



Конференция
«Физика частиц при средних и высоких энергиях»
(Particle physics at intermediate and high energies)

Протвино 2–5 июня 2026 г



Трековые камеры из дрейфовых трубок
в НИЦ «Курчатовский институт - ИФВЭ»

Р.М. Фахрутдинов

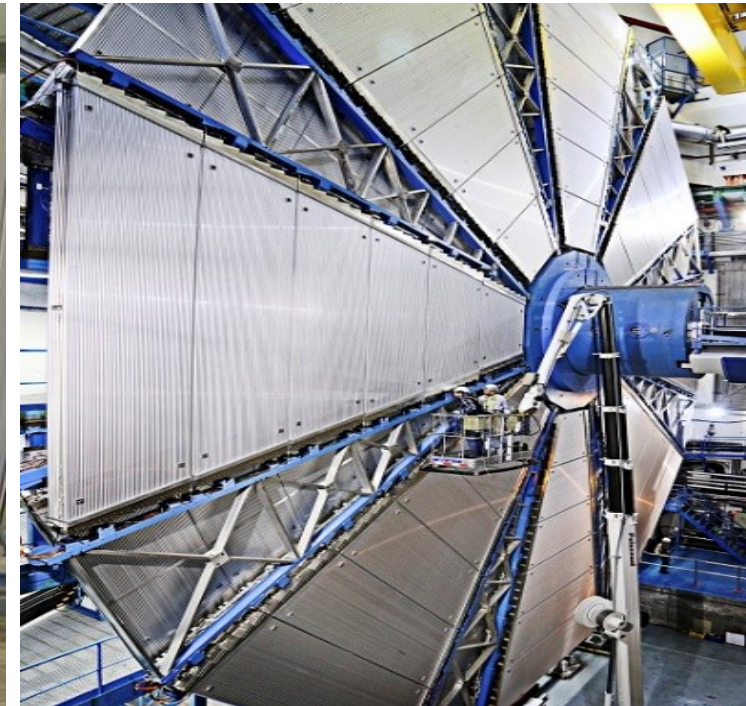
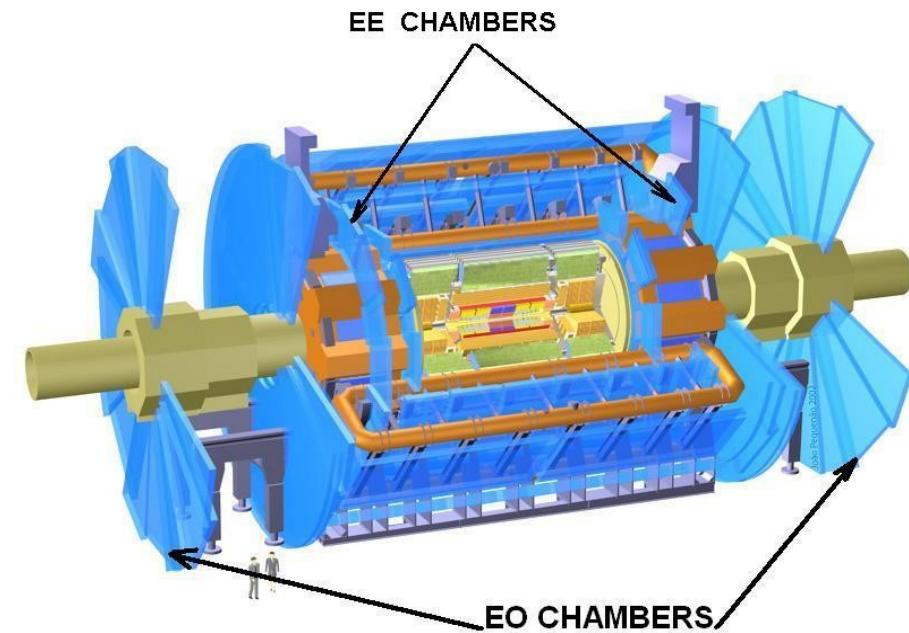
от имени Сектора больших трековых детекторов
Отделения экспериментальной физики



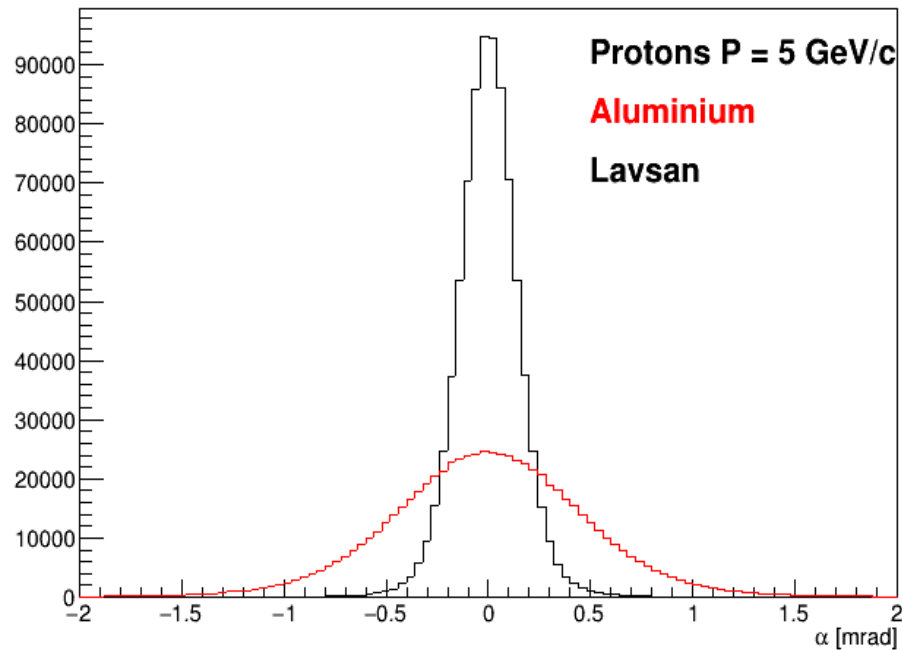
Посвящается Анатолию Андреевичу Борисову (1938 – 2026)



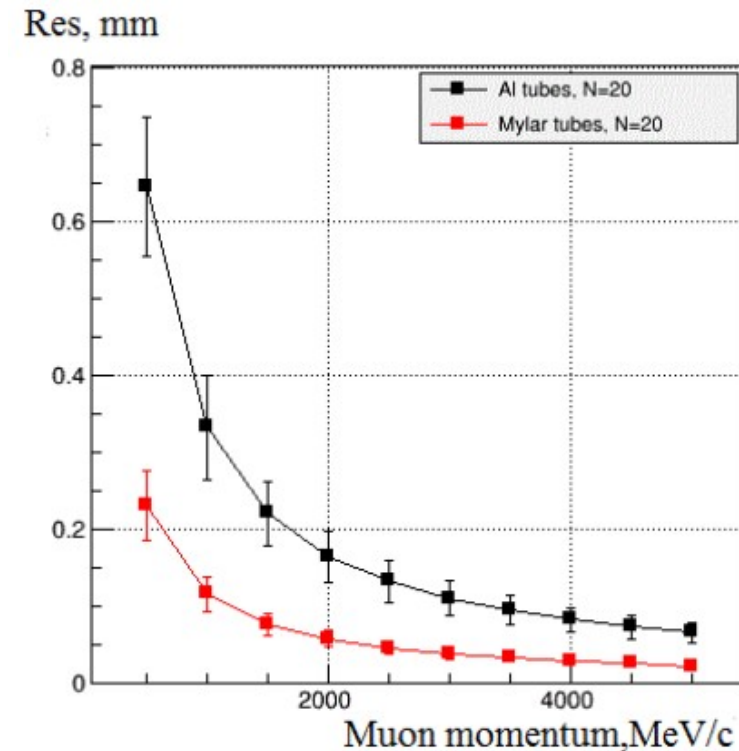
НИЦ «Курчатовский институт - ИФВЭ» являлся ответственным изготовителем EO&EE MDT (monitored drift tube) камер для мюонного спектрометра АТЛАС на БАК и изготовил 254 большие камеры с общим количеством ДТ ~ 75 тыс. шт. Многолетнее практически безотказное использование камер АТЛАС подтверждает успешность разработанной конструкции АТЛАС-ДТ диаметром 30 (в дальнейшем еще и 15) мм в корпусах из тонкостенной (0.4 мм) алюминиевой трубы.



Безусловно, трековые камеры из ДТ в металлическом корпусе, благодаря надежности и технологичности изготовления, оптимальны для оконечных частей (мюонных трекеров) физических установок в ускорительных экспериментах. Но для задач регистрации не только мюонов в оконечной части, но и всех заряженных частиц в средней части, важно минимизировать количество пассивного вещества на их пути. Преследуя эту цель, мы переработали (доработали) свою конструкцию ДТ-АТЛАС: Al труба заменена на тубус из лавсана с толщиной стенки 0.125 мм, обе стороны которого (внутренняя и внешняя) напылены алюминием. Толщина 0.125 мм позволяет ДТ оставаться самоподдерживающимся элементом – она выдерживает натяжение сигнальной проволоки 350 г и сохраняет свою правильную круглую форму без использования каких-либо (внутренних либо внешних) поддержек (в отличие от широко используемых строу-трубок). (Нижеприведенные расчеты выполнены О.П. Ющенко).

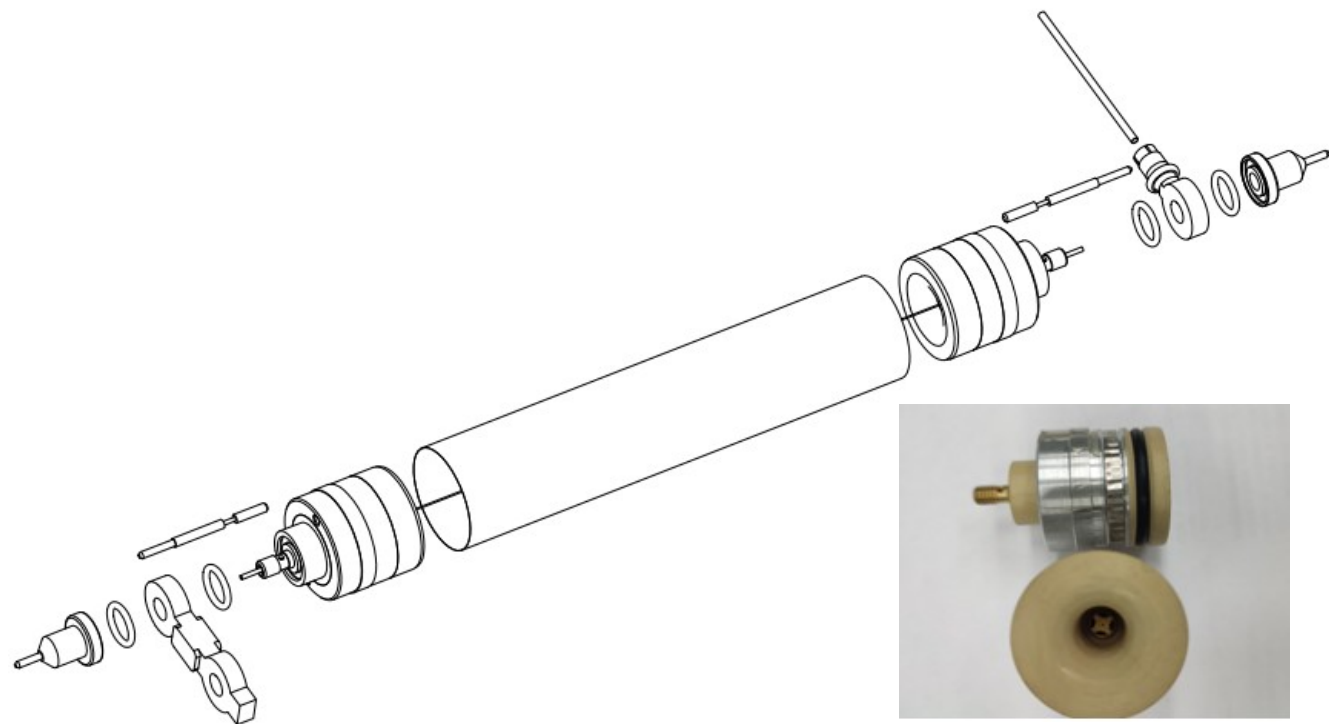
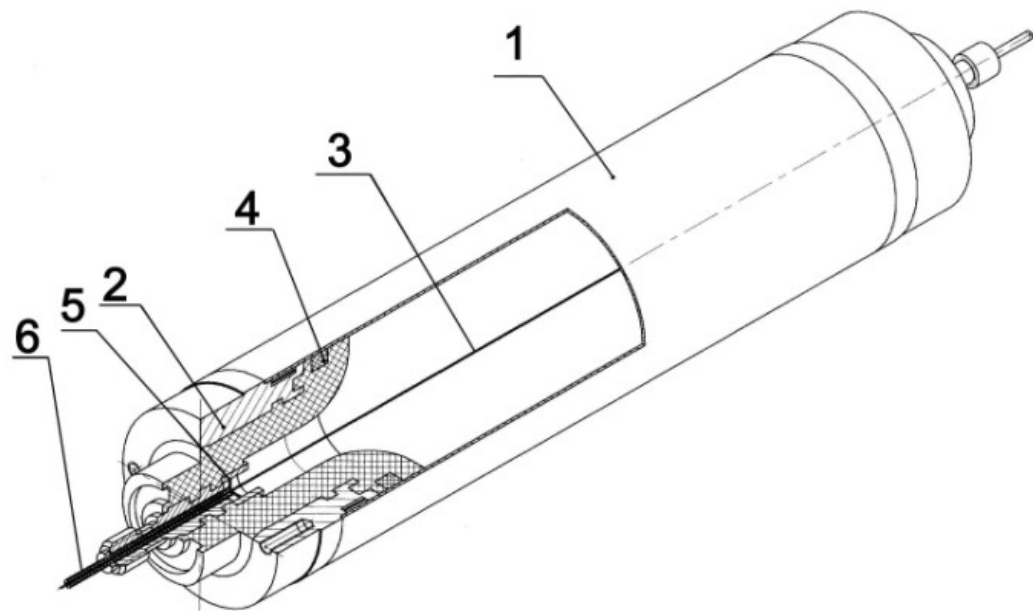


Average angle of multiple Coulomb scattering after passing 12 DTs having 0.4 mm Al or 0.125 mm thick mylar wall (GEANT4)



Influence of multiple Coulomb scattering to spatial resolution in case DTs made of Al or mylar (GEANT4)

Конструкция ДТ, разработанной в ИФВЭ для АТЛАС и для «домашних» экспериментов на У-70

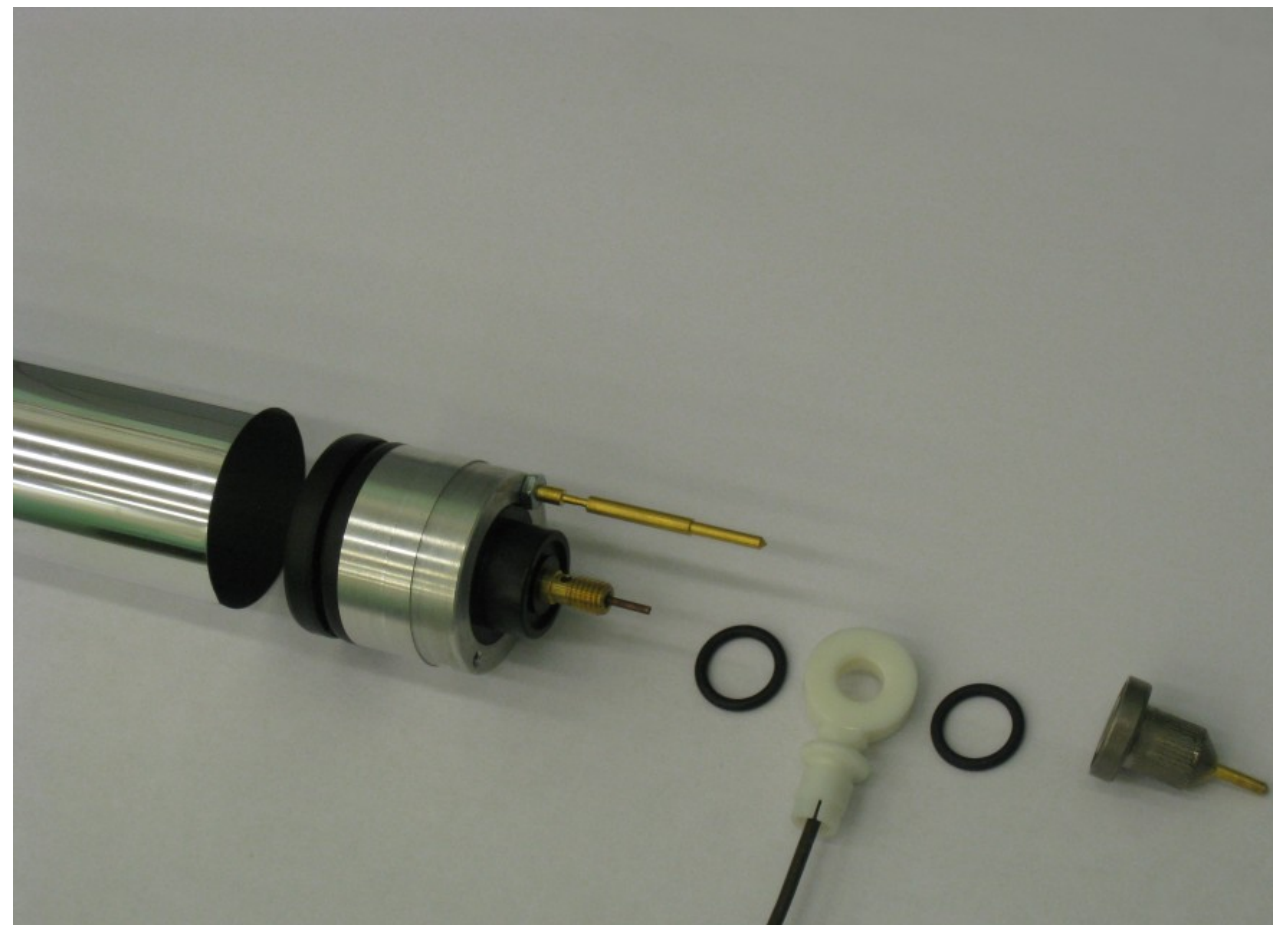


ДТ, используемая в мюонных камерах АТЛАС (Al корпус)



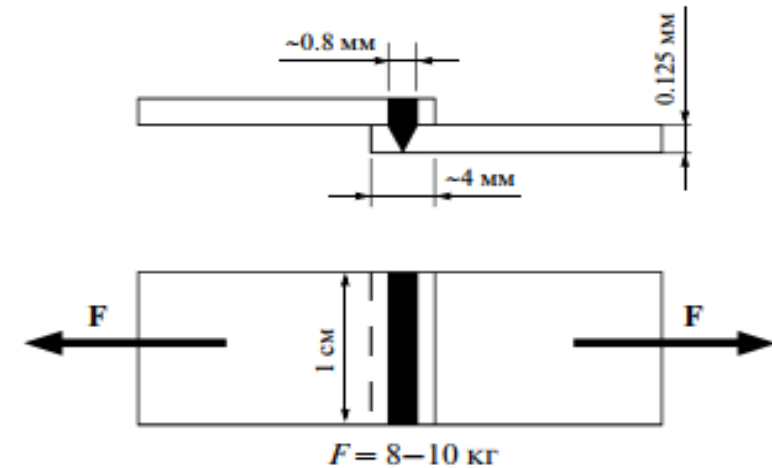
Вверху – заглушка для Al труб, внизу - для лавсановых

Лавсановая 30-мм дрейфовая трубка в разобранном виде



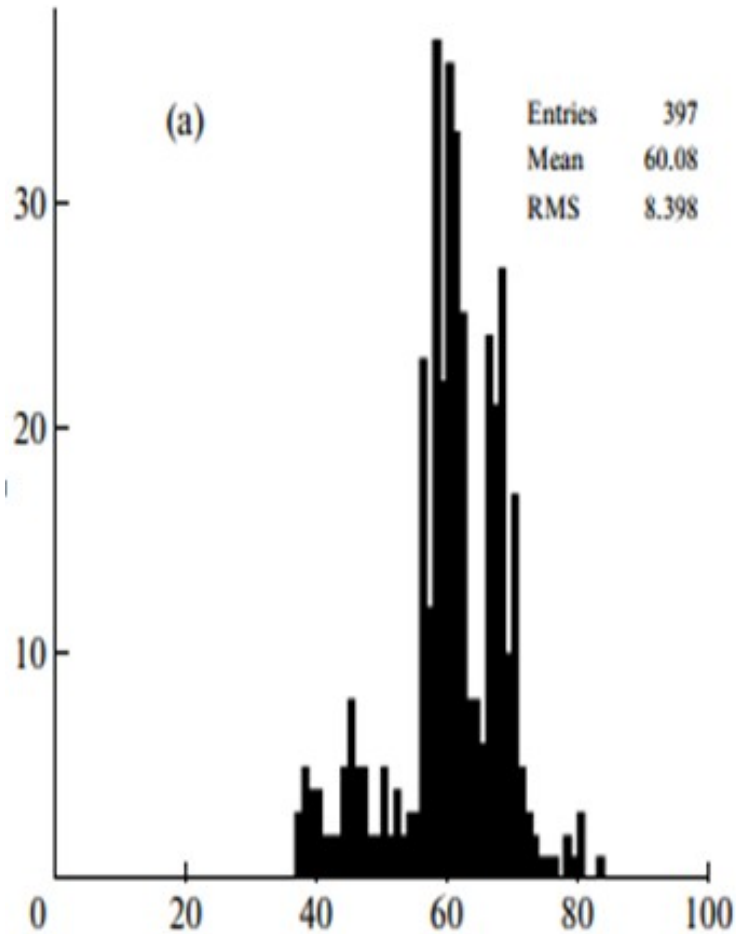
Толщина стенки лавсановой трубки 0.125 мм

Ультразвуковая сварочная установка для изготовления тубусов из лавсановых листов толщиной 0.125 мм. Лист оборачивается вокруг стального калиброванного шлифованного стержня, УЗС-головка сваривает продольным швом .

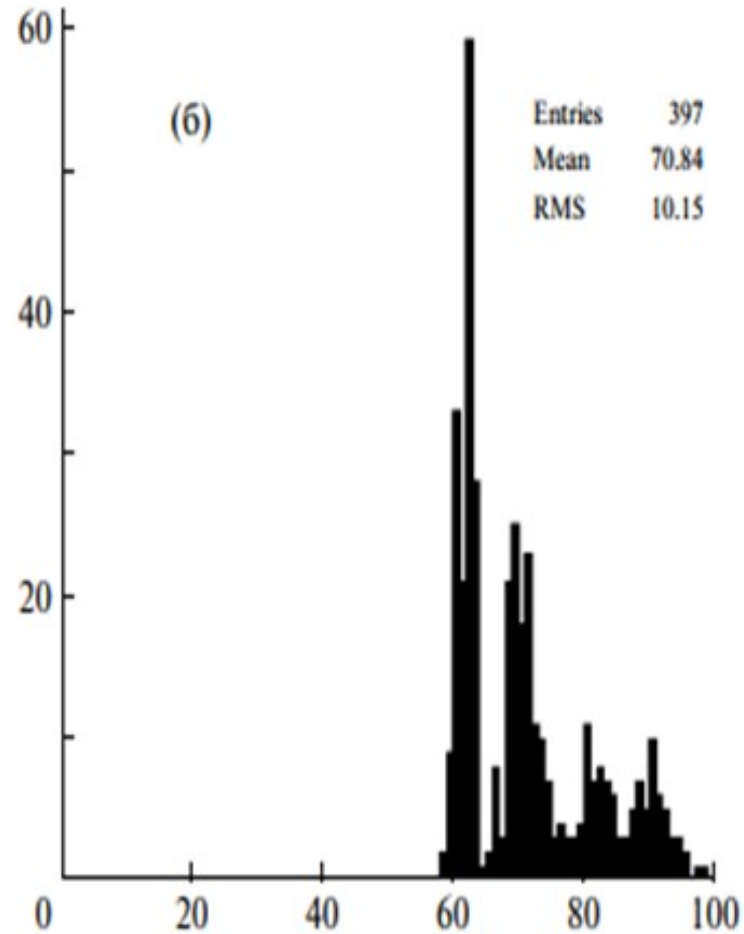


Разрывное усилие – более 8 кг

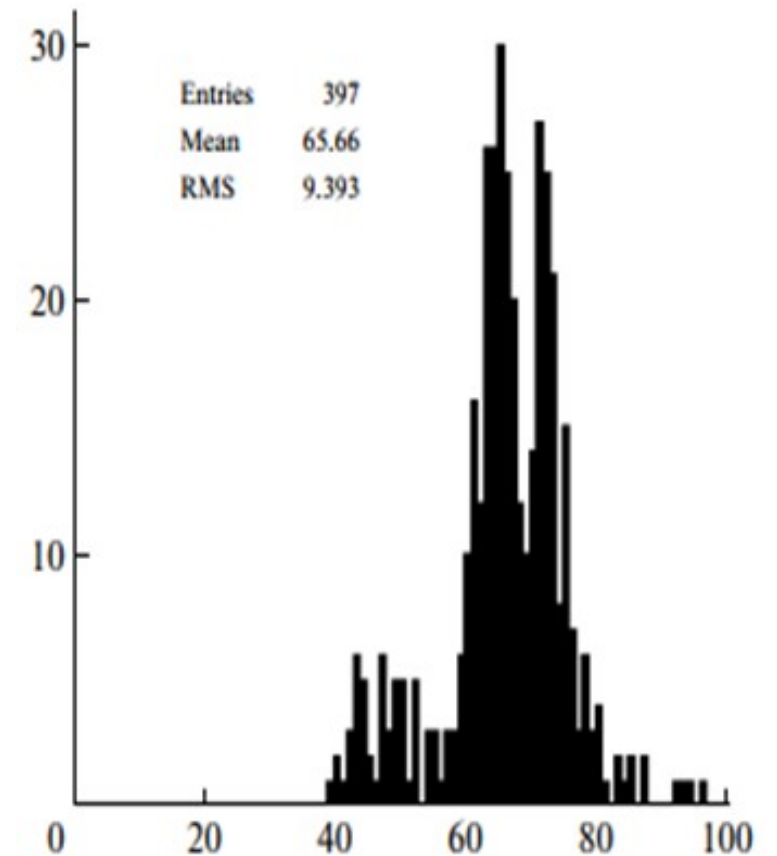
До сварки, измеряется омическое сопротивление обеих сторон свариваемого листа, для того чтобы сторону с меньшим сопротивлением использовать для внутреннего слоя тубуса, который будет служить катодом ДТ.



Сопротивление (в Ом)
внутреннего слоя тубуса

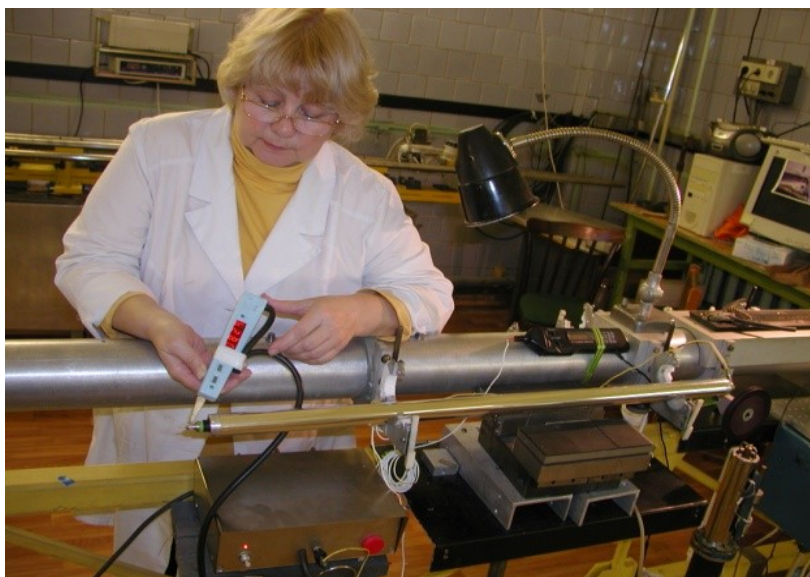


Сопротивление (в Ом)
внешнего слоя тубуса

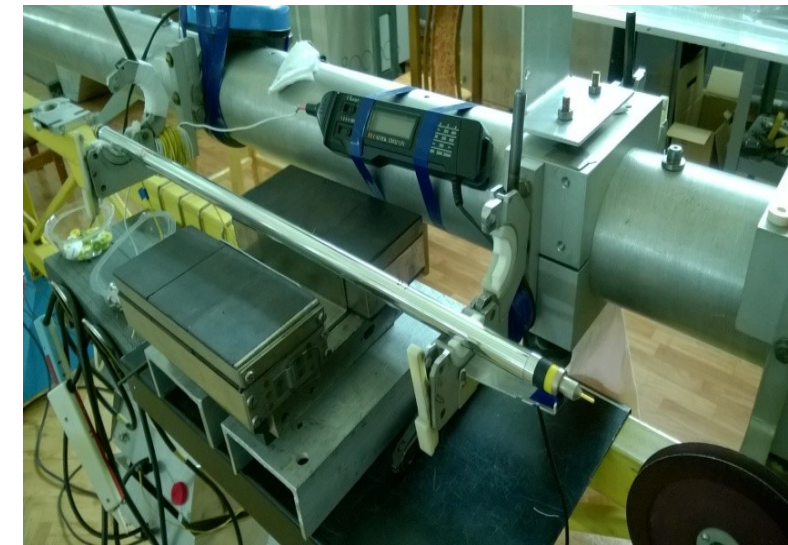
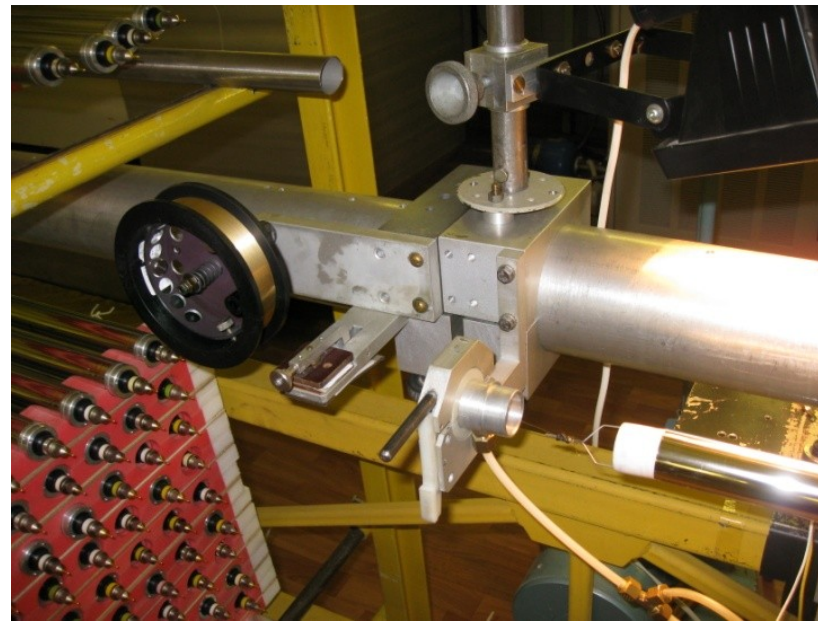


Сопротивление между заглушками
после их вклеивания в тубус

Участок сборки ДТ в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ



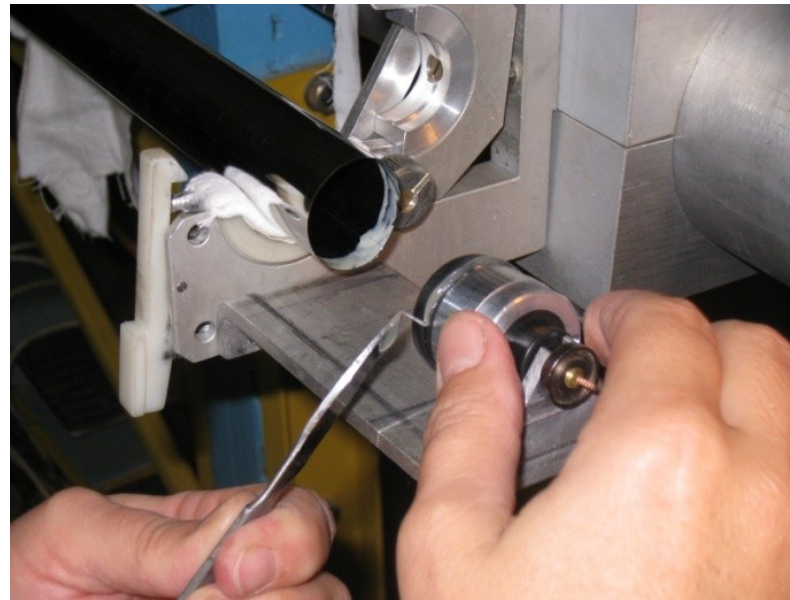
Сборка ДТ



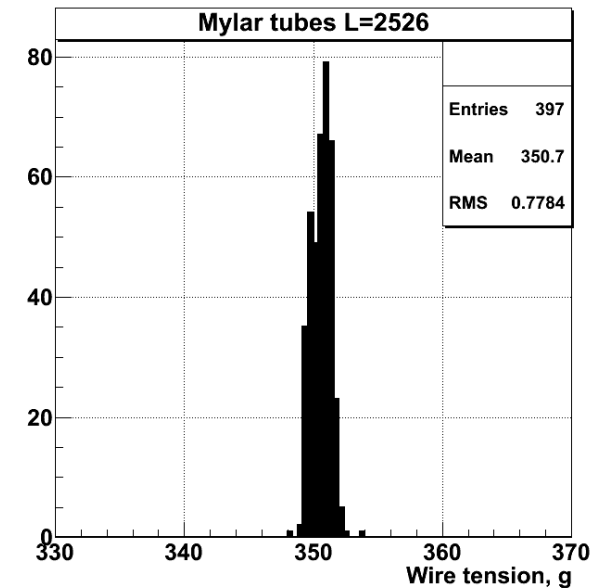
Контроль натяжения сигнальной проволоки по частоте резонансных колебаний в магнитном поле



Фиксация (обжим) проволоки в капиллярной трубке



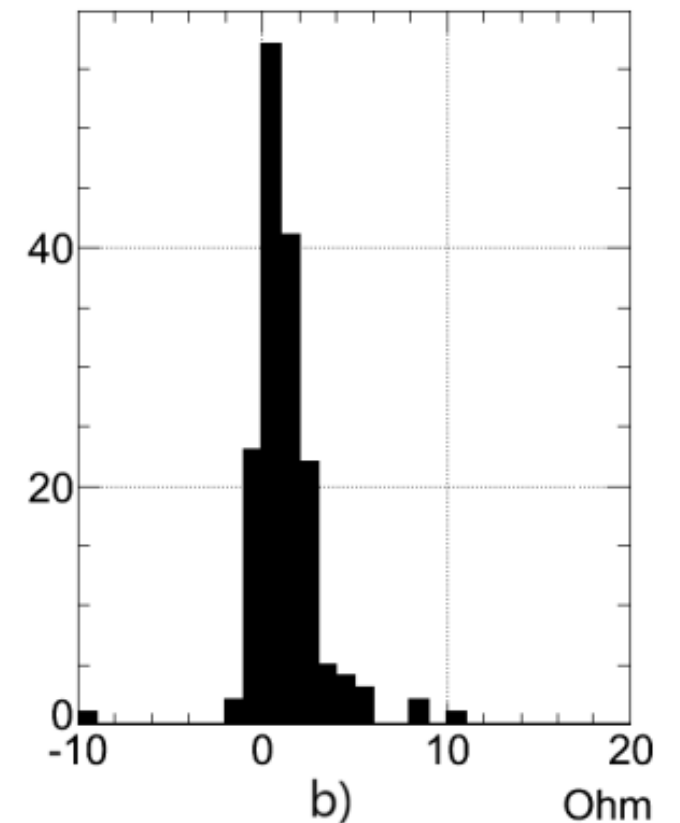
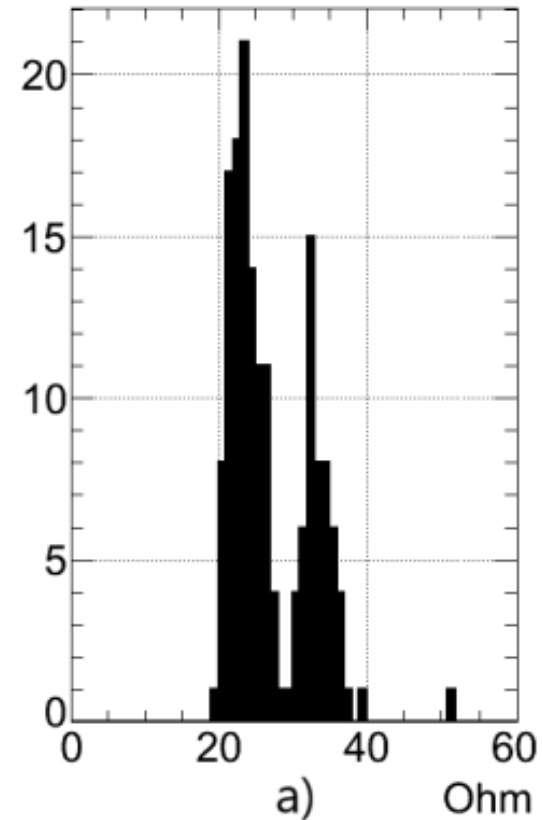
Заглушка обмазывается клеем и вставляется в тубус



Для обеспечения надежного электрического контакта между внутренним слоем тубуса (с Al покрытием) и Al поверхностью торцевой заглушки, тубус над клеевым соединением плотно обжимается механически, ДТ устанавливается в специальный стенд и выдерживается там вплоть до окончания затвердевания клея. Данный стенд обеспечивает также заданную длину ДТ и клок-ориентацию заглушек.

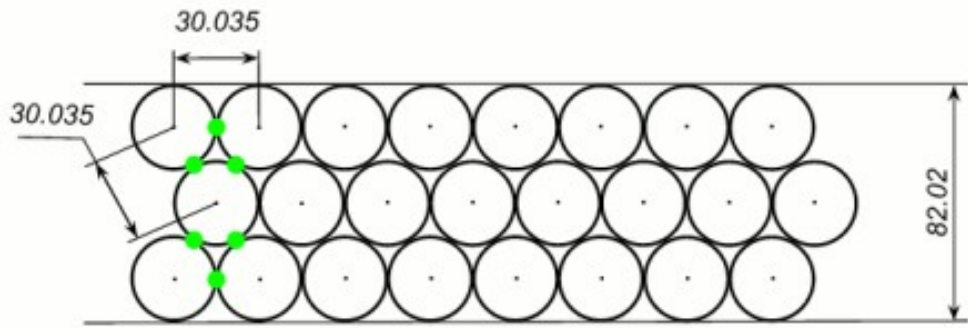


Стенд «выдержки» ДТ при вклейке заглушек



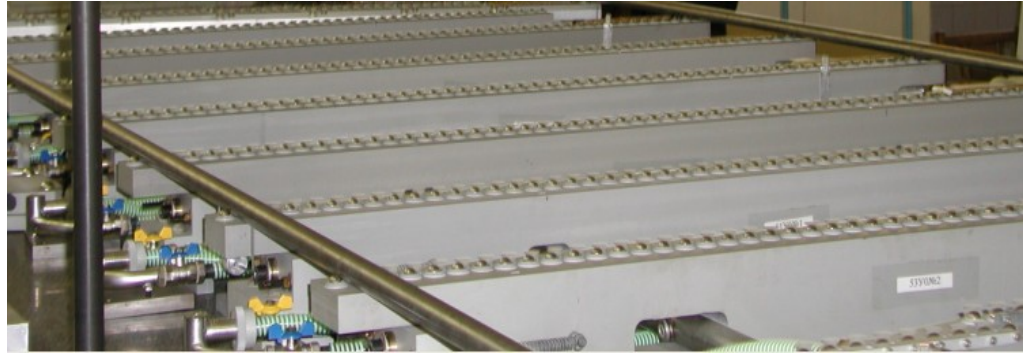
(а) - начальное электрическое сопротивление 30-мм ДТ, $L = 1.3$ м
(б) на сколько сопротивление ухудшилось за 2 года.

Склейка мультислоев из 30-мм ДТ

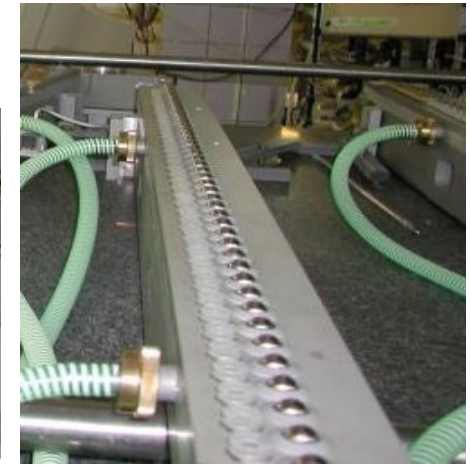


● - GLUE LOCATION

«Плотная» схема расположения ДТ в камере



Позиционирующие «комбы» на гранитном столе



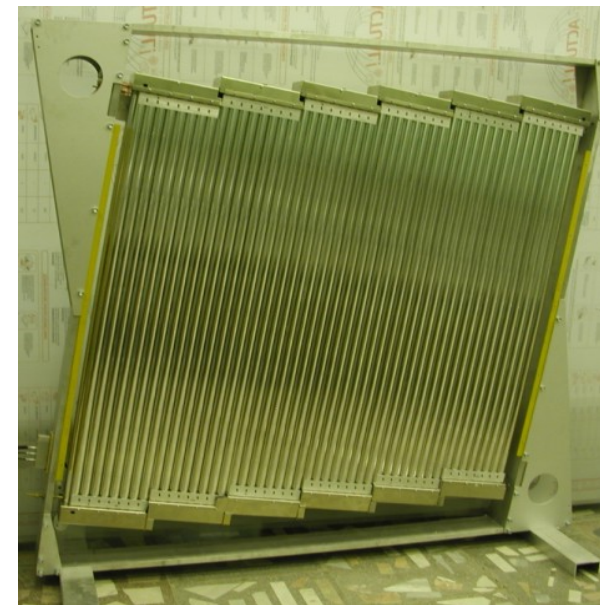
Автоматизированная клеевая машина

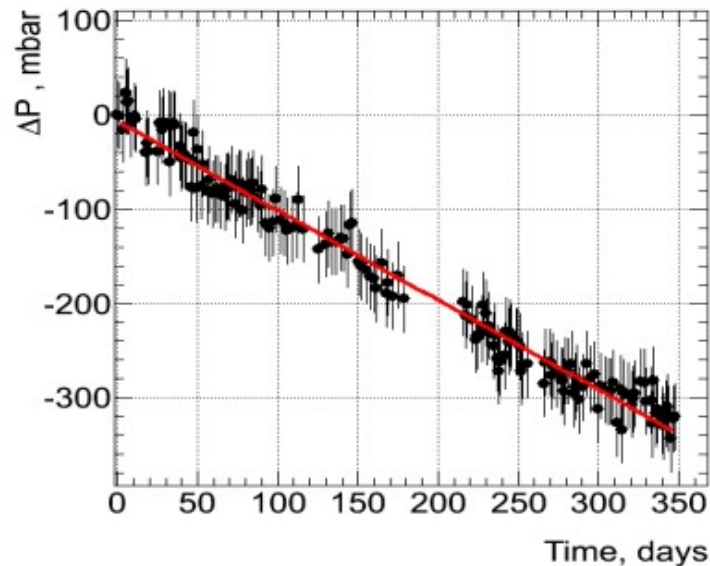


Склеенные 3-слойные модули из 30-мм ДТ

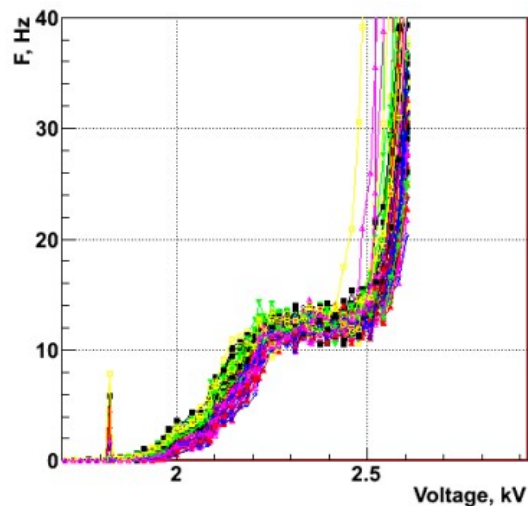


**Камеры из 30-мм лавсановых трубок. Макс. длина ДТ – 2.5 м.
35 камер, в сумме объединяющих ~ 5000 ДТ, уже изготовлены и используются в
экспериментах на У-70.**

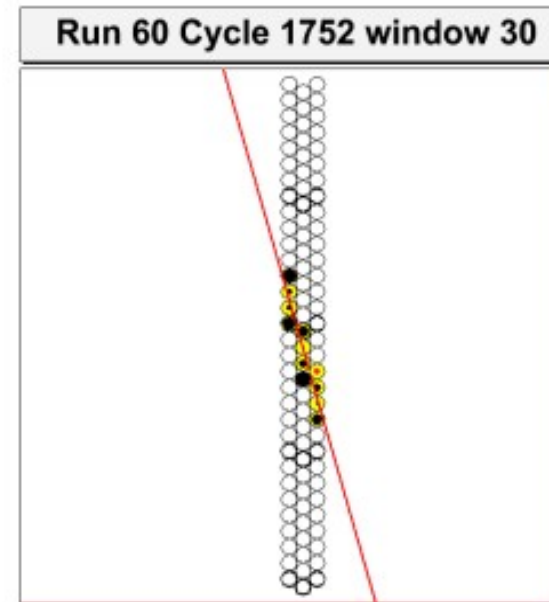
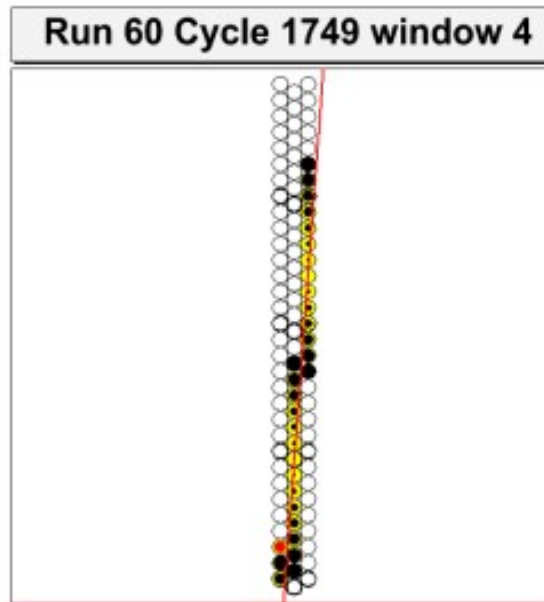




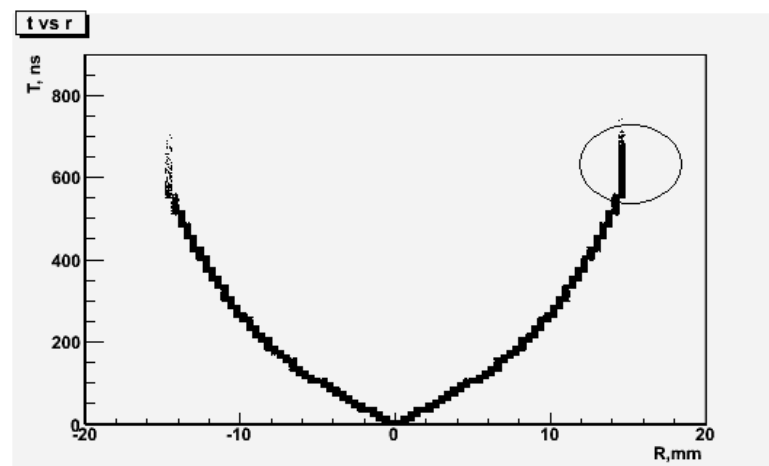
Оценка герметичности камеры из 72 ДТ по потере избыточного давления, $L = 1056$ мм. $\text{Ar} + 7\% \text{CO}_2$; $P_0 = 1608$ мбар. $dP/dt \approx -1$ мбар/день



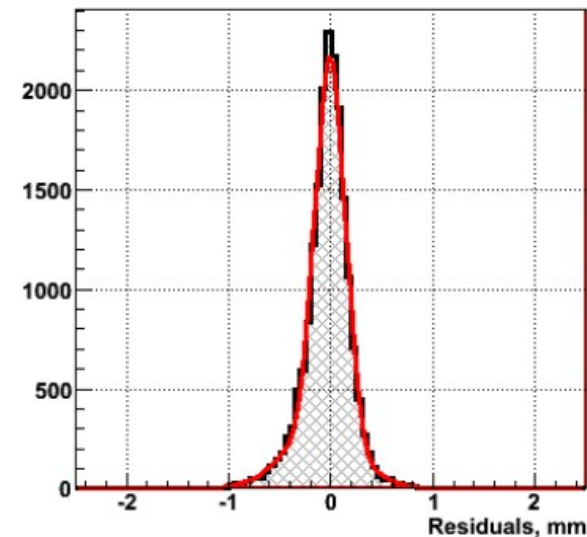
Типичная счетная характеристика (естественный радиационный фон)



Примеры реконструкции мюонных треков



Типичное $R(t)$ – соотношение, заполнение $\text{Ar} + 7\% \text{CO}_2$

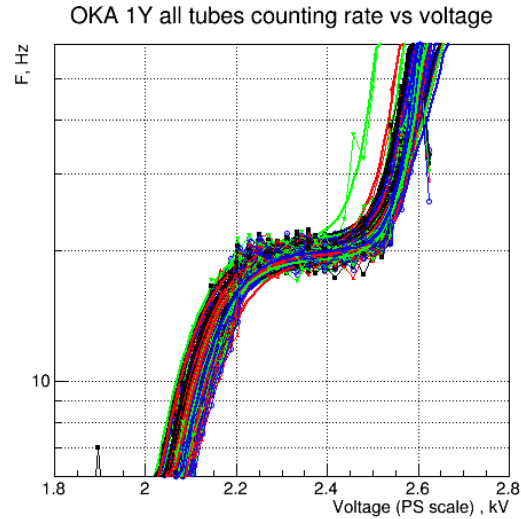


Распределение резидюалсов ¹⁴ для длинных треков. $\sigma \approx 0.2$ мм

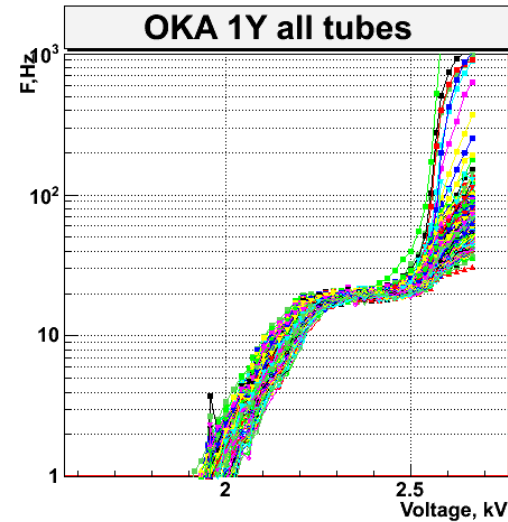
Очевидны преимущества, если камера длительное время способна работать без обновления рабочей газовой смеси. Как обстоит дело с лавсановыми камерами? Пример ниже – счетные х-ки камеры ОКА1У (144 ДТ, L = 1536 мм. Газовое заполнение: Ar + 7%CO₂ при P₀ = 1524 мбар).

Достаточно длительное время имеется плато по напряжению, общее для всех ДТ.

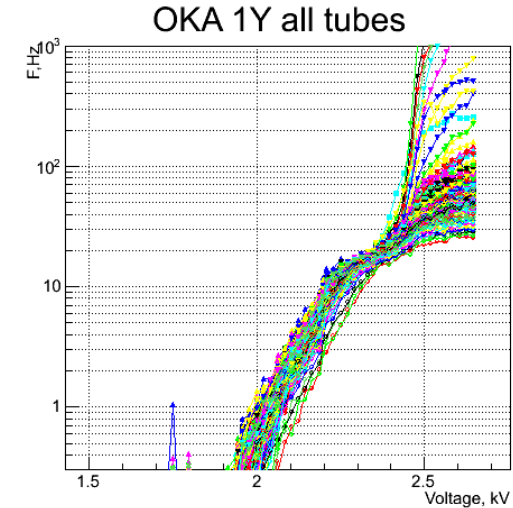
just after gas filling



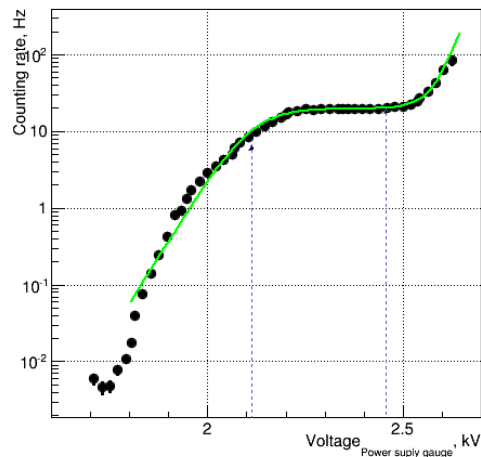
in 75 days after gas filling



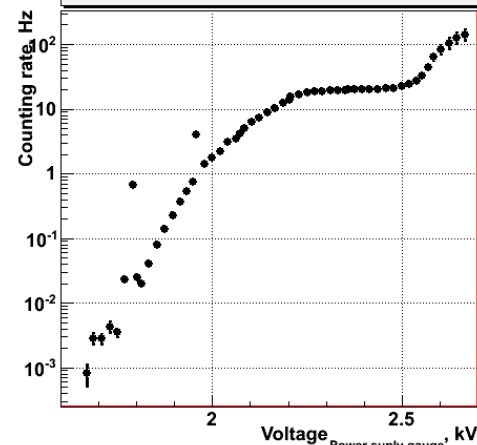
in 467 days after gas filling



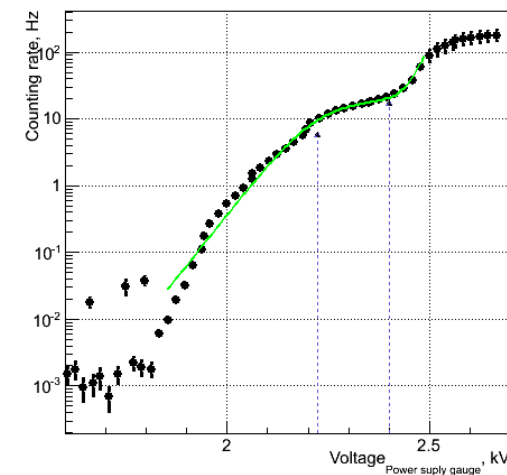
OKA1Y Average counting rate vs. voltage



OKA1Y Average counting rate vs. voltage



OKA1Y Average counting rate vs. voltage

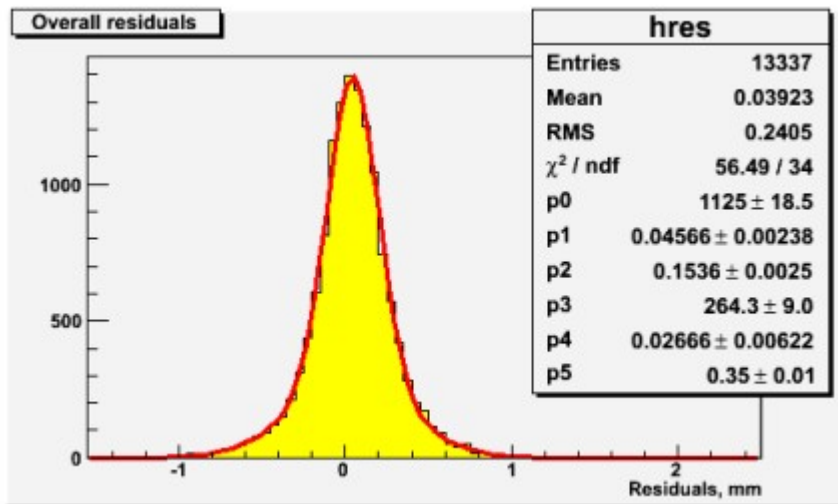


Понятно, что для реконструкции трека с высокой точностью требуется знание $r(t)$ – соотношения с высокой точностью. Также понятно, что в «беспродувной» моде оно «плышет». Помогает автокалибровка – периодическое обновление/корректировка $r(t)$ – соотношения итерационным методом на основе анализа параметров трека в заданный момент времени.

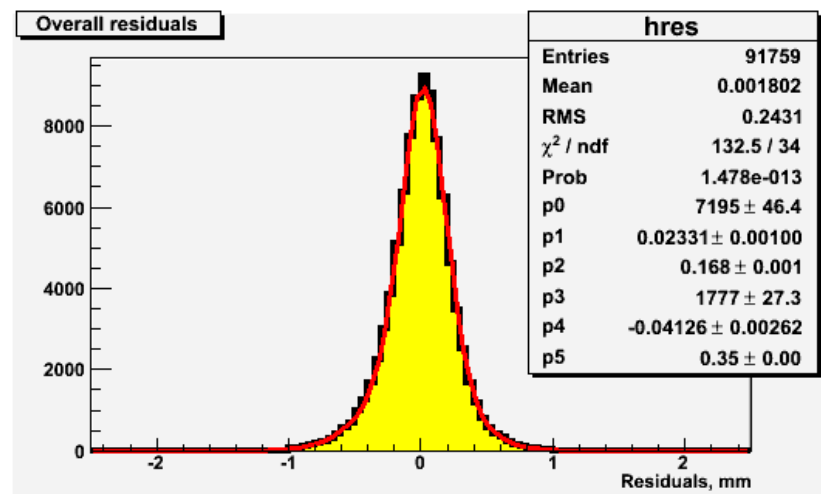
Примеры ниже – камера “Спасчарм”, 96 лавсановых ДТ, $L = 816$ мм. Газовое заполнение: $\text{Ar} + 7\% \text{CO}_2$ при $P_0 = 1524$ мбар, затем газозаполняющая система отключена.

Распределение резидюалсов для длинных треков космических мюонов, слева направо:

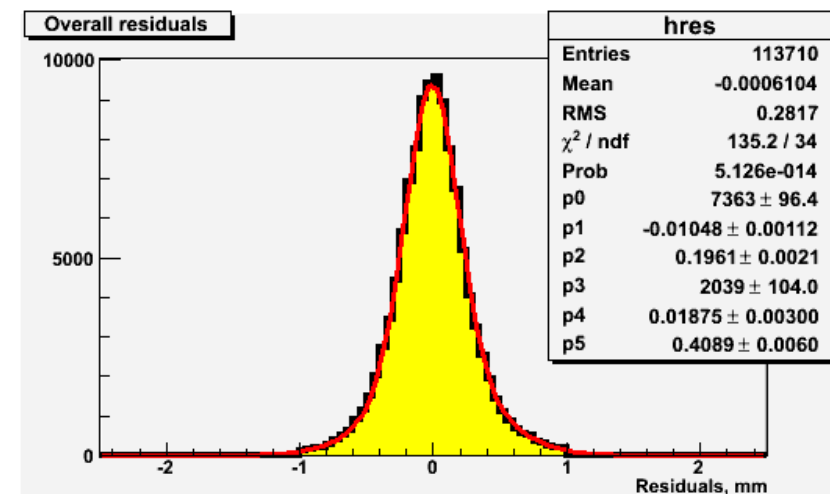
- в день газового заполнения;
- через 139 дней;
- через 159 дней.



$\sigma \approx 0.16$ мм



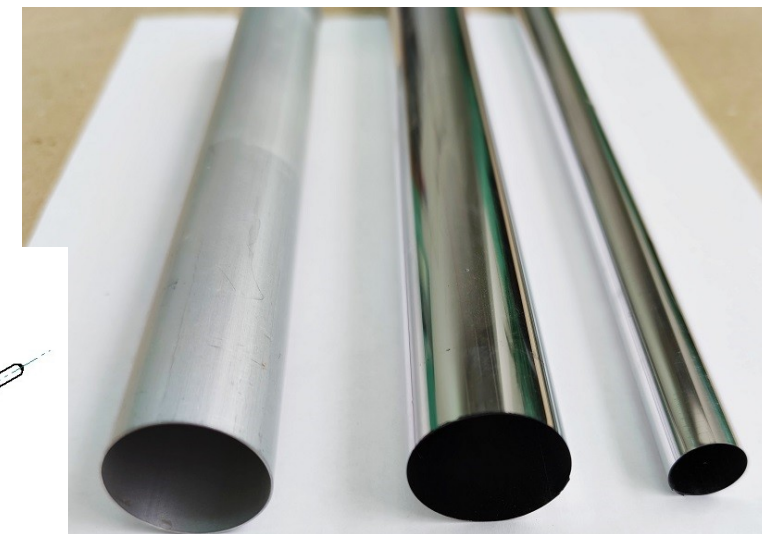
$\sigma \approx 0.17$ мм



$\sigma \approx 0.20$ мм

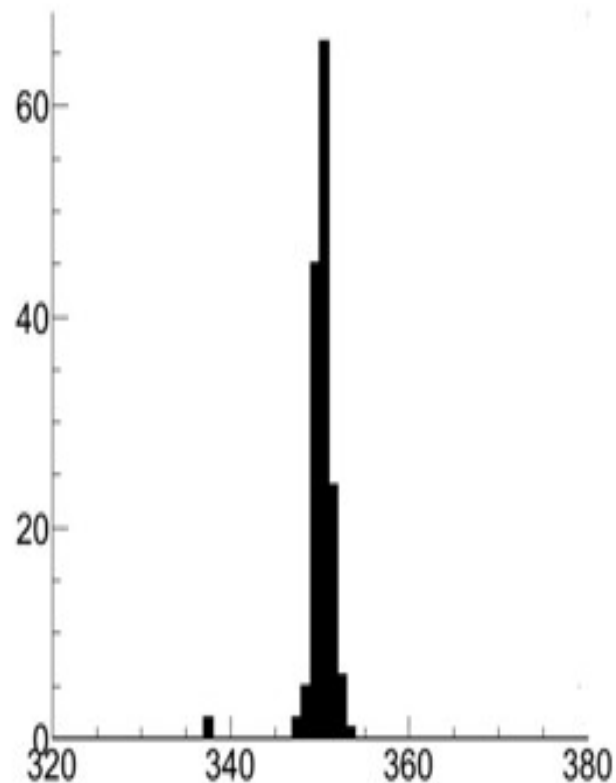
В «традиционных» ДТ двухтрековое разрешение равно радиусу ДТ. В частности, поэтому для работы при больших нагрузках важно иметь ДТ малого диаметра. Как показано в АТЛАСе, с учетом всех факторов грузочная способность («rate capability») 15-мм ДТ примерно в 10 раз выше, чем 30-мм ДТ.

ДТ в 15-мм лавсановой трубе

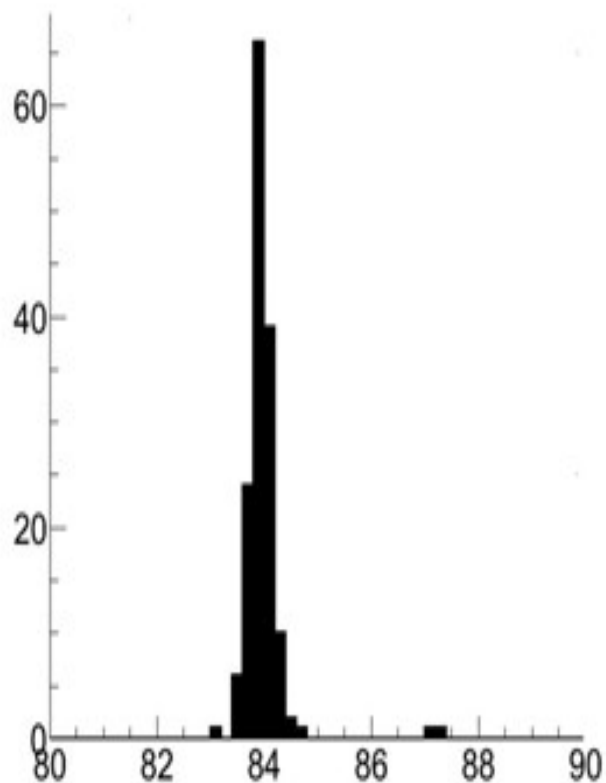


Торцевые заглушки для 15-мм ДТ

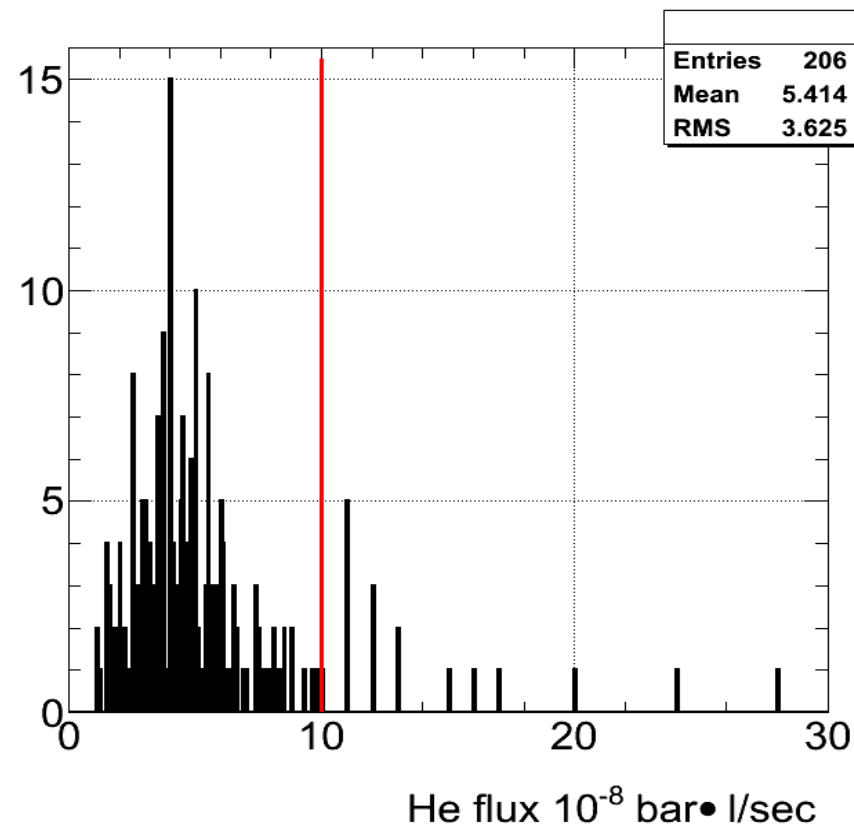
На верхнем фото слева направо:
30-мм Al труба, 30-мм лавсановая труба,
15-мм лавсановая труба



Распределение измеренных натяжений проволоки (в граммах) в камере с 15-мм ДТ длиной 2526 mm

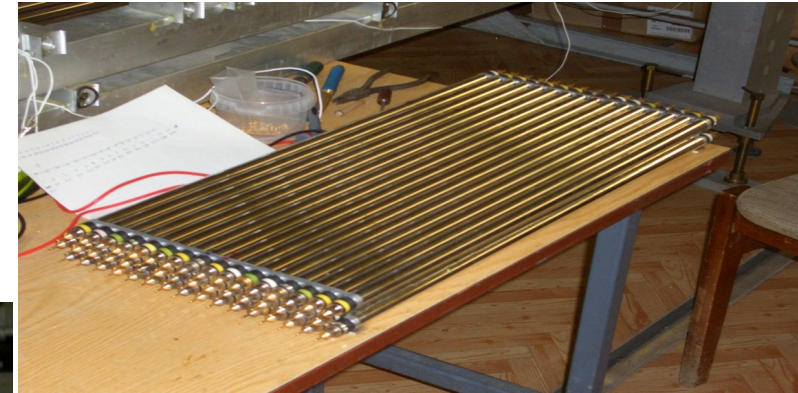
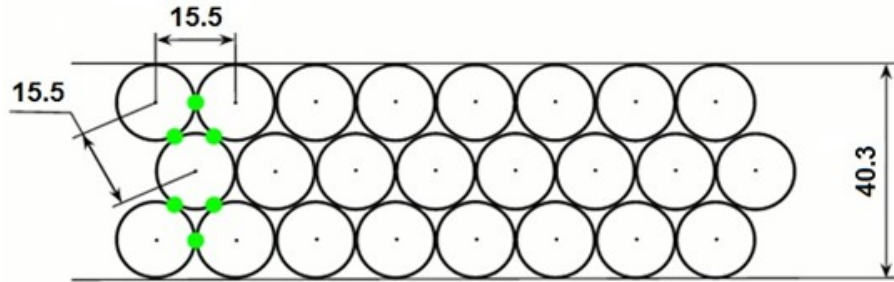


Провисание проволок (мкм) в камере с ДТ длиной 2526 mm



Распределение по уровню герметичности (“He gas leakage”) в камере с ДТ длиной 2526 мм. Измерения с гелиевым масс-спектрометром. Красная линия – установленный допустимый максимум течи.

Склейка модулей из 15-мм ДТ отличается от склейки 30-мм ДТ. 48 шт. 15-мм ДТ склеиваются между собой одновременно в специальной монтажной кассете, образуя трехслойный модуль с «плотной упаковкой». Высокая точность позиционирования трубок обеспечивается «ребенками», расположенными через ~ 20-25 см. Для сборки камеры нужного размера, требуемое количество 48-канальных модулей объединяется в общей раме (уже без клея).



Склеенный модуль из 15-мм ДТ



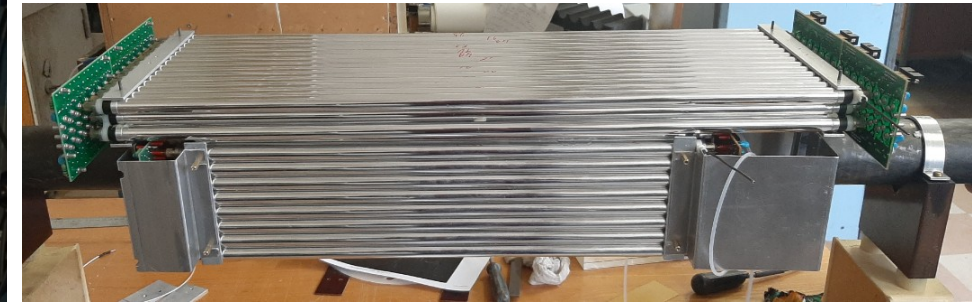
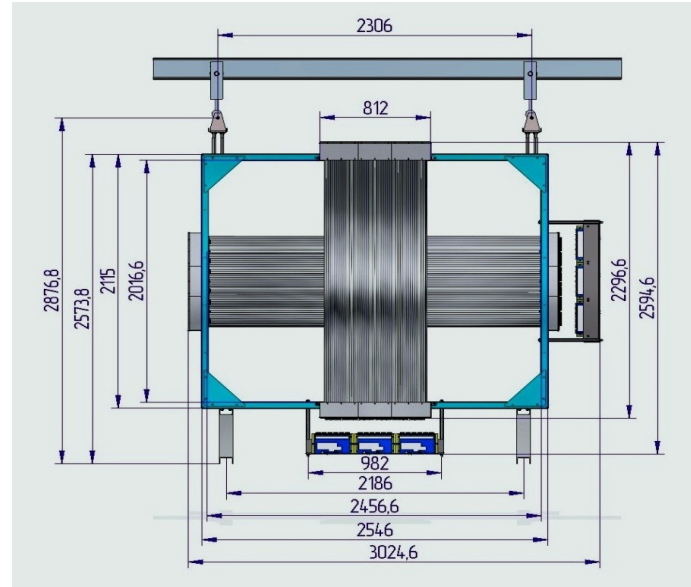
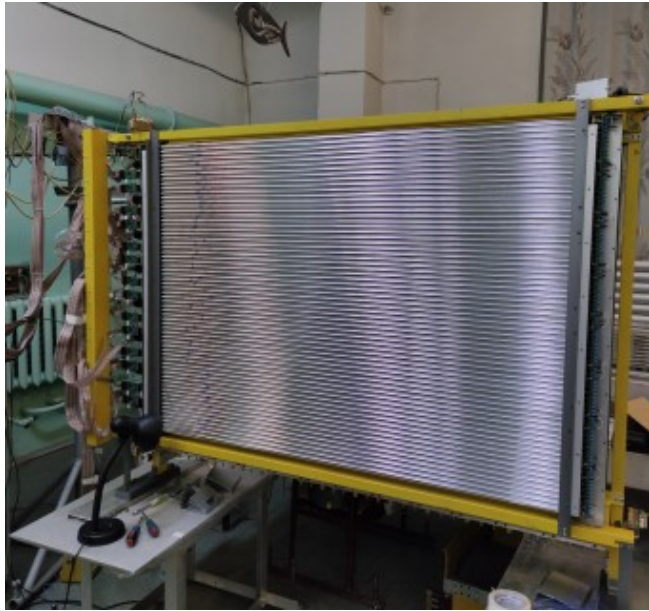
Монтажная кассета

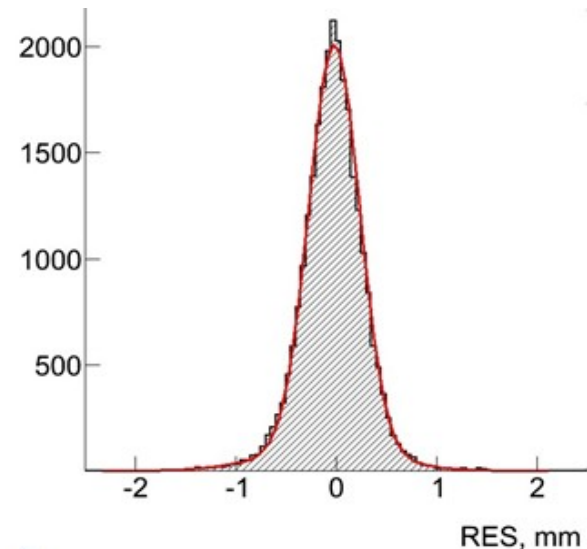
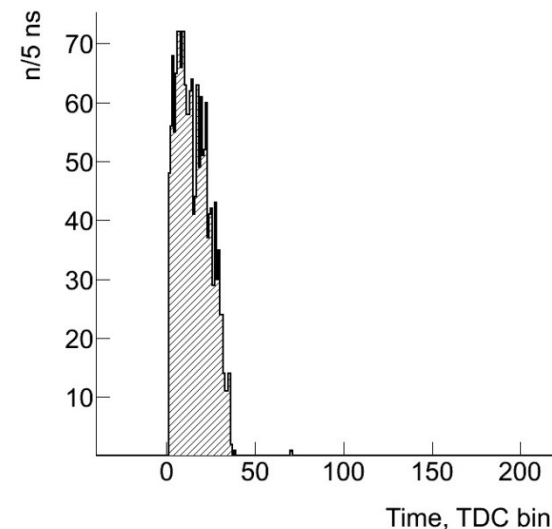
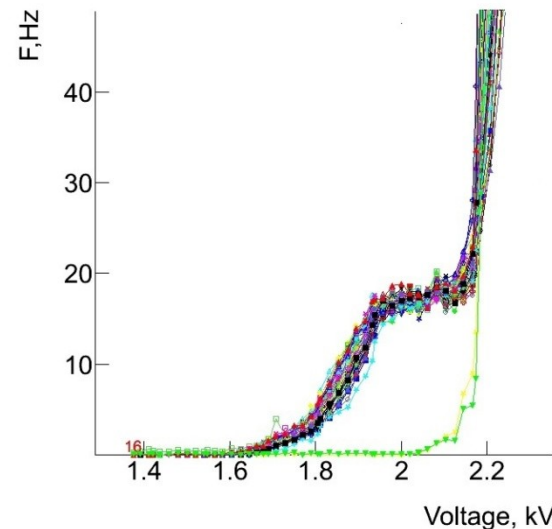
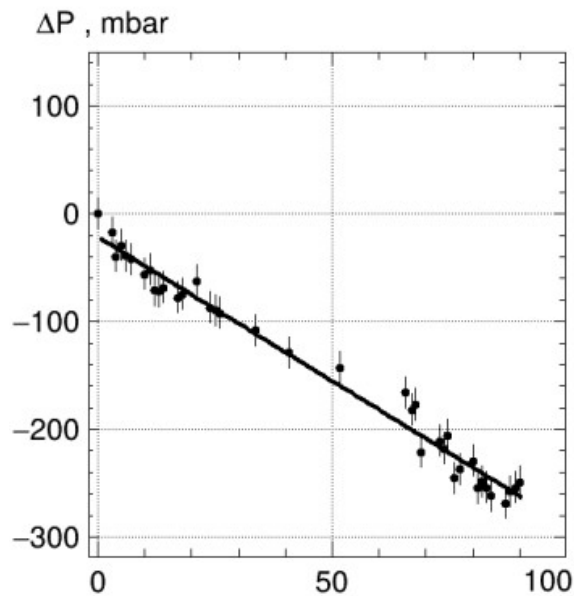


48 шт. 15-мм ДТ в монтажной кассете



**Камеры из 15-мм лавсановых ДТ. Максимальная длина ДТ ~ 2.5 м.
Для установок на У-70 изготовлено 13 камер с общим количеством ДТ более 2000 шт.**



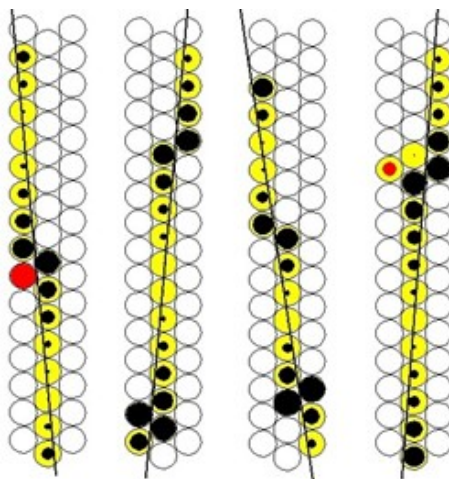
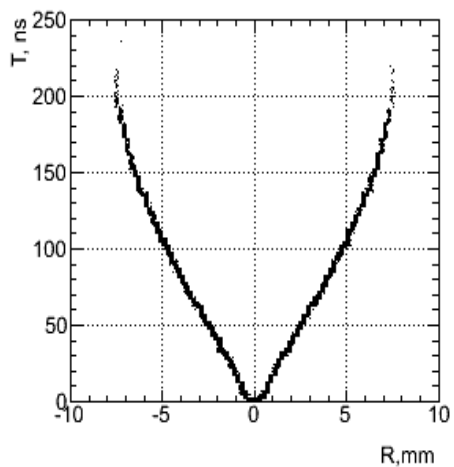


X-ка герметичности – падение избыточного давления камеры из 72 ДТ = 0.5 м, $dp/dt = -2.33 \pm 0.1$ мбар/день. Газ Ar + 7%CO₂

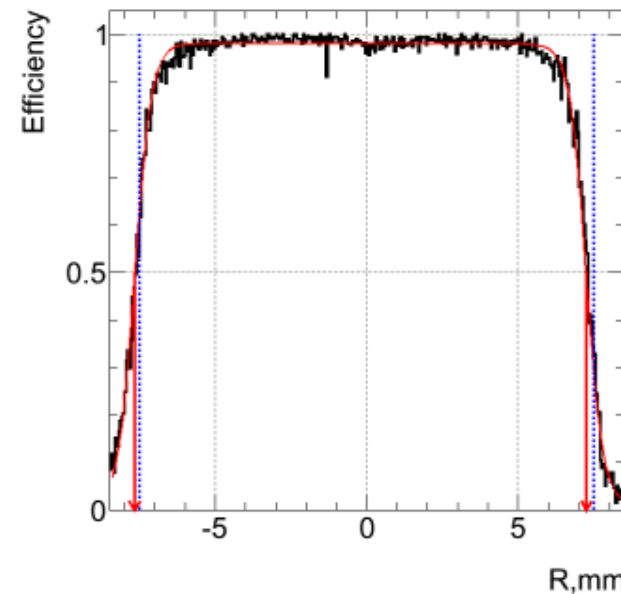
Типичная счетная x-ка камеры (зависимость счета L проволок от напряжения)

Типичный ВЦП-спектр

Распределение резидюалсов для длинных треков. $\sigma \approx 0.25$ мм



Примеры восстановления треков космических мюонов



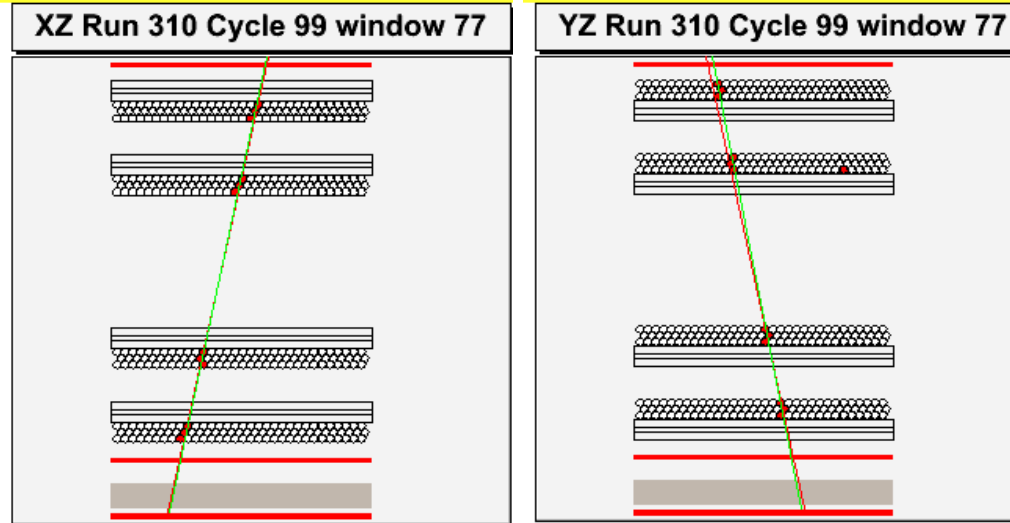
Эффективность 15-мм ДТ

R(t) соотношение, газ Ar + 7%CO₂

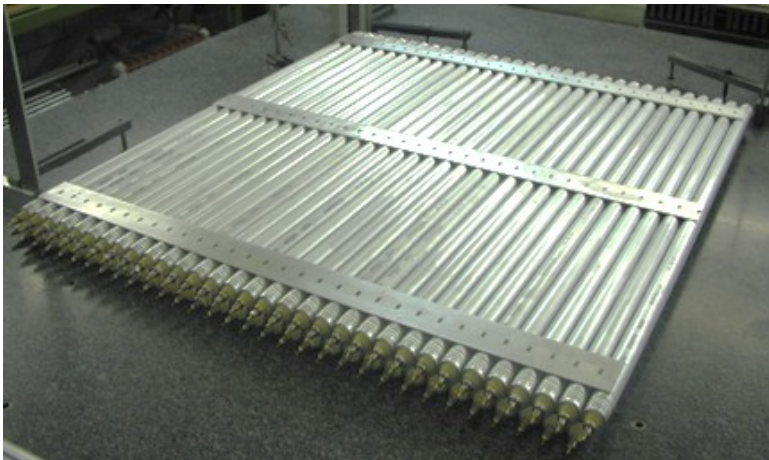
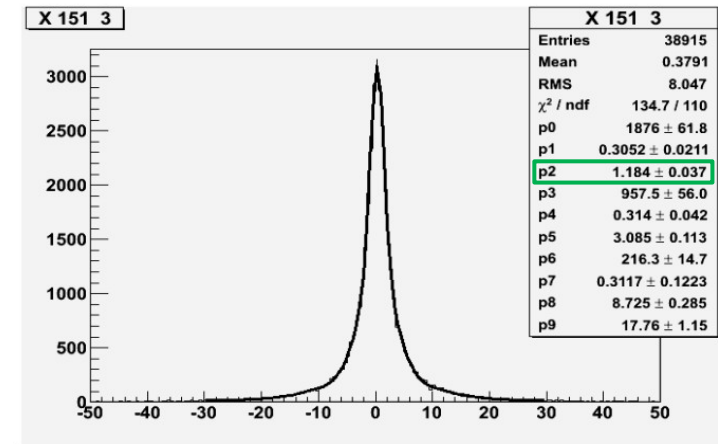
1 x 1 м² прототип мюонного томографа на космическом излучении

8 камер из ДТ в Al корпусе диаметром 30 мм, толщ. стенки 0.4 мм.

Всего 768 ДТ. Рабочий газ: Ar + 7%CO₂. Пространств. разрешение ДТ: ~0.3 мм



Пример восстановления мюонного трека



Каждая камера состоит из 3 слоев ДТ, в каждом слое 32 ДТ

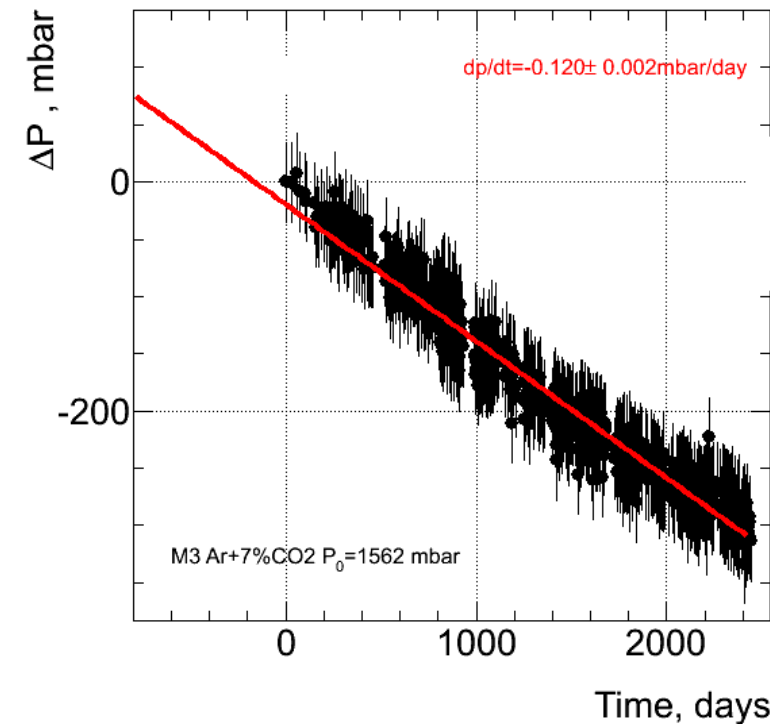
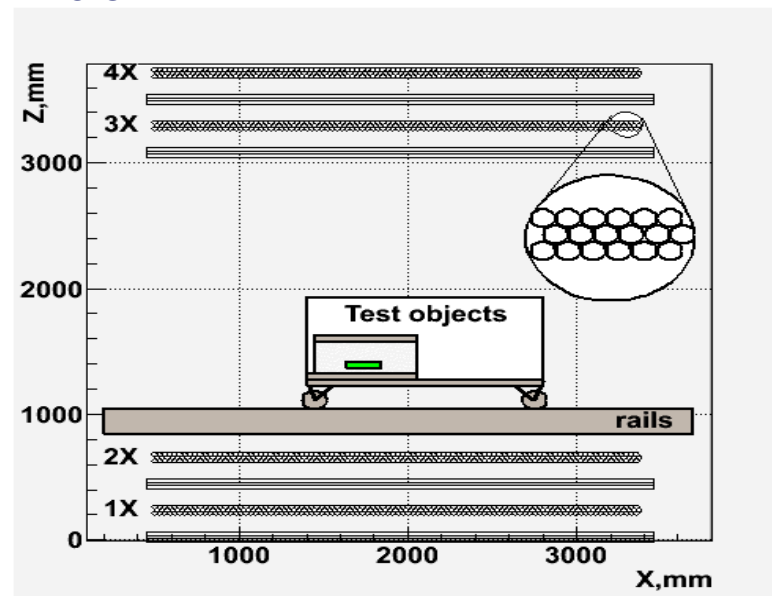
Оценка углового разрешения томографа: распределение разности углов трека, измеренного верхним и нижним регистрирующим блоком.

$$\sigma = 1.18 \pm 0.04 \text{ mrad}$$

3 x 3 м² прототип мюонного томографа: 16 камер, каждая 3 x 1.5 м², всего 2304 ДТ

ДТ в Al корпусе диаметром 30 мм, рабочий газ: Ar + 7%CO₂.

Пространственное разрешение ДТ: ~ 0.3 мм .

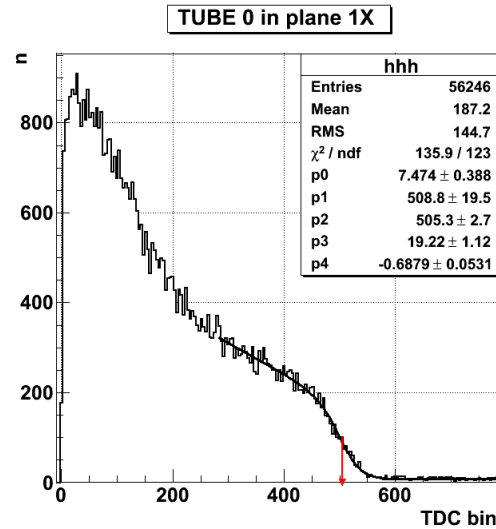
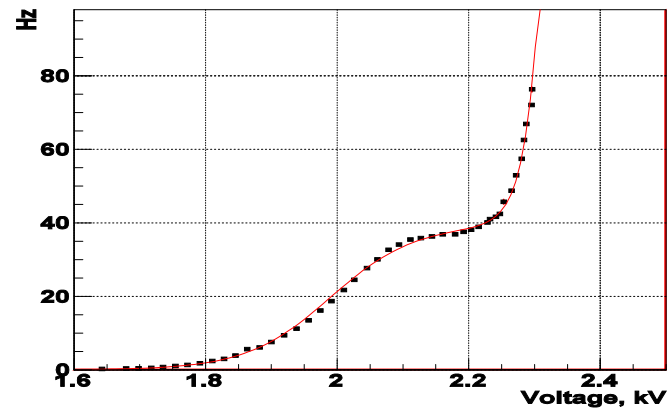


Высокая герметичность ДТ и использование метода автокалибровки для регулярного определения $r(t)$ -соотношения позволяет работать длительное время - **несколько лет!** - без постоянного продува либо обновления рабочей газовой смеси

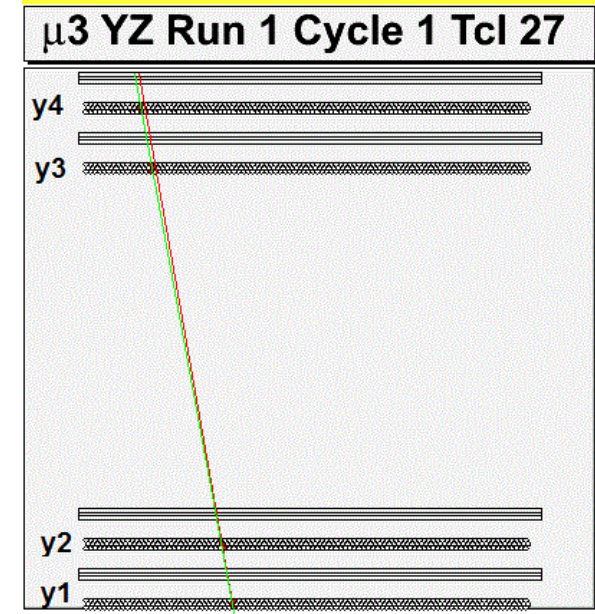
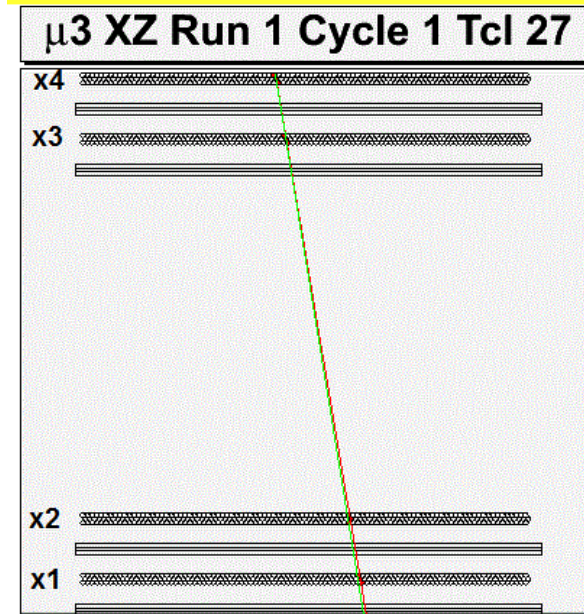
Дрейфовая камера 3 x 1.5 м²

3 x 3 м² прототип мюонного томографа: 16 камер, каждая 3 x 1.5 м²

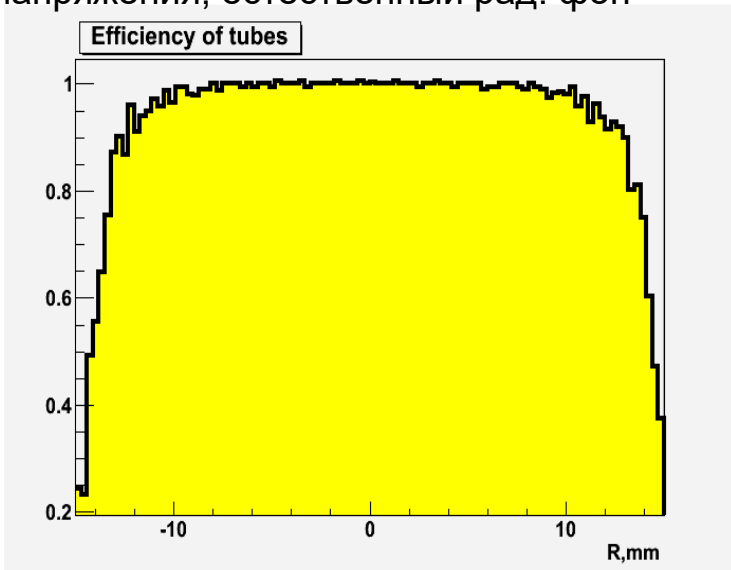
Пространственное разрешение ДТ: ~0.3 мм.



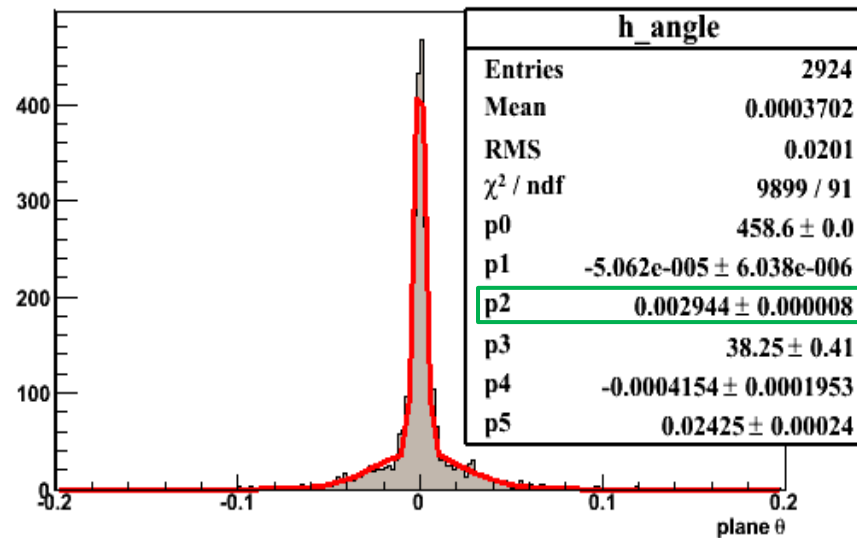
Типичный ВЦП-спектр, 1 bin=1 ns



Пример восстановления трека мюона



Типичная эффективность ДТ



Оценка углового разрешения томографа: распределение разности углов трека, измеренного верхним и нижним регистрирующим блоком.
 $\sigma = 2.94 \pm 0.01 \text{ mrad}$

ДТ в алюминиевой трубе диаметром 52 мм, толщ. стенки 0.8 мм (на основе ДТ мюонного спектрометра разобранного «Комплекса Меченых Нейтрино». ОИЯИ - ИФВЭ)



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

Д1.13-88-172

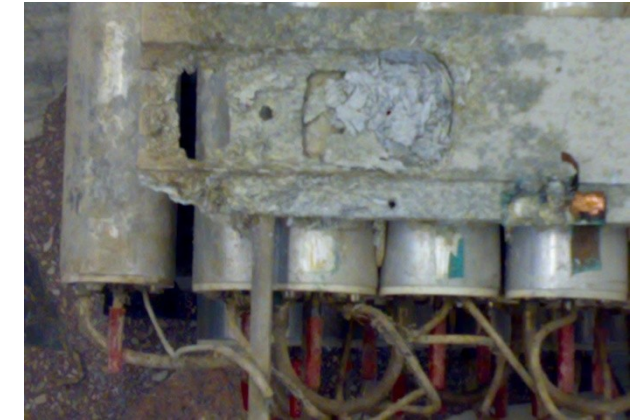
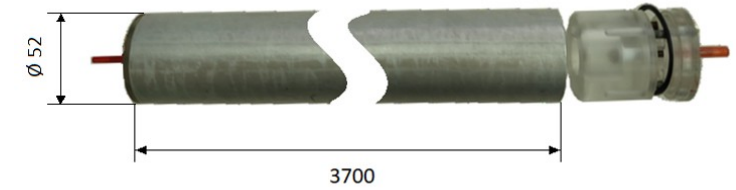
Международный симпозиум
по координатным детекторам
в физике высоких энергий

Дубна, 22-25 сентября 1987 года

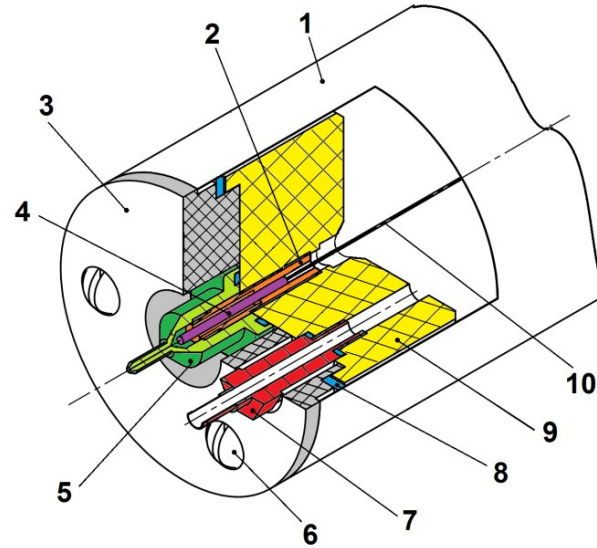
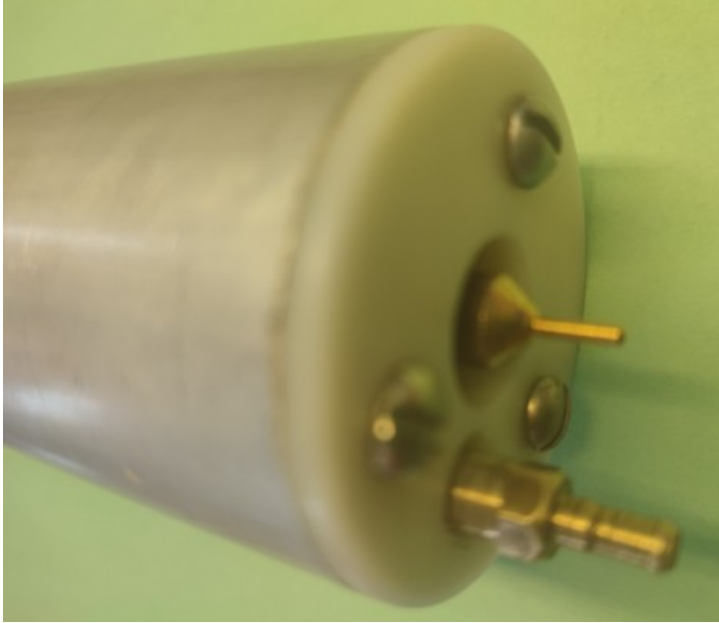
МЮОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР КОМПЛЕКСА "МЕЧЕННЫЕ НЕЙТРИНО"

М. Винде, И.А. Голутвин, В.Х. Додохов, Н.И. Замятин,
А.В. Карпужин, Ю.Т. Кирюшин, Н.М. Лустов, В.Н. Лысяков,
Д. Юзе, В.А. Свиридов, В.Н. Сотников

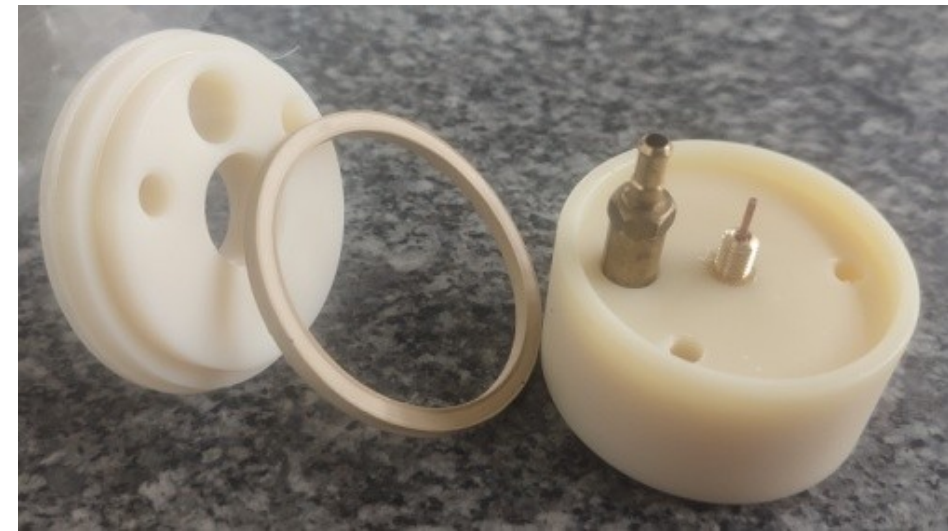
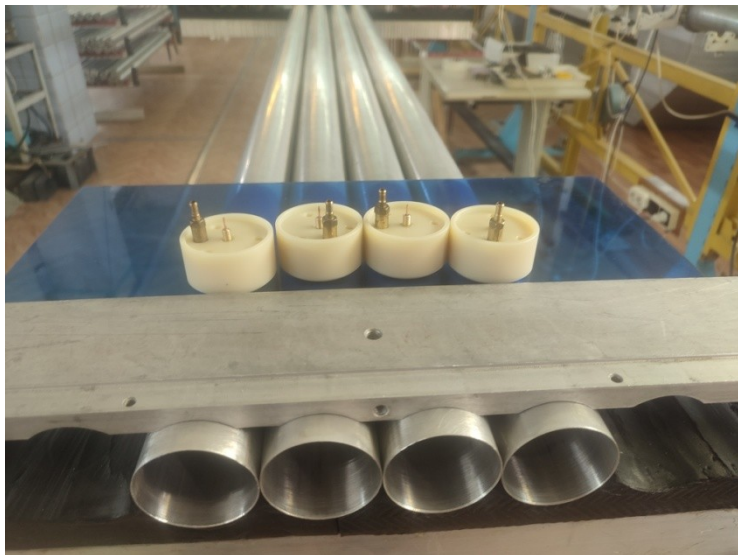
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

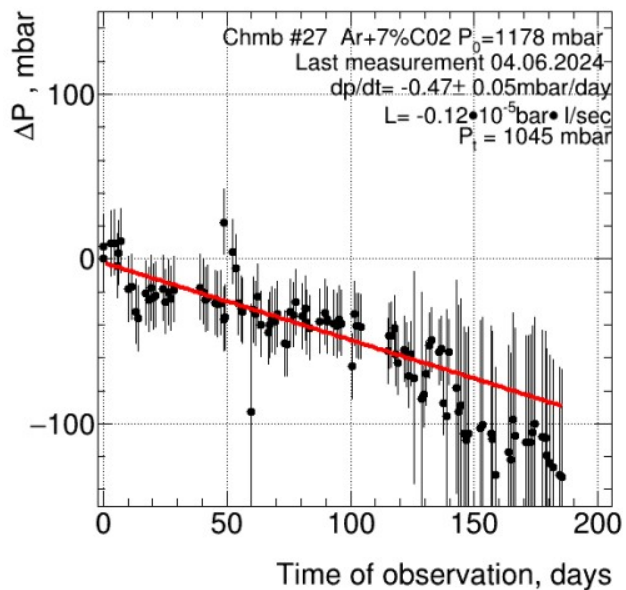


Камеры из ДТ в алюминиевой трубе диаметром 52 мм, толщ. стенки 0.8 мм (схематическая конструкция и компоненты ДТ в обновленном варианте)

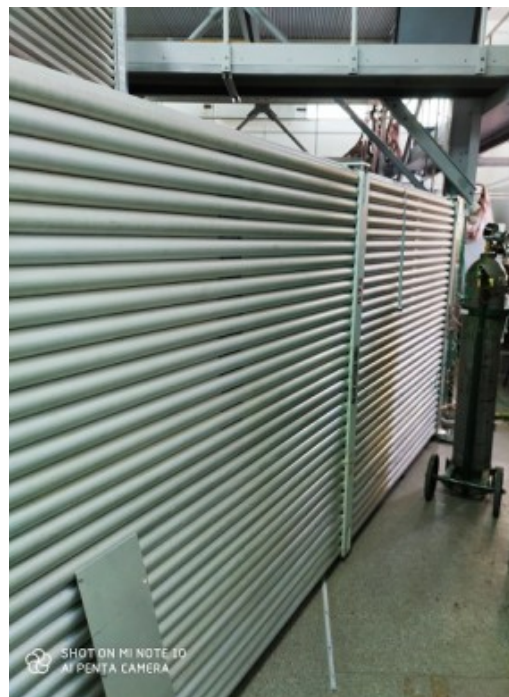
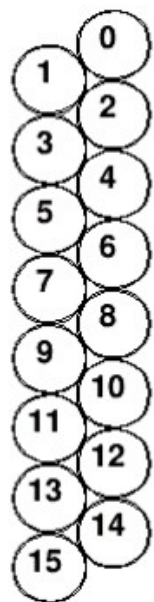


- 1 – корпус ДТ
- 2 – втулка латунная
- 3 – крышка заглушки (капролон)
- 4 – трубка обжимная капиллярная
- 5 – колпачок сигнальный
- 6 - винт
- 7 – штуцер
- 8 - прокладка уплотнительная
- 9 – корпус заглушки (капролон)
- 10 – сигнальная проволока

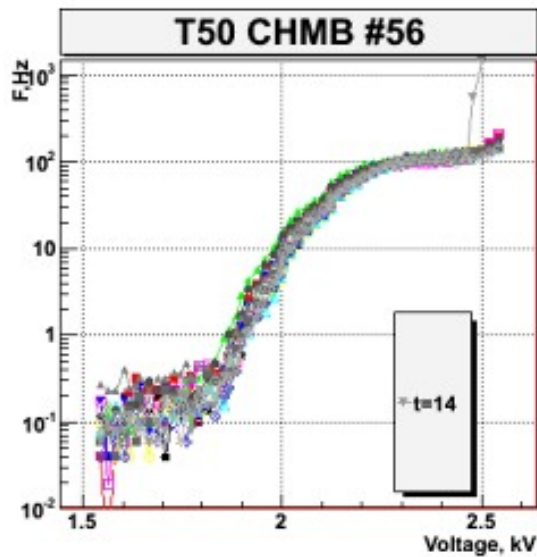




Х-ка герметичности – падение избыточного давления камеры. L= 3700 мм. Ar + 7%CO₂, P₀ = 1178 mbar

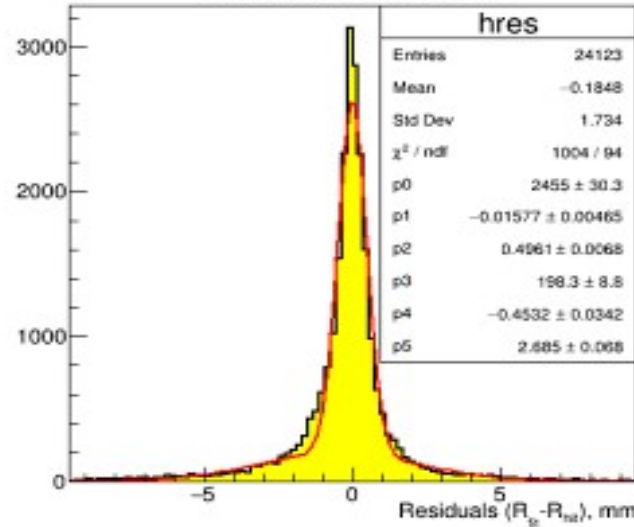


Конструкция камер позволяет объединять их в большие монолитные плоскости, без разрыва между состыкованными камерами



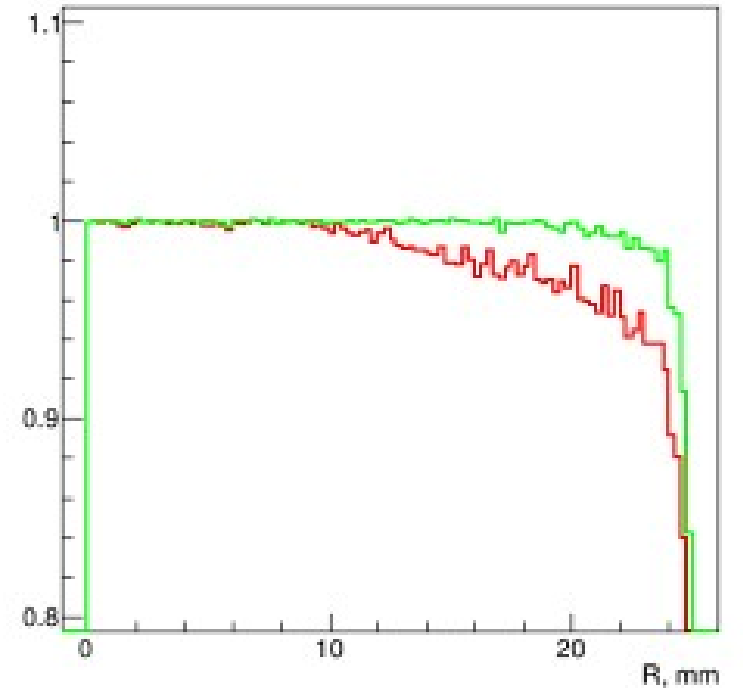
Счетная х-ка - зависимость счета проволок от напряжения, естественный рад. фон

Overall residuals

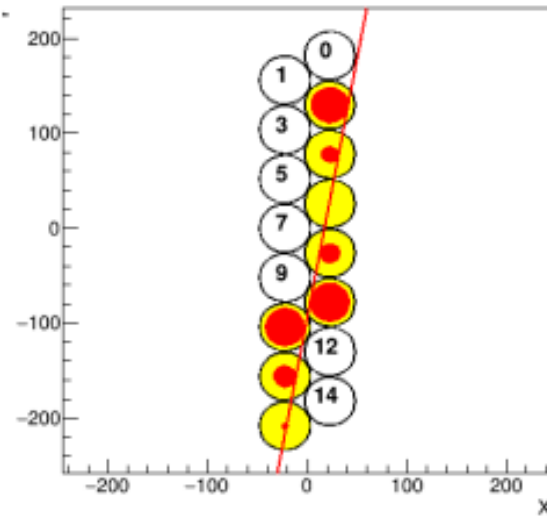


Распределение резидуалсов для длинных треков. $\sigma \approx 0.45$ мм

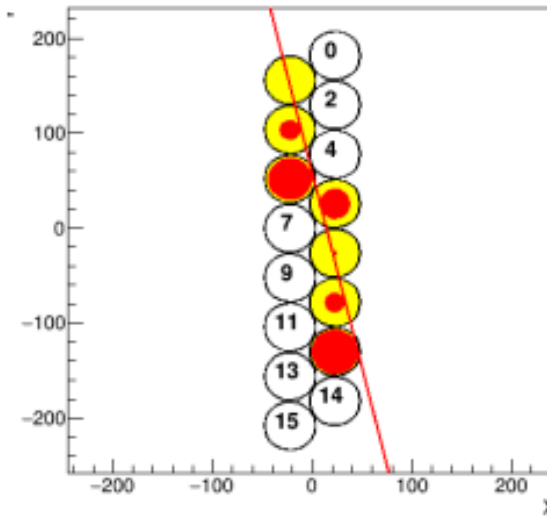
Eff vs. R



Run 13 Cycle 24 window 24



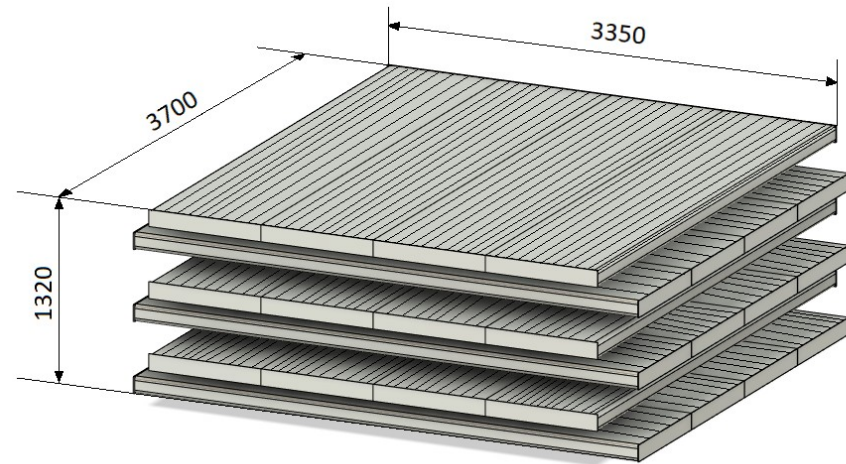
Run 13 Cycle 38 window 83



Пример восстановления трека мюона

Зеленым цветом: зависимость срабатывания ДТ от расстояния до сигнальной проволоки.
Красным цветом: эффективность в смысле участия ДТ в реконструкции трека (налицо ухудшение эффективности из-за δ -электронов

Камеры из 52-мм ДТ планируется использовать в экспериментальных установках ОКА и СПАСЧАРМ (мюонные трекары) на ускорительном комплексе У-70, а также, совместно с НИЯУ МИФИ, прорабатывается предложение об их использовании при создании сети мюонных годоскопов для мониторинга потоков космических частиц (рис. вверху справа).



Годоскоп из 24 камер (каждая 3.7 x 0.83 м²)

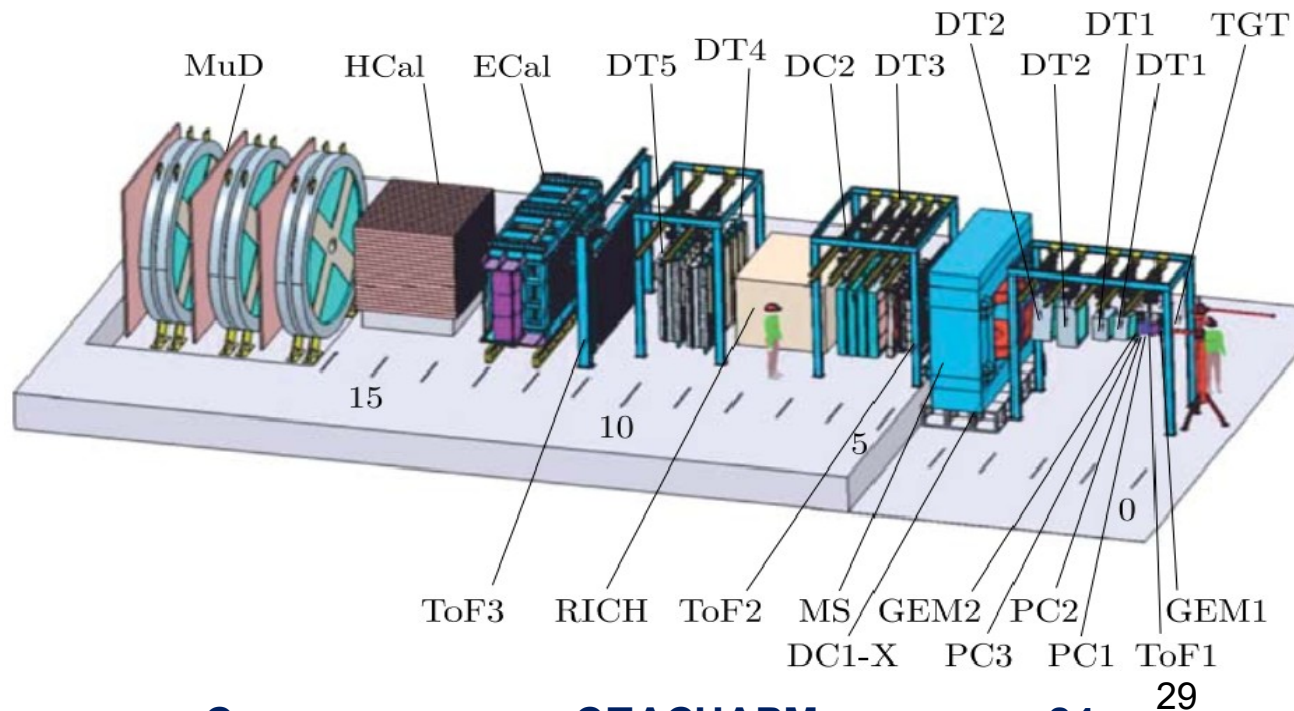


Схема установки СПАСЧАРМ на канале 24

Плоскость для установки ОКА

Концепция разрабатываемого мобильного мюонного томографа

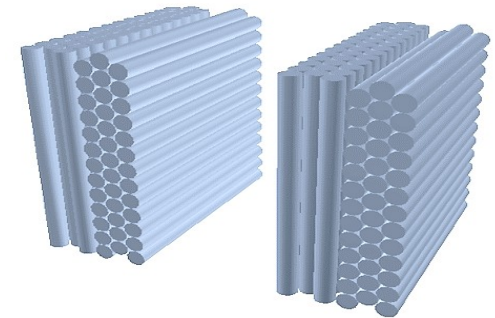
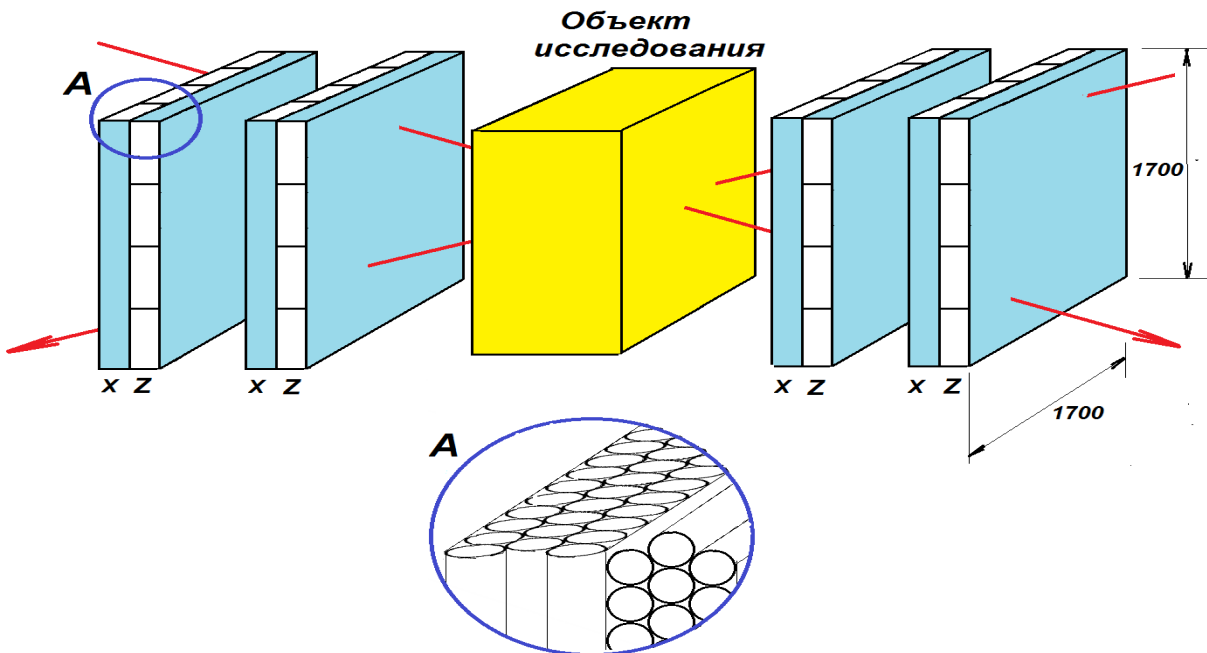
В базовом варианте – разборная конструкция из двух автономных годоскопов габаритами $\sim 1.7 \times 1.7 \times 0.8$ м².

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

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

Расст. между парами камер можно увеличивать (уменьшается аксептанс, но улучшается угловое разреш.)

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

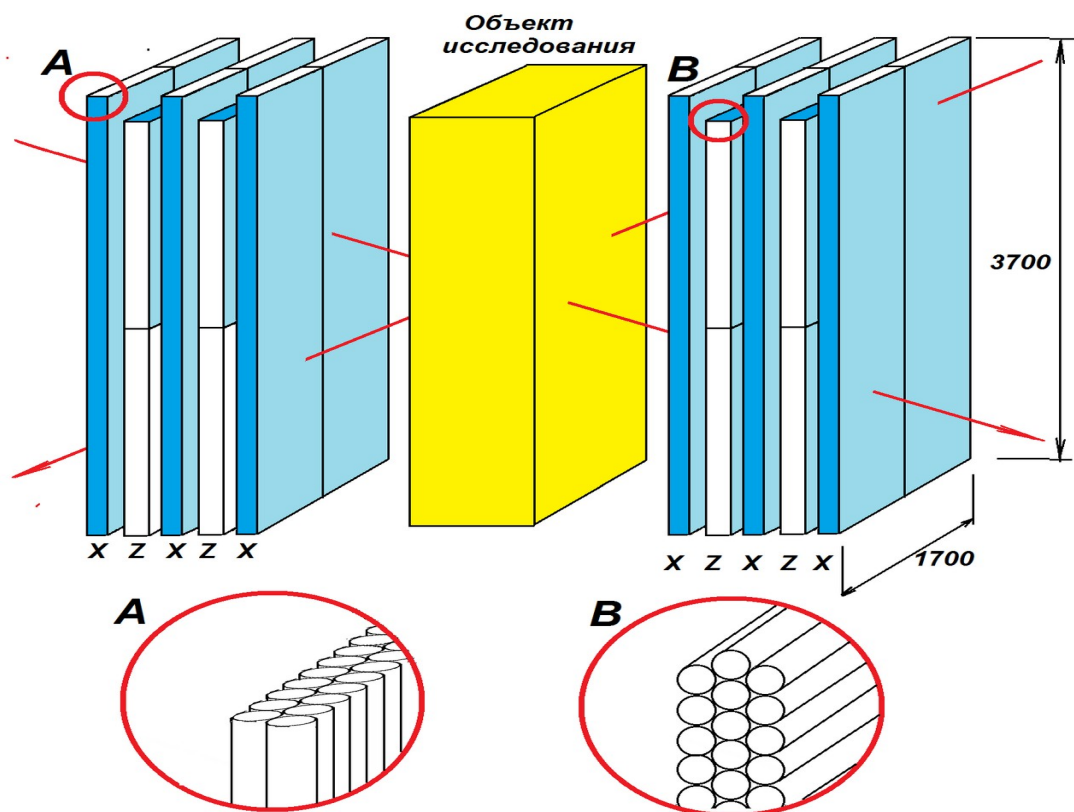


Камера 1.7×0.85 м² и один из ее создателей А.С.Кожин

Концепция разрабатываемого мобильного мюонного томографа (продолжение)

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 $3.7 \times 0.85 \text{ м}^2$

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

Заключение

НИЦ КИ – ИФВЭ обладает опытом изготовления трековых камер из:

- ДТ в алюминиевом корпусе диаметром 30 и 52 мм;
- ДТ в тубусе диаметром 30 и 15 мм из лавсана (с алюминизированным покрытием) толщ. 125 мкм, при этом ДТ является самоподдерживающимся элементом – она выдерживает натяжение сигнальной проволоки 350 г и сохраняет правильную круглую форму без использования каких-либо поддержек.

Спасибо за внимание!

