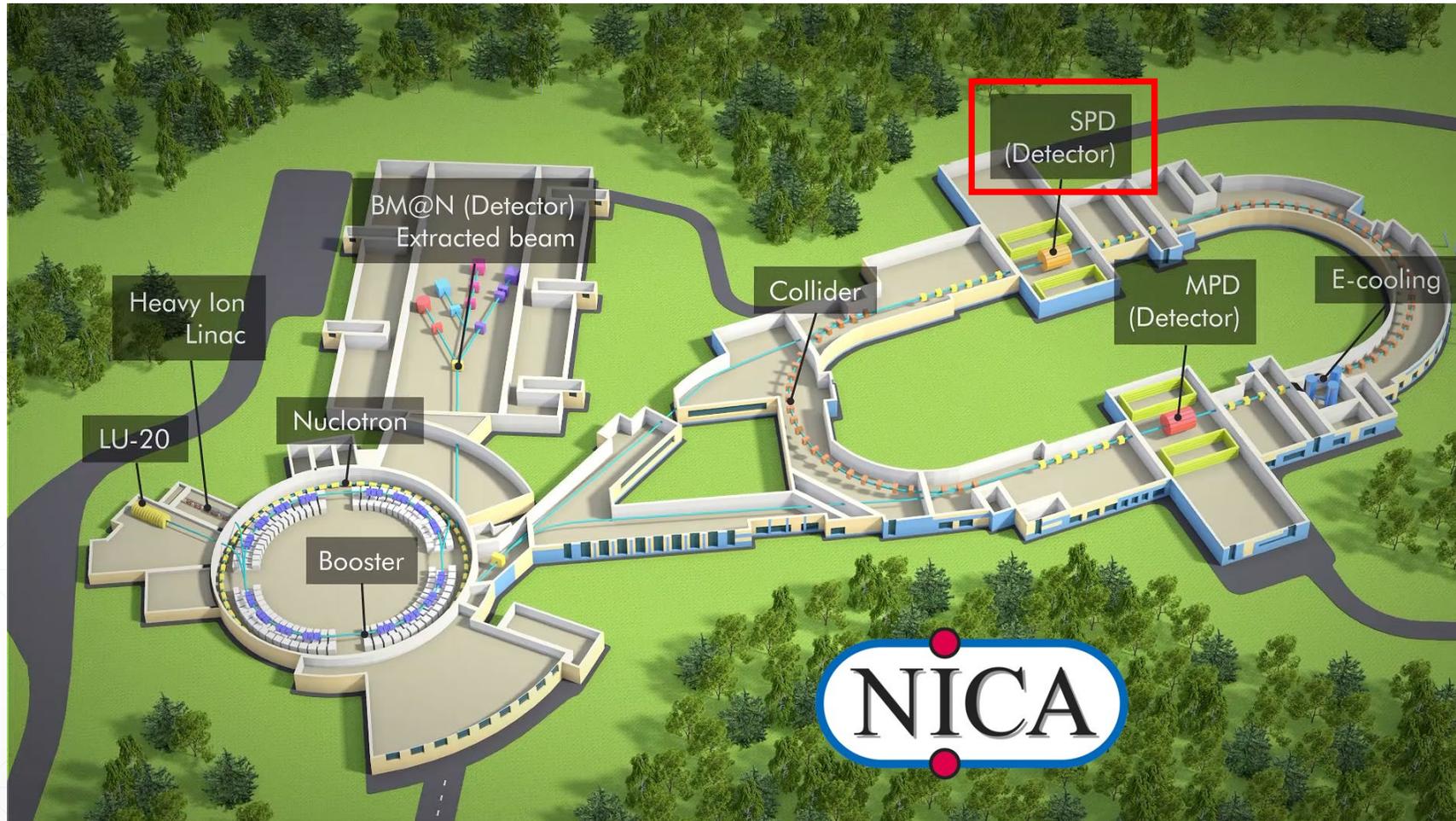


Разработка центрального трекера на основе Micromegas (МСТ) для детектора SPD, реализующегося на ускорительном комплексе NICA

И. В. Ляшко, А. Л. Гонгадзе, Д. В. Дедович, Н. А. Ковязина

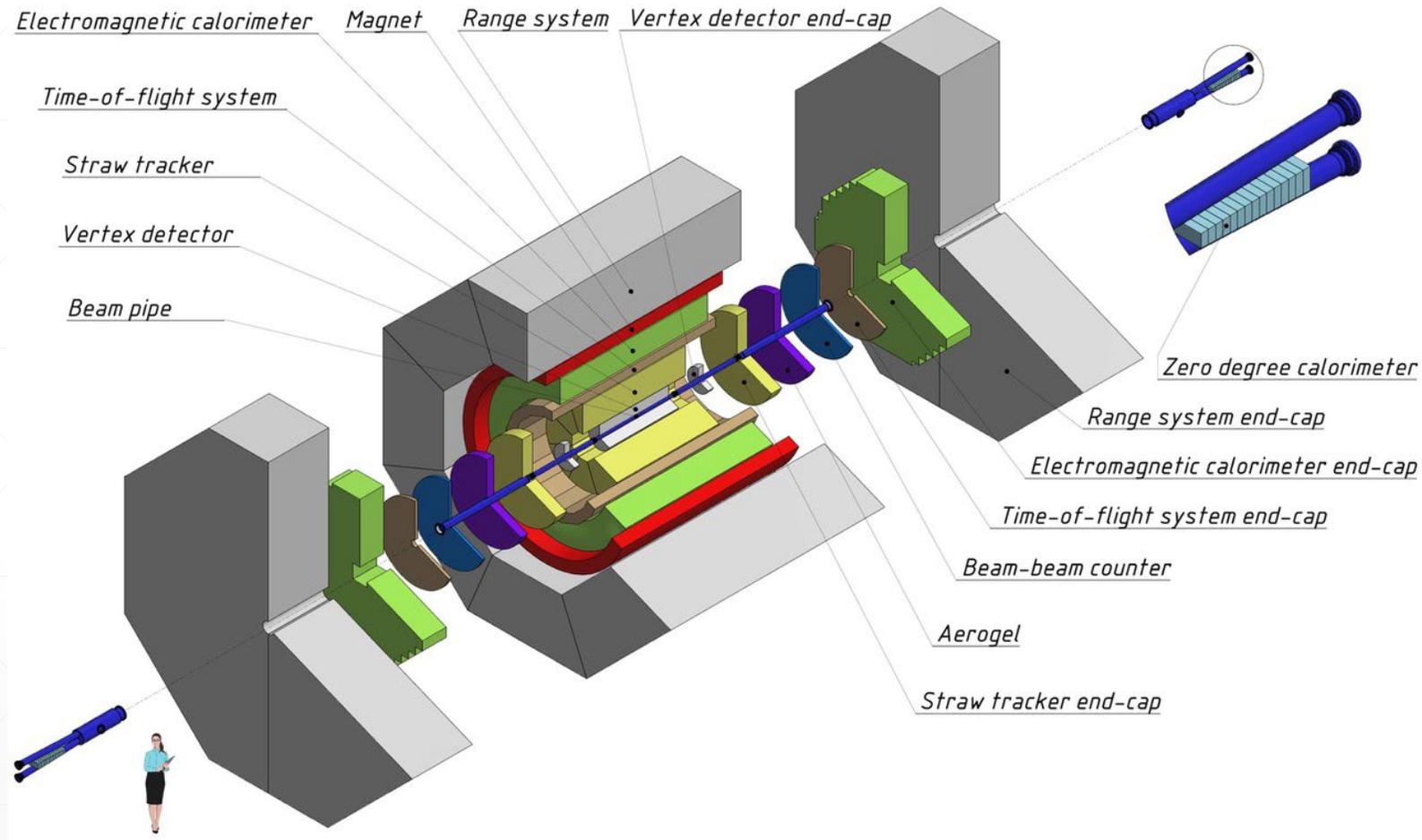
Объединённый институт ядерных исследований

Nuclotron based Ion Collider facility



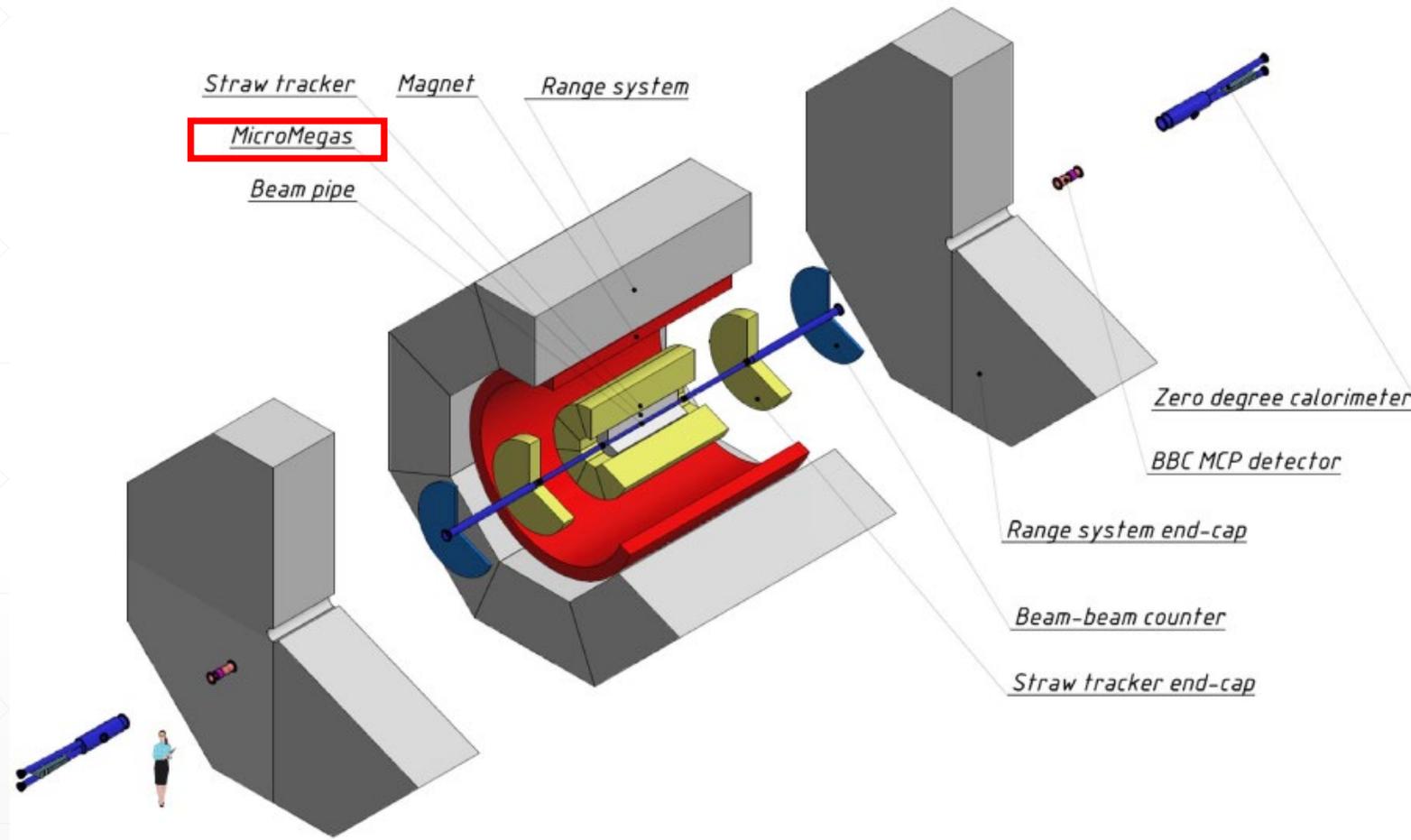
Мегапроект NICA позволит проводить фундаментальные исследования материи с экстремальными плотностями и температурами; физики адронов; природы спина нуклона и поляризационных явлений; ядерной и атомной физики, биофизики и астрофизики.

Экспериментальная установка **Spin Physics Detector**



Установка SPD спроектирована как универсальный 4π-детектор, включающий системы трекинга, калориметр, мюонную систему и систему идентификации частиц, размещённые в сверхпроводящем магните.

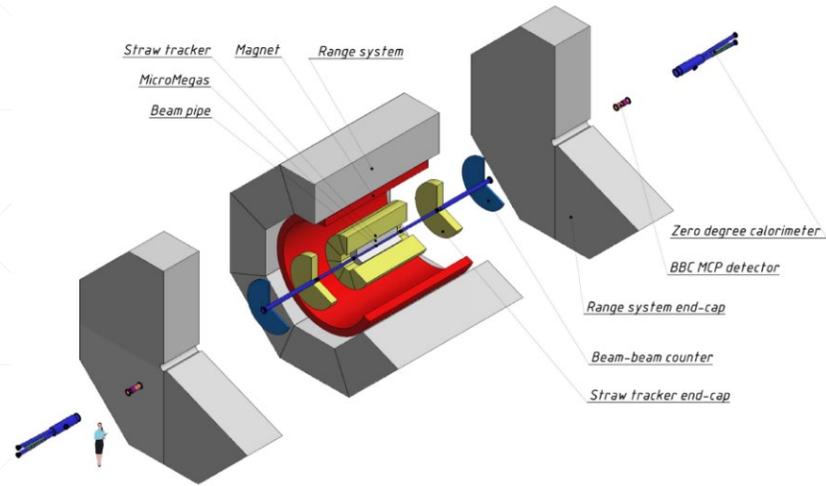
Экспериментальная установка SPD: Фаза 1



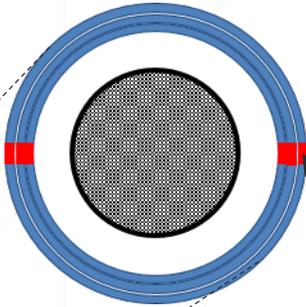
Micromegas Central Tracker (MCT) – простой и дешевый детектор призванный улучшить импульсное разрешение и эффективность поиска треков в первые годы эксплуатации SPD.

MCT не предназначен для реконструкции вершин $D^{0,\pm}$

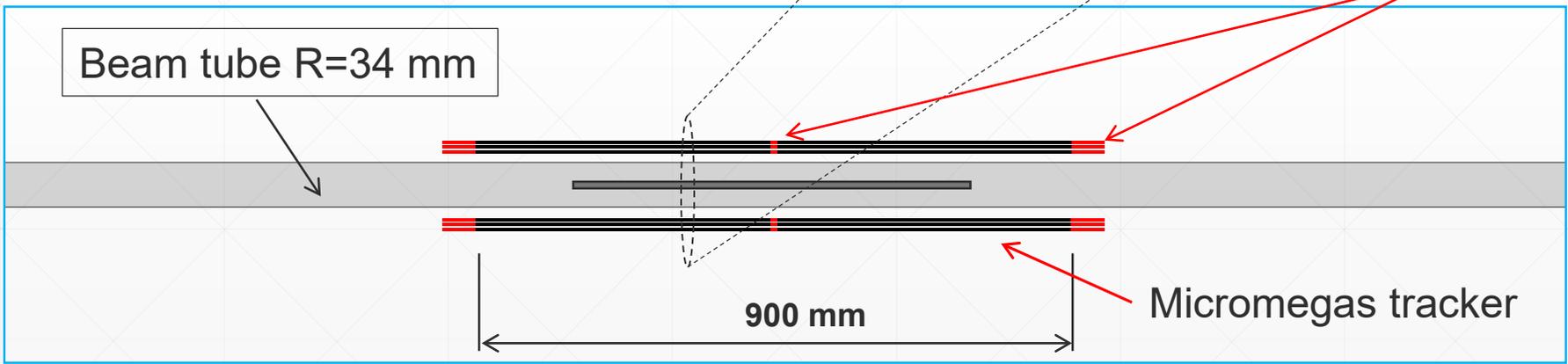
Micromegas Central Tracker (MCT). Общая схема



Micromegas tracker: 3 слоя R=50-61 mm
12 полуцилиндрических детекторов micromegas



Мертвая зона



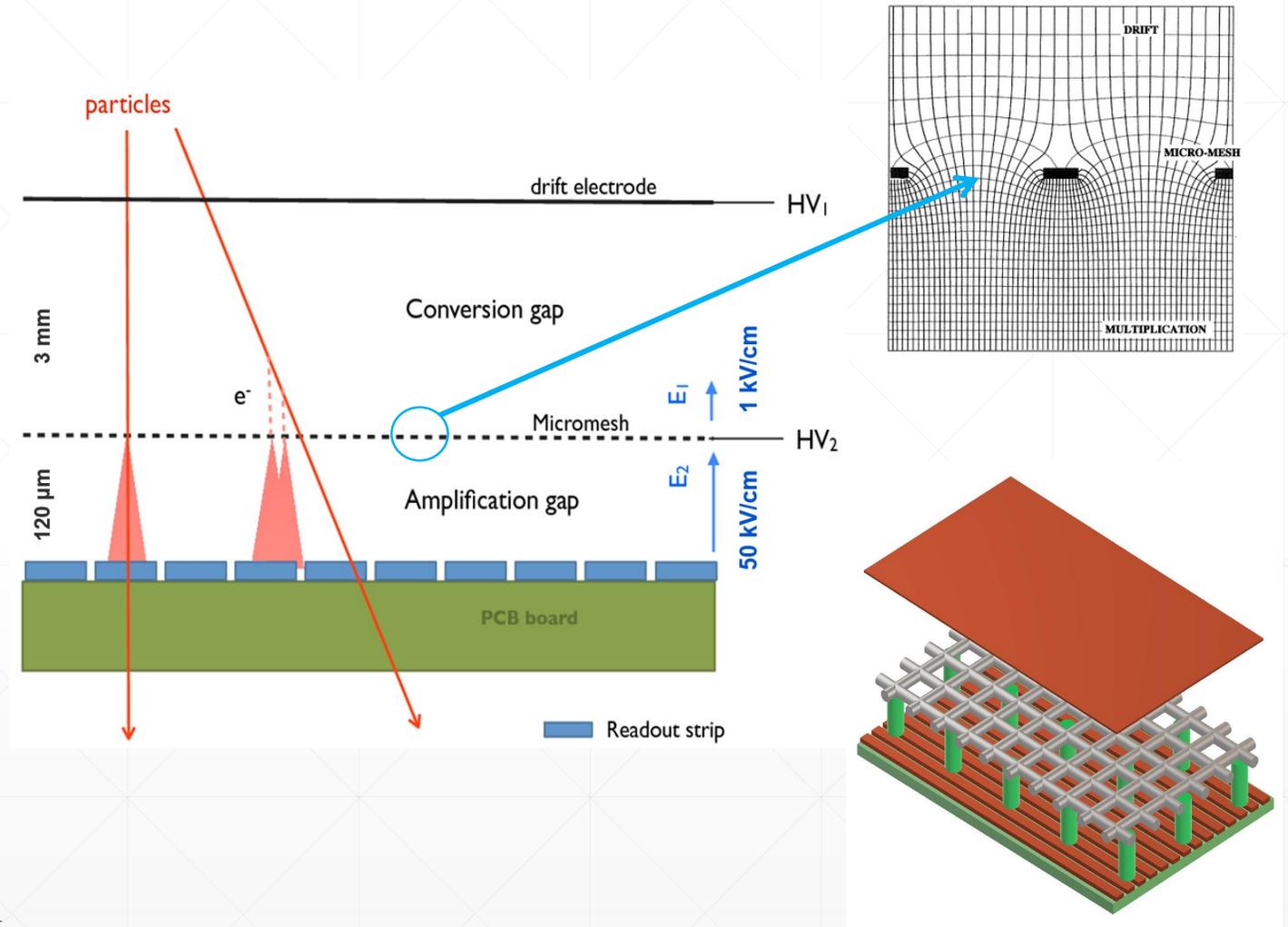
Micro Mesh Gaseous Structure

Micromegas – плоский счетчик с выделенными ионизационным и усилительным зазорами разделенными тонкой сеткой.

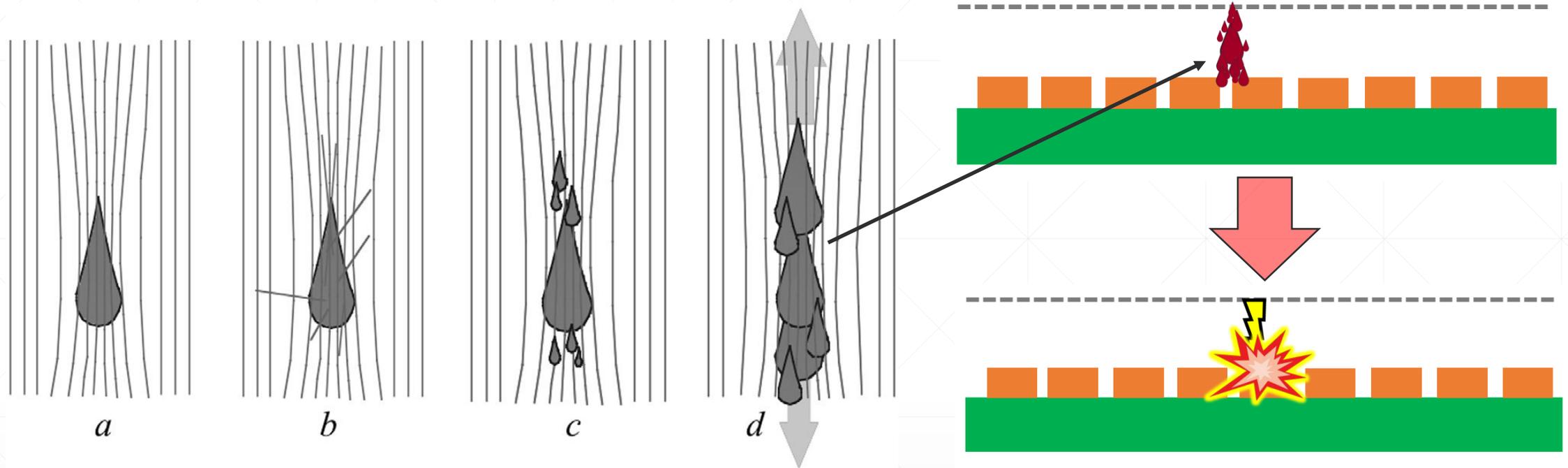
- Ионизационный зазор: 3-5 мм
- Усилительный зазор: ~ 120 мкм
- Газовое усиление: $\sim 10^4$
- Прозрачность сетки для первичных электронов: $>95\%$ при оптимальном E_{drift}/E_{gain}
- Анод сегментирован в виде медных полосок

Преимущества:

- Высокая загрузочная способность
- Хорошее двухтрековое разрешение
- Координатное разрешение 100-150 мкм

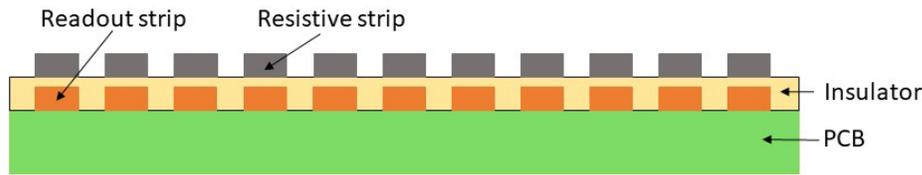


Развитие лавины в плоском поле.

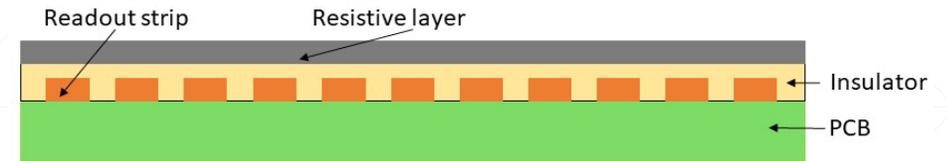


Как и любой счетчик с параллельными пластинами, детектор Micromegas уязвим к искровому разряду. Если лавина достаточно велика, то образуется область в которой присутствуют носители заряда из-за чего она обладает проводимостью. Если заряд лавины превышает предел Риттера ($10^7 \div 10^8$ электронов, в зависимости от газовой смеси), между анодом и сеткой образуется проводящий канал, за которым следует искра.

Защита от разряда

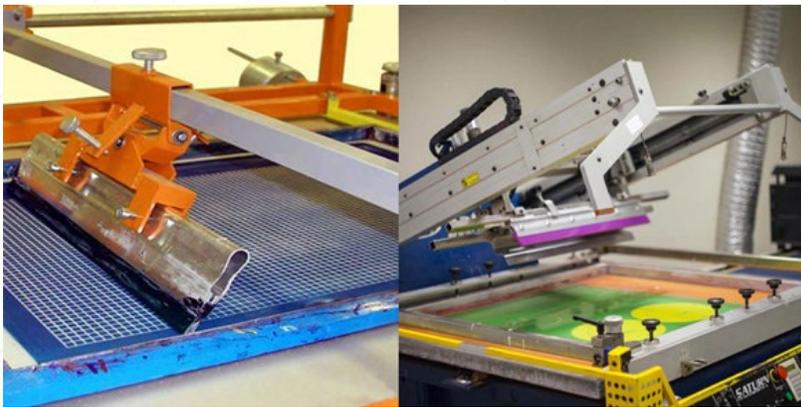


Поверх каждого считывающего стрипа наносится резистивный стрип.



Резистивный слой наносится на всю поверхность.

Метод трафаретной печати

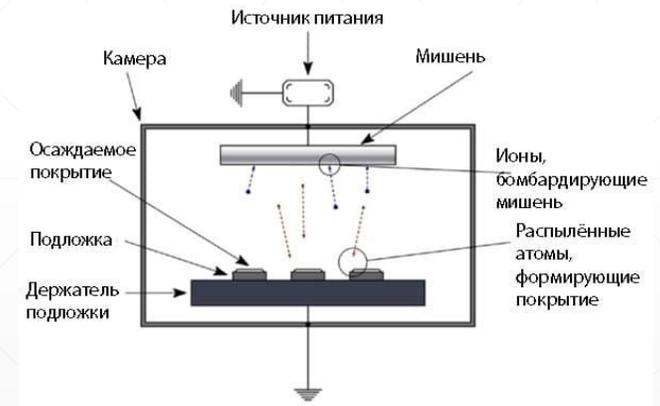


Плюсы: Стоимость при больших масштабах производства. Допустимы большие размеры детектора.

Минусы: Неоднородность поверхности. (Разброс высоты резистивных стрипов 15-20мкм)

ATLAS, CLAS12 использовали данный метод

Метод магнетронного напыления



Плюсы: Равномерность напыления, а значит стабильность работы детектора

Минусы: Стоимость (в нашем случае нивелируется размером детектора).

T2K использовал данный метод

Мотивация исследования стойкости DLC покрытия

- Метод используется сравнительно недавно => нет большой статистики тестов.
- Толщина покрытия – 100 нм, соответственно оно уязвимо к повреждениям как механическим при производстве ММ, так и от разрядов.
- DLC покрытие стало использоваться сравнительно недавно и никогда не использовалось в условиях протонных ускорителей

Идея эксперимента по исследованию деградации DLC

Необходимо заставить детектор работать в режиме, когда практически непрерывно провоцируется разряд.

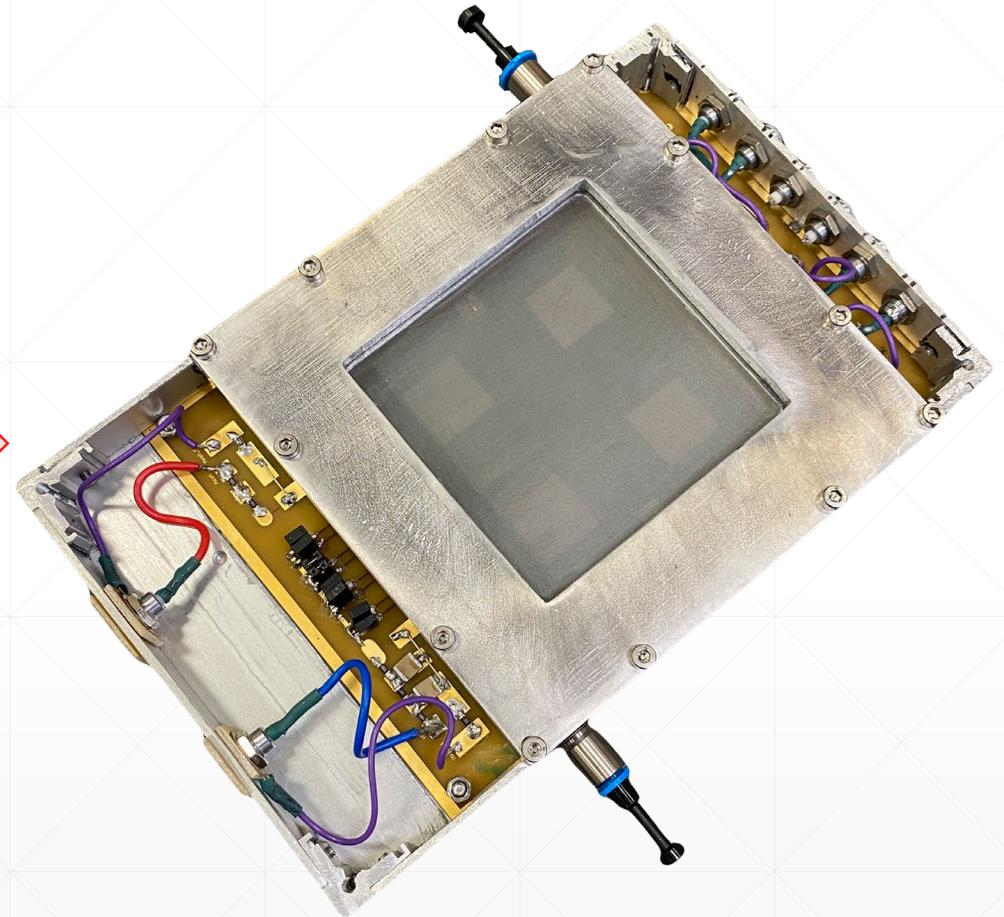
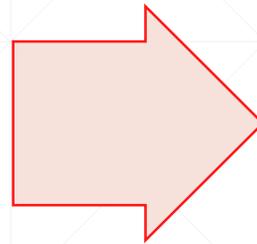
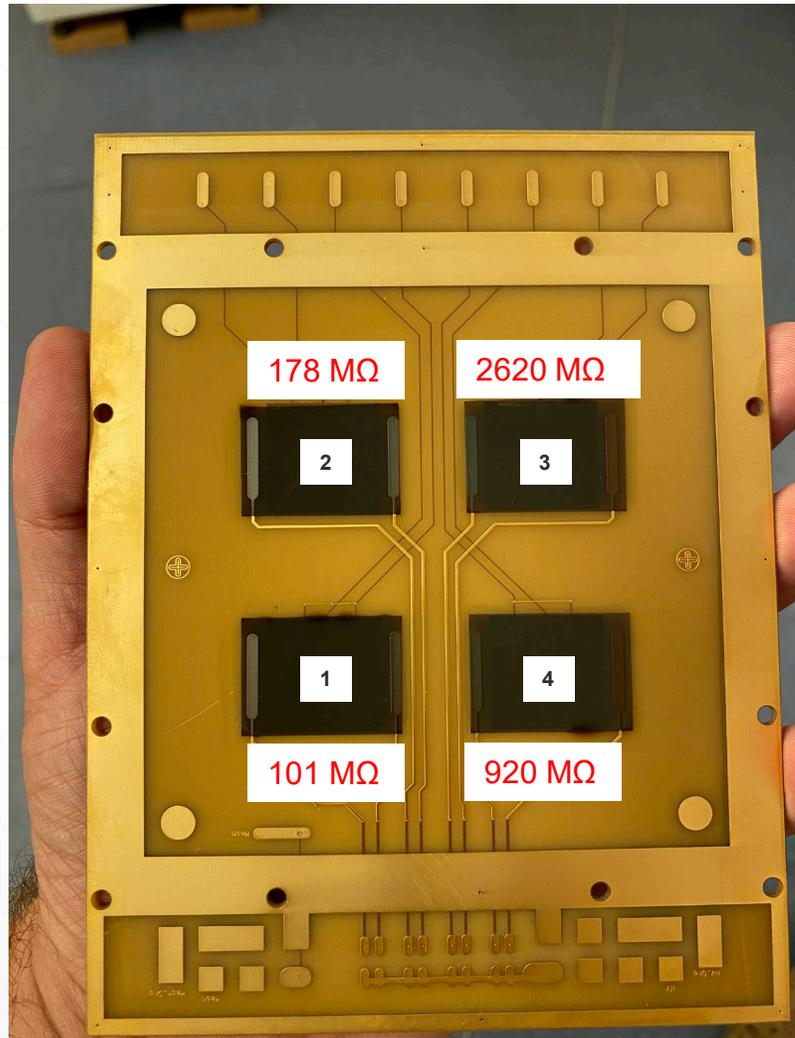
Как заставить? Засвечивать наш детектор α частицами т.к. они вызывают высокую ионизацию.



Что мы ожидаем в итоге при возможной деградации DLC покрытия?

- Увеличение сопротивления покрытия
- Ухудшение энергетического разрешения
- Существенное изменение амплитуды

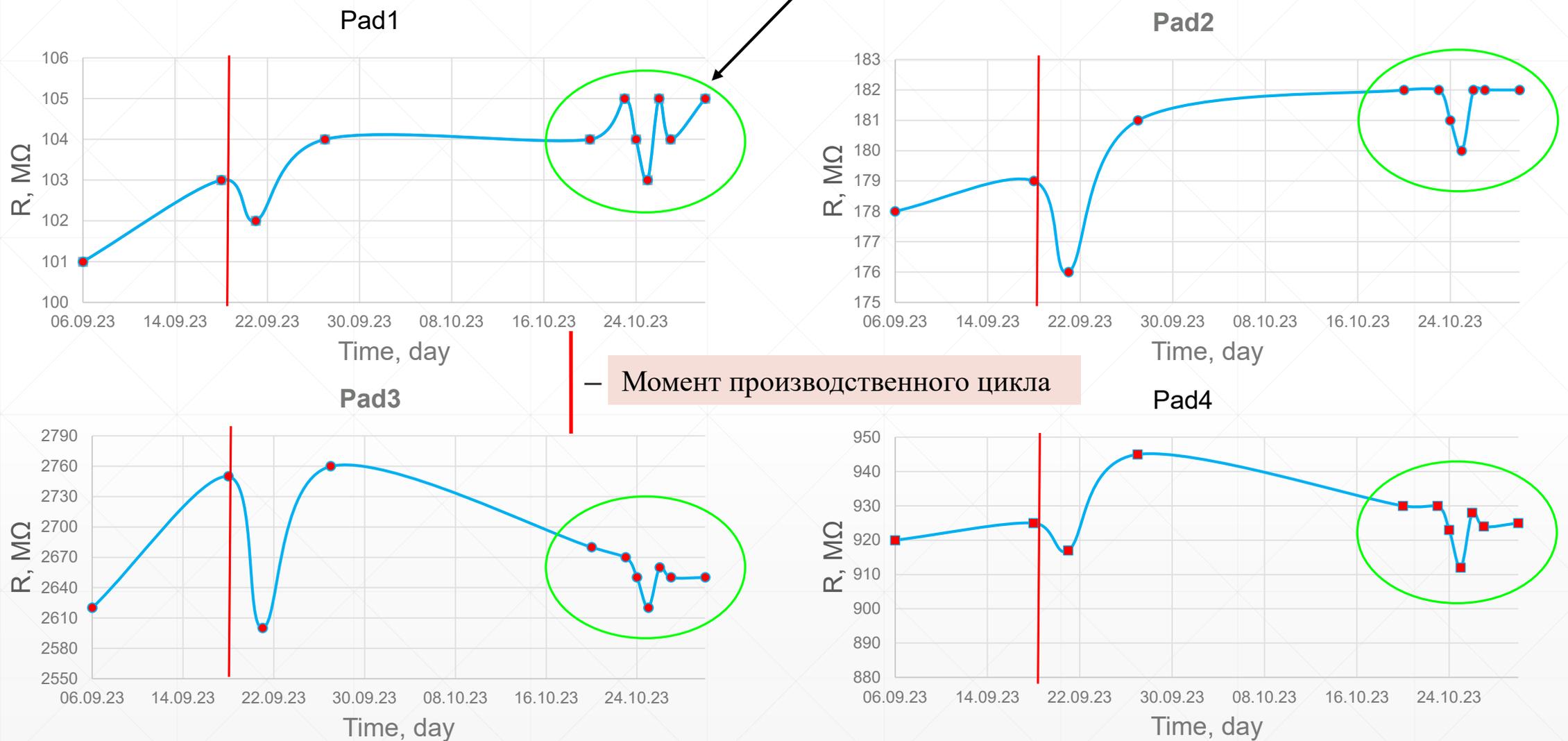
Прототип для исследования деградации DLC



Создан прототип с 4-мя «окошками», на которые нанесено DLC покрытие с разными сопротивлениями.

Определение величины флуктуаций сопротивления DLC

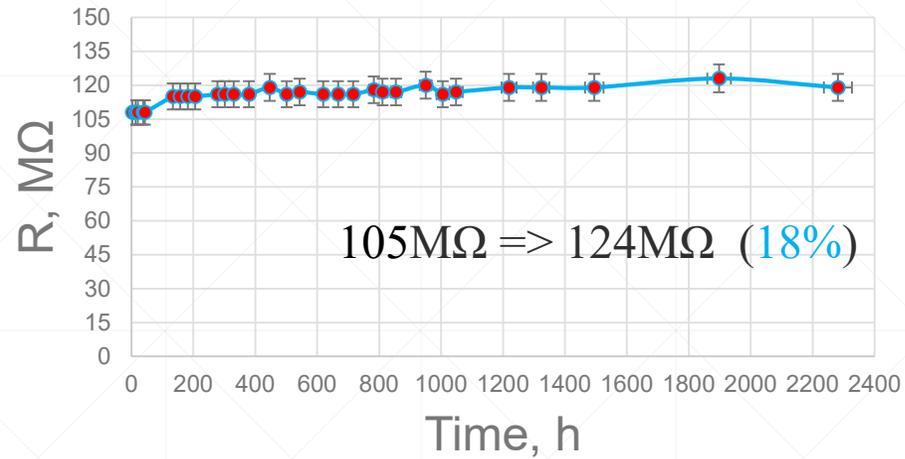
Для определения величины значимого изменения сопротивления



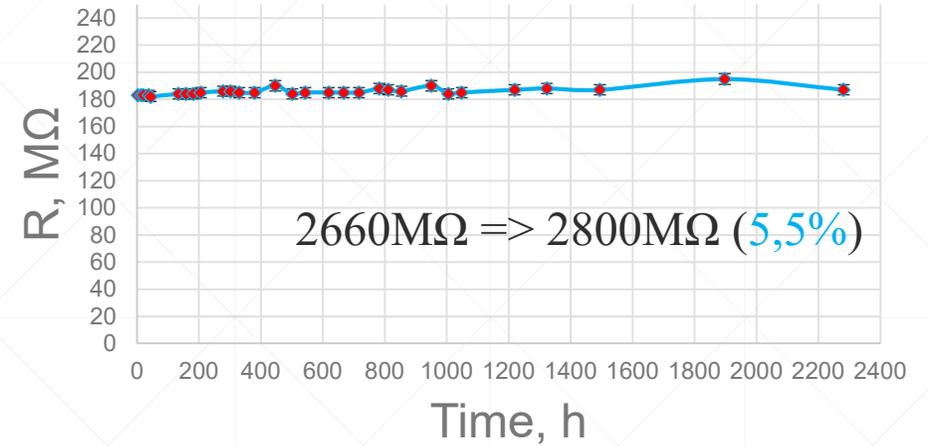
Камера собрана и находится на продувке ArCO₂(7%)

Набор статистики. Аккумулятивное количество разрядов

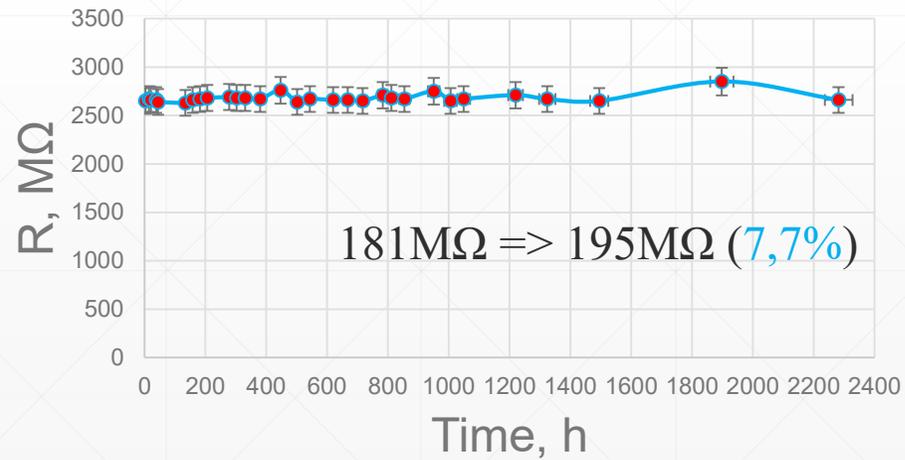
Pad1



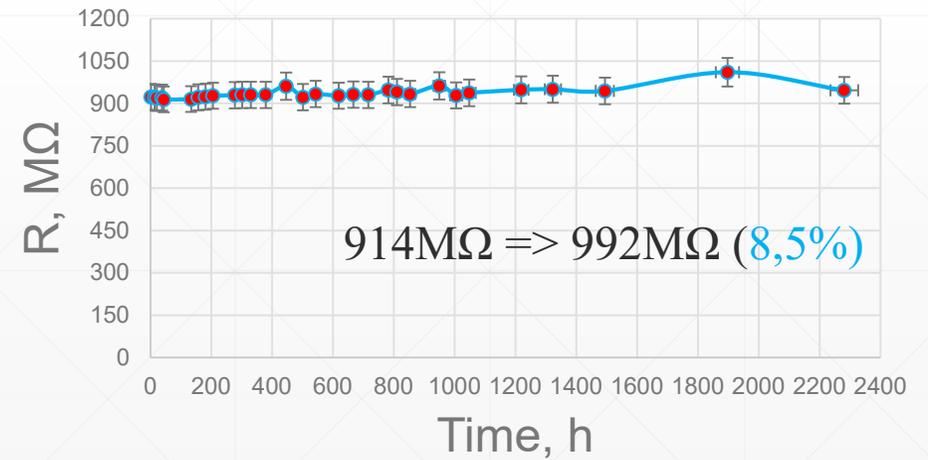
Pad2



Pad3

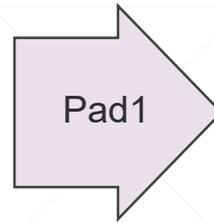
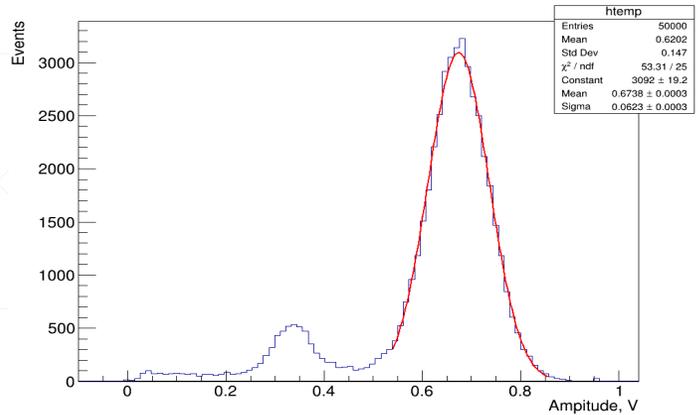


Pad4



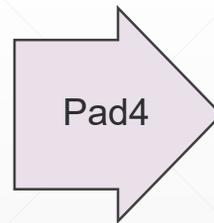
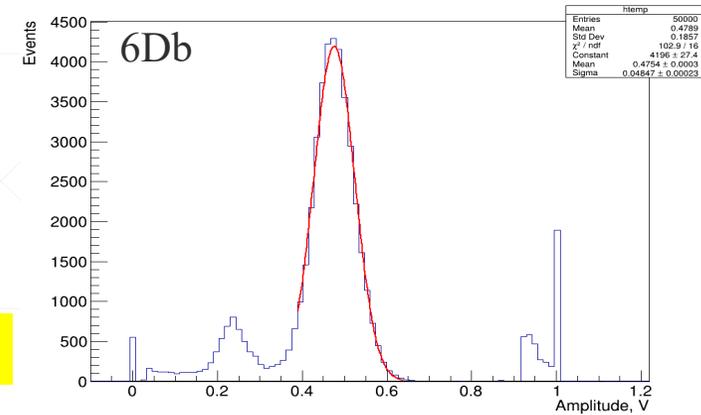
Контрольные спектры от Fe₅₅

До облучения

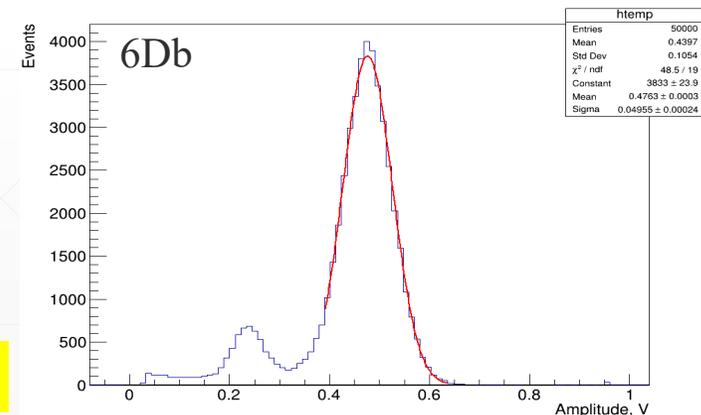
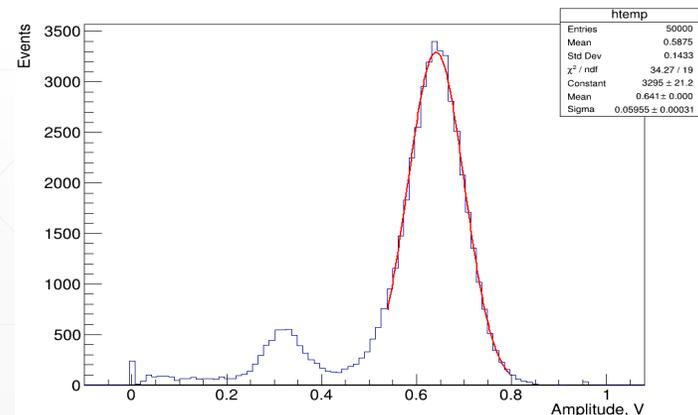


FWHM = 21,8% => 24%

после набора статистики

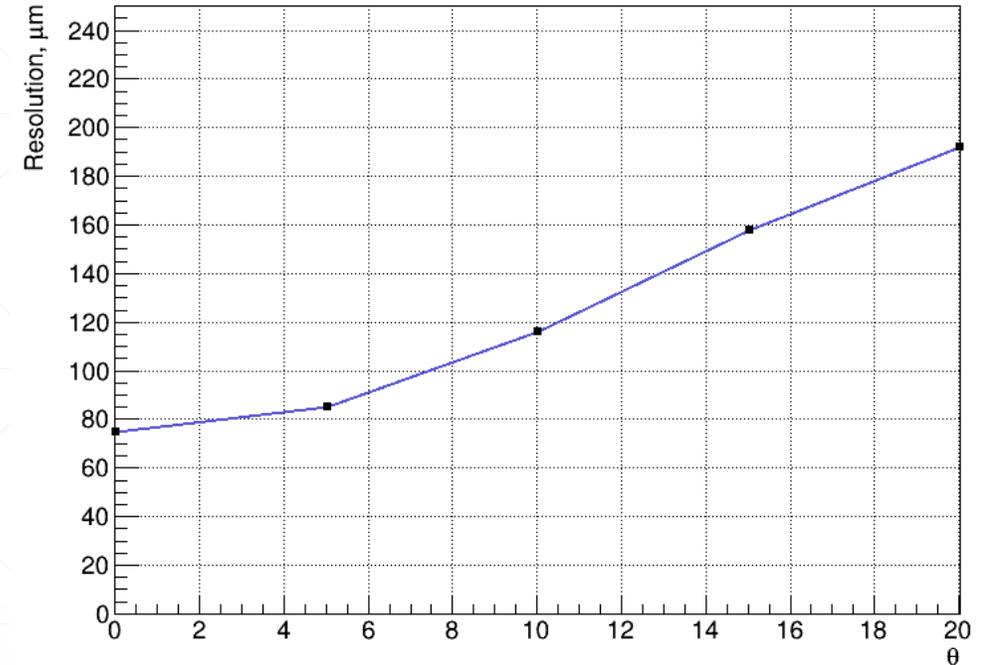
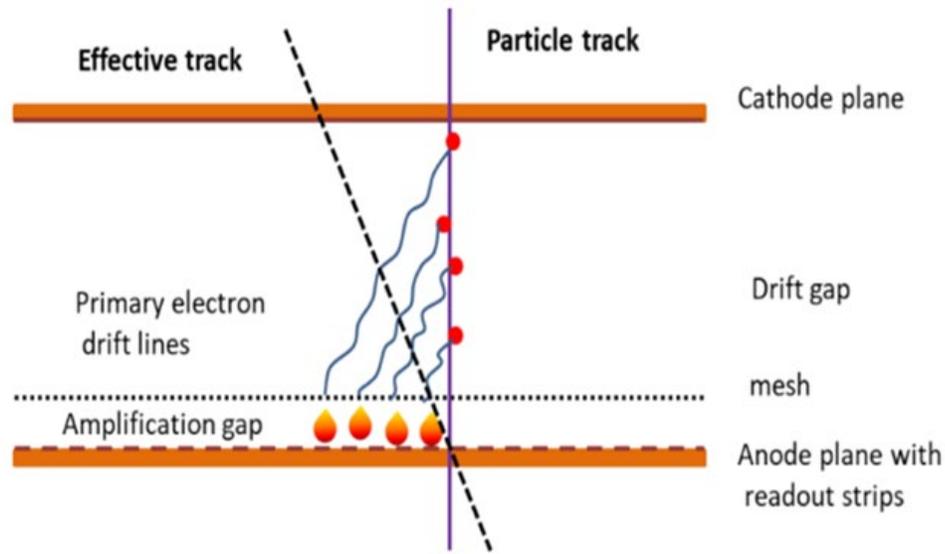


FWHM = 21,9% => 24,5%



Спектры от Fe₅₅ до облучением альфа источником и после набора статистики

Работа Micromegas в магнитном поле

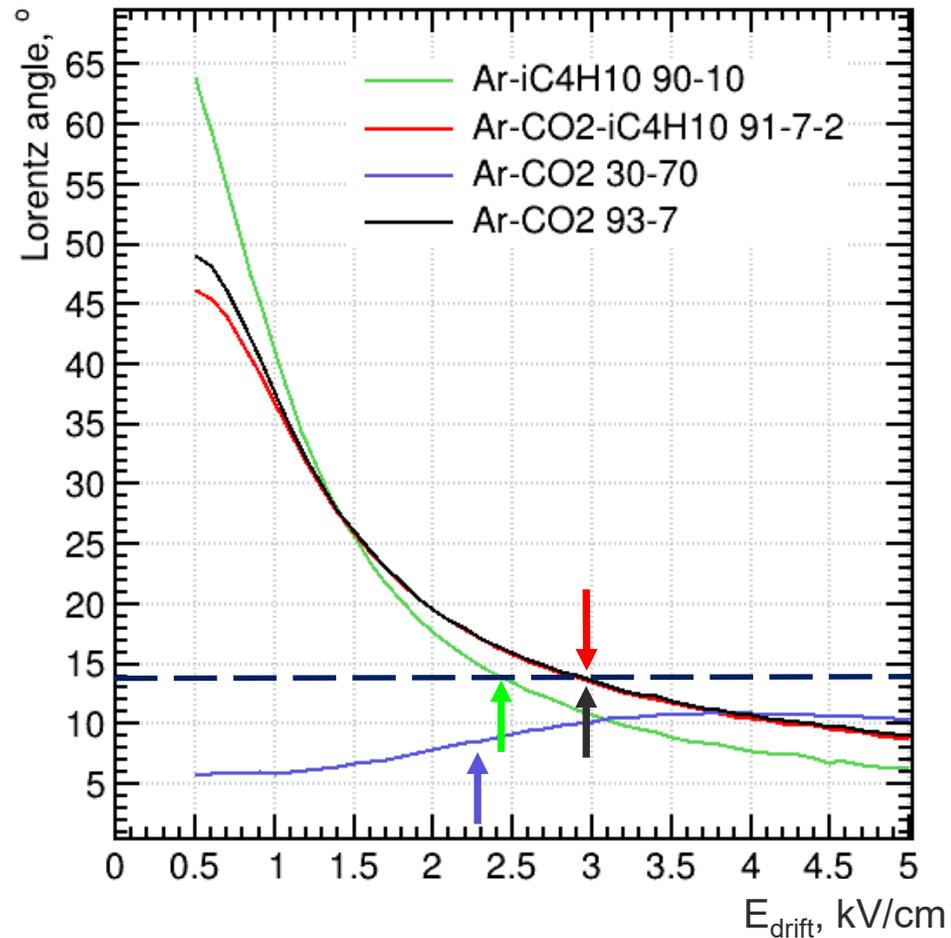


- При работе в магнитном поле электроны дрейфуют под углом к направлению напряженности электрического поля
- С точки зрения отклика детектора трек «эффективно наклонен»
- При работе в магнитном поле $B=1\text{Т}$ угол Лоренца для стандартных смесей при оптимальном дрейфовом напряжении превышает 40°

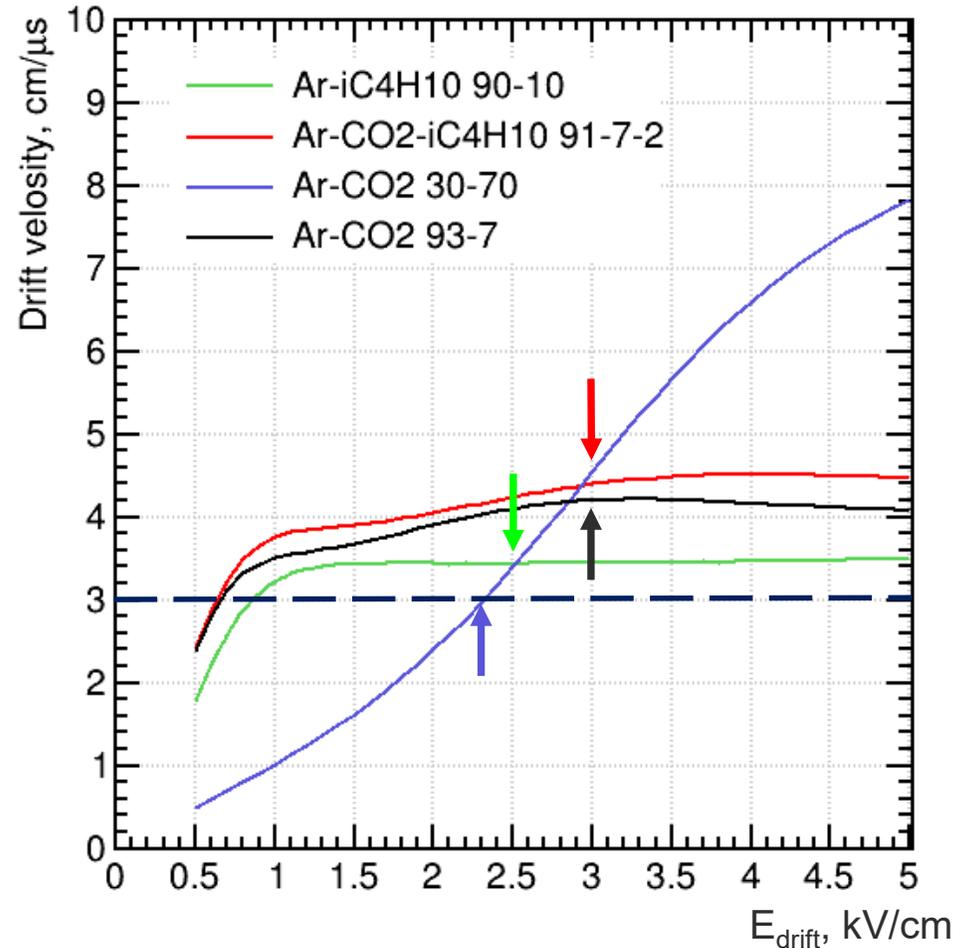
Требования к детектору и газовой смеси

Бестриггерная система сбора данных ⇒ Эффективность при повышенном пороге	Стабильная работа с достаточно высоким коэффициентом усиления, и высокая первичная ионизация, минимальный угол Лоренца при дрейфовом поле близком к оптимальному
Координатная точность 150 мкм	Угол Лоренца не более 10-15 градусов
Максимальное время дрейфа менее 100 нс	Скорость дрейфа электронов не менее 3 см/мкс

Обзор газовых смесей. Моделирование.

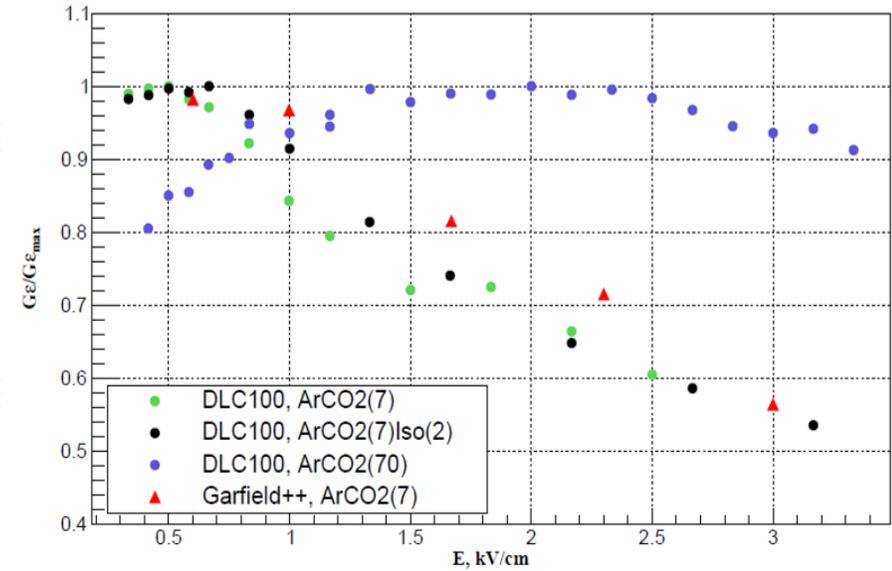
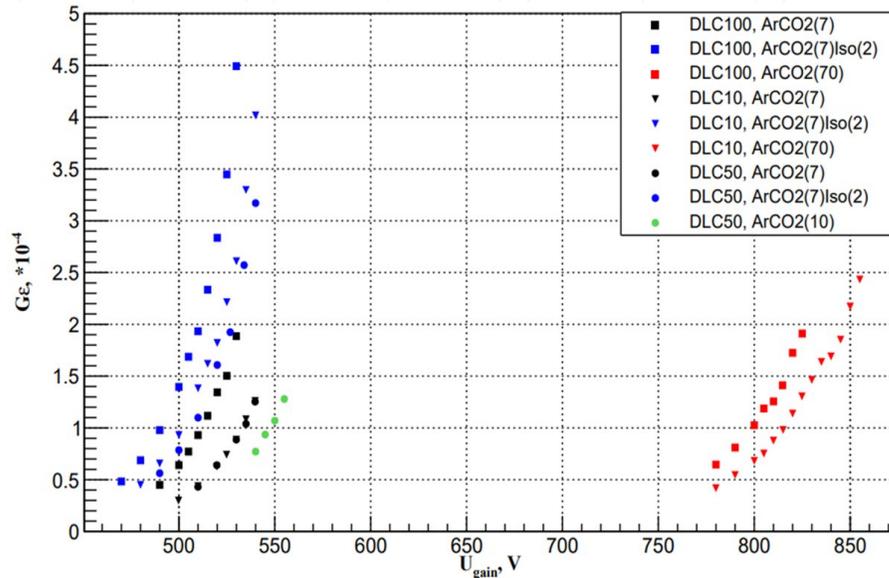


Угол Лоренца в зависимости от электрического поля (моделирование)



Скорость дрейфа электронов в зависимости от электрического поля (моделирование)

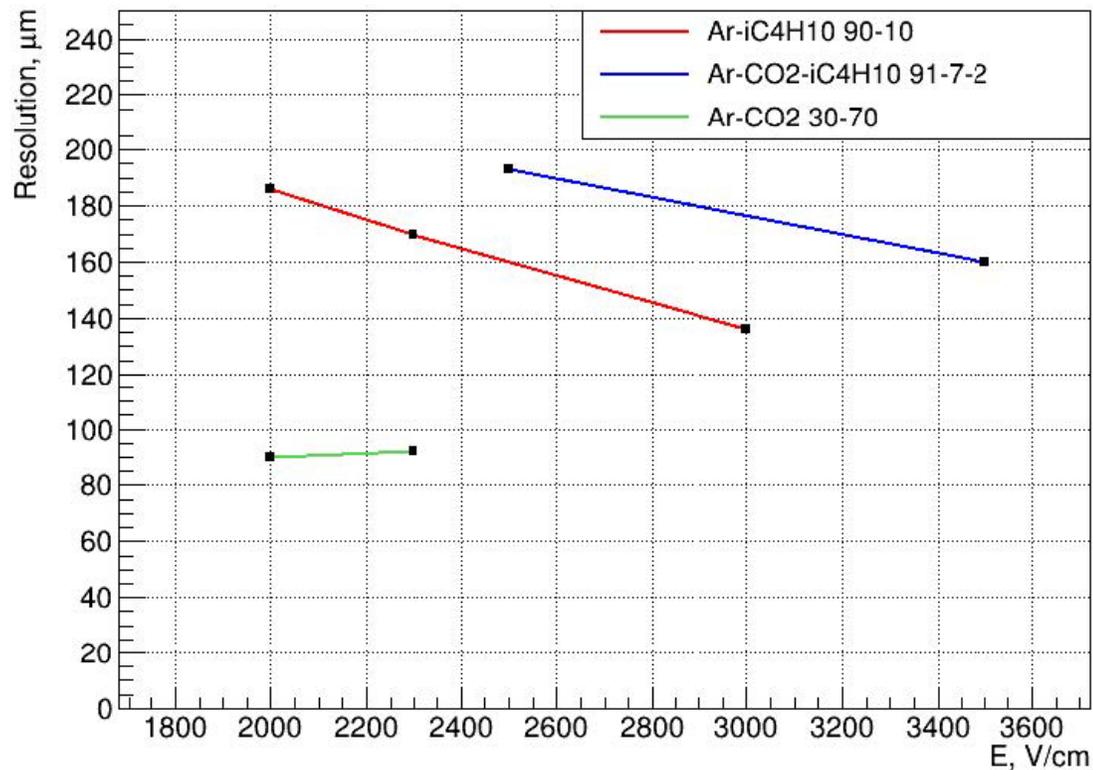
Усиление и эффективность сбора заряда



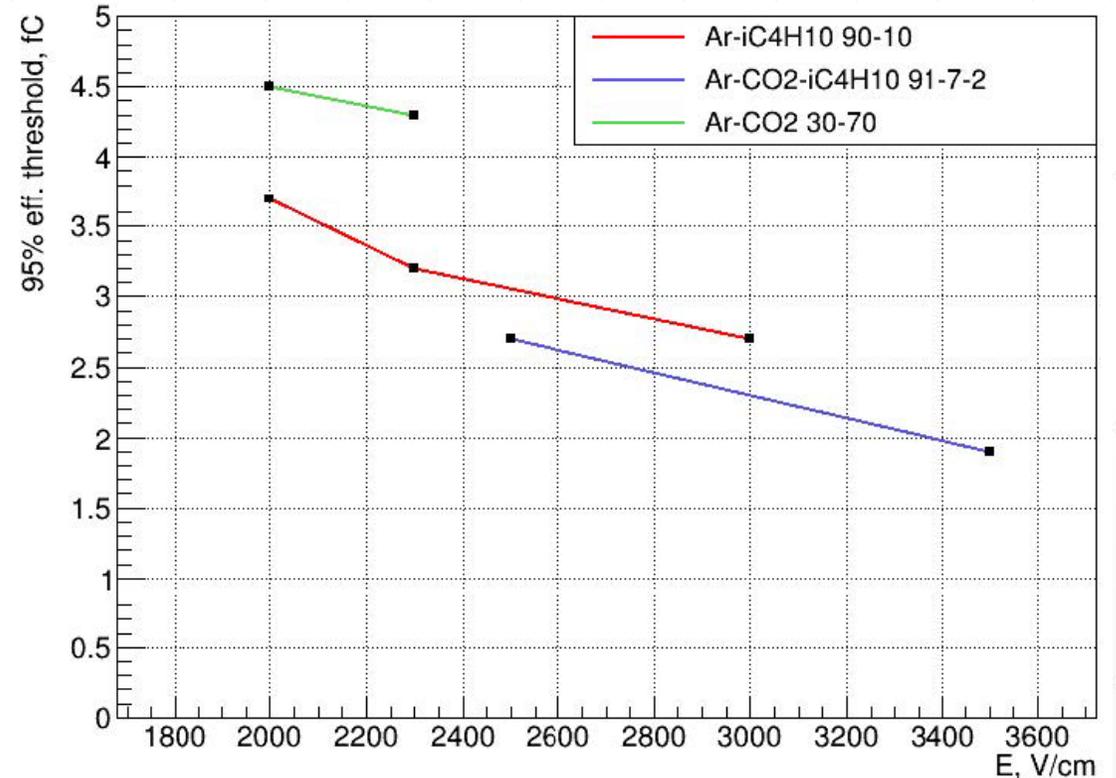
Gas mixture	Max. gain, $\times 10^4$	E_{drift} , kV/cm	Charge collection efficiency, Garfield++	N_{cl}	Lorentz angle
Ar-CO ₂ (93-7)	1,5	3	0,57	7,71	13
Ar-CO ₂ (30-70)	1,6	2,2	0,95	9,6	8
Ar-CO ₂ -iC ₄ H ₁₀ (91-7-2)	3,5	3	0,63	8,1	13
Ar-iC ₄ H ₁₀ (90-10)	3	2,5	0,8	9,45	13

Усиление и эффективность сбора заряда

- Полное моделирование было проведено для 4 смесей:
Ar-C₄H₁₀(10%), Ar-CO₂(7%)-iC₄H₁₀(2%), Ar-CO₂(70%), Ar-CO₂(7%).
- Газовое усиление было нормировано на реальные данные с коэффициентом 0.5



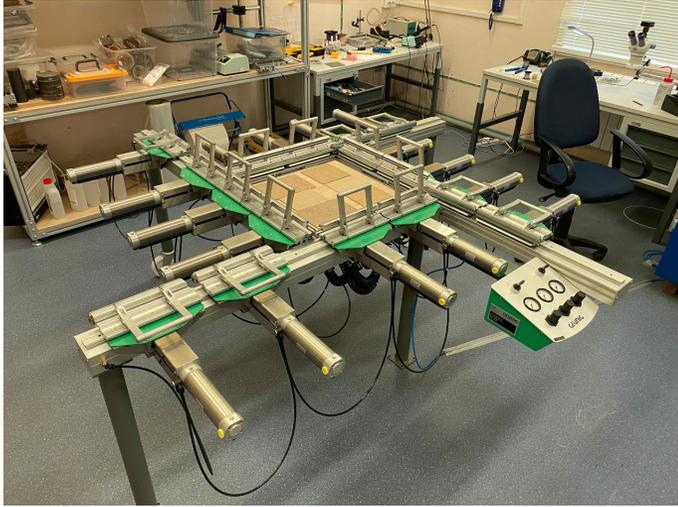
Зависимость разрешения от дрейфового поля
(моделирование)



Максимально допустимый порог 95%
эффективности

Для сравнения : Величина шума для ММ камер NSW (ATLAS) 0.3-0.4 fC RMS

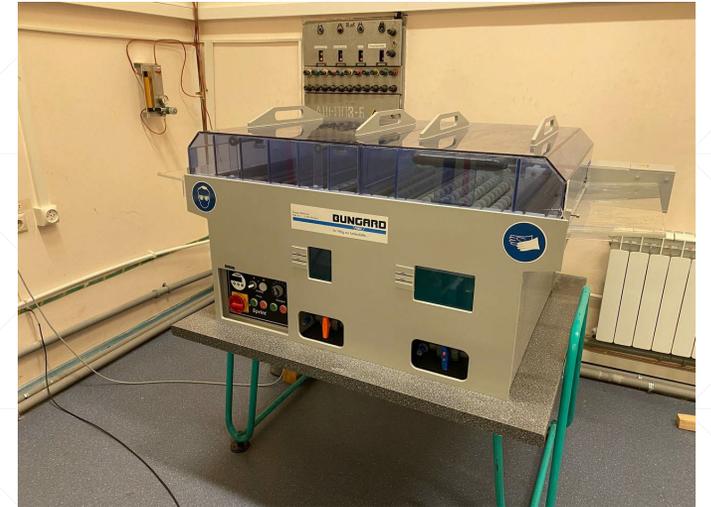
Производственный комплекс Micromegas



Натяжитель сетки



Инсолятор



Установка травления

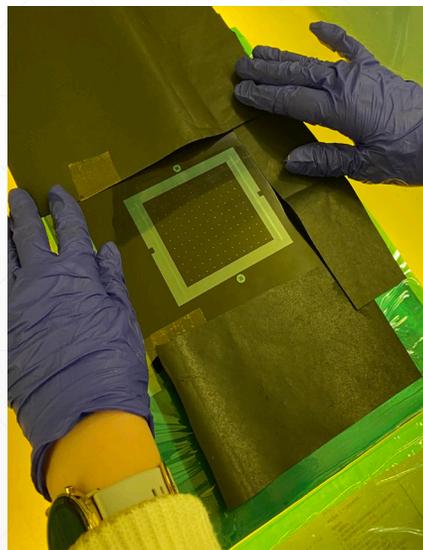
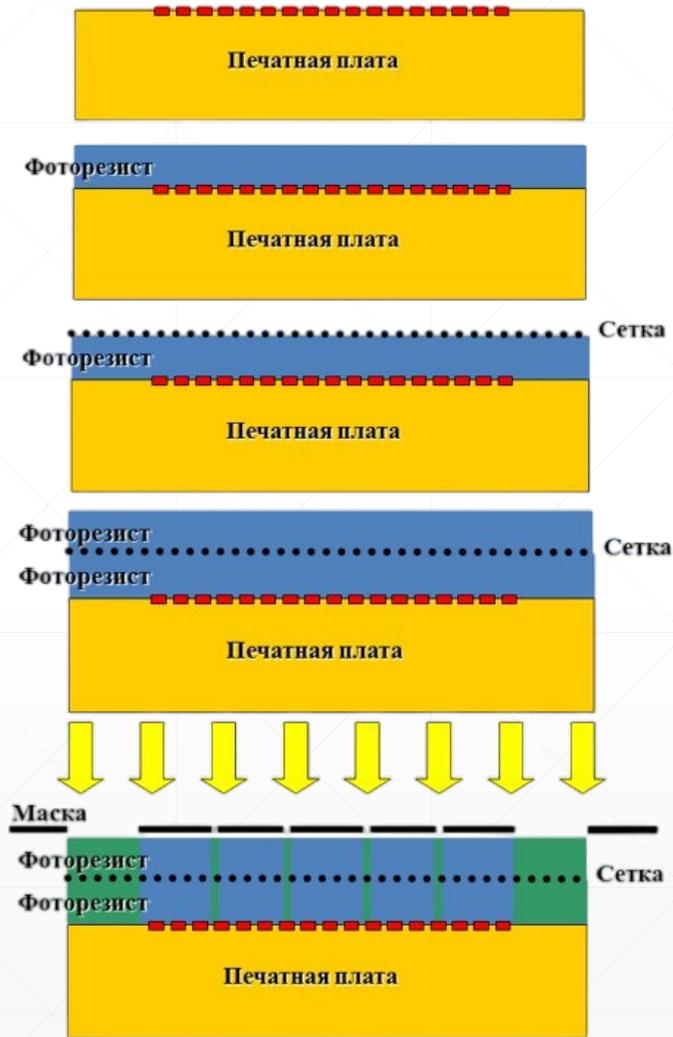


Ламинатор

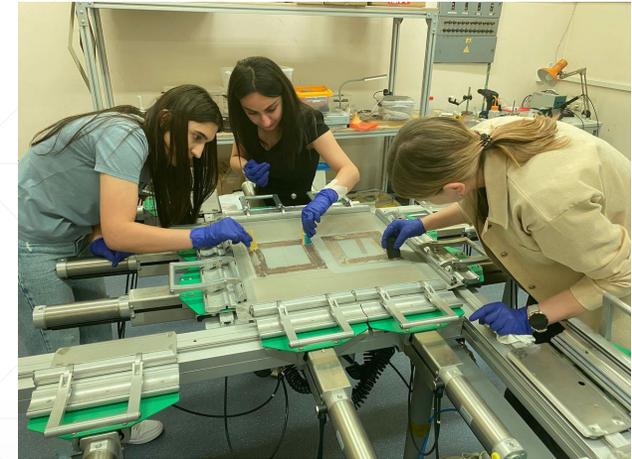


Сушильный шкаф

Изготовление детекторов ММ



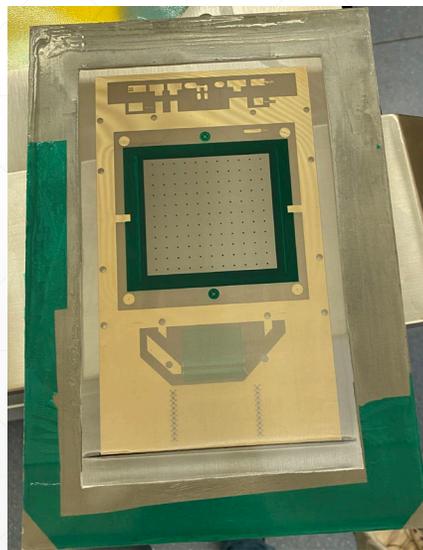
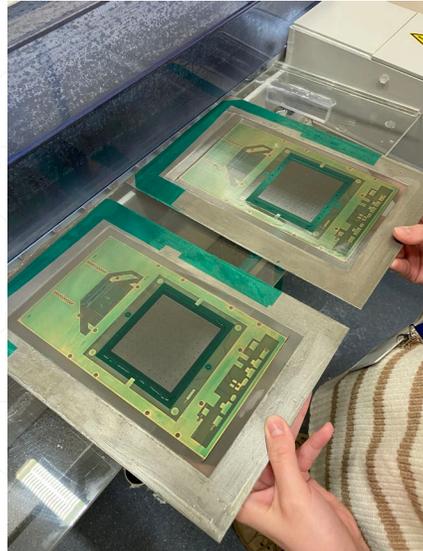
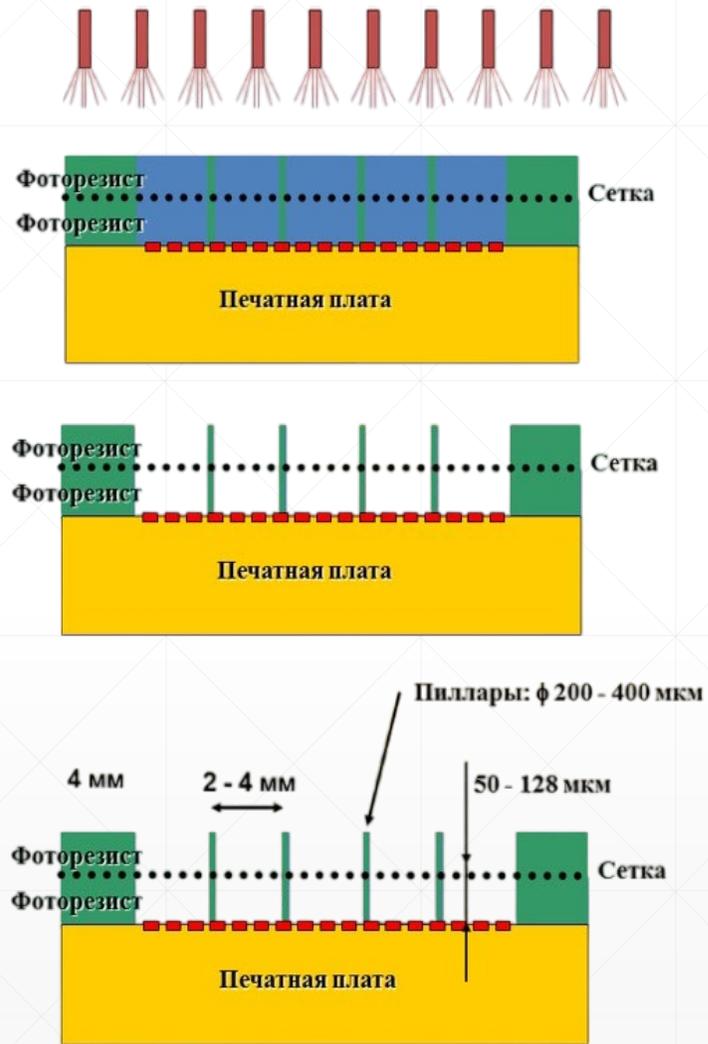
На исходную РСВ наносится необходимое количество слоев фоторезистивной пленки (DYNAMASK 40,75 мкм)



Предварительно натянутая на каркасе сетка фиксируется слоем фоторезистивной пленки

Используя фотолитографическую маску наш прототип засвечивается ультрафиолетом

Изготовление детекторов ММ



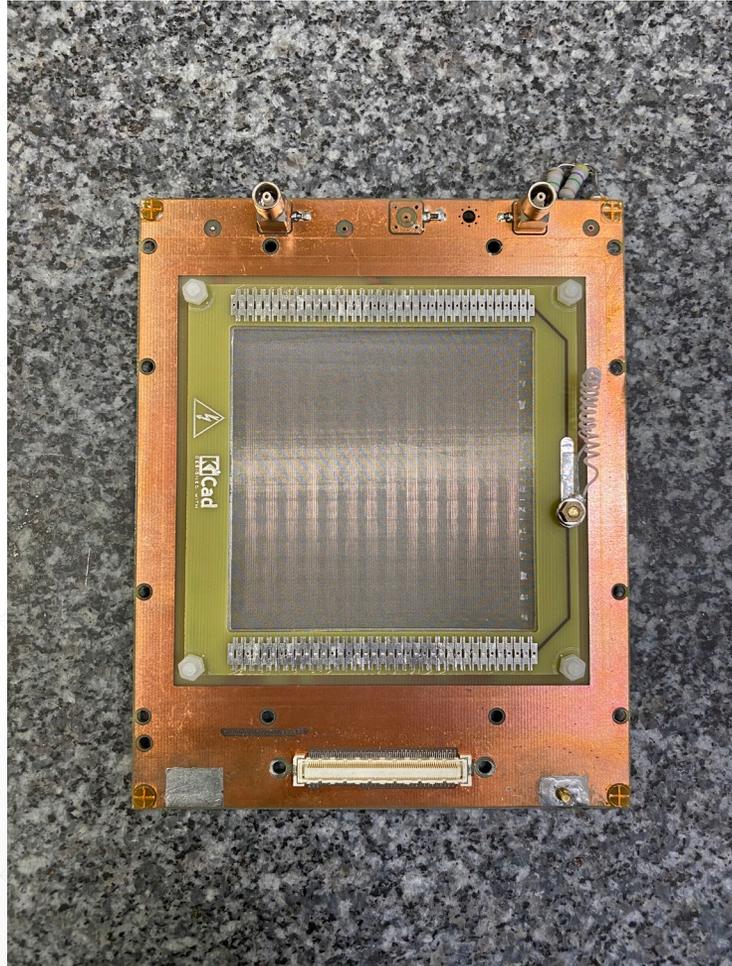
Травление 1%-м раствором кальцинированной соды Na_2CO_3

Засвеченная область остается, все остальное смывается

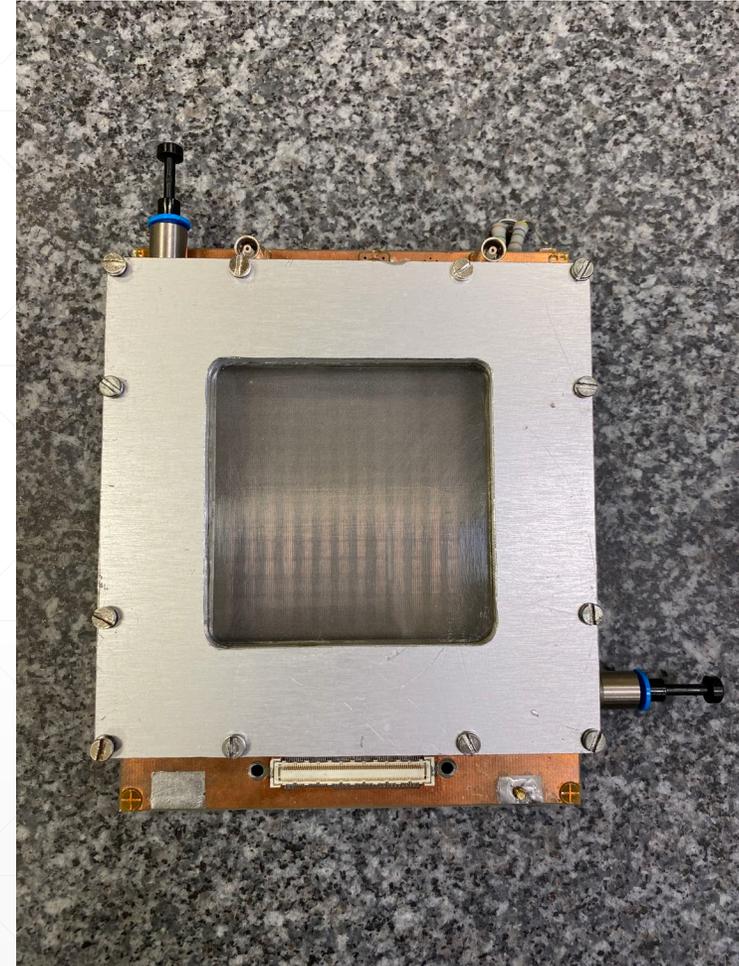
Промывка в деионизированной воде и сушка в печи при 145° – 1 час

Лишняя сетка обрезается. Распаиваются дискретные элементы

Изготовление детекторов ММ



Установка дрейфового зазора



Детектор в сборе

Изготовление полуцилиндрического детектора ММ

Во многом мы пользуемся опытом наших коллег из Сакле (Франция), которые разработали цилиндрический детектор на основе Micromegas для эксперимента CLAS12.

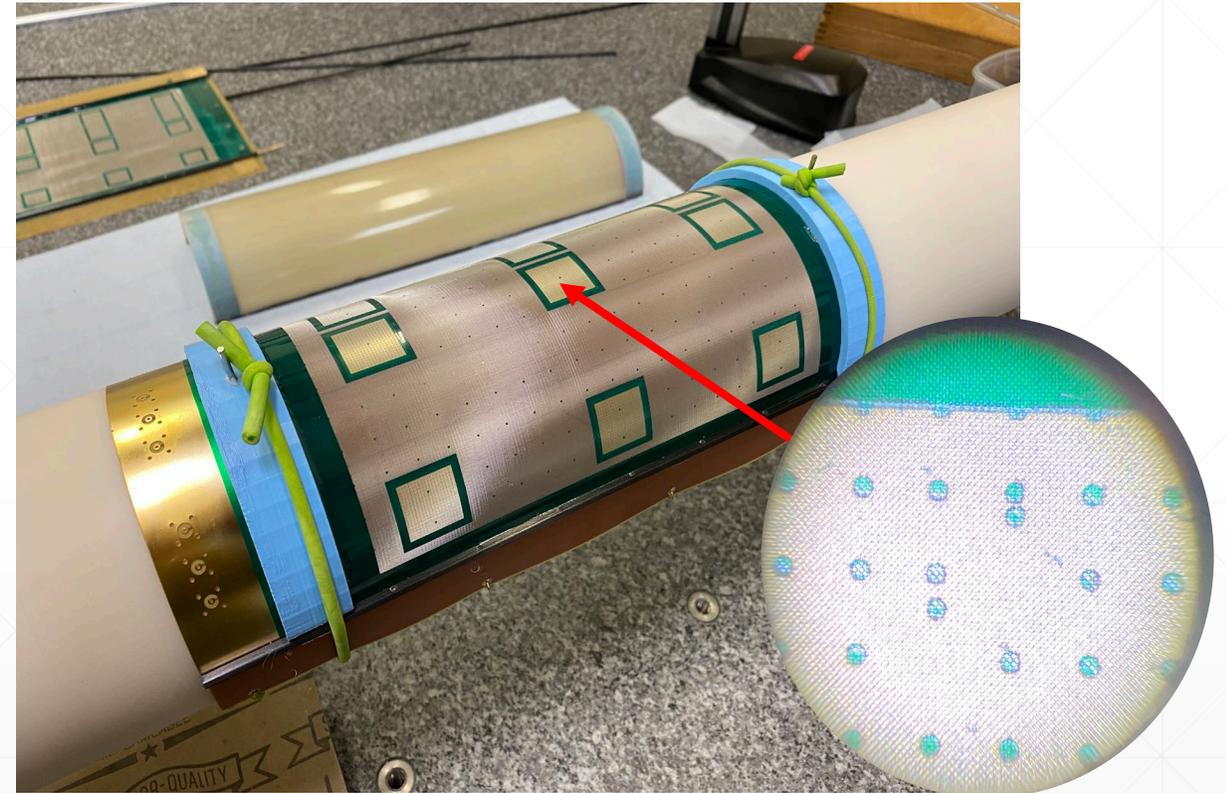
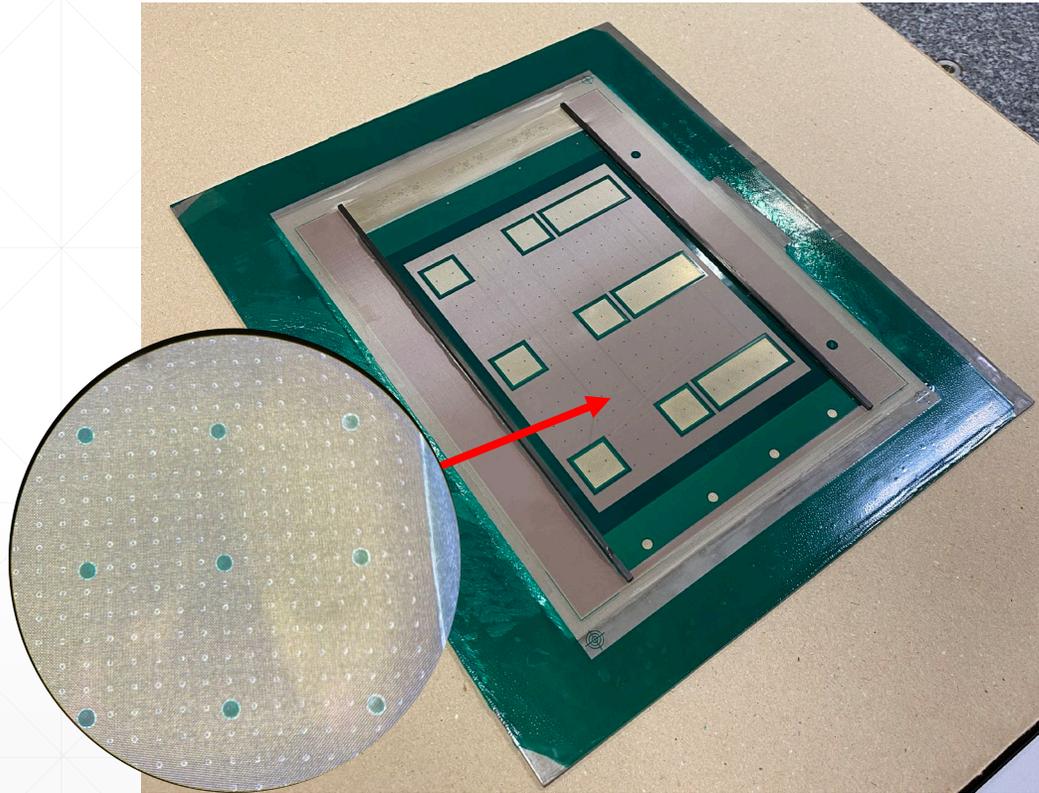
Разница: у нас радиус кривизны 5 см, а у них 20 см.



Разработка вершинного детектора ММ в рамках CLAS12

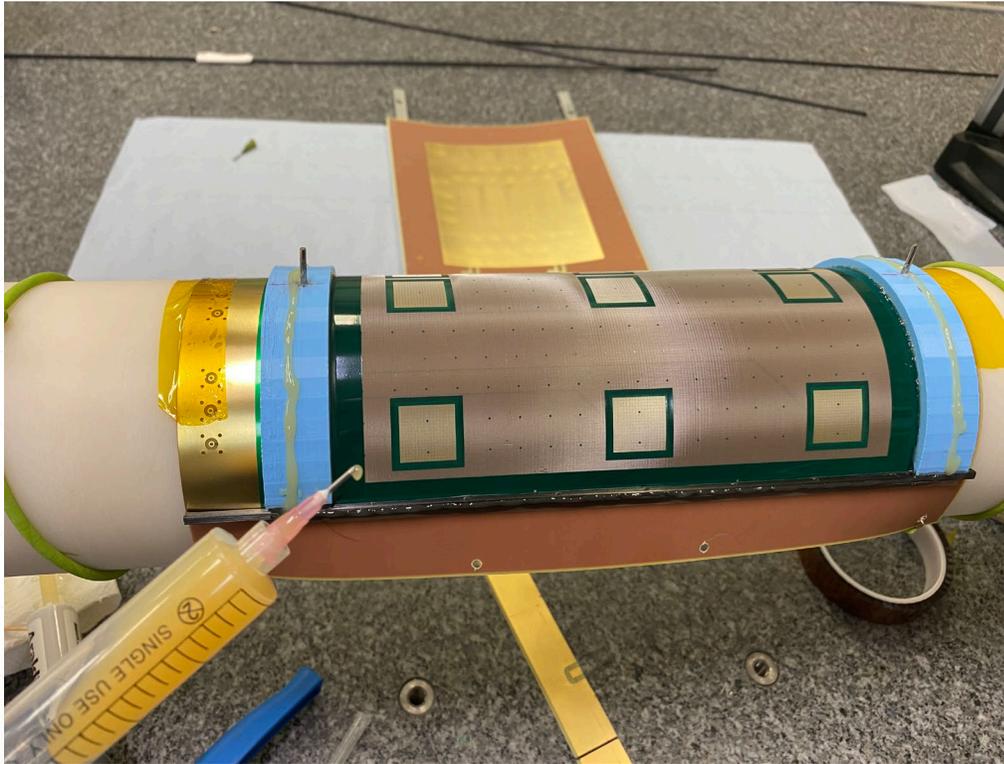
Изготовление полуцилиндрического прототипа

Наиболее важным параметром, который мы хотели контролировать для первого прототипа, является стабильность величины зазора усиления и, следовательно, усиления газа по площади детектора.



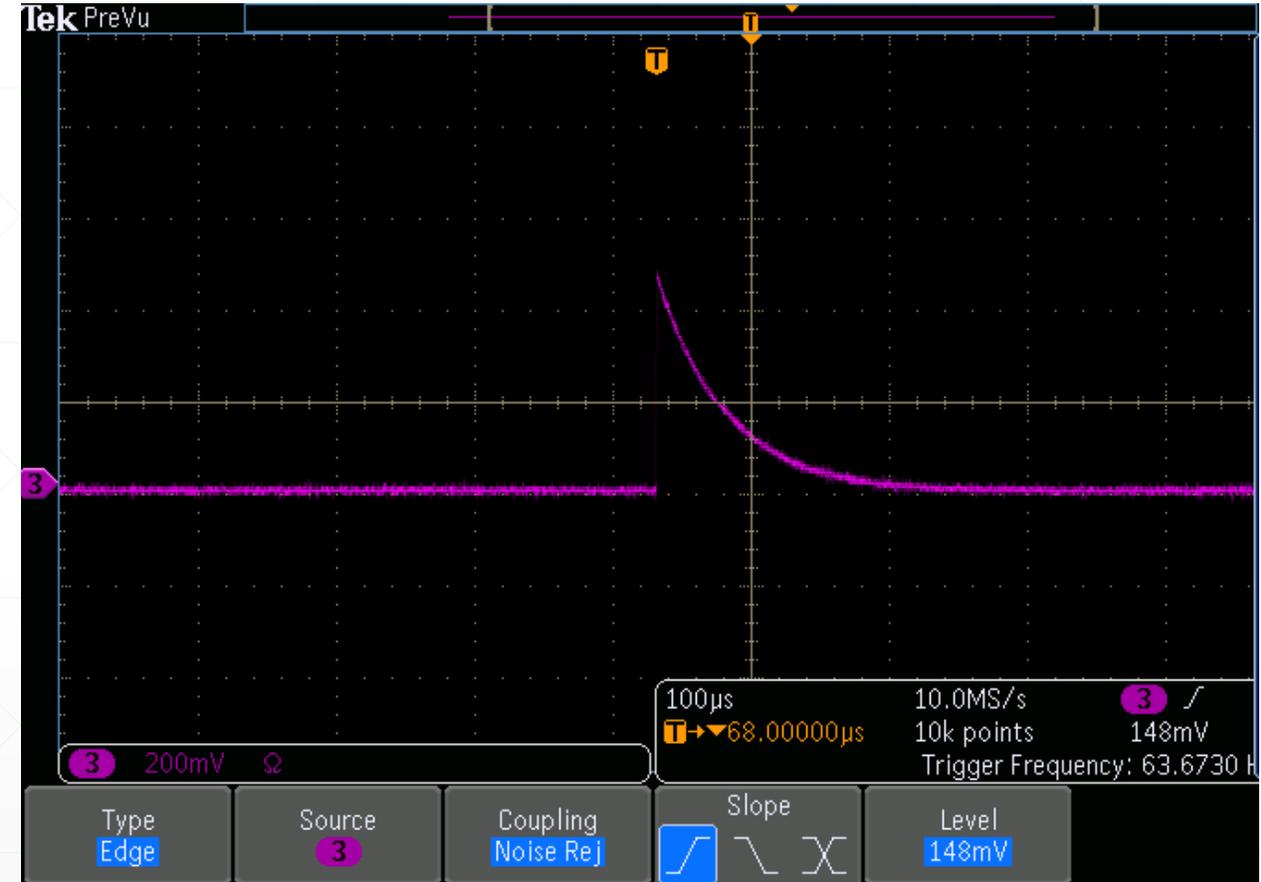
Для удобства сигнальные электроды выполнены в виде окошек размером $1,5 \times 1,5 \text{ см}^2$ и $1,5 \times 4,5 \text{ см}^2$. Для изучения возможных дефектов на характеристики детектора в процессе изготовления на одной площадке (#6) были сдвинуты два пиллара.

Изготовление полуцилиндрического прототипа



Процедура нанесения эпоксидной смолы и склейка катода и силового каркаса

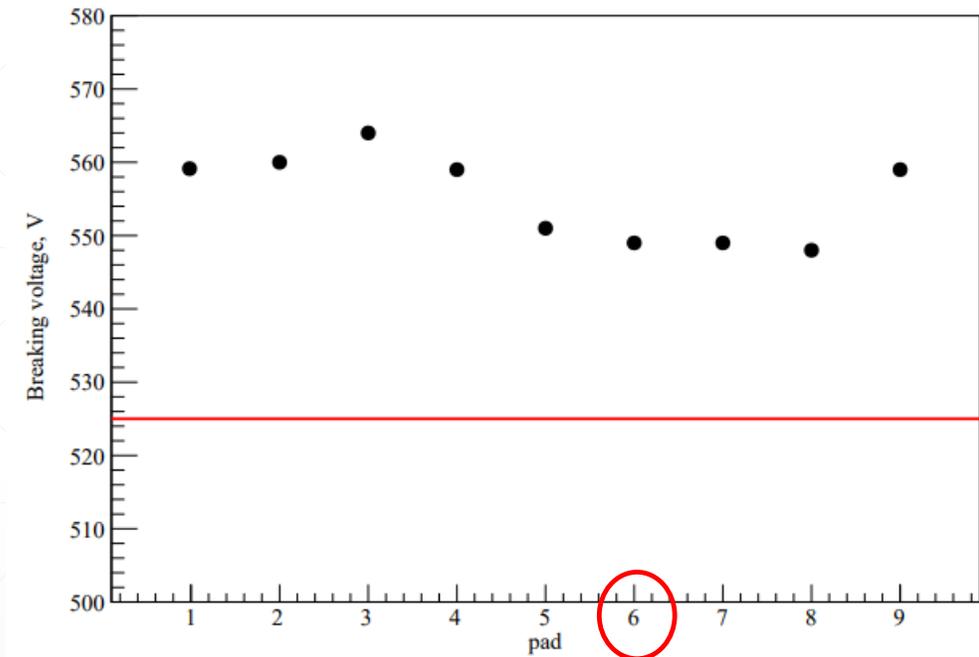
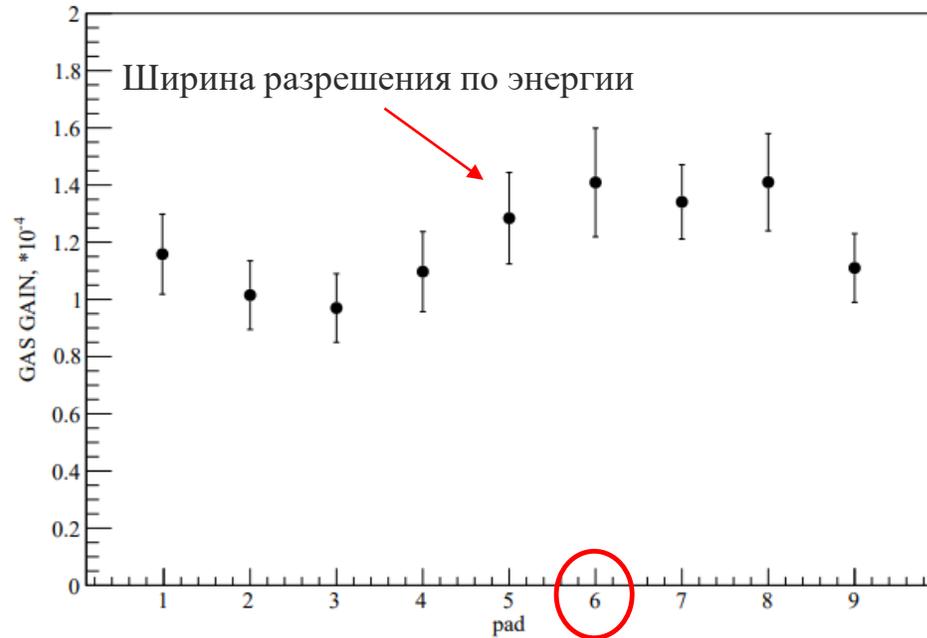
Детектор в сборе и его первое испытание



Сигнал на осциллографе. Амплитуда – 450 mV, Время сигнала – 150 µs

Исследование стабильности усиления газа по площади

Для собранного прототипа было определено напряжение пробоя для всех «окошек», а также измерены коэффициент усиления газа и энергетическое разрешение при одном и том же рабочем напряжении $U_{\text{gain}} = 525 \text{ В}$.



Слева: зависимость коэффициента усиления газа для каждого «окошка» при фиксированном напряжении усиления $U_{\text{gain}} = 525 \text{ В}$, что соответствовало коэффициенту усиления газа 10^4 . Столбики ошибок представляют разрешение по энергии (среднеквадратичное значение), измеренное с помощью источника Fe_{55} .

Справа: напряжение пробоя, измеренное отдельно для всех «окошек». Красная линия представляет рабочее напряжение для коэффициента усиления газа около 10^4 . Для всех мы имеем запас по напряжению в 25V.

Заключение

За 2 года развития проекта МСТ/SPD:

- Отработаны основные этапы технологии производства Micromegas детекторов
 - Проведены тесты газовых смесей для работы в магнитном поле
 - Исследована устойчивость резистивного покрытия DLC.
 - Изготовлен и протестирован первый цилиндрический прототип МСТ
- ❖ Следующий шаг – изготовление и тестирование рабочего прототипа со стрипами и резистивным покрытием.

Спасибо за внимание!
