

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
**КАЛИБРОВКА ШКАЛЫ КАНАЛА
ДЕТЕКТОРА BBC SPD**

Научный руководитель,
старший преподаватель

_____ Ф. А. Дубинин

Студент

_____ А. В. Золотаревский

Москва 2025

Содержание

Введение	3
1 Эксперимент SPD	3
1.1 Детекторы в рамках эксперимента SPD	4
1.1.1 Детектор Beam-Beam Counter	5
1.2 Система CAEN FERS-5200	6
1.3 Цель и задачи	6
1.3.1 Метод калибровки шкалы детектора, основанный на анализе спектра β -частиц	7
1.3.2 Установка для снятия амплитудного спектра NaCl	8
2 Представление результатов	9
2.1 Получение активированного ^{38}Cl	9
3 Заключение	11

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 и иных спиновых эффектов. 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.

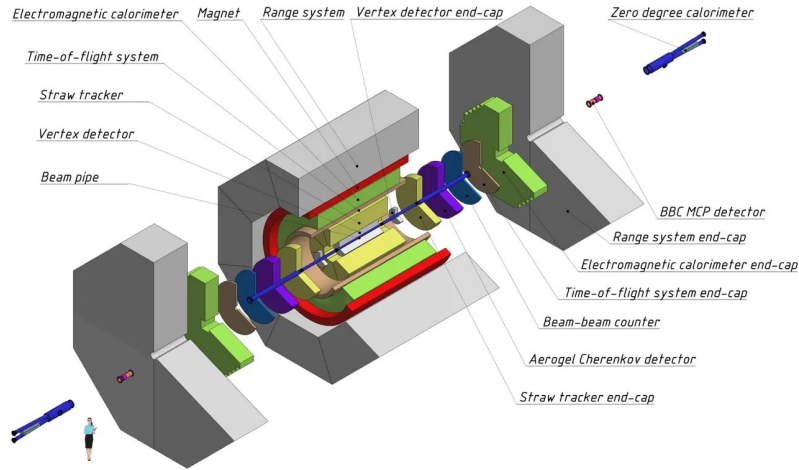


Рис. 2: Детекторная система SPD

1.1 Детекторы в рамках эксперимента SPD

Эксперимент SPD представляет собой комплекс детекторных систем, направленных на измерение различных параметров исследуемого пучка.

Кремниевый вершинный детектор (VD) обеспечит разрешение положения первичной вершины на уровне менее 100 мкм, необходимое для реконструкции вторичных вершин распадов D-мезонов. Система отслеживания на основе straw-трубок (ST), размещенная в соленоидальном магнитном поле величиной до 1 Тл на оси детектора, 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 обеспечит разделение величиной 3σ для π - и K-мезонов и K-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 сведено 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 поляризиметрию 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 представляет собой 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 трапецевидной формы (рис. 3) [3].

Для сбора света из тайлов используется спектросмещающее оптоволокно (WLS) - оптическое волокно с добавкой, благодаря которой оно способно захватить свет боковой поверхностью. WLS укладывается внутри тайла в 3 витка. Через него свет поступает в классическое оптоволокно, а далее – на кремниевый фотоумножитель (SiPM), который формирует сигнал, поступающий в систему предварительной обработки данных CAEN FERS-5200.

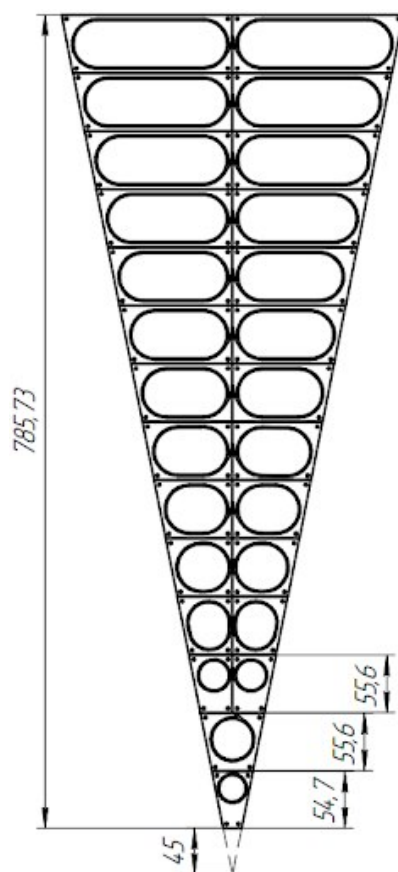


Рис. 3: Сектор детектора BBC

1.2 Система CAEN FERS-5200

CAEN FERS-5200 – система предварительной обработки данных, которая используется в экспериментальной физике для сбора данных с большого массива детекторов. Основной данной системы является микросхема Citiroc-1A [4]. Основная плата FERS-5200 содержит вывод для 64 каналов, предназначенных для подключения SiPM, а также включает в себя электронику для предварительной обработки сигнала, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), триггерную логику, синхронизацию, локальную память и интерфейс считывания данных. Каждый канал интерфейса считывания данных состоит из предусилителя и двух формирователей сигнала: Slow Shaper с детектором пиковых значений и Fast Shaper, за которым следует дискриминатор. Устройство способно определять время прихода сигналов и длительность превышения порога сигналом (Time over Threshold), что позволяет оценить амплитуду сигнала и получить амплитудный спектр.



Рис. 4: CAEN FERS-5200

1.3 Цель и задачи

Целью работы является исследование возможности применения изотопа ^{38}Cl для калибровки отклика тайлов детектора BBC SPD. Необходимость калибровки обусловлена двумя основными причинами.

Во-первых, параллельно с проведением эксперимента будет проводиться его компьютерное моделирование. Для того, чтобы соотносить и сравнивать результаты эксперимента и полученной модели, необходимо привести экспериментальные данные к удобному для анализа виду, сопоставив каналы детектора с количеством фотоэлектронов.

Во-вторых, в тайлах, расположенных в первом ряду сектора (ближе всего к пучку) возможно наблюдение пролёта сразу двух частиц. Для фиксации этого события, необходимо идентифицировать пик, соответствующий двум выбитым из ячеек фотоэлектронам, что требует калибровки шкалы.

Задачи:

1. Произвести расчёт наработанного в результате облучения нейтронным источником количества выбранного изотопа ^{38}Cl
2. Провести измерения с данным изотопом, проанализировать возможность его использования для калибровки отклика тайлов.

1.3.1 Метод калибровки шкалы детектора, основанный на анализе спектра β -частиц

Метод основывается на исследовании спектра β -частиц, регистрируемых от соли NaCl , содержащей активированный ^{38}Cl , с помощью тайла. Идея заключается в получении β -активных атомов хлора ^{38}Cl в молекуле NaCl из ^{37}Cl путём облучения соли нейтронами. Данный изотоп выбран ввиду того, что ^{38}Cl имеет в своём β -спектре электроны вплоть до 5 МэВ (рис. 5) и характеризуется периодом полураспада $T_{1/2} = 37.2$ мин, что является приемлемым для данного метода. Необходимость наличия в спектре электронов энергией выше 3 МэВ обуславливается наличием ионизационных потерь при прохождении электрона через вещество сцинтиллятора, которые можно оценить по формуле:

$$\frac{dE}{dx} = 2\rho \text{ МэВ/см}$$

В качестве источника нейтронов выбрана установка, основанная на изотопе ^{252}Cf , характеризующаяся полным потоком 10^5 быстрых нейтронов в секунду в телесный угол 4π ср. На расстоянии 5 см от источника, находящегося под слоем замедлителя нейтронов (полиэтилена), установлена упаковка NaCl массой 1 кг и размерами 15.0x5.5x8.5 см. Поверхностная плотность потока нейтронов на заданном расстоянии равна:

$$F = \frac{\Phi}{4\pi R^2}, \quad (1)$$

где $\Phi = 10^5 \text{ с}^{-1}$ - полный поток нейтронов, $R = 5$ см - расстояние от источника до образца.

Тогда скорость образования атомов ^{38}Cl определяется следующим соотношением:

$$R_a = \sigma F N_{\text{Cl}}, \quad (2)$$

где σ - сечение реакции захвата нейтрона (для тепловых нейтронов $\sigma \approx 0.43$ барн), N - количество атомов хлора в образце.

Таким образом:

$$\nu_{\text{NaCl}} = \frac{m_{\text{NaCl}}}{\mu_{\text{NaCl}}} = \nu_{\text{Cl}} = \frac{N_{\text{Cl}}}{N_A} \Rightarrow N_{\text{Cl}} = N_A \frac{m_{\text{NaCl}}}{\mu_{\text{NaCl}}} \quad (3)$$

Из всех атомов природного хлора $\sim 75.8\%$ составляет ^{35}Cl и $\sim 24.2\%$ составляет ^{37}Cl . Для ^{35}Cl вероятность захвата 3-х нейтронов пренебрежимо мала, поэтому рассматривается только ^{37}Cl .

Итоговая формула для расчёта скорости образования ^{38}Cl :

$$R_a = 0.242 \cdot \frac{\sigma \Phi N_A m_{\text{NaCl}}}{4\pi R^2 \mu_{\text{NaCl}}} \quad (4)$$

Подставляя численные значения, получим $R \approx 1400 \text{ с}^{-1}$. Для нахождения максимально возможного количества атомов ^{38}Cl , полученного в результате наработки, составим дифференциальное уравнение, описывающее баланс между образованием и распадом ядер хлора:

$$\frac{dN}{dt} = R - \lambda N \quad (5)$$

Решив данное уравнение, получим:

$$N = \frac{R}{\lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \quad (6)$$

При $t \rightarrow \infty$ $N_{\text{inf}} = \frac{R}{\lambda} = \frac{RT}{\ln 2}$;

Таким образом, $N_{\text{inf}} = 1.1 \cdot 10^6$ атомов. Для достижения такого уровня наработки необходимо затратить на облучение не менее $T \approx 3.5 \cdot 10^4 \text{ с}$ или 10 часов.

Активность вещества рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{N_0 \cdot \ln 2}{T_{1/2}} \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \quad (7)$$

Для рассчитанного количества атомов эта активность равна: $A = 195 \text{ Бк}$

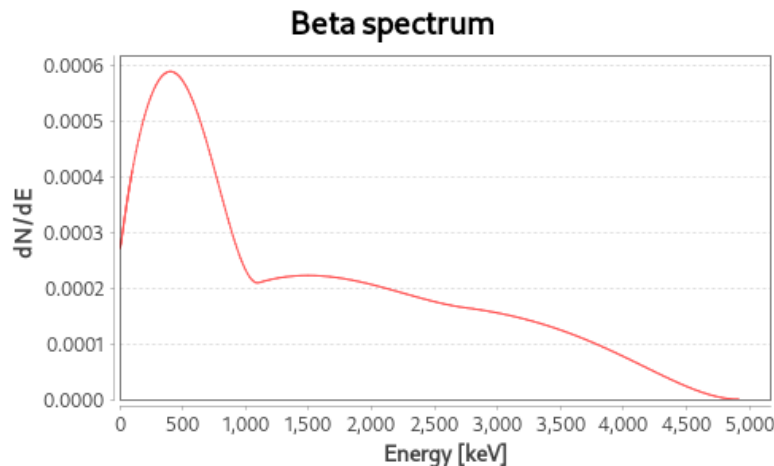


Рис. 5: β -спектр ^{38}Cl

1.3.2 Установка для снятия амплитудного спектра NaCl

Для снятия амплитудного спектра импульсов, приходящих от NaCl, используется следующая установка: органический сцинтиллятор цилиндрической

формы с диаметром $D = 5\text{см}$, состоящий из полистирола с добавками птерфенил и РОРОР, закреплён в светоизолированном ящике. Сцинтиллятор обёрнут слоем белой бумаги. В обоих его торцах установлены ФЭУ фирмы GoHi. Сигналы от ФЭУ подаются на сумматор (СУММ), который складывает их амплитуды, и через дискриминаторы (Д1 и Д2) на схему совпадений (СС), которая является триггером. Далее сигнал поступает на заряд-цифровой преобразователь (ЗЦП) (рис. 6).

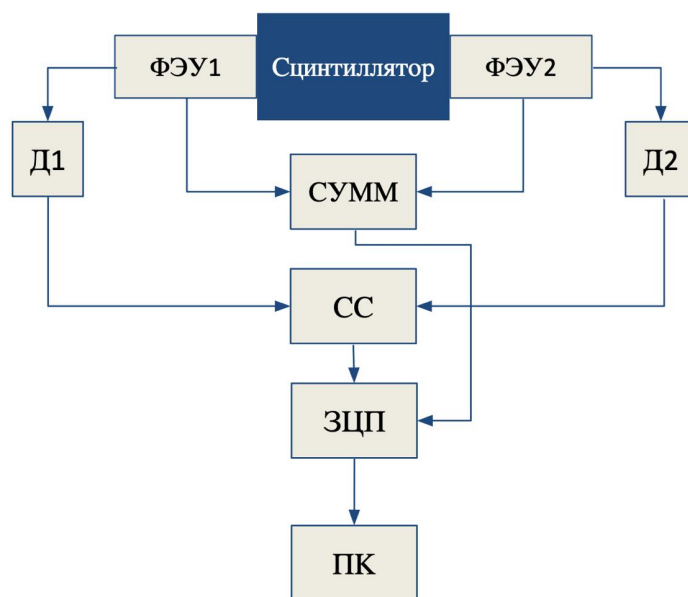


Рис. 6: Схема экспериментальной установки

2 Представление результатов

2.1 Получение активированного ^{38}Cl

Облучение NaCl производилось в течение 3-х дней. По прошествии этого срока, с помощью описанного в п. 1.3.2 сцинтилляционного детектора получен амплитудный спектр импульсов, приходящих от установленной в верхней части сцинтиллятора упаковки NaCl. Измерения производились в течение 30 минут. Гистограмма спектра, полученная в результате измерений, приведена на рис. 7.

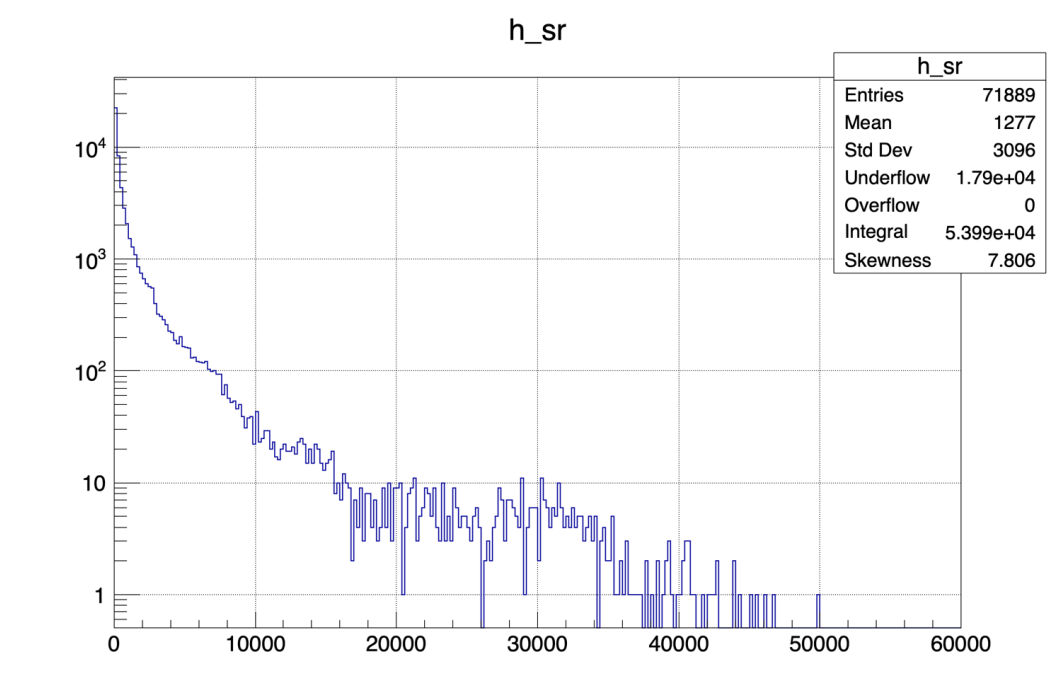


Рис. 7: Результат измерения спектра NaCl

Так же измерен спектр фонового излучения в течение 30 минут и произведён вычет гистограммы этого спектра из исходной гистограммы. Результат приведён на рис. 8

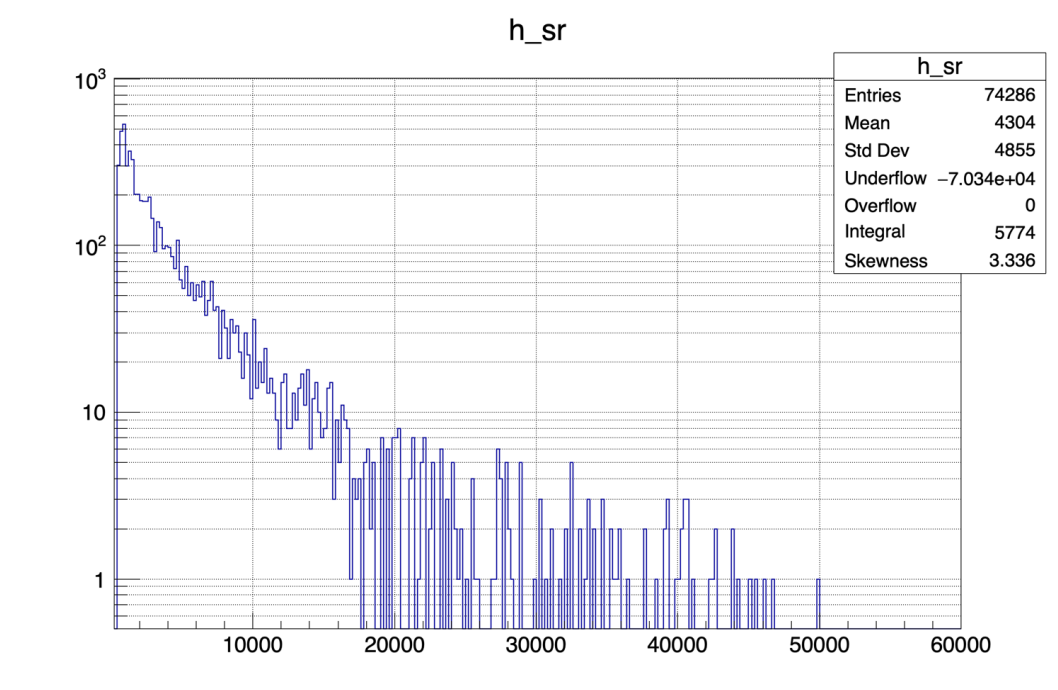


Рис. 8: Спектр NaCl с вычетом фонового спектра

$N = 5774$ – количество событий, зарегистрированных детектором за 30 минут. Тогда скорость счёта событий $n = (4.8 \pm 0.7)$ имп/сек

3 Заключение

Расчётная активность ^{38}Cl , наработанного при облучении NaCl источником нейтронов ^{252}Cf составляет: $A = 195$ Бк Тогда в телесном угле 2π должно регистрироваться около 98 имп/сек без учёта выхода электронов, так как, ввиду того, что источник имеет значительную толщину, выход значительно снижен. В ходе измерений удалось зарегистрировать импульсы, приходящие от ^{38}Cl , однако скорость счёта была низкой и составила: $n = (4.8 \pm 0.7)$ имп/сек Изотоп ^{38}Cl пригоден для калибровки отклика тайлов при условии использования источника нейтронов с потоком тепловых нейтронов больше 10^7

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.
- [4] CAEN. Fers-5200 front-end readout system.