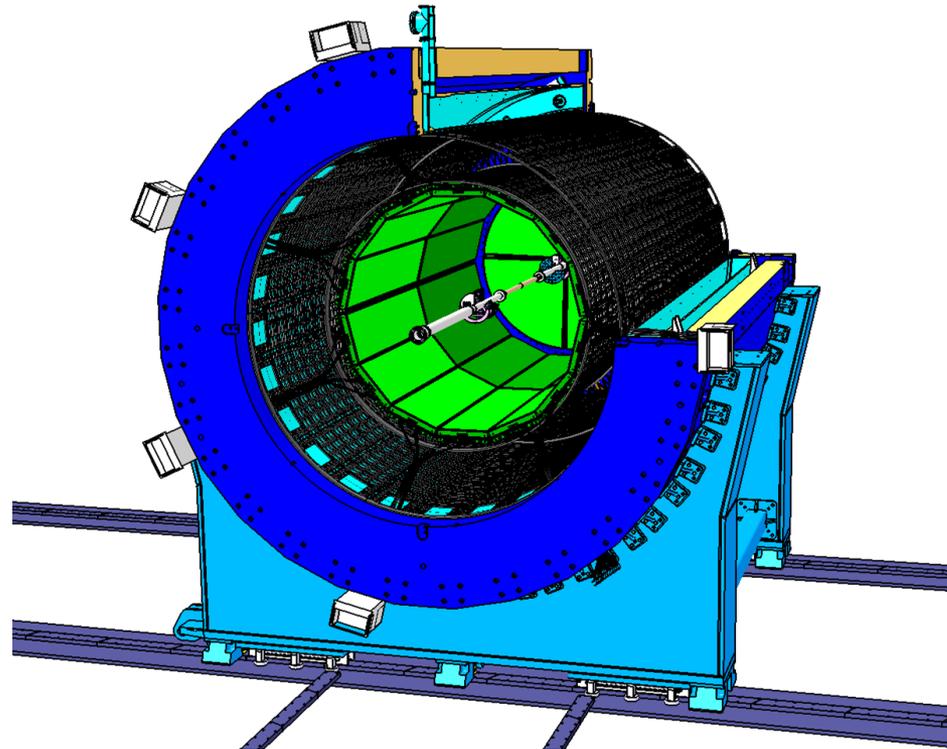


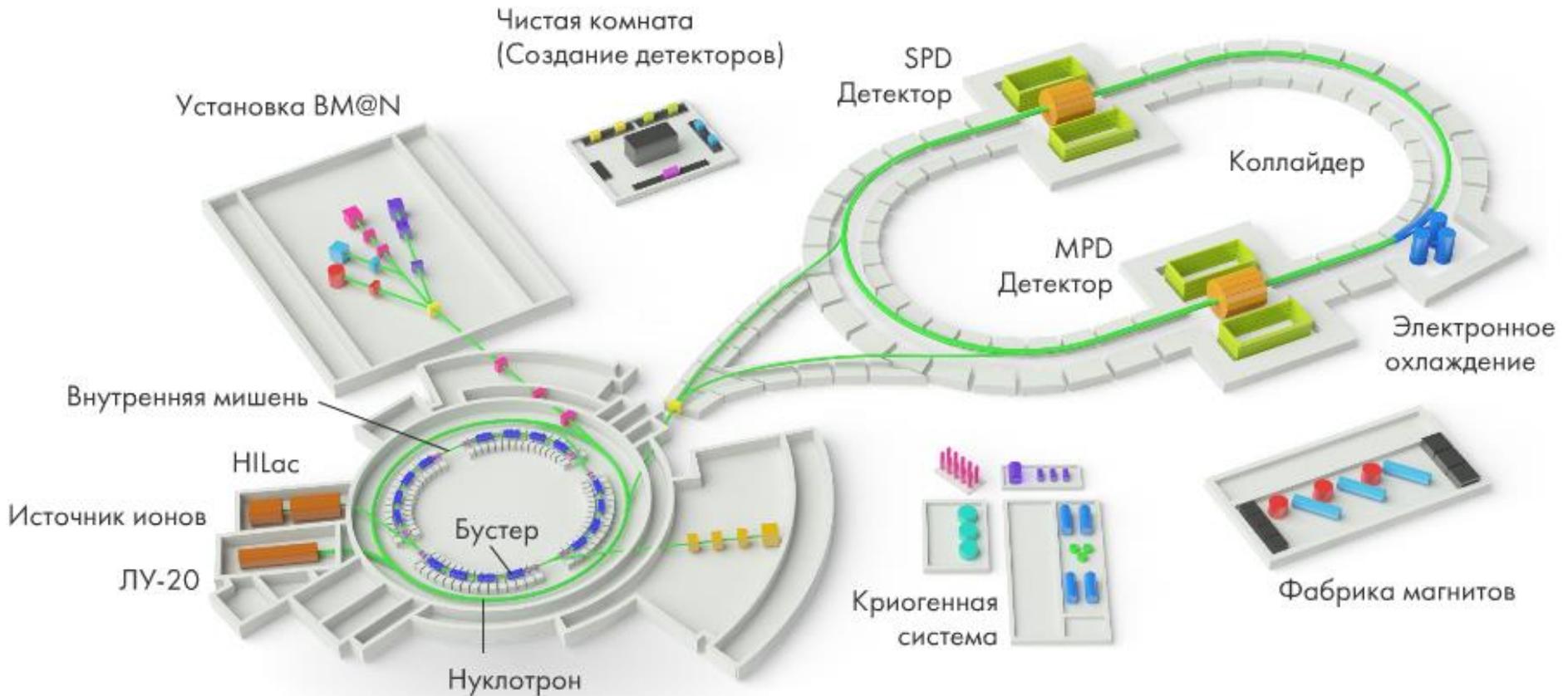
Времяпролетная система идентификации частиц Многоцелевого детектора (MPD)



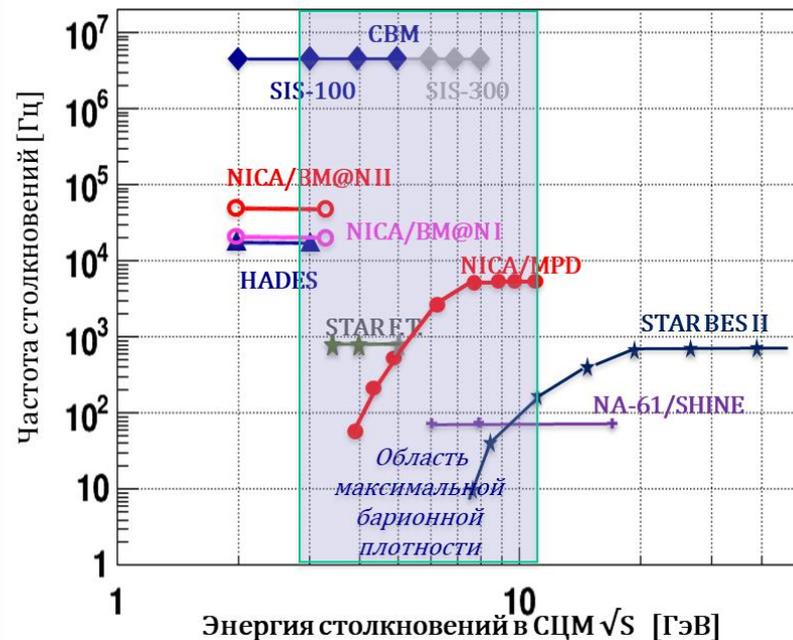
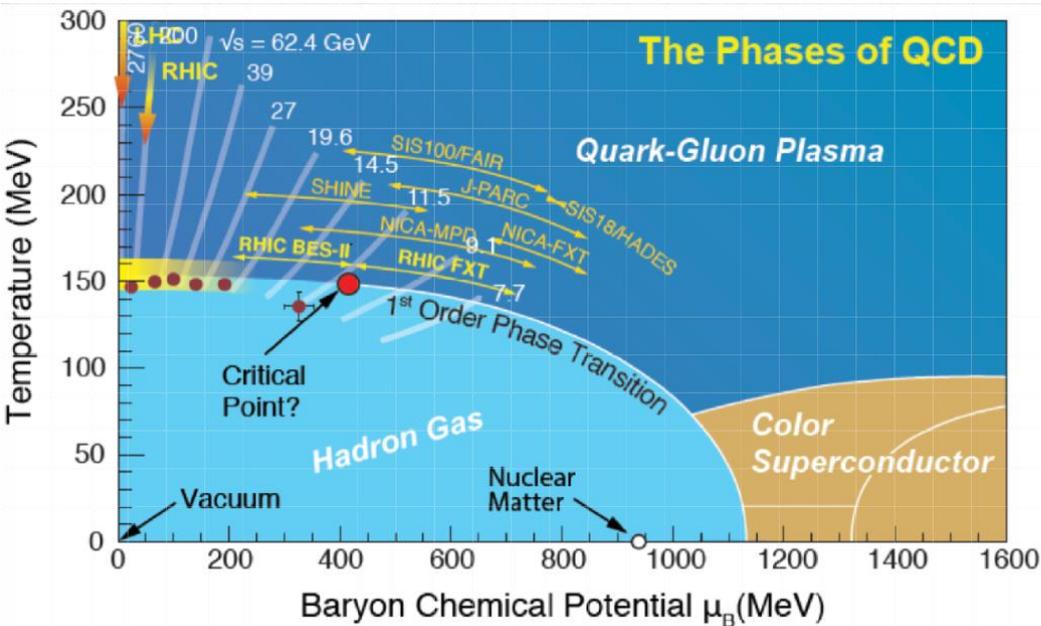
Бабкин Вадим Андреевич
(По материалам диссертационной работы)
18/03/2021

Объем и структура 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.



Физическая программа Многоцелевого детектора

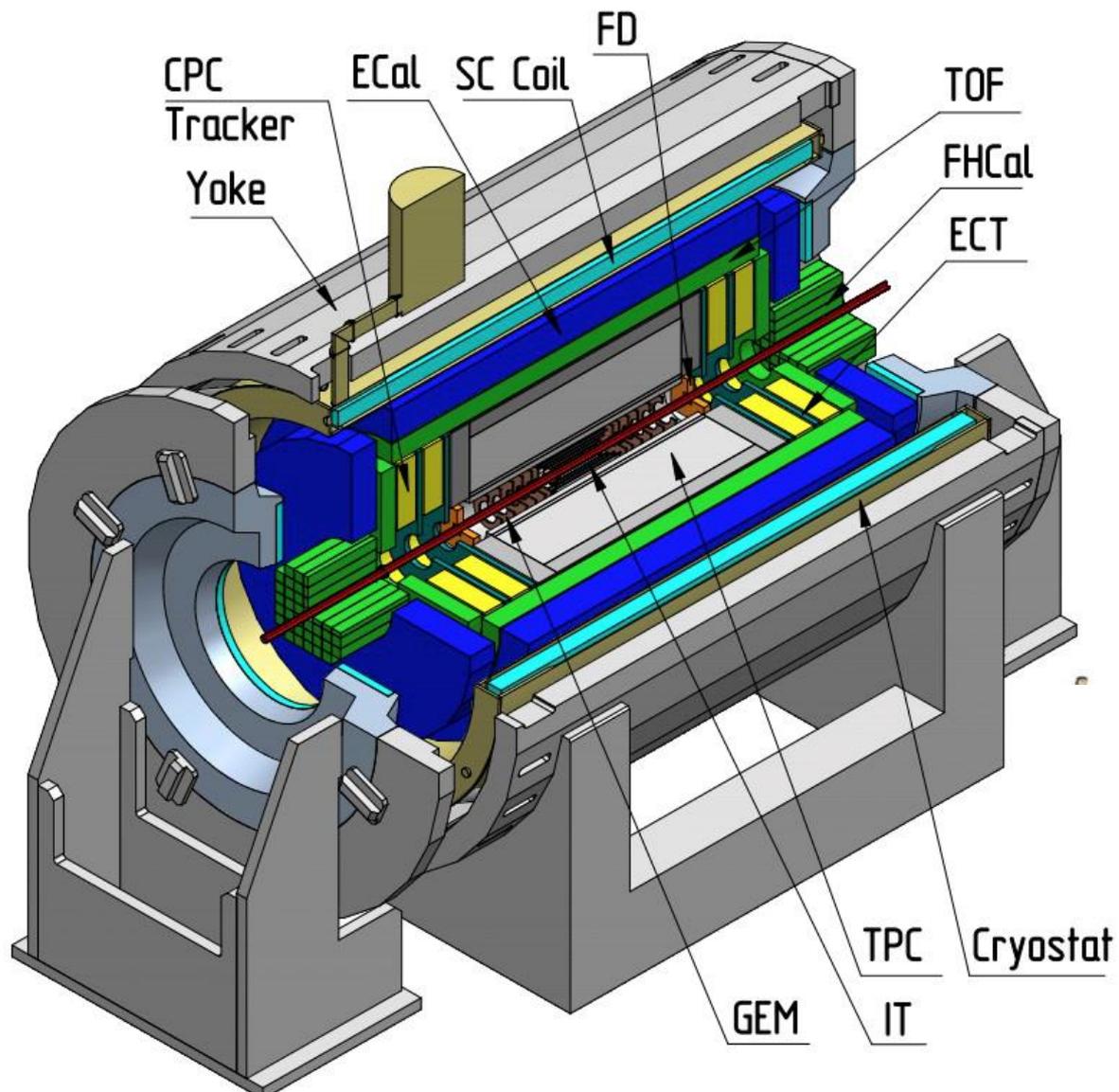


Детектор MPD на ускорительном комплексе NICA нацелен на решение следующих проблем:

- 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.

Такая физическая программа предполагает детальное изучение свойств всех частиц, рождающихся в результате соударения ионов в коллайдере. Поэтому задача идентификации сорта каждой частицы и измерение ее импульса является основной задачей создаваемого детектора. Для прецизионных и высокоэффективных измерений экспериментальная установка должна иметь самые современные и высокоэффективные детектирующие системы.

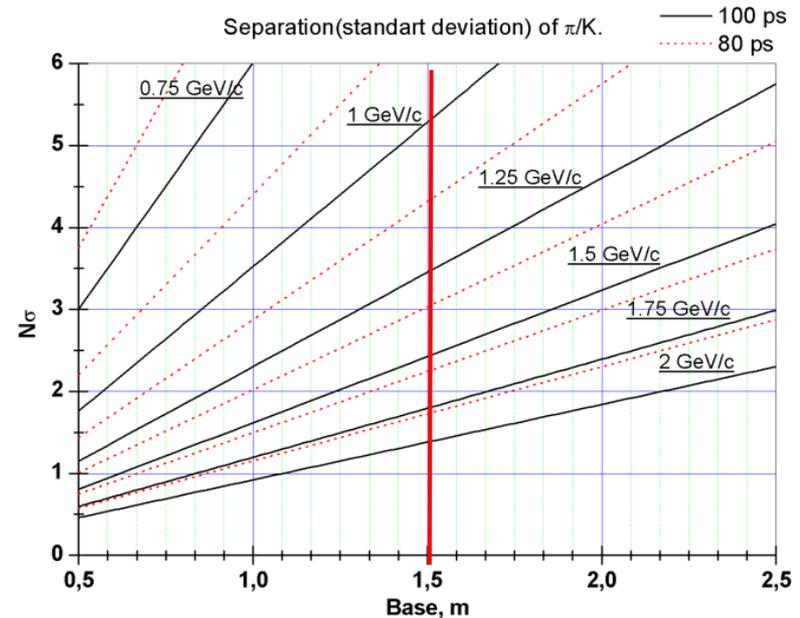
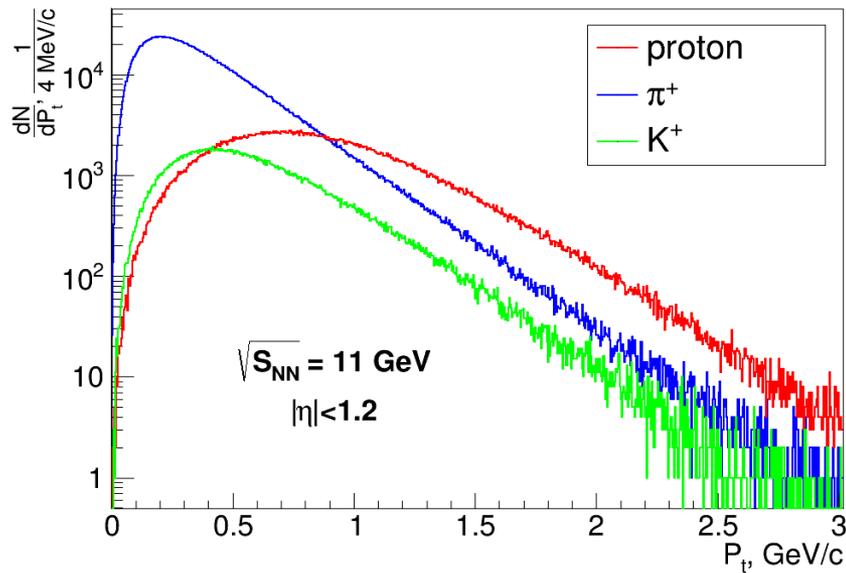
Структура многоцелевого детектора



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) 99.

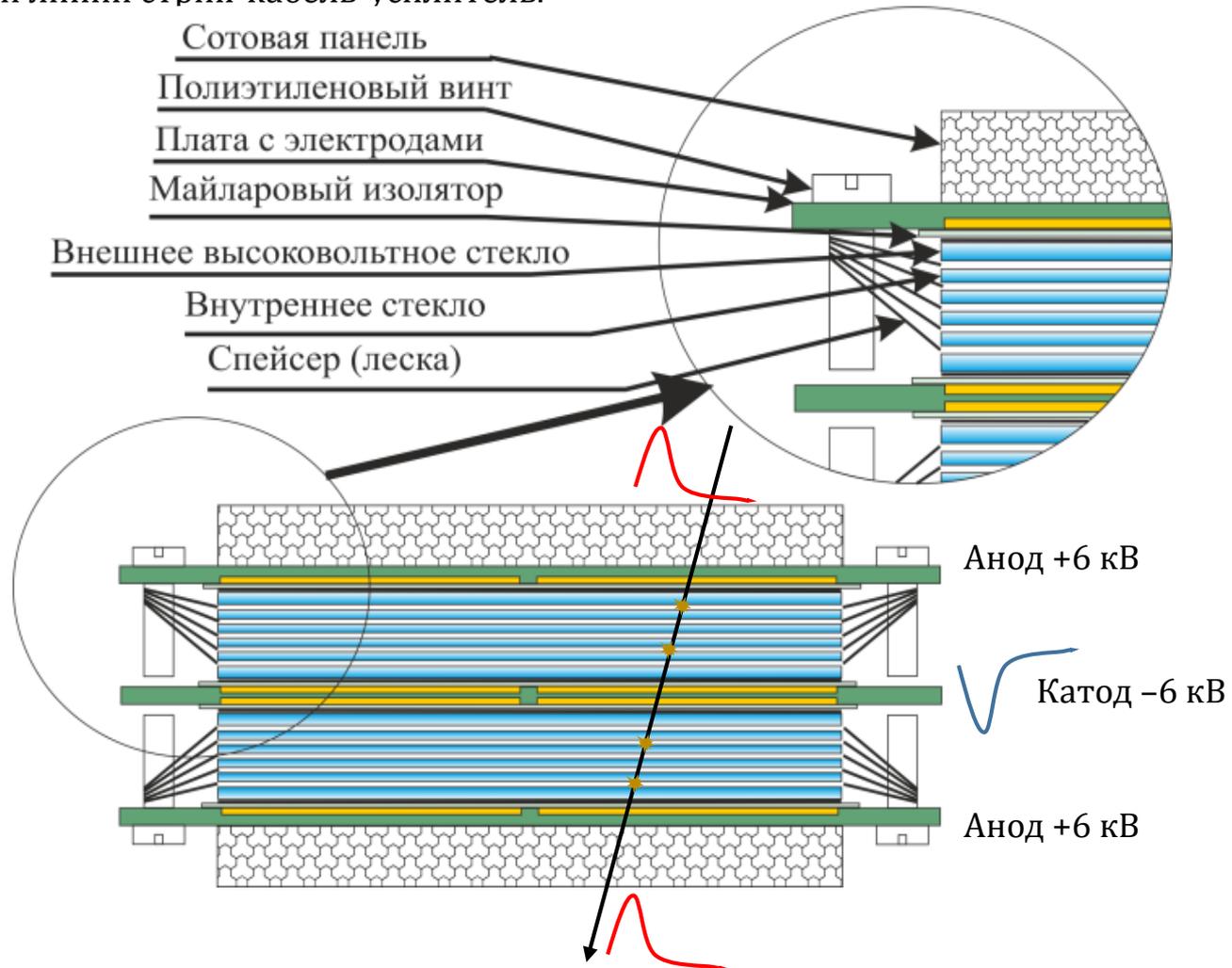
Требования к времяпролетной системе идентификации частиц в MPD

- Конструкция детектора должна быть недорогой и простой для создания системы с площадью $>50 \text{ м}^2$.
- Полное временное разрешение лучше 100 пс (для разделения π/K с импульсами до $p_t < 1.5 \text{ ГэВ/с}$);
- Оптимальное соотношение гранулярности считывающих электродов и количества каналов электроники для минимизации загруженности (осципацию $< 15\%$) каналов из-за высокой множественности частиц в центральных столкновениях ионов.
- хорошее координатное разрешение ($\sigma_{x,y} < 10 \text{ мм}$) для эффективного согласования трека, определенного в TPC с положением частицы в TOF;
- детектор должен работать в магнитном поле до 0.5 Тл;
- временное разрешение и эффективность не должны ухудшаться при загрузках до 50 Гц/см^2 .



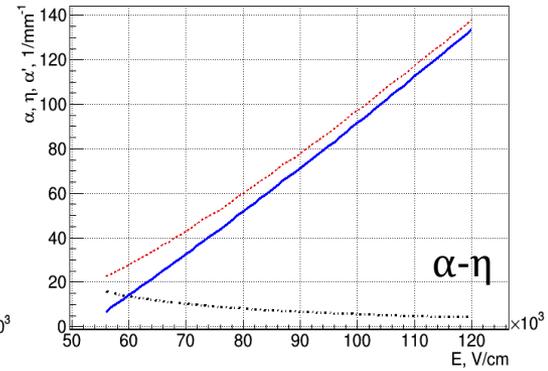
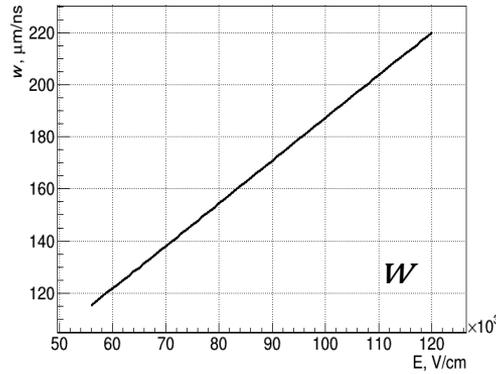
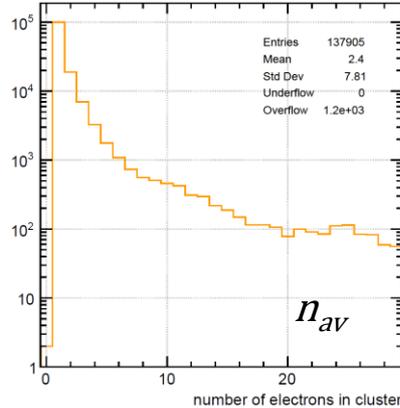
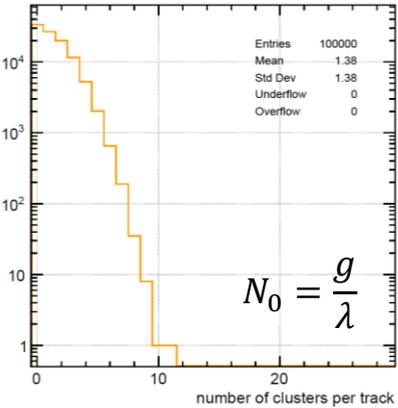
Устройство и принцип работы МРПК

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.



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) (π -мезон 1 ГэВ/с)

Ток в лавине:

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

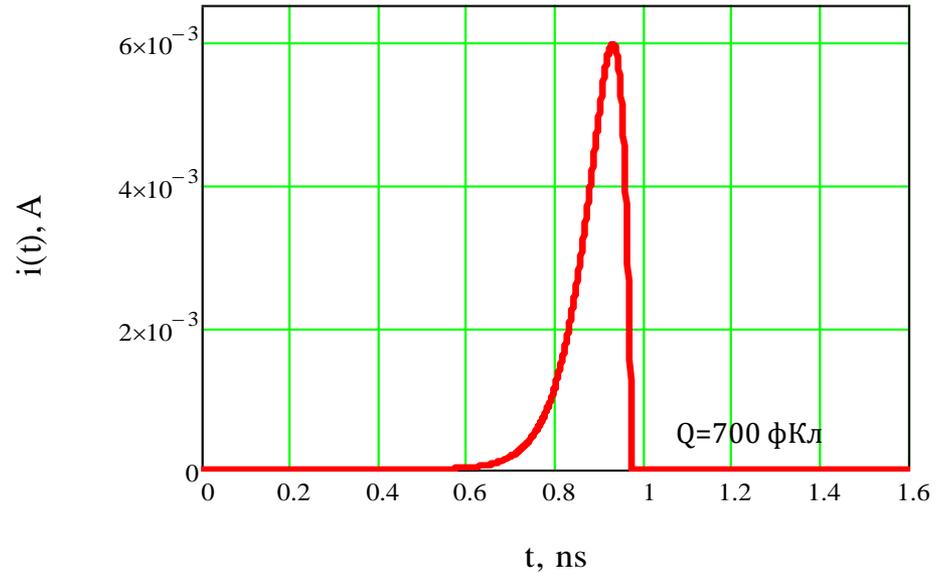
«Взвешенное» поле определяется из условий:

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

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

Средний наведенный на считывающие электроды ток:

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



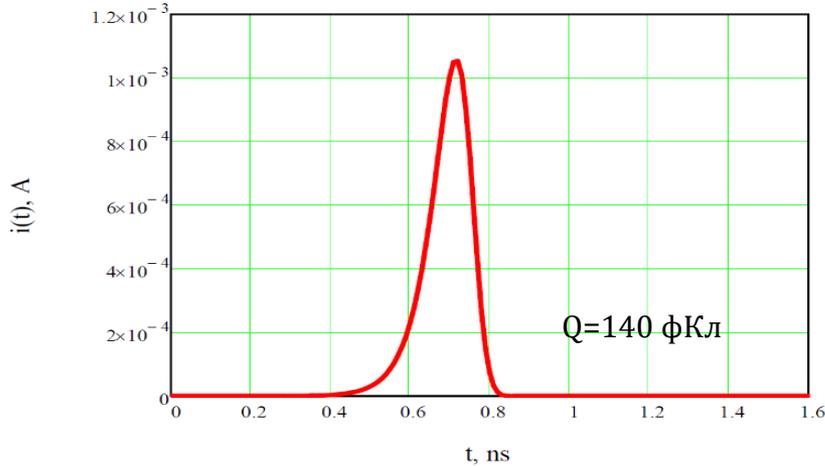
Наведенный на считывающие электроды МРПК ток от одного зазора 0,2 мм, заполненного стандартной газовой смесью

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

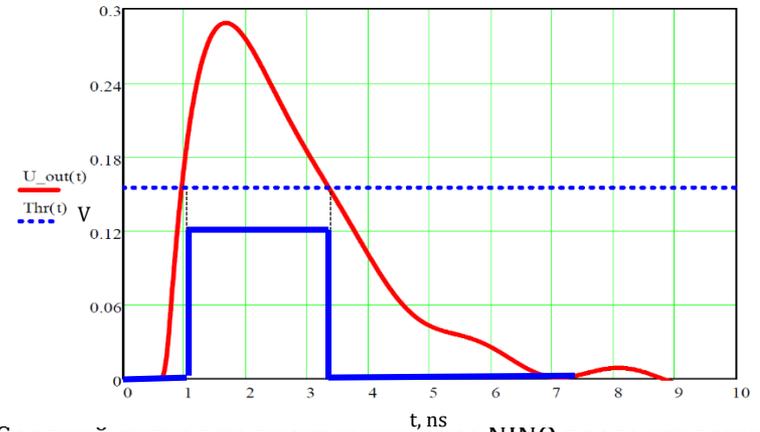


Наведенный на считывающие электроды МРПК средний ток от 10 зазоров с учетом эффекта объемного заряда

Отклик электроники с учетом шумов

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

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

Падение разности потенциалов в зазоре:

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

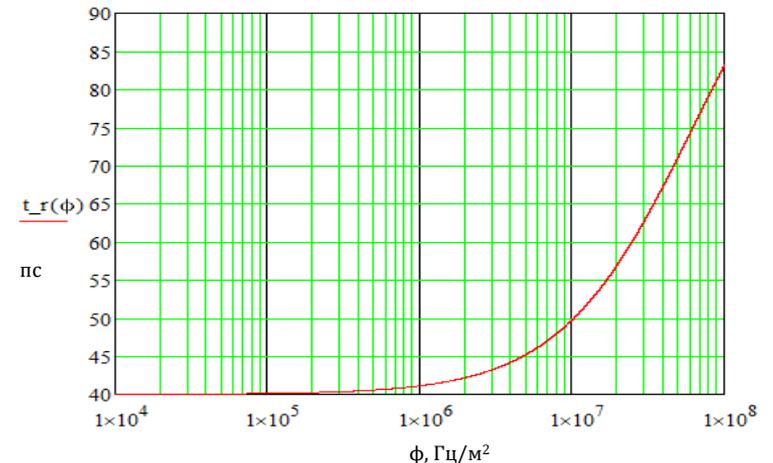
Изменение временного разрешения:

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

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

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

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



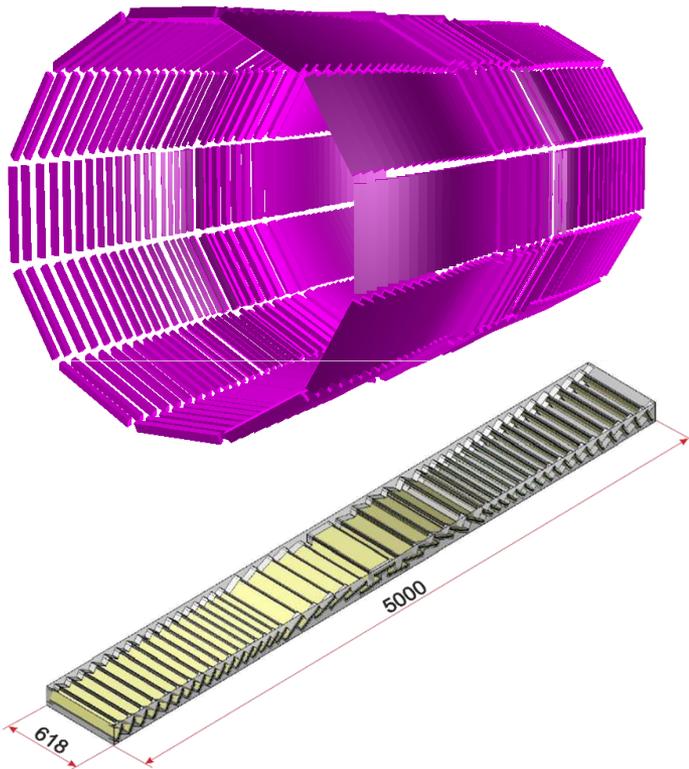
Расчетная зависимость временного разрешения МРПК от потока проходящих через нее частиц

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.

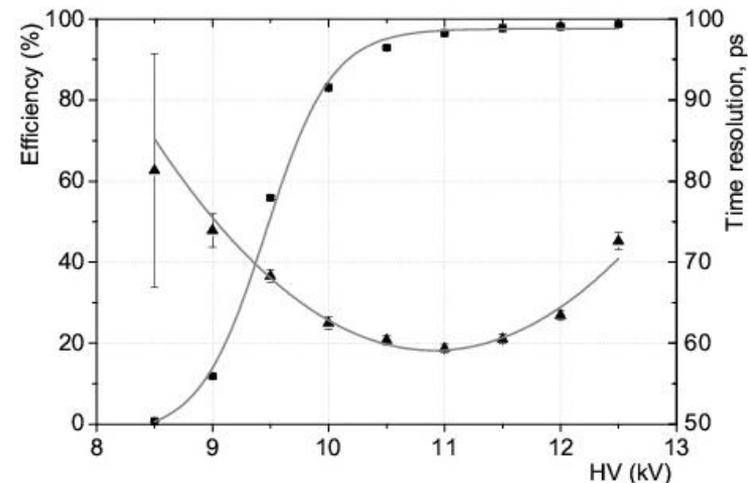
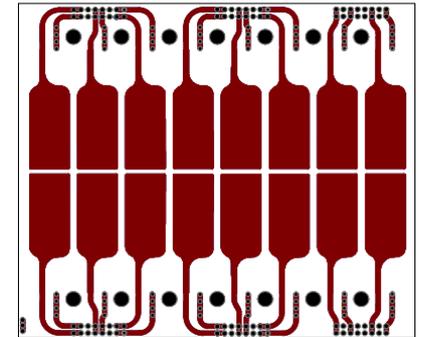
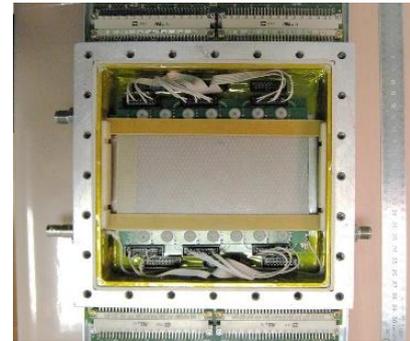
Разработка МРПК для TOF MPD

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-ззорная 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.



Времяпролетная система с «падовым» считыванием



Временное разрешение (▲) и эффективность (■) «падовой» МРПК

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.

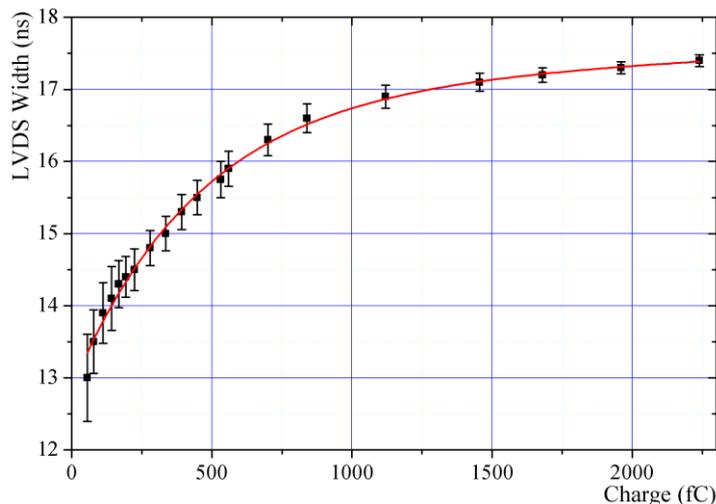
Предусилитель-дискриминатор на базе микросхемы NINO для TOF MPD

Характеристики усилителя-дискриминатора TOF MPD:

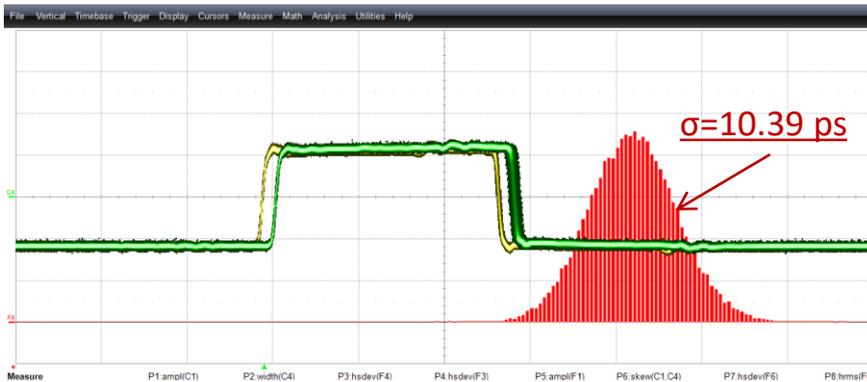
- Стабилизированное напряжение (+2,5 В);
- Дифференциальный вход ($Z_{diff} = 30-75 \text{ Ом}$ (54 Ом - типичное));
- Регулируемый порог дискриминации (типичное $U_{th} = 160 \text{ мВ}$);
- Защита входных каналов от перегрузки;
- Конденсаторы на входе для двустороннего считывания;
- Выходной разъем 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 $10.4/\sqrt{2} = 7.3 \text{ ps}$;
- Возможность Time-over-Threshold коррекции.



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



Зависимость длительности импульса LVDS на выходе NINO от входного заряда

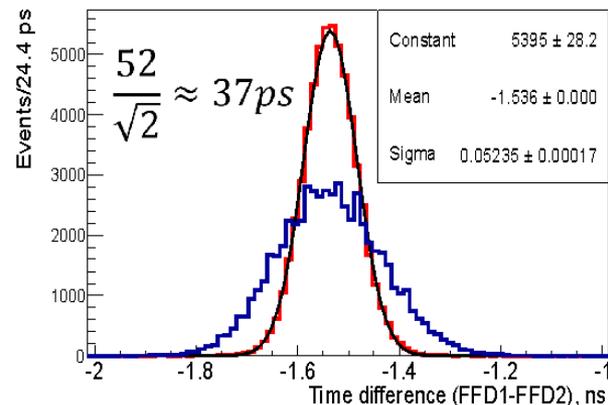
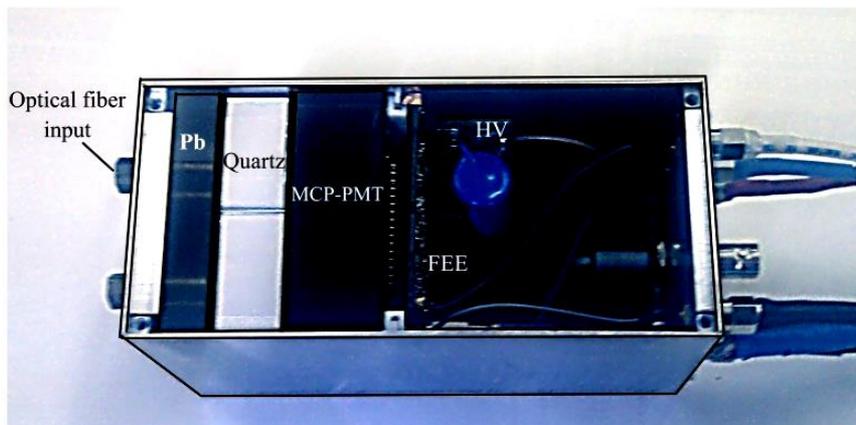
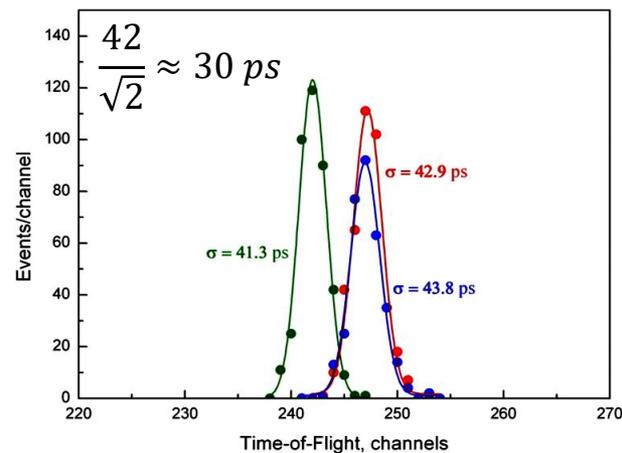
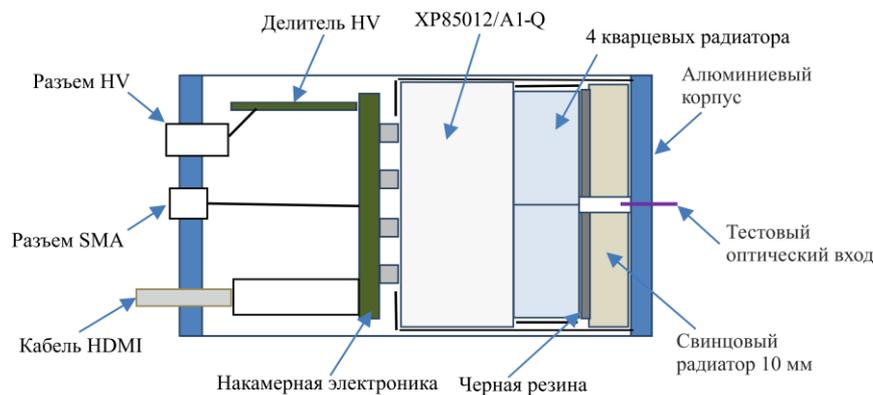


Распределение разности времен двух каналов усилителя

V.A. Babkin, M.G. Buryakov, V.M. Golovatyuk, M.M. Rumyantsev, S.V. Volgin, *Status of the front-end electronics for the time-of-flight measurements at the MPD experiment* // Particles and Nuclei, 13, 5 (2016) 532.
Babkin, V.A., ... Dmitriev, A.V., et al., *Control and readout electronics of the time-of-flight system of the MPD* // CEUR Workshop Proceedings, 2023 (2017) 129.

Быстрый стартовый детектор для времяпролетных измерений (FFD)

Для прецизионных измерений временных характеристик детекторов используется стартовый детектор Т0, который генерирует быструю временную отметку в момент пролета через него частицы. Он представляет собой детектор черенковских фотонов, испускаемых заряженными частицами в кварцевом радиаторе. Фотоны регистрируются быстрым многоканальным микроканальным фотоэлектронным умножителем Photonis Planacon XP85012/A1-Q. Наилучшее собственное временное разрешение такого стартового счетчика достигает 30 пс. После оцифровки сигналов времяцифровыми преобразователями на базе НРТДС, его временное разрешение ухудшается максимум до 50 пс.



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) 778.

МРПК с «стриповыми» считывающими электродами

После оценки первой предложенной конструкции с большим числом «падовых» электродов, было принято решение оптимизировать ее путем перехода к двустороннему считыванию с плоского «стрипового» электрода. Первый прототип МРПК с стриповым считыванием имел две разделенные считывающими электродами секции, как и «падовая» 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.

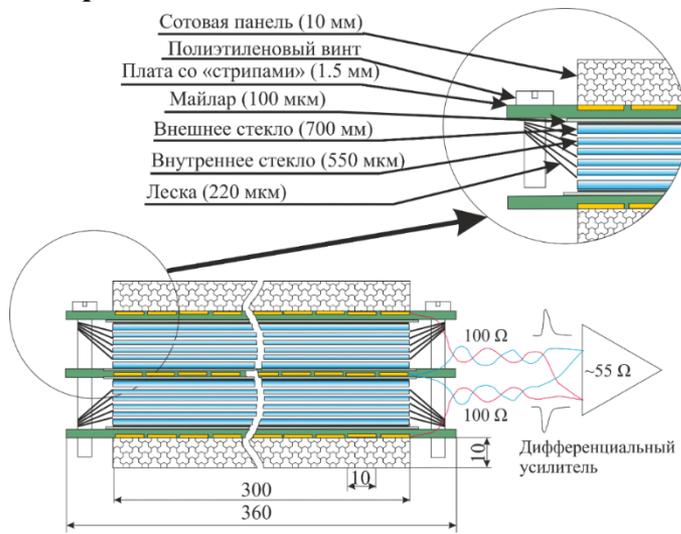


Схема прототипа двухсекционной МРПК со стриповым считыванием

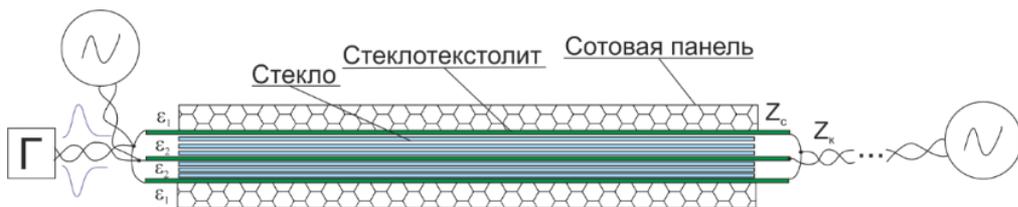
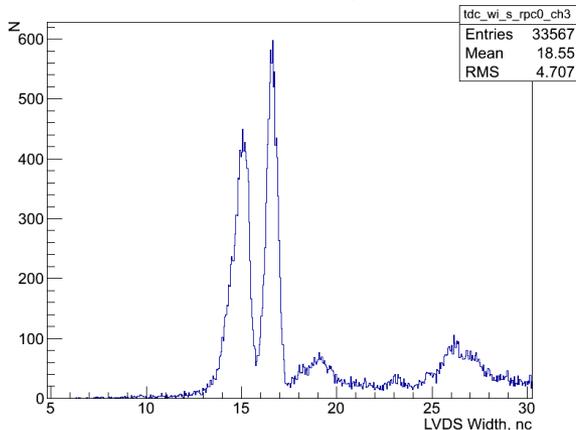


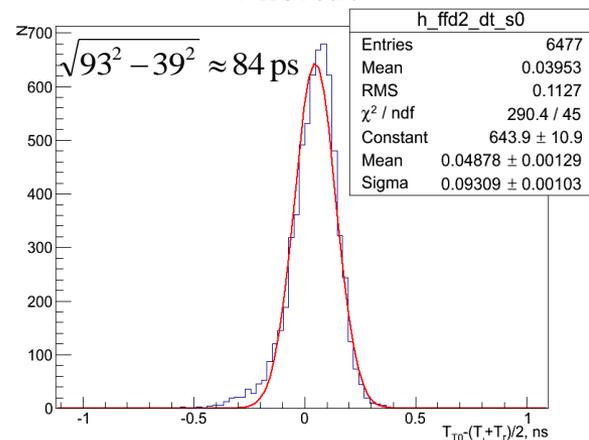
Схема установки для исследования прохождения сигналов через МРПК

TDC width SRPC-0, ch-3

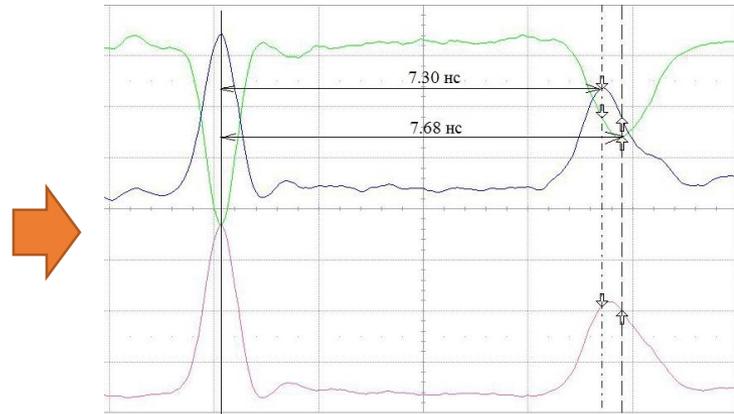


Спектр длительностей LVDS импульсов с двухсекционной МРПК

FFD2-SRPC ch-0



Распределение времени пролета между T0 и двухсекционной МРПК



Отражение дифференциального сигнала, прошедшего через анодный и катодный стрипы двухсекционной 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 стрипами шириной 5 мм и двухсекционный, который составлялся из двух одностековых, разделенных сотовой панелью, для уменьшения дисперсии сигнала.

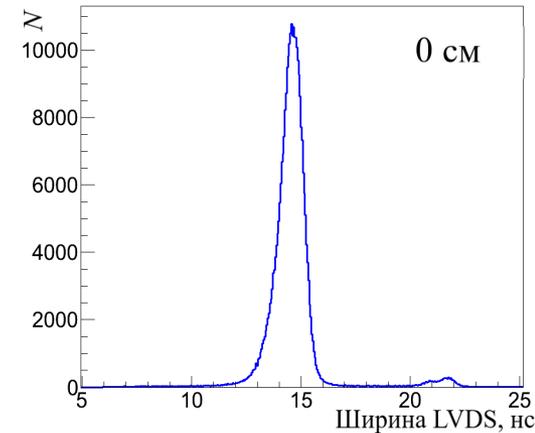
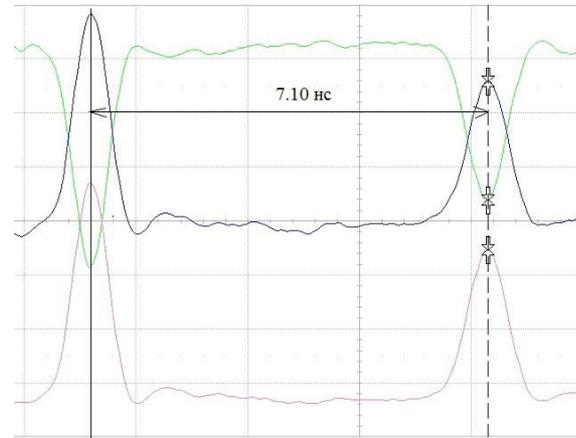
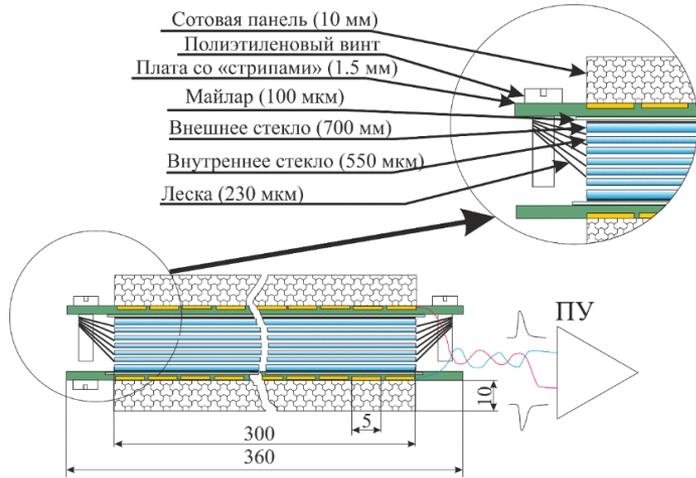


Схема односекционной МРПК со стрипом шириной 5 мм

Отражение дифференциального сигнала в односекционной МРПК

Спектр длительностей LVDS импульсов с односекционной МРПК.

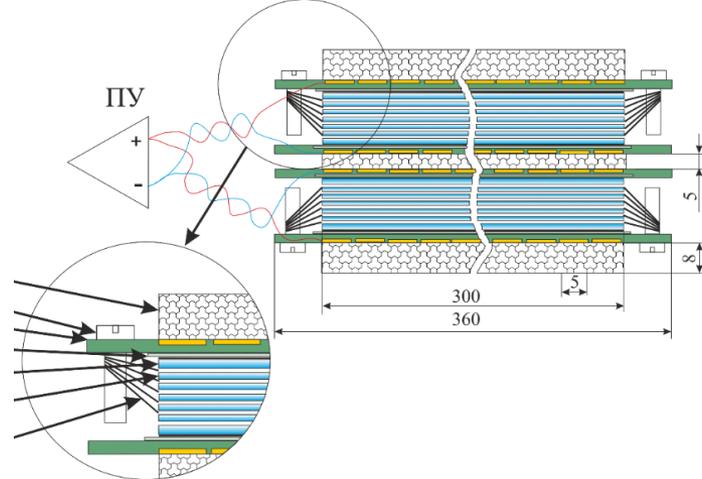
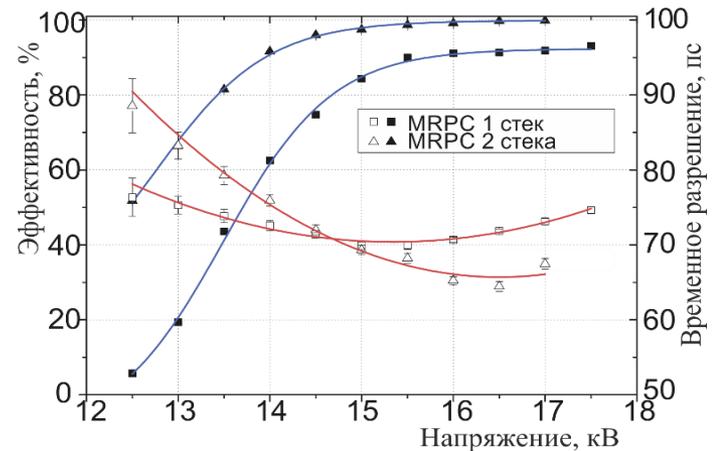


Схема двухсекционной МРПК с разделителем из сотовой панели



Разрешение и эффективность прототипов МРПК с 6 зазорами

V. Babkin, et al., *Strip MRPC for the MPD/NICA Time-of-Flight System* // Proceedings of TIPP-2014, PoS(TIPP2014)289.

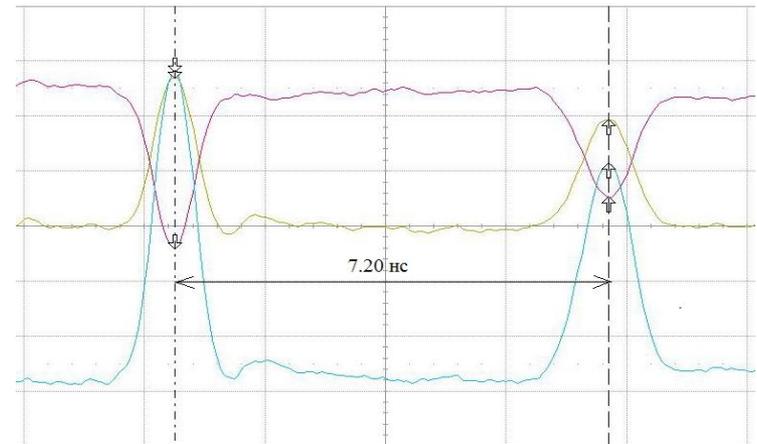
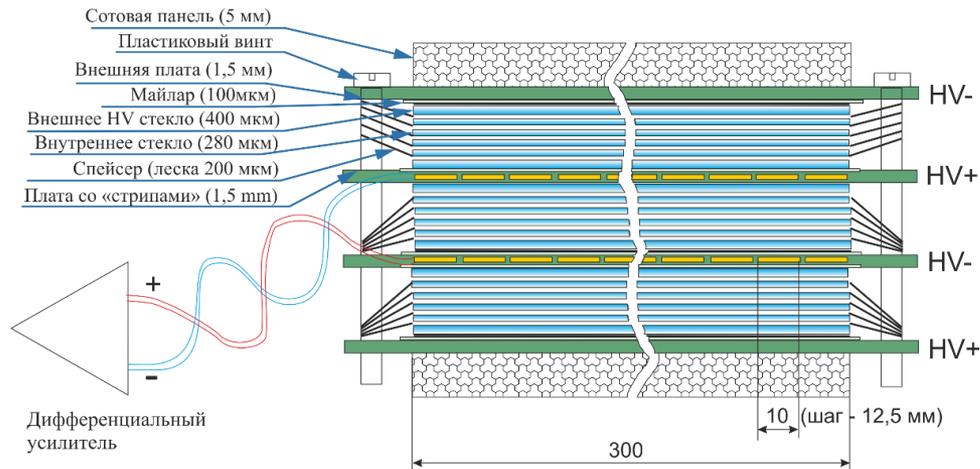
V. Babkin, et al., *Fast detectors for the MPD/NICA time-of-flight system* // Bulgarian Chemical Communications, 47(Special Issue-B) (2015), p. 215.

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.

V.Babkin, et al., *Triple-stack Multigap Resistive Plate Chamber with Strip Readout* // Nucl. Instrum. Meth. A 824 (2016) 490.

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 электродов: 280 (использовано впервые!) и 400 мкм. Исследования прототипов проводились на установке «Тестовый канал МРД». Для облучения как можно большей площади детекторов потоком частиц низкой интенсивности пучок растягивался во времени и расфокусировался квадрупольными линзами.

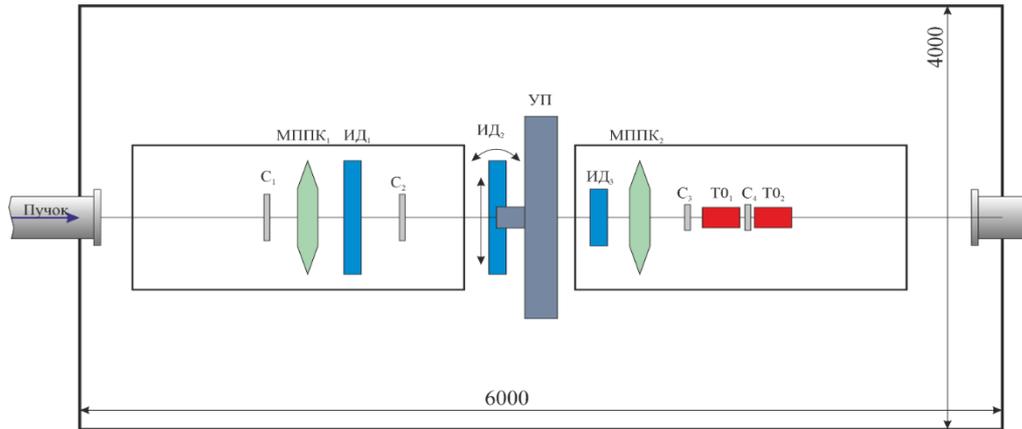
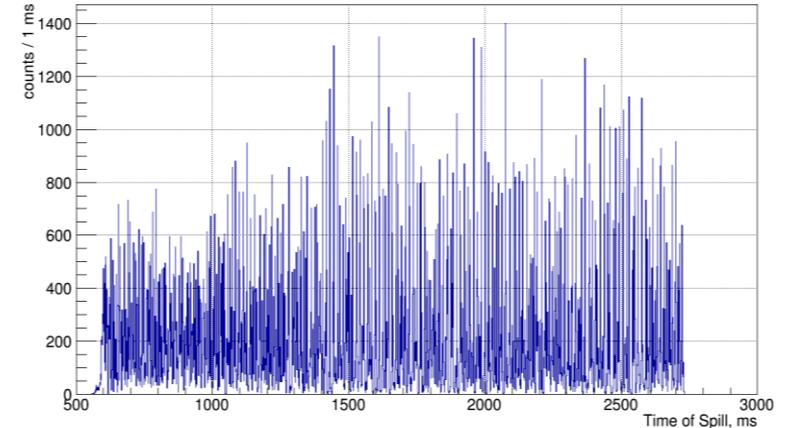
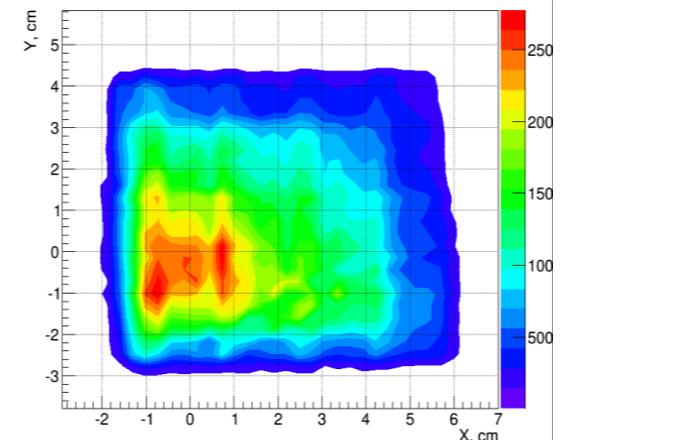
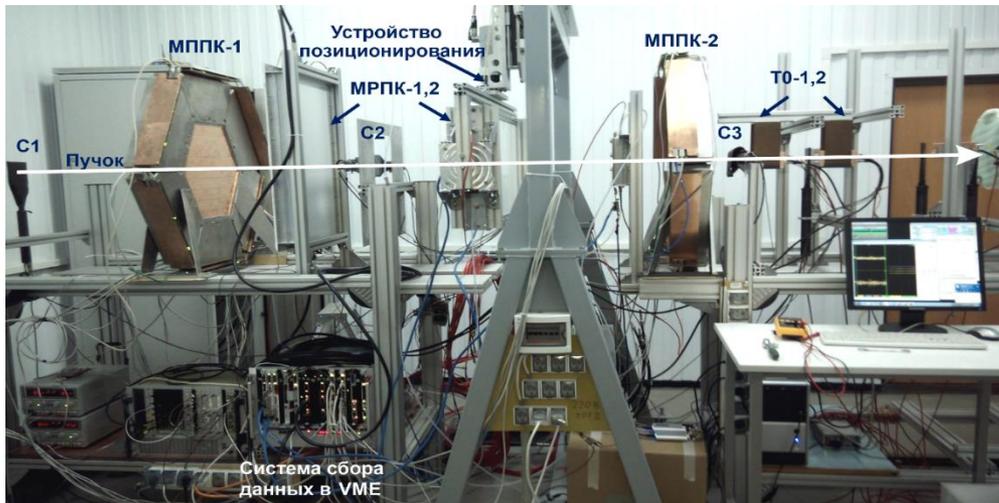


Схема установки детекторов на пучке во время испытаний МРПК

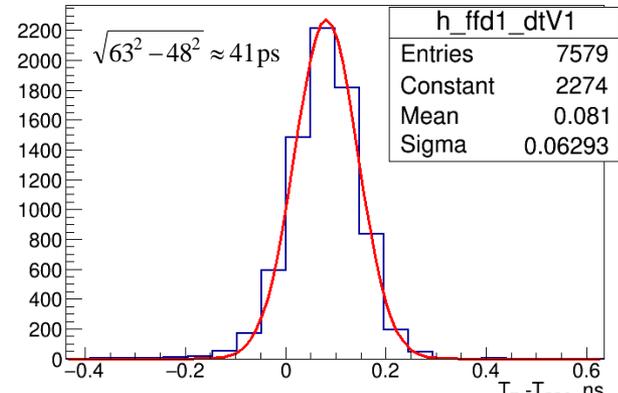
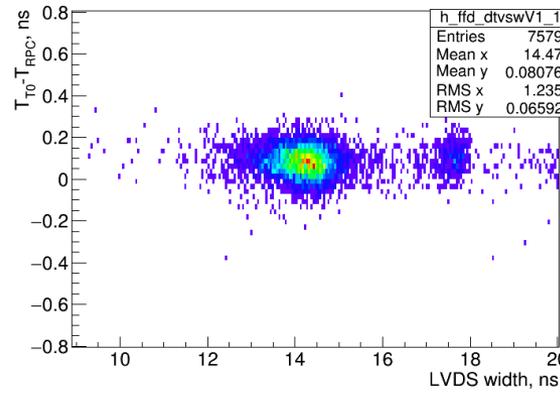
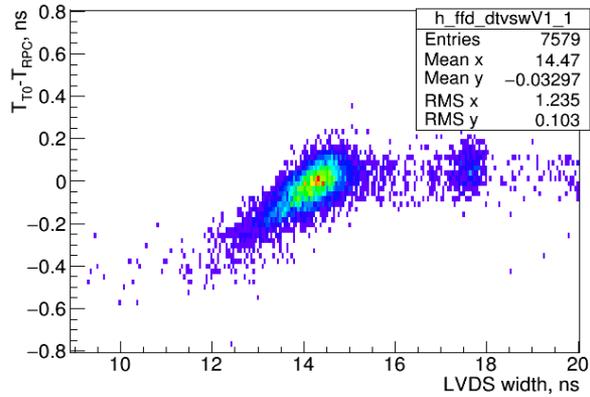


Типичная временная структура интенсивности пучка дейтронов, измеренная сцинтилляционными счетчиками.



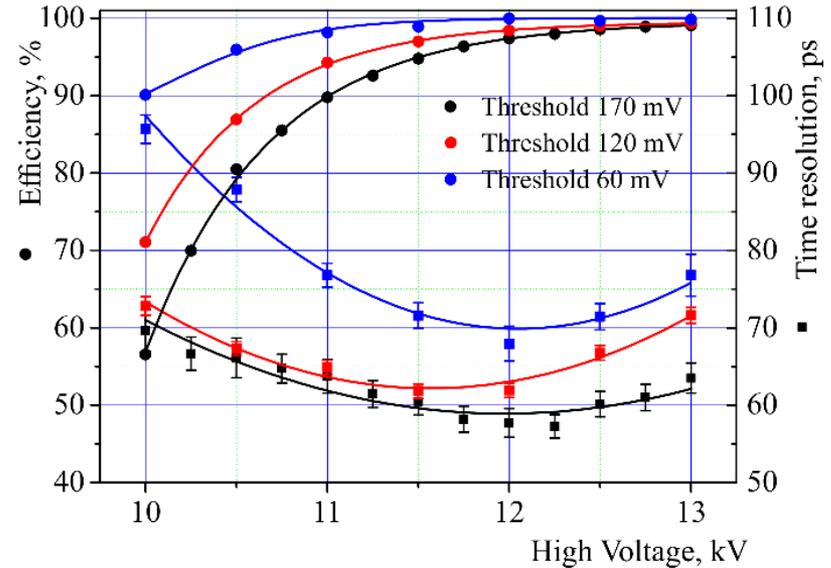
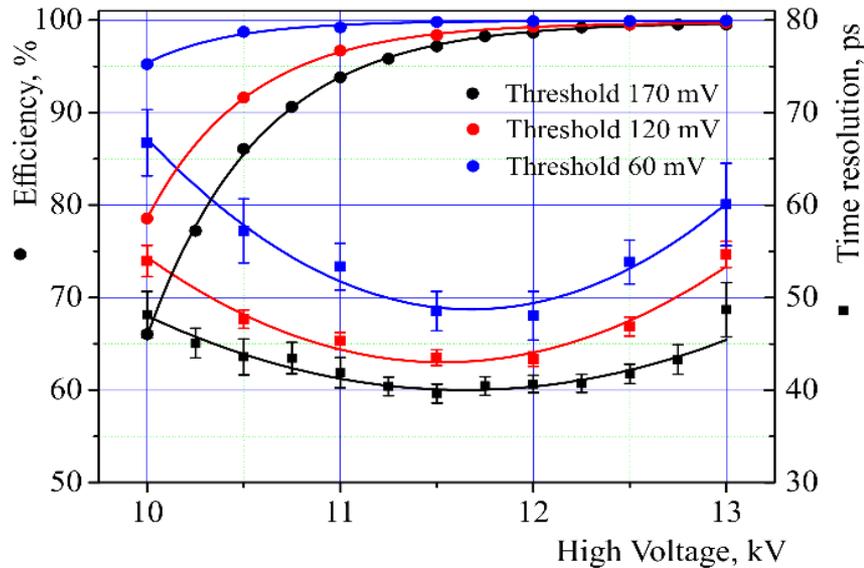
Двухмерный профиль пучка в гексагональных МРПК для триггерного счетчика с сцинтиллятором 7x7 см².

Испытания прототипов трехсекционных МРПК на пучке частиц



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

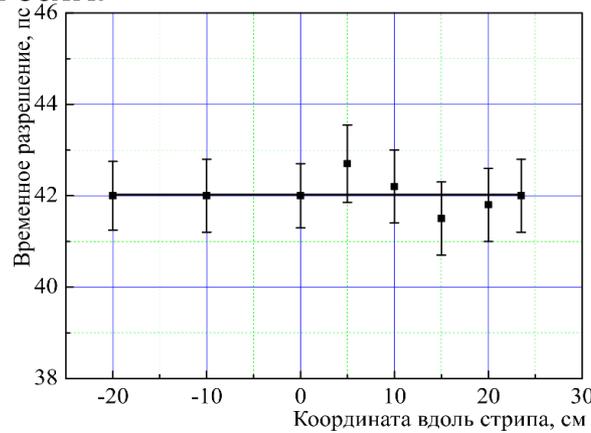
Временное распределение $T_{To} - T_{RPC}$ после применения коррекции ToT.



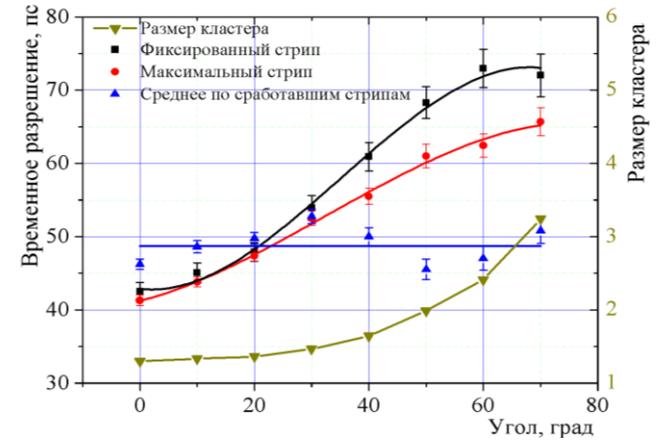
Эффективность и временное разрешение прототипов МРПК с плавающими резистивными электродами толщиной 280 (слева и на основе низкорезистивного стекла в зависимости от интенсивности пучка

Испытания прототипов трехстековых МРПК на пучке частиц

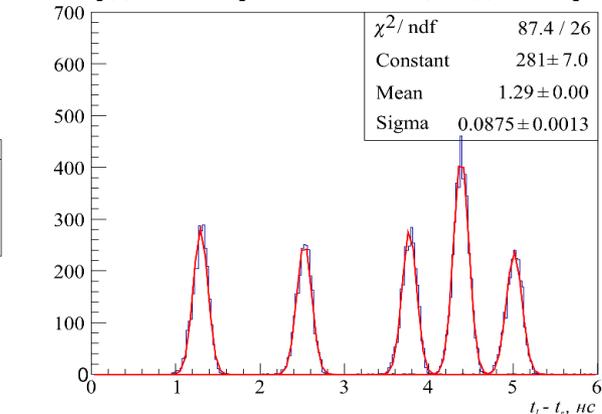
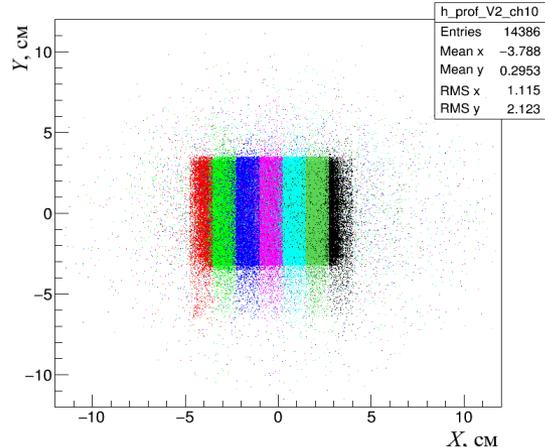
Детектор МРПК со стеклами толщиной 280 мкм был зафиксирован на прецизионном устройстве позиционирования с дистанционным управлением, позволяющим перемещать детектор и вращать по горизонтальной и вертикальной осям.



Временное разрешение трехсекционной МРПК от координаты пролета частицы вдоль стрипа

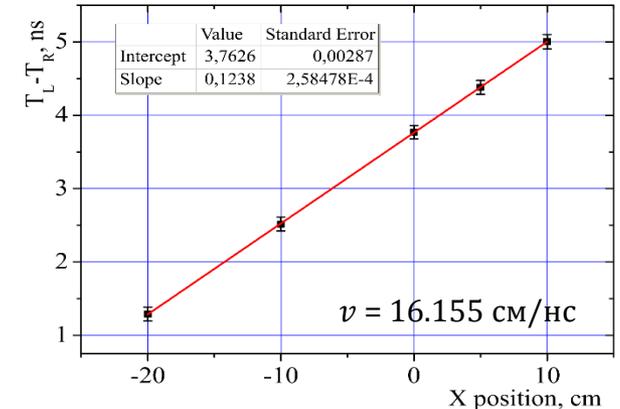


Временное разрешение трехстековой МРПК от угла входа частицы поперек стрипа



Разности времен прихода сигнала с двух сторон стрипа при перемещении МРПК

$$\sigma_{t_cut} = \frac{2\sigma_{x_cut}}{v} = \frac{2 \cdot \frac{1.5}{\sqrt{12}}}{16.155} = 0.054 \text{ нс};$$



Зависимость разности времен прихода сигнала с двух сторон стрипа от координаты

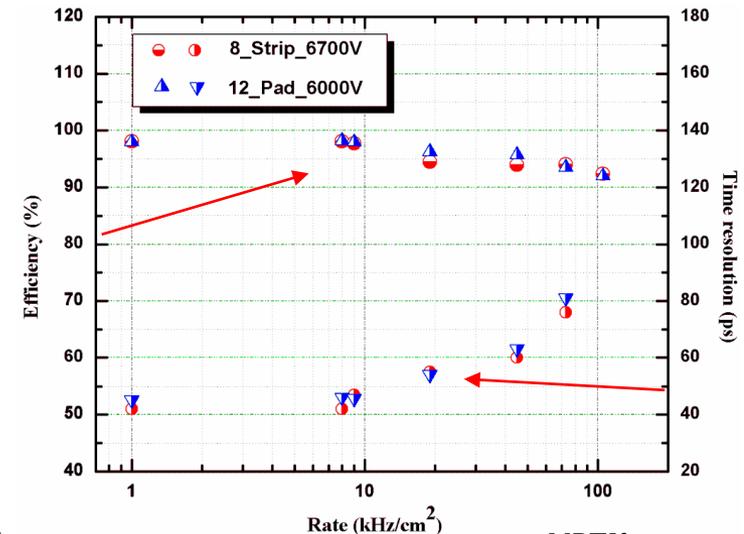
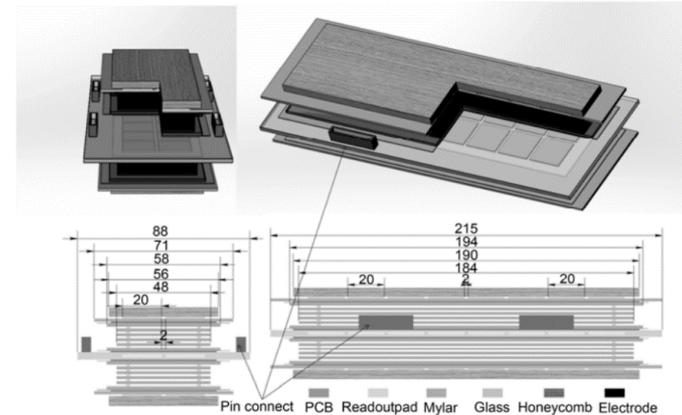
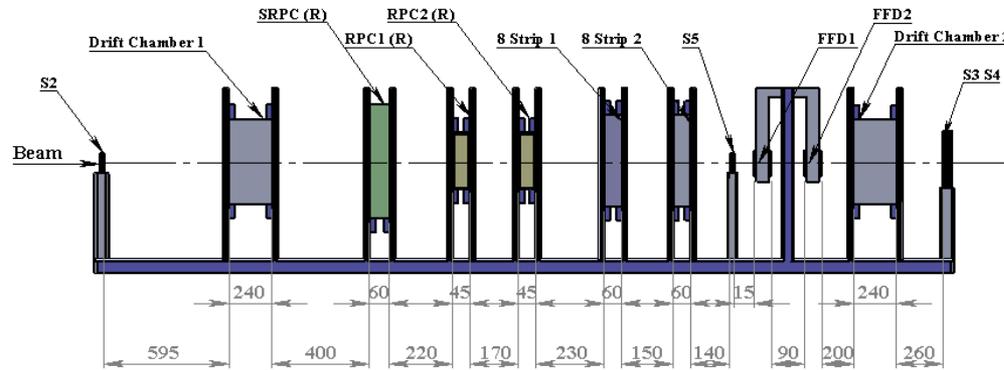
$$\sigma_{x_rpc} = \frac{v}{2} \sqrt{\sigma_{t_exp}^2 - \sigma_{t_cut}^2} = 0.56 \text{ см}$$

Проекция стрипов МРПК в МРПК

V.Babkin, et al., *Development of the MRPC for the TOF system of the MultiPurpose Detector* // JINST 11 (2016) C06007

Работы по исследованию загрузочной способности МРПК

Одна из задач диссертационной работы состояла в улучшении загрузочной способности МРПК. Первый эксперимент проходил в 2013 году на выведенном пучке дейтронов Нуклотрона совместно с группой из университета Циньхуа (Пекин, КНР). Использование стекла объемным сопротивлением $\sim 10^{10}$ Ом·см

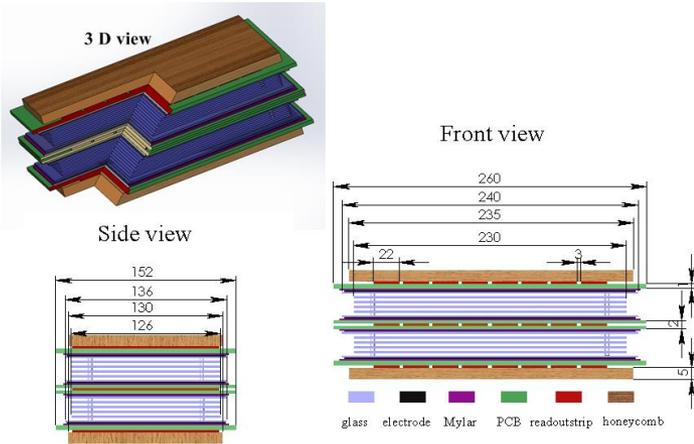


Эффективность и временное разрешение МРПК на основе низкорезистивного стекла в зависимости от интенсивности пучка дейтронов. Эффективность >95% до 70 кГц/см².

WeiPing Zhu, ..., V. Babkin, et al., *A real-size MRPC developed for CBM-TOF* // Science China Technological Sciences, 56 Issue 11, (2013) 2821-2826.

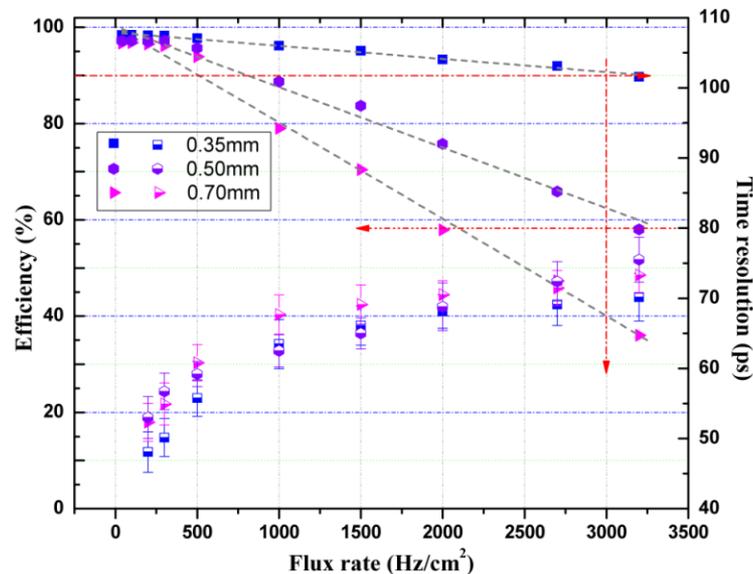
Работы по исследованию загрузочной способности МРПК

Использование тонкого стекла (до 3 кГц/см²)



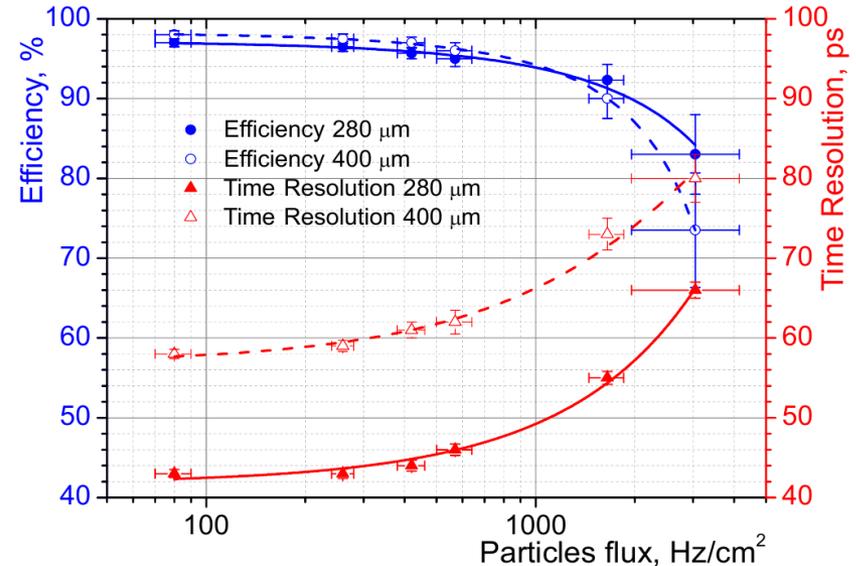
В сеансе Нуклотрона в марте 2015 года на установке «Тестовый канал МРПК» было проведено исследование загрузочных способностей прототипов трехсекционной МРПК для TOF МРПК с резистивными электродами из коммерческого флот-стекла различной толщины. Измеренное удельное сопротивление у стекол толщиной 400 и 280 мкм составляли $4.2 \cdot 10^{12}$ и $7.5 \cdot 10^{12}$ Ом·см, соответственно. В эксперименте 2013 года удельное сопротивление всех стекол составляла $4 \cdot 10^{12}$ Ом·см.

Экспериментальная зависимость временного разрешения от загрузки хорошо согласуется с теоретической кривой (см. слайд 8).



Эффективность и временное разрешение МРПК с резистивными электродами из стекла различной толщины от потока частиц. Эффективность >90% до 3 кГц/см² для стекла толщиной 350 мкм.

Zhu Weiping, ..., V. Babkin, et al., *A thin float glass MRPC for the outer region of CBM-TOF wall* // Nucl. Instrum. Meth. A 735 (2014) 277.

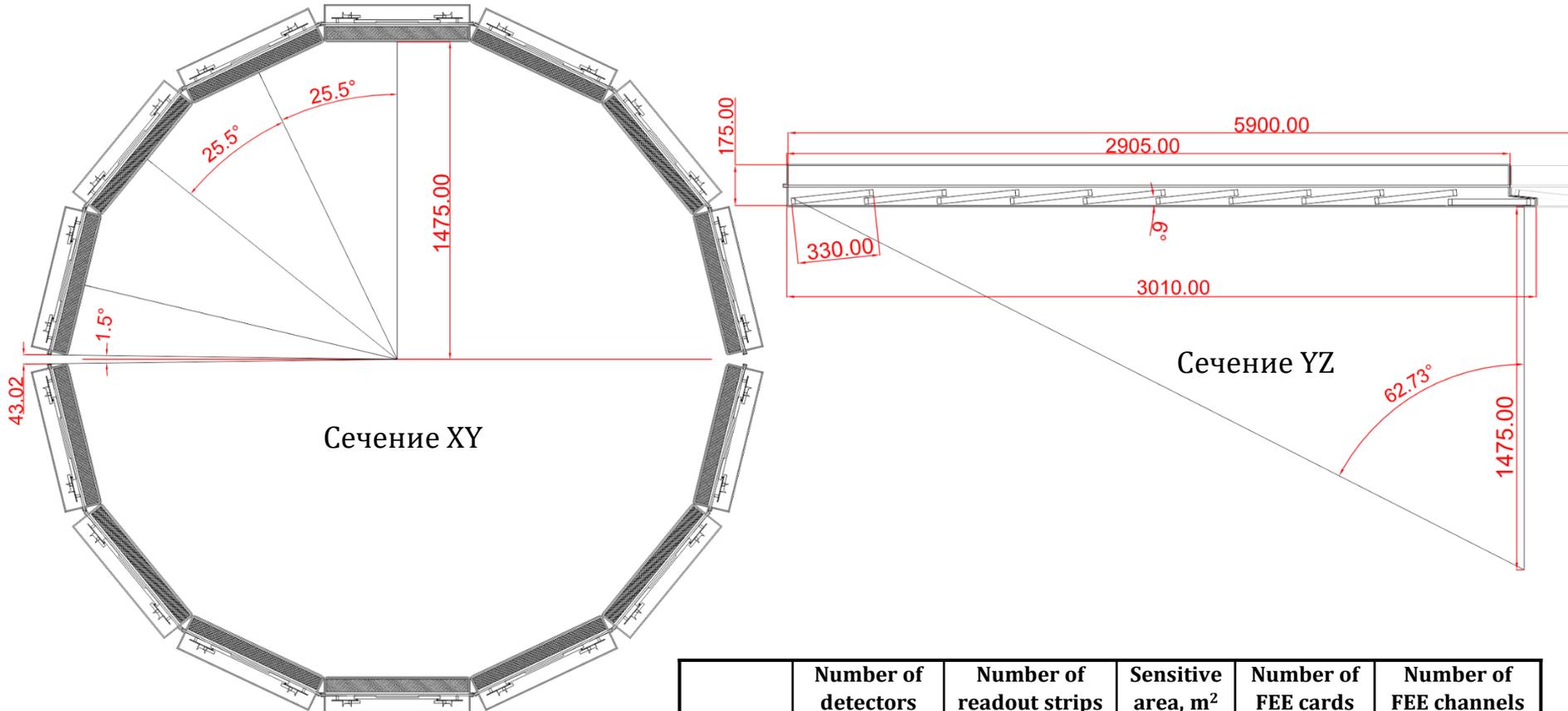


Эффективность и временное разрешение трехсекционной МРПК для TOF МРПК из стекла толщиной 280 и 400 мкм в зависимости от интенсивности пучка.

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.

Времяпролетная система эксперимента MPD

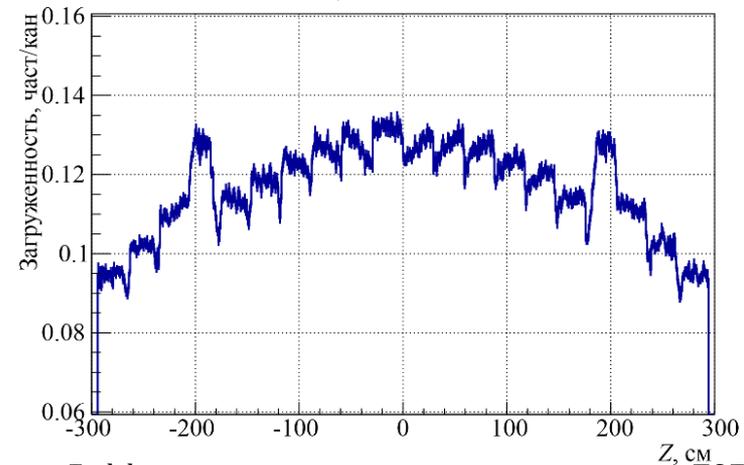
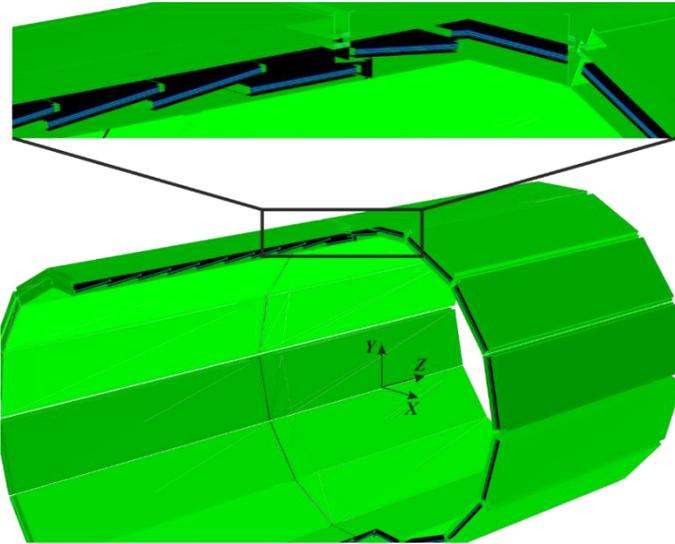
Конечная цель работы состоит в создании системы времяпролетной идентификации частиц (TOF) эксперимента MPD. **Четвертая глава** описывает ее устройство и конструктивные особенности. Приводятся результаты моделирования производительности системы TOF в MPDRoot. Здесь же описана электроника сбора данных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



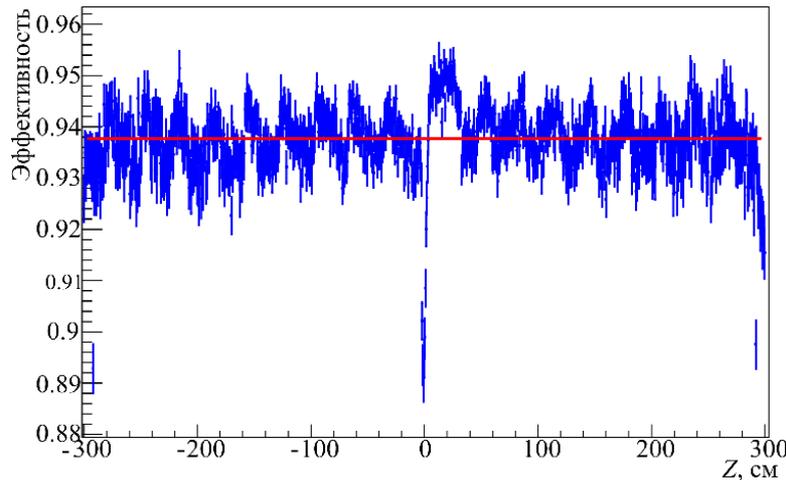
	Number of detectors	Number of readout strips	Sensitive area, m ²	Number of FEE cards	Number of FEE channels
MRPC	1	24	0.192	2	48
Module	10	240	1.848	20	480
Barrel	280	6720	51.8	560	13440 (1680 NINO)

Моделирование времяпролетной системы MPD в MPDRoot

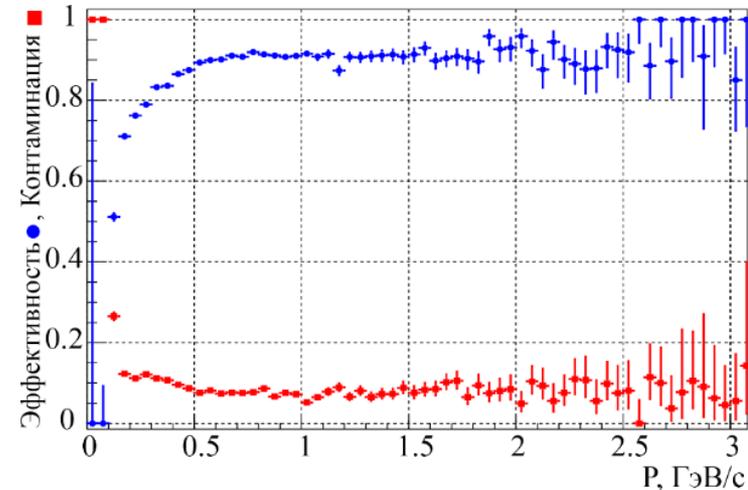
Для моделирования производительности системы была задана максимально приближенная к реальности геометрия всех элементов модулей TOF в MPDRoot. Все основные результаты получены с использованием генератора LAQGSМ для центральных столкновений ядер золота с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ.



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



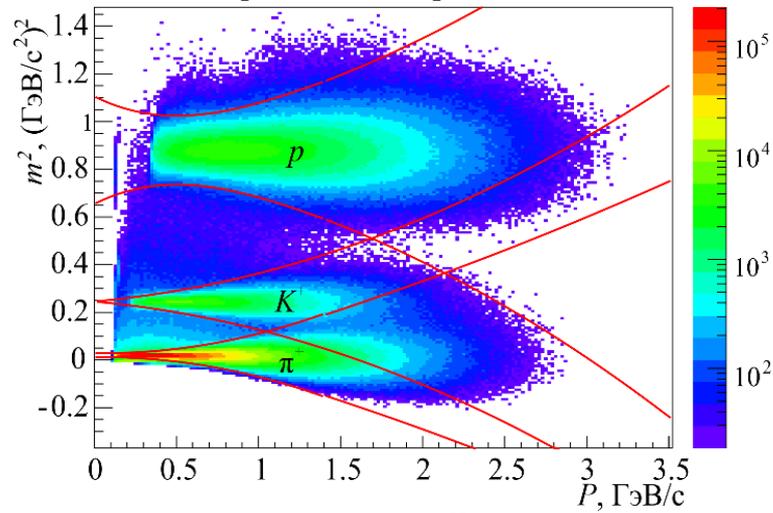
Дифференциальная геометрическая эффективность TOF MPD вдоль оси Z. Средняя эффективность $\sim 94\%$



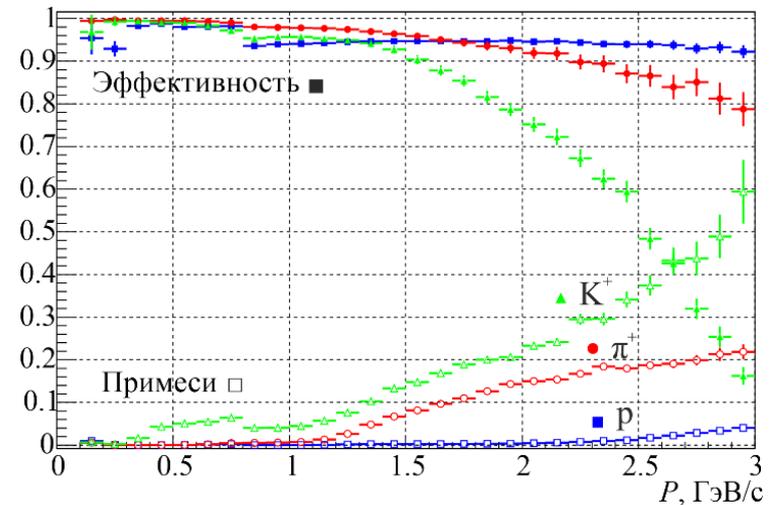
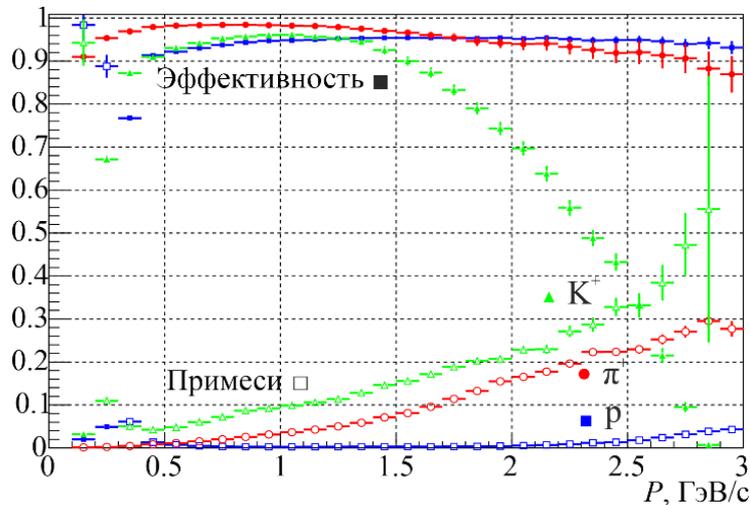
Эффективность сопоставления и примесь неверно сопоставленных восстановленных треков из TPC с событиями в TOF. Средняя эффективность $\sim 84\%$, контаминация $\sim 10\%$

Моделирование времяпролетной системы MPD в MPDRoot

Эффективность идентификации адронов в многоцелевом детекторе



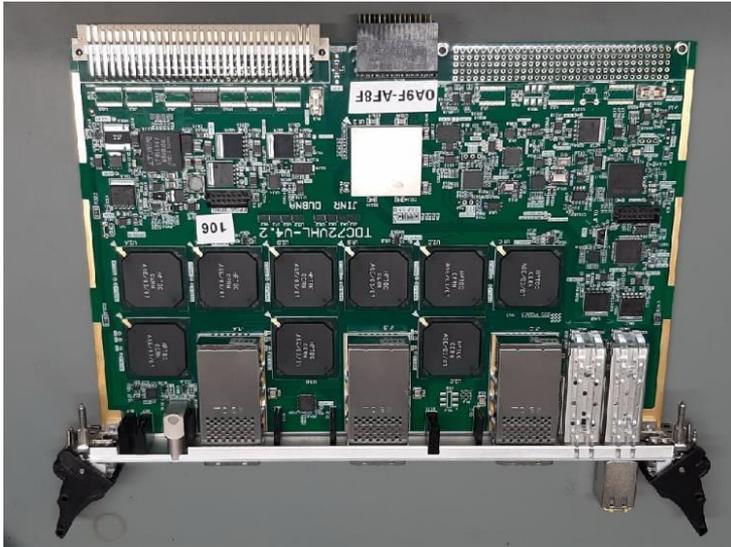
Зависимость квадрата массы для π , K , p в зависимости от их импульса для разрешения времяпролетной системы $\sigma_t = 80$ пс. Красные линии – границы 3σ .



Эффективность разделения адронов и примесь не верно идентифицированных частиц только времяпролетным методом (слева) и комбинированно по времени пролета и ионизационным потерям частиц dE/dx в ТРС (справа).

Электроника сбора данных TOF MPD

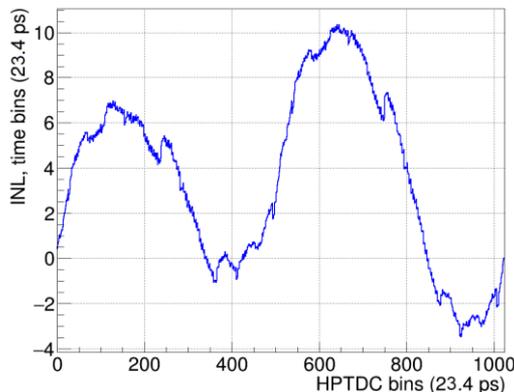
Сигналы с камерной электроники TOF в виде усилителей PA24N2V4L поступают на систему сбора данных, основным элементом которой является время-цифровой преобразователь которая TDC72VHL



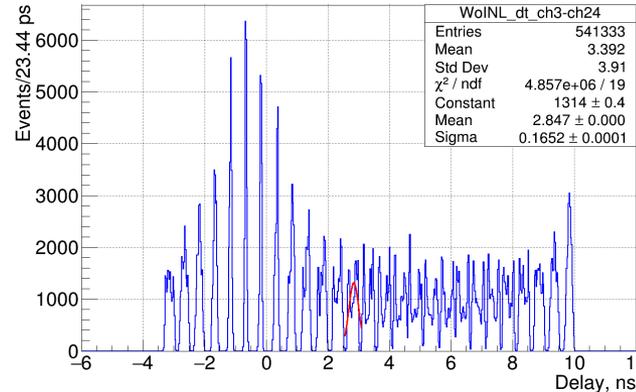
TDC72VHLv4 (VXS) на базе микросхемы HPTDC

- Интерфейс VME64x (VXS);
- Число входных каналов – 72;
- Входной импеданс 100 Ом (стандарт LVDS);
- Временное разрешение: ~ 24 пс на бин ($\sigma \sim 20$ 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).

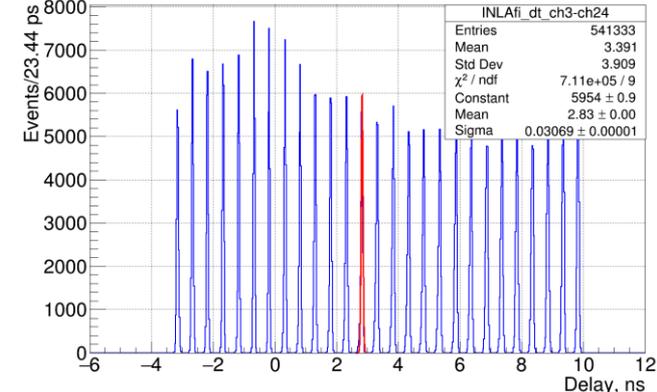
Калибровка интегральной нелинейности HPTDC



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



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



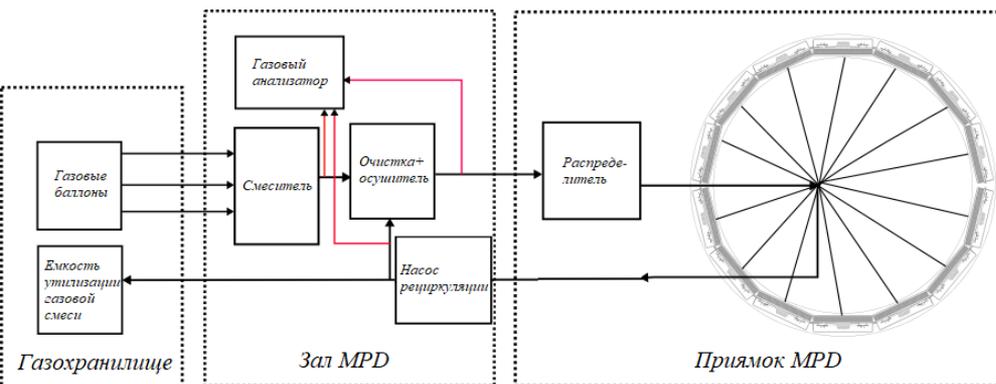
Временные распределения между двумя каналами HPTDC после применения калибровок. Разрешение составляет ~ 21 пс

Сервисные подсистемы

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% C₂H₂F₄ + 5% i-C₄H₁₀ + 5% SF₆). 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 м³, поэтому для экономии рабочих газов и в экологических целях была спроектирована газовая система с замкнутым контуром циркуляции смеси.



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

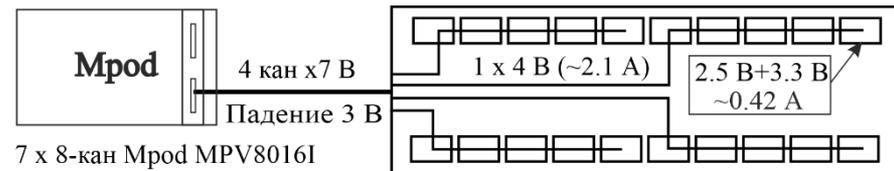


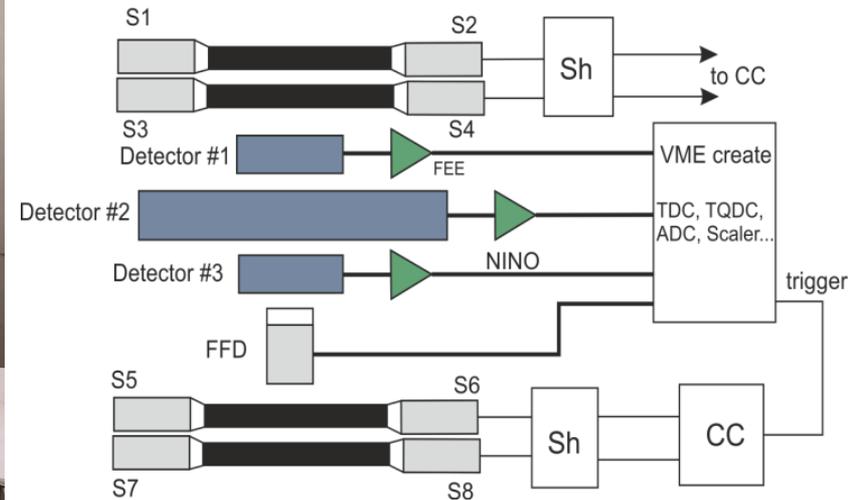
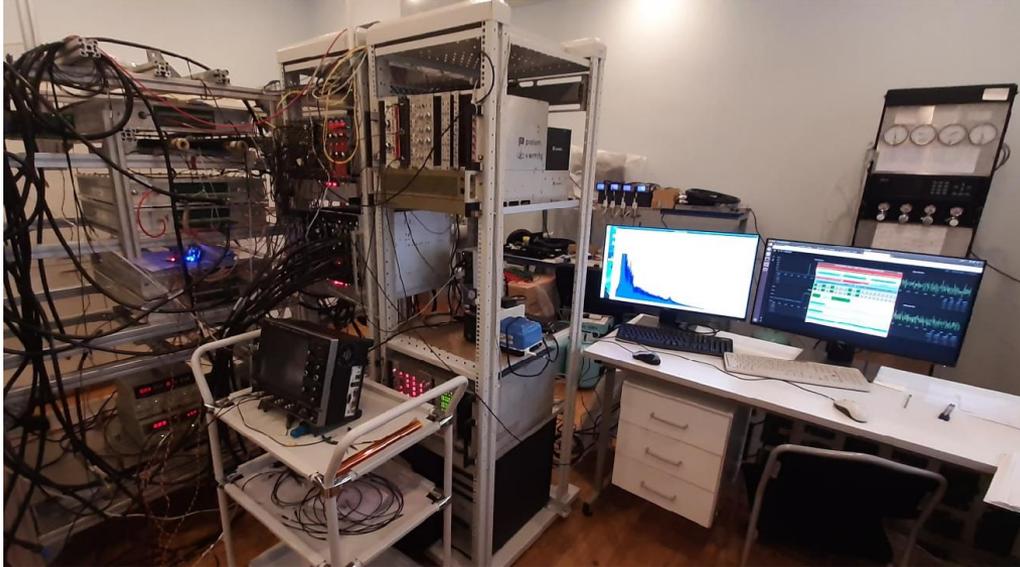
Схема распределения низкого напряжения в TOF МРД

	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 ³	2940, ~3 м ³

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
Полное энергопотребление	8000

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 м², на которой организовано непрерывное массовое производство МРПК и модулей TOF MPD с многоступенчатым тестированием продукции.



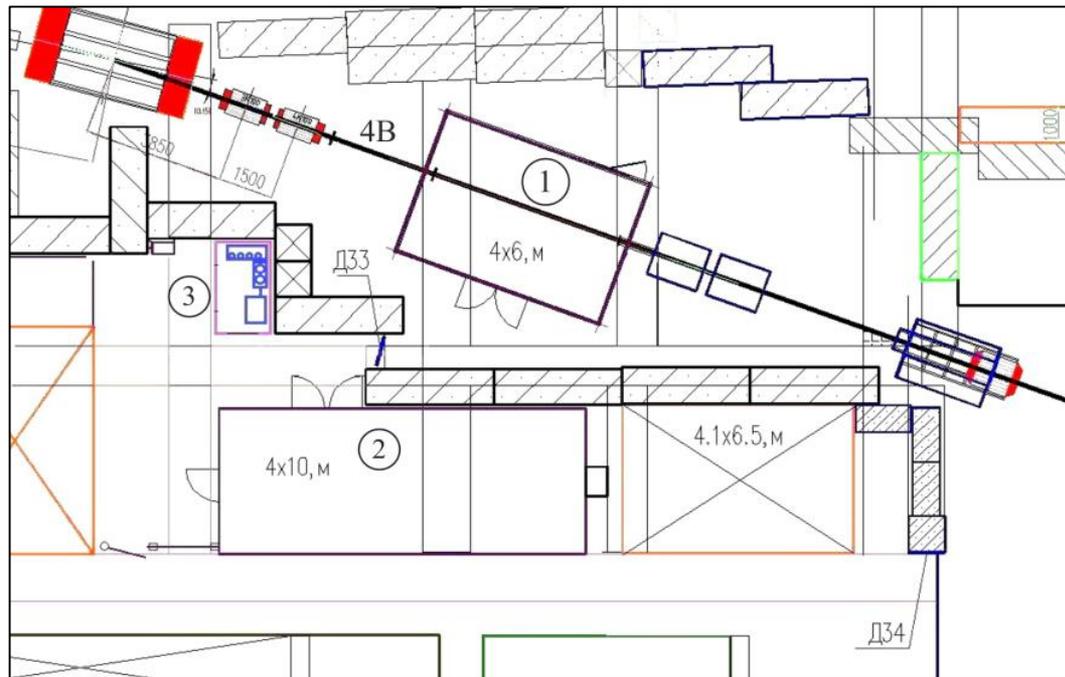
Стенд для испытания прототипов МРПК на космике:

- 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:

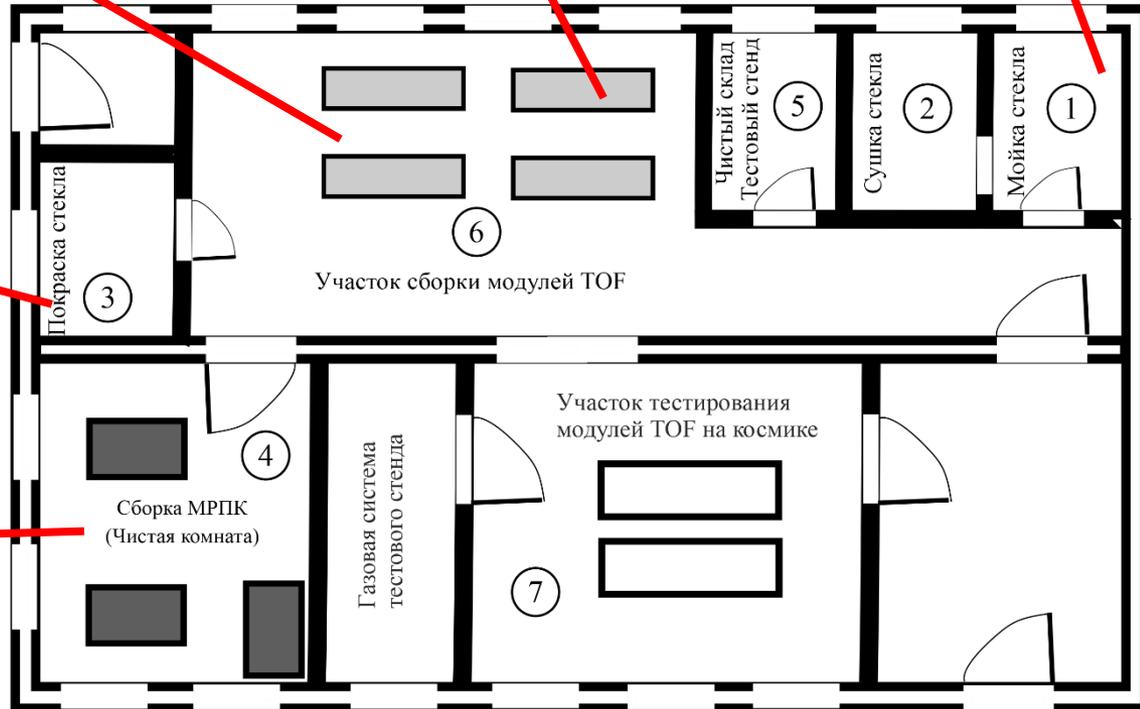
- два «стола» из алюминиевого профиля для фиксации и юстировки детекторов и другого оборудования вдоль оси пучка;
- устройство позиционирования для перемещения и поворота испытываемого детектора относительно оси пучка с точностью до 10 мкм;
- 3 пропорциональных камеры с 6 плоскостями проволочек для трекинга и определения профиля пучка;
- сцинтилляционный 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 MRPC;
- 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

V.A. Babkin, et al., *The MPD test beam setup for testing detectors with the Nuclotron beams* // Instrum. Exp. Tech. 60 (2017) no. 3, 307.

Участок массового производства детекторов и модулей TOF MPD

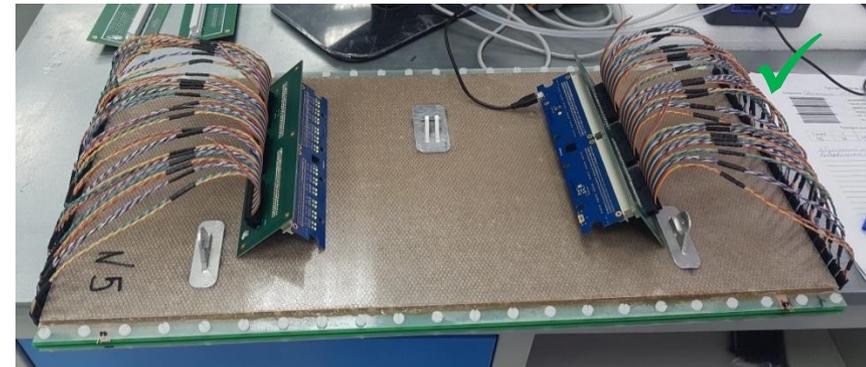
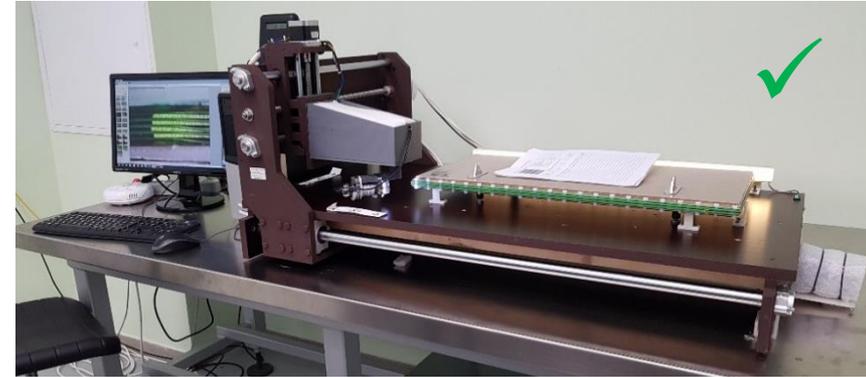


Участок массового производства детекторов и модулей TOF MPD

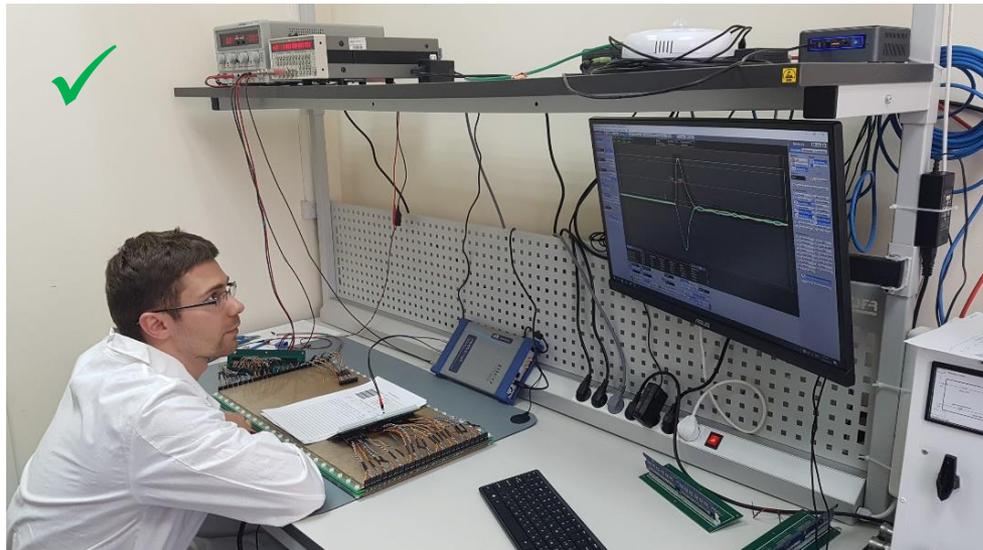
Пять этапов контроля качества сборки МРПК

Перечень проверки

- ✓ 1) Оптический контроль (равномерность зазоров, сколы и трещины в стекле)
- ✓ 2) Первичное HV тестирование (без газа) - до 6 кВ
- ✓ 3) Проверка считывающих кабелей и контактов на КЗ, разрыв и неправильную полярность
- ✓ 4) Полноценное HV тестирование (после откачки и заполнения фреоном R134a) – до 12 кВ
- ✓ 5) Контроль импеданса линии



✓ Готов к установке в модуль!



Стенд тестирования модулей TOF MPD на космическом излучении

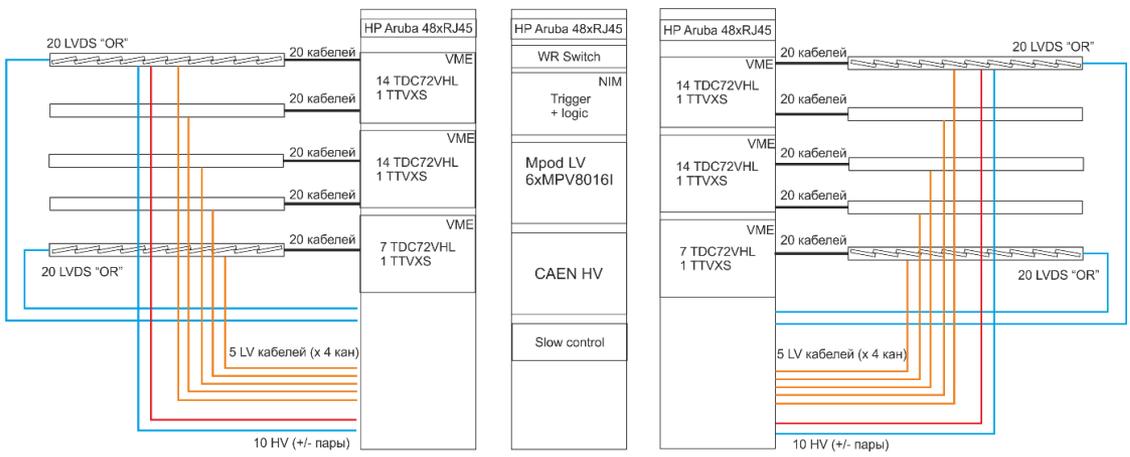
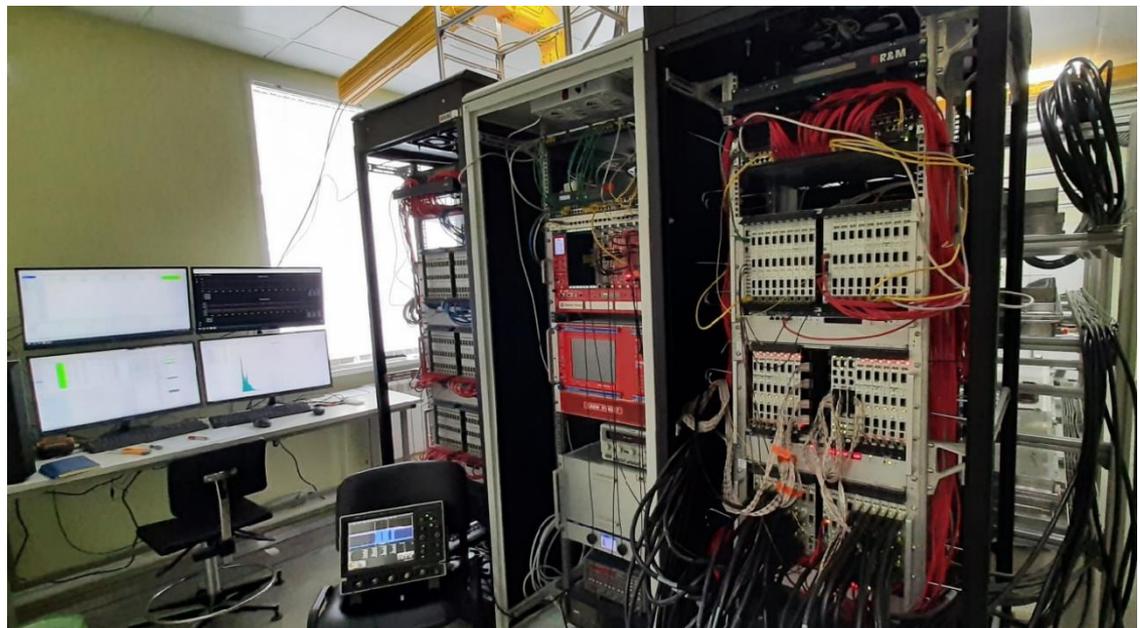


Схема стенда для испытаний модулей TOF



D. Dabrowski, ...V. Babkin, et al., *Gas System for MPD Time-of-Flight Detector* / Acta Physica Polonica B (Proceedings Supplement), 9 (2016) no.2, p.203.

Основные результаты диссертационной работы

1. В процессе разработки детекторов для времяпролетной системы многоцелевого детектора MPD было изучено влияние конструктивных особенностей многозазорной резистивной плоской камеры на форму и характеристики выходного дифференциального сигнала.
2. На основе этого исследования была предложена оригинальная трехсекционная симметричная МРПК, конструкция которой минимально влияет на искажение первичного сигнала и улучшает рабочие свойства детектора.
3. Впервые на выведенных пучках Нуклотрона была создана специализированная установка «Тестовый канал MPD» для тестирования детекторов. Установка позволяет исследовать рабочие характеристики детекторов частиц с высокой точностью и в короткие сроки.
4. Использование новой конструкции 15-зазорного детектора позволило впервые получить временное разрешение лучше 40 пс.
5. Впервые были проведены исследования загрузочных характеристик МРПК при уменьшении толщины резистивных электродов, а также, при использовании специального низкорезистивного стекла. Было обнаружено улучшение загрузочных характеристик при уменьшении толщины стекла. Детектор со стеклом толщиной 280 мкм работает с эффективностью выше 90% при загрузках до 2 кГц/см². Детекторы на основе низкорезистивного стекла эффективно работают до загрузок $5 \cdot 10^4$ частиц/см².
6. Основная цель данной работы состояла в создании надежной и эффективной системы идентификации частиц по времени пролета для многоцелевого детектора MPD. Такая времяпролетная система, полностью удовлетворяющая техническим требованиям этого детектора, была разработана.
7. Благодаря успешным испытаниям прототипов МРПК и завершению работ по проектированию времяпролетной системы TOF MPD, было организовано массовое производство детекторов на базе ЛФВЭ.

Спасибо за внимание!

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). Актуальность исследований данного типа детекторов на настоящее время подтверждается регулярным проведением специальных научно-методических конференций с публикацией большого числа статей. Особый интерес вызывает методика повышения эффективности работы МРПК с увеличением интенсивности потока проходящих через нее частиц.

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

Задачи диссертационной работы:

- разработка, исследование рабочих характеристик и оптимизация МРПК, удовлетворяющей требованиям времяпролетной системы Многоцелевого детектора;
- проектирование эффективной времяпролетной системы идентификации частиц Многоцелевого детектора, на основе разработанной МРПК;
- создание исследовательской инфраструктуры, позволяющей детально изучать характеристики разрабатываемых детекторов.

Научная значимость и новизна диссертационной работы

Эксперимент MPD создается для решения физических задач, связанных с изучением свойств сверхплотной барионной материи. Ответы на них имеют большое значение в понимании многих фундаментальных проблем современной физики. Особый интерес вызывают: поиск признаков фазового перехода между адронной материей и кварк-глюонной плазмой (КГП); 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) и изучение основных свойств сильного взаимодействия и КГП-симметрии. Для решения таких амбициозных научных задач создается экспериментальная установка MPD на ускорительном комплексе NICA. Помимо фундаментальной значимости, данная работа имеет большое методическое значение, так как в процессе разработки элементов и подсистем времяпролетной системы были получены результаты, которые будут использованы при создании новых детектирующих устройств.

Новизна диссертационной работы проявляется в следующем:

1. Впервые было получено рекордное временное разрешение 40 пс (включая разрешение считывающей электроники) при эффективности регистрации 99% для МРПК, разработанной в рамках диссертационной.
2. Впервые была исследована зависимость эффективности и временного разрешения МРПК, изготовленных из стекла различной толщины, от интенсивности потока проходящих через нее частиц.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработка 15-зазорной трехсекционной МРПК активной площадью $\sim 0.2 \text{ м}^2$ с симметричным дифференциальным считыванием сигналов со стриповых электродов для использования во времяпролетной системе MPD.
2. Методика улучшения загрузочных способностей МРПК при использовании для его сборки низкорезистивного и тонкого стекла.
3. Методика исследования эффектов прохождения высокочастотного импульса по стриповым считывающим электродам и на границах стрип-кабель-усилитель, которая привела к изменению принципа считывания сигнала с МРПК и улучшила временные характеристики детектора.
4. Моделирование в MPDRoot разработанной конструкции времяпролетной системы TOF MPD.
5. Создание методической инфраструктуры для исследования и массового производства детекторов.

Научно-практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработанная новая конструкция трехсекционной МРПК с симметричным стриповым считыванием, может быть применена для создания или усовершенствования других времяпролетных систем экспериментов с требуемым временным разрешением лучше 100 пс.
2. Характеристики МРПК из стекла разной толщины и из низкорезистивного стекла (удельное сопротивление $< 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$), полученные в зависимости от интенсивности потока частиц, демонстрируют возможность использования такого материала для создания детекторов, работающих при повышенных интенсивностях частиц.
2. Созданная новая экспериментальная установка «Тестовый канал MPD», представляет широкие возможности для тестирования различных типов детекторов, которыми будут комплектоваться разрабатываемые и будущие установки на комплексе NICA.

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.