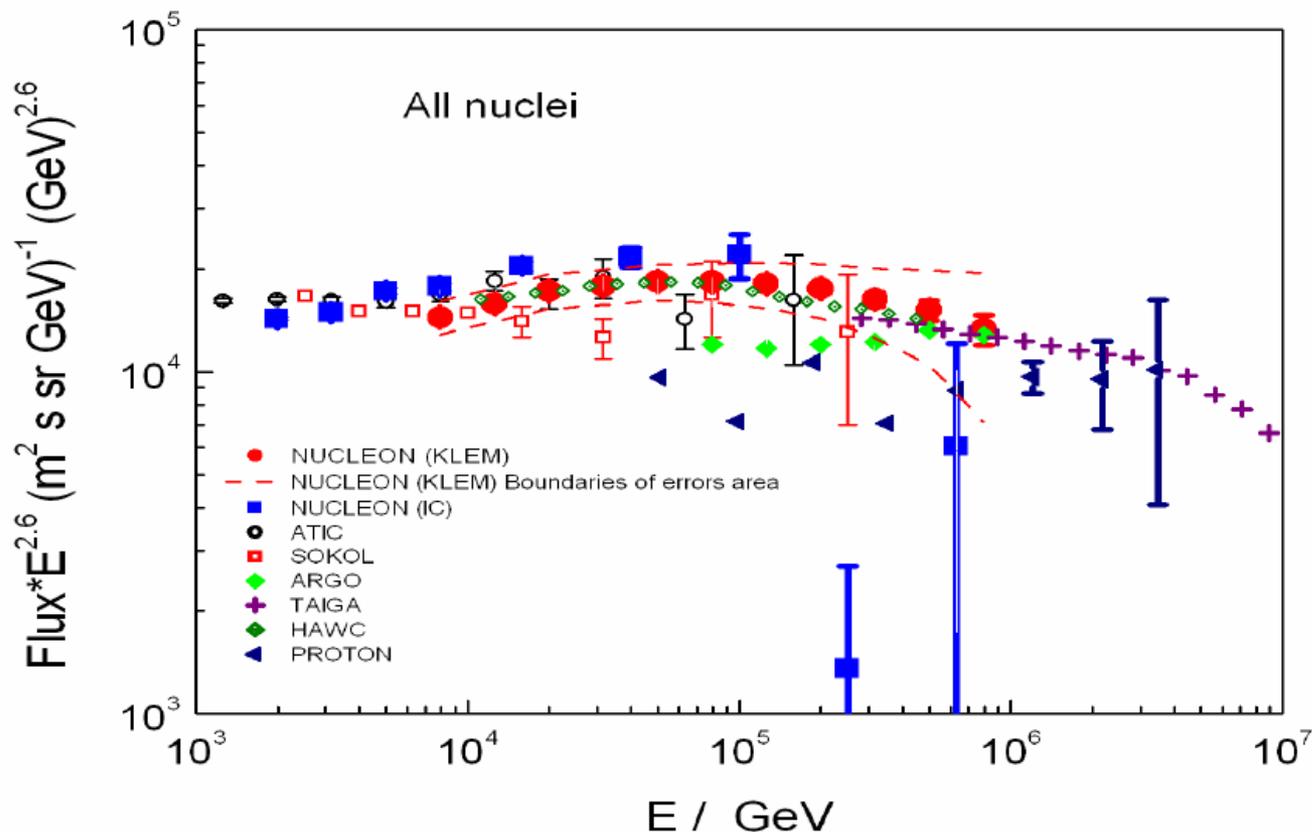


Нуклон – универсальное колено по жесткости (E/Z)



Показано наличие «колена» для разных компонент в области жесткостей ~ 10 ТВ.

Спектр всех частиц по данным прямых экспериментов



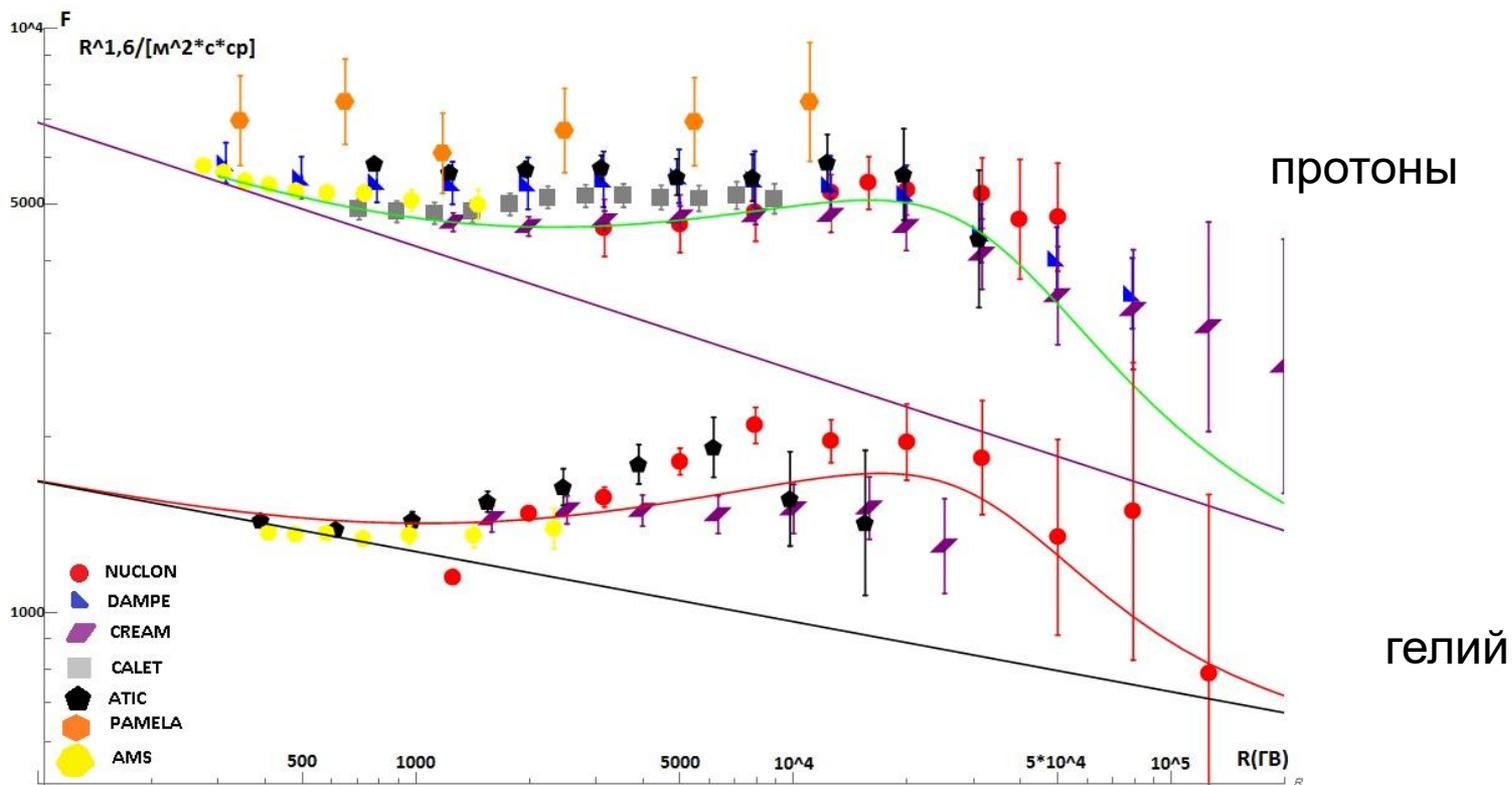
При пороге 10 ТэВ показатель спектра равен 2.48 ± 0.014 , а при пороге 100 ТэВ равен 2.78 ± 0.096

По данным HAWC : 2.49 ± 0.01 2.71 ± 0.01

Природа этого «колена»

Ближний источник? Аналогично гипотезе Ерлыкина и Волфендейла 1997 года. Как скажется на анизотропии?

10^4 лет, 0.3 кпс



Вторая особенность: 100 -1000 ТэВ

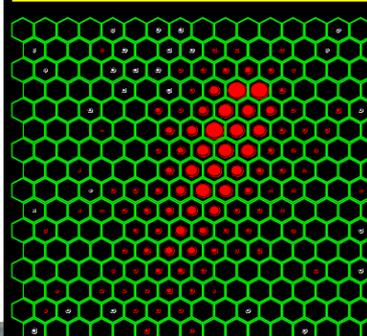
Argo – YBJ + Cherenkov telescope of LHAASO



**Wide Field of View
Cherenkov Telescope
(WFCTA)**

- 5m² spherical mirror;
- 16×16 PMT array
- Pixel size 1° ;
- FOV: 14° × 16° ;
- Elevation angle: 60° .

One of Cherenkov event

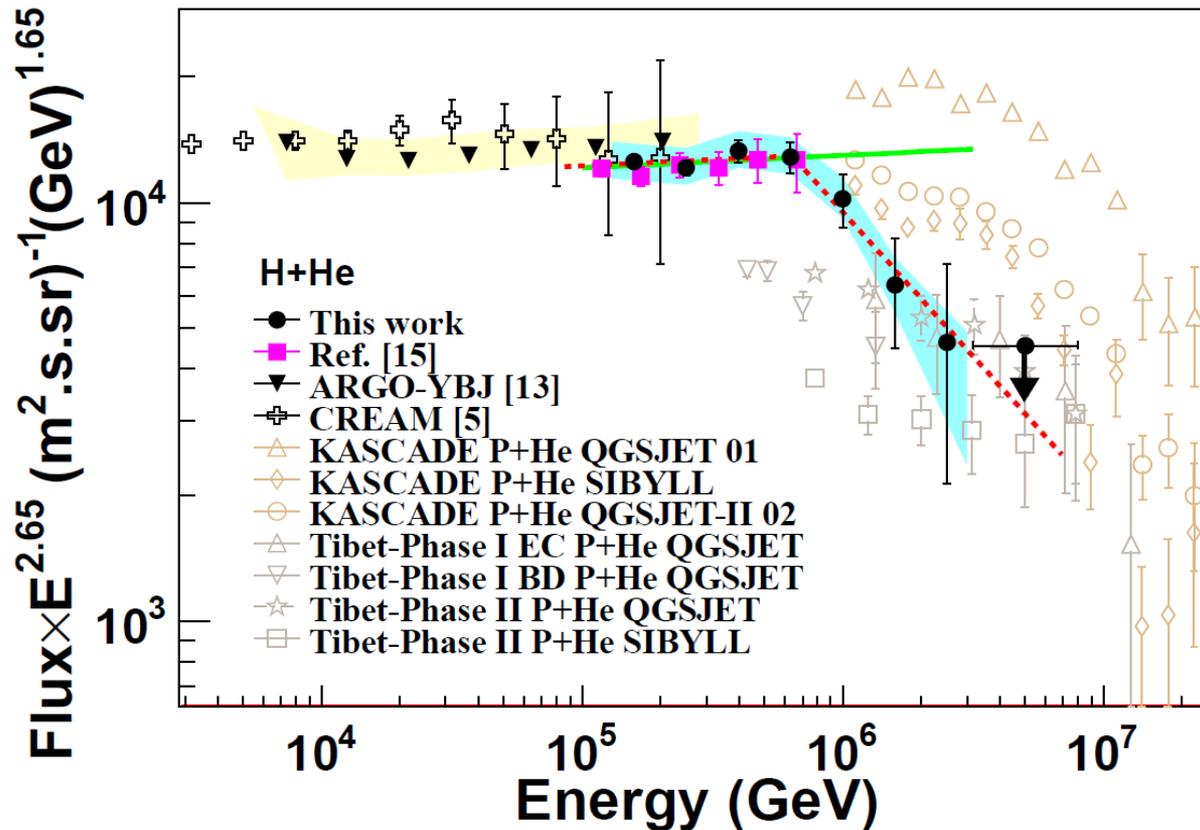


5000 m²



Resistive Plate Chambers carpet

Спектр протоны+ гелий



Резкий излом «легкой компоненты» (протоны и гелий) при 700 ТэВ

Какой же тогда состав в классическом колене ($3 \cdot 10^{15}$ эВ) ?

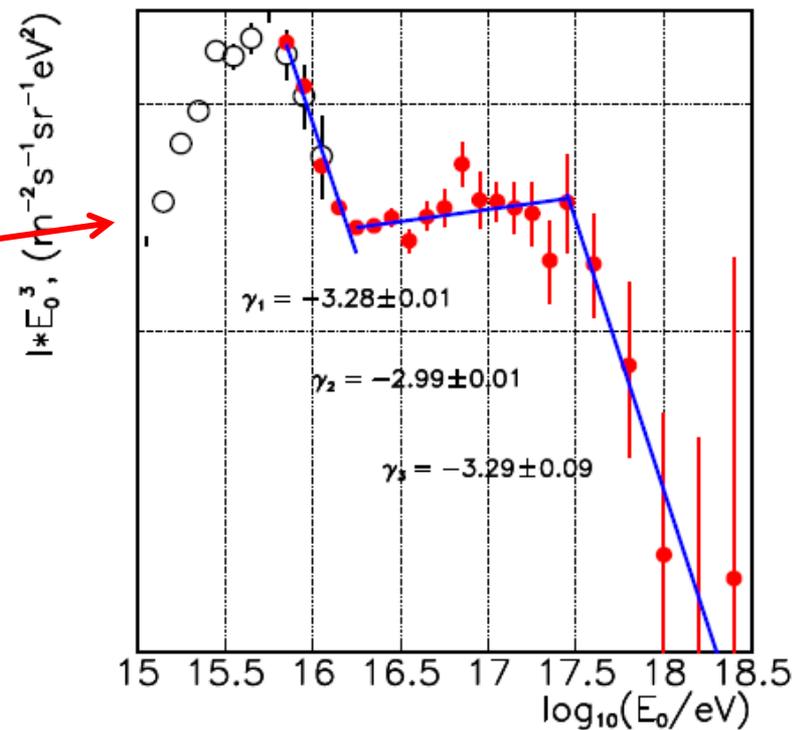
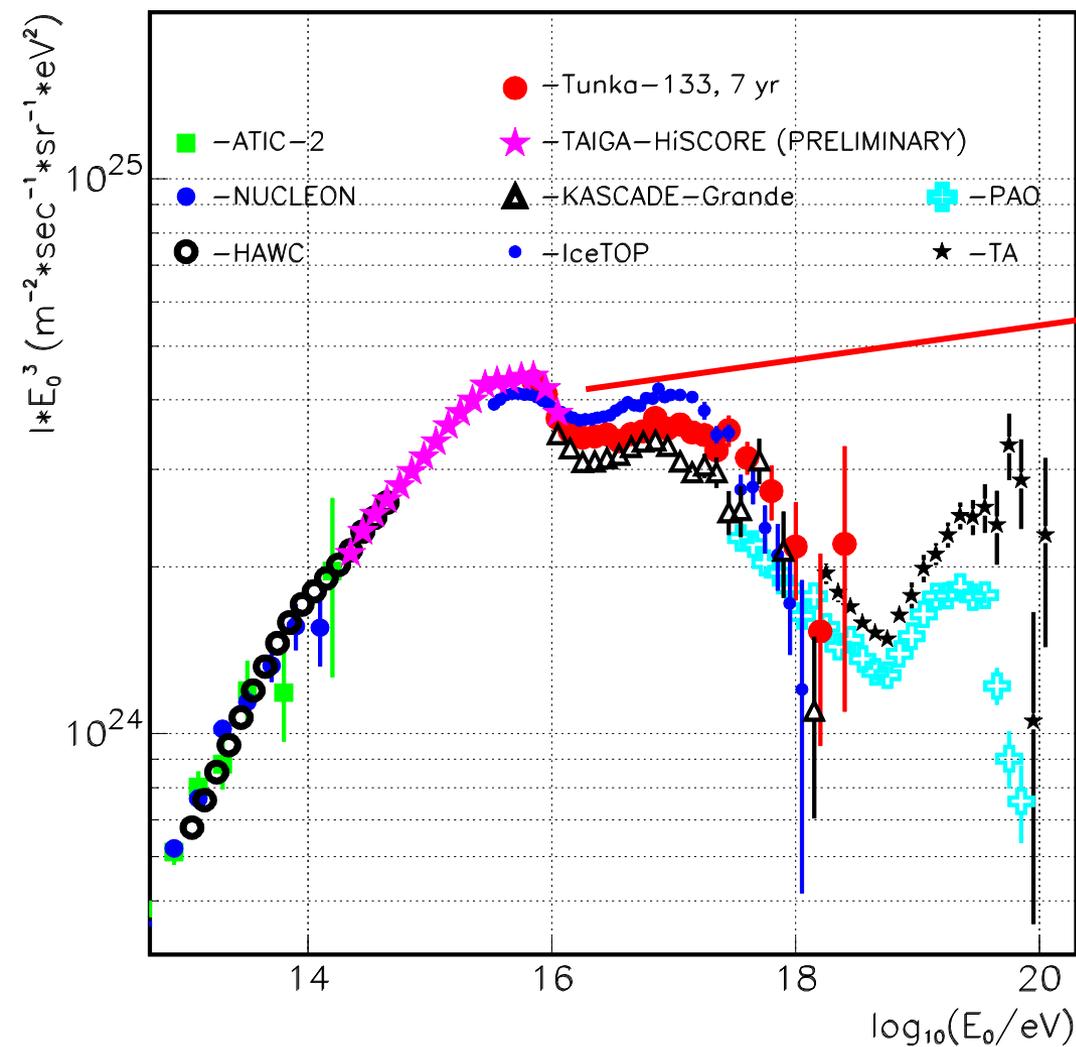
Третья особенность : 10^{14} - 10^{17} эВ



TAIGA-HiSCORE

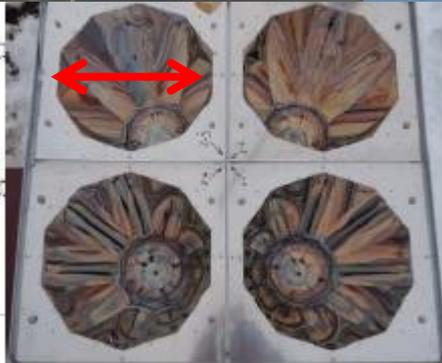


Энергетический спектр в диапазоне $10^{14} - 10^{18}$ eV



Первая очередь комплекса TAIGA - 1 км² 120 широкоугольных станции и 3 черенковских атмосферных телескопа.

Начало работы в полном объеме в 2021.



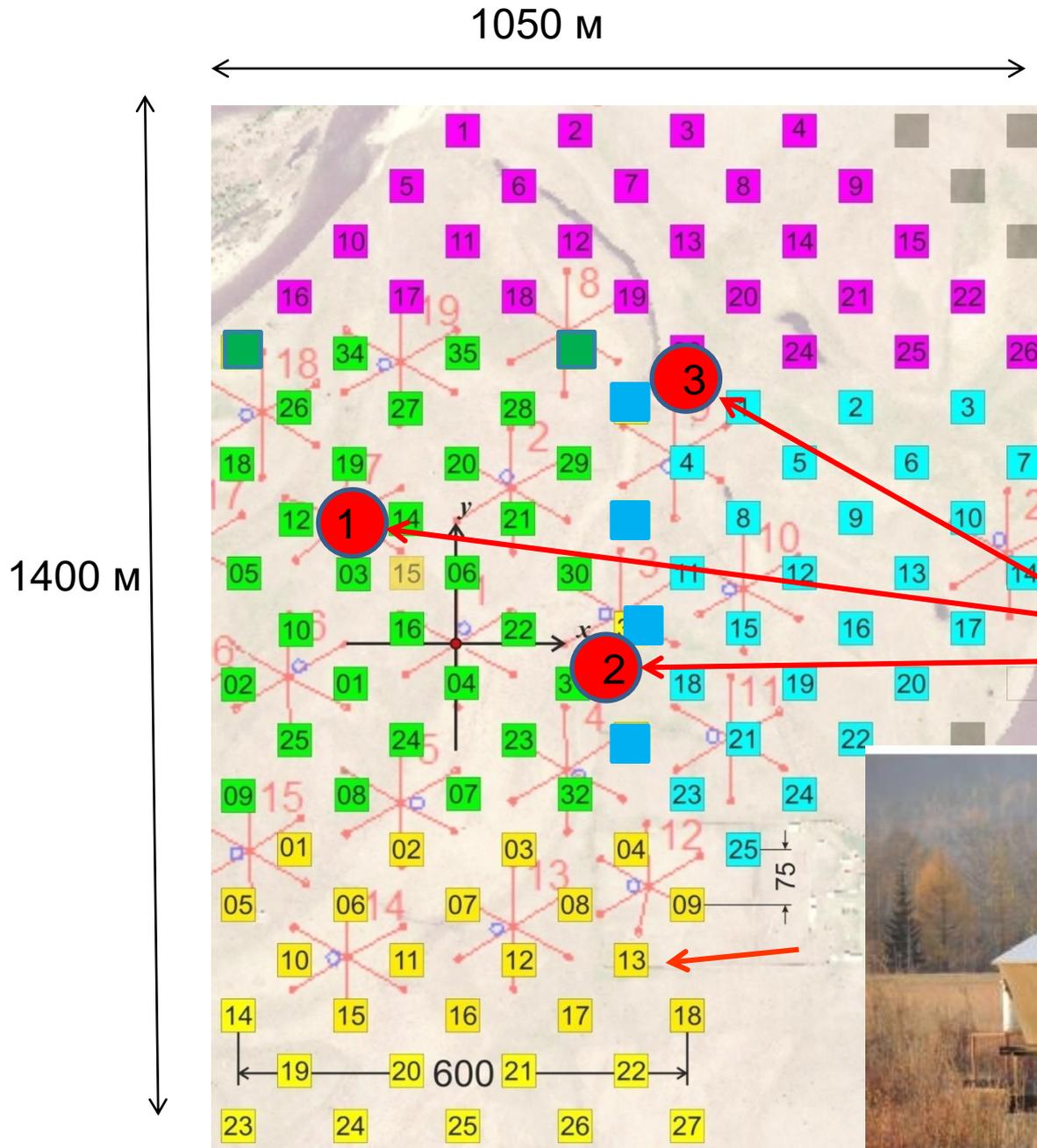
$$S_{\text{tot}} = 0.5 \text{ m}^2$$

Концентраторы и 4 ФЭУ

диаметром 20 см

FOV = 0.6 стер

TAIGA (первая очередь) - ноябрь 2020 : 86 станций и 2 телескопа



Третий телескоп уже установлен, но без зеркал и камеры



Что дальше?

1. Как объяснить особенности при 10 ТэВ и при $2 \cdot 10^{16}$ эВ в энергетический спектре? Можно ли спектр объяснить только сверхновыми? Нужен ли ближний источник?
2. Существует ли излом «легкой компоненты» при 700 ТэВ.
3. Протоны при энергии 10^{17} эВ. Галактические или внегалактические? Как связать поток этих протонов с внегалактическим магнитным полем?
4. Нужны прямые измерения в районе 10^{15} эВ и при более высоких энергиях.

**ОЛВЭ -«Обсерватория Лучей Высоких Энергий»
исследование космического излучения в области энергий
 10^{11} - 10^{16} эВ**

Интегральный спектр космических лучей

Энергия, эВ	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}
Поток (м-2 ср-1 год-1)	2 100	46	0.8	0.0054

**Геометрический фактор >100 м² ср в 300 раз больше
Нуклона**

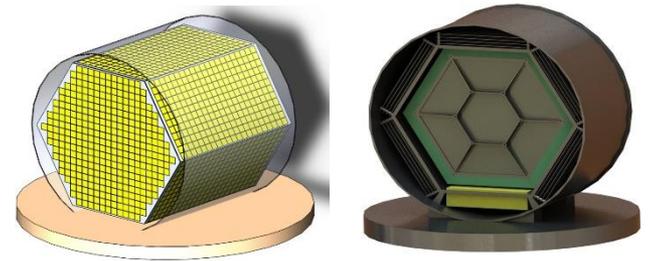
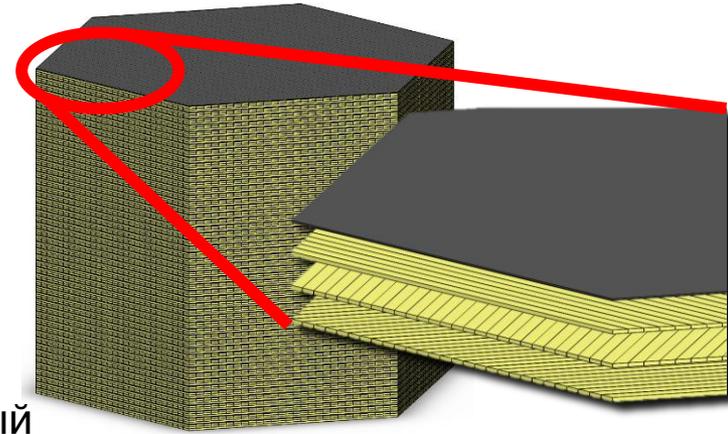
Такой «прорывной» эксперимент, на ближайшие десятилетие определит направления исследований в астрофизике высоких энергий. Основным критерий – высокий фактор экспозиции и высокая точность энергетического и зарядового разрешения

ОЛВЭ

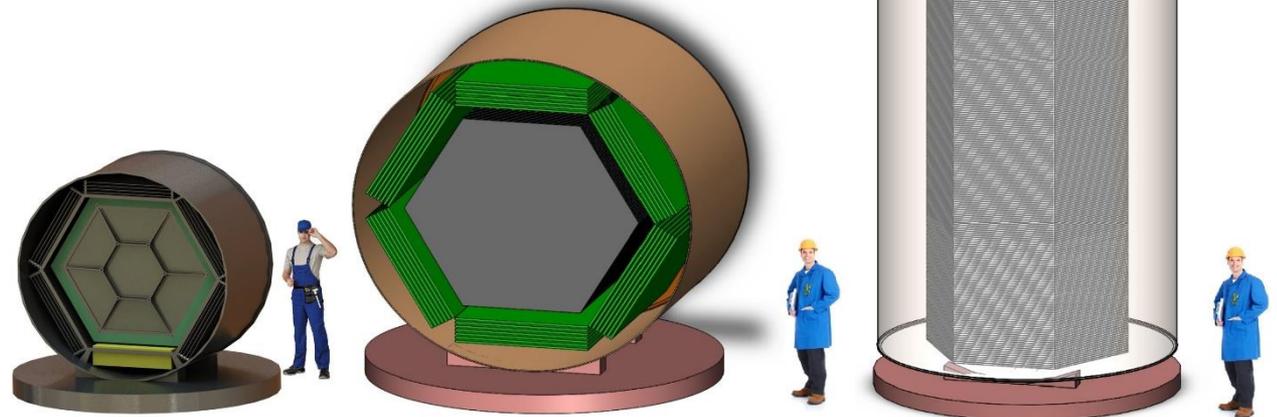
Две основные регистрирующие системы

- **Система измерения заряда** (СИЗ) – многослойная матрица кремниевых детекторов (4 слоя размер пада 1 см²)
- **Система измерения энергии** (СИЭ) – вольфрамово-сцинтилляционный 4D (три координаты и послекаскадный нейтронный мониторинг) ионизационный калориметр

Зарядовое разрешение **<0.3 з.е.** во всем диапазоне.
Энергетическое разрешение **3-30%** в зависимости от диапазона и заряда ядра (Минимальное разрешение - протоны в области энергий 10¹⁵-10¹⁶ эВ).
Энергетическое разрешение для электронов и Гамма-квантов **~1%**



	Фактор эксп, м ² ср год	Диапазон, эВ
ОЛВЭ 16 т	160	10 ¹¹ -10 ¹⁶
ОЛВЭ 50 т	530	10 ¹¹ -3·10 ¹⁶
ОЛВЭ 70 т	760	10 ¹¹ -5·10 ¹⁶



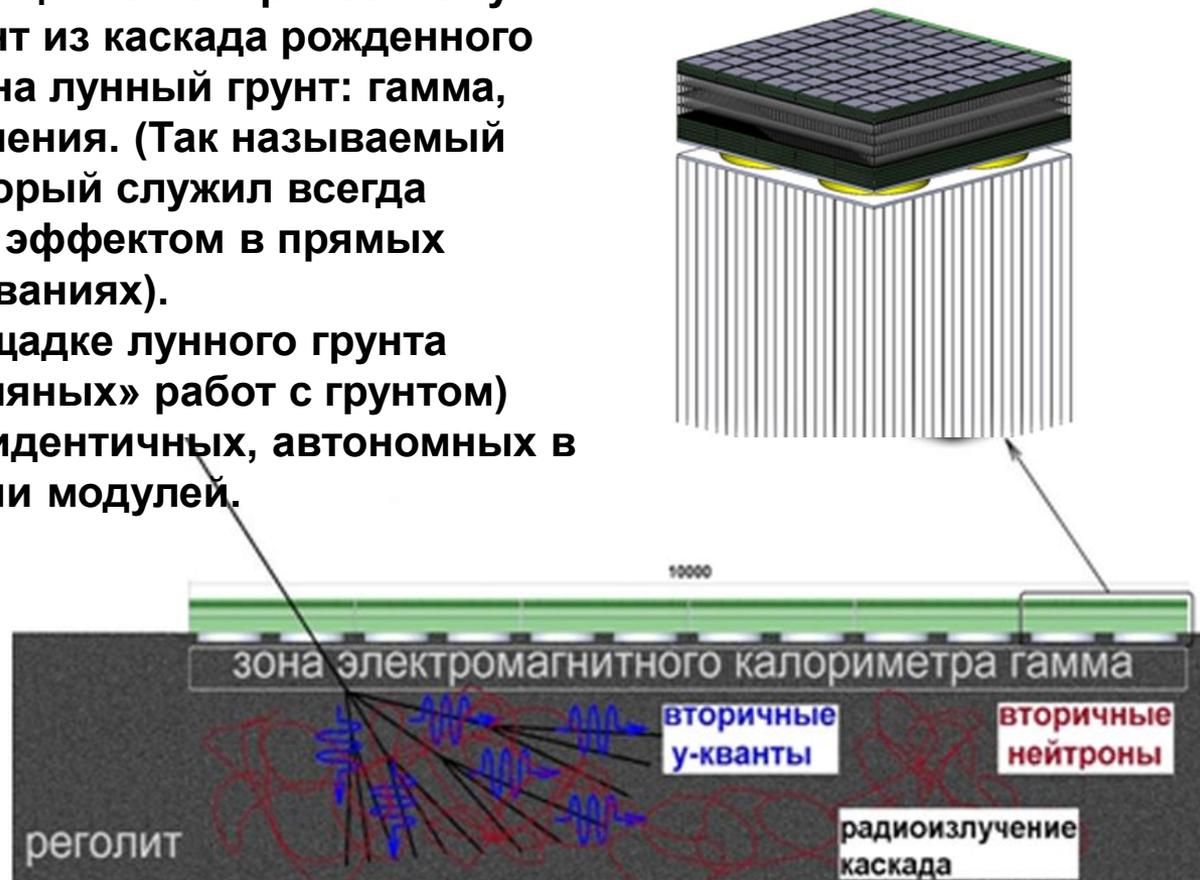
НЕЙТРОНИЙ

для Российской Лунной Научной Обсерватории

Идея использования грунта Луны в качестве поглотителя ИК не новая, но все предыдущие проекты требовали колоссальных ресурсов для построения сложных конструкций.

Предложена оригинальная идея определения первичной энергии частицы по поверхностному излучению трех компонент из каскада рожденного воздействием частицы на лунный грунт: гамма, нейтронов и радиоизлучения. (Так называемый **«обратный ток»**, который служил всегда дестабилизирующим эффектом в прямых исследованиях).

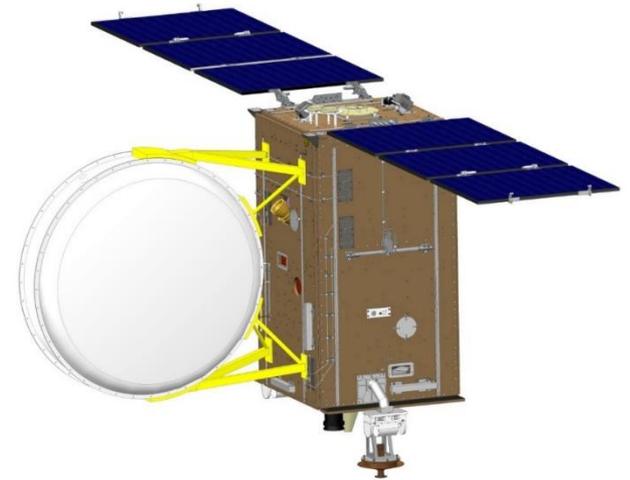
Предлагается на площадке лунного грунта расположить (без «земляных» работ с грунтом) определенное количество идентичных, автономных в эксплуатации модулей.



НУКЛОН 2 (Менделеев)

Основные цели эксперимента «Нуклон-2»:

- определение зарядового состава КЛ вплоть до границ известного списка стабильных элементов (с возможным поиском «острова стабильности» элементов с зарядом $Z > 114$);
- исследование изотопного состава сверхтяжелых ядер КЛ за пиком железа, до $Z \sim 60$ (изучение внутризвездного нуклеосинтеза в современную космологическую эпоху в прилегающей области Галактики).



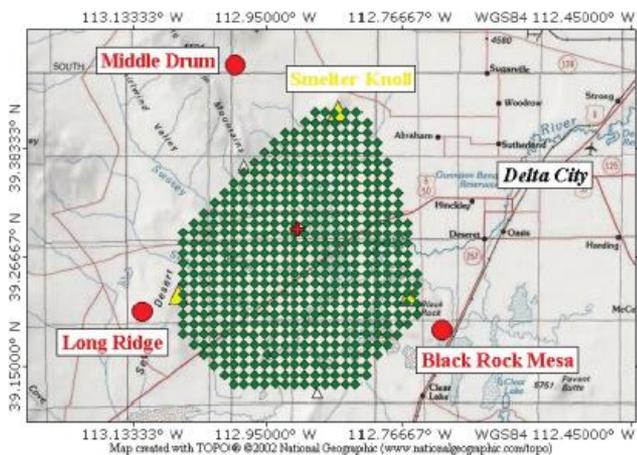
По ожидаемым результатам эксперимента будет собран банк событий, превышающий на полтора порядка общемировой банк, собранный за 50 лет исследований.

Космические лучи предельно высоких энергий: $> 10^{19}$ эВ

Auger 3000 km²



Telescope Array, 700 km²



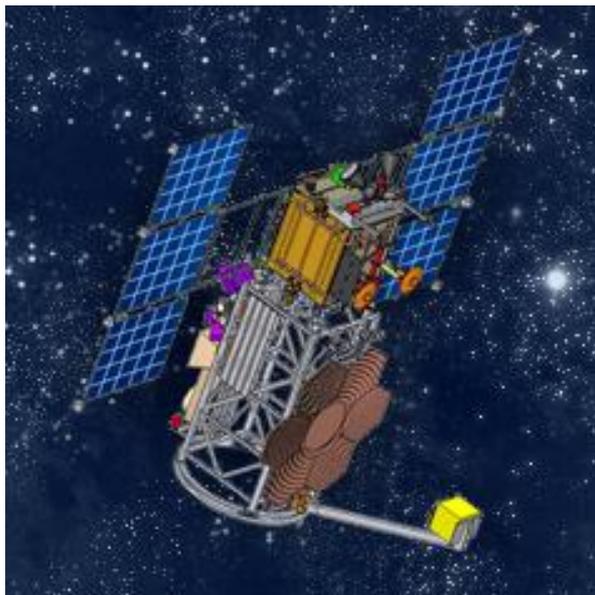
Цели

1. Есть ли ГЗК –эффект – рождение пионов при взаимодействии с реликтовыми фотонами
2. Найти источник космических лучей предельно высоких энергий

Что получилось

1. Есть излом спектра КЛ при энергий выше $4 \cdot 10^{19}$ эВ, но:
 - спектры на ТА (Северная установка) и Auger (Южная установка) отличаются;
 - излом в спектре не связан с ГЗК.
2. Источники КЛ предельно высоких энергий не найдены.

Первая реализация: Проект «ТУС» (Трековая УСтановка) на спутнике Ломоносов



Дата запуска – 28.04.2016
Время работы – до 12.2017
Орбита:

- 500 км
- 97.8°



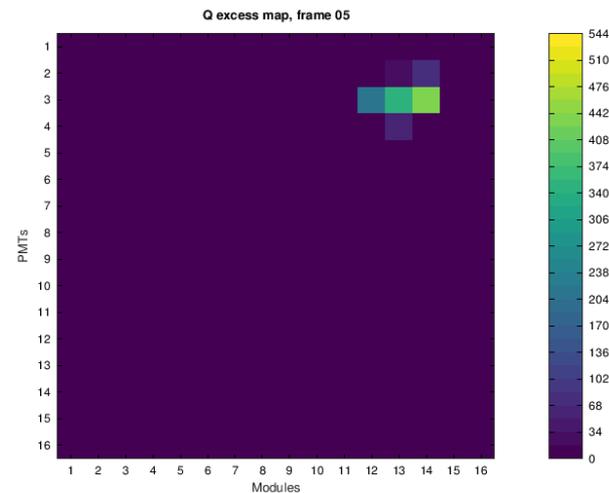
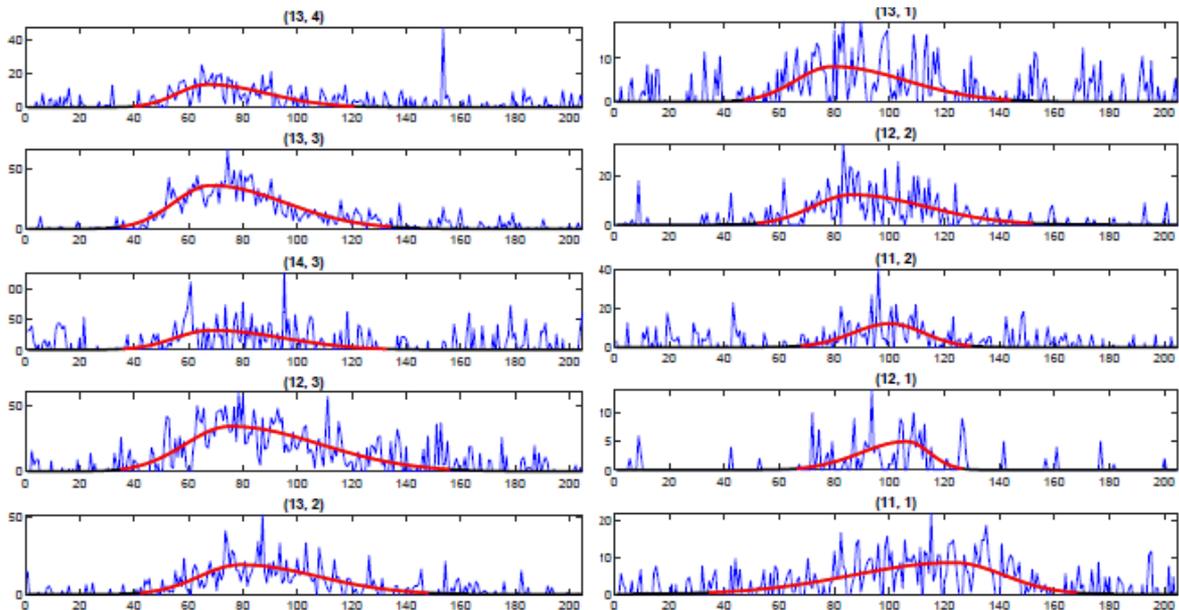
Поле зрения	±4,5 град
Число каналов	16 модулей по 16 ФЭУ
Размер пикселя	10 мрад(5×5 км)
Площадь зеркала	~2 м ²
Время экспозиции	30 %

**28 апреля 2016 года
05:01 (МСК)**



**Первый старт с
космодрома Восточный**

Первая регистрация с орбиты EAS-like event



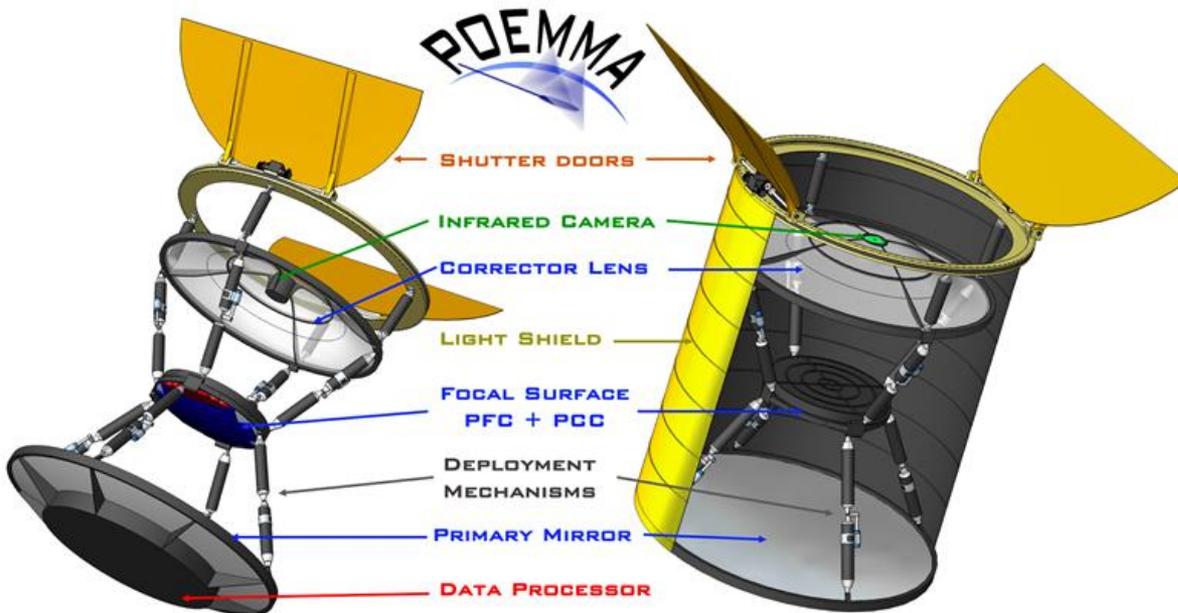
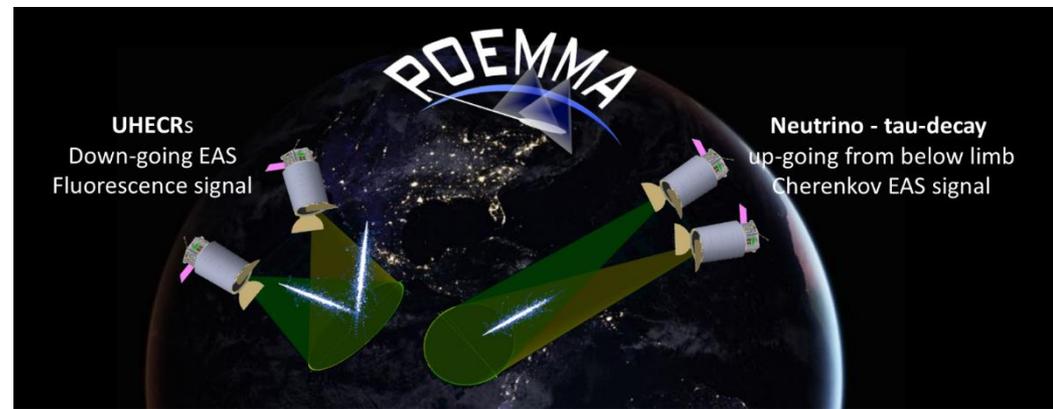
$$\phi_{\text{rec}} = (50 \pm 10)^\circ, \quad \theta_{\text{rec}} = (44 \pm 4)^\circ.$$

$$E \gtrsim 10^{21} \text{ eV}$$

- ✓ В событии наблюдается релятивистское движение.
- ✓ В предположении ШАЛ проведена реконструкция параметров первичной частицы.
- ✓ Эксперимент продемонстрировал работоспособность методики, возможность распознавания и реконструкции релятивистского движения, но и обнаружил существенные сложности: большое разнообразие фоновых явлений.

Khrenov et al, JCAP,
2020

Следующий шаг: крупномасштабная орбитальная обсерватория



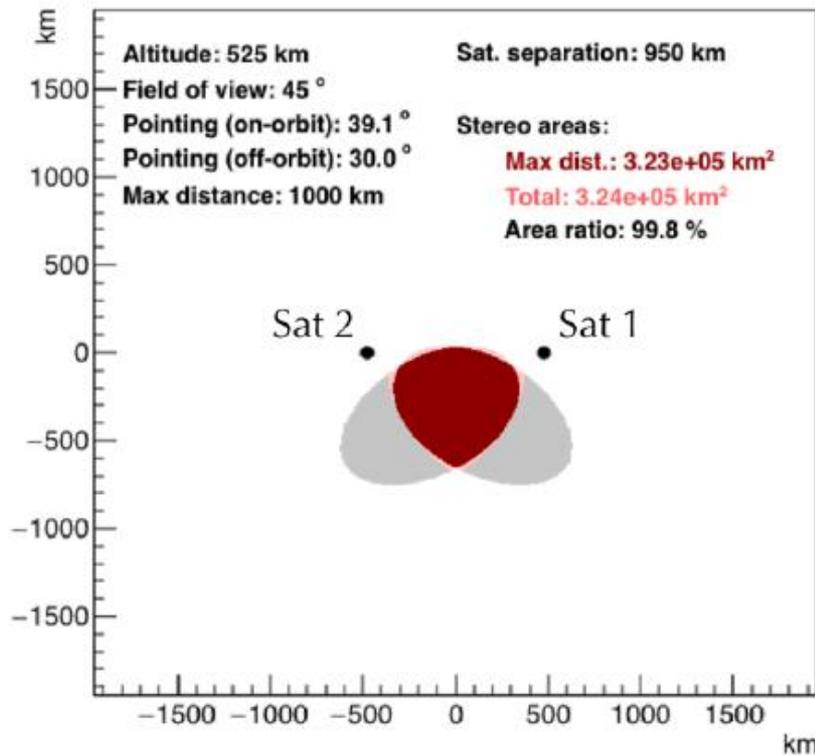
POEMMA: Probe of Extreme Multi- Messenger Astrophysics

НИИЯФ МГУ участвует в научной программе проекта и разработке цифровой электроники флуоресцентного телескопа

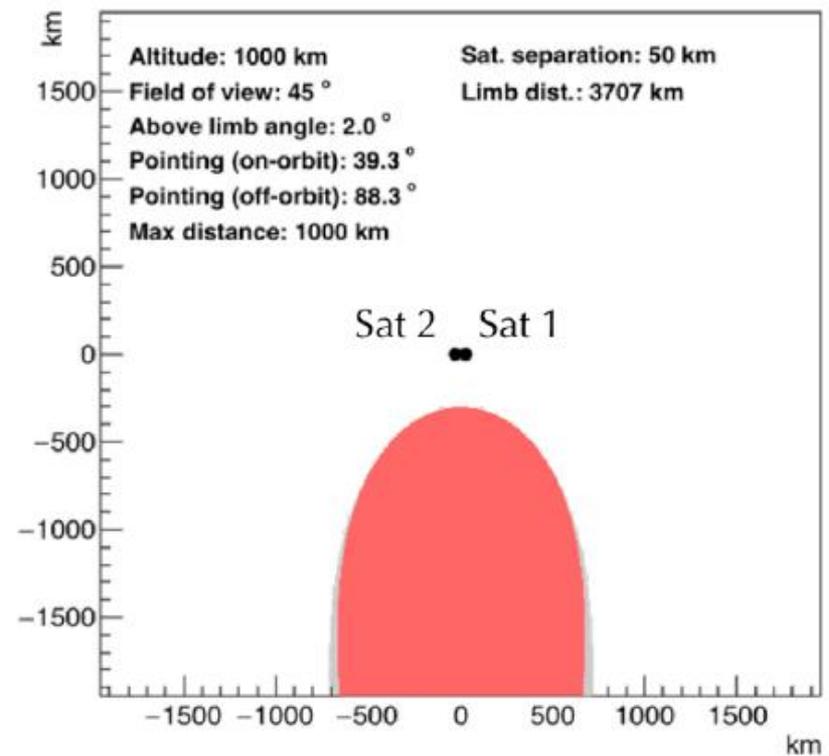
Комплекс для регистрации КЛ ПВЭ и нейтрино высоких энергий (> 20 ПэВ) Проект представляет собой систему двух телескопов на двух космических аппаратах, обеспечивающих стереоскопическое изображение трека ШАЛ и регистрацию прямого черенковского свечения от восходящих ливней энергичных нейтрино.

POEMMA

UHECR stereo observation mode



Neutrino stereo observation mode



Площадь в 100 раз больше, чем Auger.

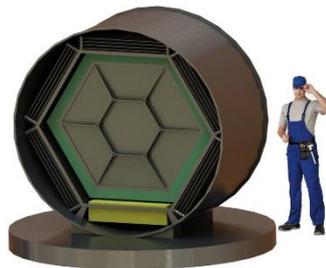
Заключение

Мы очень надеемся, что десятилетие 2021-2030 будет столь же успешно для исследования космических лучей, как и предыдущее!

Нуклон-2
(Менделеев)

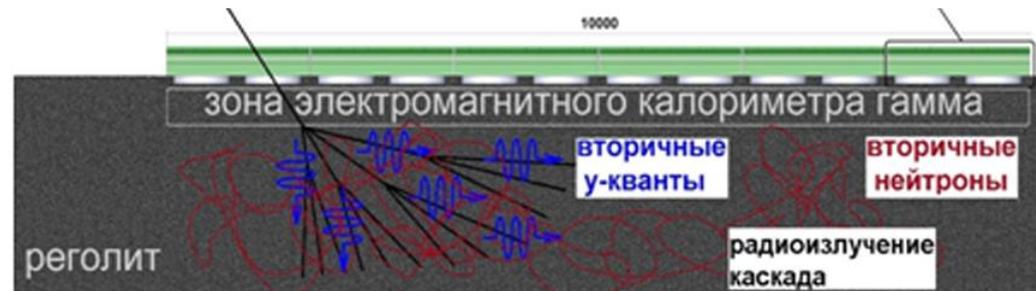


ОЛВЭ



TAIGA

Нейтроний на Луне



Спасибо за внимание