



Участие ПИЯФ в SPD

Соснов Д.Е.
ЛФЭЧ ОФВЭ

25.12.2025



Физика: *

- Экзотические резонансы
- Дикварки и т.п.
- Одиночные спиновые ассиметрии, поперечная поляризация
- Многопарtonные взаимодействия

Straw-трекер **

(совместно с ОИЯИ, Дубна и ИЯФ, Алматы):

- R&D считающей электроники
- R&D изготовления straw-трубок
- Моделирование отклика трубок
- Оптимизация реконструкции треков

Компьютинг ***

Сотрудники ПИЯФ в SPD

- Ким В. Т. *, **
- Барсов С. Г. **
- Буланова С. А. *, **
- Дзюба А. А. **
- Егоров А. Ю. **
- Зеленов А. В. *, **
- Кирьянов А. К. ***
- Кузнецова Е. В. **
- Лазарев А. А. *, **
- Маев О. Е. **
- Малеев В. П. **
- Малышев М. Ю. *
- Мосолова Е. О. **
- Нартов А. В. **
- Скальненков А. Ю. **
- Соснов Д. Е. **
- Федин О. Л. **
- Фетисов А. А. **
- Чубыкин А. Д. **

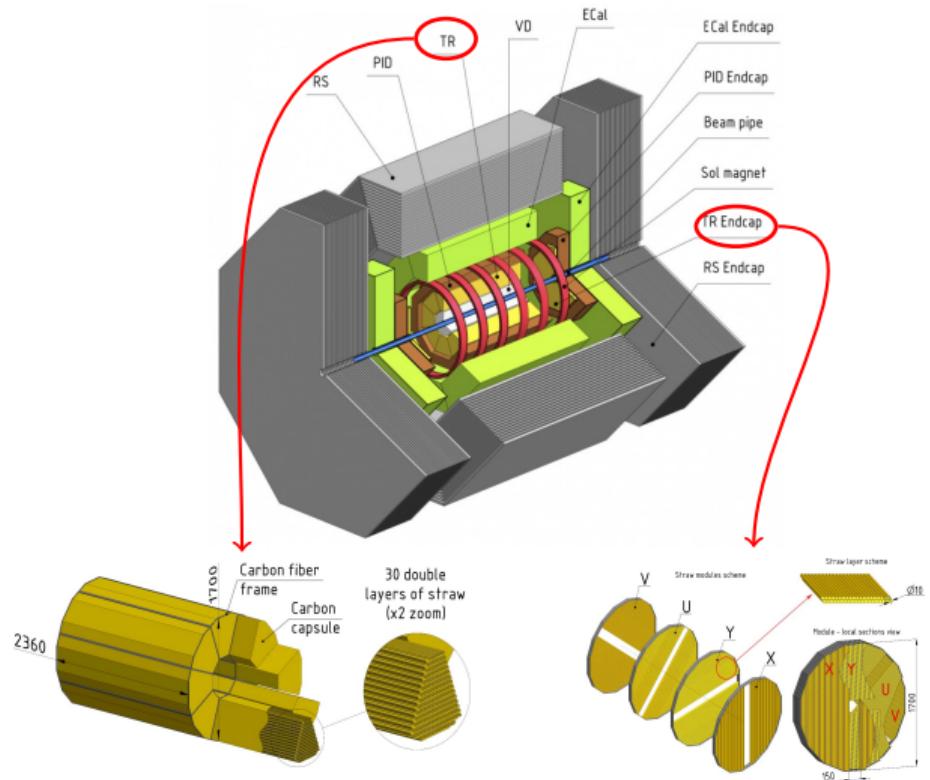


Основные направления физических задач SPD:

- V. V. Abramov et al., "Possible Studies at the First Stage of the NICA Collider Operation with Polarized and Unpolarized Proton and Deuteron Beams", *Phys.Part.Nucl.* **52** (2021) 6 1044, doi:[10.1134/S1063779621060022](https://doi.org/10.1134/S1063779621060022)
- A. Arbuzov et al., "On the physics potential to study the gluon content of proton and deuteron at NICA SPD" *Progress in Particle and Nuclear Physics* **119** (2021) 103858, doi:[10.1016/j.ppnp.2021.103858](https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2021.103858)
- V. Abazov et al. (SPD Collaboration), "Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA", *Natural Science Review*, **1** (2024) 1-325. doi:[10.54546/NaturalSciRev.100101](https://doi.org/10.54546/NaturalSciRev.100101)

Straw-трекер SPD

- Восстановление треков заряженных частиц
- Измерение импульсов частиц в магнитном поле
- Идентификация заряженных частиц с малым импульсом по измеренным ионизационными потерями энергии
- Straw-трекер: ~ 20 тыс. straw-трубок диаметром 10мм в барельной части (ultra-sonic welding) и ~4 тыс в End-Cap (winded straw)

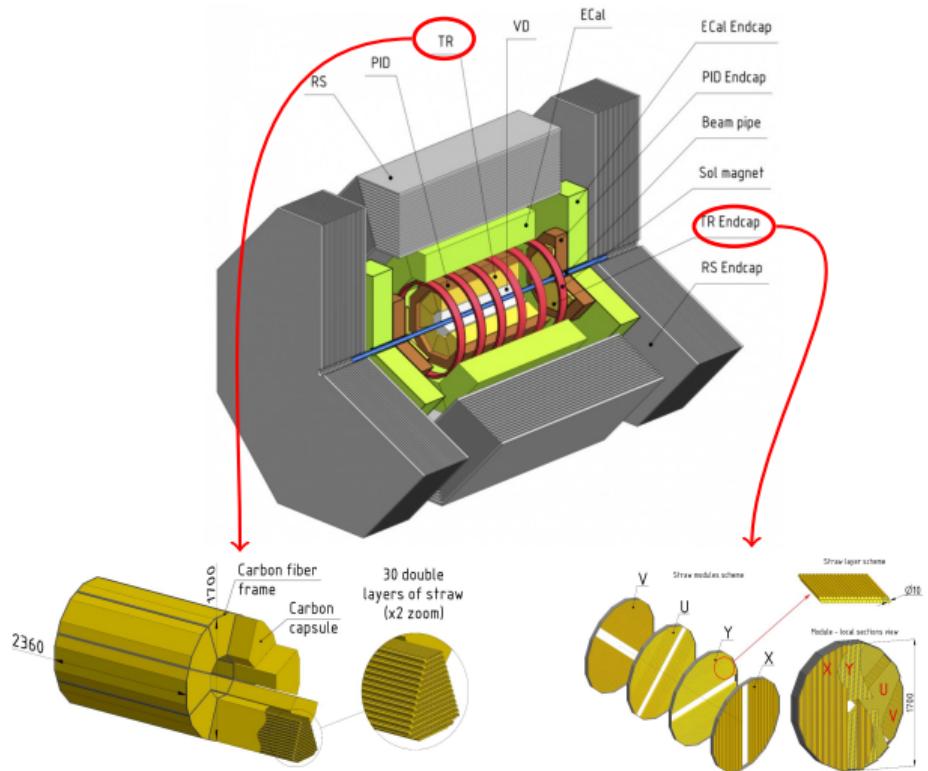


from Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA

Цели R&D по выбору считывающей электроники straw-трекера:

- Определение требований к считающей электронике
- Изучение существующих ASIC^a потенциально подходящих для считывания сигналов со straw-трубок:
 - Измерение пространственного разрешения straw-трубок
 - Измерение зарядового разрешения

^aASIC – application-specific integrated circuit, интегральная схема специального назначения



from Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA



Тестовые пучки в 2025 году

- 1 сеанс на НИЦ КИ – ПИЯФ СЦ-1000 ($p, p = 450 – 1700 \text{ MeV}/c$)
- 2 периода набора данных на CERN SPS ($\mu, p = 70 – 150 \text{ GeV}/c$)
- 2 периода набора данных на CERN PS ($e/pions, p = 300 – 5000 \text{ MeV}/c$)

Тестовый пучок на НИЦ КИ – ПИЯФ СЦ-1000

Основная цель: получение наилучшего возможного зарядового разрешения,

проверка возможности идентификации частиц по dE/dx

2–8 октября:

- Отдельная straw-трубка со специальным усилителем, со временем формирования 250ns (О.Н. Минко, ОИЯИ)
- 1 MicroMegas; 2 MWPC (см. доклад О.Е. Маева)

*Н.Г. Козленко

Тестовые пучки CERN SPS

Основная цель: определение наилучшего возможного пространственного разрешения в зависимости от параметровчитывающей электроники

7–16 апреля, 16–30 июля:

- Малый прототип SPD ST, трекер MicroMegas, TimePix 4
- Считывающая электроника: ATLAS ASD, STM-VMM (VMM3a based), A.Solin & NA64 readout

Тестовые пучки CERN PS

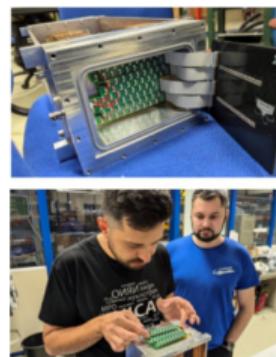
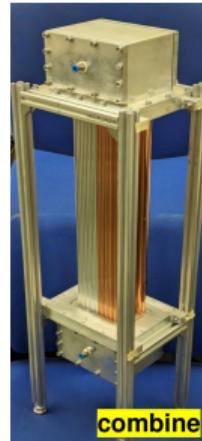
Основная цель: получение наилучшего возможного зарядового разрешения

6–13 августа, 12–19 ноября:

- Отдельная straw-трубка со специальным усилителем, со временем формирования 250ns (О.Н. Минко, ОИЯИ)
- Трекер AZALEA, TimePix 4

В тестовых измерениях используется два прототипа straw-трекера:

- Комбинированный прототип (Straw Combined Prototype) (с 2023 г.):
 - 36 straw-трубки диаметром 5 мм
 - 18 straw-трубки диаметром 10 мм
 - 8 straw-трубки диаметром 20 мм
- Малый прототип SPD ST – Прототип со стерео-расположением трубок, 8 слоёв straw-трубок диаметром 10мм (с 2024 г.):
 - 4 double-layer planes: Y-U-V-Y
 - Stereo angle: 2°
 - Первый прототип интерфейса для подачи высокого и подключения считывающей электроники



Прототипы сделаны в ОИЯИ
(Т. Еник и др.)





Используемые варианты считывающей электроники:

A.Solin & NA64 readout

NA64 readout с аналоговой частью
А. Солин, НИИ ЯП БГУ (г. Минск),
являющейся основой для будущего
основного решения электроники трекера
SPD.

Параметры:

- Время формирования 12ns
- Усиление 20 mV/fC
- Размер бина TDC ~1ns

STM-VMM

Запасное решение электроники для трекера SPD – используется
внешнее считывание с VMM3a asic. Тем самым решаются
проблемы VMM3a:

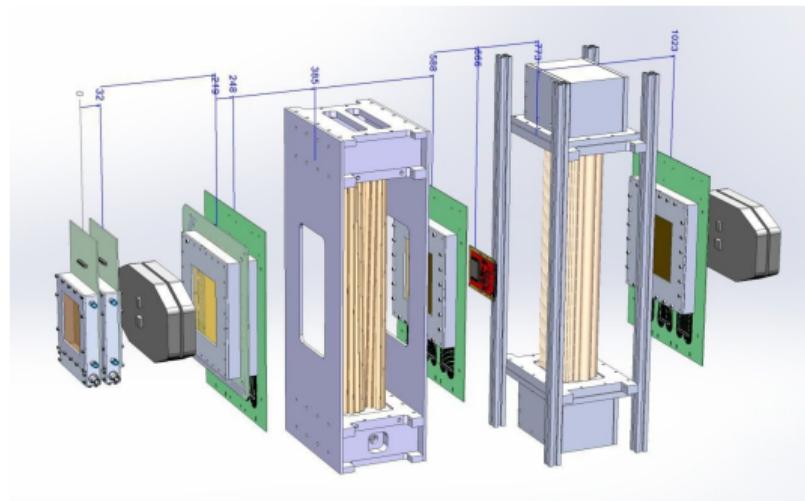
- Зависание в режиме "time-at-threshold"
- Проблема в оцифровке tdo и pdo

Первый прототип решения представлен в 2025 году трекерной
группой SPD в ОИЯИ (В.В. Баутин и др.). Используемый DAQ SW
был разработан в ПИЯФ (Д.Е. Соснов).

Основные параметры решения наследуются от параметров
используемого чипа (VMM3a):

- Время формирования: 25, 50, 100, 200 ns
- Усиление: 0.5, 1, 3, 4.5, 6, 9, 12, 16 mV/fC
- Размер бина времени ~ 200 – 400ps

Тестовая установка на SPS

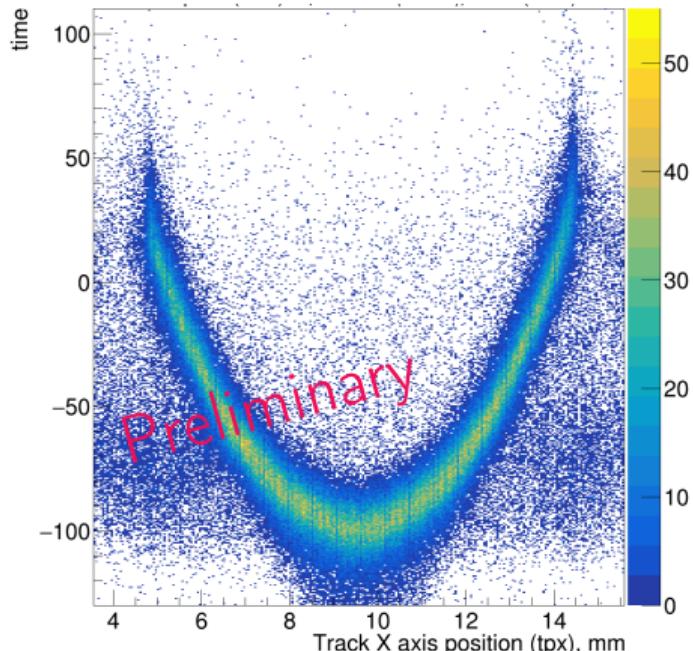


Тестовая установка состоит из:

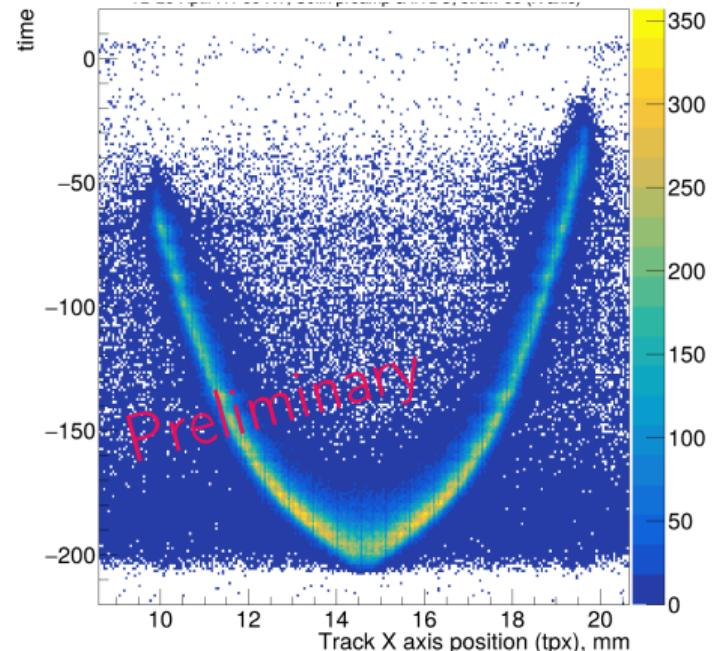
- 4 Сцинтиллятора
- 4 MicroMegas (с шагом $250\mu m$):
3 по оси X, 1 по оси Y
- Прототипы:
 - Малый прототип SPD ST (10мм)
 - Комбинированный прототип (20мм, 10мм & 5мм)
- TimePix 4 (размер пикселя $55\times 55 \mu m$)

Примеры зависимости времени дрейфа от положения трека R(T)

Апрель, STM-VMM (VMM3a based)



Апрель, A.Solin & NA64 readout

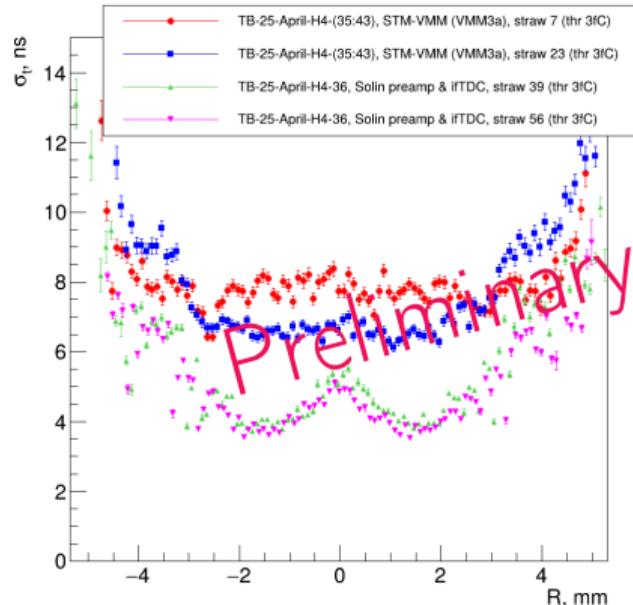


Временное разрешение

- Апрель, считывание STM-VMM, straw 7
(красные круглые маркеры)
- Апрель, считывание STM-VMM, straw 23
(синие квадратные маркеры)
- Апрель, считывание A.Solin & NA64, straw 39
(зеленые треугольные маркеры)
- Апрель, считывание A.Solin & NA64, straw 56
(фиолетовые треугольные маркеры)

При этом:

- Калибровки не завершены
- STM-VMM имеет больший peaking time
- Вычитание неопределенности определения t_0 не проводилось

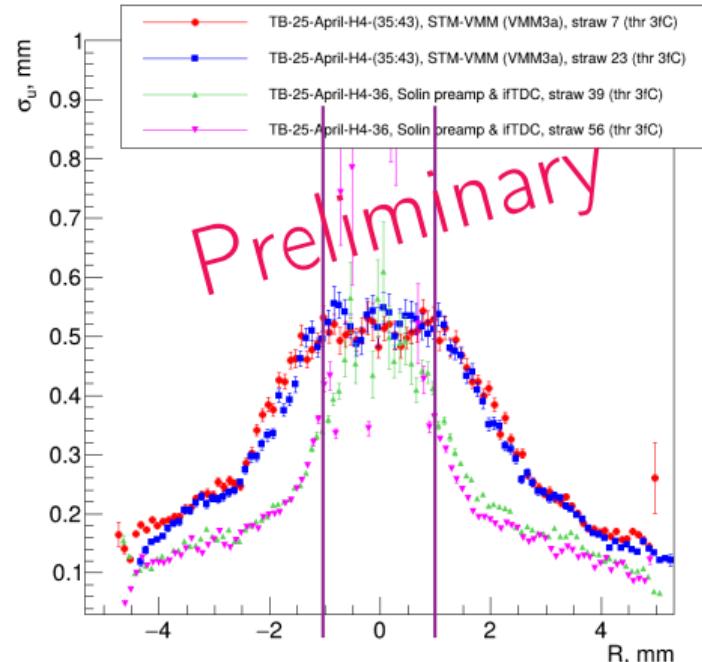


Пространственное разрешение

Предварительные результаты не учитывающие
конечное разрешение референсного трекера
(средневзвешенное с ошибками для области
 $\pm[1 - 5]$ mm)

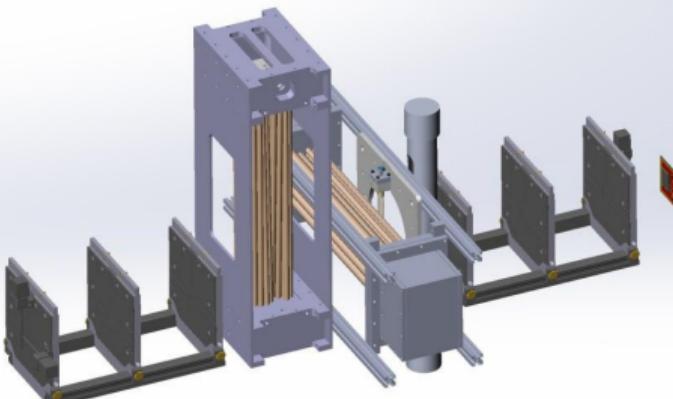
- Апрель, STM-VMM, straw 7: 260 μ m
- Апрель, STM-VMM, straw 23 260 μ m
- Апрель, A.Solin & NA64, straw 39: 190 μ m
- Апрель, A.Solin & NA64, straw 56: 160 μ m

We are working on understanding the major
contribution to large resolution



Тестовая установка, PS

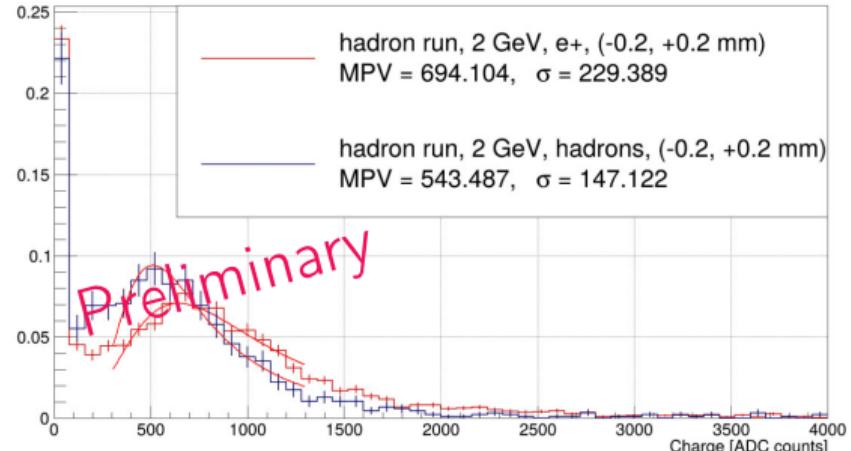
Тестовая установка состоит из:



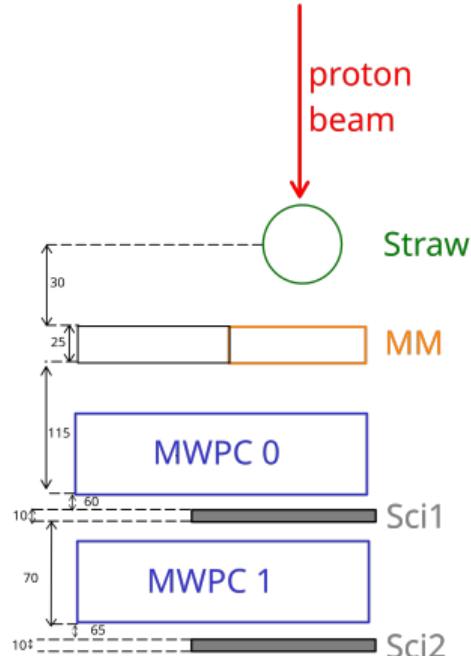
- Трекер AZALEA (полученное разрешение для частиц 2GeV – 70 μ m)
- Черенковский счетчик для выделения электронов
- Straw-трубки:
 - Отдельная трубка 10mm
 - Малый прототип SPD ST (10мм)
 - Комбинированный прототип (20мм, 10мм & 5мм)
- Измерение зарядового разрешения
 - Специальный усилитель со временем формирования 250ns (О.Н. Минко, ОИЯИ)
 - Пионы, позитроны 0.6, 1, 2 GeV/c
- Измерение пространственного разрешения
 - Считывающая электроника:
STM-VMM (VMM3a based), A.Solin & NA64 readout, ATLAS ASD
 - Пионы, 5 & 10 GeV/c

Первые результаты тестовых измерений на PS

- Специальный усилитель со временем формирования 250ns (О.Н. Минко, ОИЯИ)
- В качестве координаты использовалась только информация с TimePix 4
- Анализ продолжается



from S. Bulanova, X SPD Collaboration meeting, 20-23 октября 2025



Тестовая установка, СЦ-1000

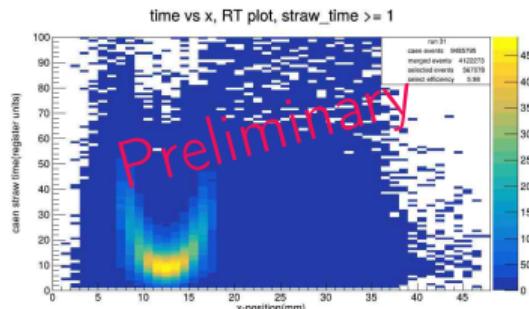
Тестовая установка состоит из:

- Straw-трубка:
 - Отдельная трубка 10mm
 - Специальный усилитель со временем формирования 250ns (О.Н. Минко, ОИЯИ)
- 1 MicroMegas (с шагом $400\mu m$)
- 2 MWPC (О.Е. Маев, А.А. Дзюба, А.Д. Чубыкин, А.А. Фетисов)
 - Шаг 1mm
 - Cross3 readout
 - Детальнее см. доклад О.Е. Маева
- Протоны $p = 0.45 - 1.7 \text{ GeV}/c$ ($E_k = 0.1 - 1 \text{ GeV}$)

Первые результаты тестовых измерений на СЦ-1000

- Производится работа по совмещению данных с трех систем считывания
- Анализ продолжается

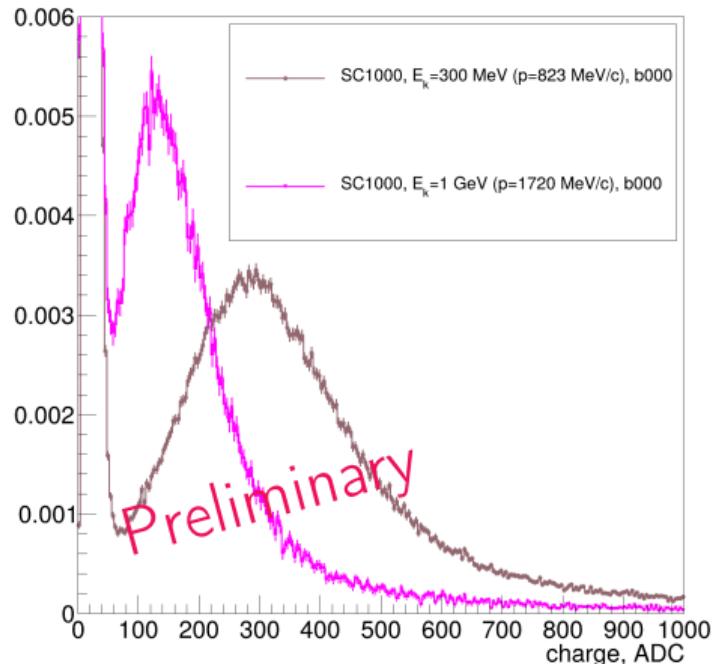
Зависимость времени дрейфа от проложения трека $R(T)$



Координата получена из данных MWPC (А.Д. Чубыкин)

Соснов Д.Е.,

Интегральные распределения заряда в трубке



from S. Bulanova, X SPD Collaboration meeting, 20-23 октября 2025

Участие ПИЯФ в SPD

25.12.2025

15 / 25



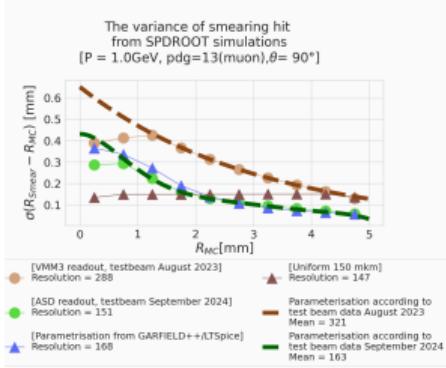
Моделирование реалистичного отклика straw

(С.А. Буланова, Е.О. Мосолова, А.А. Лазарев, А.В. Нартов)

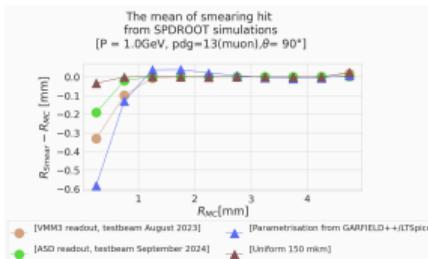


Текущая работа, связанная с моделированием реалистичного отклика straw-трубок:

- С помощью моделирования Garfield/LTSpice выполнена параметризация измеряемого времени дрейфа $t_{dr} = f(r, \theta)$.
Результаты моделирования учитывают влияние считывающей электроники на времеменное разрешение и хорошо согласуются с экспериментальными измерениями
- Полученная параметризация добавлена в SPDroot software, t_{dr} вместо R_{MC}
- В SPDroot добавлена реконструкция хитов трекера $R_{reco} = f(t_{dr})$



from E.Mosolova, IX SPD Collaboration meeting, 12-16 мая 2025



from E.Mosolova, IX SPD Collaboration meeting, 12-16 мая 2025



Моделирование реалистичного отклика straw

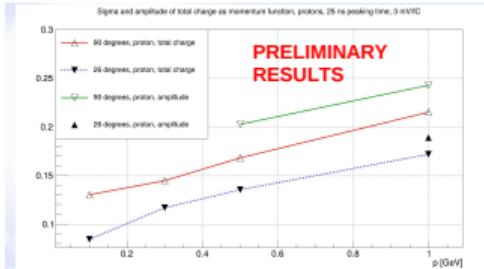
(С.А. Буланова, Е.О. Мосолова, А.А. Лазарев, А.В. Нартов)



Текущая работа, связанная с
моделированием реалистичного отклика
straw-трубок:

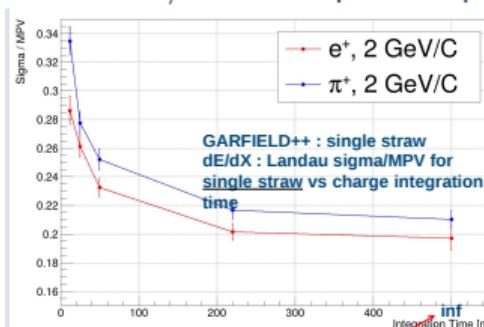
- Изучено влияния реалистичного динамического диапазона считывающей электроники на возможность Particle Identification для частиц с малыми импульсами

Зависимость Landau σ/MPV от импульса частицы



генератор: GARFIELD++; модель электроники: VMM3
from S. Bulanova, IX SPD Collaboration meeting, 12-16 мая 2025

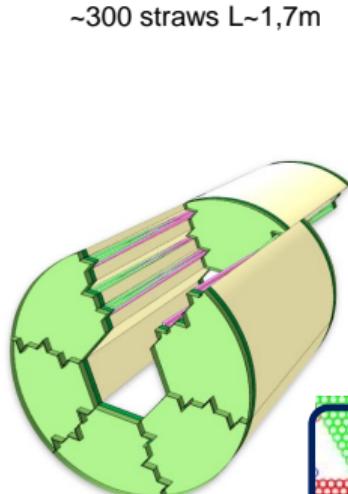
Зависимость Landau σ/MPV от времени формирования



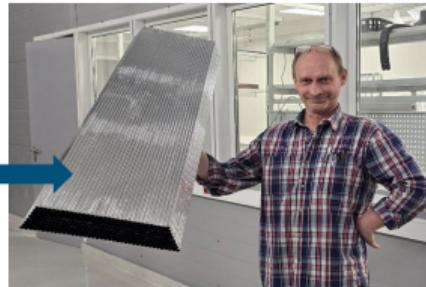
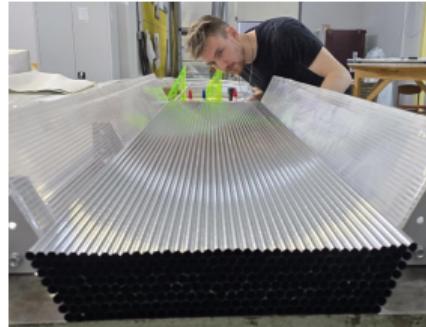
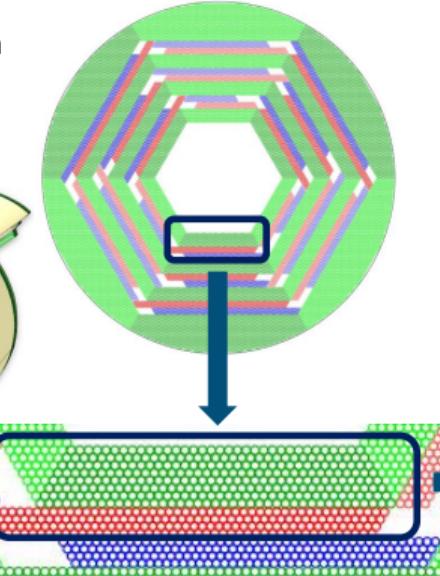
генератор: GARFIELD++
from S. Bulanova, X SPD Collaboration meeting, 20-23 октября 2025

Проведена отработка процедура сбора сегментов Straw-трекера (ЛФВЭ ОИЯИ)

Mockup



~300 straws L~1,7m



from T. Enik, IX SPD Collaboration meeting, 12-16 мая 2025



Доклады:

1. А.В. Зеленов, "Образование адронов и тетра-кварков с большими при энергиях NICA", 57-я Зимняя Школа ПИЯФ, Луга, 15-20 марта 2025
2. E.O. Mosolova, "Implementation of the straw tracker realistic simulation and straw hit reconstruction in SPDroot package", III International scientific school-conference "Atom. Science. Technology", Казахстан, г. Алматы, 16-18 апреля 2025
3. S.A. Bulanova, E.V. Kuznetsova, "Garfield++/LTSpice simulation of straw tube response for different readout electronics models of the SPD Straw Tracker", III International scientific school-conference "Atom. Science. Technology", Казахстан, г. Алматы, 16-18 апреля 2025
4. A.V. Zelenov, "Diquark role in large pT baryon and multiquark exotic state production with in pp- and dd-collisions", NUCLEUS-2025, Санкт-Петербург, 1-6 июля 2025
5. В.Т. Ким, "Nuclear Fluctons, QCD Structure Functions and Cumulative Processes", 13th BLTP JINR-ITP CAS Workshop on Physics of Strong Interacting Systems (PSIS-2025), Казахстан, г. Алматы, 17 - 22 августа 2025
6. В.Т. Ким, "Spin Physics Detector at NICA", 16th Int. School-Conference "Actual Problems of Microworld Physics", Беларусь, г. Минск, 24 - 31 августа 2025
7. A.V. Zelenov, "Diquark Role for Hadron Production with Large-pT in pp Collisions", International Conference on High Energy Physics (ICHEP-2025), Армения, г. Ереван, 29 сентября - 3 октября 2025
8. S.A. Bulanova, "Garfield/LTSpice studies of the straw tube time and charge resolution for various readout parameters", AYSS-2025, Дубна, 27-31 октября 2025



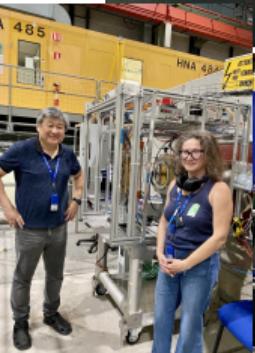
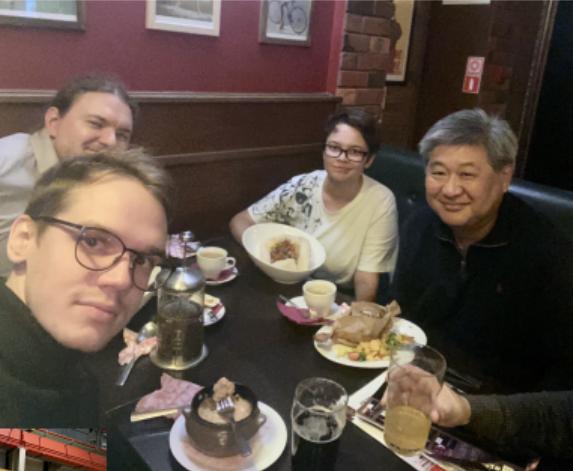
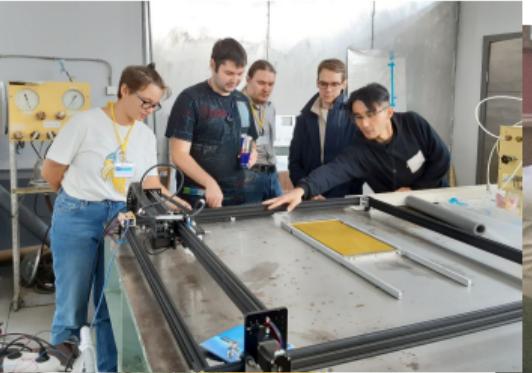
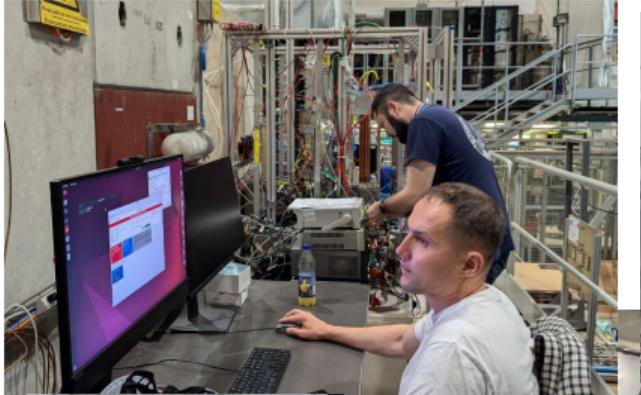
Доклады (SPD Collaboration Meetings):

1. S.A. Bulanova, "Garfield++/LTS spice studies of the straw time and charge resolution for different readout parameters", IX SPD Collaboration Meeting, Армения, г. Ереван, 12-16 мая 2025
2. E.O. Mosolova, "Update on realistic simulation and hit reconstruction for the Straw Tracker", IX SPD Collaboration Meeting, Армения, г. Ереван, 12-16 мая 2025
3. A.V. Zelenov, "Large- p_T production of baryons and tetraquarks at SPD NICA energies", IX SPD Collaboration Meeting, Армения, г. Ереван, 12-16 мая 2025
4. A.V. Zelenov, "Diquark role in large- p_T hadron production at SPD NICA energies", X SPD Collaboration Meeting, Дубна, 20-23 октября 2025
5. S.A. Bulanova, "Charge resolution with straw tubes – simulation studies and testbeam measurements", X SPD Collaboration Meeting, Дубна, 20-23 октября 2025



Публикации:

1. A. Mukhamejanova et al., "Garfield++/LTSpice for modelling response of Straw Tubes with custom readout", *J. Phys.: Conf. Ser.* **2984** (2025) 012020
doi:[10.1088/1742-6596/2984/1/012020](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2984/1/012020)
2. S. Bulanova, V. Bautin, E. Kuznetsova, "Garfield++/LTSpice simulation of straw tube response for different readout electronics models of the SPD Straw Tracker", *J. Phys.: Conf. Ser.* **3089** (2025) 012003 doi:[10.1088/1742-6596/3089/1/012003](https://doi.org/10.1088/1742-6596/3089/1/012003)
3. E. Mosolova, E. Kuznetsova, "Implementation of the straw tracker realistic simulation and straw hit reconstruction in SPDroot package", *J. Phys.: Conf. Ser.* **3089** (2025) 012004 doi:[10.1088/1742-6596/3089/1/012004](https://doi.org/10.1088/1742-6596/3089/1/012004)
4. V. Bautin et al., "Straw Tracker of the future Spin Physics Detector at NICA collider", *Proceedings of Science, Technology Instrumentation in Particle Physics - TIPP2023* (2025) 125. doi:[10.22323/1.468.0125](https://doi.org/10.22323/1.468.0125)
5. N. Azorsky et al., "Ultrasonic welding technology for straw trackers: from development to application", *Advances in Nuclear Science and Applications* 1 (2025) 3, 179
doi:[10.63907/ansa.v1i3.52](https://doi.org/10.63907/ansa.v1i3.52)
6. V. Bautin et al., "Ultrasonic welding technology for future Straw Trackers and performance studies with small-size tracker prototypes", *Nucl. Instrum. Meth. A* **1081** (2026) 170767 doi:[10.1016/j.nima.2025.170767](https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170767)







Выводы

Компьютинг

- Продолжена разработка концепции компьютеринга SPD, включающая ПИЯФ в качестве SPD TIER-1
- Продолжаются работы с прототипом SPD TIER-1 на базе ЦОД ПИК НИЦ КИ – ПИЯФ

Физика

- Получены оценки образование многокварковых адронных состояний (тетракварков) с большими p_T
- Продолжена работа по оценке роли дикварков с большими p_T при энергиях NICA

Straw-трекер

- Проведены изменения на тестовых пучках CERN SPS с имеющимися вариантами считающей электроники
- Проведены измерения пространственного и зарядового разрешения на тестовых пучках CERN PS
- Проведены измерения зарядового разрешения на НИЦ КИ – ПИЯФ СЦ-1000 с целью изучения возможности идентификации частиц по dE/dx

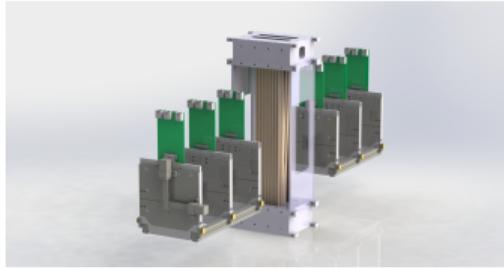
Спасибо за внимание!

И счастливого нового года!



Backup slides

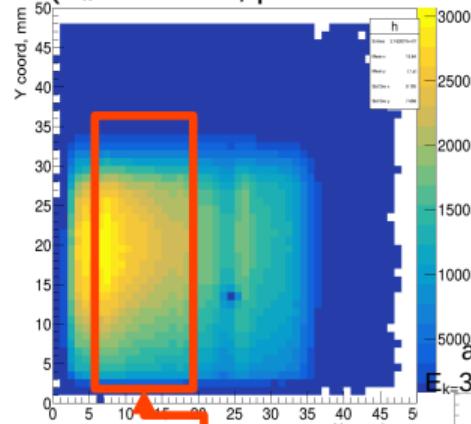
Трекер AZALEA



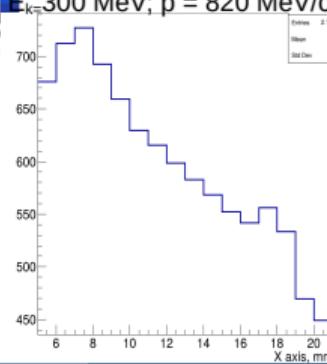
- AZALEA: The AIDA-2020 Zero-suppressed Acquisition Located at the East-Area telescope (разработан в рамках проекта EUDET)
- Состоит из:
 - 6 плоскостей с сенсорами MIMOSA 26 (размер пикселя $18.4\mu\text{m}$)
 - FEI4 Si плоскость (использовалось в качестве триггер)
 - Trigger Logic Unit (TLU)
- Разрешение трекера: до $\sim 5\mu\text{m}$



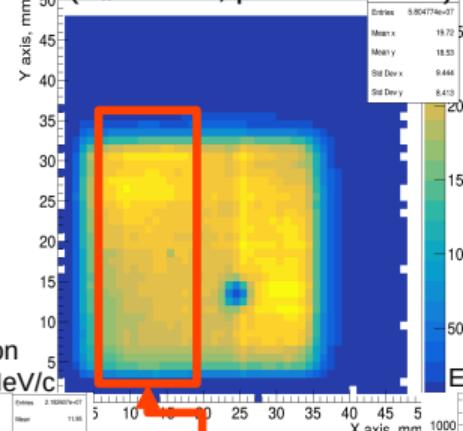
beam profile
($E_k = 300$ MeV; $p = 820$ MeV/c)



Beam profile
around straw position
 $E_k = 300 \text{ MeV}$; $p = 820 \text{ MeV}/c$



beam profile
($E_k=1$ GeV; $p = 1.7$ GeV/c)



Beam profile
around straw position
1 GeV; $p = 1.7$ GeV/c

