

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Институт ядерной физики и технологий
кафедра №40 «Физика элементарных частиц»

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЙ В МЮОННОЙ
СИСТЕМЕ УСТАНОВКИ SPD**

Научный руководитель	_____	к.ф-м.н., доц. Солдатов Е.Ю.
Научный консультант	_____	к.ф-м.н. Верхеев А.Ю.
Студент группы М23-112	_____	Осетров А.О.

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ	3
2 ЭКСПЕРЕМЕНТ SPD	4
2.1 Общее описание.....	4
2.2 Мюонная система	7
3 СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОТОТИПА МЮОННОЙ СИСТЕМЫ SPD	10
4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	11
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	11

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день барионная материя кажется хорошо изученной по сравнению с основными компонентами вселенной - темной материей и темной энергией. Несмотря на большие успехи, достигнутые в описании взаимодействия кварков и глюонов в рамках пертурбативного подхода КХД, вопрос о том, почему нуклоны именно такие, какими мы их видим, остается открытым. Понимание структуры и фундаментальных свойств адронов непосредственно из динамики составляющих его кварков и глюонов - одна из главных нерешенных задач КХД.

Нуклон имеет спин $\hbar/2$, что определяет его магнитный момент, а также такие фундаментальные свойства природы, как различные фазы вещества при низких температурах и стабильность известной Вселенной. Именно поэтому изучение спиновой структуры нуклона имеет особое значение. Кварковая модель успешно предсказывает большинство основных свойств адронов, таких как заряд, четность и изоспин. Однако она не позволяет объяснить спиновые свойства адронов в терминах их составных частей.

Научной установкой, которую предполагается использовать для изучения спиновой структуры нуклонов и других явлений, связанных со спином, является SPD (Spin Physics Detector) [1]. Её планируется разместить в одной из двух точек столкновения пучков коллайдера NICA, строящегося в Международной межправительственной научной организации “Объединенный институт ядерных исследований” (Дубна, Россия).

Для проектирования установки, изучения возможности решения поставленных физических задач и разработки методов регистрации и идентификации процессов в эксперименте необходимо моделирование различных детекторных систем. Работа посвящена моделированию мюонной системы SPD, с использованием программного пакета ROOT, и последующей разработке программного обеспечения для обработки и анализа данных эксперимента.

ЭКСПЕРИМЕНТ SPD

2.1 Общее описание

В планах коллаборации SPD установить детектор во второй точке взаимодействия строящегося коллайдера NICA (ОИЯИ, Дубна) для изучения спиновой структуры протона и дейтрона и других спиновых явлений. Планируется работать с поляризованными пучками частиц с энергией до 27 ГэВ в системе центра масс и светимостью до $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Установка SPD, показанная на рис. 1, представляет собой универсальный 4 π -детектор с расширенными возможностями отслеживания и идентификации частиц [2].

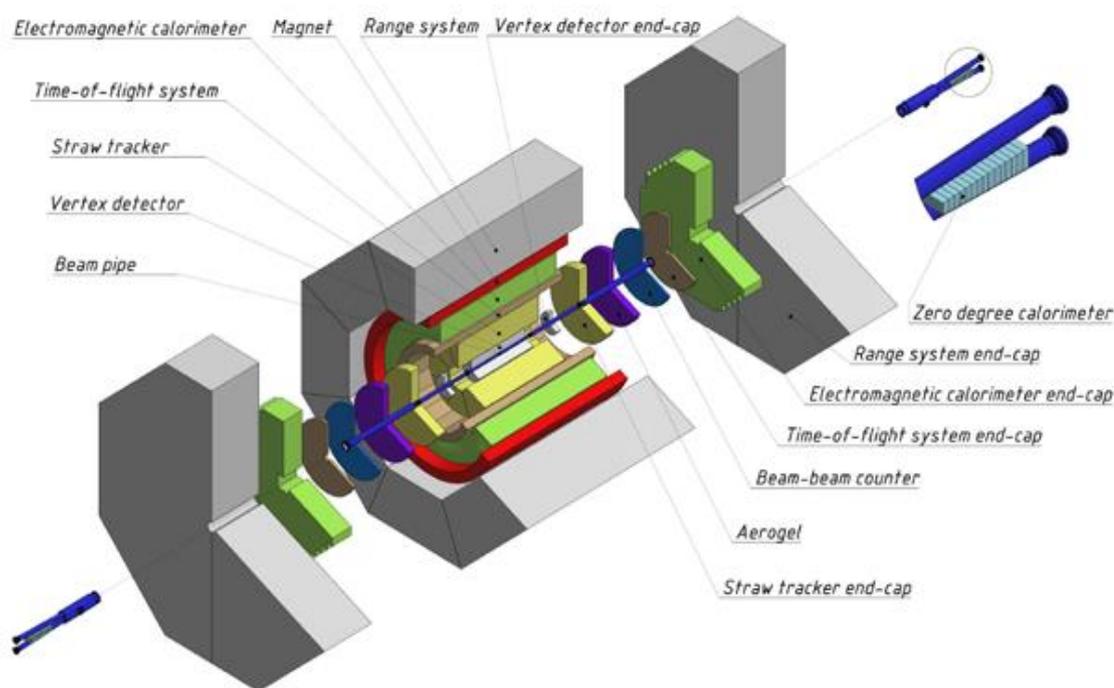


Рис. 1 Общая схема установки SPD

Прибор включает в себя следующие детекторные системы:

- магнитная система,
- вакуумная труба,
- время-пролетная система,
- вершинный детектор,
- трековый детектор,
- электромагнитный калориметр,
- счетчик столкновений пучков,
- калориметр нулевого угла,
- мюонная система.

Сверхпроводящий магнит является одной из важнейших частей установки SPD. Вместе с трековой системой он обеспечивает измерение моментов заряженных частиц с точностью около 2 %.

Вакуумная труба отделяет среду вершинного детектора от вакуума ускорителя, вследствие чего обладает большой механической прочностью и достаточно малой толщиной для минимизации многократного рассеяния и радиационных эффектов.

Цель время-пролетной системы — идентификация заряженных частиц разной массы в диапазоне импульсов до нескольких ГэВ. Планируется использовать время-пролетную систему в событиях с несколькими треками, чтобы как определить время столкновения, так и идентифицировать отдельные треки. Помимо определения типа частиц, система также сообщает время начала работы трекового детектора.

Вершинный детектор SPD — это кремниевая часть спектрометра, отвечающая за точное определение первичной точки взаимодействия и измерение вторичных вершин по распадам короткоживущих частиц (прежде всего, D-мезонов).

Целью трекового детектора является восстановление с высокой эффективностью треков первичных и вторичных частиц для измерения их импульсов по кривизне траектории в магнитном поле. Он также участвует в идентификации частиц посредством измерения энерговыделения (dE/dx).

Электромагнитный калориметр необходим для регистрации и идентификации частиц, рождающихся при столкновении адронов и вылетающих в телесный угол 4π . В его задачи входит также идентификация одиночных фотонов и нейтральных пионов, отделения фотонных ливней, порожденных π^0 -мезонами, для исключения фоновых событий.

Основными целями счетчика столкновения пучков являются локальная поляриметрия, мониторинг столкновений пучков и участие в точном определении времени столкновения, когда для этого не могут быть использованы другие детекторы (например, в случае упругого рассеяния).

Калориметр нулевого угла будет установлен в зонах разделения пучков по обе стороны от точки взаимодействия SPD. Его главные цели — измерение светимости пучка, локальная поляриметрия и создание временной метки для разделения событий.

Эксперимент SPD перекроет кинематический зазор между проводимыми ранее низкоэнергетическими измерениями и результатами высокоэнергетических экспериментов по столкновению поляризованных протон-протонных пучков, а также запланированные эксперименты с фиксированной мишенью на LHC.

2.2 Мюонная система

Мюонная (пробежная) система SPD служит для идентификации мюонов в присутствии значительного адронного фона и оценки энергии адронов (грубая адронная калориметрия). Она также является единственным субдетектором основной части установки SPD, способным идентифицировать нейтроны путем объединения отклика с сигналами от электромагнитного калориметра и внутренними трекерами. Идентификация мюонов осуществляется посредством распознавания фрагментов трека частиц и дальнейшим их сопоставлением с треками внутри магнитов. Точное определение импульса мюона осуществляется внутренними трекерами в магнитном поле.

Одной из основных целей пробежной системы является идентификация мюонов из распадов $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ в присутствии фоновых пионов и продуктов их распада.

Схематичный вид системы и ее основные размеры в мм показаны на рис. 2 (а). Схема мюонной системы, состоящей из слоёв поглотителя и детекторов, показана на рис. 2 (б).

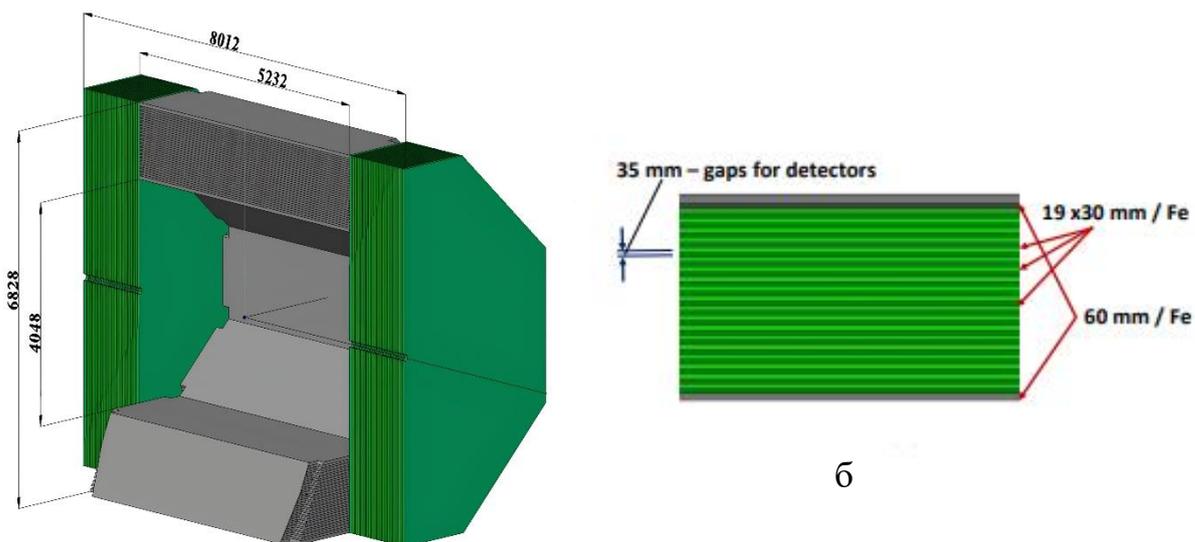


Рис. 2 (а) Схематичный вид (половина разреза) мюонной системы
Барельная часть показана серым цветом, торцевые диски – зеленым;
(б) Размеры слоев системы.

Мюонная система состоит из восьмимодульного бареля (“бочки”) и двух торцевых дисков.

Наружные слои железа толщиной 60 мм используются для скрепления модулей между собой. В межслоевые зазоры помещаются Mini Drift Tubes (MDT) детекторы и считывающая электроника. Толщина основных поглотительных железных пластин (30 мм) выбирается в сравнении с длиной пробега мюона в стали для лучшего разделения мюонов и адронов, а также для адронной калориметрии.

Общее количество MDT детекторов – около 8000 единиц. Они размещаются следующим образом: вдоль оси пучка в бареле и перпендикулярно в торцевых дисках.

Общая толщина поглотителя выбрана равной четырем длинам ядерного взаимодействия λ_I . Таким образом обеспечивается равномерная фильтрация мюонов во всех направлениях. Вместе с толщиной электромагнитного калориметра ($\sim 0,5\lambda_I$) общая толщина установки SPD получается около $4,5\lambda_I$.

Детектор MDT изначально был разработан и произведен в ОИЯИ для Мюонной системы эксперимента D0 в FNAL [3]. Позднее на его основе была создана и мюонная система для эксперимента COMPASS в CERN [4]. Модификация двухкоординатного считывания для MDT с открытой геометрией катода и внешними съемными электродами была предложена и принята коллаборацией PANDA [5] для мюонной системы их экспериментальной установки. Эта же новая версия MDT предлагается и для проекта SPD, так как имеет все необходимые характеристики – радиационную стойкость, координатное разрешение, временное разрешение, надежность, а также продвинутый уровень уже проведенных НИОКР в рамках проекта PANDA.

Сечение MDT детектора с открытой геометрией катода показано на рис. 3.

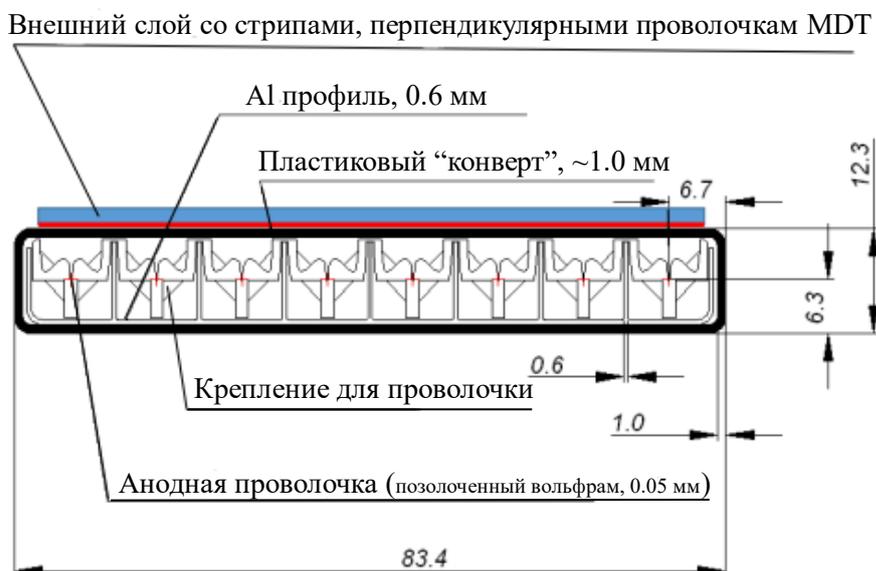


Рис. 3 Поперечное сечение MDT детектора

Детектор состоит из металлического катода (алюминиевый гребенчатый профиль из 8 ячеек), анодных проволочек и пластиковой оболочки (норил) для газонепроницаемости. Гребенчатый профиль катода обеспечивает каждой анодной проволоке отдельный сигнал для получения одной из координат. Перпендикулярная стриповая плоскость используется для получения второй координаты. Форма наведенного сигнала повторяет исходный, имея противоположную полярность, но амплитуда составляет около 15% от исходного. Таким образом, требуется усиление сигнала и надлежащее экранирование внешнего электромагнитного поля.

Применение открытой геометрии катода позволяет получать вторую координату считывания. Однако это приводит к потере симметрии электрического поля в каждой из 8 ячеек детектора и, следовательно, уменьшает необходимое приложенное напряжения для того же коэффициента газового усиления по сравнению со стандартной геометрией (катод закрыт крышкой из нержавеющей стали).

СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОТОТИПА МЮОННОЙ СИСТЕМЫ SPD

Первый этап работы – описание прототипа мюонной системы, который в настоящее время используется для тестирования электроники, сбора космики, и интегрирование его в программную среду ROOT. Полученная геометрическая модель прототипа представлена на рис. 4.



Рис. 4 Геометрическая модель прототипа мюонной системы SPD

Сперва смоделирован MDT детектор из восьми ячеек, заполненных газовой смесью $Ar + CO_2$ (рабочее вещество газовой ячейки детектора). Затем 6 MDT объединены в одну детекторную плоскость. В железном корпусе размещено 16 детекторных плоскостей с железными поглотителями с шагом в 35 мм для электроники. В начале системы расположен так называемый Vlayer, состоящий из двух детекторных плоскостей, каждая из которых содержит четыре MDT детектора. За ними расположен железный лист толщиной 60 мм. Созданная модель прототипа должна стать частью разрабатываемого программного обеспечения для обработки и анализа данных проектируемого эксперимента SPD.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе произведено моделирование прототипа мюонной системы эксперимента SPD с использованием программного пакета ROOT. В дальнейшем планируется использовать его для разработки программного обеспечения в среде SpdRoot. Работа будет развиваться: требуется усложнение существующей модели пробегной системы для учета большего количества составляющих (электроника, скрепляющие детали и т.д.) и модификации геометрии. Следующим этапом будет моделирование событий и разработка алгоритма идентификации различных частиц и измерения их характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Technical design report of the Spin Physics Detector / International spin physics collaboration at the collider NICA// 12 February, 2023
- [2] Conceptual design of the Spin Physics Detector/ V.M. Abazov, V. Abramov, L.G. Afanasyev // arXiv:2102.00442, January 2021
- [3] The Muon system of the run II D0 detector / V. M. Abazov et al. // Nucl. Instrum. Meth., 2005
- [4] The COMPASS experiment at CERN / P. Abbon et al. // Nucl. Instrum. Meth., 2007
- [5] Technical Design Report for the PANDA Electromagnetic Calorimeter / Rainer Novotny et al. // panda.gsi.de, August 2008