



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)**



# Мобильный мюонный годоскоп для мюонографии различных объектов

Целиненко М.Ю. А21-121

Москва, 2024

# 1. Космические лучи и мюоны

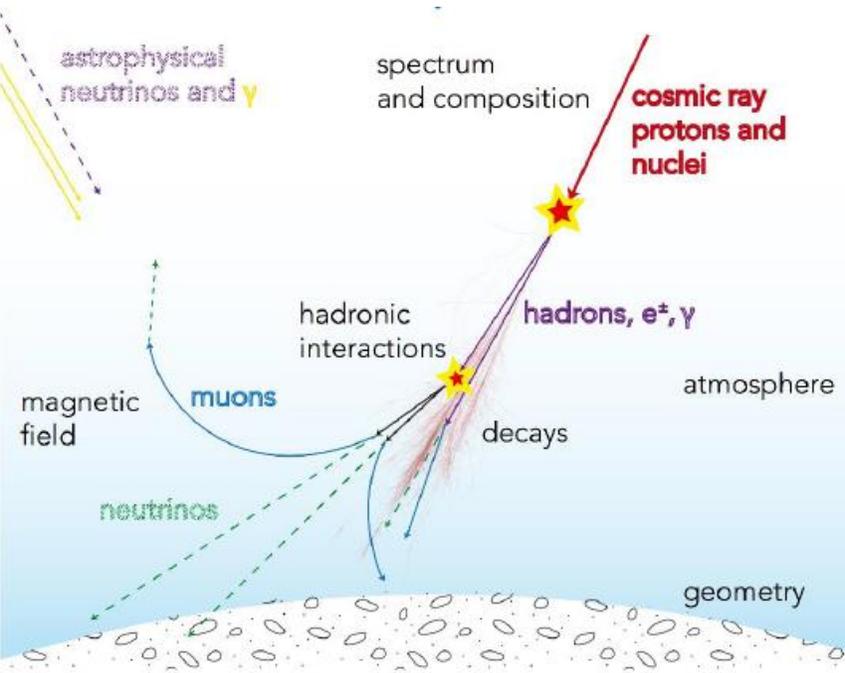


Схема движения космических лучей

**Космические лучи** — элементарные частицы, фотоны и ядра атомов, движущиеся с высокими энергиями в космическом пространстве.

При прохождении через гелиосферу поток первичных космических лучей модулируется процессами в межпланетном пространстве, связанными с активностью Солнца, которые вызывают изменения, как интенсивности потока, так и его изотропии.

При энергиях ( $E > 10$  ГэВ) направление движения мюонов практически совпадает с направлением движения первичных частиц.

Интенсивность потока мюонов на поверхности Земли чувствительна к различным термодинамическим изменениям в атмосфере.

Измерения пространственно-угловых вариаций потока мюонов дают возможность получать общую картину состояния атмосферы, магнитосферы и ближней гелиосферы.

## Взаимодействие мюонов с ядрами

**Основные процессы:**

*Упругое рассеяние*

*Неупругое рассеяние*

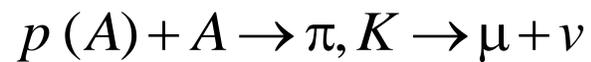
*Тормозное излучение*

*Образование  $e^+e^-$  пар*

**Наблюдаемые эффекты:**

*Многократное рассеяние*

*Адронные каскады*



# 1. Космические лучи и мюоны

Особенность: Слабое поглощение и большой пробег (электромагнитное взаимодействие и  $t_m = 2,2 \times 10^{-6}$  с).

## Генерация мюонов

### 1. Ускорительная физика:

- Исследования структуры нуклонов и ядер
- Идентификация частиц и процессов

### 2. Физика космических лучей:

- Исследования спектра и состава ПКИ
- Проверка моделей взаимодействия
- Поиск новых частиц и состояний материи

### 3. Прикладные исследования в космических лучах:

- Просвечивание земных объектов
- Мониторинг атмосферы Земли
- Мониторинг околоземного пространства

– Электромагнитное рождение:

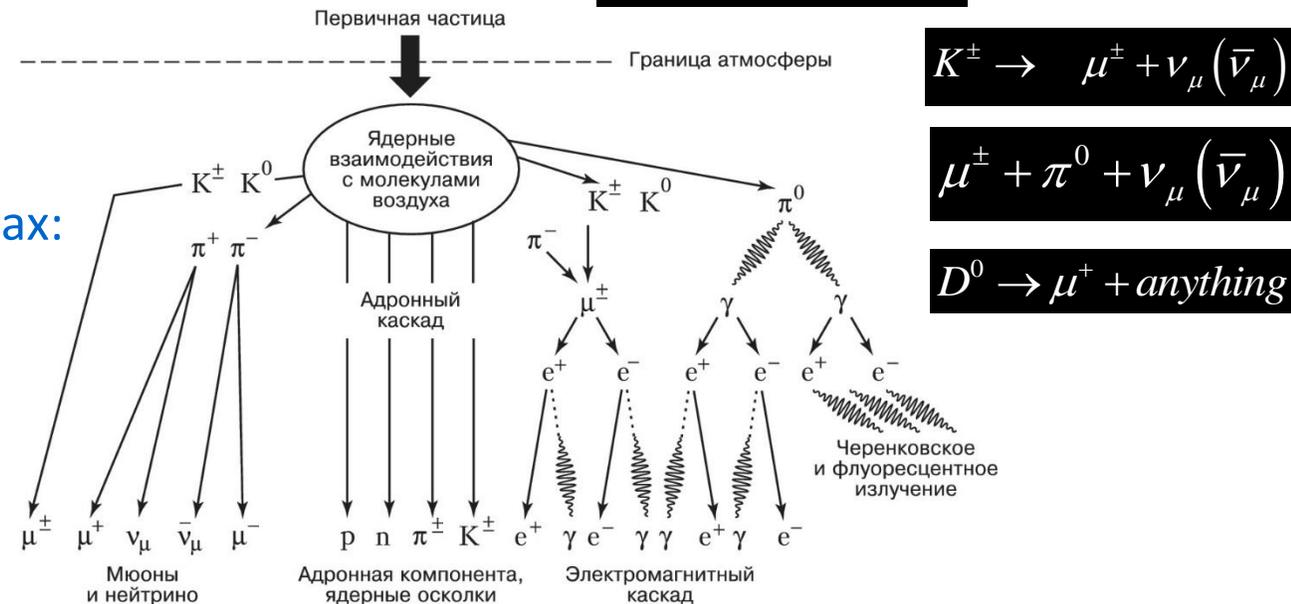
$$\gamma + Z \rightarrow Z + \mu^+ + \mu^-$$

Процесс подавлен в  $(m_\mu / m_e)^2$  раз по сравнению с

При высоких энергиях электророждение  $\gamma + Z \rightarrow Z + e^+ + e^-$  может преобладать

– Распады частиц:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$$



$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$$

$$\mu^\pm + \pi^0 + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$$

$$D^0 \rightarrow \mu^+ + \text{anything}$$

Схема образования компонентов ШАЛ

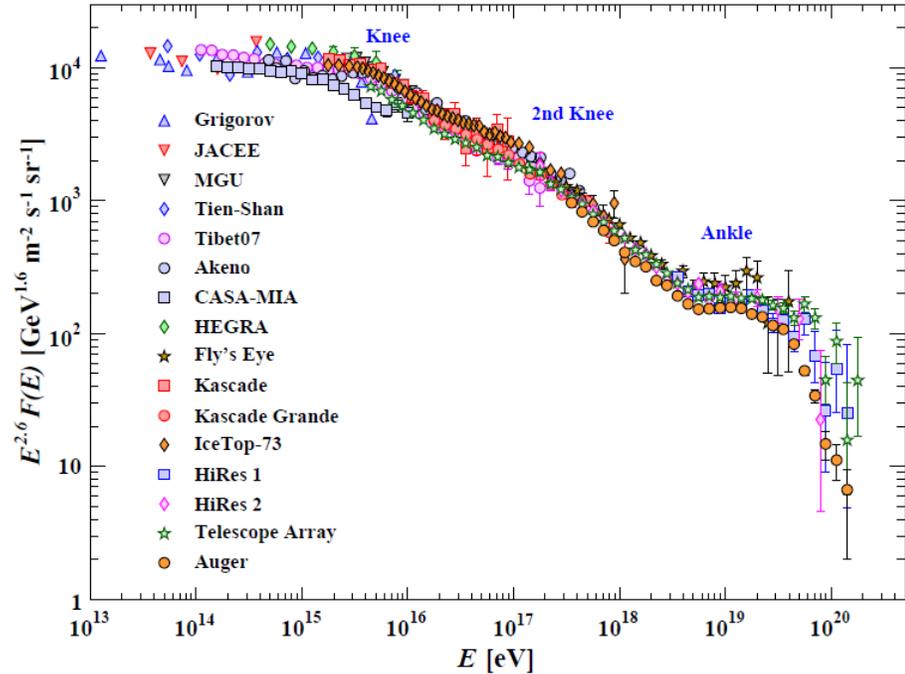
# 1. Космические лучи и мюоны

## Спутниковые измерения

- наблюдение начала солнечной вспышки;
- измерения параметров солнечного ветра в точке Лагранжа L1 (1,5 млн. км. от Земли).

## Наземные измерения

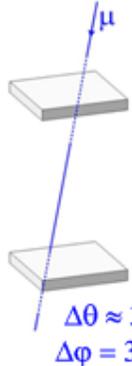
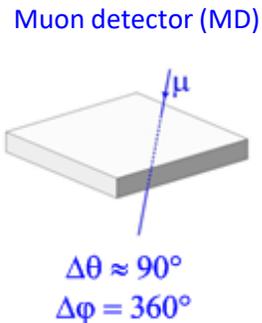
- сеть нейтронных мониторов (вариации внеатмосферного происхождения);
- мюонные телескопы (дискретные направления регистрации);
- многонаправленные мюонные телескопы (2 координатные плоскости, нет реконструкции трека, угловое разрешение  $\sim 7^\circ$ , нет возможности оценки эффективности);
- мюонные годоскопы (несколько координатных плоскостей, реконструкция трека, угловое разрешение  $\sim 1^\circ$ , «мягкий триггер», оценки эффективности регистрации плоскости).



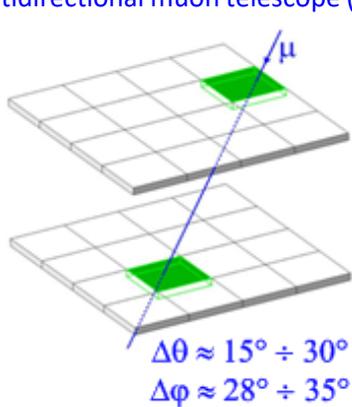
Спектр космических лучей

Muon telescope (MT)

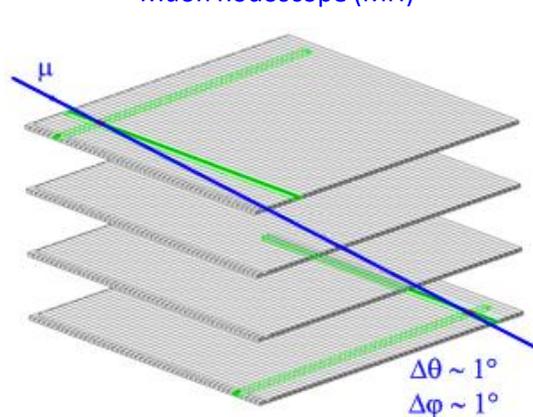
Muon detector (MD)



Multidirectional muon telescope (MMT)



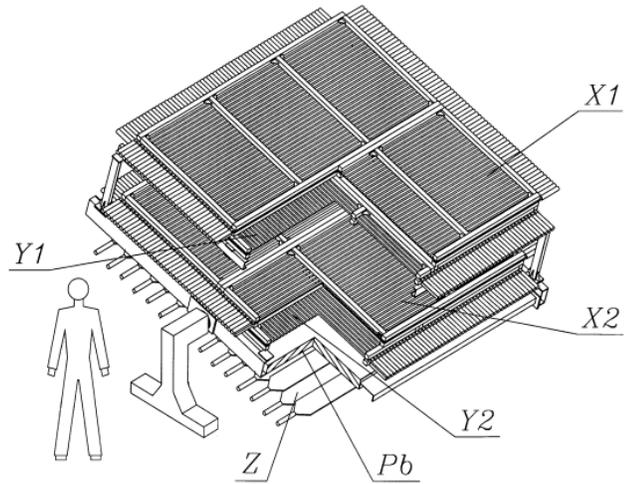
Muon hodoscope (MH)



## Исследования атмосферных мюонов:

- дают информацию об энергетическом спектре и массовом составе ПКЛ;
- позволяют проверять существующие модели адронных взаимодействий и искать «новую физику»;
- важны для нейтринной астрофизики.

# 1. Космические лучи и мюоны: годоскопы



ТЕМП



УРАГАН



SciCRT

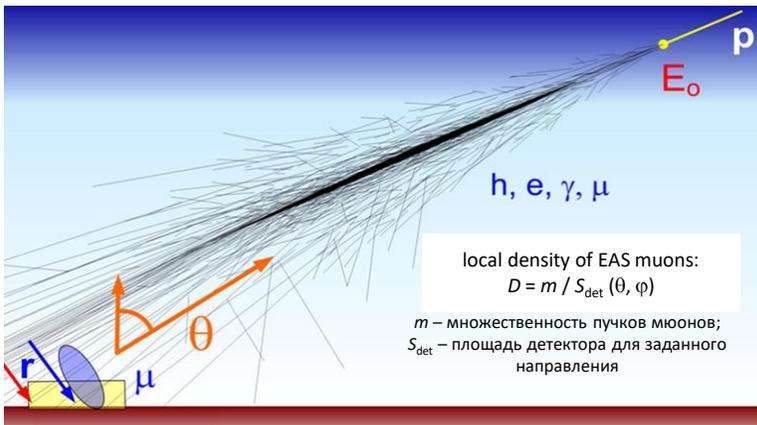
	ТЕМП	УРАГАН	SciCRT
Площадь регистрации, м <sup>2</sup>	9	12	9
Угловая точность, °	2	0.8	1.6
Темп счета мюонов, Гц	550	1400	400
Эффектив. регистрации, %	90	99	84

## 2. Мюнография

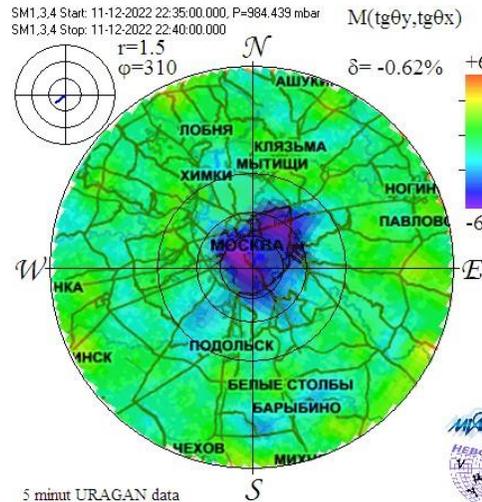
**Мюнография** (по аналогии с рентгенографией) – получение изображения вследствие поглощения и рассеяния потока мюонов естественного происхождения при прохождении через вещество.

Подход основан на регистрации с помощью мюонных годоскопов потока мюонов космических лучей, проходящих через исследуемый объект, по всем направлениям в пределах апертуры детектора.

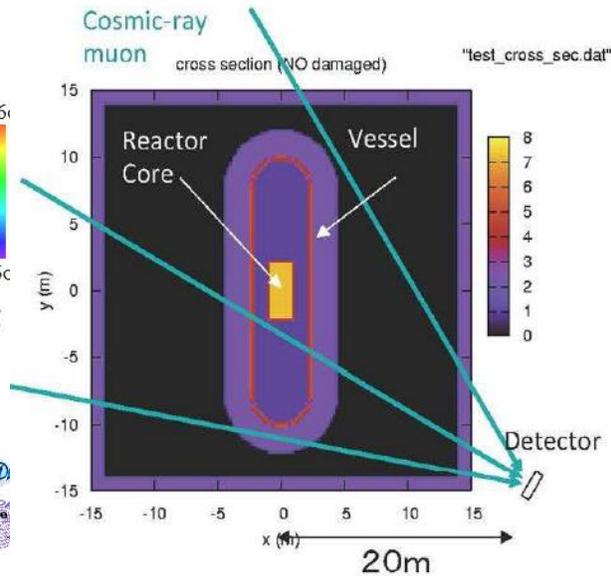
**Годоскоп** – прибор для регистрации каждого трека, приходящего из любого направления в пределах апертуры детектора.



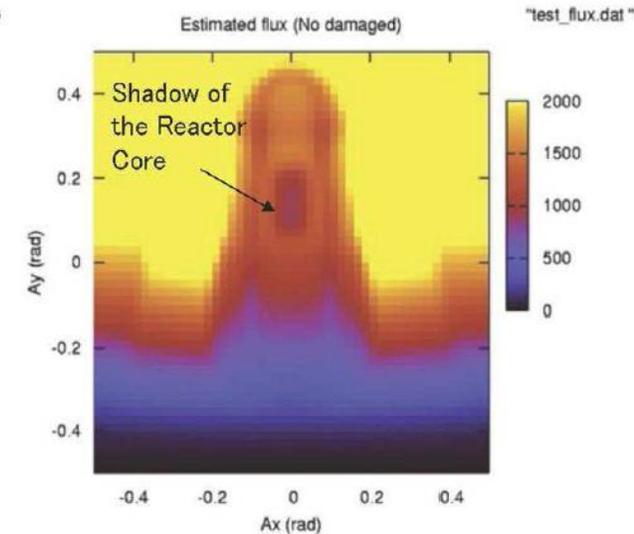
Принцип получения данных



Мониторинг атмосферы

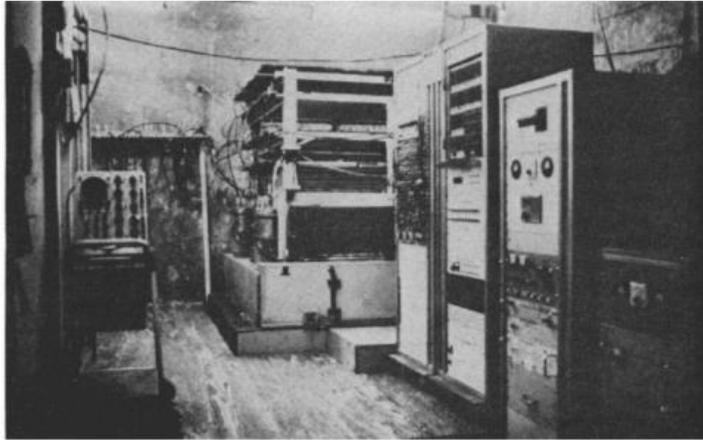


Способ применения



Полученное изображение

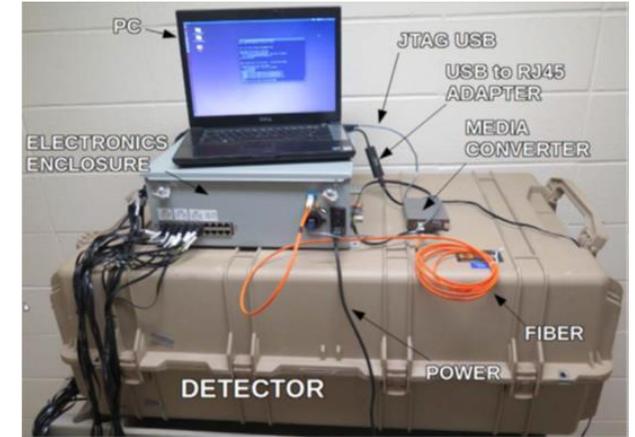
## 2. Мюнография



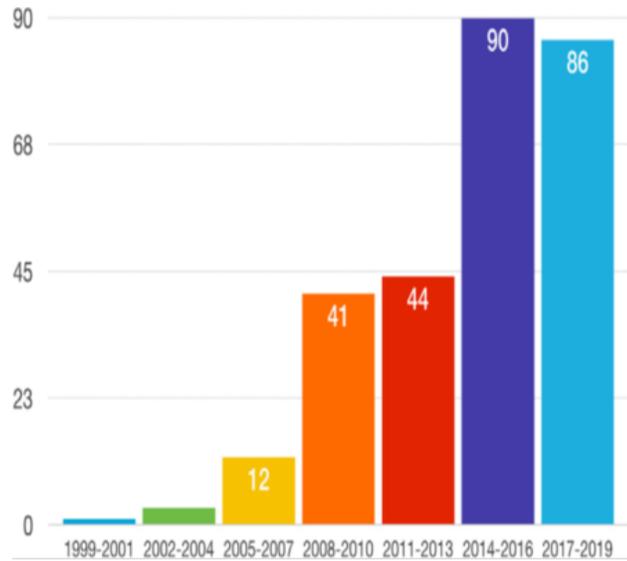
Техника 70-х



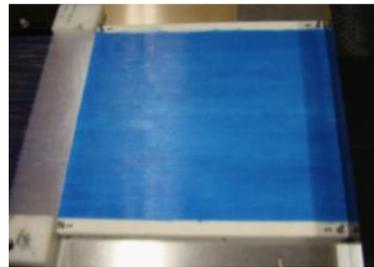
Техника 2000-х



Современный комплект МТ



Число публикаций 2000-2020гг.



Плоскость детектора  
(256×256мм, 128×128 ячеек)



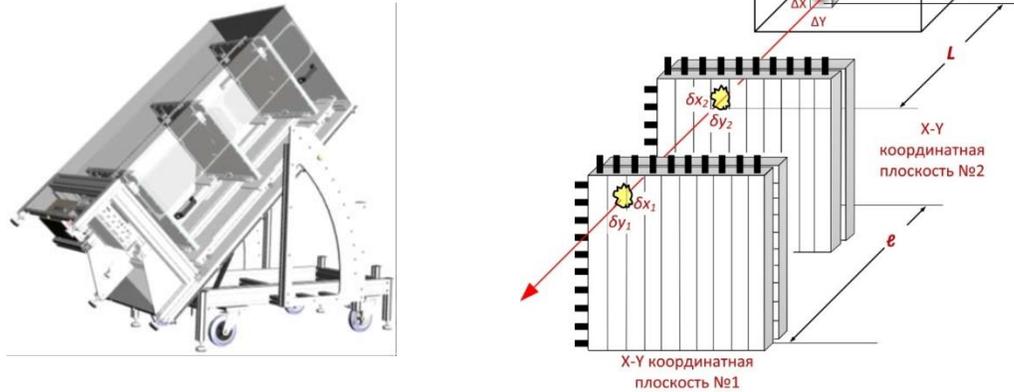
Скважинный (1×0,15м)

**Результат:** возможность установить МТ под любой объект, «просветить» под любым углом.

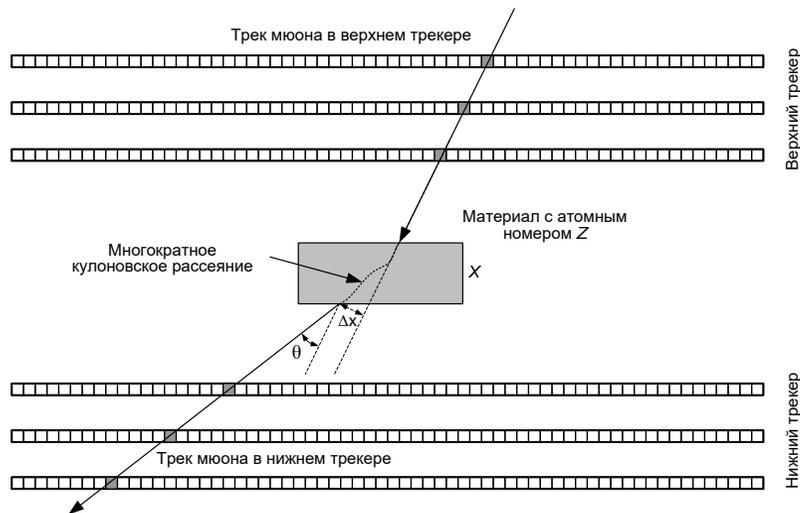
# 2. Мюнография

Метод мюонной томографии на основе потерь мюонов в веществе  
(поглощение потока мюонов)

Разрешение метода:  $\Delta X, \Delta Y = (L/l)\delta x, (L/l)\delta y$



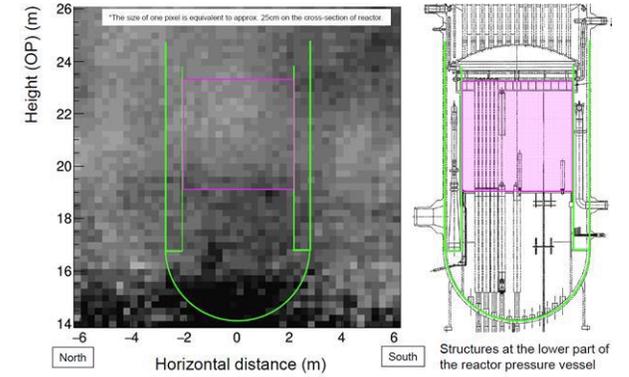
Метод мюонной томографии на основе анализа многократного кулоновского рассеяние мюонов



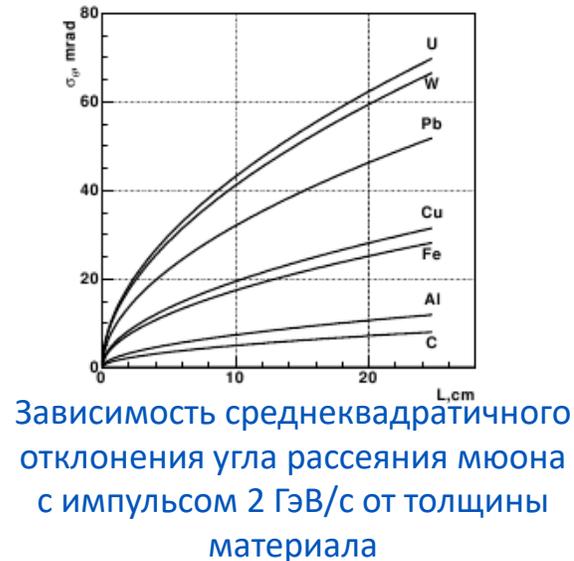
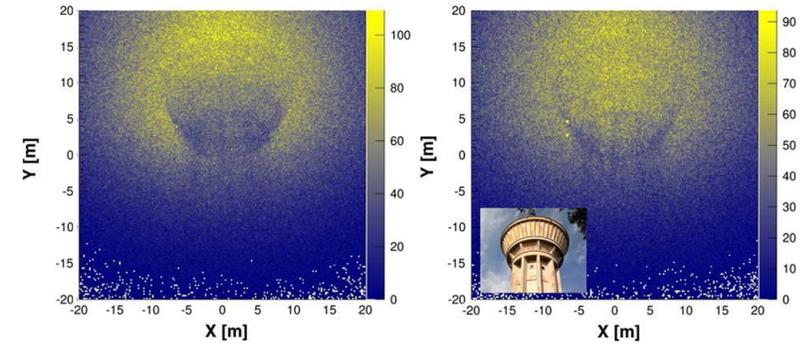
$$\sigma_\theta = \frac{14.1 \text{ МэВ}}{p} \sqrt{\frac{l}{X_0}}$$

$$\theta_0 = \frac{14.1 \text{ МэВ}}{p\beta} \sqrt{\frac{l}{X_0}}$$

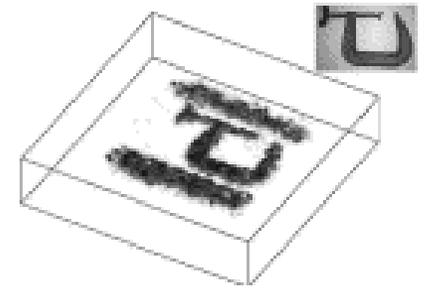
Мюнограмма разрушенного реактора (слева) и схема реактора (справа)



Водонапорная башня с водой (слева) и пустая (справа)

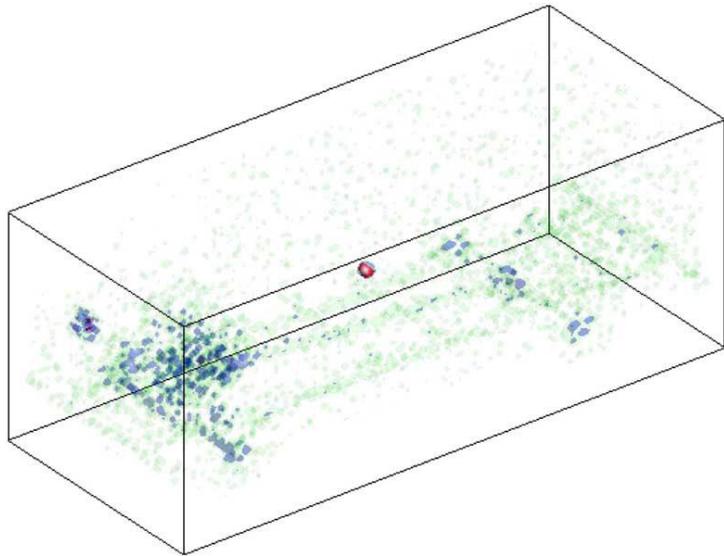
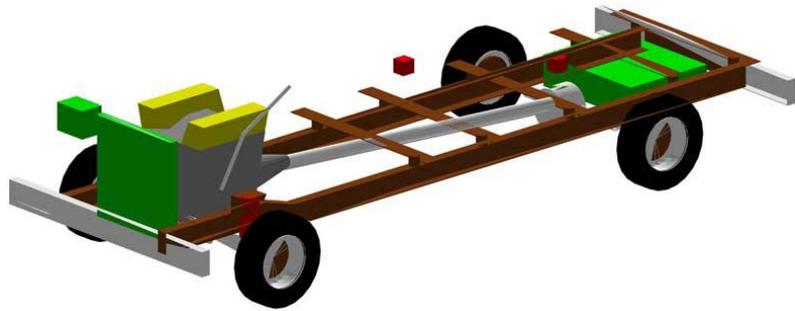


Зависимость среднеквадратичного отклонения угла рассеяния мюона с импульсом 2 ГэВ/с от толщины материала



Снимок компактного тяжелого предмета в потоке мюонов космических лучей

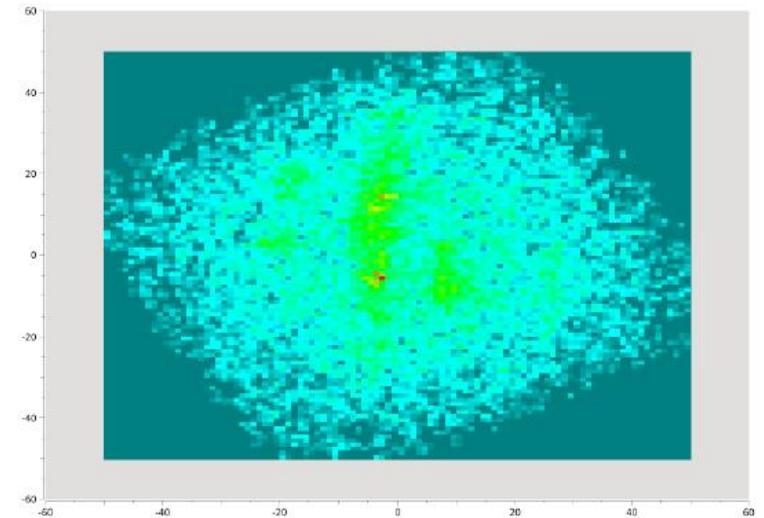
## 2. Мюнография



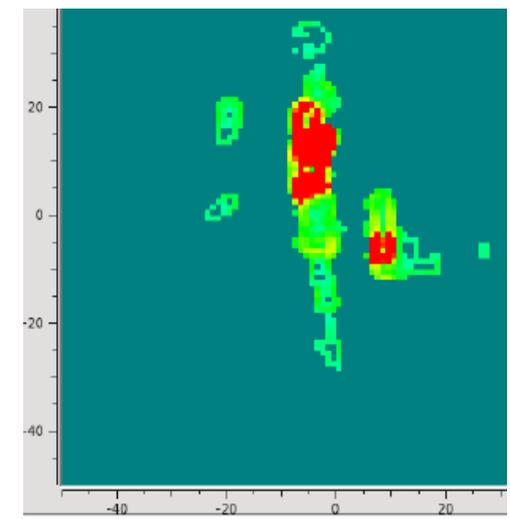
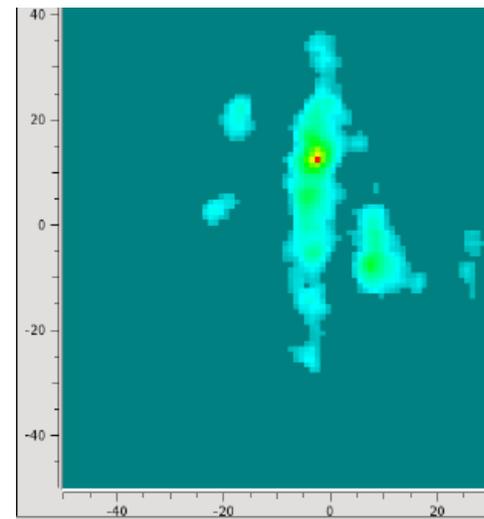
Модельная реконструкция компактного объекта медианным методом, размещенного в фургоне условного грузового автомобиля



Объекты наблюдения



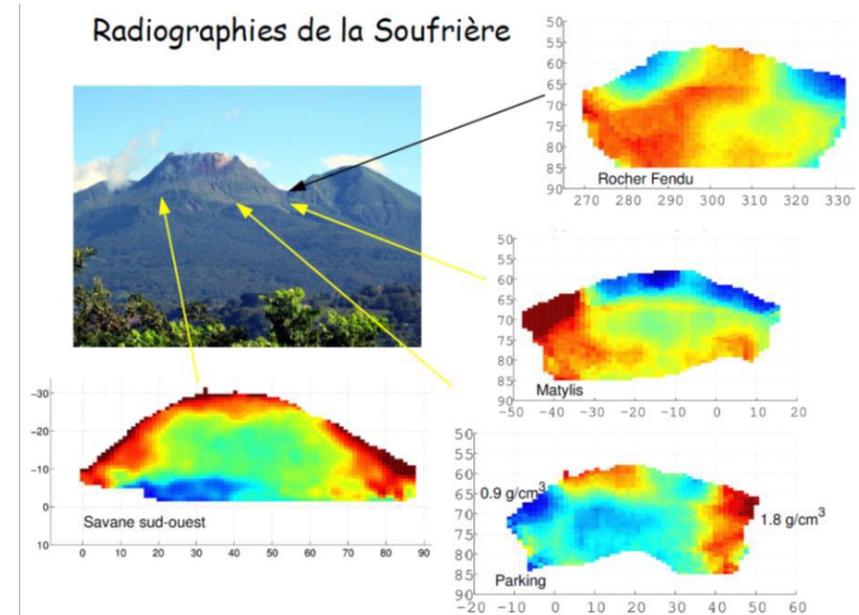
Изображение объектов наблюдения



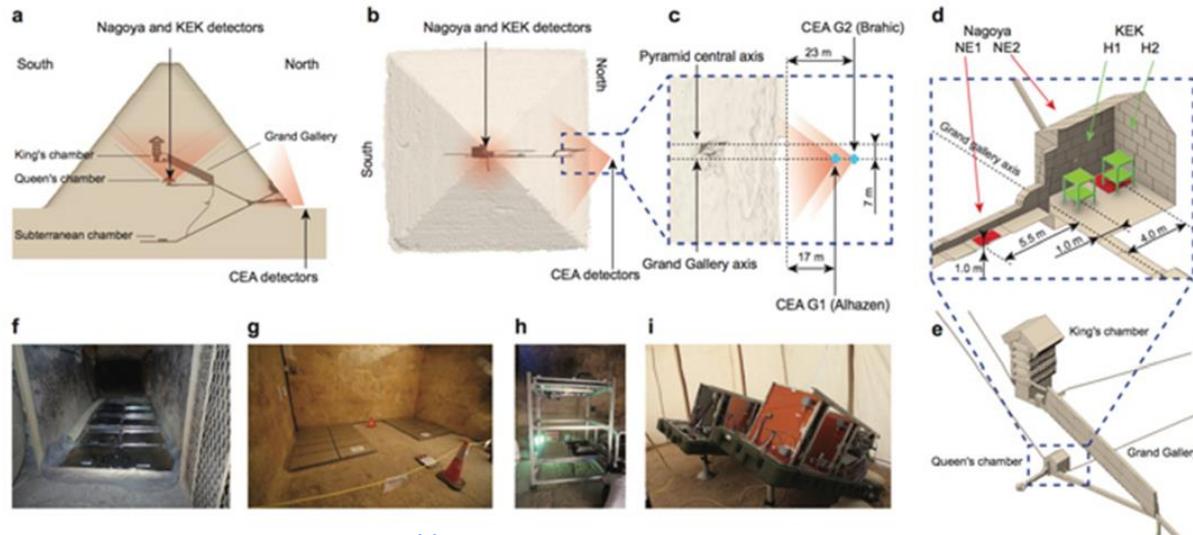
Изображение после фильтрации

## 2. Мюнография

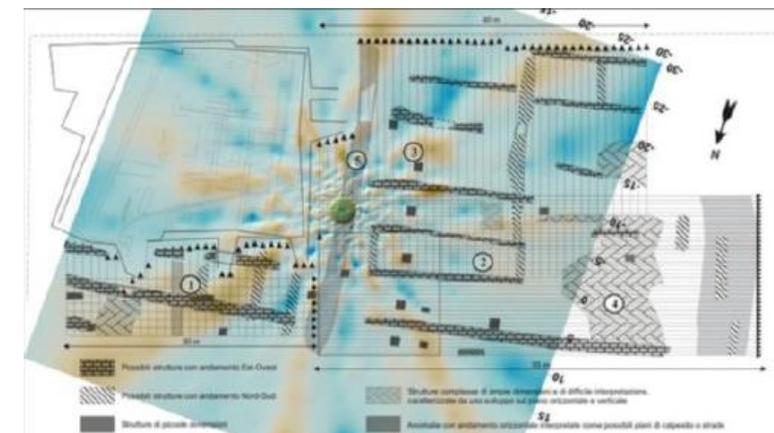
- Изучение структуры египетских (Хеопса, Хефрена и др.) и мексиканских (Теотиуакан) пирамид.
- Картирование внутренней структуры вулканов (Везувий, Стромболи, Этна и Пюи де Доме, Сатсума-Иводжима) для оценки уровня магмы.
- Мониторинг подземных вод, особенно в районах, подверженных оползням и сильным осадкам.
- Предотвращение несанкционированного перемещения тяжелых делящихся веществ.
- Мюнография расположения ядерного топлива в аварийных реакторах АЭС Фукусима-1.
- Мюнография промышленных объектов (домны и др.)



Исследование горных массивов



Исследование пирамид



Исследования древнего города и порта Агилера

### 3. Цель работы

Создать и испытать мобильный мюонный годоскоп (ММГ) на основе сцинтилляционных стрипов с кремниевыми фотоумножителями для мюонографии различных объектов в режиме реального времени.

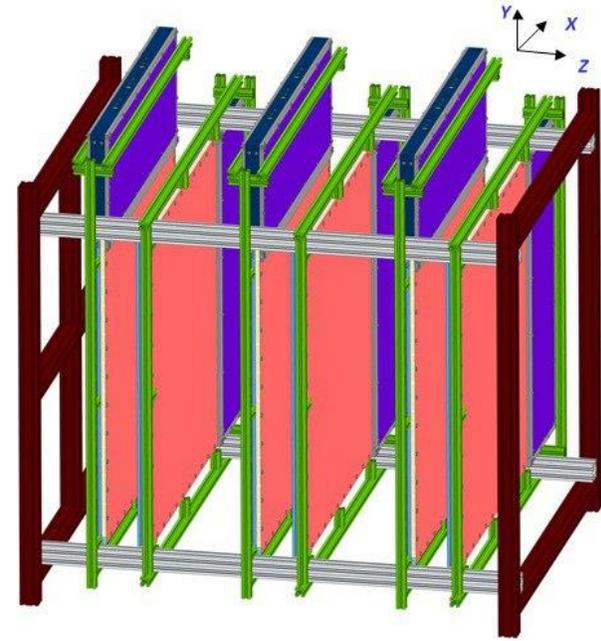
Детектирующим элементом **ММГ** являются сцинтилляционные полоски стрипов со светосбором на основе спектросмещающих оптических волокон, световые сигналы с которых регистрируются кремниевыми фотоумножителями (SiPM).

**Годоскоп** – 6 однопроекционных координатных плоскостей (3 для каждой проекции и 1152 каналов регистрации) :

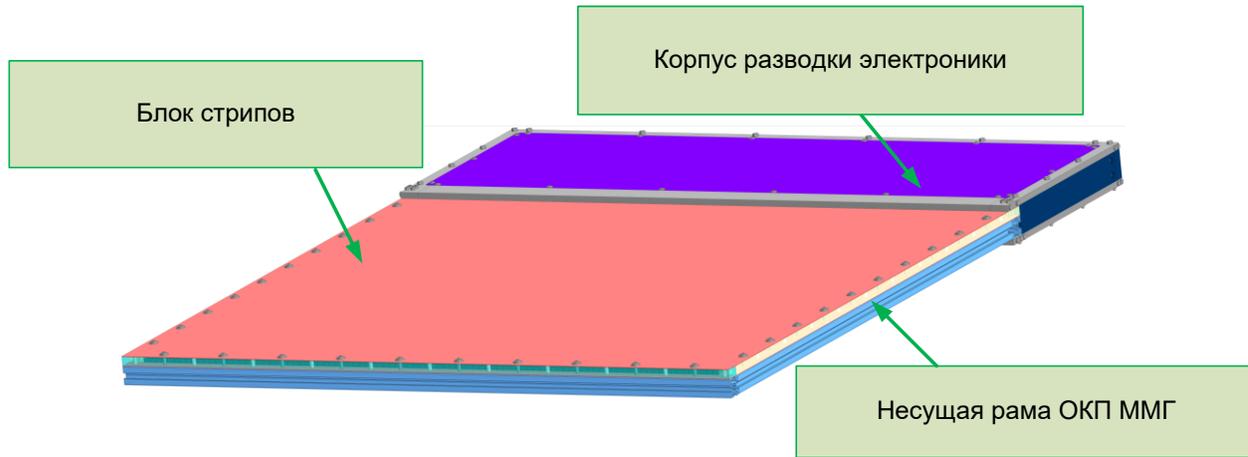
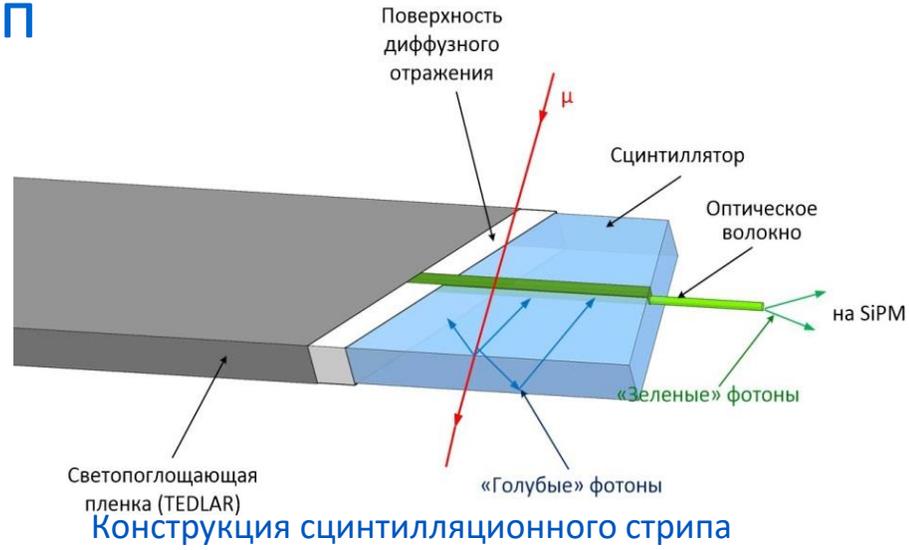
**Однопроекционная координатная плоскость** - 192 сцинтилляционных стрипа уложенных в два слоя со смещением относительно друг друга на половину ширины стрипа.

**Базовый модуль(номинальное разбиение)** – 32 стрипа и SiPM вместе с одной платой считывания.

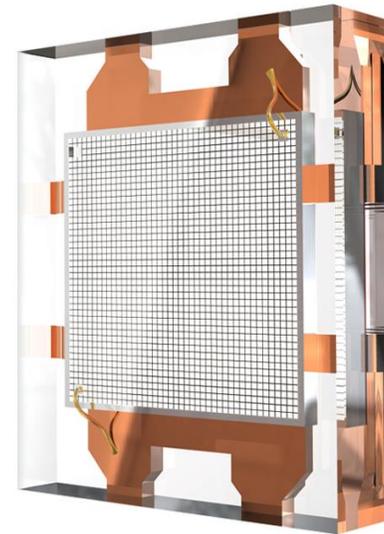
# 4. Разработанный годоскоп



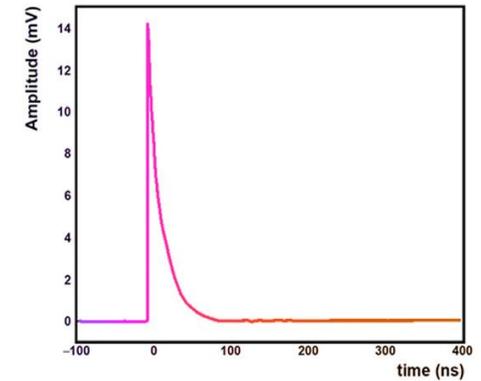
Конструкционная модель ММГ



Конструкционная модель ОКП ММГ



Вид и выходной сигнал SiPM Joinbon TN-3050



# 4. Разработанный годоскоп



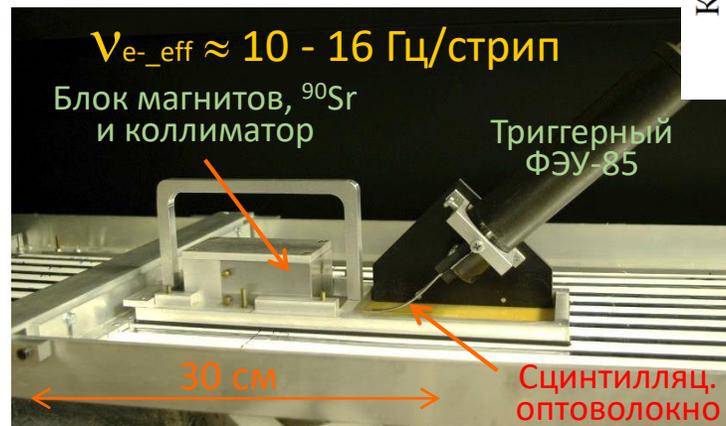
Фотография стенда для стрипов



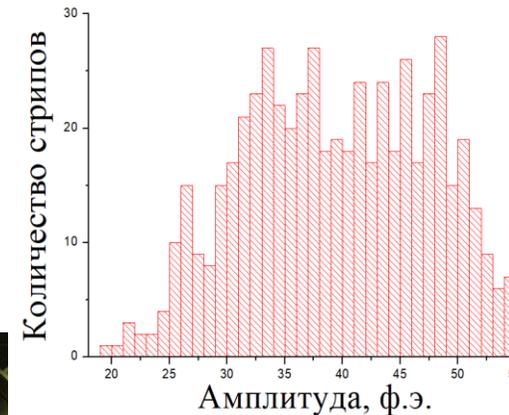
Фотография стенда для SiPM



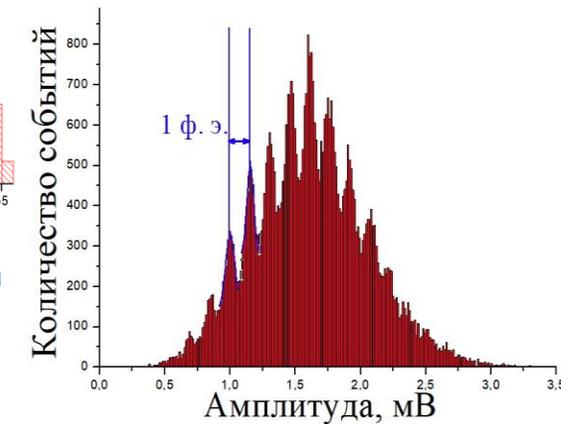
Фотография мюонного телескопа



Фотография спектрометра



Распределение количества стрипов по световыходу



Одноэлектронный спектр кремниевого фотоумножителя

# 4. Разработанный годоскоп



Фотография прототипа ММГ

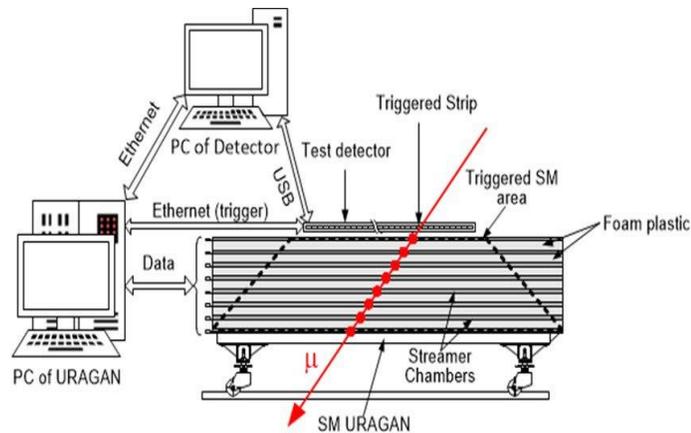
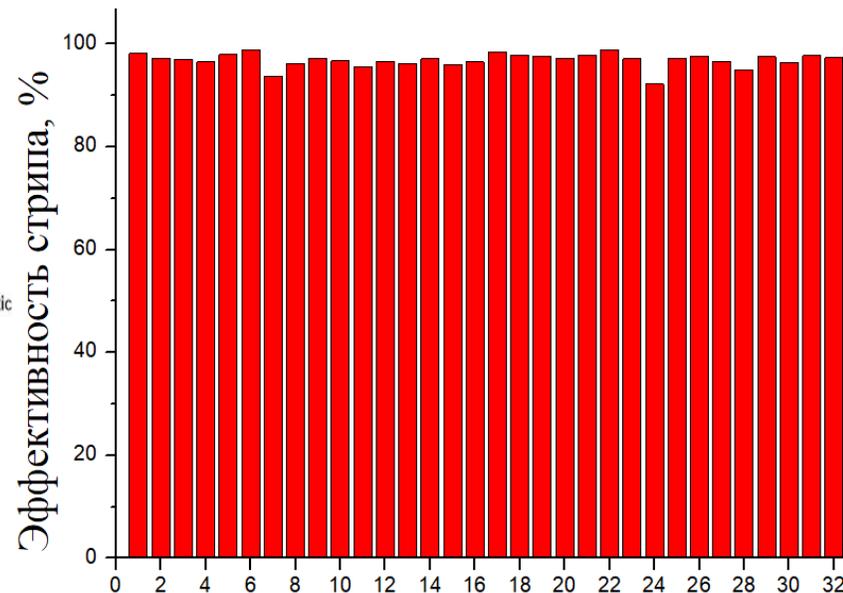
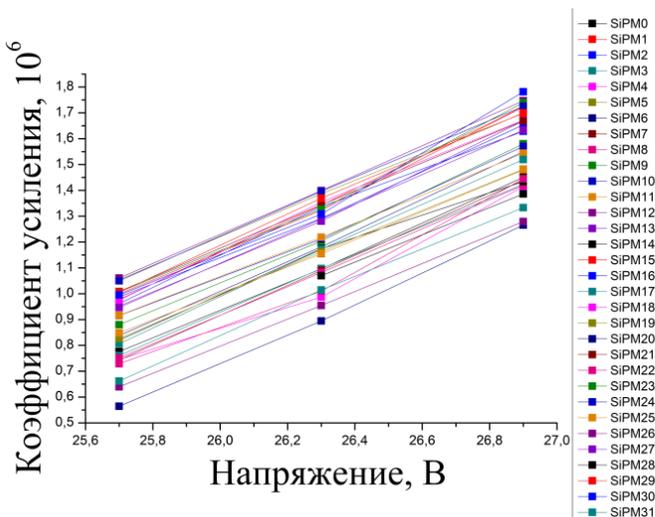


Схема эксперимента



Стрипы  
Распределение эффективности срабатывания стрипов прототипа ММГ



Зависимость коэффициента усиления от напряжения питания SiPM



Распределение амплитуд сигналов-откликов в зависимости от координаты попадания мюона в стрип

Спасибо за внимание!

## ИСТОЧНИКИ

- Luis W. Alvarez *et al.*, Search for Hidden Chambers in the Pyramids. *Science* **167**, 832-839 (1970). DOI: [10.1126/science.167.3919.832](https://doi.org/10.1126/science.167.3919.832)
- K. Gnanvo *et al.*, "Detection and imaging of high-Z materials with a muon tomography station using GEM detectors," *IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference*, Knoxville, TN, USA, 2010, pp. 552-559, doi: 10.1109/NSSMIC.2010.5873822.
- M. D'Errico *et al* 2020 *JINST* **15** C03014 DOI 10.1088/1748-0221/15/03/C03014
- J. Marteau *et al* 2017 *JINST* **12** C02008 DOI 10.1088/1748-0221/12/02/C02008
- [Tanaka Hiroyuki K. M.](#) and [Oláh László](#) 2019 Overview of muographers *Phil. Trans. R. Soc. A*. **377** 20180143 <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0143>
- Hirofumi Fujii, Kazuhiko Hara, Kohei Hayashi, Hidekazu Kakuno, Hideyo Kodama, Kanetada Nagamine, Kotaro Sato, Shin-Hong Kim, Atsuto Suzuki, Takayuki Sumiyoshi, Kazuki Takahashi, Fumihiko Takasaki, Shuji Tanaka, Satoru Yamashita, Investigation of the Unit-1 nuclear reactor of Fukushima Daiichi by cosmic muon radiography, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Volume 2020, Issue 4, April 2020, 043C02, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa027>