

Объединенный институт ядерных исследований  
Лаборатория физики высоких энергий  
им. В.И. Векслера и А.М. Балдина.

**Бабкин Вадим Андреевич**

**Времяпролетная система идентификации частиц  
многоцелевого детектора (MPD)**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

**Научный руководитель:**

**к.ф.-м.н.,  
В.М. Головатюк**

## Актуальность темы исследования

Результаты диссертационной работы будут использованы для создания установки, изучающей свойства экстремально горячей и плотной ядерной материи, что в настоящее время является одной из самых актуальных задач в физике высоких энергий. Интерес к данной тематике также подтверждается тем, что сразу несколько больших мировых научных центра занимаются созданием подобных установок. С другой стороны, необходимость создания детектирующей системы самого современного уровня, удовлетворяющей требованиям эксперимента MPD (MultiPurpose Detector), является очень актуальной методической задачей. Для создания времяпролетной системы используются многоззорная резистивная плоская камера (МРПК). Данный тип детекторов на настоящее время развивается весьма активно, что подтверждает, большое число публикаций по данной тематике во множестве специализированных изданий.

**Основной целью** диссертационной работы является создание эффективной времяпролетной системы идентификации частиц многоцелевого детектора на ускорительном комплексе NICA на базе МРПК.

**Задачи** диссертационной работы:

- исследование рабочих характеристик и оптимизация многоззорных резистивных плоскопараллельных камер, предназначенных специально для времяпролетной системы многоцелевого детектора;
- проектирование максимально эффективной времяпролетной системы идентификации частиц многоцелевого детектора, на основе разработанной МРПК;
- создание производственной и испытательной инфраструктуры, позволяющей произвести детектор любой сложности и детально изучать все его рабочие характеристики.

# Научная новизна и значимость диссертационной работы

Физические задачи эксперимента MPD, посвященные изучению сверхплотной материи, имеют большое значение в понимании очень многих фундаментальных проблем. Особый интерес вызывают: поиск новых, ранее не наблюдавшихся форм барионной материи, лучшее понимание связанности кварков в нуклонах и эволюция Вселенной (в частности, поиск причины отсутствия в ней антивещества). Помимо фундаментальной значимости, данная работа имеет высокое методическое значение.

**Новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые детально аналитически и экспериментально изучено распространение токового сигнала по длинной дифференциальной полосковой линии считывания МРПК, показавшее, что для достижения максимального временного разрешения конструкция детектора должна быть максимально диэлектрически симметричной и согласованной.
2. Впервые была предложена конструкция МРПК с 15 газовыми зазорами, разделенными считывающими электродами на 3 секции. Такая конструкция является диэлектрически симметричной и, благодаря большому числу газовых зазоров, обладает высоким временным разрешением. Изготовленный прототип МРПК с активной площадью  $0.2 \text{ м}^2$  такой конструкции при испытаниях на выведенном пучке дейтронов Нуклотрона показал временное разрешение 40 пс при эффективности регистрации 99%. Благодаря такому временному разрешению, удалось по времени прихода сигналов с двух сторон линии восстановить координату пролета частиц с разрешением 5 мм.
3. Впервые была изучена зависимость эффективности и временного разрешения МРПК, изготовленных из стекла различной толщины, от интенсивности потока частиц. Результаты этих исследований привели к оптимизации конструкции МРПК для TOF MPD, которая проявилась в использовании для сборки детектора сочетания тонких стекол и узких зазоров, что улучшило загрузочную способность в два раза.

## На защиту выносятся следующие положения:

1. Экспериментально изучен принцип работы многозазорных резистивных плоских камер с считыванием сигналов с двух сторон полоскового электрода. Проведена работа по исследованию и моделированию особенностей прохождения высокочастотного импульса по считывающим электродам в виде длинных узких полос (стрипов) и на границах стрип-кабель-усилитель.
2. Разработана, изучена и оптимизирована для массового производства МРПК специально для времяпролетной системы МРД с большой активной площадью ( $\sim 0.2 \text{ м}^2$ ). Измеренное временное разрешение данного детектора в среднем составляет 50 пс (включая разрешение электроники) на всей активной площади.
3. Проведена методическая работа по изучению и улучшению загрузочных свойств детекторов различными методами. Впервые для этого было использовано сочетание эффекта уменьшения толщины стекла и увеличения числа узких зазоров для уменьшения заряда лавины в одном газовом зазоре.
4. Разработана и промоделирована оригинальная конструкция цилиндрической части времяпролетной системы многоцелевого детектора на базе МРПК, отвечающая всем требованиям эксперимента.
5. Для испытания детекторов создана новая специализированная экспериментальная установка на выведенном пучке Нуклотрона «Тестовый канал МРД», позволяющая испытывать большинство типов детекторов на пучках как минимально ионизирующих частиц, так и тяжелых ионов высоких энергий.
6. Создана и введена в эксплуатацию инфраструктура для массового производства и испытания детекторов и модулей времяпролетной системы TOF для эксперимента МРД.

## Объем и структура работы:

Диссертация изложена на 150 страницах и состоит из введения, 5 глав и заключения. Диссертация содержит 99 рисунков, 5 таблиц и список литературы из 99 источников цитирования.

Во введении к основному тексту диссертации представлено краткое описание цели работы и задач по ее реализации. Традиционно здесь представлены основные положения, выносимые на защиту, их актуальность и практическая ценность, а также апробация результатов работы.

**Первая глава** диссертации является обзорной. В ней кратко описана структура ускорительного комплекса NICA, приводятся основные физические цели и задачи эксперимента MPD и перечислены основные требования к времяпролетной системе. На основе этих требований приводится обзор существующих быстрых детекторов, исходя из которого выбирается тип и конструкция детектора.

Детектор MPD на ускорительном комплексе NICA нацелен на решение следующих проблем современной физики частиц:

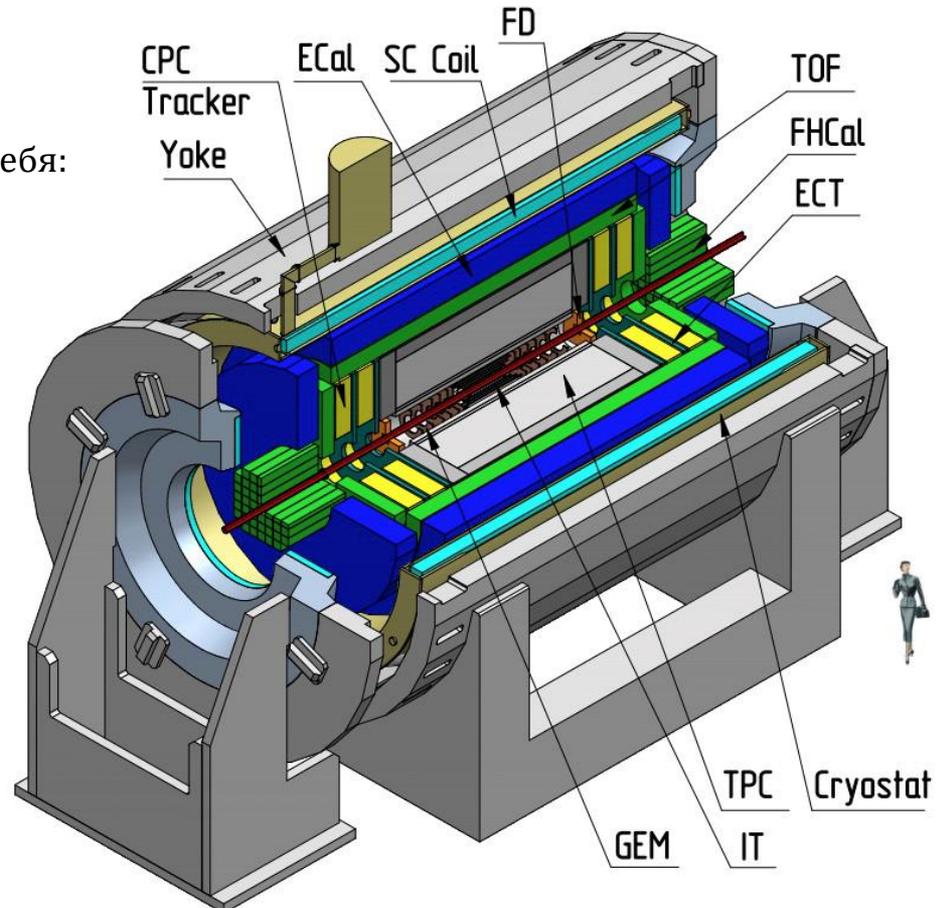
- изучение уравнения состояния ядерной материи при высоких плотностях;
- частичное восстановление киральной симметрии;
- фазовый переход, включая возможность обнаружения сигналов деконфайнмента;
- изучение свойств кварк-адронной фазы вещества;
- поиск критической точки на фазовой диаграмме.

Такие задачи предполагают детальное изучение свойств всех частиц, рождающихся в результате соударения ионов в коллайдере. В первую очередь важнейшей задачей является идентификация сорта каждой частицы и ее импульс. Для прецизионных и высокоэффективных измерений экспериментальная установка должна иметь самые современные и высокоэффективные детектирующие системы.

# Структура многоцелевого детектора

Многоцелевой детектор в полной конфигурации состоит из следующих основных подсистем:

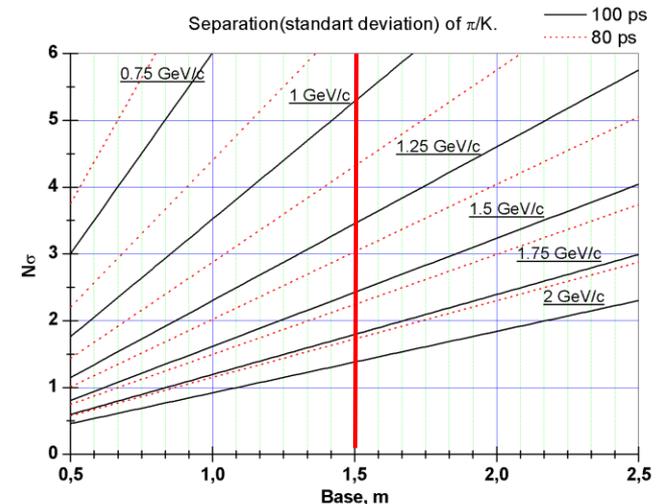
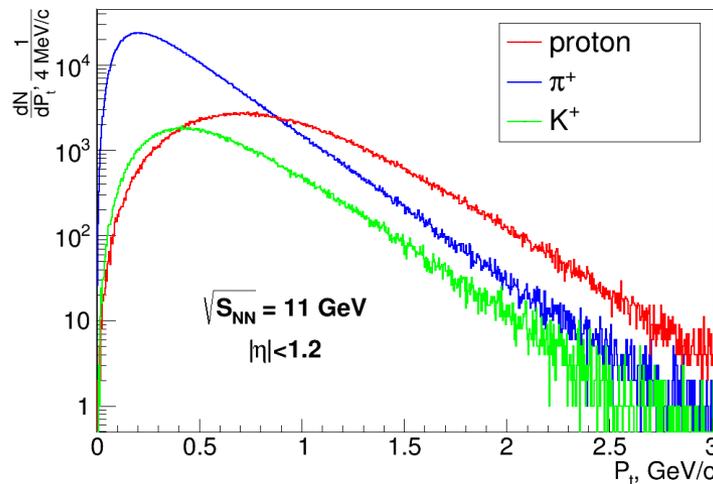
- Сверхпроводящий магнит-соленоид.
- Система идентификации частиц, включающая в себя:
  - времяпролетную систему TOF;
  - времяпроекционную камеру TPC;
  - электромагнитный калориметр ECal.
- Трековая система, состоящая из:
  - внутреннего трекера IT;
  - времяпроекционной камеры TPC;
  - торцевые трековые детекторы ECT;
- Система триггера, включающая в себя:
  - быстрый передний детектор FD;
  - счетчик встречных соударений BBC;
  - передний адронный калориметр FHCAL;



# Требования к времяпролетной системе идентификации частиц в МРД

Чтобы обеспечить их эффективное разделение по времени пролета необходимо создать детектор, который удовлетворял бы следующим требованиям:

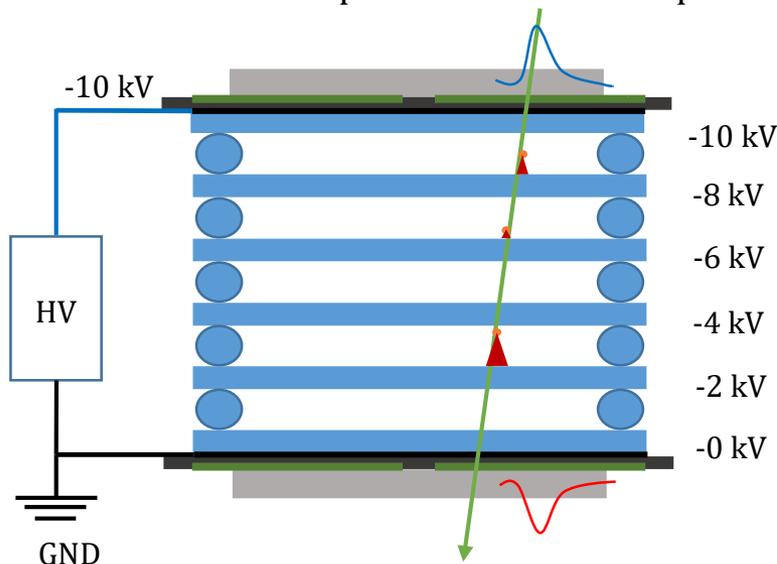
- конструкция детектора должна быть достаточно недорогой и простой для создания системы с площадью около 50 м<sup>2</sup>;
- временное разрешение лучше 80 пс (для разделения  $\pi/K$  с поперечными импульсами до  $p_t < 1.5$  ГэВ/с);
- оптимальное соотношение гранулярности считывающих электродов и количества каналов электроники для минимизации загрузки каналов из-за высокой множественности частиц в центральных столкновениях ионов ( $< 15\%$ );
- хорошее координатное разрешение ( $\sigma < 10$  мм) для эффективного согласования трека, определенного в ТРС с положением частицы в ТОФ;
- детектор должен работать в магнитном поле до 0.5 Тл;
- временное разрешение и эффективность не должны ухудшаться при нагрузках до 50 Гц/см<sup>2</sup>.



# Устройство и принцип работы МРПК

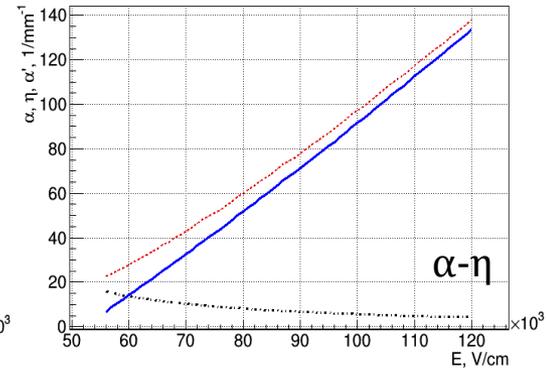
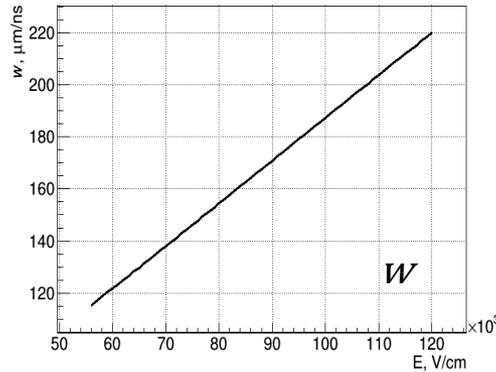
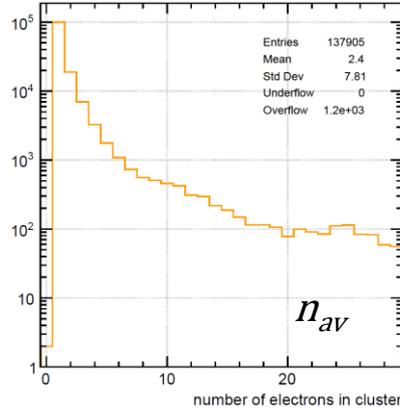
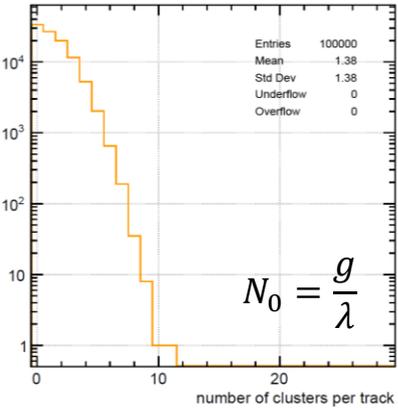
Во **второй главе** диссертации описывается устройство и принцип работы резистивной плоской камеры, формулируются основные принципы её работы. В главе рассматривается процесс формирования и распространения сигнала в МРПК от образования при пролете частицей кластеров ионизации до распространения наведенного на считывающие электроды электрического сигнала по дифференциальной линии стрип-кабель-усилитель.

Резистивная плоская камера представляет собой один или несколько узких параллельных газовых промежутков, образованных резистивными электродами с объемным сопротивлением порядка  $10^{10} - 10^{13}$  Ом·см, в качестве которых чаще всего используется термополированное (изготовленное по флоат-технологии) стекло. Для создания внутри газового промежутка электростатического поля, достаточного для возникновения электронной лавины, на поверхности внешних резистивных электродов наносится проводящее покрытие, на которое подается необходимое высокое напряжение. Электромагнитный импульс, возникающий в результате движения зарядов лавины, индуцируется на внешние считывающие электроды, которые обычно изготавливают на стеклотекстолите. Электроды, имеющие нулевой потенциал, отделены от высоковольтного слоя изолятором во избежание пробоя.



# Устройство и принцип работы МРПК

## Формирование сигнала в МРПК



MAGBOLTZ+HEED для смеси  $C_2H_2F_4/i-C_4H_{10}/SF_6$  (90/5/5) ( $\pi$ -мезон 1 ГэВ/с)

Ток в лавине:

$$i(t) = eN(t) \frac{w}{g} = eN_0 w \left(1 - \frac{wt}{g}\right) e^{(\alpha-\eta)wt}$$

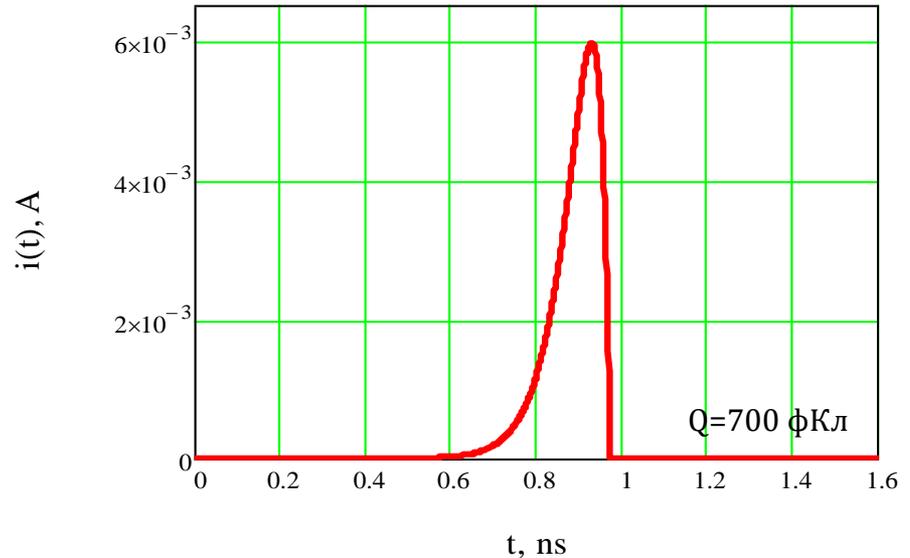
«Взвешенное» поле определяется из условий:

$$\sum_{i=1}^n E_i d_i = V_w, \quad \varepsilon_i E_i = \varepsilon_j E_j$$

$$\frac{E_w}{V_w} = \frac{1}{2 \frac{d_{PCB}}{\varepsilon_{PCB}} + 2 \frac{d_{Kapt}}{\varepsilon_{Kapt}} + 2 \frac{d_{out}}{\varepsilon_{glass}} + 4 \frac{d_{in}}{\varepsilon_{glass}} + 5g}$$

Средний наведенный на считывающие электроды ток:

$$\bar{i}(t) = \frac{E_w}{V_w} w n_{av} e_0 e^{(\alpha-\eta)wt} \frac{1}{\lambda} (g - wt) \Theta\left(\frac{g}{w} - t\right)$$



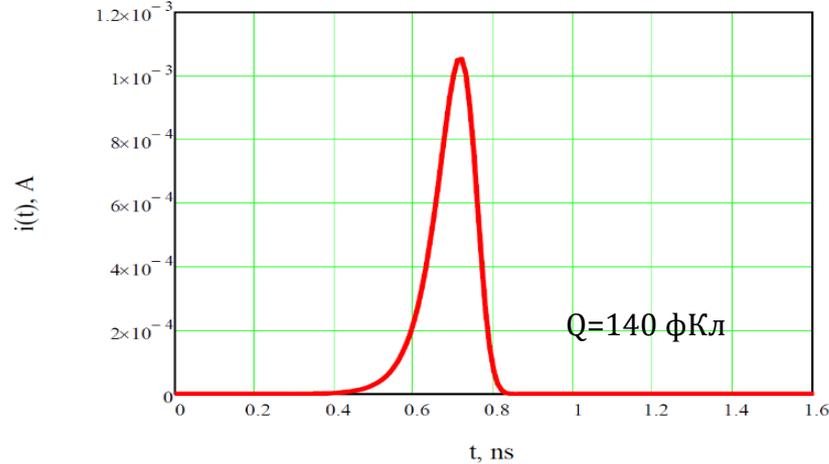
Наведенный на считывающие электроды МРПК ток от одного зазора 0,2 мм, заполненного стандартной газовой смесью

# Устройство и принцип работы МРПК

Эффект ограничения объемного заряда

$$\alpha(N) = \alpha_0 \frac{N_{sat}}{N + N_{sat}}; w(\alpha) = 0.1101 + 8.42 \cdot 10^{-4} \alpha \text{ [мм/нс]}$$

$N_{sat} \sim 10^9$  - условие Мика для узких зазоров

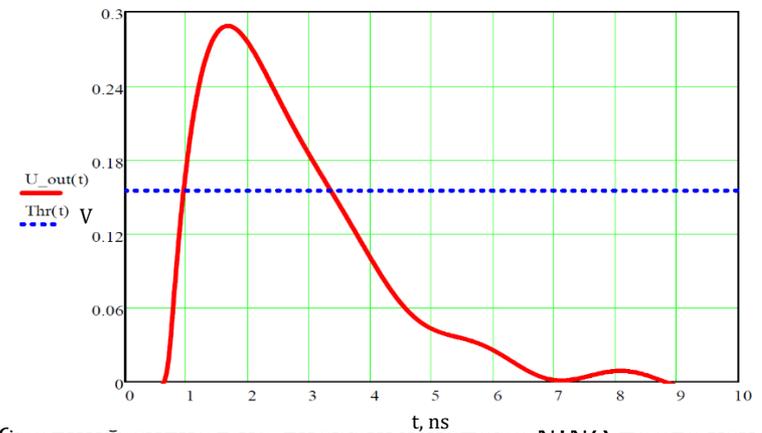


Наведенный на считывающие электроды МРПК средний ток от 10 зазоров с учетом эффекта объемного заряда

Отклик электроники с учетом шумов

$$f(t) = n^{-n} e^{n \left(\frac{t}{\tau}\right)^n} e^{-\frac{t}{\tau}}; U_{out}(t) = 1.8 \cdot 6^4 \cdot \int_0^{\infty} \bar{i}(t) f(t-x) dx.$$

$U_{noi}(t) = K \sum_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i)$  - модель шума электроники



Средний сигнал на дискриминаторе NINO после усиления с учетом шумов электроники. Синяя линия – стандартный порог дискриминации NINO – 160 мВ

## Влияние плотности потока частиц на характеристики МРПК

González-Díaz D., Fonte P., Garzon J.A. and Mangiarotti A., An analytical description of rate effects in timing RPCs // Nucl. Phys. B. – 2006. – Vol.158. – P.111–117.

Падение разности потенциалов в зазоре:

$$\Delta U = U_s - \bar{U}_{eff} = \bar{I}R = \bar{Q}\varphi\rho d.$$

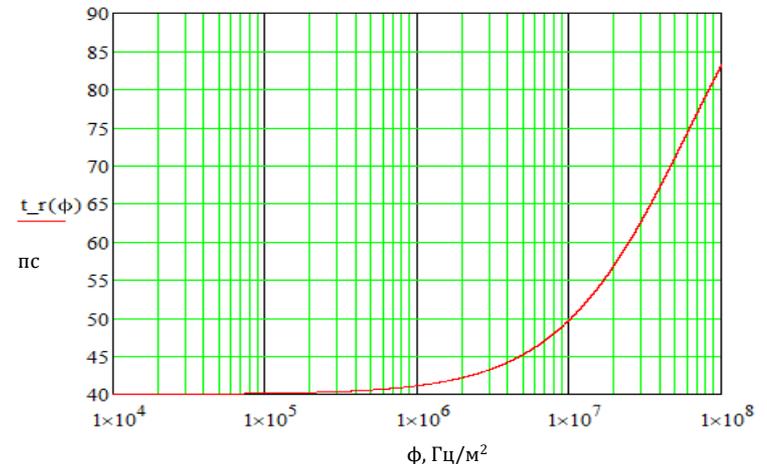
Изменение временного разрешения:

$$\frac{\Delta\sigma_t}{\sigma_t}(\varphi) = \frac{1}{S_0} \frac{dS}{dE} \frac{\Delta\bar{E}(\varphi)}{\Delta\bar{E}(\varphi)}, \text{ где } \begin{cases} S_0 = (\alpha - \eta)w \\ \Delta\bar{E} = (\bar{Q}(E - \Delta\bar{E})\varphi\rho d)/g \end{cases}$$

$$\bar{Q} = a(\bar{U}_{eff} - U_{th}) \Rightarrow \bar{U}_{eff} = U_{th} + \frac{U_s - U_{th}}{1 + a\varphi\rho d}.$$

$U_{th} = 2.1$  кВ – равновесное пороговое напряжение

$a = 2.9$  пКл/кВ – коэффициент уменьшения заряда лавины

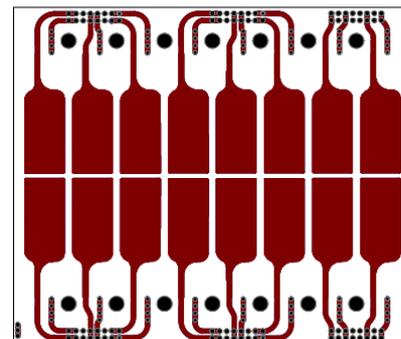
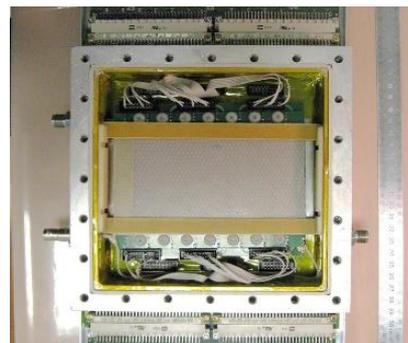
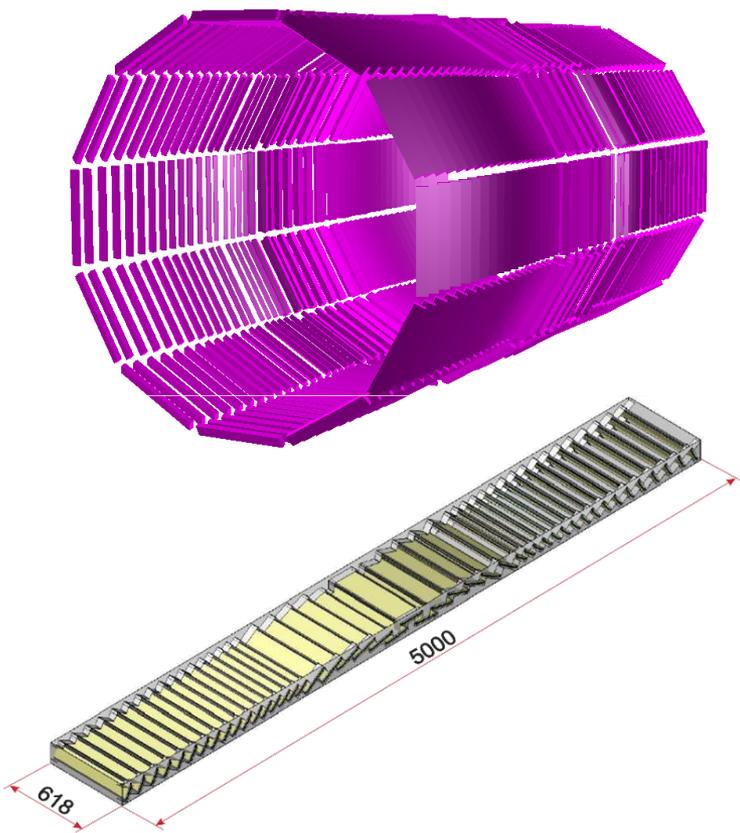


Расчетная зависимость временного разрешения МРПК от потока проходящих через нее частиц

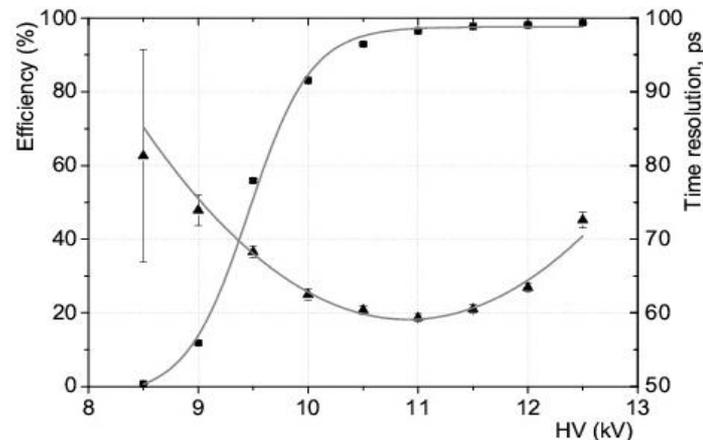
# Разработка МРПК для TOF MPD

Третья глава посвящена разработке и исследованию рабочих характеристик МРПК различных конструкций в целях оптимизации ее для времяпролетной системы эксперимента MPD. Хронологически описывается процесс создания различных конструкций детекторов, из испытания и выводы. Основным результатом этой работы стала принципиально новая симметричная 15-зазорная конструкция МРПК.

Первая предложенная конструкция времяпролетной системы Многоцелевого детектора состояла из 12 модулей, в каждом из которых располагалось по 47 МРПК двух типов. Общее число каналов – 31680.



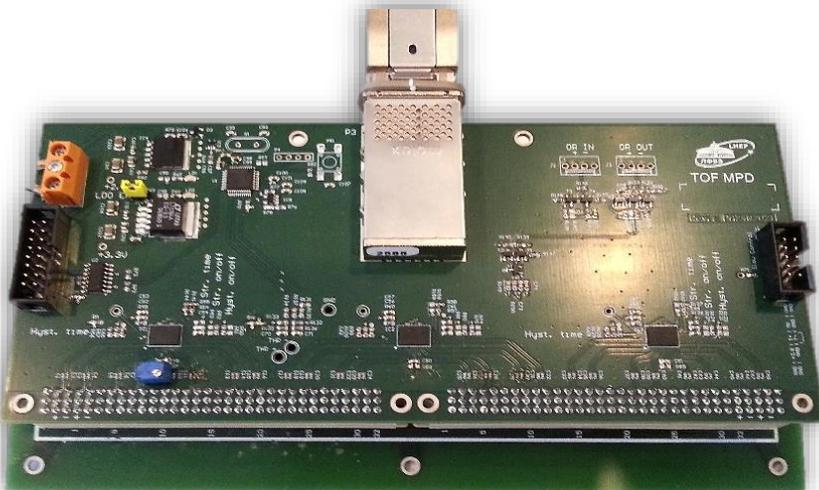
Прототип детектора с считывающими электродами в виде площадок



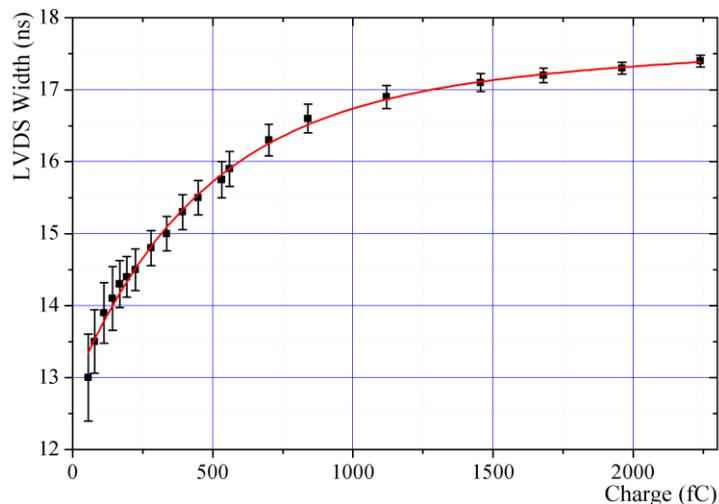
Времяпролетной системы с «пэдовым» считыванием

Разрешение и эффективность прототипа «пэдовой» МРПК

# Предусилитель на базе микросхемы NINO для TOF MPD



24-канальный усилитель-дискриминатор PA24N2V4L на базе чипа NINO с выходным разъемом MOLEX CXP



Зависимость длительности импульса LVDS на выходе NINO от входного заряда

## Характеристики усилителя-дискриминатора TOF MPD:

- Стабилизированное напряжение (+2,5 В);
- Дифференциальный вход ( $Z_{diff} = 54 \text{ Ом}$ );
- Защита входных каналов от перегрузки;
- Конденсаторы на входе для двустороннего считывания;
- Выходной разъем CPX (InfiniBand);
- Последовательный выход "or" для триггерных целей;
- 8-битный контроллер MCU STM8L152C8T6 ультранизкой мощности (< 20 мкВт) для:
  - ✓ управление напряжением питания усилителя;
  - ✓ управление порогом дискриминатора;
  - ✓ мониторинг температуры платы ( $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ );
  - ✓ мониторинг температуры газового объема;
- Временное разрешение одного канала  $10.4/\sqrt{2} = 7.3 \text{ пс}$ ;
- Возможность Time-over-Threshold коррекции.



Распределение разности времен двух каналов усилителя

# МРПК с полосковыми считывающими электродами

После оценки первой предложенной конструкции с большим числом «пэдовых» электродов, было принято решение оптимизировать ее путем перехода к двустороннему считыванию с полоскового «стрипового» электрода. Первый прототип МРПК с стриповым считыванием имел две разделенные считывающими электродами секции, как и «пэдовая» МРПК. Основное отличие нового детектора состояло в большой активной площади ( $600 \times 300 \text{ мм}^2$ ) и считывающих электродах в виде длинных полос шириной 10 мм.

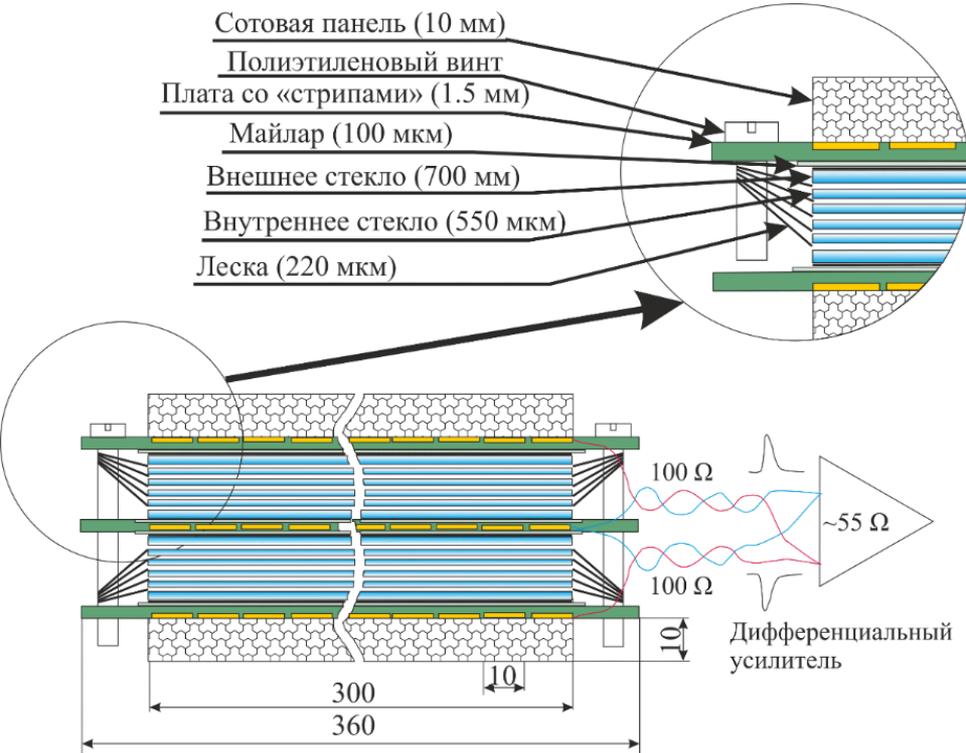
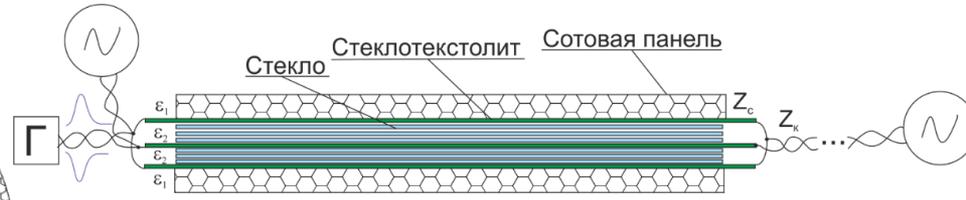
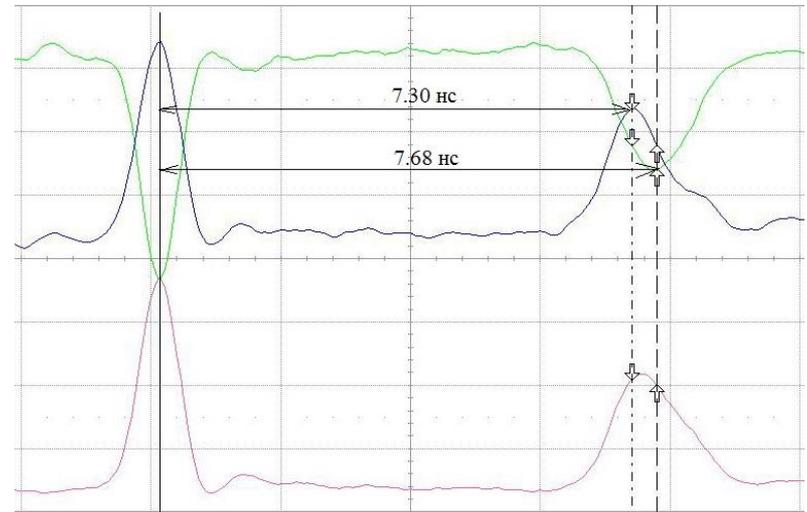


Схема прототипа двухстековой МРПК со стриповым считыванием



Принципиальная схема установки для исследования прохождения сигналов через МРПК



Отражение дифференциального сигнала, прошедшего отдельно через анодный и катодный стрипы двухстековой МРПК.

# МРПК с полосковыми считывающими электродами

Для сеанса тестирования на Нуклотроне в марте 2013 года были собраны два прототипа МРПК: односекционный с 6 зазорами по 250 мкм и полосками шириной 5 мм и двухсекционный, который составлялся из двух одностековых, разделенных сотовой панелью, для уменьшения дисперсии сигнала.

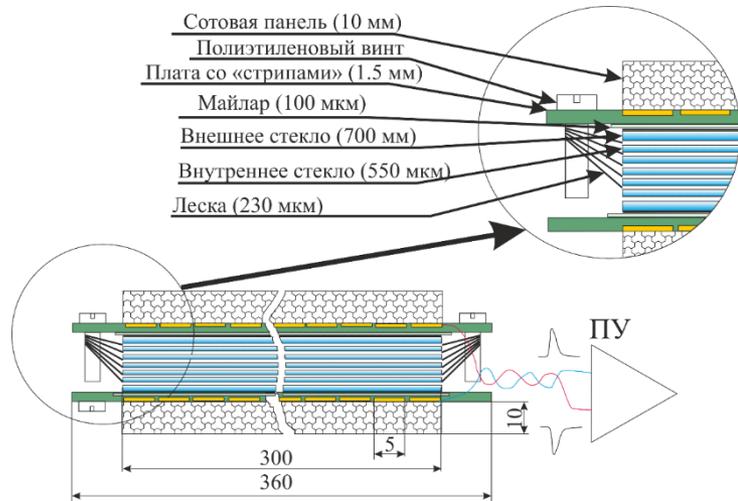


Схема одностековой МРПК со стрипом шириной 5 мм

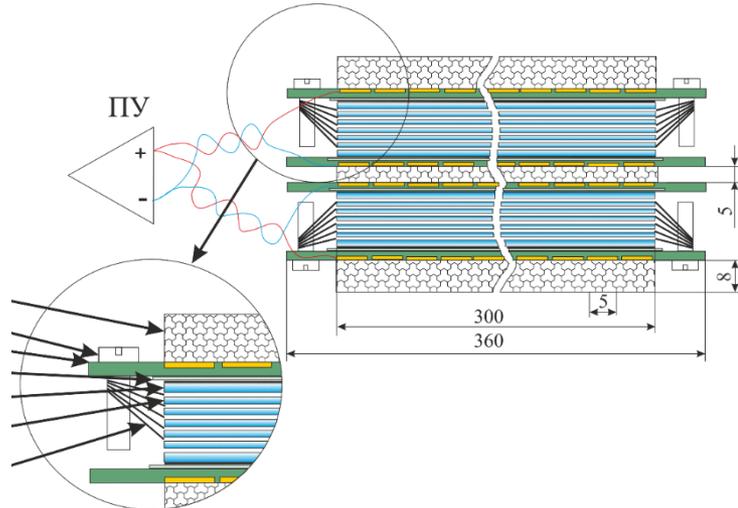
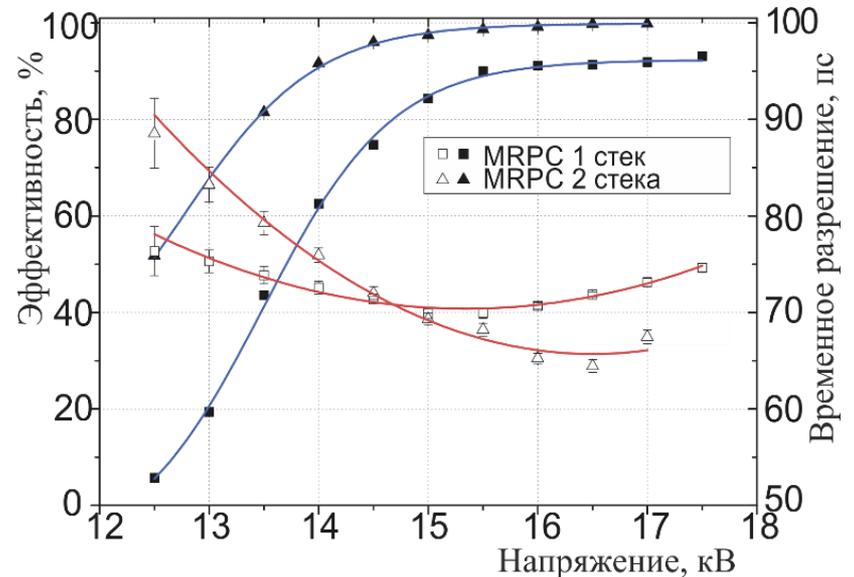
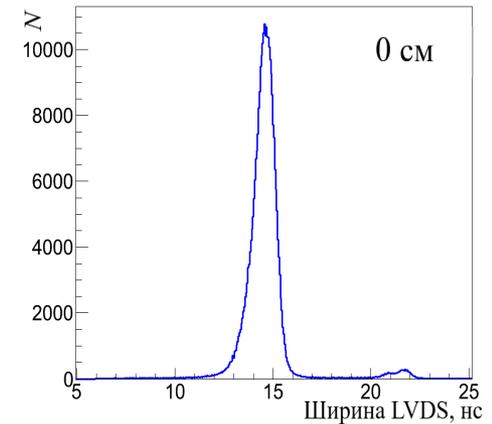
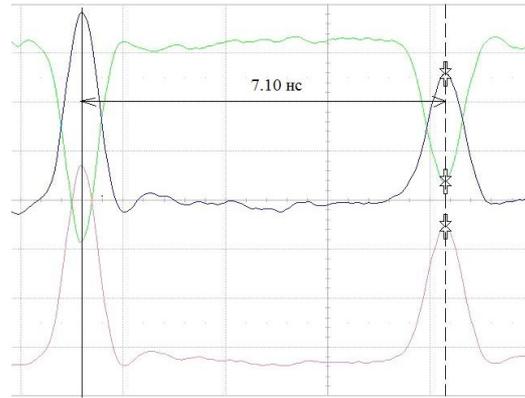


Схема двухстековой МРПК с разделителем из сотовой панели

26.11.2020



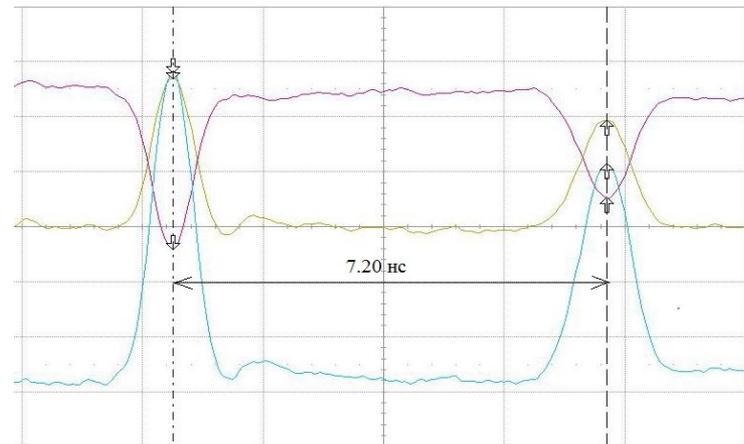
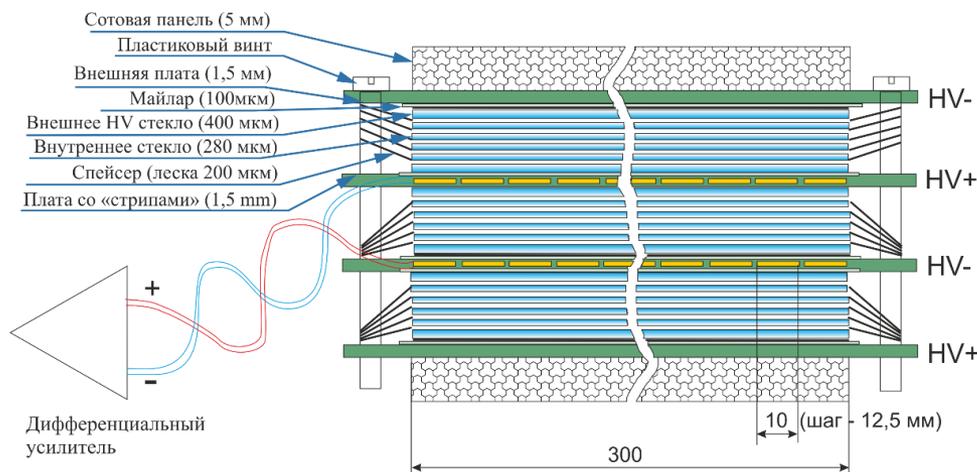
Разрешение и эффективность прототипов МРПК с 6 зазорами

# Трехсекционная МРПК

По результатам исследования первых прототипов МРПК были сделаны следующие выводы:

- ✓ детектор должен иметь как можно большее число газовых зазоров, разделенных резистивными электродами с минимально возможной толщиной;
- ✓ газовые зазоры должны быть поделены на секции для уменьшения рабочего напряжения и лучшего согласования линии считывания;
- ✓ анодный и катодный считывающие электроды должны находиться в одинаковой диэлектрической среде для исключения дисперсии дифференциального сигнала за счет скорости распространения;
- ✓ ширина стрипов и диэлектрики между анодом и катодом должны быть подобраны таким образом, чтобы дифференциальный импеданс линии стрипов согласовался с импедансом считывающего кабеля. Общий импеданс всей линии должен быть как можно ближе к входному сопротивлению усилителя, которое, в свою очередь, должно быть на сколько возможно малым.

Эти выводы привели к созданию 15-зазорной трехсекционной конструкции МРПК.



Отражение дифференциального сигнала, прошедшего через анодный и катодный стрипы трехсекционной МРПК.

Схема трехсекционной МРПК с плавающими электродами толщиной 280 (400) мкм и считыванием сигналов только со стрипов на внутренних печатных платах при помощи двойной витой пары.

26.11.2020

# Испытания прототипов трехсекционных МРПК на пучке частиц

Для испытаний на выведенном пучке дейтронов Нуклотрона с энергией 2–3.5 ГэВ/нуклон в феврале 2015 года было собрано два прототипа трехсекционной МРПК, отличающихся только толщиной плавающих электродов: 280 и 400 мкм. Исследования прототипов проводились на установке «Тестовый канал МРД». Для облучения как можно большей площади детекторов потоком частиц низкой интенсивности пучок растягивался максимально во времени и расфокусировался квадрупольными линзами.

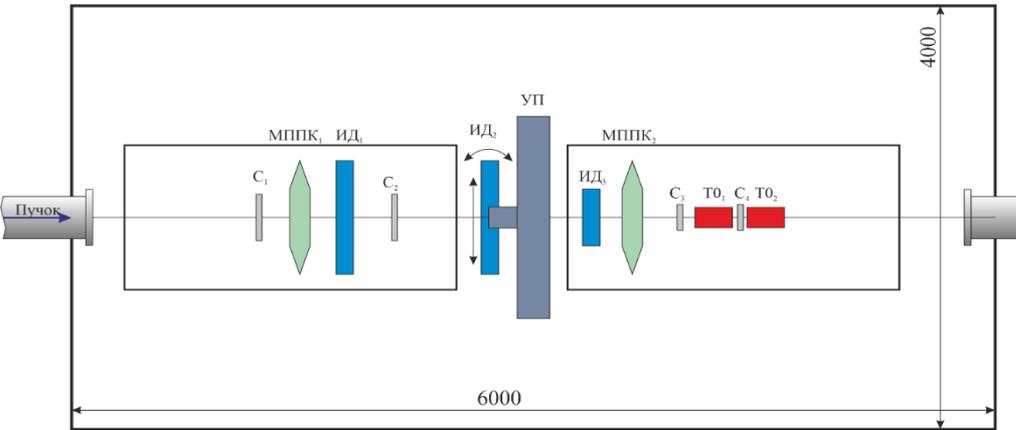
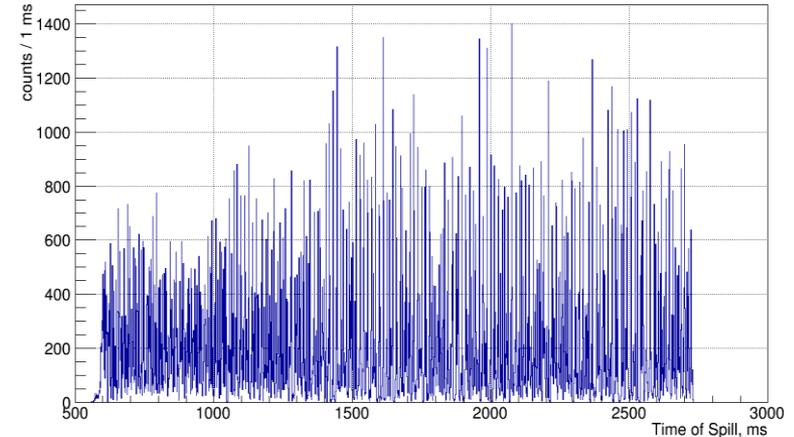
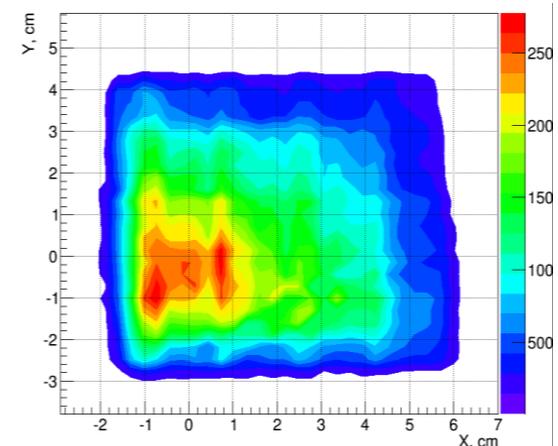


Схема установки детекторов на пучке во время испытаний МРПК

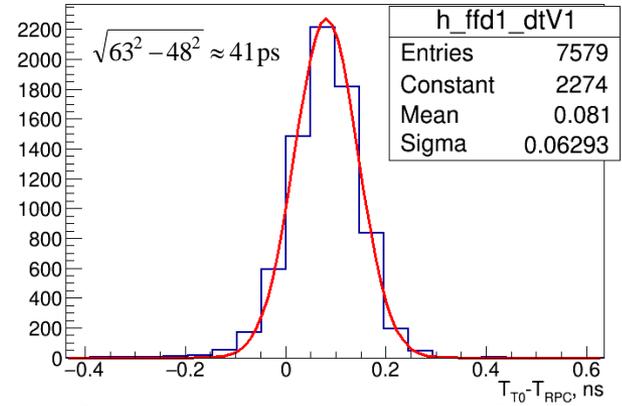
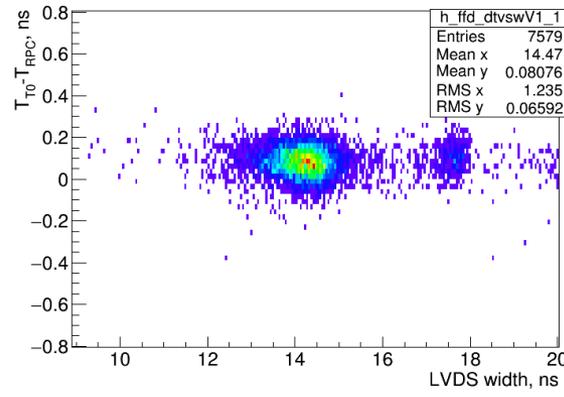
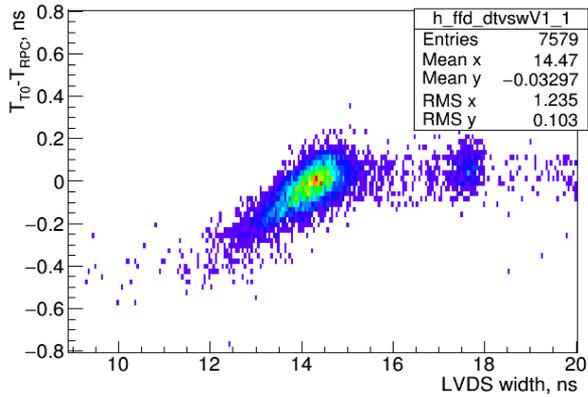


Типичная временная структура интенсивности пучка дейтронов, измеренная сцинтилляционными счетчиками.



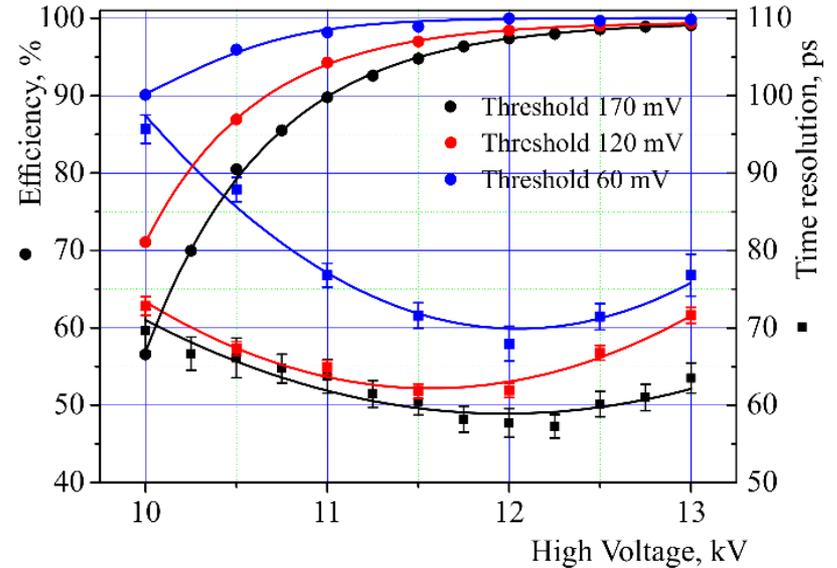
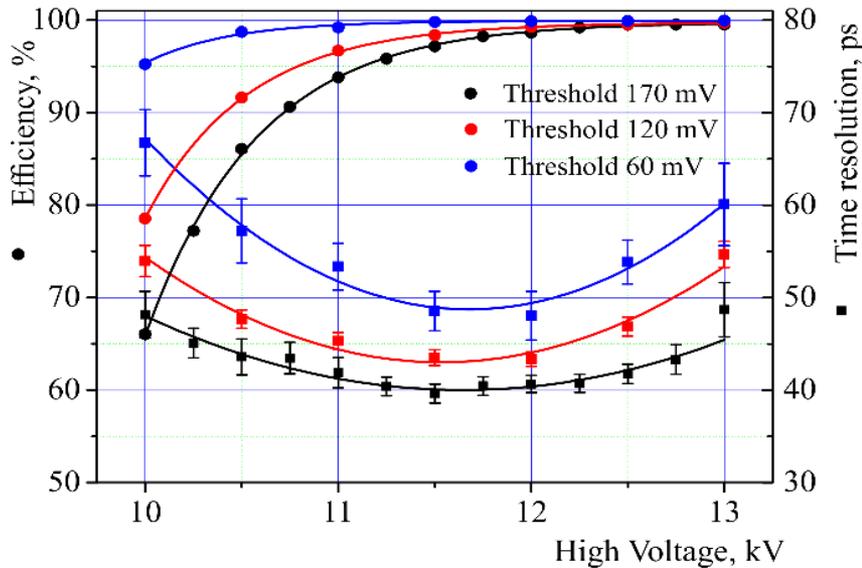
Двухмерный профиль пучка в гексагональных МРПК для триггерного счетчика с сцинтиллятором  $7 \times 7 \text{ см}^2$ .

# Испытания прототипов трехсекционных МРПК на пучке частиц



Пример применения коррекции времени над порогом (ToT) к времени пролета трехсекционной МРПК с толщиной стекл 280 мкм.

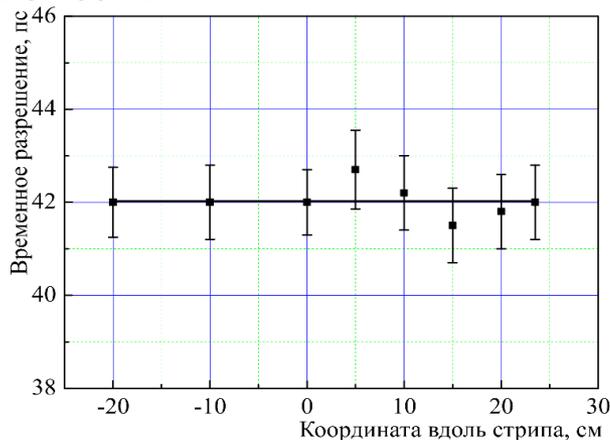
Временное распределение  $T_{TO} - T_{RPC}$  после применения коррекции ToT.



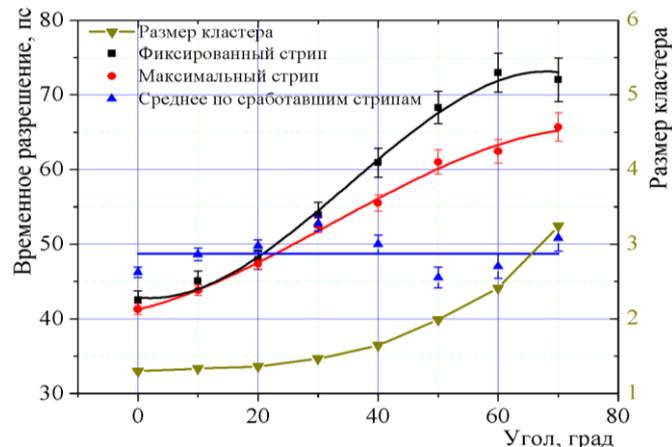
Эффективность и временное разрешение прототипов МРПК с плавающими резистивными электродами толщиной 280 (слева и на основе низкорезистивного стекла в зависимости от интенсивности пучка

# Испытания прототипов трехстековых МРПК на пучке частиц

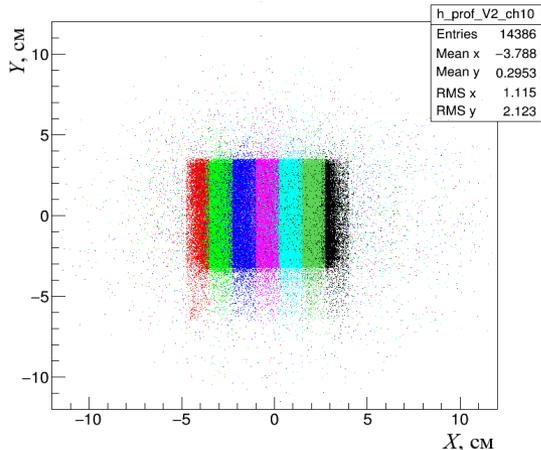
Детектор МРПК со стеклами толщиной 280 мкм был зафиксирован на прецизионном устройстве позиционирования с дистанционным управлением, позволяющим перемещать детектор и вращать по горизонтальной и вертикальной осям.



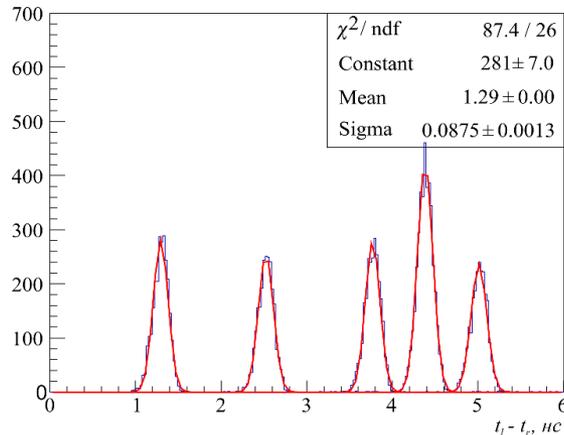
Временное разрешение трехстековой МРПК от координаты пролета частицы вдоль стрипа



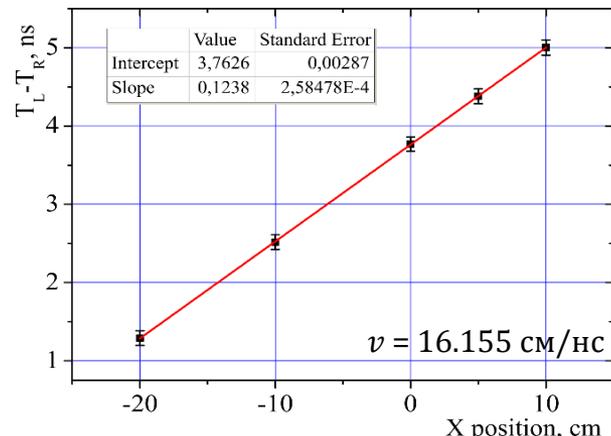
Временное разрешение трехстековой МРПК от угла входа частицы поперек стрипа



Проекция стрипов МРПК в МРПК



Разности времен прихода сигнала с двух сторон стрипа при перемещении МРПК

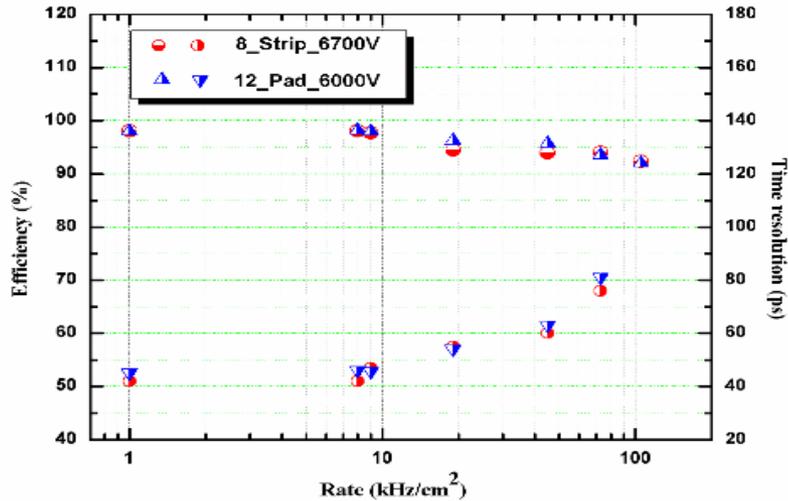


Зависимость разности времен прихода сигнала с двух сторон стрипа от координаты

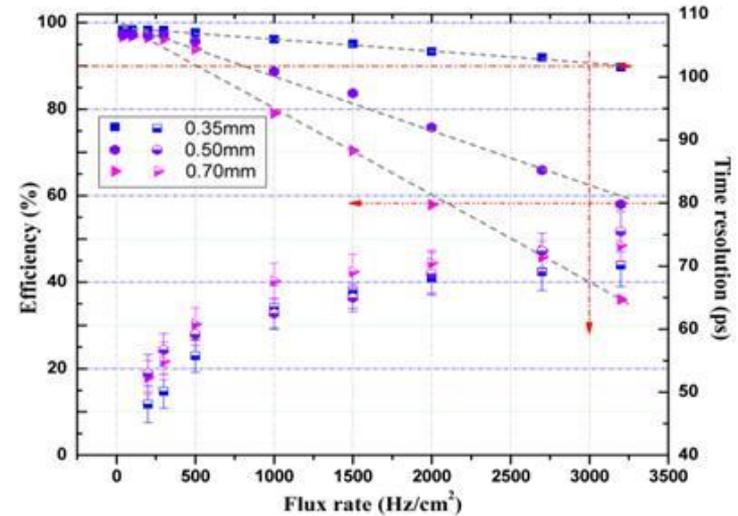
$$\sigma_{t_{cut}} = \frac{2\sigma_{x_{cut}}}{v} = \frac{2 \cdot \frac{1.5}{\sqrt{12}}}{16.155} = 0.054 \text{ нс}; \quad \sigma_{x_{rpc}} = \frac{v}{2} \sqrt{\sigma_{t_{exp}}^2 - \sigma_{t_{cut}}^2} = 0.56 \text{ см}$$

# Работы по исследованию загрузочной способности МРПК

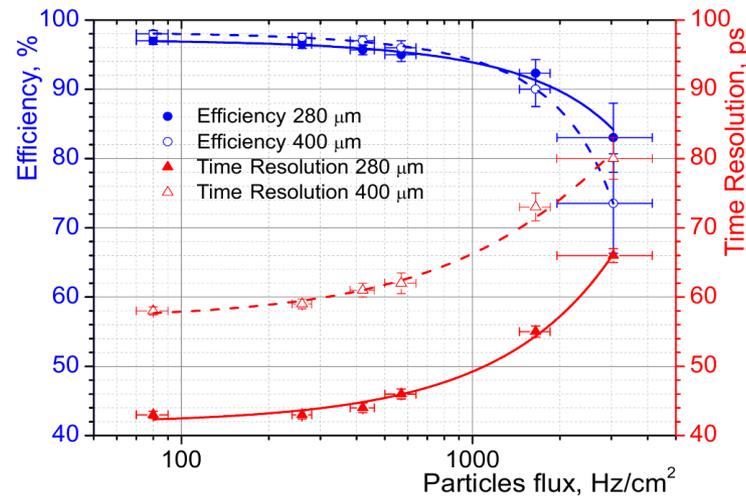
Одна из задач диссертационной работы состояла в изучении влияния потока заряженных частиц через МРПК. Такие работы проводились в сеансах 2013 и 2015 годов на выведенных пучках Нуклотрона.



Эффективность и временное разрешение МРПК на основе низкорезистивного ( $\sim 10^{10}$  Ом·см) стекла в зависимости от интенсивности пучка. Эффективность >95% до 70 кГц/см<sup>2</sup>



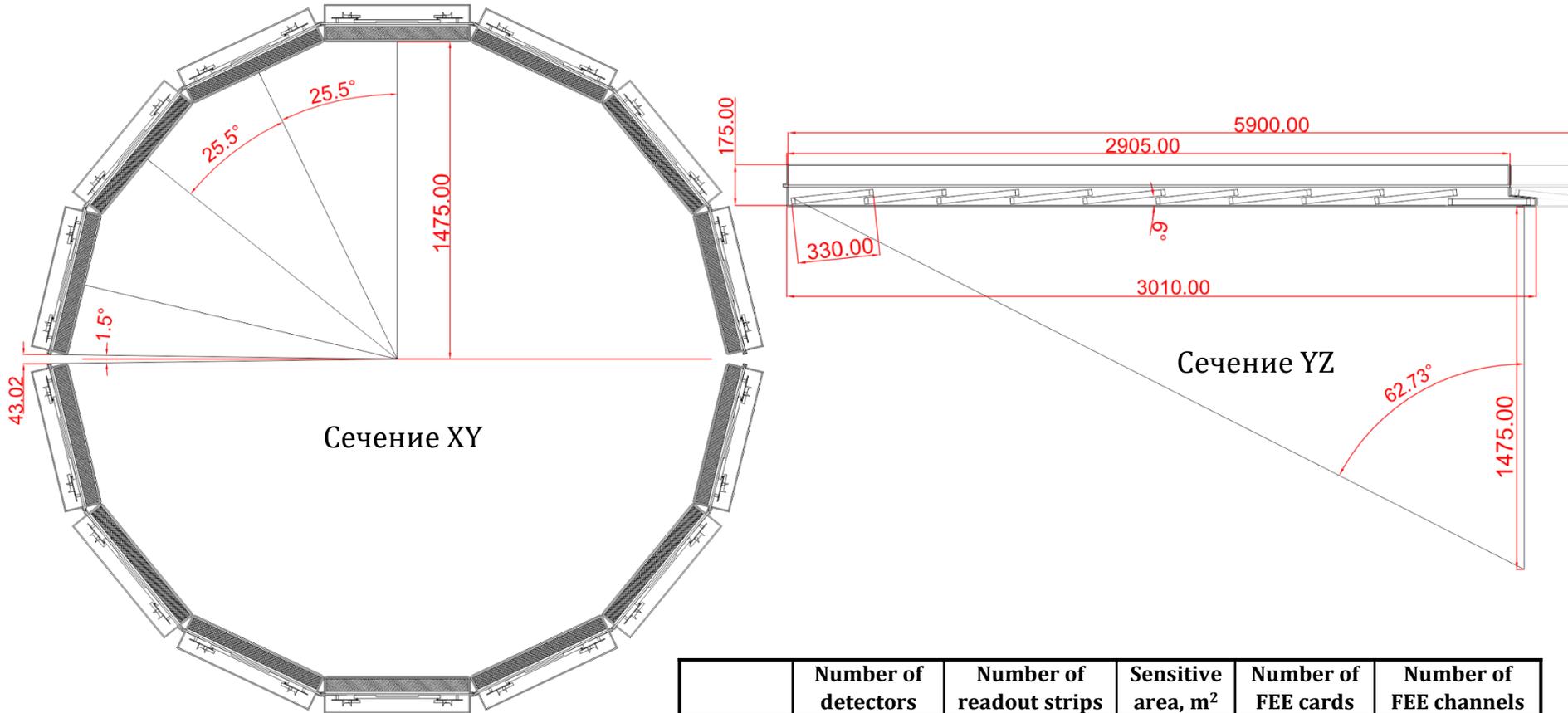
Эффективность и временное разрешение МРПК с резистивными электродами из стекла различной толщины от потока частиц. Эффективность >90% до 3 кГц/см<sup>2</sup> для стекла толщиной 350 мкм



Эффективность и временное разрешение прототипов трехсекционной МРПК с резистивными электродами 280 и 400 мкм в зависимости от интенсивности пучка

# Времяпролетная система эксперимента MPD

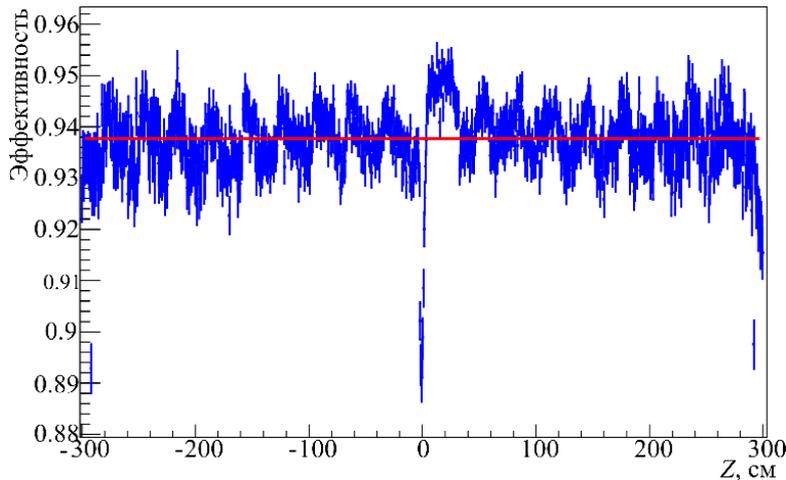
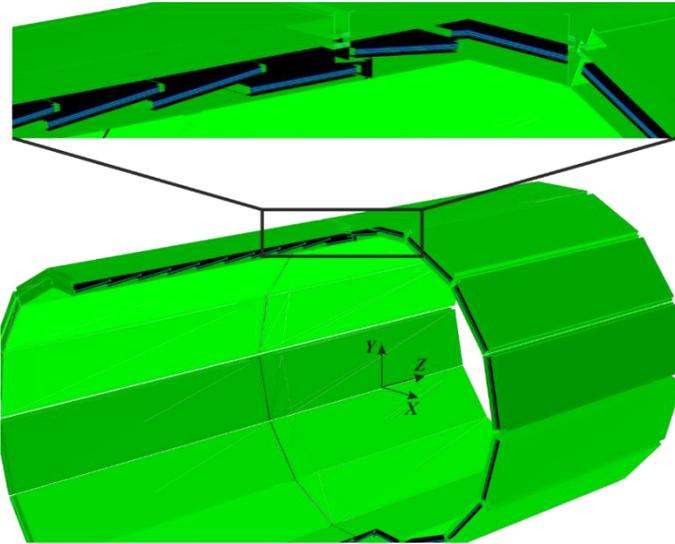
Конечная цель работы состоит в создании системы времяпролетной идентификации частиц (TOF) эксперимента MPD. **Четвертая глава** описывает ее устройство и конструктивные особенности. Приводятся результаты моделирования производительности системы TOF в MPDRoot. Здесь же описана электроника сбора данных и подсистемы обслуживания TOF: газовая система, системы электропитания и охлаждения.



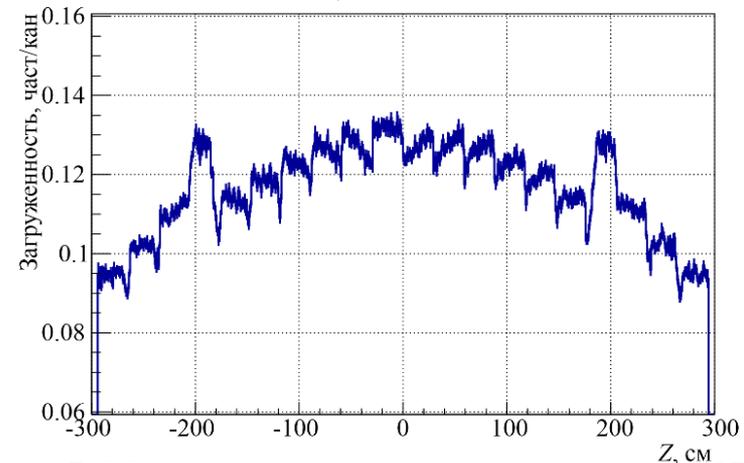
	Number of detectors	Number of readout strips	Sensitive area, m <sup>2</sup>	Number of FEE cards	Number of FEE channels
MRPC	1	24	0.192	2	48
Module	10	240	1.848	20	480
Barrel	280	6720	51.8	560	<b>13440</b> (1680 NINO)

# Моделирование времяпролетной системы MPD в MPDRoot

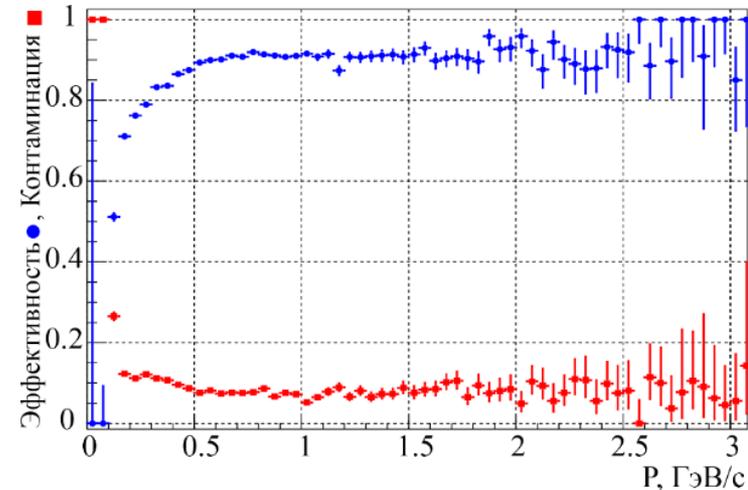
Для моделирования производительности системы была задана максимально приближенная к реальности геометрия всех элементов модулей TOF в MPDRoot. Все основные результаты получены с использованием генератора LAQGSМ для центральных столкновений ядер золота с энергией  $\sqrt{s_{NN}} \equiv 11$  ГэВ.



Дифференциальная геометрическая эффективность TOF MPD вдоль оси Z. Средняя эффективность  $\sim 94\%$



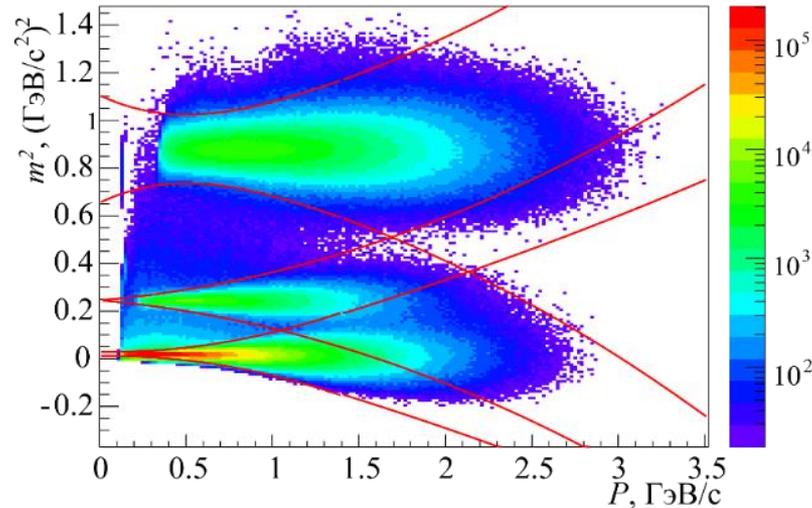
Дифференциальная загруженность каналов TOF вдоль оси Z (пучка). Средняя загруженность  $\sim 11\%$



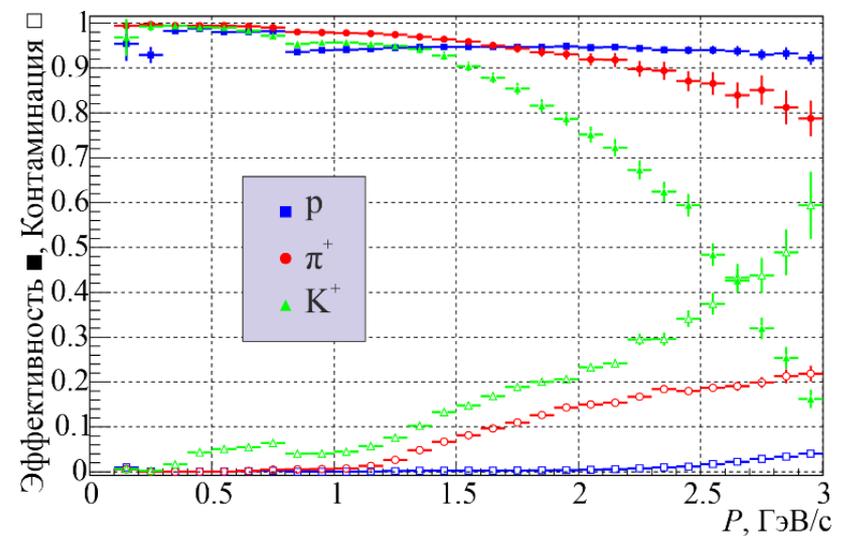
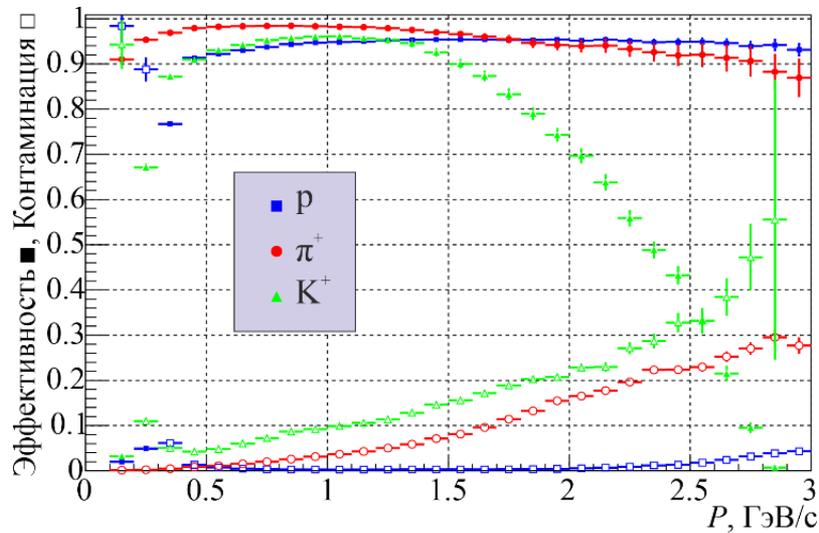
Эффективность сопоставления и примесь неверно сопоставленных восстановленных треков из TPC с событиями в TOF. Средняя эффективность  $\sim 84\%$ , контаминация  $\sim 10\%$

# Моделирование времяпролетной системы MPD в MPDRoot

## Эффективность идентификации адронов в многоцелевом детекторе



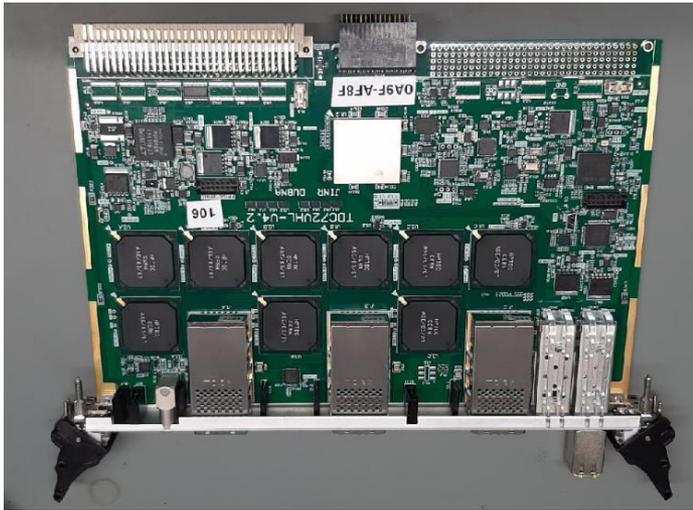
Разделение  $\pi$ ,  $K$ ,  $p$  времяпролетной системой с  $\sigma_t = 80$  пс. Красные линии – границы  $3\sigma$



Эффективность и контаминация разделения адронов только времяпролетным методом (слева) и комбинированно по времени пролета и ионизационным потерям частиц  $dE/dx$  в TPC (справа).

# Электроника сбора данных TOF MPD

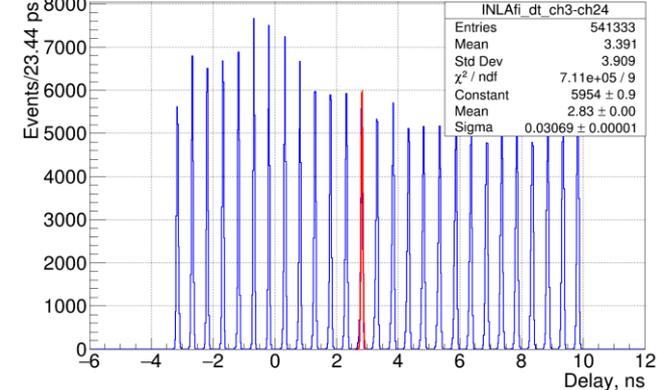
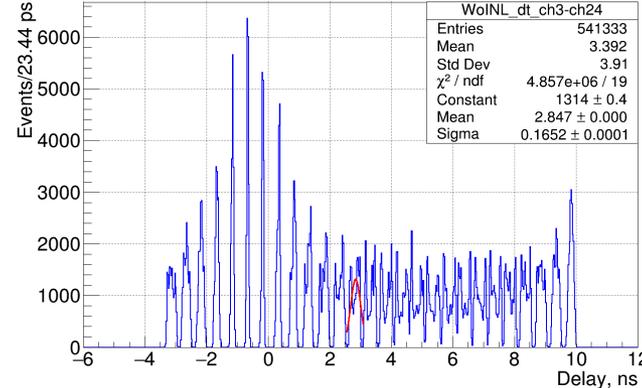
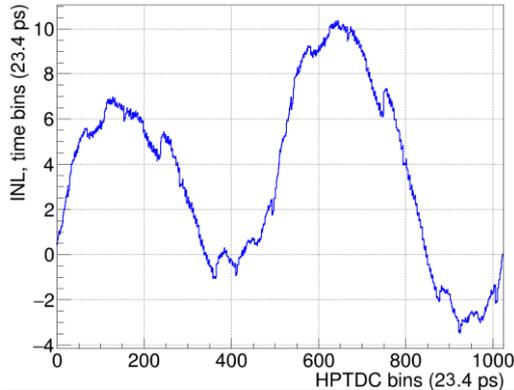
Сигналы с камерной электроники TOF в виде усилителей PA24N2V4L поступают на систему сбора данных, основным элементом которой является время-цифровой преобразователь которая TDC72VHL



TDC72VHLv4 (VXS) на базе микросхемы НРТDС

- Интерфейс VME64x (VXS);
- Число входных каналов – 72;
- Входной импеданс 100 Ом (стандарт LVDS);
- Временное разрешение:  $\sim 24$  пс на бин ( $\sigma \approx 20$  пс);
- Потребляемая мощность: +5 В 0.13 А; +3.3 В 5.6 А.
- Синхронизация White Rabbit (точность < 10 пс)
- Возможность автономной работы без крейта

## Калибровка интегральной нелинейности НРТDС



Интегральная нелинейность отсчетов (бинов) НРТDС в рамках одного цикла фазовой автоподстройки частоты.

Влияние интегральной нелинейности на временное разрешение между каналами НРТDС в зависимости от взаимной задержки входных импульсов.

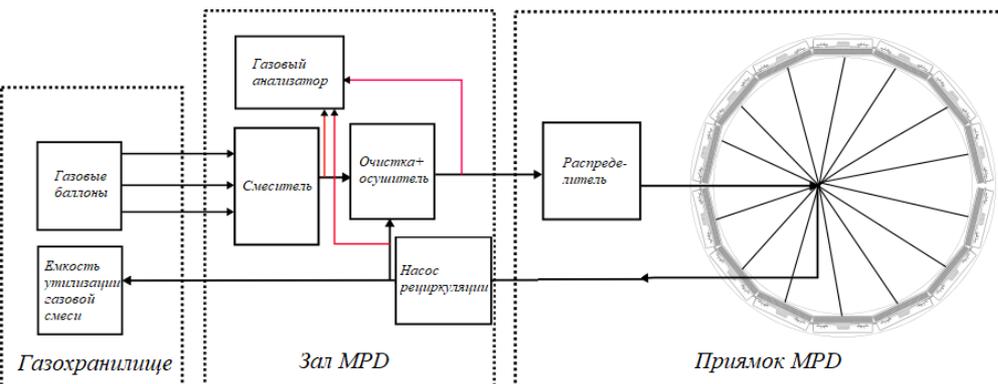
Временные распределения между двумя каналами НРТDС после применения калибровок. Разрешение составляет  $\sim 21$  пс

# Объем и структура работы:

Работоспособность времяпролетной системы обеспечивает несколько так называемых сервисных подсистем. Их назначение – обеспечивать газоснабжение, электропитание детекторов и электроники, а также мониторинг и контроль всех процессов, происходящих в детекторе.

## Система газоснабжения

Для работы детекторов МРПК используется специальная негорючая газовая смесь (90% C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>4</sub> + 5% i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> + 5% SF<sub>6</sub>). Газовая система должна обеспечивать не только эффективное обновление смеси в газовом объеме модулей TOF, но также контролировать стабильность пропорций компонентов смеси, рабочее давление в модулях и обеспечивать чистоту смеси. Газовый объем модулей TOF составляет около 3 м<sup>3</sup>, поэтому для экономии рабочих газов и в экологических целях была спроектирована газовая система с замкнутым контуром циркуляции смеси.



	Число детекторов	Газовый объем без МРПК, л	Газовый объем с МРПК, л
Детектор	1		5
Модуль	10	155	155 - 50 = 105
Сектор	20	310	210
Баррель TOF	280	4340, ~4.3 м <sup>3</sup>	2940, ~3 м <sup>3</sup>

## Система электропитания

Система электропитания времяпролетной системы МРД состоит из высоковольтной и низковольтной части. Все источники питания располагаются в крейтах МРод. Для подачи высокого напряжения на плоскости детекторов используются источники iSeg EHS 4080p(n). Накамерная электроника питается низким напряжением от источников iSeg MPV8016I.



Схема распределения высокого напряжения в TOF МРД

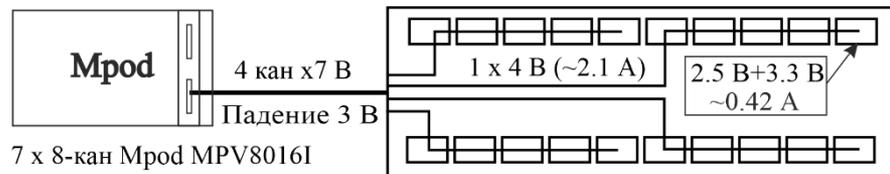
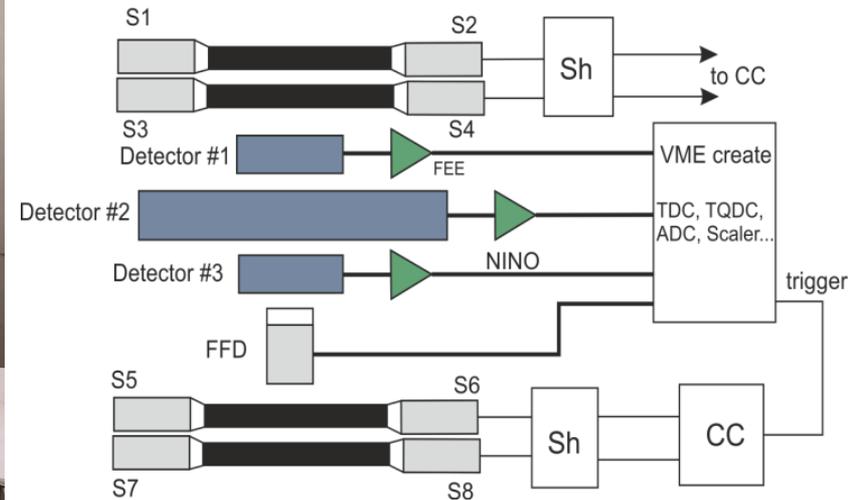
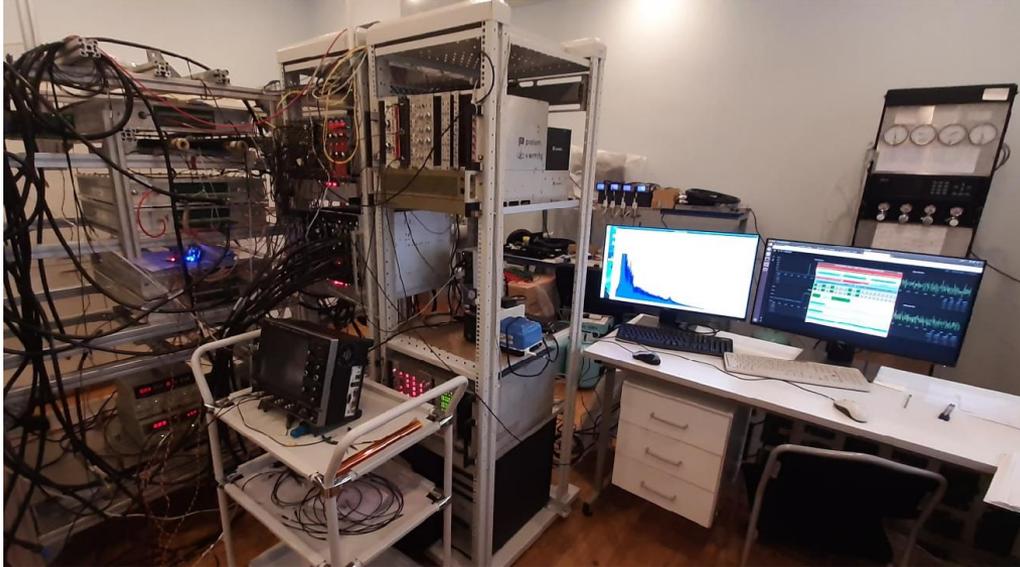


Схема распределения низкого напряжения в TOF МРД

Источник потребления мощности	Мощность, Вт
Накамерная электроника, кабели, крейты	1400
Считывающая электроника (ВЦП+крейты)	4200
Высоковольтные модули и крейты МРод	600
Устройства медленного контроля	800
Газовая система	1000
<b>Полное энергопотребление</b>	<b>8000</b>

# Экспериментальные установки для исследования МРПК

**Пятая глава** диссертации описывает инфраструктуру, созданную в ходе работы. В первую очередь, для непрерывного тестирования создаваемых прототипов МРПК была организована установка на космических частицах. Основная экспериментальная установка – Тестовый канал MPD была создана на канале вывода 4В Нуклотрона. Для массового производства детекторов была выделена площадь около 300 м<sup>2</sup>, на которой организовано непрерывное массовое производство МРПК и модулей TOF MPD с многоступенчатым тестированием продукции.



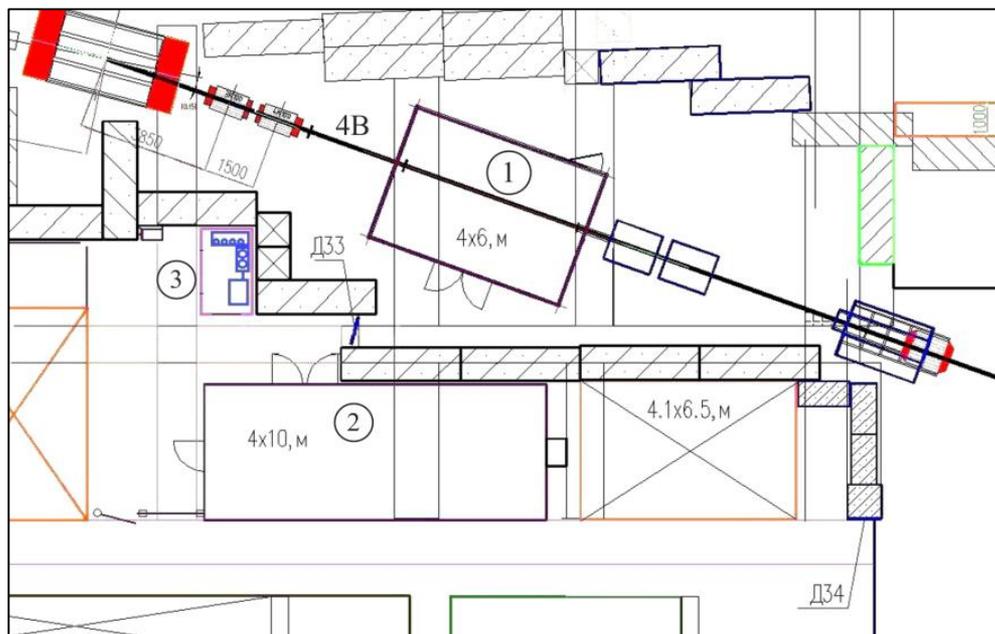
## Стенд для испытания прототипов МРПК на космике:

- опорная конструкция из алюминиевого профиля, предназначенная для крепления исследуемых и триггерных детекторов размерами 1,2x1x2 м;
- сцинтилляционный телескоп из 4х счётчиков площадью 700x150 мм для обеспечения триггера по всей рабочей области испытываемых камер;
- стартовые детекторы (FFD) на базе микроканальных ФЭУ с собственным временным разрешением около 30 пс.
- быстрая считывающая электроника на базе VME, DRS4 и цифрового осциллографа LeCroy WaveRunner 640Zi с полосой пропускания до 4 ГГц;
- 4-х канальная газовая система с автоматическим контролем потоков на базе массовых расходомеров MKS-Instruments;
- низковольтная и высоковольтная система питания; система медленного контроля на базе TANGO.

# Экспериментальные установки для исследования МРПК

Установка «Тестовый канал МРД» включает в себя:

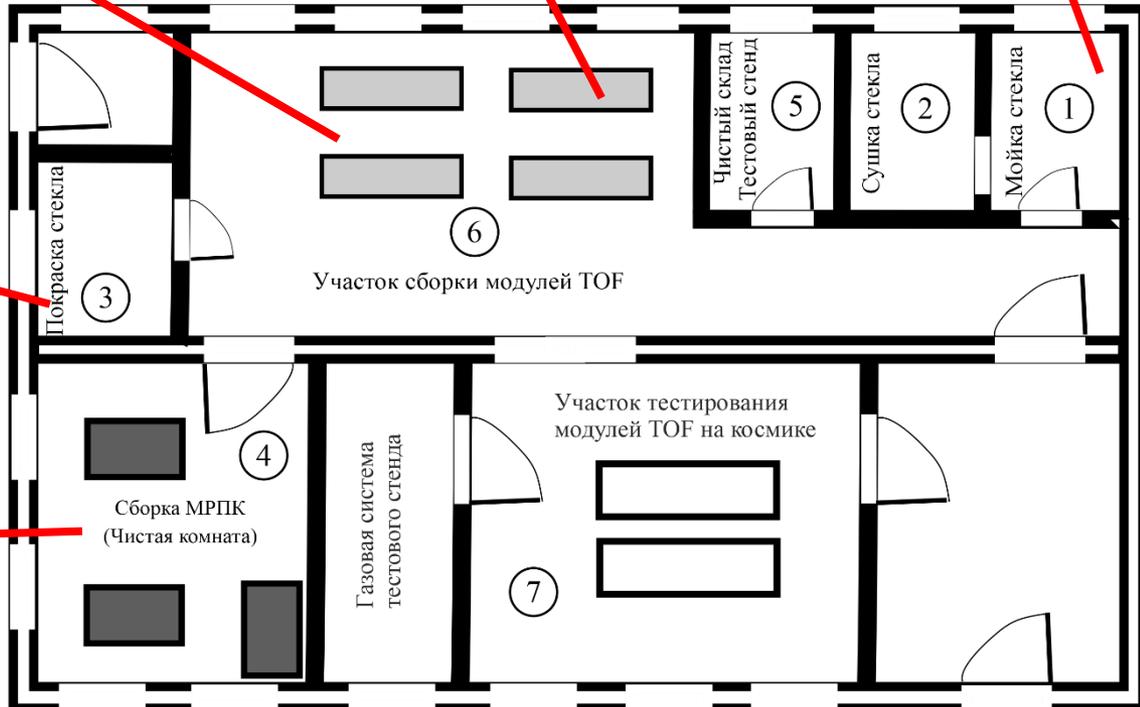
- два «стола» из алюминиевого профиля для фиксации и юстировки детекторов и другого оборудования вдоль оси пучка;
- устройство позиционирования для перемещения и поворота испытываемого детектора относительно оси пучка с точностью до 10 мкм;
- 3 пропорциональных камеры с 6 плоскостями проволочек для трекинга и определения профиля пучка;
- скинтилляционный телескоп из 3–5 быстрых счётчиков для триггерных целей и для определения интенсивности пучка;
- газовая система, состоящая из двух газовых пультов, позволяющих создавать газовые смеси на основе инертных газов для продува пропорциональных камер и фреонов для МRPC;
- современная система сбора данных на базе VME и Ethernet;



Основные помещения установки «Тестовый канал МРД» на канале 4В Нуклотрона: 1 – пучковый домик; 2 – домик персонала; 3 – газораспределительная система



# Участок массового производства детекторов и модулей TOF MPD





## Основные результаты диссертационной работы:

1. В процессе разработки детекторов для времяпролетной системы Многоцелевого детектора было изучено влияние конструктивных особенностей многозазорной резистивной плоской камеры на форму и характеристики выходного дифференциального сигнала. На основе этого исследования была предложена конструкция оригинальной симметричной стрехсекционной МРПК.
2. Были собраны и испытаны несколько полноразмерных прототипов трехсекционных МРПК для времяпролетной системы МРD. При использовании 15-зазорной конструкции МРПК впервые было получено временное разрешение лучше 40 пс.
3. Впервые были проведены исследования загрузочных характеристик МРПК методом уменьшения толщины резистивных электродов. Было замечено улучшение загрузочных характеристик с уменьшением толщины стекла. Детектор со стеклом толщиной  $\sim 300$  мкм работает с эффективностью выше 90% при загрузках до 2 кГц/см<sup>2</sup>. При работе с низкорезистивным стеклом эффективность начала ухудшаться только при загрузках выше  $5 \cdot 10^4$  частиц/с·см<sup>2</sup>.
4. Основная цель данной работы состояла в создании современной, высокотехнологичной, надежной и эффективной системы идентификации частиц по времени пролета для детектора МРD. Такая времяпролетная система была разработана. Компьютерное моделирование системы показало высокую эффективность как регистрации частиц, так и их идентификации.
5. На выведенных пучках Нуклотрона была создана специализированная установка для тестирования детекторов «Тестовый канал МРD». Самое новейшее оборудование, используемое на установке, позволяет исследовать большинство рабочих характеристик всевозможных детекторов с высокой точностью и в короткие сроки.
6. Благодаря успешным испытаниям прототипов МРПК и завершению работ по проектированию времяпролетной системы TOF МРD, было принято решение организовать массовое производство детекторов базе ЛФВЭ.

## Апробация работы

**Результаты диссертационной работы докладывались автором на следующих конференциях:**

1. LX Международная конференция по ядерной физике «Ядро-2010» (Санкт-Петербург, Россия, 07/2010);
2. 12th Vienna Conference on Instrumentation – «VCI 2010» (Вена, Австрия, 02/2010);
3. Сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (Москва, Россия 11/2012);
4. XVII конференция ОМУС-2013 (Дубна, Россия, 04/2013);
5. «Technology and Instrumentation in Particle Physics - TIPP-14» (NIKHEF, Нидерланды, Амстердам, 06/2014);
6. «13th Pisa meeting for advanced detectors» (INFN, Бьядола, о. Эльба, Италия, 05/2015);
7. «SPIN-Praha-2015, Advanced Studies Institute, Symmetries and Spin»(Прага, Чешская Республика, 07/2015);
8. «The XIII workshop on resistive plate chambers and related detectors–RPC2016» (Гент, Бельгия, 02/2016);
9. «Instrumentation for Colliding Beam Physics – INSTR17» (Новосибирск, Россия, 02/2017);
10. CREMLIN WP7 "Super c-tau factory workshop" (Новосибирск, Россия, 05/2018);
11. The European Physical Society Conference on High Energy Physics «EPS-HEP2019» (Гент, Бельгия, 07/2019);
12. NICA days 2015, 2017, 2019 (Варшава, Польша, 11/2015-2019);
13. «Instrumentation for Colliding Beam Physics – INSTR-20» (Новосибирск, Россия, 02/2020).

## Объем и структура работы:

### Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Kh.U. Abraamyan, (...), V.A. Babkin, et al., The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A628(1) (2011), p. 99.
2. V.A. Babkin, S.V. Volgin, V.A. Voskoboynik, V.M. Golovatyuk, and S.P. Lobastov, Time-of-Flight System for the MultiPurpose Detector (MPD) // Bulletin of the RAS: Physics, 75(9) (2011), p. 1277.
3. WeiPing Zhu, (...), V. Babkin, V. Golovatyuk, M. Rumiantcev, A real-size MRPC developed for CBM-TOF // Science China Technological Sciences, 56(11) (2013), p. 2821.
4. W. Zhu, (...), V. Babkin, et al., Study on the rate capability of MRPCs assembled with thin glass // 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC), Seoul, 2013, 6829460.
5. Zhu Weiping, (...), V. Babkin, et al., A thin float glass MRPC for the outer region of CBM-TOF wall // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A735 (2014), p. 277.
6. V.A. Babkin, et al., Strip MRPC for the MPD/NICA Time-of-Flight System // Proceedings of TIPP-2014, PoS(TIPP2014)289.
7. V. Babkin, et al., Fast detectors for the MPD/NICA time-of-flight system // Bulgarian Chemical Communications, 47(Special Issue-B) (2015), p. 215.
8. V.I. Yurevich, (...), V.A. Babkin, et al., Beam Tests of Cherenkov Detector Modules with Picosecond Time Resolution for Start and L0 Trigger Detectors of MPD and BM@N Experiments // Phys. Part. Nuclei Lett., 12(6) (2015), p. 778.
9. V. Babkin, et al., Triple-stack Multigap Resistive Plate Chamber with Strip Readout // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A824 (2016) p. 490.
10. V.A. Babkin, et al., Development of the MRPC for the TOF system of the MultiPurpose Detector // J. Instrum 11 (2016) C06007.

## Объем и структура работы:

### Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

11. V.A. Babkin, et al., Status of the front-end electronics for the time-of-flight measurements at the MPD experiment // Phys. Part. Nuclei Lett., 13(5) (2016), p. 532.
12. D. Dabrowski, (...), V. Babkin, et al., Gas System for MPD Time-of-Flight Detector // Acta Physica Polonica B (Proceedings Supplement), 9(2) (2016), p.203.
13. V.A. Babkin, et al., The MPD test beam setup for testing detectors with the Nuclotron beams // Instrum. Exp. Tech. 60(3) (2017), p. 307.
14. A.V. Dmitriev, (...) V.A. Babkin, et al., Control and readout electronics of the time-of-flight system of the MPD // CEUR Workshop Proceedings, 2023 (2017), p.129.
15. Babkin, V.A. et al., Time-of-Flight particles identification in the MultiPurpose Detector at NICA // PoS(EPS-HEP2019)209.

**Спасибо за внимание!**