

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)  
Институт Ядерной Физики и Технологий  
Кафедра №40 «Физика элементарных частиц и космологии»

УДК 539.166.3

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СВЕТОВОХОДА  
МАТЕРИАЛА ТАЙЛОВ ДЕТЕКТОРА ВВС SPD**

Научный руководитель,  
старший преподаватель

\_\_\_\_\_ Ф. А. Дубинин

Студент

\_\_\_\_\_ А. В. Золотаревский

Москва 2026

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Эксперимент SPD</b>	<b>3</b>
1.1 Детекторы в рамках эксперимента SPD . . . . .	4
1.1.1 Детектор Beam-Beam Counter . . . . .	5
1.2 Цель и задачи . . . . .	6
1.3 Методика эксперимента . . . . .	6
1.3.1 Установка для измерения разрешения детектора . . . . .	7
<b>2 Представление результатов</b>	<b>8</b>
2.1 Измерение зарядовых спектров $^{137}\text{Cs}$ . . . . .	8
2.2 Обработка экспериментальных данных . . . . .	9
2.2.1 Фитирование гистограмм . . . . .	9
2.2.2 Расчёт значений относительного световыхода и энергетического разрешения . . . . .	10
<b>3 Заключение</b>	<b>10</b>

# Введение

NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) – современный ускорительный комплекс, организованный на базе Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна, Россия) для изучения спиновой структуры протона и дейтрона. На ускорителе предполагается наличие двух точек столкновения пучков заряженных частиц, в одной из которых планируется установка детектора SPD. Исследование спиновых эффектов на установке SPD в рамках проекта NICA позволит получить более глубокое понимание спиновой структуры нуклона.



Рис. 1: Схема коллайдера NICA

## 1 Эксперимент SPD

Spin Physics Detector (SPD) представляет собой универсальную установку, предназначенную для изучения спиновой структуры нуклонов. Её ключевая особенность — использование столкновений поляризованных пучков протонов и дейтронов.

Согласно современным представлениям, спин нуклона складывается из спинов и орбитальных моментов кварков и глюонов. Вклад кварков был измерен в экспериментах HERMES (DESY) и COMPASS (CERN), тогда как данные о глюонной компоненте остаются малоисследованными.

Основная задача эксперимента SPD — исследование поляризованной глюонной составляющей нуклона. Установка рассчитана на работу с поляризованными пучками при энергии до 27 ГэВ в системе центра масс, частоте столкновений 3 МГц и потока, достигающего значения  $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  [1]. Эксперимент будет проходить в два этапа. Первый этап, рассчитанный не более чем на два года, сосредоточится на изучении поляризованных и неполяризованных процессов в низкоэнергетических столкновениях. В этот период будут использоваться пучки тяжелых ионов, а также поляризованных протонов и дейтронов с пониженной светимостью (исследования упругого pp- и dd-рассеяния).

Второй, основной этап, запланированный на 2030 год, будет посвящен целенаправленному исследованию поляризованных глюонов в протонах и дейтронах. Эксперимент SPD должен перекрыть промежуток в энергиях, незатронутый предыдущими экспериментами в области физики частиц.

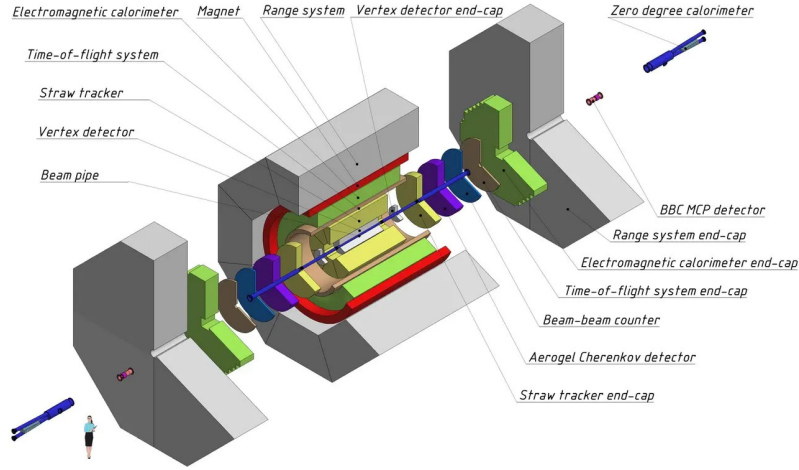


Рис. 2: Детекторная система SPD

## 1.1 Детекторы в рамках эксперимента SPD

Эксперимент SPD представляет собой комплекс детекторных систем, направленных на измерение различных параметров исследуемого пучка. В него входят: Кремниевый вершинный детектор (VD), обеспечивающий разрешение положения первичной вершины на уровне менее 100 мкм. Система отслеживания на основе straw-трубок (ST), размещенная в соленоидальном магнитном поле величиной до 1 Тл на оси детектора, которая должна обеспечить разрешение по поперечному импульсу  $\sigma(p_T)/p_T \approx 2\%$  для импульса частицы 1 ГэВ/с. Система измерения времени пролета (PID) с временным разрешением около 60 пс, которая обеспечит разделение величиной  $3\sigma$  для  $\pi$ - и К-мезонов и К-мезонов/протонов до примерно 1.2 ГэВ/с и 2.2 ГэВ/с соответственно. Возможное использование черенковского детектора на основе аэрогеля может расширить этот диапазон. Обнаружение фотонов будет обеспечиваться электромагнитным калориметром (ECal) с энергетическим разрешением  $\sim 5\%/\sqrt{E}$ . Чтобы минимизировать эффекты многократного рассеяния и поглощения фотонов, толщина материала детектора будет сведена к минимуму во всей внутренней части детектора. Для идентификации мюонов планируется использовать мюонную систему (RS). Пара счетчиков столкновения пучков (BBC) и калориметров нулевого угла будут отвечать за локальную поляриметрию и контроль светимости [2].

### 1.1.1 Детектор Beam-Beam Counter

Одной из подсистем SPD являются два детектора Beam-Beam Counter (BBC), которые будут установлены симметрично относительно точки взаимодействия. Основная цель BBC — постоянный мониторинг поляризации пучка с использованием азимутальной асимметрии выхода заряженных частиц, а также мониторинг столкновений пучков. Детектор включает в себя совокупность 16 секторов, каждый из которых состоит из 26 тайлов, представляющих собой пластиковые (polystyrene Styrolution 124N – 98.0-98.5%, p-Terphenyl (CAS 92-94-4) – 1.5-2.0%, POPOP (CAS 1806-34-4) – 0.01-0.04%) сцинтилляторы трапециевидной формы (рис. 3) [3].

Для сбора света из тайлов используется спектросмещающее оптоволоконно (WLS) - оптическое волокно с добавкой, смещающей собираемый волокном свет в длинноволновую область. WLS укладывается внутри тайла в 3 витка. Через него свет поступает в классическое оптоволоконно, а далее – на кремниевый фотоумножитель (SiPM), который формирует сигнал, поступающий в систему предварительной обработки данных CAEN FERS-5200.

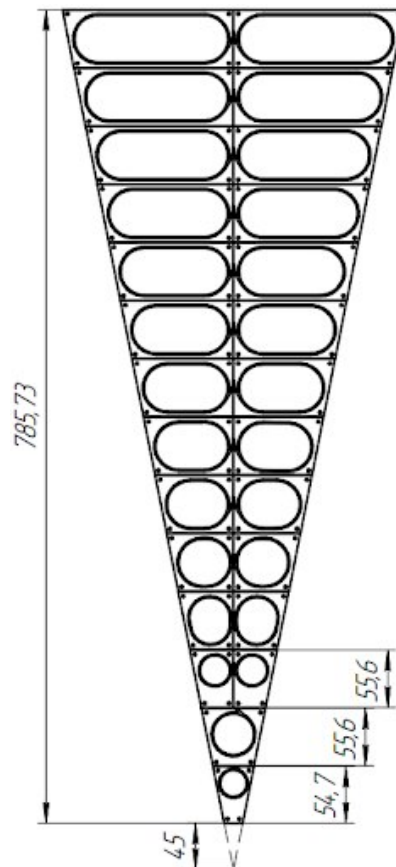


Рис. 3: Сектор детектора BBC

## 1.2 Цель и задачи

Целью работы является измерение световыхода материала тайлов детектора BBC SPD относительно эталонного образца сцинтиллятора NaI(Tl). Измерение этой величины необходимо для её добавления в физическую модель тайла детектора BBC SPD и сравнения данных моделирования с экспериментальными данными.

Задачи:

1. Провести измерения зарядового спектра  $^{137}\text{Cs}$  для двух образцов: исследуемого пластикового сцинтиллятора и эталонного неорганического сцинтиллятора.
2. Произвести обработку экспериментальных данных и рассчитать относительный световыход исследуемого сцинтиллятора
3. Рассчитать разрешение детектора

## 1.3 Методика эксперимента

Экспериментальная установка состоит из ФЭУ модели GoHi N4021, двух сцинтилляторов – заранее подготовленного образца пластикового сцинтиллятора тайла (polystyrene Styrolution 124N – 98.0-98.5%, p-Terphenyl (CAS 92-94-4) – 1.5-2.0%, POPOP (CAS 1806-34-4) – 0.01-0.04%) и неорганического сцинтиллятора NaI(Tl), источника высокого напряжения и осциллографа Teledyne LeCroy Waverunner 620zi, выполняющего роль анализатора импульсов. Настройка параметров считывания и обработки сигнала, а так же накопление зарядовых спектров осуществляется непосредственно на осциллографе (рис. 4).

Исследуемый образец представляет собой вырезанный из тайла детектора цилиндр. Одно из его оснований через оптическую смазку соприкасается с ФЭУ, а второе основание и боковая поверхность покрыты белой акриловой краской для улучшения светосбора и изоляции от внешних источников света.

Выбор NaI(Tl) в качестве опорного сцинтиллятора обусловлен близким значением максимума его спектра эмиссии ( $\approx 415$  нм) к максимуму спектра эмиссии исследуемого сцинтиллятора из полистирола ( $\approx 430$  нм)

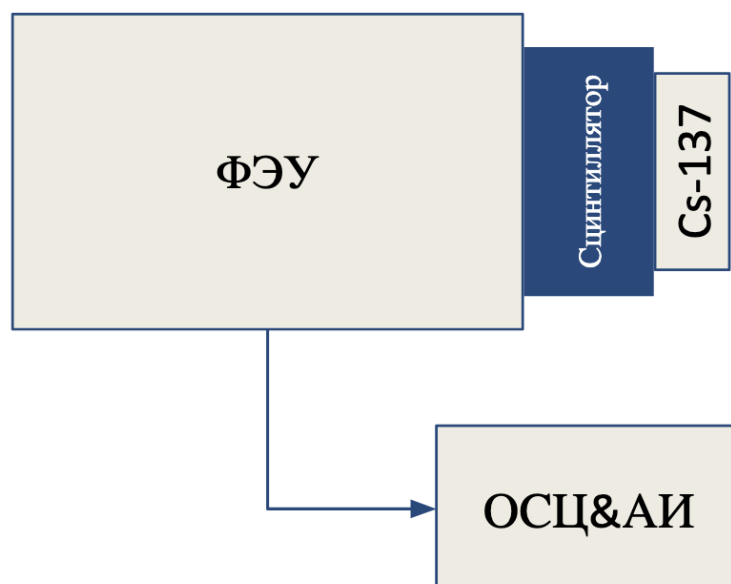


Рис. 4: Схема экспериментальной установки

### 1.3.1 Установка для измерения разрешения детектора

В работе так же рассчитывается энергетическое разрешение детектора. Для этого проводятся измерения на установке (рис. 5, аналогичной п. 1.3., с добавлением к установке ещё одного ФЭУ как показано на рисунке, так, чтобы измерения на обоих сцинтилляторах происходили параллельно. Схема совпадений настроена таким образом, чтобы регистрировать импульсы, приходящие в оба сцинтиллятора, т.е. такие  $\gamma$ -кванты, которые, рассеявшись на пластиковом сцинтиллятора, поглотились в NaI(Tl)

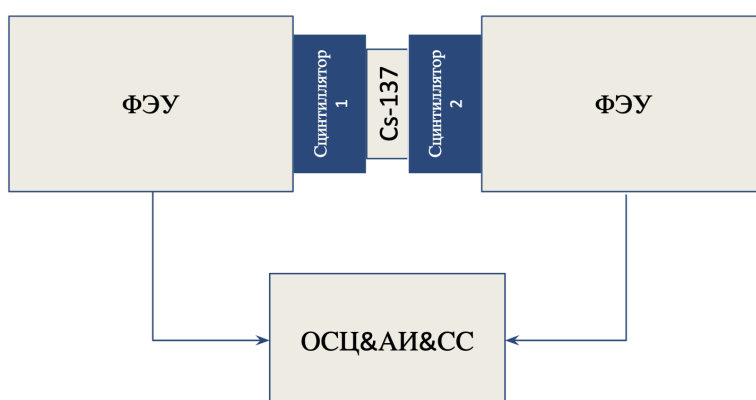


Рис. 5: Схема установки со схемой совпадений

## 2 Представление результатов

### 2.1 Измерение зарядовых спектров $^{137}\text{Cs}$

С помощью описанной в п. 1.3 экспериментальной установки последовательно для исследуемого и опорного сцинтилляторов измерен зарядовый спектр импульсов, приходящих от установленного вплотную к сцинтиллятору источника  $^{137}\text{Cs}$ . Гистограммы спектров, полученных в результате измерений, приведены на рис. 6 и 7.

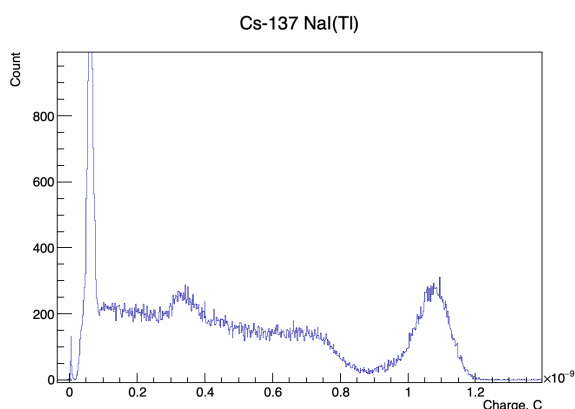


Рис. 6: Зарядовый спектр  $^{137}\text{Cs}$  на сцинтилляторе NaI(Tl)

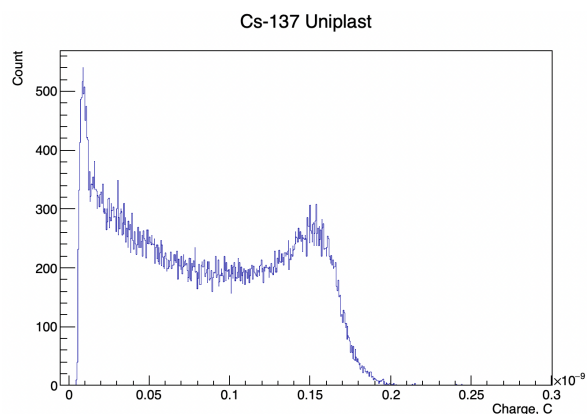


Рис. 7: Зарядовый спектр  $^{137}\text{Cs}$  на пластиковом сцинтилляторе

Так же с использованием установки для измерения энергетического разрешения (п. 1.3.1), измерены зарядовые спектры импульсов, приходящих на ФЭУ согласно описанной в том же пункте схеме совпадений. Гистограмма спектра, полученного в результате измерений для NaI(Tl) приведена на рис. 8 и 9

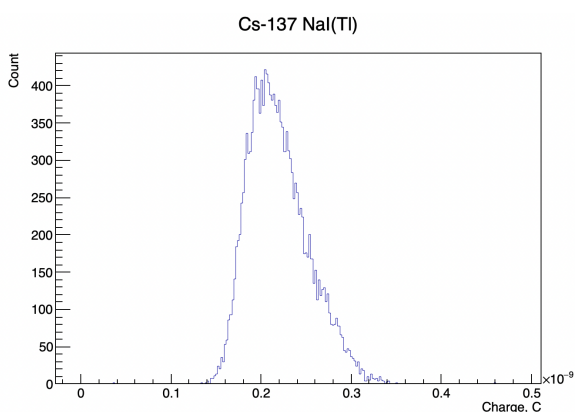


Рис. 8: Зарядовый спектр  $^{137}\text{Cs}$  на сцинтилляторе NaI(Tl) со схемой совпадений

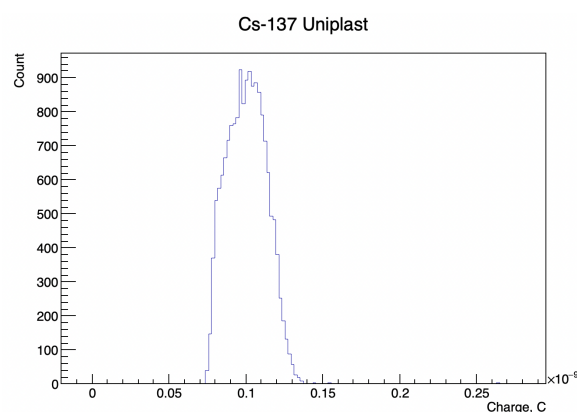


Рис. 9: Зарядовый спектр  $^{137}\text{Cs}$  на пластиковом сцинтилляторе со схемой совпадений

## 2.2 Обработка экспериментальных данных

### 2.2.1 Фитирование гистограмм

Полученные гистограммы зарядовых спектров с помощью пакета CERN Root были фитированы функцией Гаусса. На гистограмме, представленной на рис. 6, проведен фит пика, соответствующего пику обратного рассеяния. На гистограмме из рис. 7 проведен фит комптоновского края. Результаты фитирования представлены на рис. 10, 11, 12

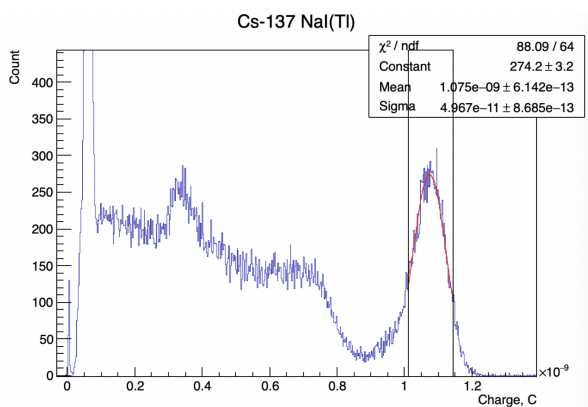


Рис. 10: Зарядовый спектр  $^{137}\text{Cs}$  на сцинтиляторе NaI(Tl) с фитированием

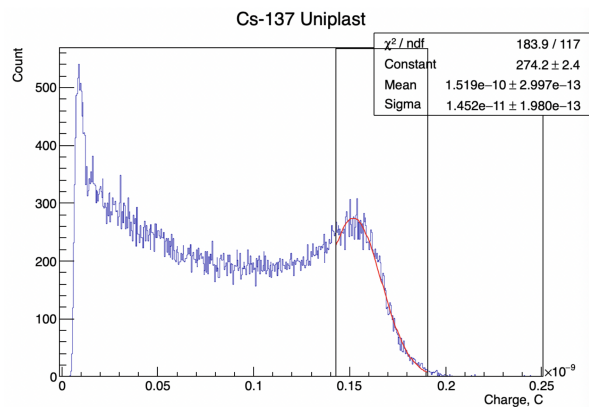


Рис. 11: Зарядовый спектр  $^{137}\text{Cs}$  на пластиковом сцинтиляторе с фитированием

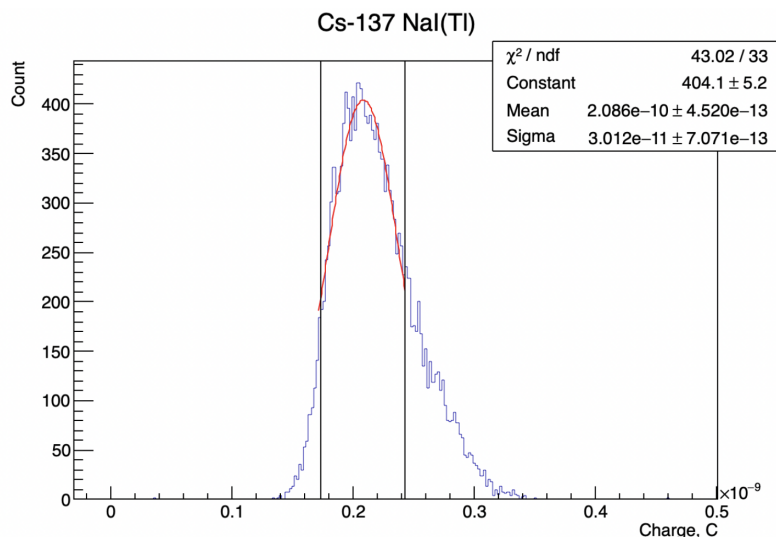


Рис. 12: Зарядовый  $^{137}\text{Cs}$  на сцинтиляторе NaI(Tl) со схемой совпадений с фитированием

### 2.2.2 Расчёт значений относительного световыхода и энергетического разрешения

По данным, полученным в результате фитирования, рассчитано значение относительного световыхода

$$RLY = \frac{N_{uniplast}}{N_{NaI(Tl)}} \cdot \frac{662}{478} \approx 0.19$$

А так же энергетического разрешения детектора

$$\delta = 2.35 \cdot \frac{\sigma}{A} \approx 0.34$$

## 3 Заключение

В ходе работы из части тайла детектора проведена подготовка образца для измерений. После настройки параметров отображения и регистрации сигналов на осциллографе измерены зарядовые спектры для конфигураций со схемой совпадений и без неё. Полученные гистограммы спектров фитированы функцией Гаусса и по экспериментальным данным вычислены относительный световыход и энергетическое разрешение детектора:

$$RLY \approx 0.19$$

$$\delta \approx 0.34$$

Полученные значения будут использованы в моделировании тайла детектора BBC SPD и согласовании его результатов с экспериментальными данными

## Список литературы

- [1] Abazov V. et al. Technical design report of the spin physics detector at nica. *Natural Science Review*, 1(1):1, 2025.
- [2] V. M. Abazov et al. Conceptual design of the spin physics detector. *Natural Science Review*, Jan 2021.
- [3] A. V. Tishevsky, F. A. Dubinin, et al. Development of the spd beam-beam counter scintillation detector prototype with fers-5200 front-end readout system. *Physics of Atomic Nuclei*, 87(4):451–458, 2024.