ТРИНИТИ
РОСАТОМ

Мюонная томография для поиска полезных ископаемых

А.А. Голубев

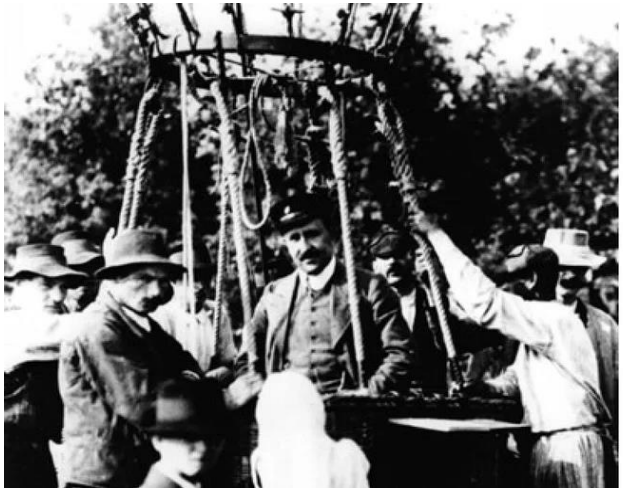
Государственный научный центр Российской Федерации
“Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”,
Москва, Россия

39 -я Всероссийская конференция по космическим лучам
(ВККЛ)

29 июня — 3 июля, Дубна

Открытие космических лучей

Австрийский физик Виктор Гесс получил Нобелевскую премию в 1936 г. за открытие космических лучей.



Theodor Wulf

Немецкий иезуитский священник и физик Теодор Вульф опубликовал 15 сентября 1910 г. первые доказательства существования космического излучения.

Открытие мюона

- Карлом Андерсоном и Сетом Неддермейером в эксперименте с камерой Вильсона в 1936 году. *https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.50.2635École Européenne Bruxelles III, Introduction to muography,* зарегистрировали частицы, которые отклоняются в магнитном поле иначе, чем другие известные космические частицы.
- Тогда было высказано предположение, что их масса больше, чем у электрона, но меньше, чем у протона.
- Позже частицу назвали «мю-мезоном», но из-за отсутствия кваркового состава (он не совсем подходит под определение мезона, но ведет себя скорее как более тяжелая версия электрона), название было изменено, и он стал тем, что мы знаем как мюон.

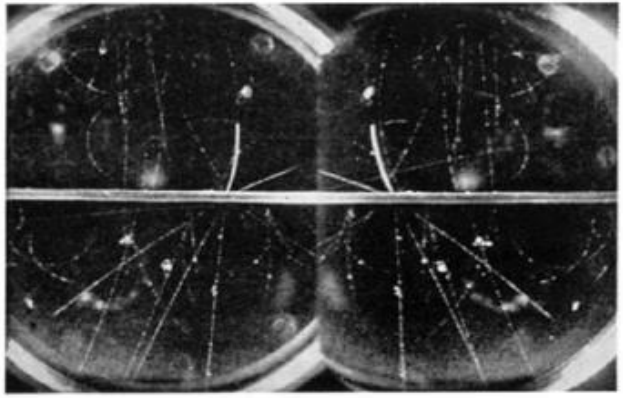
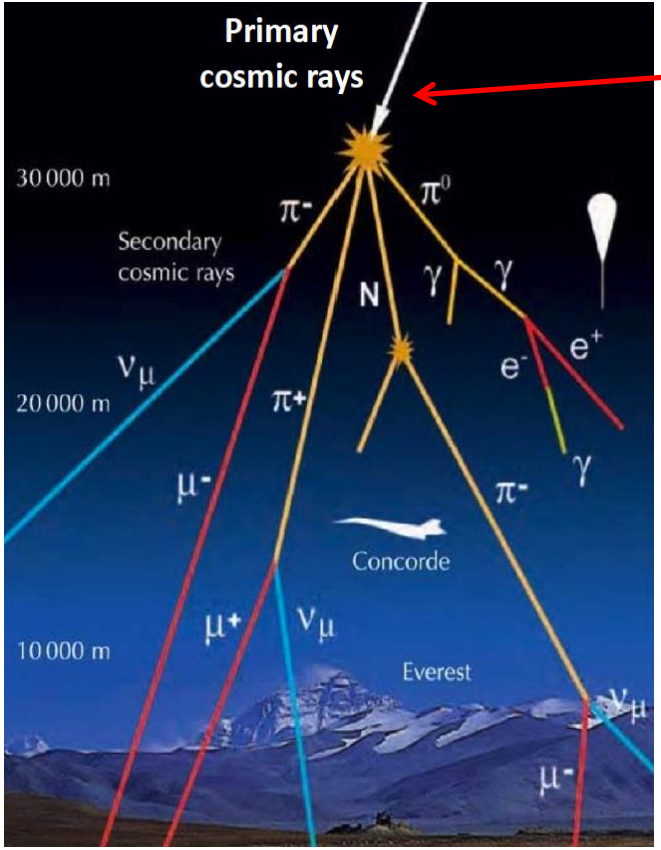
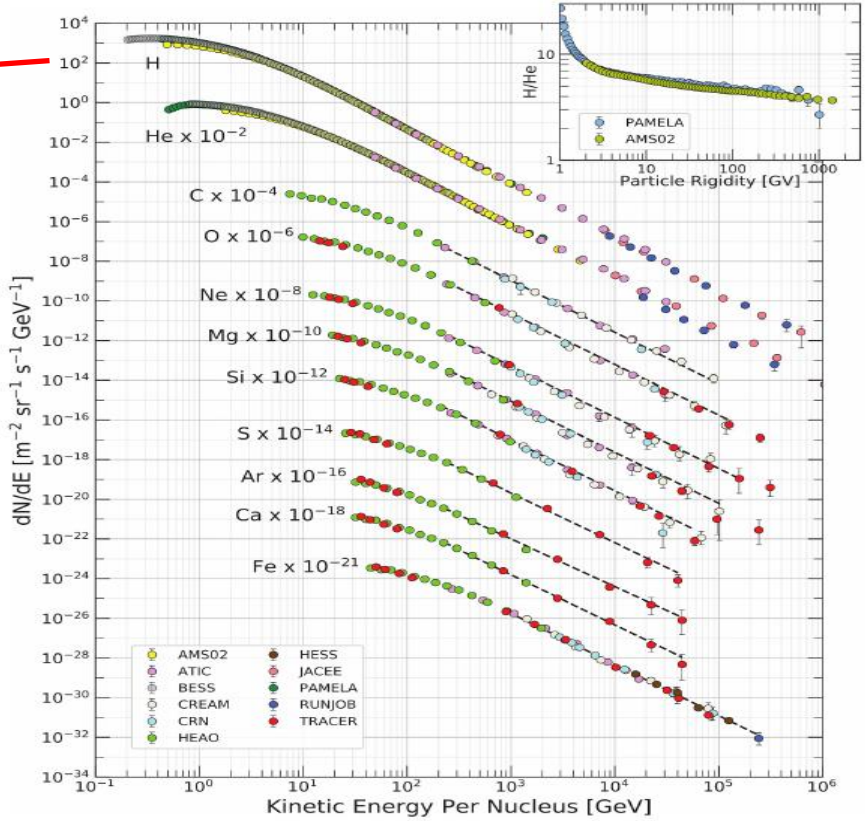


FIG. 12. Pike's Peak, 7900 gauss. A disintegration produced by a nonionizing ray occurs at a point in the 0.35 cm lead plate, from which six particles are ejected. One of the particles (strongly ionizing) ejected nearly vertically upward has the range of a 1.5 MEV proton. Its energy (given by its range) corresponds to an $H\rho = 1.7 \times 10^5$, or a radius of 20 cm, which is three times the observed value. If the observed curvature were produced entirely by magnetic deflection it would be necessary to conclude that this track represents a massive particle with an e/m much greater than that of a proton or any other known nucleus.

Maxime Lagrange. Introduction to muography, Ecole Europeenne Bruxelles III

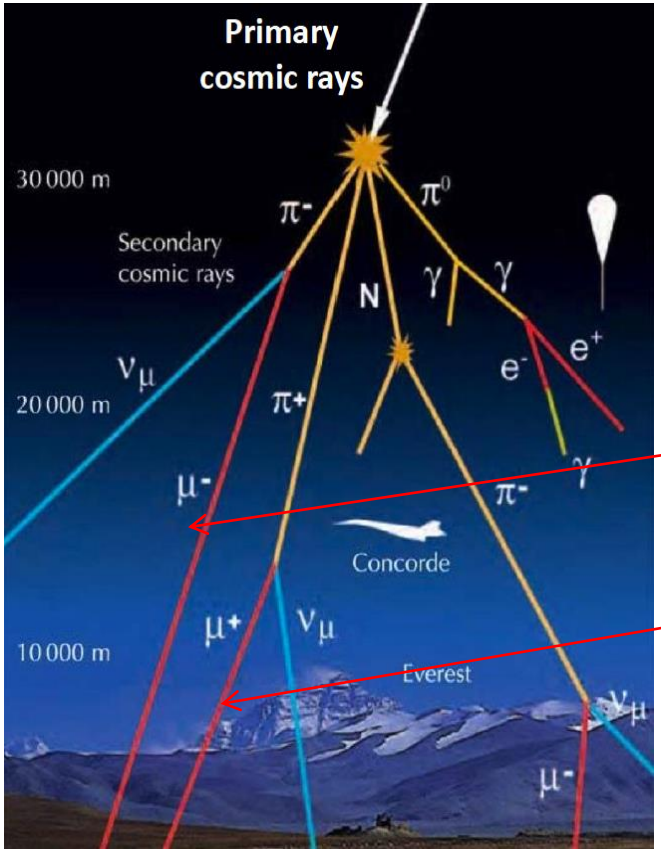
Происхождение космических мюонов

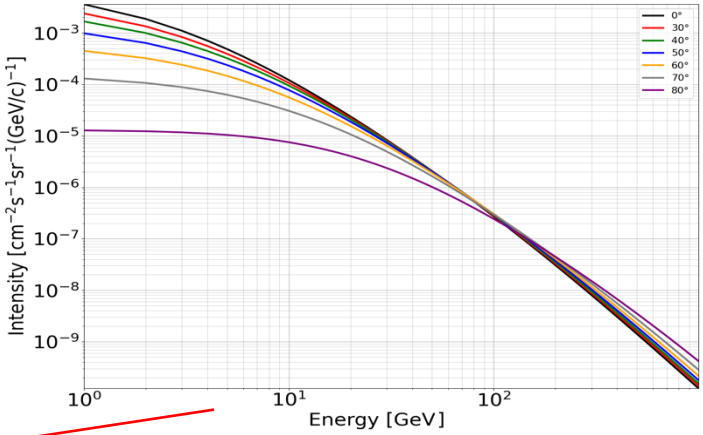




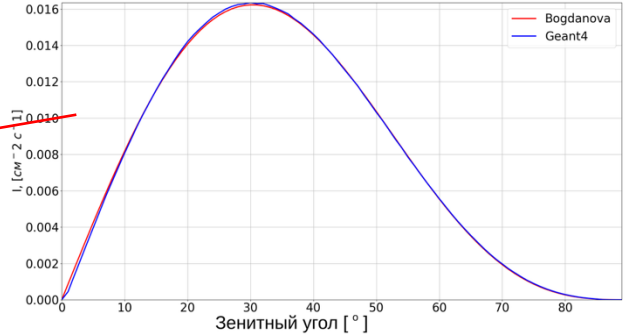
Дифференциальный энергетический спектр первичных частиц космических лучей, из работы Tanabashi et al. (2018, p. 424).

Происхождение космических мюонов

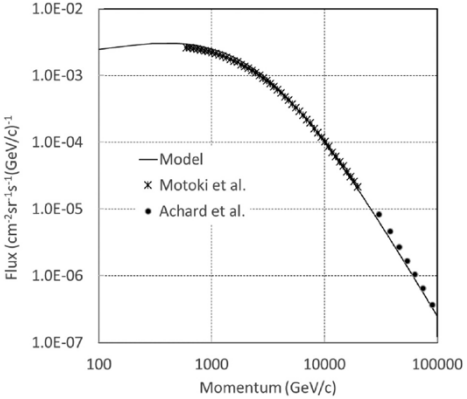




Спектр мюонов на уровне моря в зависимости от зенитного угла



**Угловое распределения потока мюонов



Спектр вертикального потока космических лучей на уровне моря.

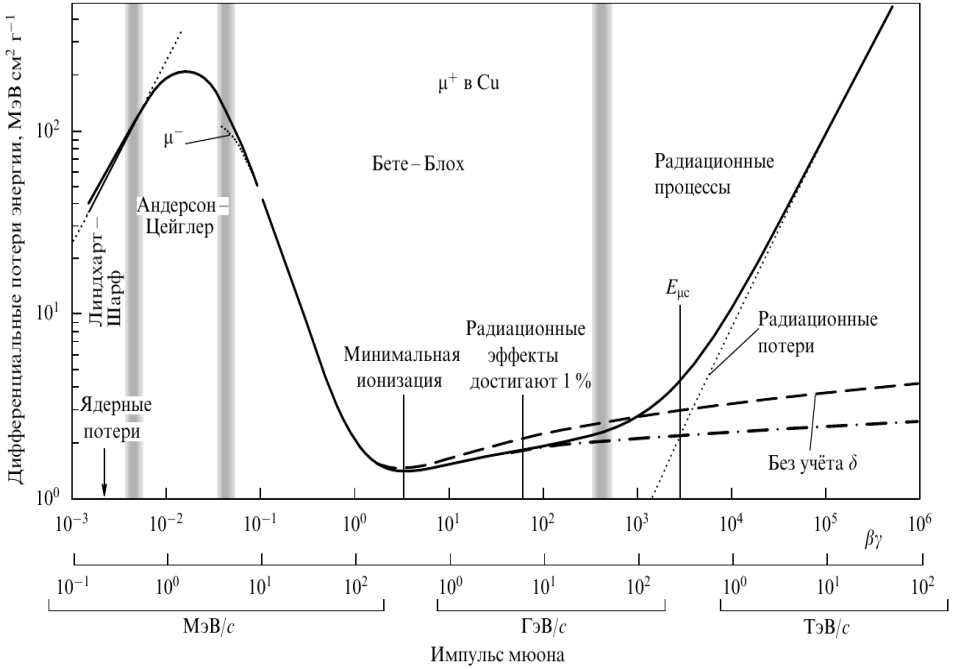
*P. Papini, C. Grimani,and S.A. Stephens, Nuovo Cim C 19 , 367 (1996)
**L. N. Bogdanova et al., Cosmic muon flux at shallow depths underground, 2006, Physics of Atomic Nuclei 69(8)

Преимущество мюонов космического происхождения

ТРИНИТИ
РОСАТОМ

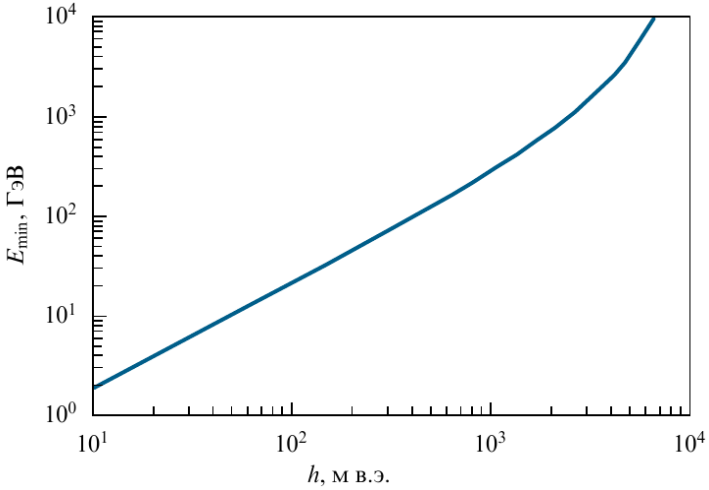
- Естественный источник излучения;
- Постоянный поток, безопасны для использования;
- Хорошо известны угловые и энергетические распределения;
- Длительное (2.2 мкс) время жизни, по сравнению с другими частицами
- Тяжелая, заряженная частица, обладающая широким энергетическим спектром;
- Многие мюоны, обладают высокой энергией и, следовательно, очень мало подвержены эффектам рассеяния;
- Зависимость ослабления потока мюонов от плотности;

Энергетические потери мюонов при взаимодействии с веществом



Потери энергии мюонов в медном поглотителе, включающие в себя электронные и радиационные потери. Groom D.E., Mokhov N.V., Sriganov S.I. At. Data Nucl. Data Tabl, 78 183 (2001)

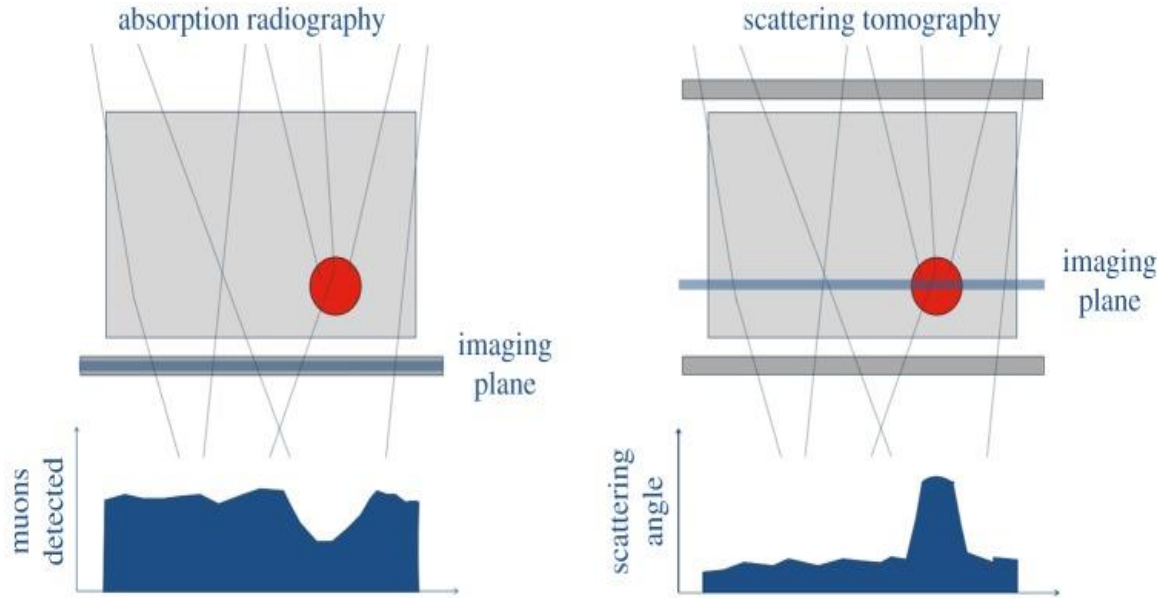
Отсутствие сильных взаимодействий, большая масса покоя и скорость, близкая к скорости света - обуславливают высокую проникающую способность мюонов.



Минимальные значение энергии мюонов на поверхности земли, необходимые для достижения глубины h в грунте.
Cecchini S., Spurio M., Geosci. Instrum. Vethod. Data Syst. 1, 185, (2012)

Мюография основана на двух физических эффектах:

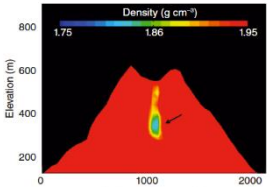
- Ослабление потока мюонов по мере его прохождения вглубь вещества в результате потерь энергии
- Многократного кулоновского рассеяния



Philos Trans A Math Phys Eng Sci. 2018 Dec 10;377(2137):20180049. doi: 10.1098/rsta.2018.0049
Muography: overview and future directions Ralf Kaiser

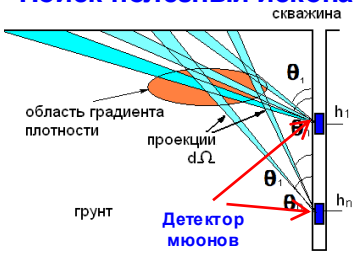
Примеры применения мюографии

Геофизические исследования (вулканы)

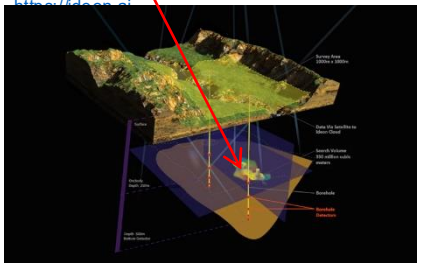


*Laszlo Olah, Hiroyuki K.M. Tananka et al., Book Series:Geophysical Monograph Series, 2022

Поиск полезный ископаемых (уран, тяжелые металлы и др.)

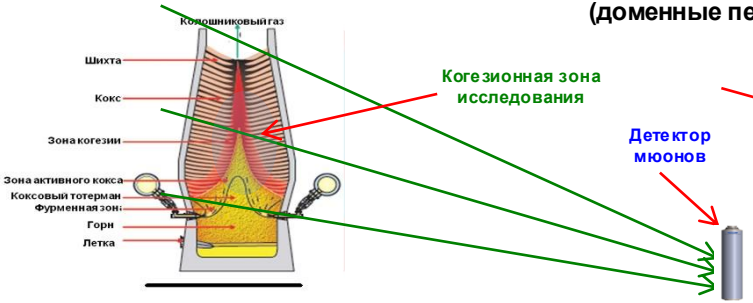


Измеренная трехмерная карта залежей полезных ископаемых (урановые руды)

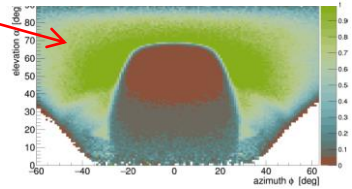


Исследование крупномасштабных промышленных объектов (доменные печи, здания и др.)

Мюоны космического происхождения



Пример модельной радиографической картины

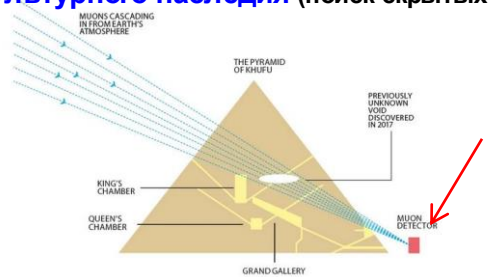


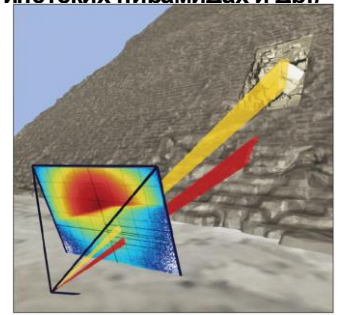
Возможно измерение расширения «когезионной зоны» доменной печи, где сырье начинает плавиться (зона с более низкой плотностью)

* Коллаборация BLEMAB (Италия)

*C. Frosin et al. Exploring the potential of muon radiography for blast furnace assessments: advancements in non-invasive imaging and structural analysis, 2024, JINST, 19 C02041

Исследование объектов культурного наследия (поиск скрытых полостей в Египетских пирамидах и др.)





*Alvarez LW, Anderson JA et al. Search for Hidden Chambers in the Pyramids. Science.1970 Feb;167(3919):832-9,
**https://www.sciencefocus.com/future-technology/how-scientists-are-using-cosmic-radiation-to-peek-inside-the-pyramids

Мюография человеческого фантома

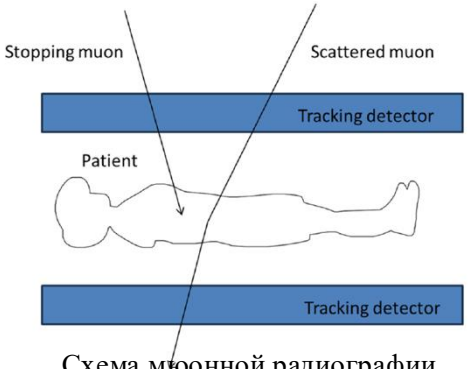
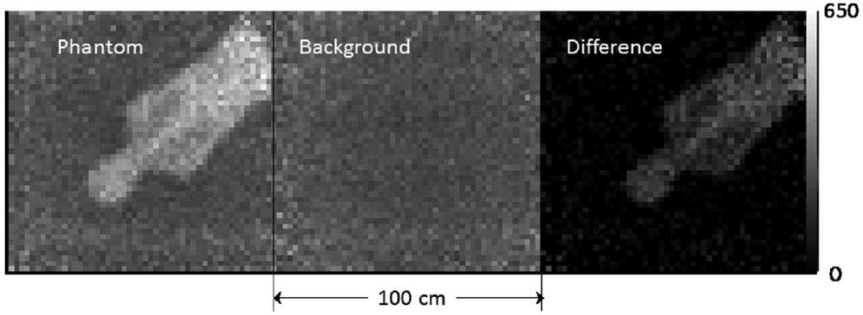


Схема мюонной радиографии.
Размещение детектора над и под объектом позволяет проводить мюографию как по рассеянию, так и по изменению интенсивности



Слева - изображение фантома в рассеянных мюонах, в центре — без фантома, справа — разница. Выдержка составляла 24 часа. Размер пикселя — 2 см.

Фото установки

Система детектирования состоит из двух параллельных детекторных "супермодулей«, включающие сотни дрейфовых трубок.
Пространственное разрешение ~0,5 мм.
Разрешение по углу - около 2 мрад.

Christopher Morris, et al. Cosmic ray radiography of a human phantom, J. Appl. Phys. 137, 124503 (2025); doi: 10.1063/5.0253548

Технология мюонной томографии

ТРИНИТИ
РОСАТОМ

Состоит из трех основных компонентов:

- Детектор:
  - сцинтилляционные;
  - ядерной эмульсии;
  - газовые детекторы;
  - черенковские детекторы.
- Система сбора данных.
- Обработка данных и построения 3D изображения.

Ядерные эмульсионные детекторы

Изображение на основе эмульсионных детекторов в ядерной фотоэмульсии формируется вследствие ионизации, заряженная частица оставляет за собой след засвеченных зерен галоидного серебра.

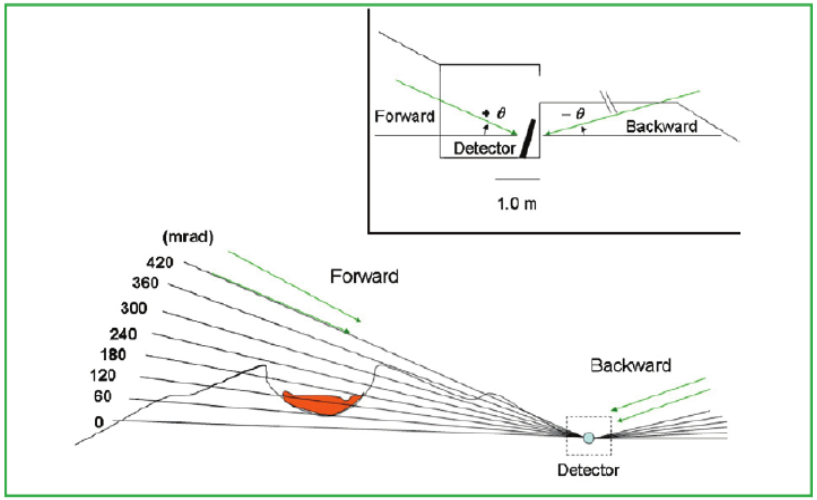
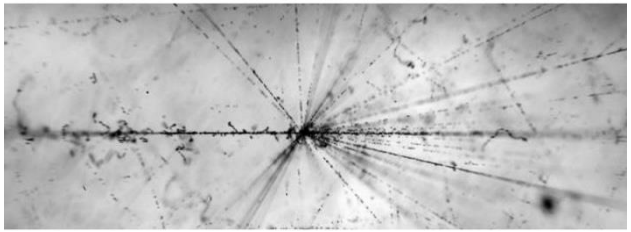
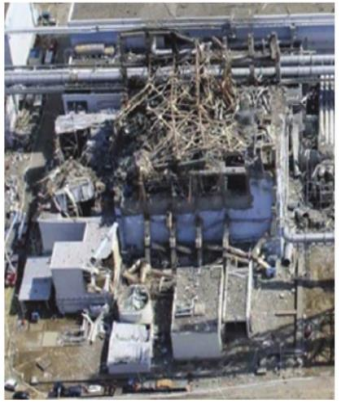
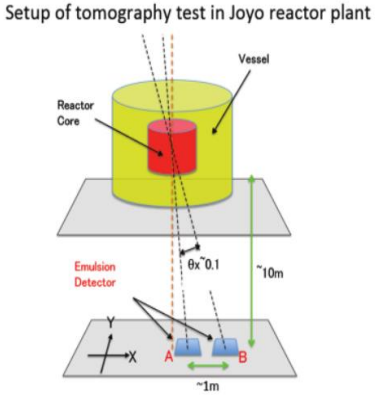


Схема установки детектора для мюографии



Треки заряженных частиц в эмульсии. Трехмерный образ события реконструирован как проекция с помощью измерительного комплекса ПАВИКОМ (ФИАН)





а) *б)*

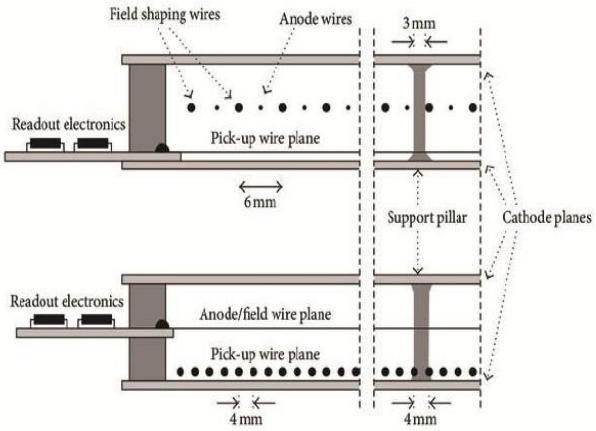
Применение метода мюографии при обследовании атомных реакторов а – разрушенный реактор атомной станции Фукусима,; б – схема установки тестовых эмульсионных камер на работающем реакторе Джойо (Япония) для контроля реактора методом мюографии

Н.С. Коновалов, Н.Г.Полухина Метод мюонной радиографии природных объектов. Инноватика и экспертиза 2015, Выпуск 2 (15)

А.Б. Александров и др. Метод мюонной радиографии для фундаментальных и прикладных исследований, УФН том. 187, № 12.

Газовые детекторы

Газовые детекторы работают на основе электронной лавины, вызванного ионизацией молекул газа мюонами. Поскольку количество ионных пар пропорционально энергии, выделяемой мюоном в газе, которая, в свою очередь, связана с энергией мюона, этот механизм позволяет газовым детекторам регистрировать мюонные события с высокой чувствительностью. Это делает их особенно полезными в сценариях, требующих точного определения положения падающих мюонов и потерь энергии.



(a)

(b)

(a) Поперечное сечение детектора, близкое к боковой стороне.
(b) Газовый детектор обладает высокоточными возможностями обнаружения мюонов.

Xingwen Zhou et al. Application and Prospects of Muography in Strategic Deposits. Minirals 2025, 15, 945

Черенковский детектор

Детекторы обеспечивают точное обратное преобразование кинематических параметров мюонов посредством измерения и анализа характеристик черенковского излучения.
Черенковские детекторы демонстрируют высокую чувствительность к релятивистским частицам и могут одновременно получать информацию о направлении движения, и энергии падающих частиц. Эта особенность позволяет им играть незаменимую роль измерение спектров мюонов космических лучей и идентификация частиц в физике высоких энергий.

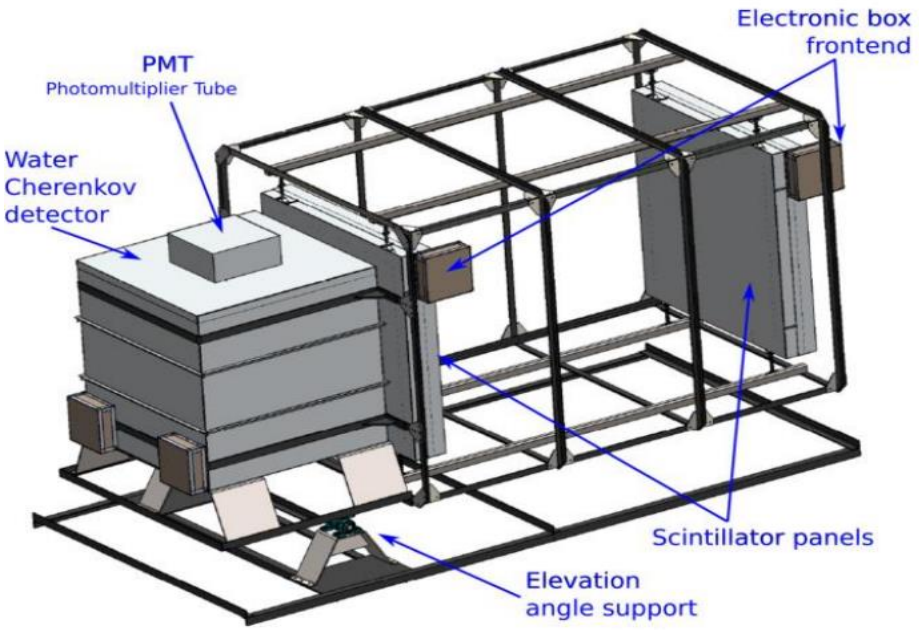
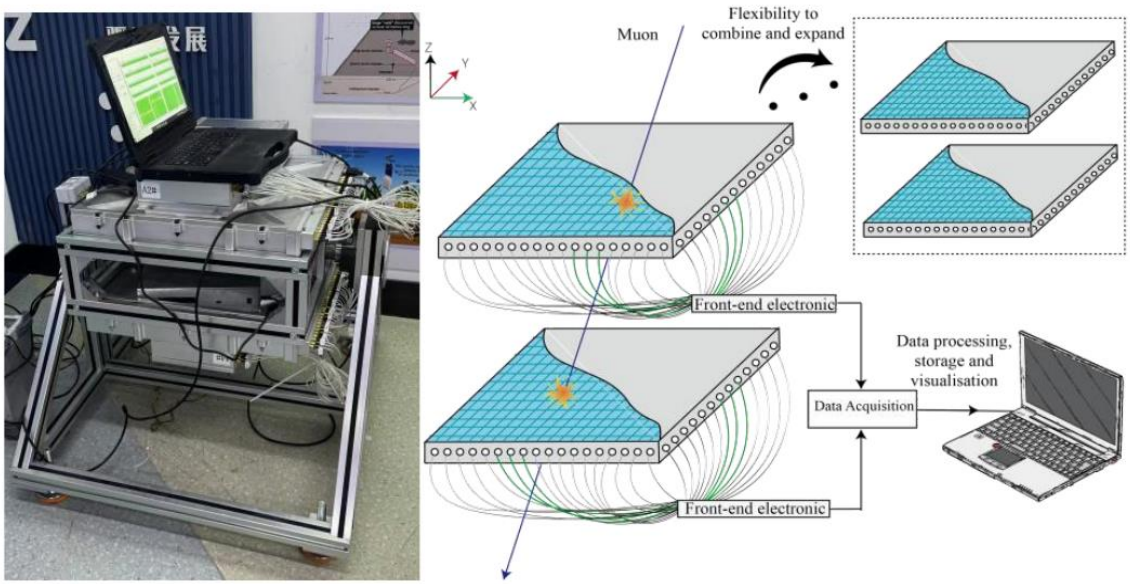


Схема гибридного телескопа, состоящего из двух панелей сцинтилляционной матрицы, предназначенных для картирования траекторий мюонов, а также водяного черенковского детектора, который подавляет основное обратное рассеяние и фоновый шум в мюографических измерениях.

Xingwen Zhou et al. Application and Prospects of Muography in Strategic Deposits. Minirals 2025, 15, 945

Сцинтилляционный детекторы

Детекторы состоят из сцинтиллятора, фэу и электронного считывающего устройства. Пример планарного позиционно-чувствительного детектора показан на рис. два слоя детектора, расположенных вертикально и горизонтально, образуют двумерную чувствительную плоскость регистрации, а несколько двумерных чувствительных плоскостей регистрации составляют трехмерный чувствительный объем.



(a) (b)

(a) Детектор мюонов на основе пластикового сцинтиллятора, разработанный Ланьчжоуским университетом. (b) Общая структура детектора мюонов на основе сцинтиллятора.

Xingwen Zhou et al. Application and Prospects of Muography in Strategic Deposits. Minirals 2025, 15, 945

История развития мюонной томографии для поиска полезных ископаемых

ТРИНИТИ
РОСАТОМ

- в 1926г. на заседании секции физ.-мат. наук Общего собрания Академии наук П.П.Лазаревым было высказано предложение о использовании космического излучения. *(А.Б. Александров и др. Метод мюонной радиографии для фундаментальных и прикладных исследований, УФН том. 187, № 12)*

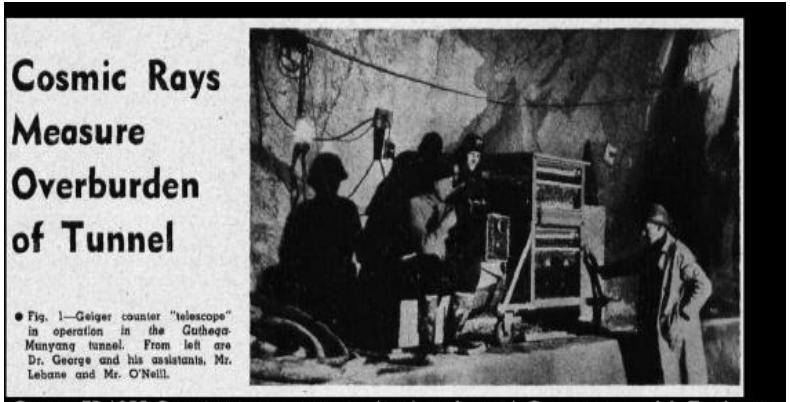
- 1955 г. 1-ая реализация в Австралии (телескоп – детектор из четырех рядов счетчиков Гейгера, между рядами проложены слои свинца толщиной 100 мм).

- В 1961 г. группой ученых из ИЗМИРАН и МГРИ создан прибор с использованием двух сцинтилляционных счетчиков площадью 20см2.

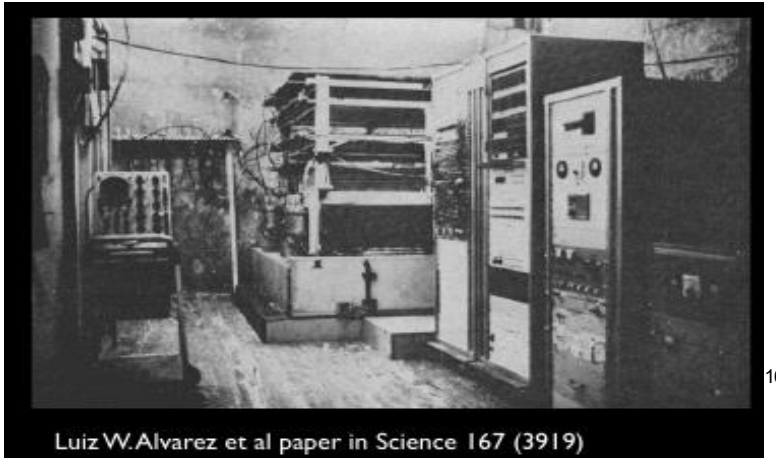
- В 1965г. в ФИАН изготовлен Измеритель интенсивности космических лучей 1 (ИИКЛ-1), состоящий из 4-ех рядов газоразрядных счетчиков площадью 1 м2.

- В 1960 – 1970 гг в работах МГРИ под руководством Бондаренко В.М. проведено исследование грунта для различных промышленных объектов, определение и оценка рудных месторождений, исследование биологической защиты.

- В 1969 году команда Луиса Альвареса проводила исследование пирамиды Хефрена в Египте с использованием искровой камеры и сцинтилляционных счетчиков.



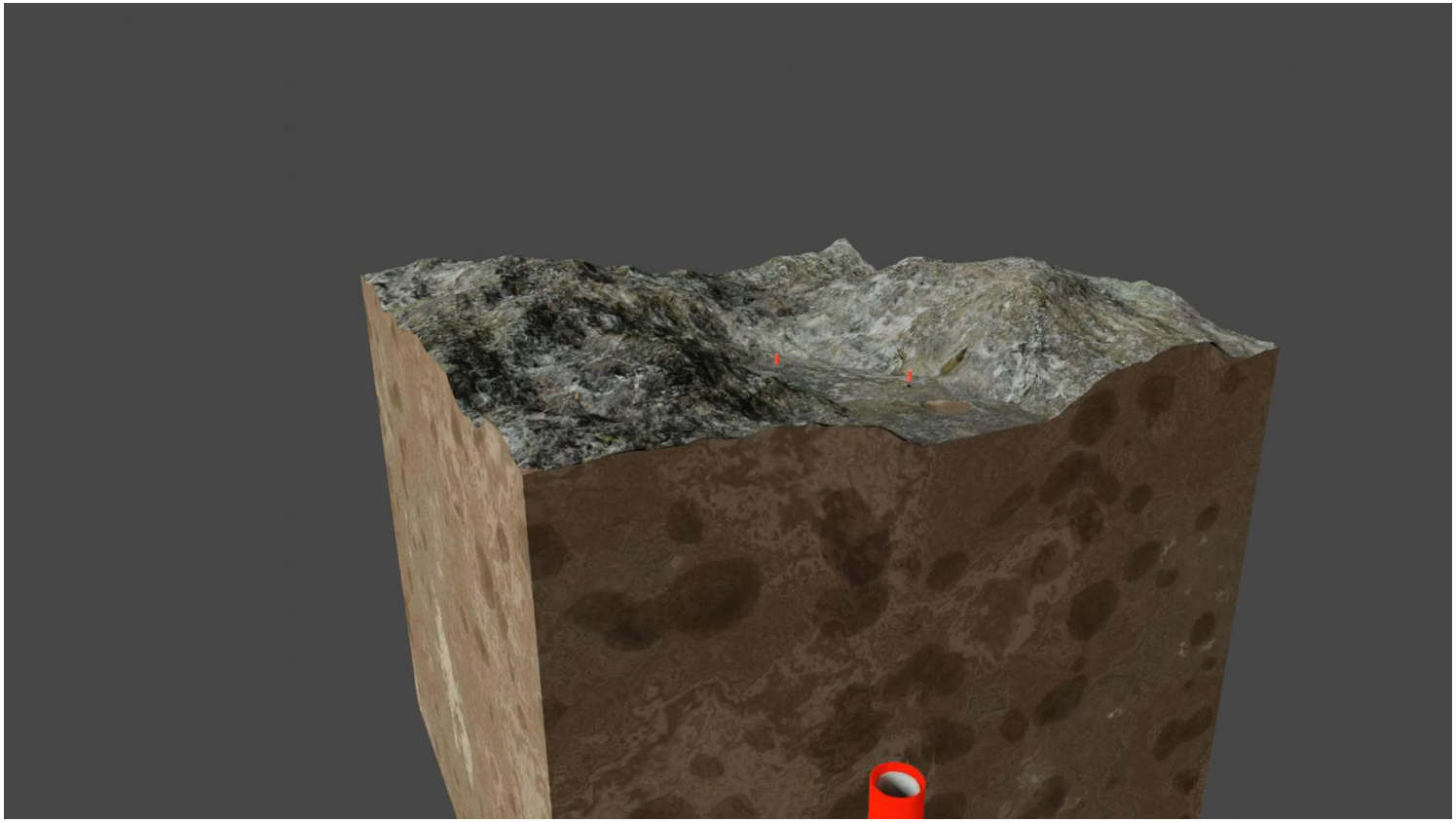
George EP. 1955 Cosmic rays measure overburden of tunnel. **Commonwealth Engineer 43**, 455–457.



Luiz W. Alvarez et al paper in Science 167 (3919)

Метод мюонной томографии для поиска полезных ископаемых

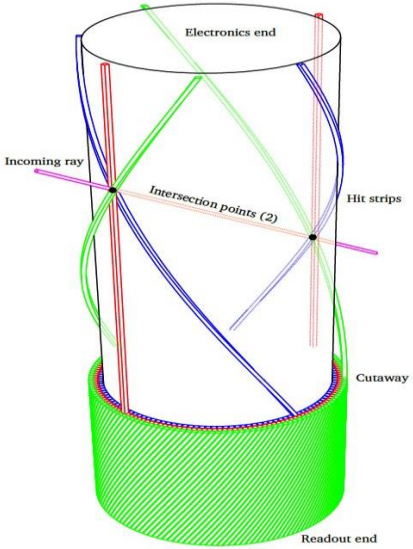
ТРИНИТИ
РОСАТОМ



Цилиндрические позиционно-чувствительные детекторы мюонов - история развития

*Maya Muon Tomography Group (2007)**

** The University of Texas at Austin, 2016,



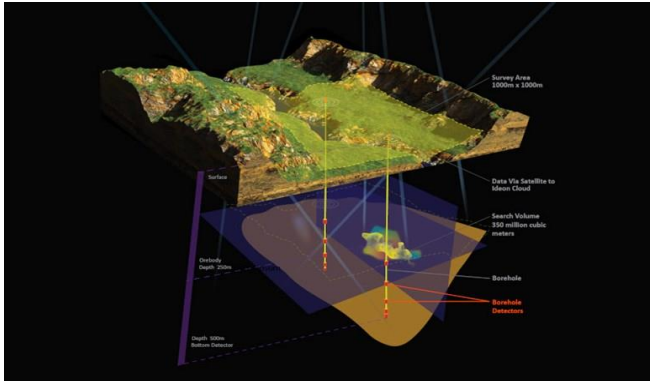
Общее количество каналов регистрации детектора 448 (ФЭУ), диаметр детектора 1.55 м, длина 4.22 м, сцинтиллятор - ленты из полистирола 31x10 мм + волокно диаметром 1.2 мм

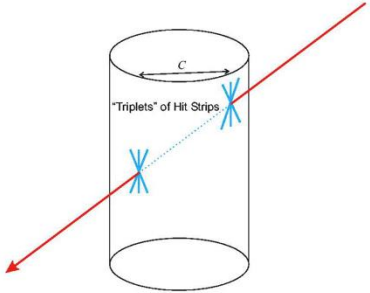
* - A Detector for Muon Tomography: Data Acquisition and Preliminary Results, Eric T. Wright, May 2007
** - H.F. Schreiner III, Methods and Simulations of Muon Tomography and Reconstruction, PhD dissertation, The University of Texas at Austin, 2016,

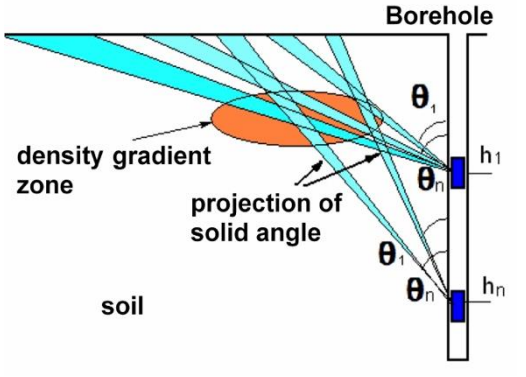
Компактные цилиндрические детекторы мюонов – мировой опыт – компания IDEON (Канада)

Детектор компании IDEON* (ранее TRIUMF, Canada's national particle accelerator laboratoryц параметры (2021):

- ✓ Позиционно-чувствительный детектор с возможностью определения треков мюонов
- ✓ Длина ~ 3.5 м
- ✓ Диаметр детектора < 100 мм
- ✓ Разрешение по плотности – 0.1-0.2 г/см^3
- ✓ Масса позволяет переносить модуль одному человеку
- ✓ Рассчитан для поиска полезных ископаемых при расположении в скважинах (используется для уточнения позиции рудных тел)
- ✓ Испытания и использование – поиск рудных месторождений







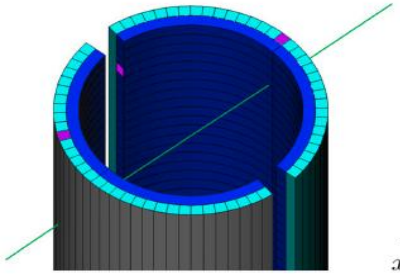
- - https://ideon.ai
- https://magazine.cim.org/en/news/2020/cosmic-rays-helping-underground-exploration-en/

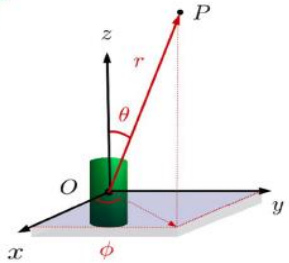
Компактные цилиндрические детекторы мюонов – мировой опыт – INFN (Италия)

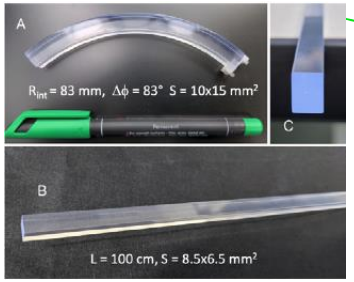
ТРИНИТИ РОСАТОМ

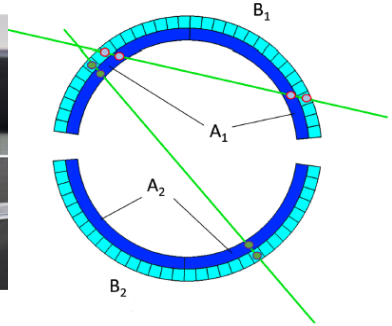
Детектор Национального института ядерной физики, INFN, параметры (2023):

- ✓ Позиционно-чувствительный детектор с возможностью определения трека мюона
- ✓ Детектор построен на основе отдельных полуколец (высота 10 мм) из орг сцинтил
- ✓ Длина ~ 1.3 м
- ✓ Диаметр детектора ~ 24 см
- ✓ Угловое разрешение ~ 12 мрад по азимуту, 52 мрад по зениту (15-90°)
- ✓ Число каналов фоторегистрации SiPM – 384 шт.
- ✓ Испытания и использование – поиск рудных месторождений при расположении в г
- ✓ Электроника основана на специализированном чипе EASIROC ASIC (FPGA based) (Потребление < 30Вт)
- ✓ Большой диаметр детектора не позволяет использовать его в большинстве типов скважин









SiPM Hamamatsu S13360-3050PE 3x3 мм

* - G. Saracino, et al., A new cylindrical detector for borehole muon radiography, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A. 1048, 167995 (2023)

Компактные цилиндрические детекторы мюонов – мировой опыт – Lanzhou Unv. (Китай)

Детектор Lanzhou University, Lanzhou, Gansu, параметры (2024)*:

Позиционно-чувствительный детектор с возможностью определения треков мюонов

Детектор построен на основе кольцевых (90 шт. высота 10 мм) и призматических (58 шт. + спектросмещающее волокно Kuraray Y11) пластиковых сцинтилляторах SP-101

Длина ~ 1.5 м

Диаметр детектора ~ 250 мм

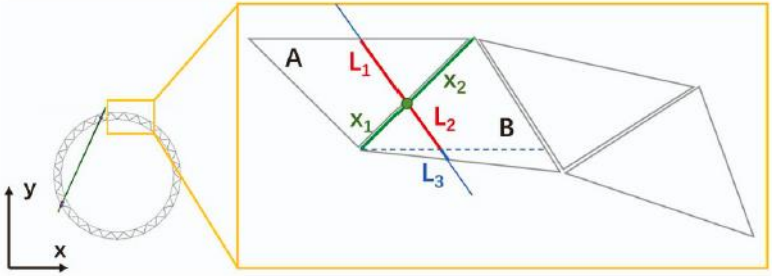
Угловое разрешение ~ 27.4 мрад по азимуту, 20.6 мрад по зениту

Эффективность регистрации ~90%

Испытания и использование – поиск рудных месторождений при расположении в шахтах

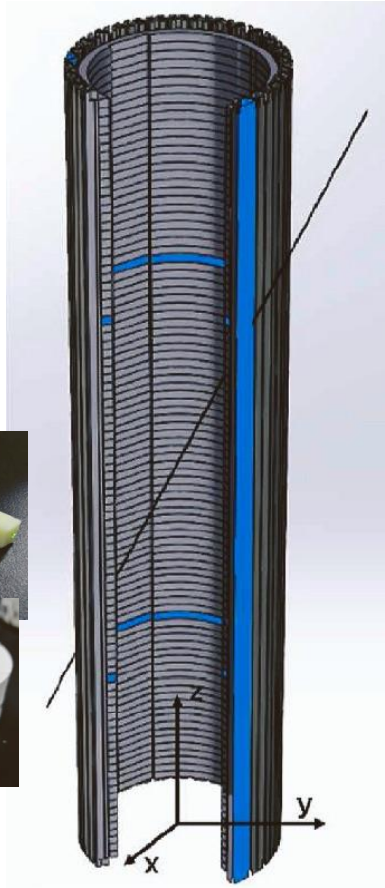
Электроника основана на специализированном чипе (ASIC), SPIROC

Большой диаметр детектора не позволяет использовать его в большинстве типов скважин



SiPM SensI C60035 6x6 мм – кольцевые сцинтиллятора

SiPM SensI C30035 3x3 мм – призматические сцинтиллятора



* Zhuodai Li, et al., Omnidirectional borehole detector for muography: Design and performance evaluation Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A. 1065 (2024) 169568

Компактные цилиндрические детекторы мюонов – мировой опыт – Lanzhou Unv. (Китай)

Детектор калориметрического типа, проект.

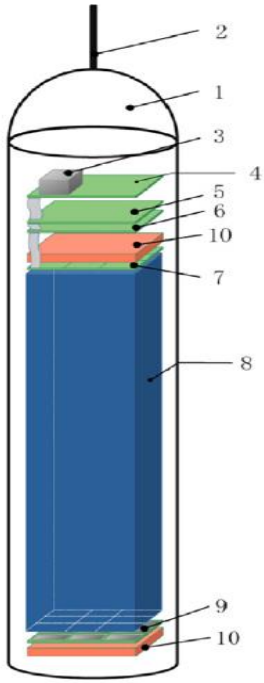


Схема детектора.
1. Металлический корпус;
2. Кабель связи и питания;
3. Модуль преобразования тока;
4. Модуль питания;
5. Модуль сбора и хранения данных;
6. Плата обработки сигналов;
7. Верхняя плата считывания;
8. Массив сцинтилляционных элементов;
9. Нижняя плата считывания;
10. Антиконформный слой и электронная обработка

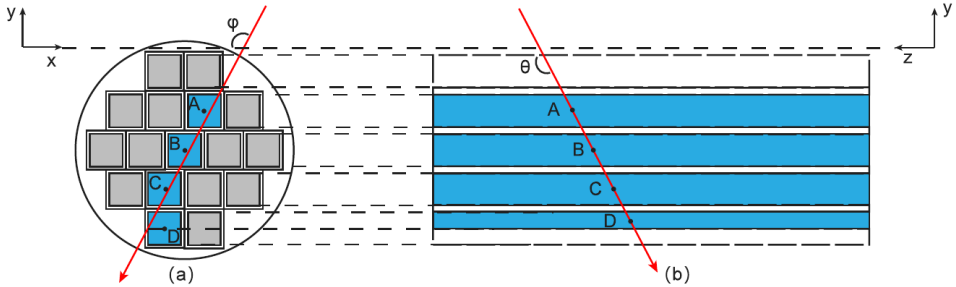


Схема расположения сцинтилляционных элементов:
a) радиальное поперечное сечение; b) осевое сечение
Красная линия- трек мюона

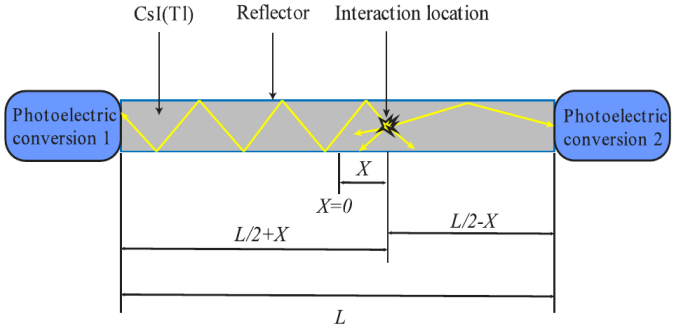


Схема позиционно-чувствительного детектора

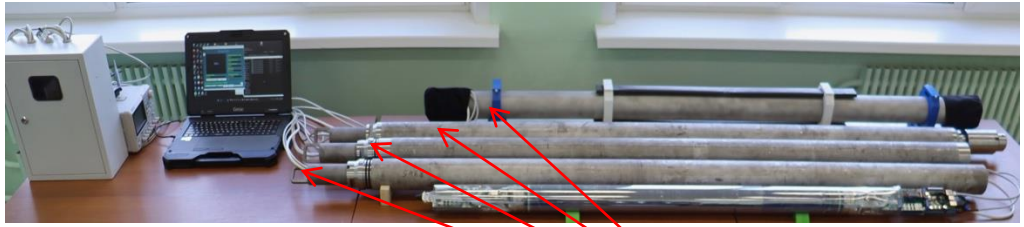
K.Yao et al/ Nuclear Inst/ and Method in Physics Research, A 1049 (2023) 168074

Мюонный томограф - ТРИНИТИ

ТРИНИТИ
РОСАТОМ

Параметры:

- ✓ Позиционно-чувствительный детектор
- ✓ Измерение плотности грунта с точностью – лучше 5%
- ✓ Модульная конструкция мюонного томографа:
  - диаметр модуля – 89 мм
  - длина модуля ~ 2,5 м
  - длина мюонного томографа ~ 9 м
  - модулей – 4 шт. (унифицированных)
  - площадь регистрации мюонов ~ 0,6 м^2
- ✓ Потребление одного модуля ~ 15 Вт
- ✓ Возможно использовать в большинстве типов скважин (в т.ч. водозаполненных 1500 м.в.э.)
- ✓ 3D томографическая реконструкция плотности грунта



Модуль сцинтилляционного детектора (МСД)

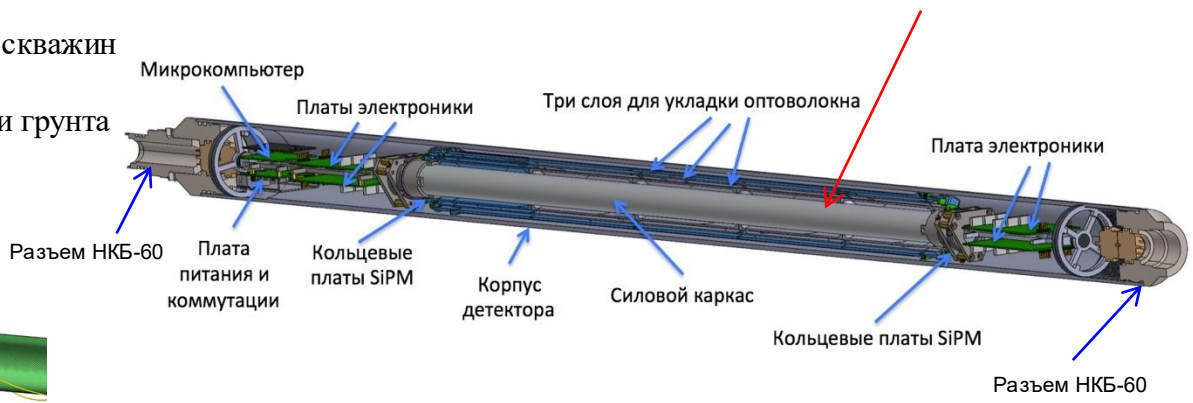
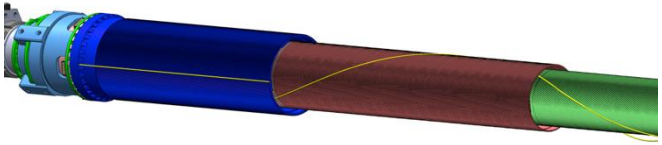


Схема укладки сцинтиллирующего оптоволокна

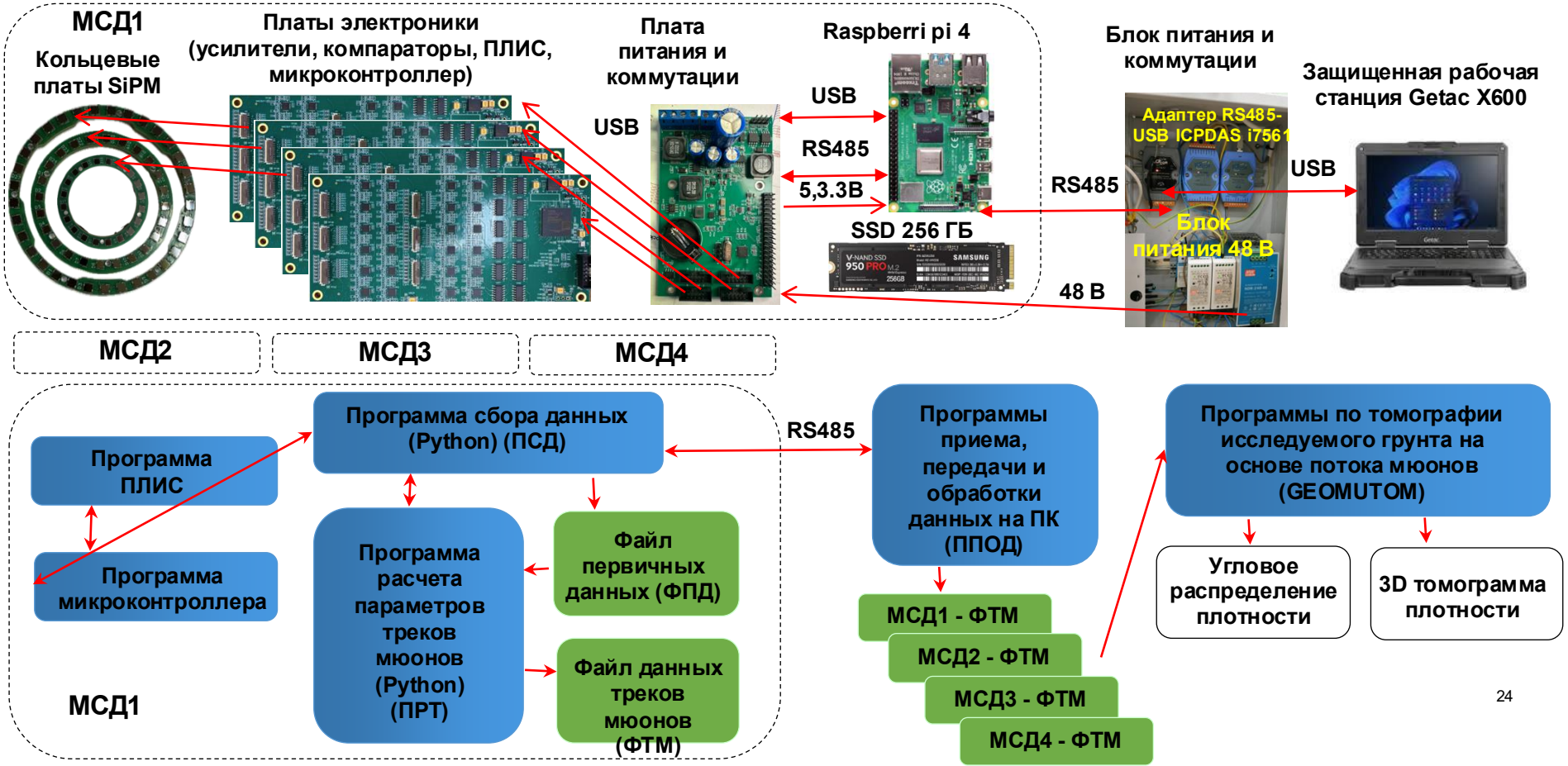


- Длина чувствительной зоны детектора: ~ 1000 мм
- Тип используемого оптоволокна: Saint Gobain BCF-12 диаметром 1 мм
- Тип используемых SiPM: MicroFC-30035-SMT (3x3 мм)

Golubev A.A., Kantsyrev A.V. et al, Muon tomograph for search and evaluation of ore deposits. RSI, 96, 115205 (2025); doi: 10.1063/5.0288915

Система регистрации и считывания сигналов мюонного томографа

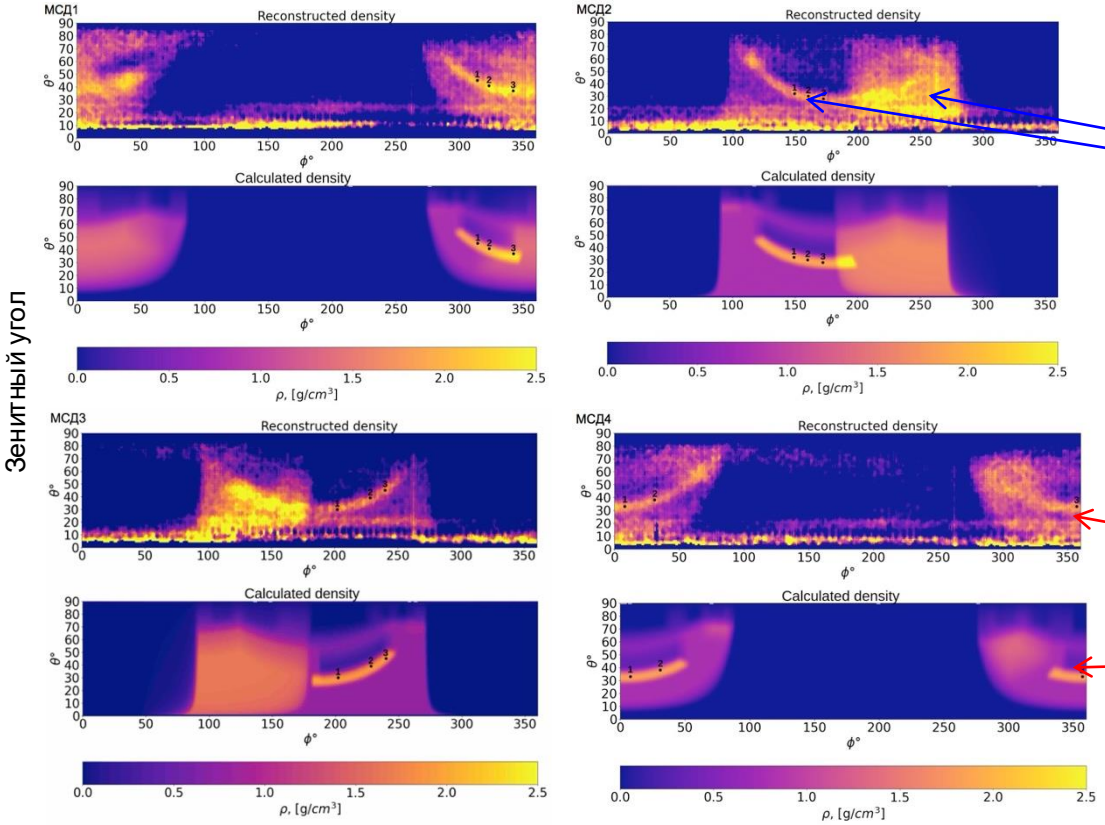
ТРИНИТИ РОСАТОМ



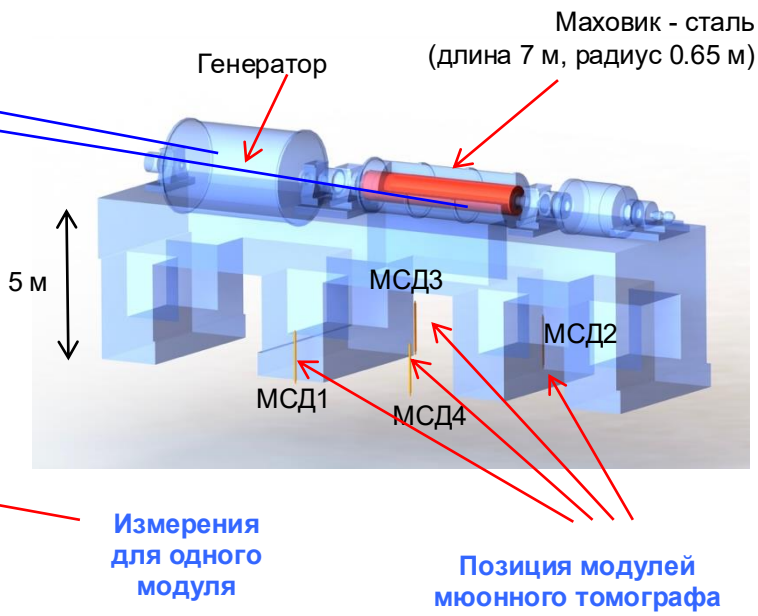
Испытание полнофункционального образца мюонного томографа

ТРИНИТИ
РОСАТОМ

Результаты измерения плотности тестового объекта
Угловые гистограммы средней плотности, модули МСД1-МСД4
Сравнение измерений с плотностью конструкции



Трехмерная модель тестового объекта



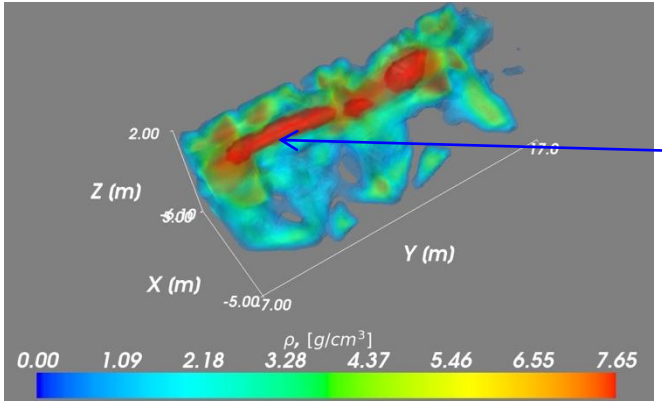
- **Точность определения средней плотности лучше 5 %**
- **Угловое разрешение ~ 1°**

Испытание полнофункционального образца мюонного томографа

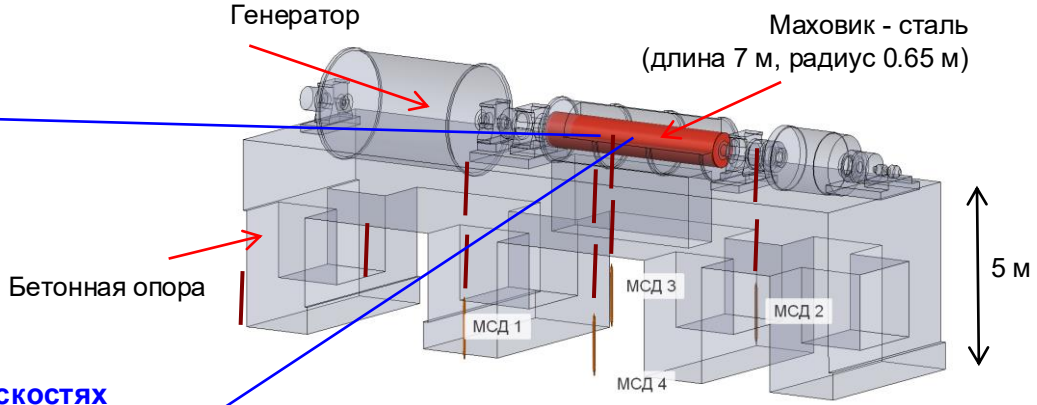
Результаты измерений и восстановления плотности

ТРИНИТИ РОСАТОМ

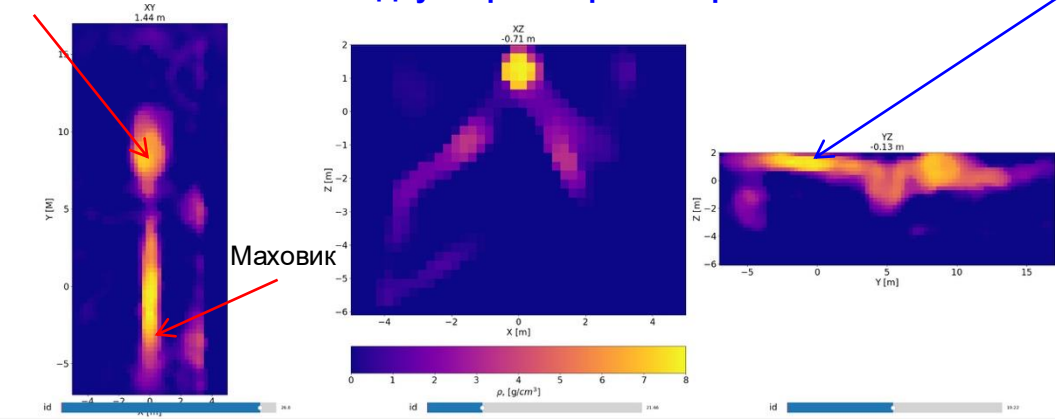
Трехмерная реконструкция (SIRT)

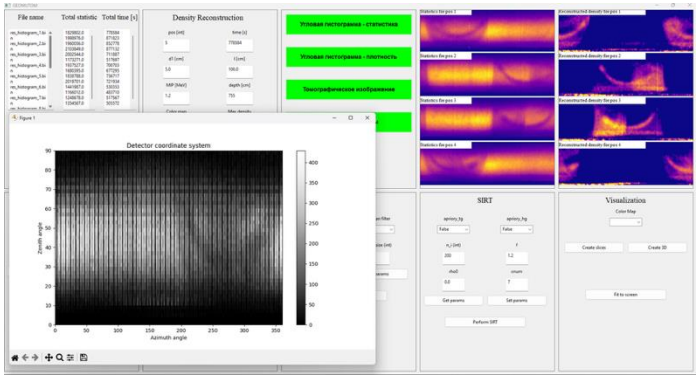


Трехмерная модель тестового объекта



Двухмерные срезы в трех плоскостях

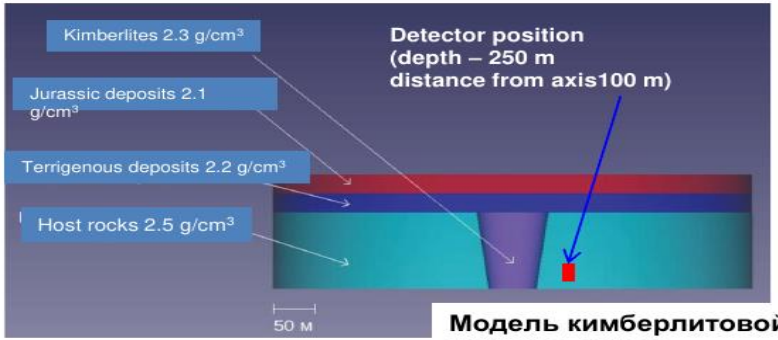




Программа для обработки данных

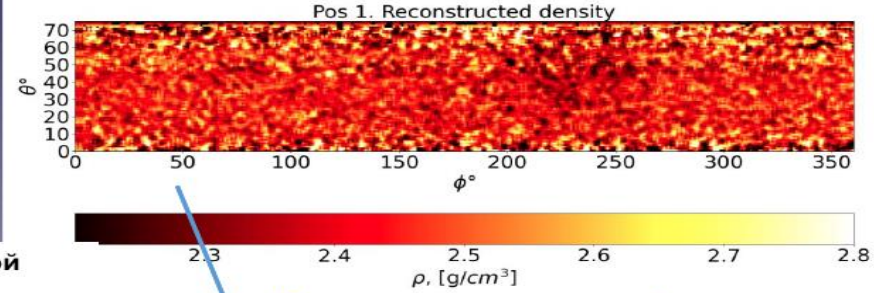
Моделирование эксперимента по поиску полезных ископаемых (кимберлитовые трубки)*

- **Поиск залежей полезных ископаемых – численное моделирование - проблема поиска кимберлитовых трубок в грунте (месторождение алмазов**)**

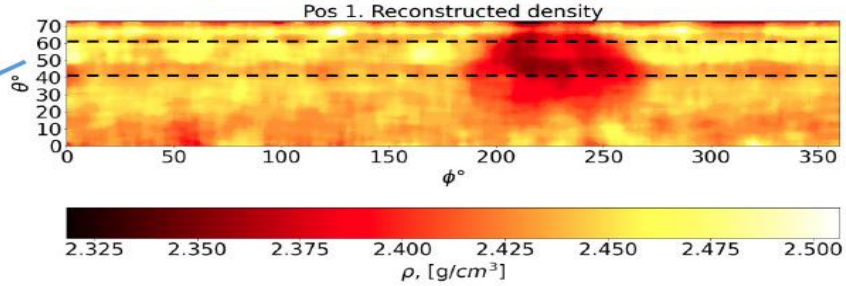


Модель кимберлитовой трубки в грунте

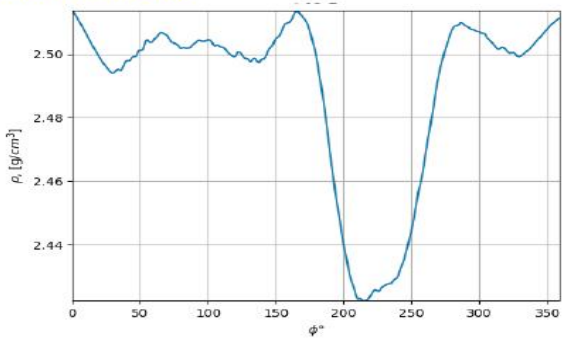
Статистика мюонов — 3 x 10⁵



Применение медианного фильтра



Профиль объемной плотности (3% разница)



* A.A. Golubev, A.V. Kantsyrev et al., Borehole muon tomograph for search and evaluation of ore deposits, Review of Scientific Instruments, 2025, V.96, №11, 115205

** - N.N. Zinchuk, Features of using typical models of kimberlite pipes in diamond prospecting, VESTNIK VSU, SERIES: GEOLOGY, 2011, No. 1, pp. 133-144

Сравнение основных геофизических методов в разведке полезных ископаемых

ТРИНИТИ РОСАТОМ

методы	мюонная	сейсмические	гравитационные	Электро-магнитные
Измеряемый параметр	плотность	скорость звука, плотность	плотность	электропроводность
стоимость	Высокие первоначальные инвестиции; низкая операционная стоимость	Высокая (большая команда)	Умеренная	От умеренного к высокой, зависит от масштаба оборудования
Глубина	10-1000 м	До 10 км	100 м - 10-ки км	До 1-2 км
Разрешение	1- 10 м	5-50 м	100- 500 м	10 – 100 м
Время сбора данных	Переменное (размещение детектора + набор данных) недели	Большая (большая команда + обработка данных) дни – недели.	Умеренный уровень, портативное оборудование	От умеренного до высокого
Примечание к применению	слепая зона под детектором	Ограничен рельефом местности, доступностью.	Широкое применение	Чувствителен к проводящим отложения верхнего слоя почвы

Заключение

Мюонная томография имеет большой потенциал для использования в геологии, в горном деле и горной инженерии:

- разведка новых месторождений полезных ископаемых;
- оценка и классификация горных пород;
- обнаружение геологических структур и изолированных рудных тел или слабых зон в шахтах;
- обнаружение резервуара или валунов во время прокладки туннелей или штолен;
- мониторинг временных изменений плотности трещиноватых и деформированных горных пород;
- ….

Устный доклад: СЕССИЯ I 02/07/2026

Алексей Скобляков «Виртуальный генератор потока атмосферных мюонов в варьируемом диапазоне энергий до 100 ТэВ» #166

Постер: СЕССИЯ II 02/07/2026

Алексей Канцырев. «Мюонная томография крупномасштабных объектов с применением компактных цилиндрических позиционно-чувствительных детекторов» #153

Всеволод Панюшкин. «Методика восстановления траекторий частиц для цилиндрических мюонных детекторов» #154

Спасибо!

А.В. Канцырев , И.Г. Алексеев, А.В. Богданов, Р.О. Гаврилин, Д.С. Колесников, Е.М. Ладыгина, М.А.Лапшин, А.И. Мышлецов* В.А. Панюшкин, А.В.Скобляков, Г.А. Сарычев*, В.П. Смирнов, Э.И. Самигуллин, Е.И. Тарковский, Ю.М.Трубаков*, А.О. Хурчиев, А.С. Загоруйко.

* Акционерное Общество “Эльконский ГМК”, Алдан, Россия

ТРИНИТИ
РОСАТОМ

Спасибо за внимание!