

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова



НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Разработка мобильного мюонного томографа на основе годоскопов из дрейфовых трубок

Фахрутдинов Р.М., Бирюков В.В., Гуцин В.Н., Исаев А.Н., Кожин А.С.,
Компаниец К.Г., Пасюк Н.А., Петрухин А.А., Шутенко В.В., Яшин И.И.

Москва, 2025

Физические принципы мюонной томографии

Мюонография – метод исследования внутренней структуры крупномасштабных объектов по анализу пространственно-угловых изменений потока мюонов космического излучения, проходящих через исследуемый объем.

Мюонограмма – графическое отображение на 2D плоскости областей анизотропии зарегистрированного потока мюонов, связанных с суммарным эффектом поглощения и рассеяния мюонов на особенностях строения исследуемого объекта.

Ядра атомов атмосферы Земли (в основном N_2 и O_2) на высоте 15 – 20 км непрерывно бомбардируются первичными космическими лучами. В результате взаимодействий образуются в основном **пионы** и **каоны**, которые распадаются на **мюоны** и **нейтрино**.

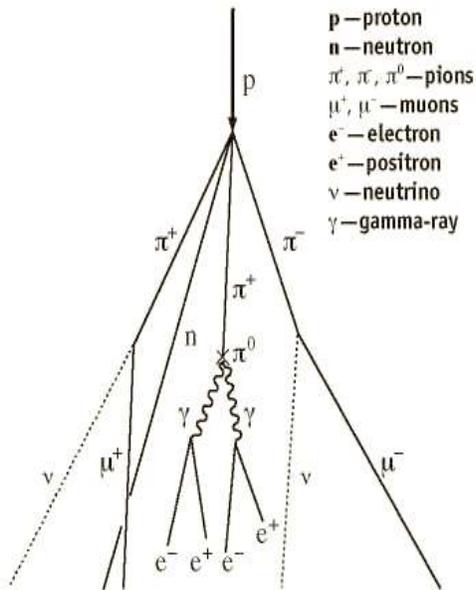
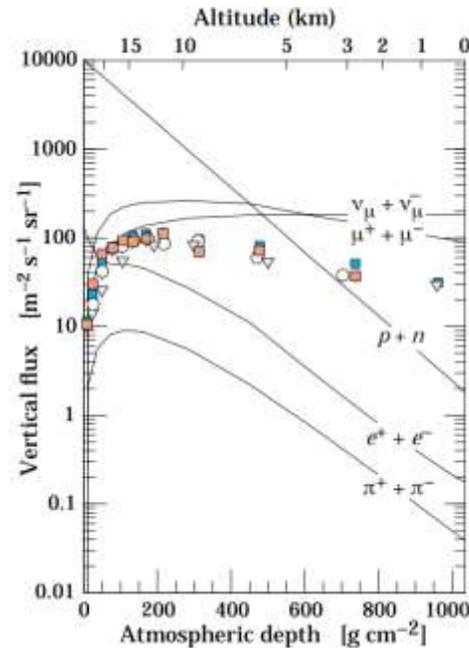
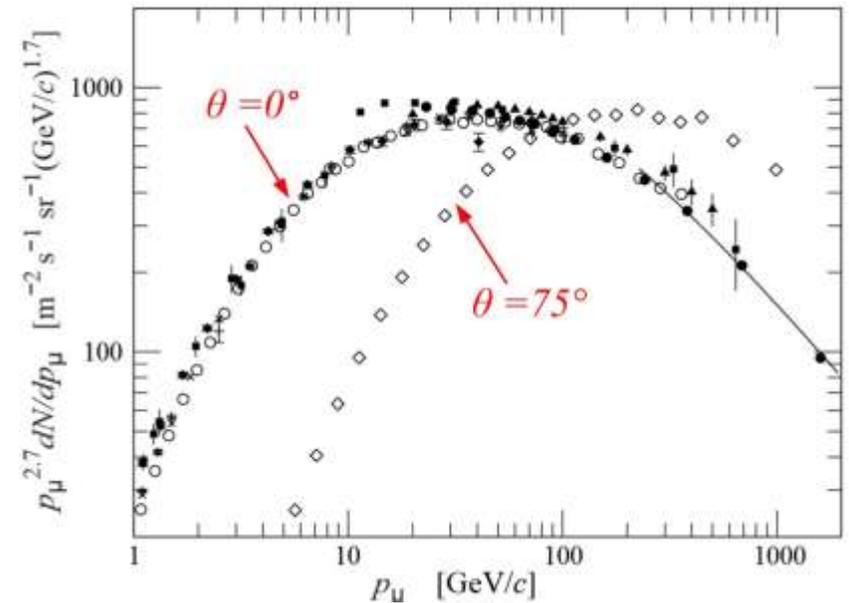


Схема рождения вторичных космических частиц



Зависимость состава потока вторичных космических частиц от высоты



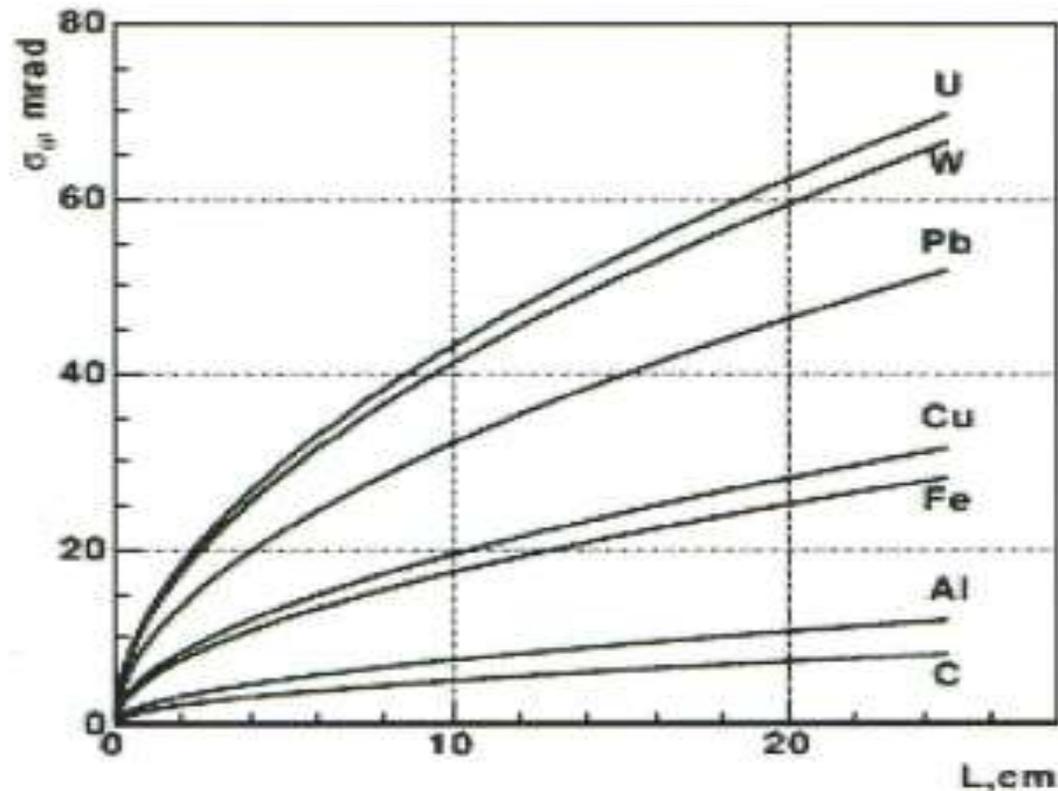
Энергетический спектр мюонов на уровне моря для зенитных углов 0° и 75°

Физические принципы мюонной томографии

Мюоны обладают высокой проникающей способностью, например при начальной энергии 3 ГэВ преодолевают почти 2 м свинца.

Средний поток космических мюонов – около 10000 на 1 кв.м в минуту. Средний импульс у поверхности Земли ~ 4 ГэВ/с с максимумом спектра ~ 2 ГэВ/с.

Рис. слева – зависимость среднеквадратичного отклонения угла рассеяния мюона с импульсом 2 ГэВ/с от толщины материала (в графическом виде), **рис. справа** – зависимость среднеквадратичного отклонения угла рассеяния мюона с импульсом 3 ГэВ/с при прохождении 10 см вещества с зарядовым числом Z.



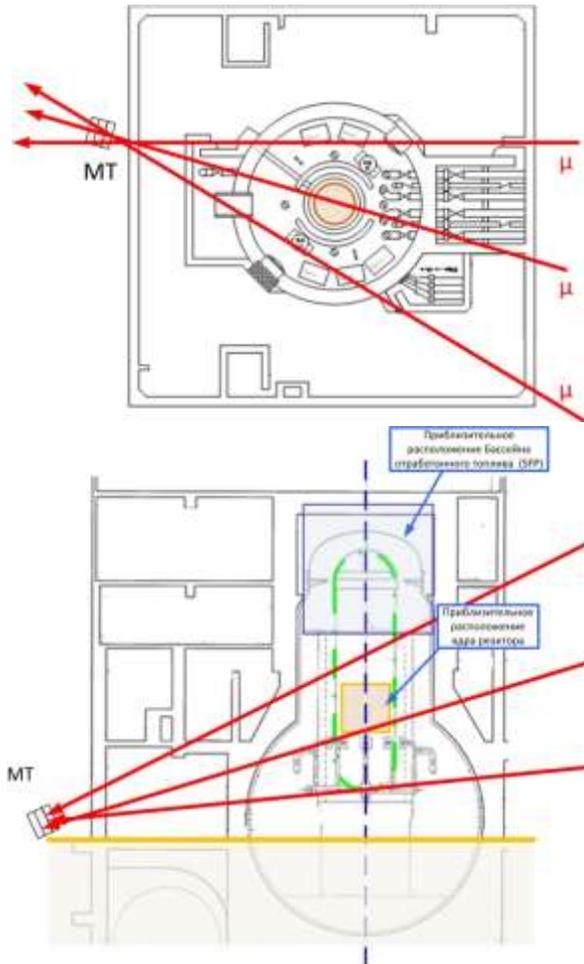
| Материал | Z | Отклонение |
|-----------------------|----|------------|
| Пластмасса | | ~2 |
| Алюминий | 13 | 5 |
| боросиликатное стекло | - | ~4 |
| Железо | 26 | 11 |
| Вольфрам | 74 | 27 |
| Свинец | 82 | 20 |
| Уран | 92 | 29 |
| Плутоний | 94 | 30 |

Отклонение (мрад) мюонов 3 ГэВ при прохождении 10 см вещества
30 мрад = 1.7°

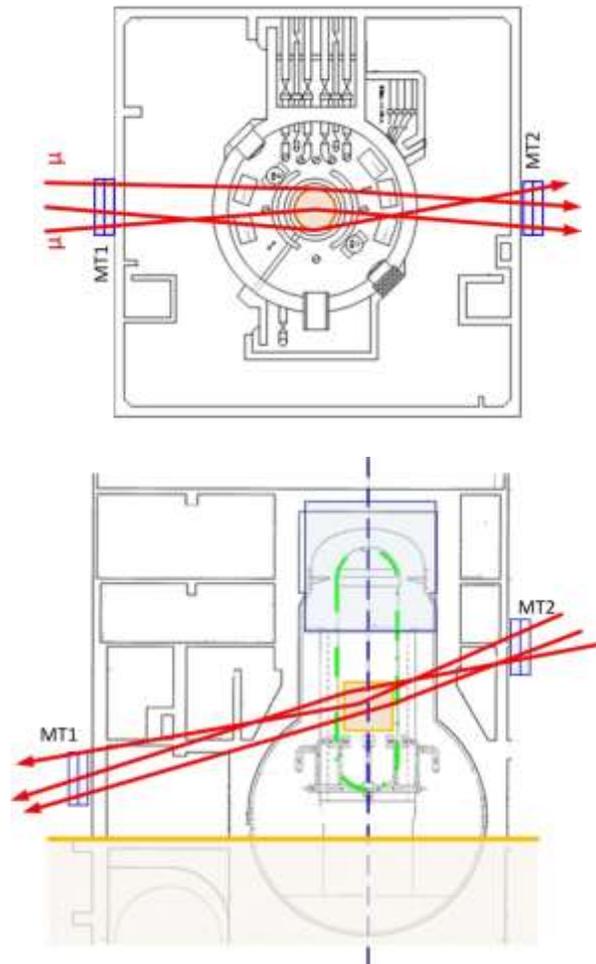
Физические принципы мюонной томографии

Мюонная томография – построение мюнограмм с разных направлений и получение на их основе 3D изображения.

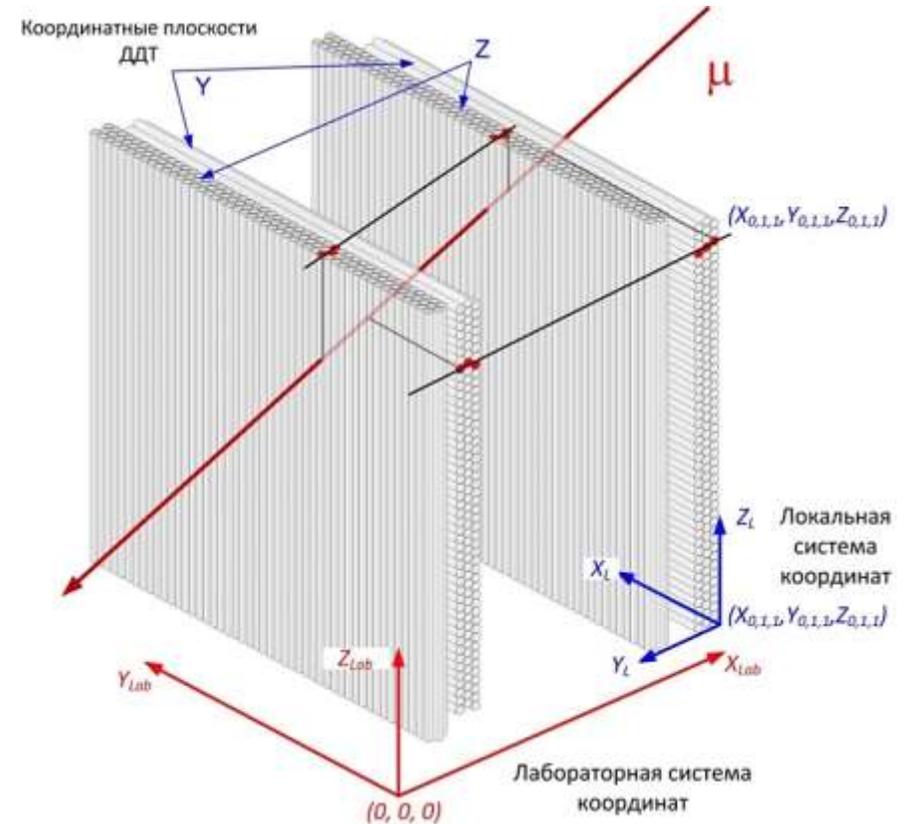
Метод МТ на основе поглощения потока мюонов



Метод МТ на основе рассеяния мюонов

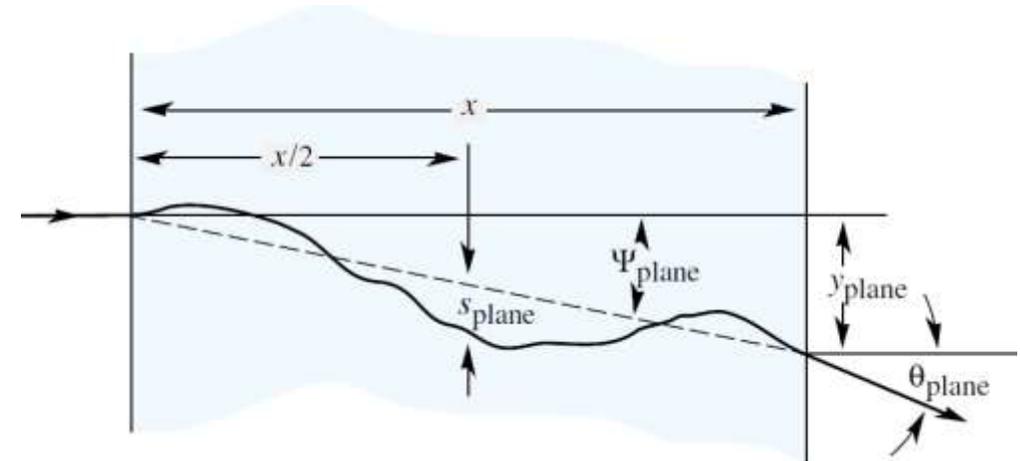
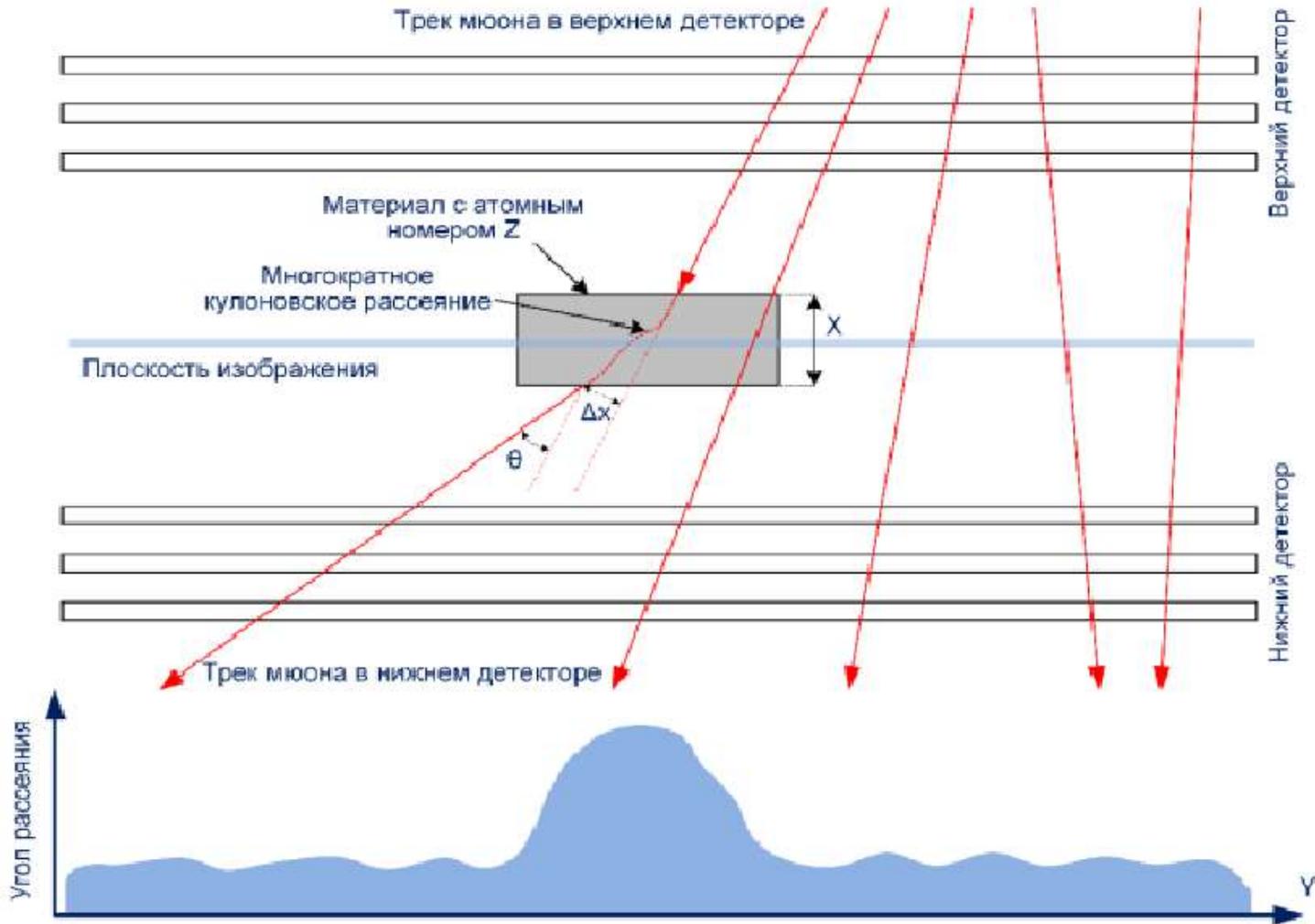


Мюонный годоскоп – прибор из нескольких координатных плоскостей для экспериментального определения зависимости интенсивности потока заряженных частиц от угла в пространстве.



Мюонная томография: метод кулоновского рассеяние мюонов

Параметры многократного кулоновского рассеяния



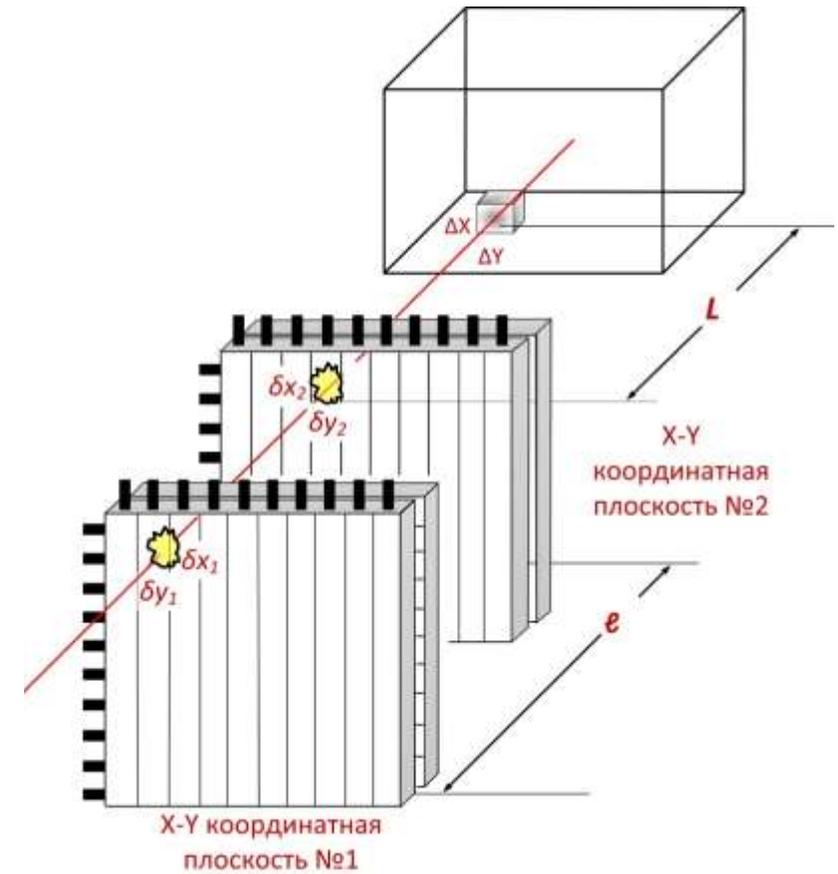
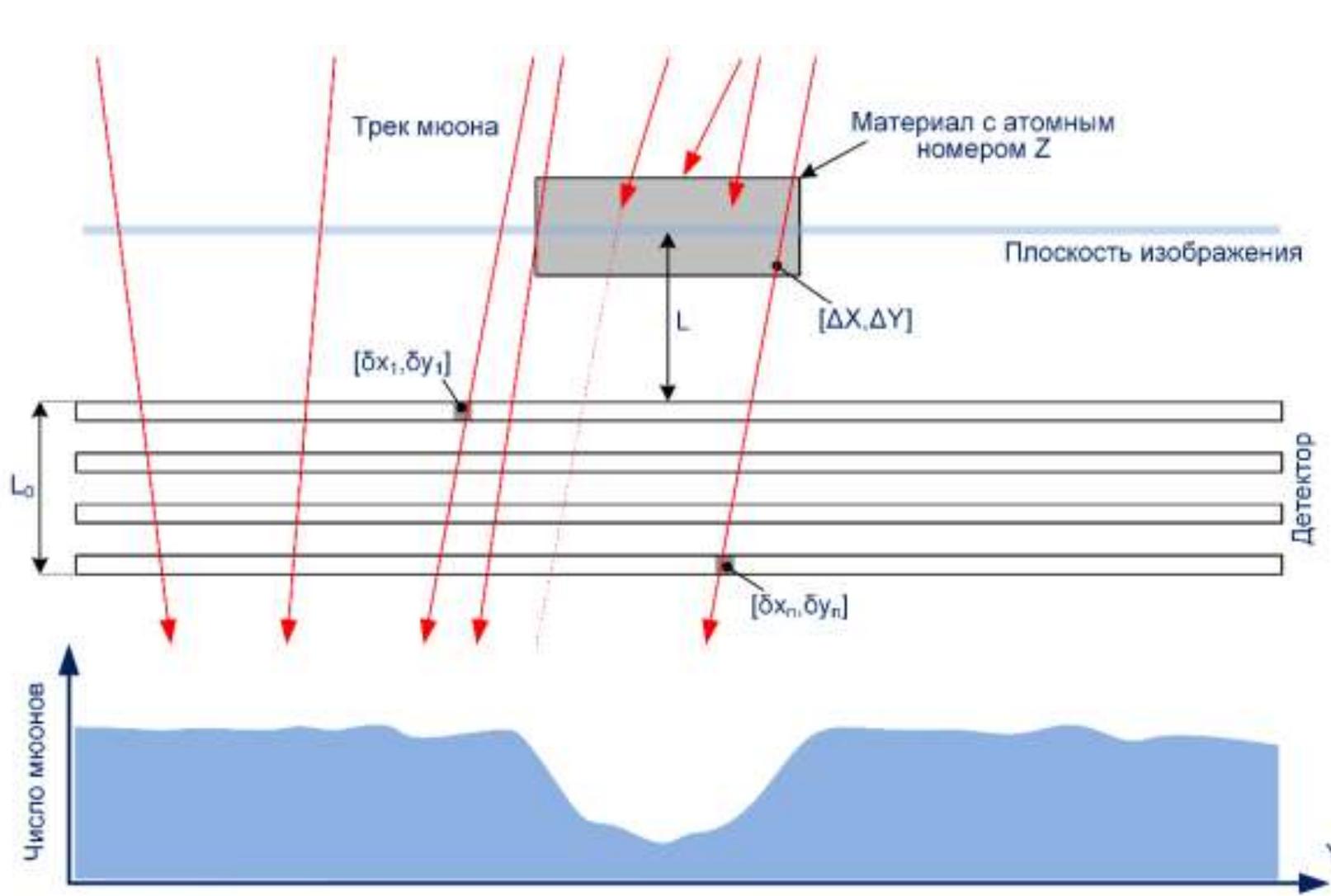
$$\Theta_0 = \overline{\Theta}_{plane} = \frac{1}{\sqrt{2}} \overline{\Theta}_{space}$$

$$\theta_0 = \frac{13.6}{\beta c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \cdot \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right]$$

$$\overline{\Psi}_{plane} = \frac{1}{\sqrt{3}} \Theta_0; \quad \overline{y}_{plane} = \frac{x}{\sqrt{3}} \Theta_0; \quad \overline{s}_{plane} = \frac{1}{4\sqrt{3}} \Theta_0$$

где θ_0 – ширина распределения, βc – скорость мюона, p – импульс, x – длина пути мюона в материале, X_0 – радиационная длина материала

Мюонная томография: метод поглощения мюонов

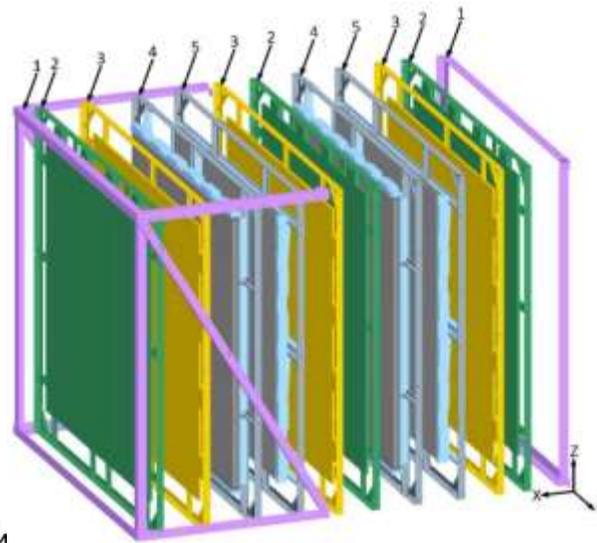
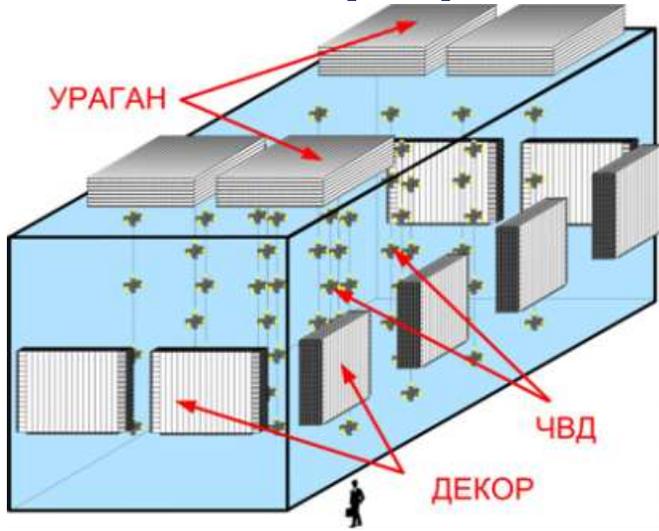


Разрешение метода:

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

Мюнография в ЭК НЕВОД НИЯУ МИФИ

Мюнография энергоблока АЭС



Свинцовый блок с размерами 20×10×20 см был помещен на глубине 2.5 м воды на расстоянии 0.5 м от бетонной стенки бассейна

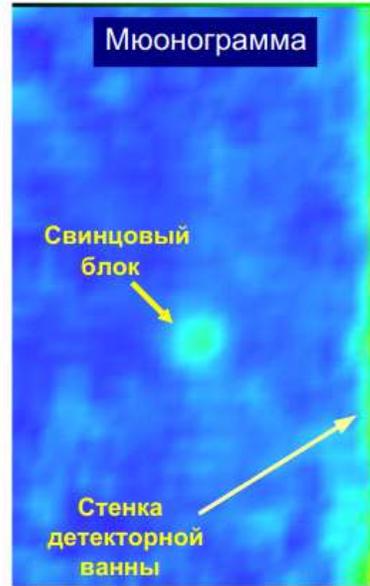
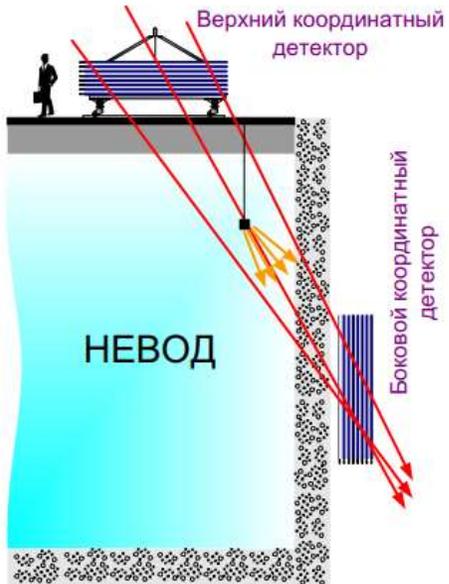
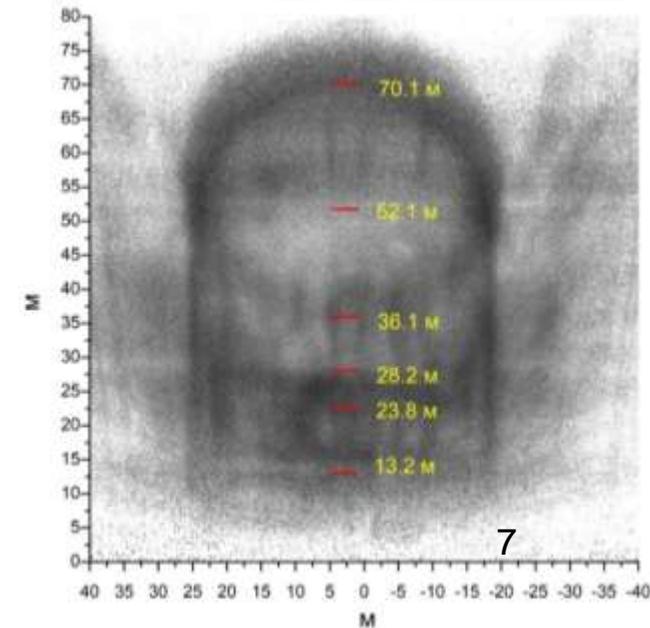


Схема эксперимента

Результат эксперимента

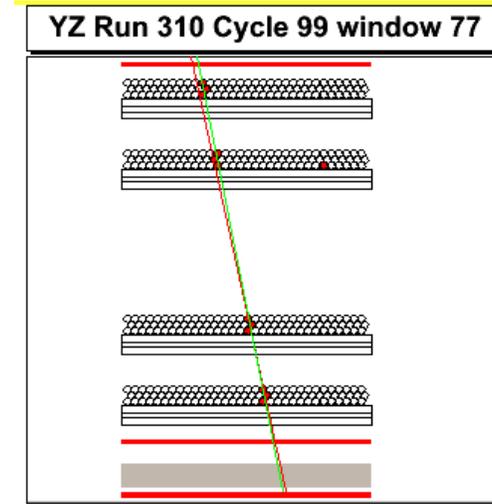
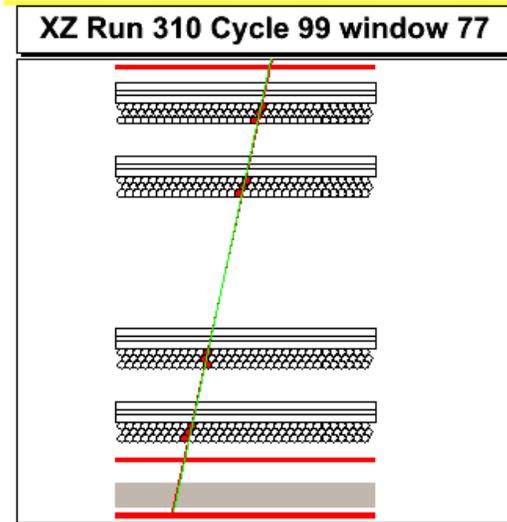


Мюонная томография в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ



Лабораторный макет мюонного томографа площадью 1 м²

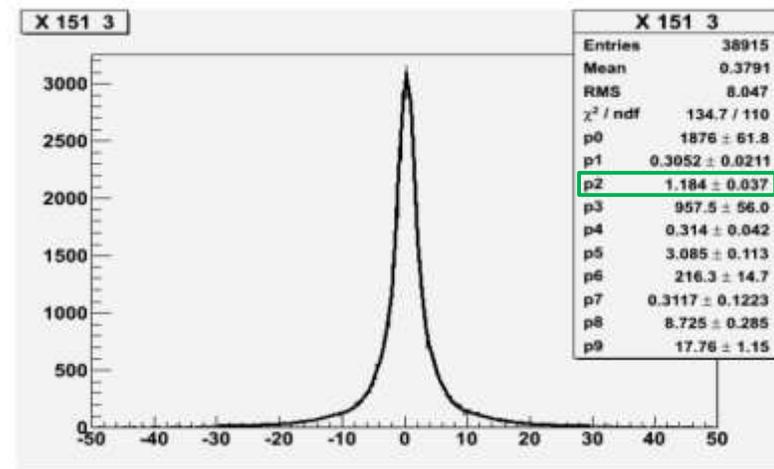
Регистрирующие элементы – дрейфовые трубки длиной 1 м и диаметром 30 мм. Рабочий газ – Ar + 7%CO₂. Суммарное количество трубок – 768 шт.



Примеры визуализации трека



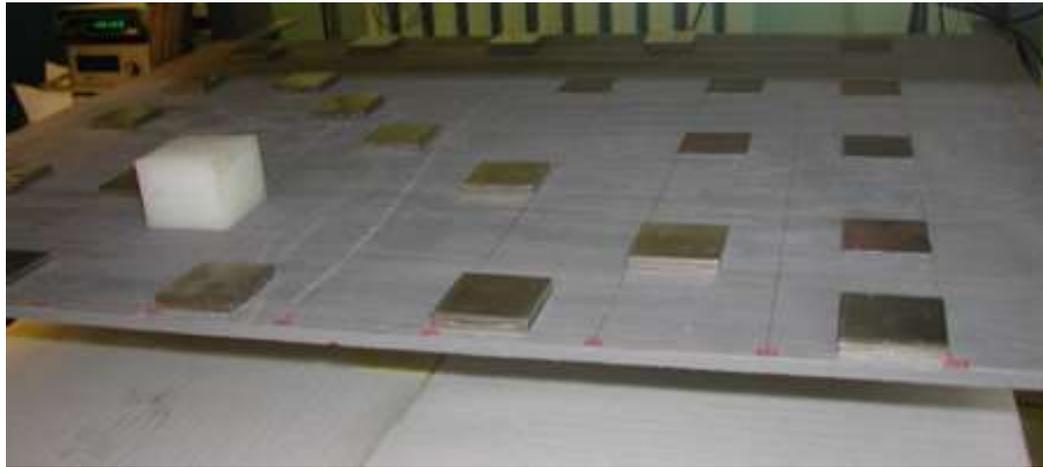
Трековая камера с трубками длиной 1 м



Распределение разности углов треков в нижнем и верхнем блоках камер (в мрад)

Ширина распределения:
 $p_2 = 1.18 \pm 0.04$ мрад

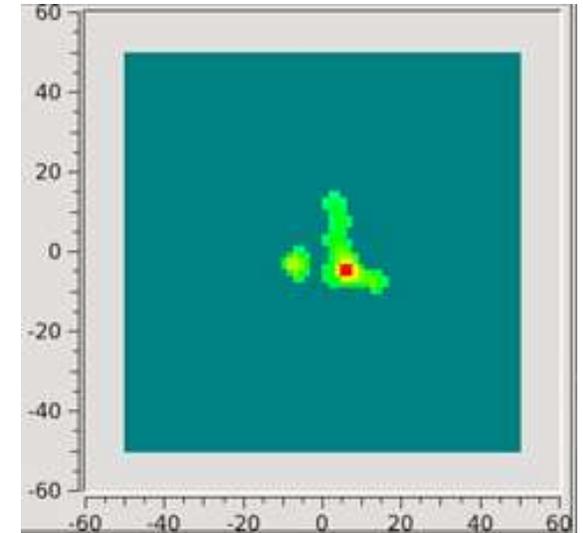
Мюонная томография в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ



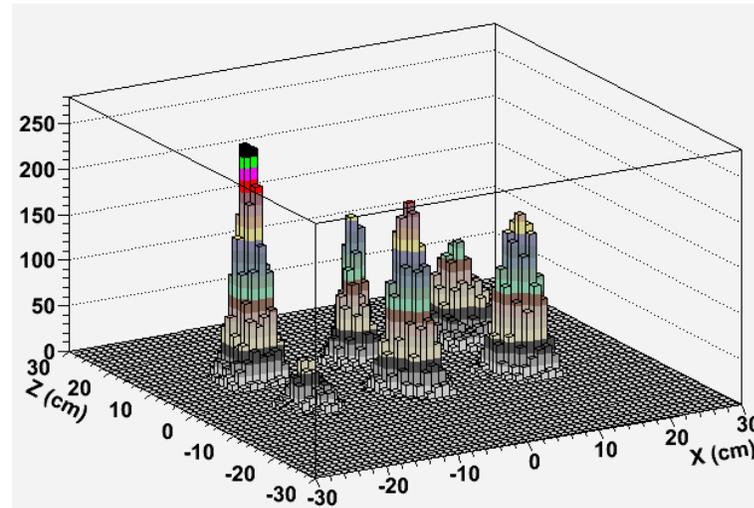
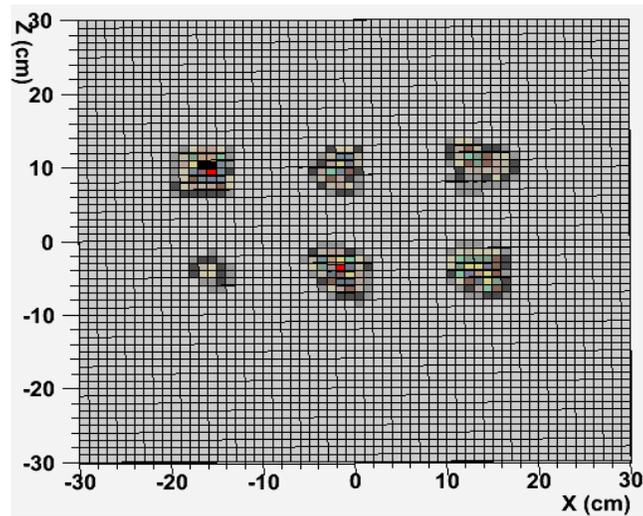
Набор пластин из разных материалов (полиэтилен, сталь, свинец)



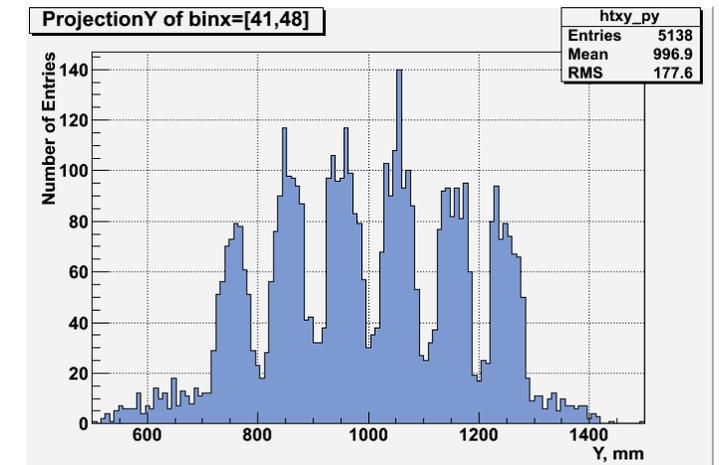
Свинцовый брусок и стальной уголок



Восстановленное изображение бруска и уголка (экспозиция 3 мин.)



Результат экспозиции с набором пластин за 5 мин.

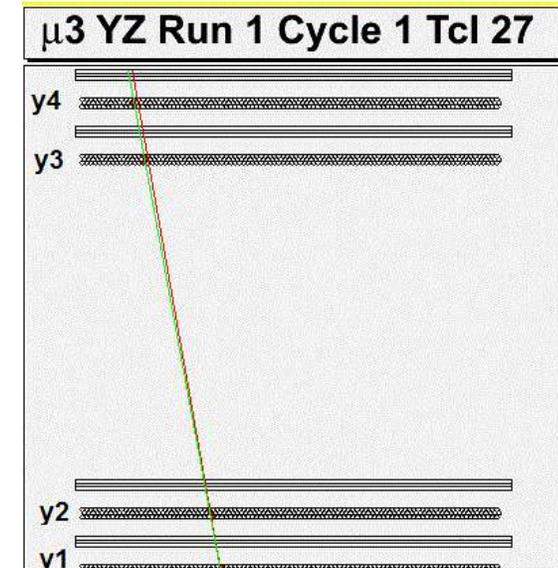
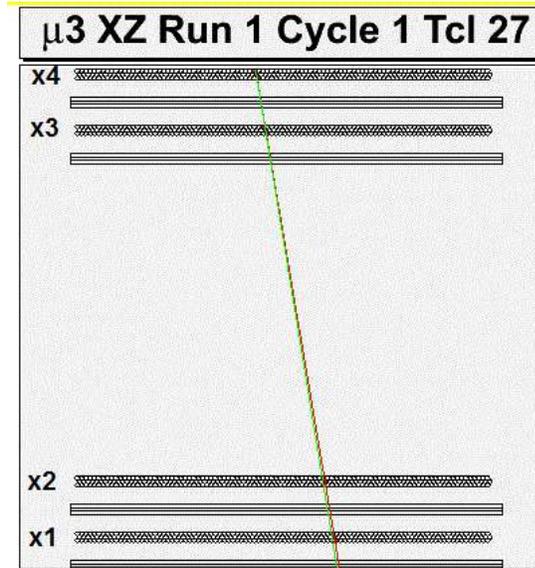


Мюонная томография в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ



Мюонный томограф площадью 3 x 3 м²

Регистрирующие элементы – дрейфовые трубки длиной 3 м и диаметром 30 мм.
Рабочий газ – Ar + 7%CO₂. Суммарное количество трубок – 2304 шт.



Примеры восстановления и визуализации трека

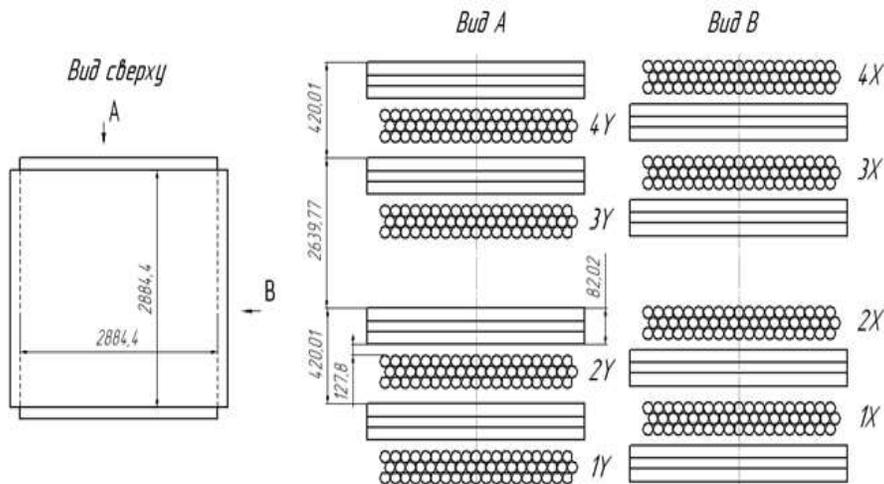
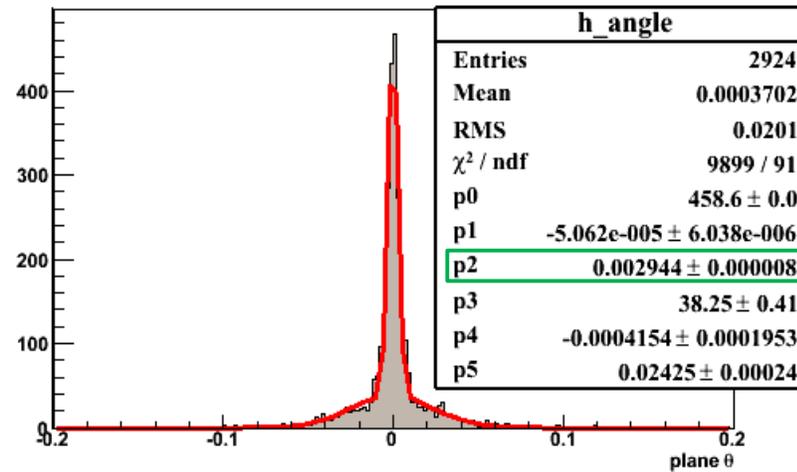


Схема расположения камер



Распределение разности углов треков в нижнем и верхнем блоках камер (в радианах)

Ширина распределения:
p2 = 2.94 ± 0.01 мрад

Мюонная томография в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ



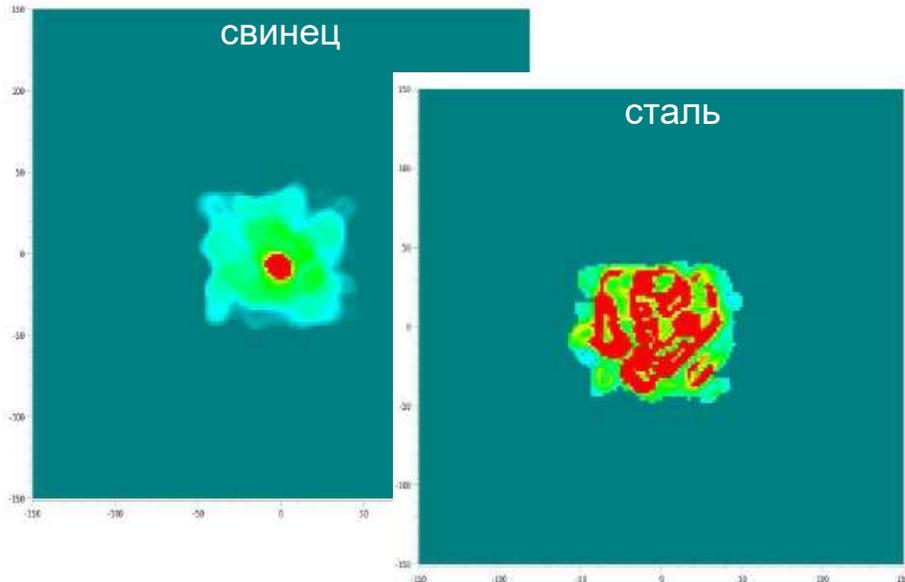
Кирпичный домик



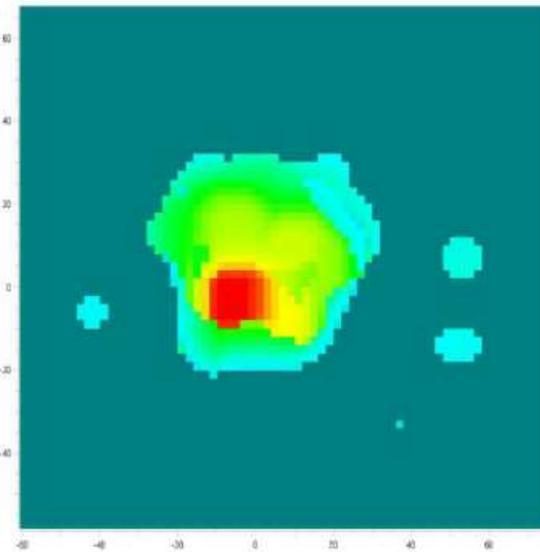
Свинцовый куб с ребром 20 см под слоем стальных труб



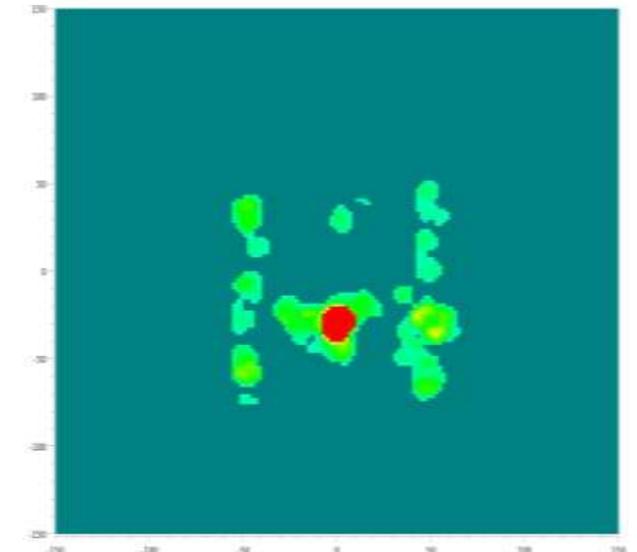
Свинцовый куб с ребром 20 см под 30 см стали



Восстановленные изображения с кирпичом



Восстановленное изображение свинцового куба



Восстановленное изображение свинцового куба (за 3 мин.)

Примеры применения мюонной томографии в мире



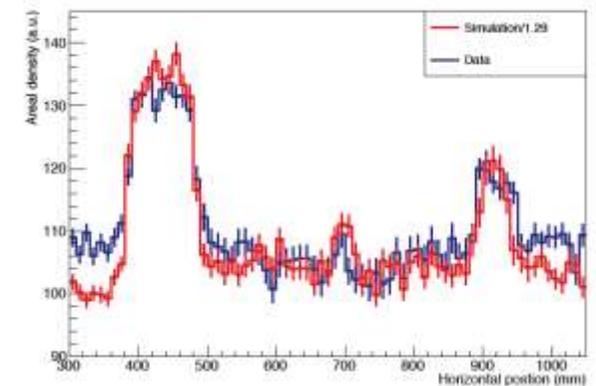
[Toshiba для Фукусимы]



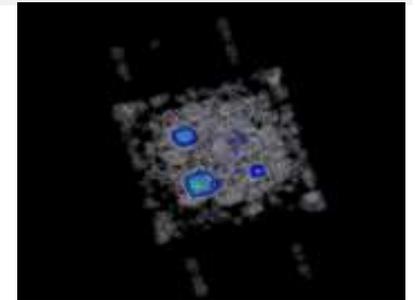
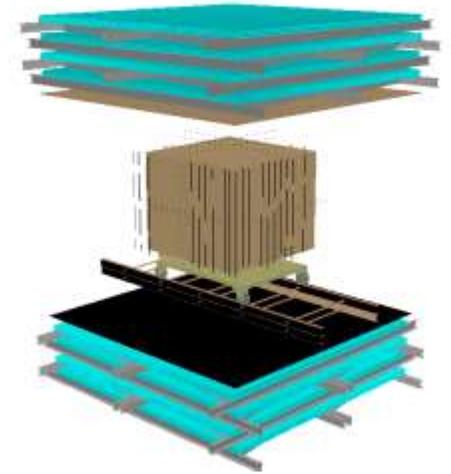
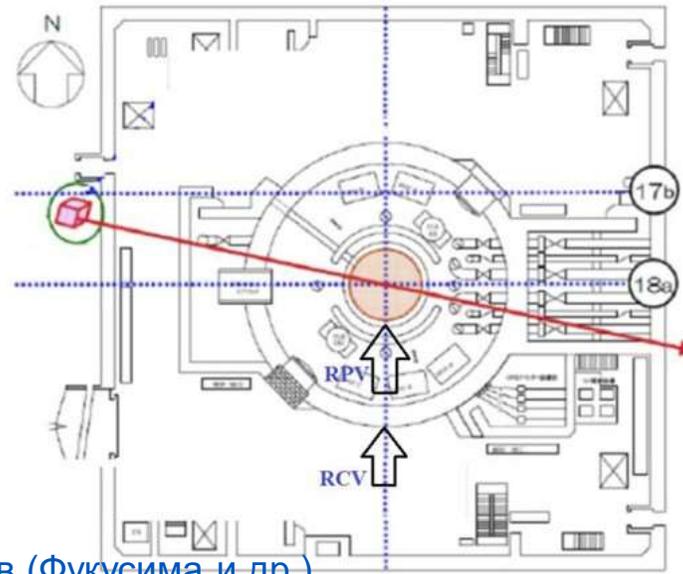
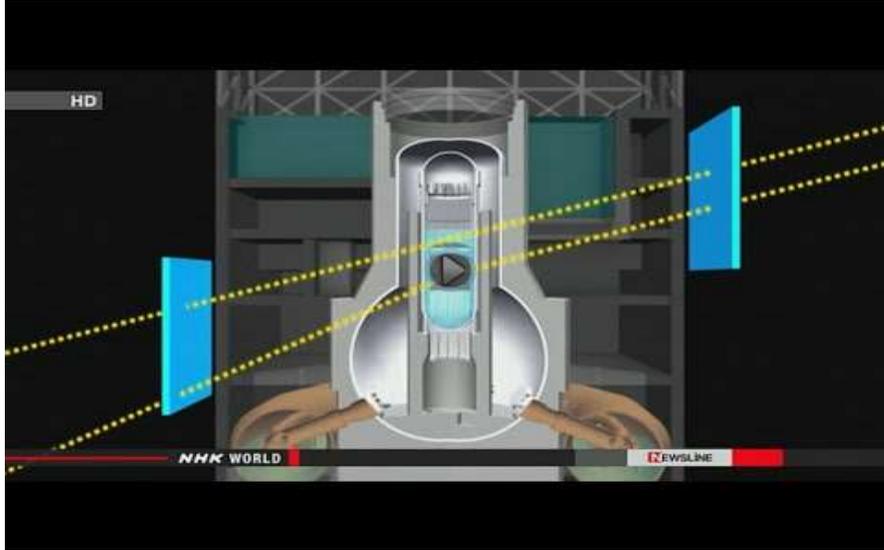
Купол собора святой Марии во Флоренции



[Decision Sciences]



Примеры применения мюонной томографии в мире



Обследование реакторов (Фукусима и др.)



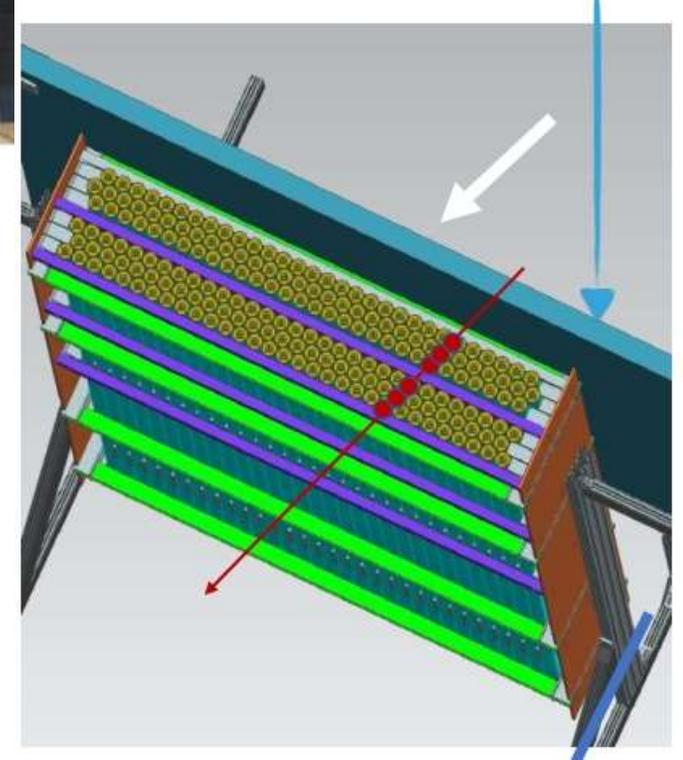
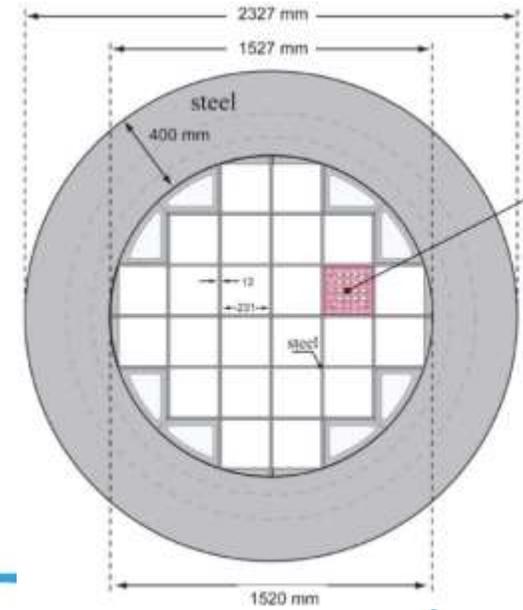
Геологоразведка (ТРИНИТИ и др.)
Пирамиды, вулканы

Контейнеры (ЛАНЛ)

О.П.Ющенко: за 30 мин. обнаруживаются 10x10x10 см объекты из UO_2 в спец-контейнерах даже при максимальном заполнении стальными отходами.

Примеры применения мюонной томографии в мире

MUTOMCA project (INFN). Aim:
re-verification of spent fuel
casks in interim storage facility
in Germany



Концепция разрабатываемого мобильного мюонного томографа

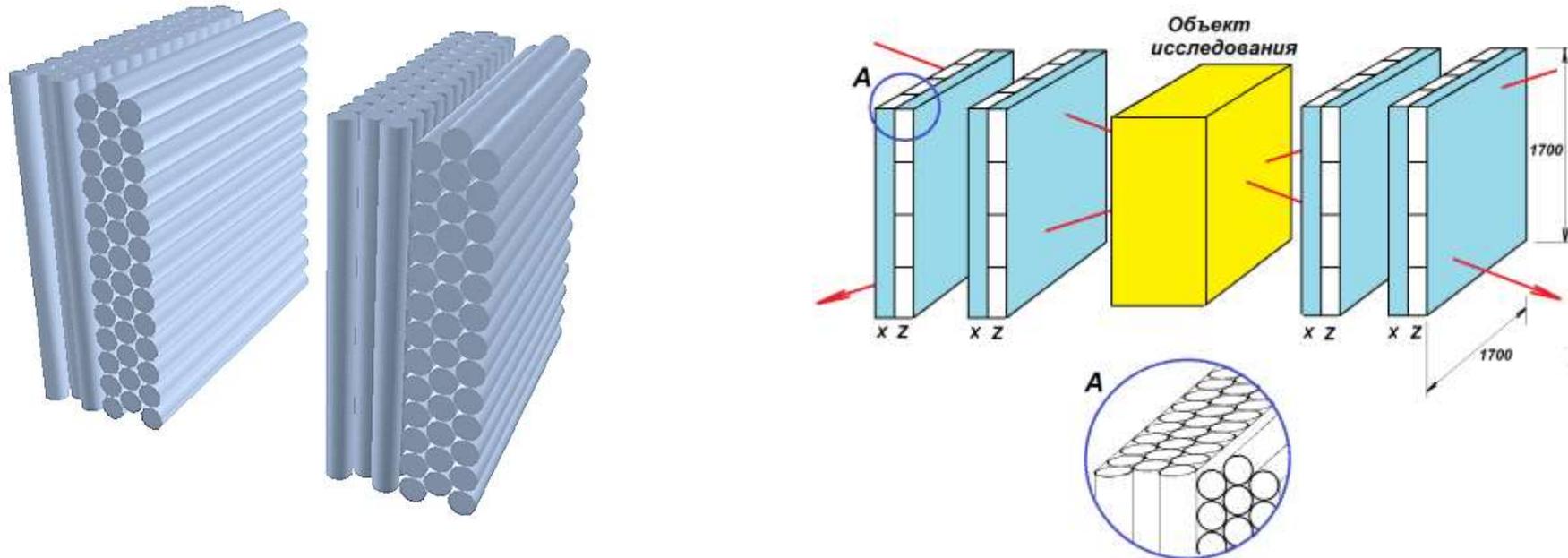
В базовом варианте – разборная конструкция из **двух автономных годоскопов** габаритами $\sim 1.7 \times 1.7 \times 0.8$ м.

Годоскоп – сборка из 4-х идентичных трековых камер из дрейфовых трубок, ортогонально ориентированных в соседних камерах.

Трековая камера состоит из 3-х слоев дрейфовых трубок, по 32 шт. в слое, собранных по методу «плотной упаковки». Внешний диаметр трубки 52 мм, толщина стенки 0.8 мм, материал – алюминий. Рабочий газ – $\text{Ar} + 7\% \text{CO}_2$.

Расстояние между парами камер можно увеличивать (уменьшается аксептанс, но улучшается угловое разрешение).

Пространственное разрешение трековых камер ~ 0.5 мм. Угловое разрешение годоскопа – не хуже 0.3 градуса.



Дополнительный комплект камер

Если объект исследования крупногабаритный, то для ускорения набора статистики полезно иметь дополнительный комплект трековых камер с дрейфовыми трубками большей длины, например трубками диаметром 52 мм и длиной 3.7 м.

Изготовление таких камер опробовано в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, в них 32 дрейфовые трубки расположены в 2 ряда, при этом предусмотрена возможность состыковки камер друг с другом без зазора.



Трековая камера с трубками длиной 3.7 м

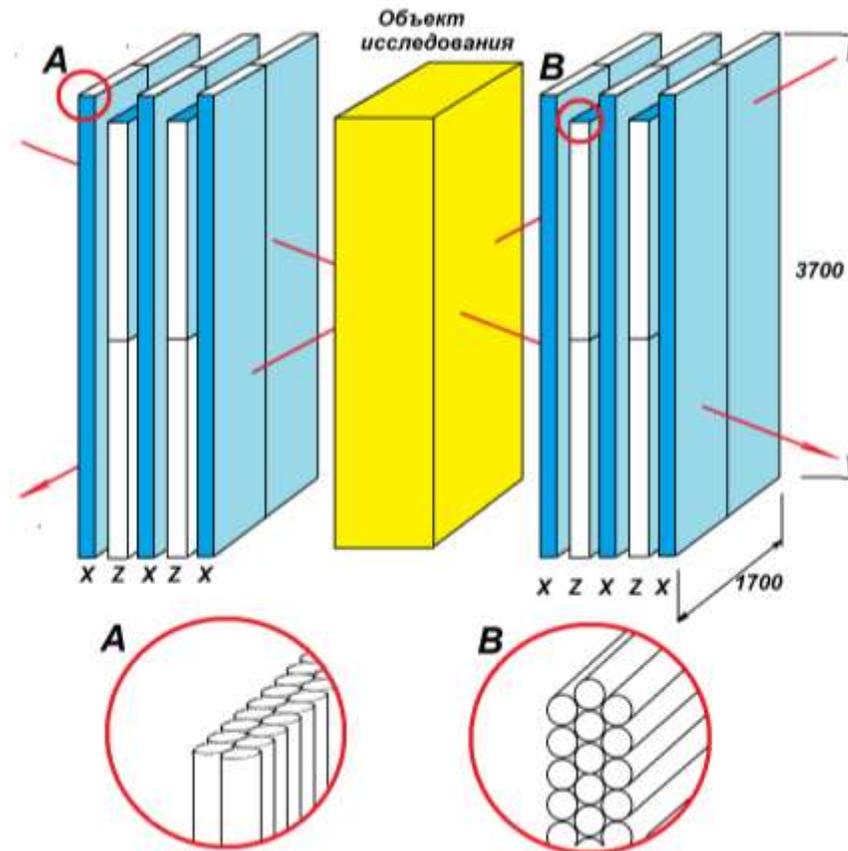
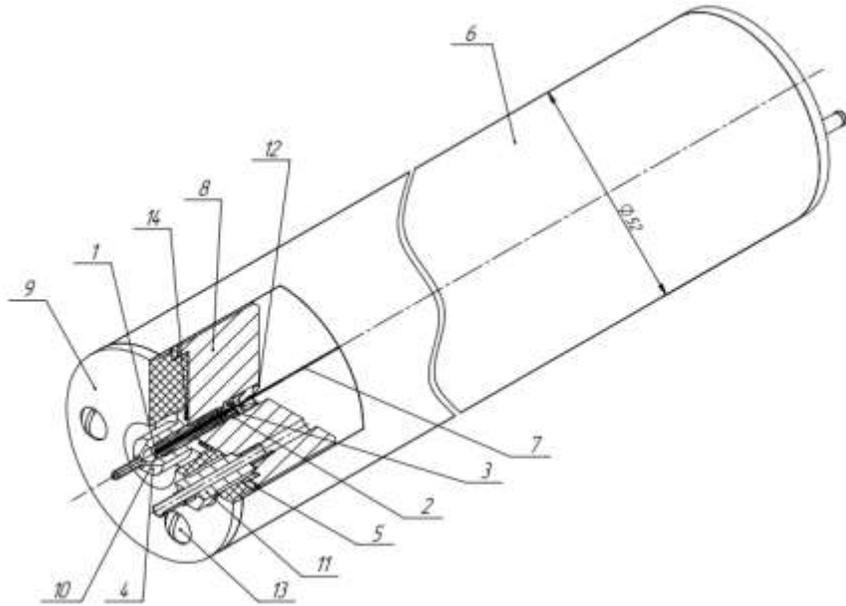
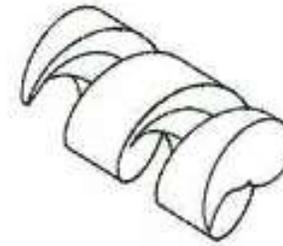


Схема томографа из 8 камер «базового варианта» площадью $1.7 \times 1.7 \text{ м}^2$ и 12 камер из «дополнительного комплекта» площадью $3.70 \times 0.85 \text{ м}^2$

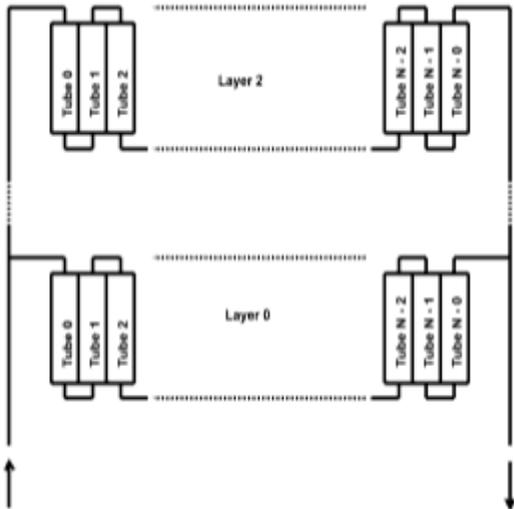
Конструкция дрейфовой трубки



1. Трубка обжимная.
2. Проставка латунная.
3. Проставка пластмассовая.
4. Колпачок сигнальный.
5. Прокладка уплотнительная.
6. Корпус (труба).
7. Сигнальная проволока.
8. Заглушка торцевая.
9. Крышка.
10. Втулка с резьбой.
11. Штуцер.
12. Локатор.
13. Винт М5х28.
14. Кольцо уплотнительное.



Локатор
("twister")



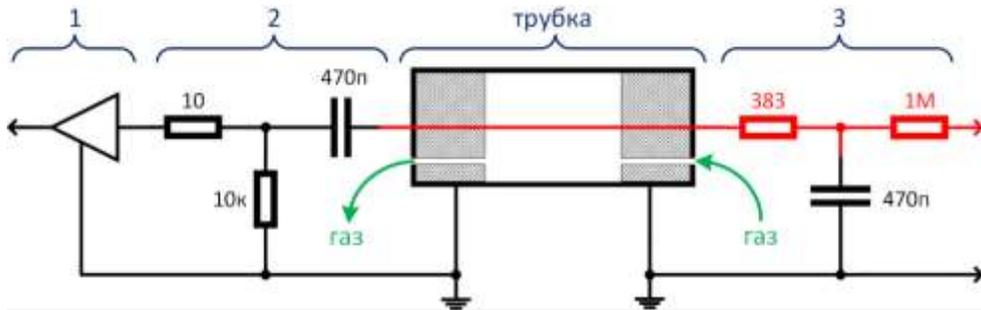
Газовое соединение



Возможен режим как с постоянной циркуляцией газа, так и «беспродувный».

Экспериментально проверено, что при достигнутой герметичности, с применением метода автокалибровки, камера может работать без обновления газа не менее года.

Электроника



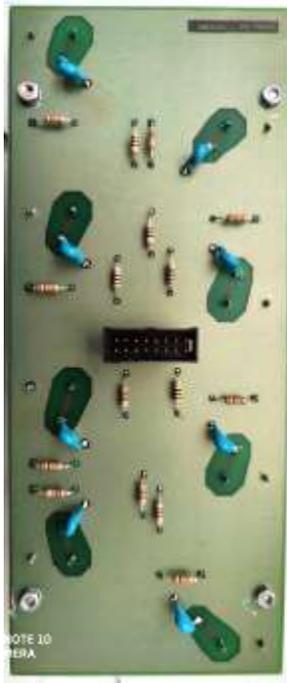
Электрическое подключение трубки: 1 – усилитель, 2 и 3 – переходные платы с пассивными элементами

Подача высокого напряжения и съем сигнала – с разных концов трубки.

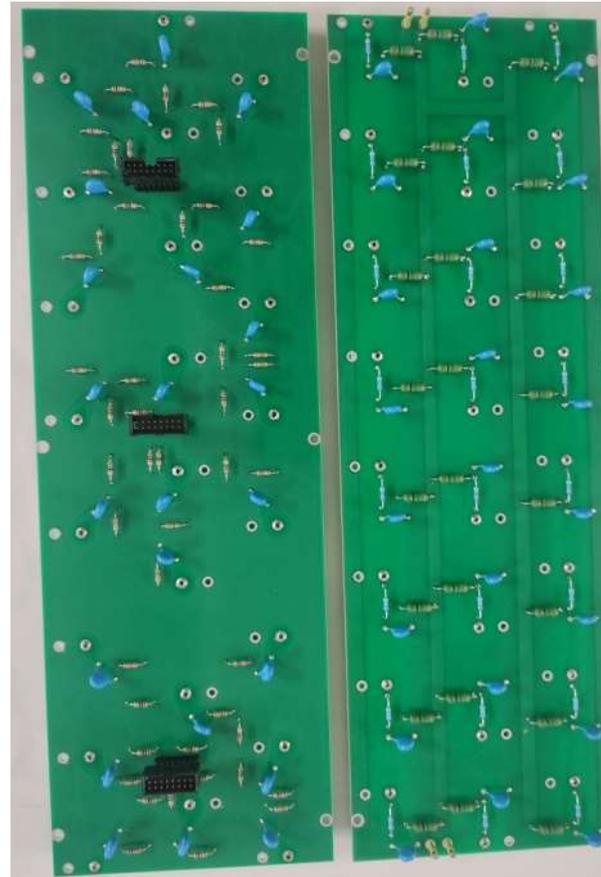
Усилитель на базе микросхемы ОКА2, входное сопротивление 330 Ом, выходной сигнал в стандарте LVDS, регулируемый порог чувствительности в пределах 0.6 – 3.0 μ А.



8-канальный усилитель



8-канальная сигнальная и в/в переходные платы для камеры из 2-х рядов ДТ

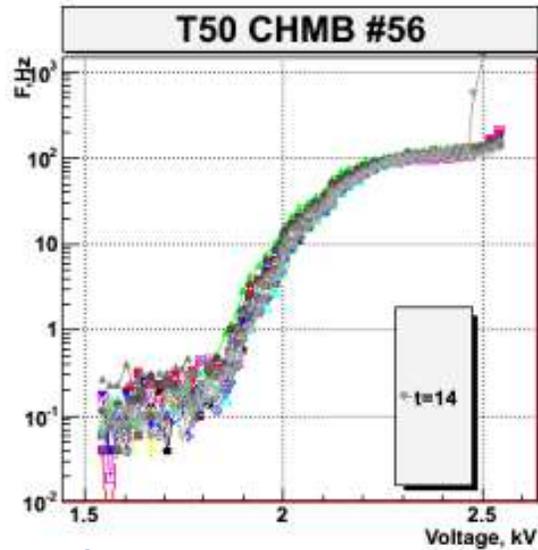


24-канальная сигнальная и в/в переходные платы для камеры из 3-х рядов ДТ

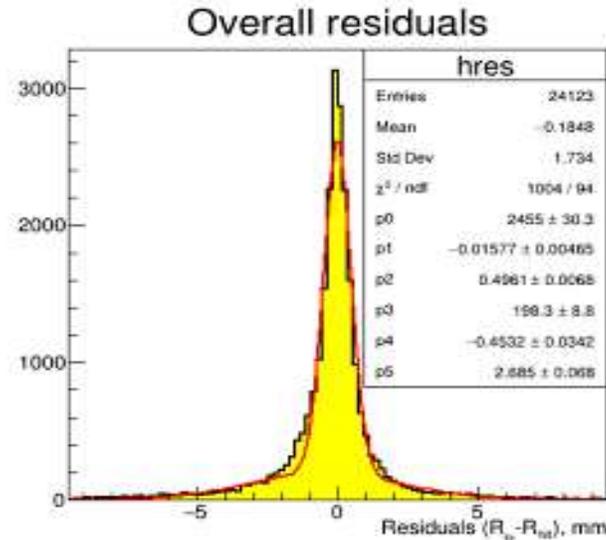


Торец камеры с переходными платами и усилителями

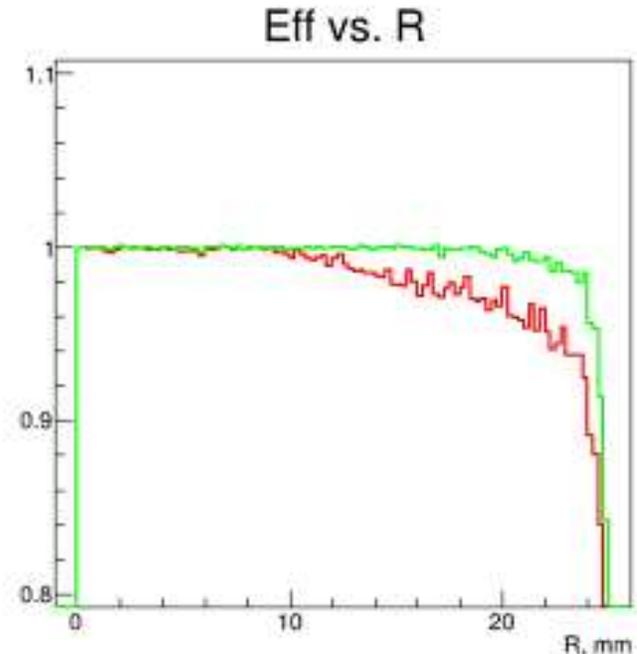
Физические характеристики



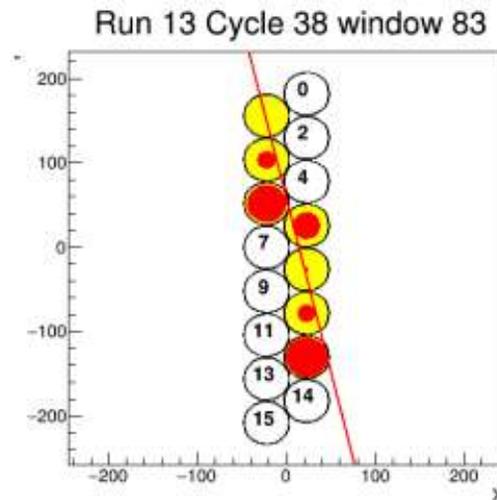
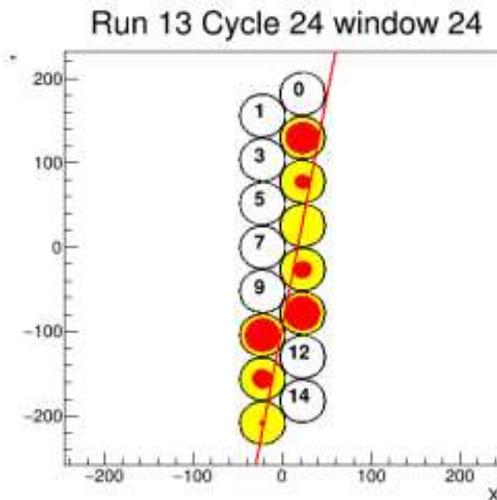
Счетные характеристики
камеры из 32-х трубок



Оценка пространственного
разрешения, сигма ~0.5 мм



Эффективность дрейфовых трубок в зависимости
от расстояния между сигнальной проволокой и
треком: зеленая кривая – имеется факт
срабатывания, красная кривая – отсутствует
срабатывание в 10 мм коридоре предварительного
прогноза (эффект δ -электронов)



Примеры реконструкции треков

Заключение

- Разрабатывается мобильный мюонный томограф, состоящий из двух годоскопов, регистрирующими элементами которых являются дрейфовые трубки (ДТ).
- Разработана конструкция ДТ диаметром 52 мм, налажено их производство и испытания.
- Разработаны трехслойные трековые камеры (ТК) с чувствительной площадью $\sim 1.7 \times 1.7 \text{ м}^2$, в каждом слое по 32 ДТ длиной $\sim 1.7 \text{ м}$.
- Разработаны, изготовлены и испытаны опытные экземпляры двухслойных ТК с чувствительной площадью $\sim 3.70 \times 0.85 \text{ м}^2$, в каждом слое по 16 ДТ длиной $\sim 3.7 \text{ м}$.
- Налажено производство 8-канальных усилителей на базе интегральных схем ОКА2, с ними испытаны опытные экземпляры ТК. Оптимальный порог чувствительности при испытаниях $\sim 1.5 \text{ мкА}$.
- Проверено, что достигнутая герметичность ДТ позволяет работать ТК мобильного томографа на рабочей газовой смеси $\text{Ar} + 7\% \text{CO}_2$ длительное время (год и более) без обновления газа.
- Подана заявка на грант РНФ.

Спасибо за внимание!