



## Участие ПИЯФ в SPD

*Соснов Д.Е.*  
ЛФЭЧ ОФВЭ

25.12.2025



## Физика: \*

- Экзотические резонансы
- Дикварки и т.п.
- Одиночные спиновые асимметрии, поперечная поляризация
- Многопартонные взаимодействия

## Straw-трекер \*\*

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

- R&D считывающей 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. \*\*

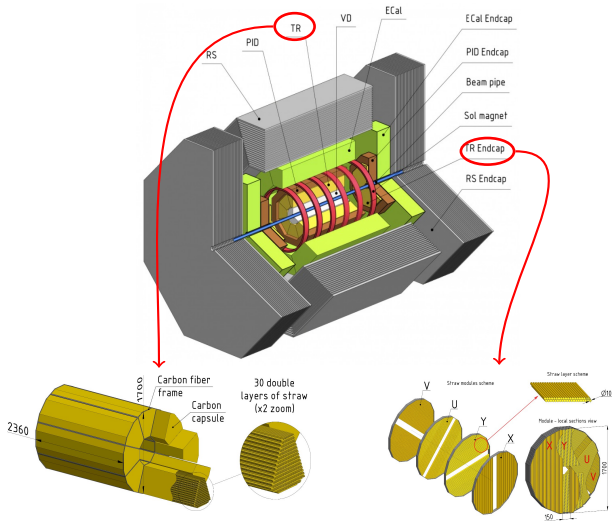


## Основные направления физических задач SPD:

- 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 ионизационным потерям энергии
- Straw-трекер:  $\sim 20$  тыс. straw-трубок диаметром 10мм в барельной части (ultra-sonic welding) и  $\sim 4$  тыс в End-Cap (winded straw)



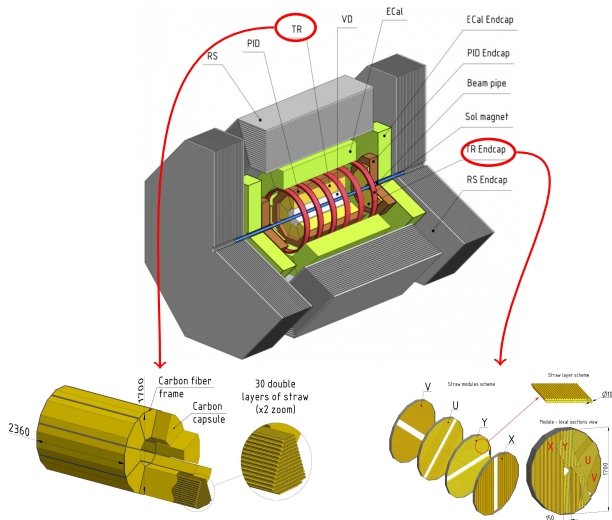
from Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA



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

- Определение требований к считывающей электронике
- Изучение существующих ASIC<sup>a</sup> потенциально подходящих для считывания сигналов со straw-трубок:
  - Измерение пространственного разрешения straw-трубок
  - Измерение зарядового разрешения

<sup>a</sup>ASIC – 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  
( $e/\pi$ ons,  $p = 300 - 5000 \text{ MeV}/c$ )

### 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  
параметров считывающей 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

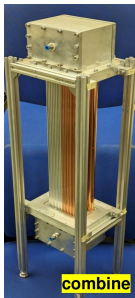
Основная цель: получение наилучшего возможного  
зарядового разрешения

6–13 августа, 12–19 ноября:

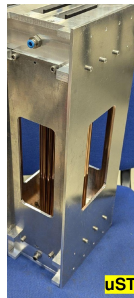
- Отдельная straw-трубка со специальным усилителем, со временем формирования 250ns (О.Н. Минко, ОИЯИ)
- Трекер AZALEA, TimePix 4

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:  $2^\circ$
  - 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  $\sim 1$ ns

### STM-VMM

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

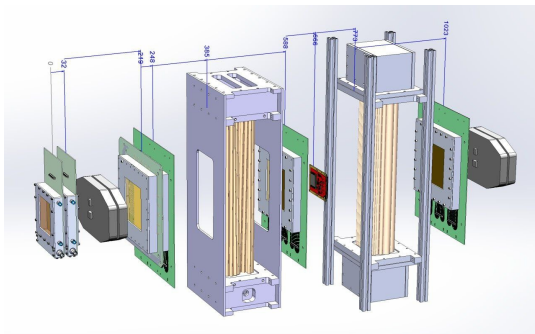
- Зависание в режиме “time-at-threshold”
- Проблема в оцифровке tdo и pdo

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  $\sim 200 - 400$ ps

## Тестовая установка на SPS



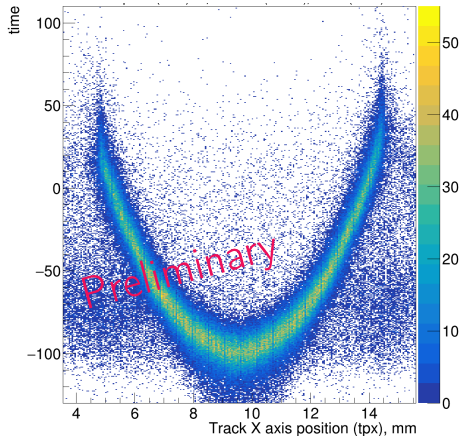
Тестовая установка состоит из:

- 4 Сцинтиллятора
- 4 MicroMegs (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  $55 \times 55 \mu m$ )

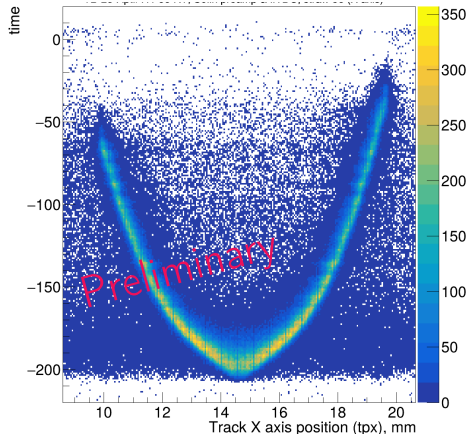


## Примеры зависимости времени дрейфа от проложения трека R(T)

Апрель, STM-VMM (VMM3a based)



Апрель, A.Solin & NA64 readout



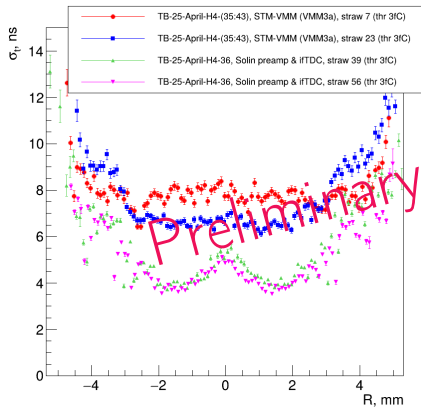


## Временное разрешение

- 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 большой peaking time
- Вычитание неопределенности определения  $t_0$  не проводилось

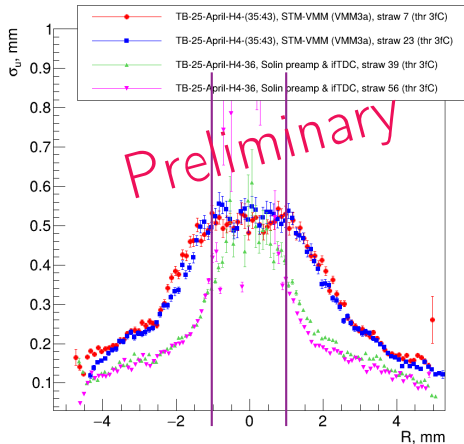




Пространственное разрешение  
Предварительные результаты не учитывающие  
конечное разрешение референсного трекера  
(средневзвешенное с ошибками для области  
 $\pm[1 - 5]$  mm)

- Апрель, STM-VMM, straw 7: 260  $\mu\text{m}$
- Апрель, STM-VMM, straw 23 260  $\mu\text{m}$
- Апрель, A.Solin & NA64, straw 39: 190  $\mu\text{m}$
- Апрель, A.Solin & NA64, straw 56: 160  $\mu\text{m}$

We are working on understanding the major  
contribution to large resolution

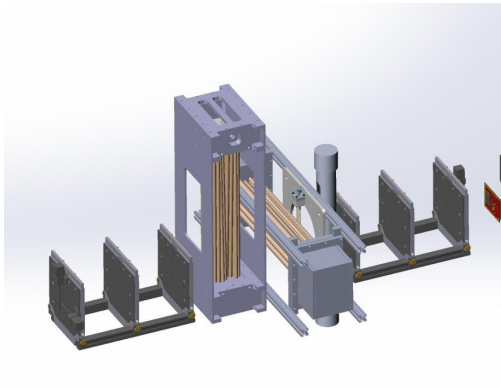




## Тестовая установка, PS

Тестовая установка состоит из:

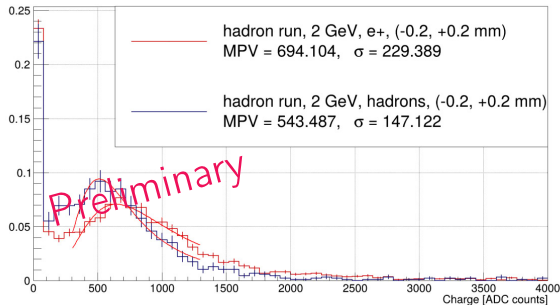
- Трекер AZALEA (полученное разрешение для частиц 2GeV – 70  $\mu m$ )
- Черенковский счетчик для выделения электронов
- Straw-трубки:
  - Отдельная трубка 10mm
  - Малый прототип SPD ST (10mm)
  - Комбинированный прототип (20mm, 10mm & 5mm)
- Измерение зарядового разрешения
  - Специальный усилитель 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



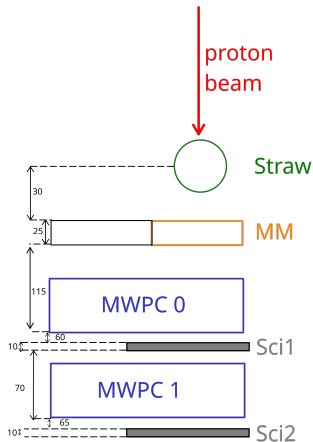


## Первые результаты тестовых измерений на PS

- 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

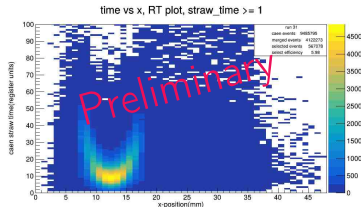
Тестовая установка состоит из:

- 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

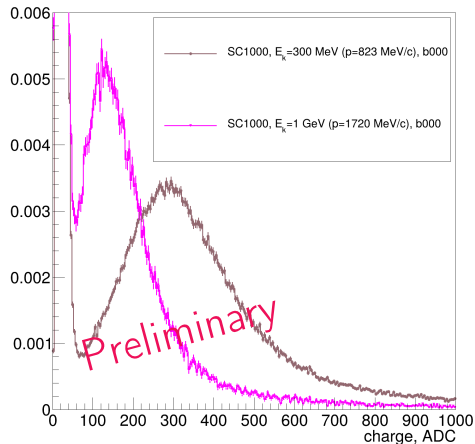
- Производится работа по совмещению данных с трех систем считывания
- Анализ продолжается

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



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

Интегральные распределения заряда в трубке

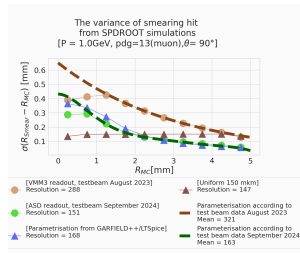


from S. Bulanova, X SPD Collaboration meeting, 20-23 октября 2025

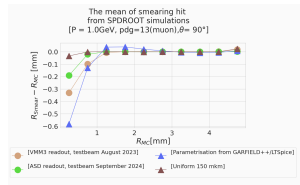


## Текущая работа, связанная с моделированием реалистичного отклика straw-трубок:

- С помощью моделирования Garfield/LTSpice выполнена параметризация измеряемого времени дрейфа  $t_{dr} = f(r, \theta)$ .  
Результаты моделирования учитывают влияние считывающей электроники на временное 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



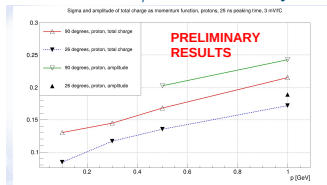
from E.Mosolova, IX SPD Collaboration meeting, 12-16 мая 2025



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

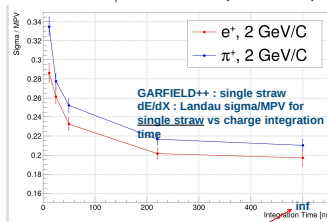
- Изучено влияния реалистичного динамического диапазона считывающей электроники на возможность Particle Identification для частиц с малыми импульсами

## Зависимость Landau $\sigma/MPV$ от импульса частицы



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

## Зависимость Landau $\sigma/MPV$ от времени формирования

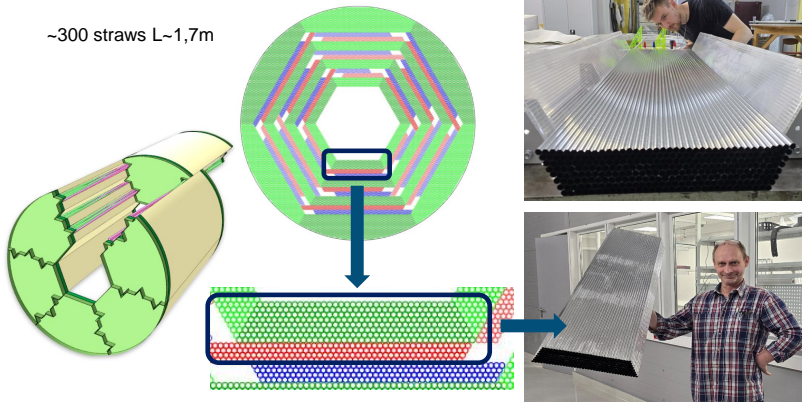


генератор: GARFIELD++  
from S. Bulanova, X SPD Collaboration meeting, 20-23 октября 2025



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

## Mockup



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



### Доклады:

1. А.В. Зеленов, "Образование адронов и тетра-кварков с большими  $p_T$  при энергиях NICA", 57-я Зимняя Школа ПИЯФ, Луга, 15-20 марта 2025
2. Е.О. 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++/LTSpipe 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  $p_T$  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- $p_T$  in  $pp$  Collisions", International Conference on High Energy Physics (ICHEP-2025), Армения, г. Ереван, 29 сентября - 3 октября 2025
8. S.A. Bulanova, "Garfield/LTSpipe studies of the straw tube time and charge resolution for various readout parameters", AYSS-2025, Дубна, 27-31 октября 2025





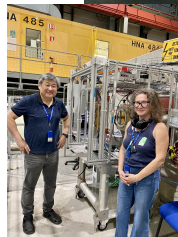
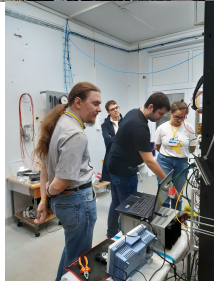
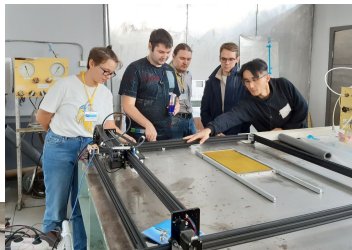
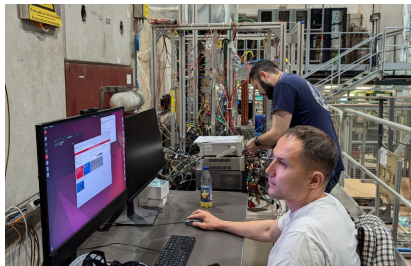
### Доклады (SPD Collaboration Meetings):

1. S.A. Bulanova, "Garfield++/LTSpipe 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 образования 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 считывающей 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  $dE/dx$

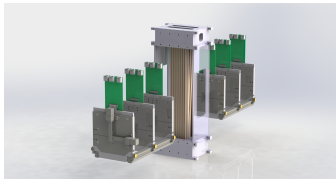
**Спасибо за внимание!**

**И счастливого нового года!**



Backup slides

## Трекер AZALEA

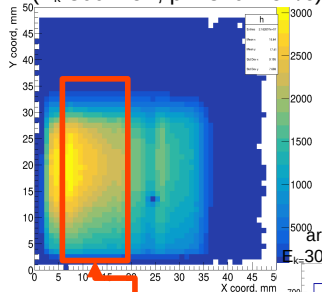


- AZALEA: The AIDA-2020 Zero-suppressed Acquisition Located at the East-Area telescope (разработан в рамках проекта EUDET)
- Состоит из:
  - 6 плоскостей с сенсорами MIMOSA 26 (размер пикселя  $18.4\mu\text{m}$ )
  - FEI4 Si плоскость (использовалось в качестве триггер)
  - Trigger Logic Unit (TLU)
-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



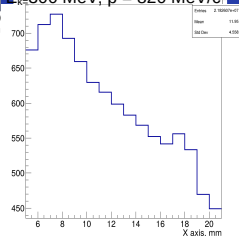


beam profile  
( $E_k=300$  MeV;  $p = 820$  MeV/c)

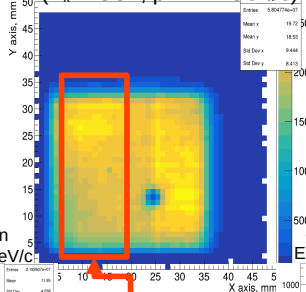


Straw position

Beam profile  
around straw position  
 $E_k=300$  MeV;  $p = 820$  MeV/c



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



Straw position

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

