

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПАДА  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  В  
ДЕТЕКТОРЕ SPD С ПОМОЩЬЮ СРЕДЫ  
SPDROOT

Научный руководитель  
к.ф.-м. н.

\_\_\_\_\_ Е. Ю. Солдатов

Студент

\_\_\_\_\_ А. В. Лазарева

Москва 2024

# Содержание

Введение	3
1 Описание установки	4
2 Теоретическая часть	5
3 Результаты	6
4 Заключение	12
Список использованных источников	13

# Введение

NICA (Nuclotron based Ion Collider facility)[1] – это новый ускорительный комплекс, который был создан на базе Объединённого института ядерных исследований (Дубна, Россия) с целью изучения свойств плотной барионной материи. Эксперимент Spin Physics Detector (SPD) будет установлен во вторых точках взаимодействия ионного коллайдера на базе комплекса NICA. Установка SPD предназначена для изучения спиновой структуры протона и дейтрона и других явлений, связанных со спином, с помощью поляризованных пучков протонов и дейтронов при энергии столкновения до 27 ГэВ и светимость до  $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ .

Сейчас эксперимент находится на стадии разработки и ему необходимы работы по подбору материалов, в электронике и программном обеспечении. Моделирование процессов - еще один этап в подготовке эксперимента. Оно позволяет предсказать результаты эксперимента до его фактического проведения. Это помогает подготовить экспериментальные установки и избежать неожиданных результатов, следовательно дает возможность корректировать параметры детекторов, настройку оборудования и изменить физические условия.

Целью данной работы является моделирование распада  $J/\psi$ -мезона на электрон-позитронную пару в среде SPDRoot.

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

- Установка и ознакомление с программным проектом, посвящённый эксперименту SPD на коллайдере NICA;
- Изменение кода для генерации событий в соответствии с изучаемым процессом распада  $J/\psi$ -мезона;
- Представление полученных данных после генерации и реконструкции событий в виде гистограмм для визуальной интерпретации результатов.

# 1 Описание установки

Экспериментальная установка SPD[2] спроектирована как универсальный  $4\pi$ -детектор с расширенными возможностями слежения и идентификации частиц. Основная цель эксперимента SPD - проведение экспериментов по изучению спиновой структуры нуклонов и других процессов, зависящих от спина, путем измерений асимметрий в процессе Дрелла-Яна, процессы рождения  $J/\psi$  частиц и прямых фотонов в столкновениях поляризованных протонов и дейтронов.

Текущий дизайн детектора SPD предусматривает три модуля: две торцевые крышки (end-caps) и центральную часть (barell). Каждая секция имеет свою индивидуальную магнитную систему: end-caps - соленоидальные катушки, barell - тороидальную магнитную систему. В основные системы детектирования входят: мюонный детектор, электромагнитный калориметр, система времени пролета, трековый детектор, силиконовый вершинный детектор, счетчик столкновений, калориметр нулевых углов.

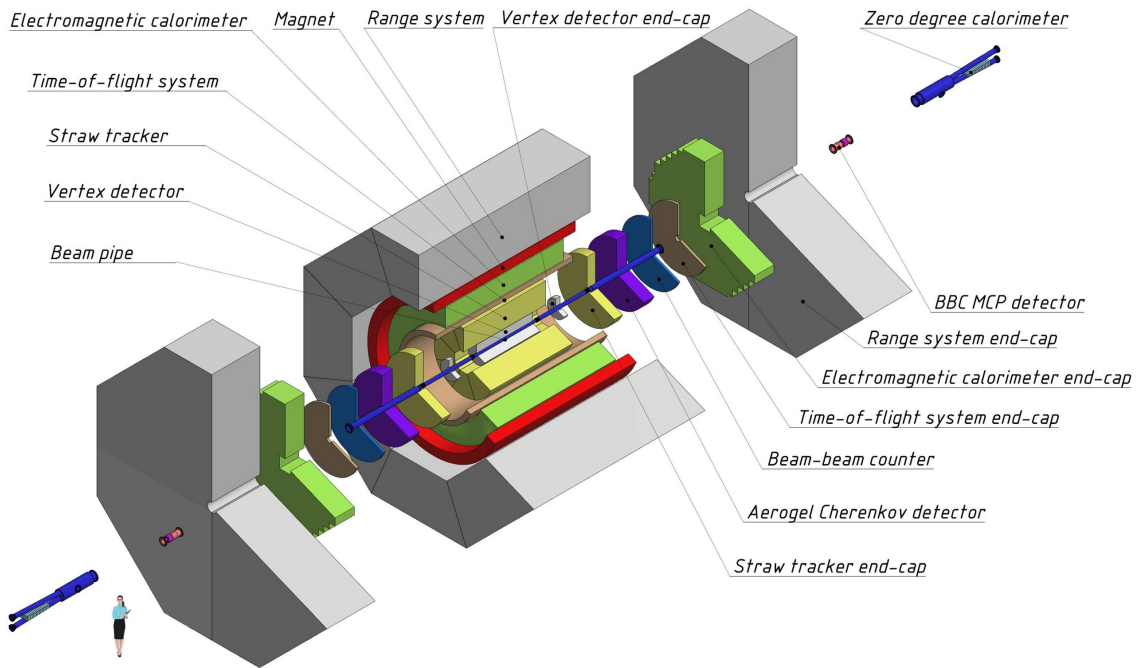


Рисунок 1 — Общая схема установки SPD

## 2 Теоретическая часть

$J/\psi$ -мезон[3] – это первая очарованная частица, которая была открыта одновременно на протонном ускорителе и электрон-позитронном коллайдере в 1974 году. Чаще она называется частицей со скрытым очарованием, поскольку состоит из очарованного кварка и очарованного антикварка ( $c\bar{c}$ ).

$J/\psi$ -мезон имеет массу около  $3.097 \text{ ГэВ}/c^2$ . Время жизни составляет порядка  $7,2 \cdot 10^{-21}$  секунд, что делает его достаточно стабильным по сравнению с другими частицами, участвующими в сильных взаимодействиях. Распады  $J/\psi$  разнообразны и предоставляют ценные данные для изучения природы сильных взаимодействий. Электромагнитные распады, такие как  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  и  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ , являются ключевыми для измерения массы и ширины резонанса частицы.

$c\bar{c} \rightarrow 3g$	$64,1\% \pm 1,0\%$
$c\bar{c} \rightarrow \gamma + 2g$	$8,8\% \pm 1,1\%$
$c\bar{c} \rightarrow \gamma$	$\sim 25,5\%$
$\gamma \rightarrow hadrons$	$13,5\% \pm 0,3\%$
$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$	$5,971\% \pm 0,032\%$
$\gamma \rightarrow \mu^+ + \mu^-$	$5,961\% \pm 0,033\%$

Таблица 1 — Моды распада  $J/\psi$ -мезона

В таблице 2 представлены моды распада[4]  $J/\psi$ -мезона. Адронные способы распада  $J/\psi$  сильно подавлены из-за правила Окубо-Цвейга-Иидзуки. Этот эффект сильно увеличивает время жизни частицы и тем самым обеспечивает ей очень узкую ширину распада всего в  $93,2 \pm 2,1 \text{ кэВ}$ . Из-за этого сильного подавления электромагнитные распады начинают конкурировать с адронными. Вот почему  $J/\psi$  имеет значительную долю распада на лептоны.

$J/\psi$  является важным инструментом для тестирования фундаментальных теорий, таких как квантовая хромодинамика. Изучение поперечных сечений, кинематики и поляризации позволяет глубже понять механизмы рождения частиц и структуру сильных взаимодействий.

### 3 Результаты

В результате работы с пакетом SPDRoot построены гистограммы.

В данной работе рассматривался процесс распада  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  при столкновении пучков протонов с  $\sqrt{s} = 27$  ГэВ. Для анализа набиралась статистика в 4000 событий.

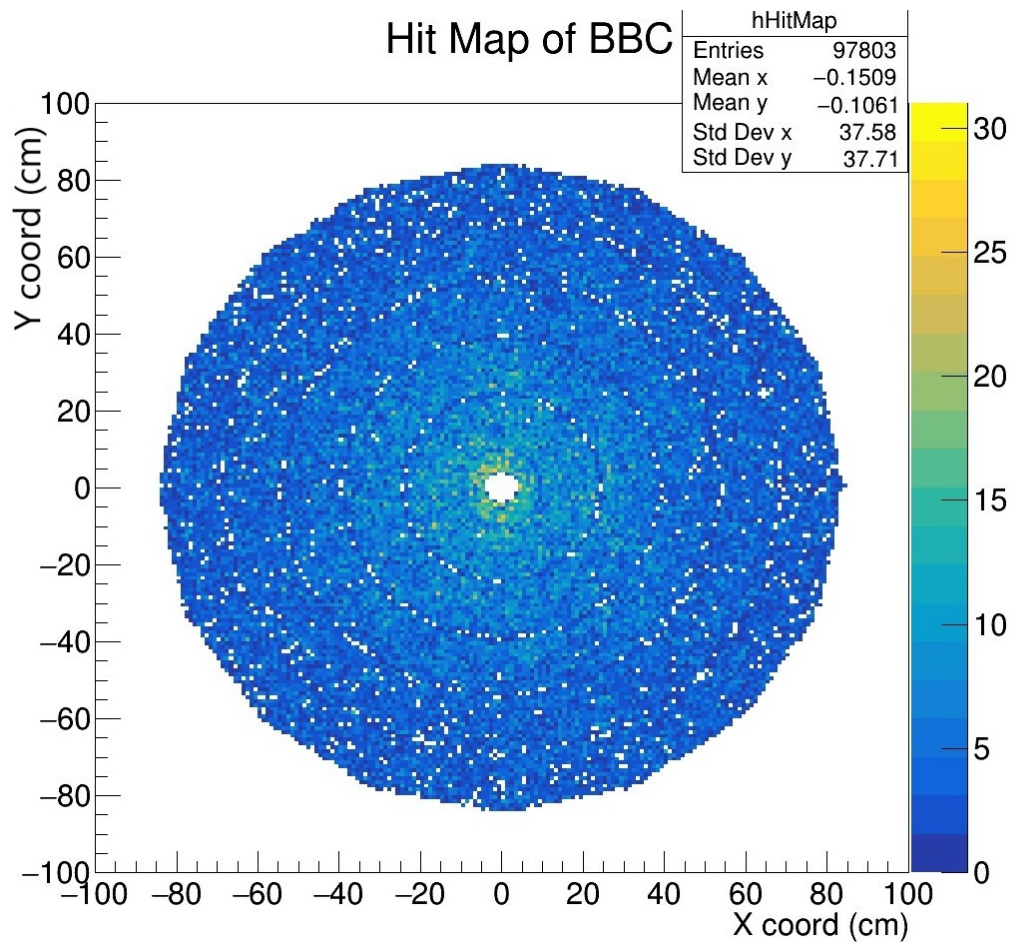


Рисунок 2 — Карта попаданий Beam-Beam counter

По данным из распределений понятно, что реконструированных электронов и позитронов после распада значительно меньше всех реконструированных электронов и позитронов в данном детекторе. Вид полученных распределений соответствует геометрии детекторов BBC и FARICH.

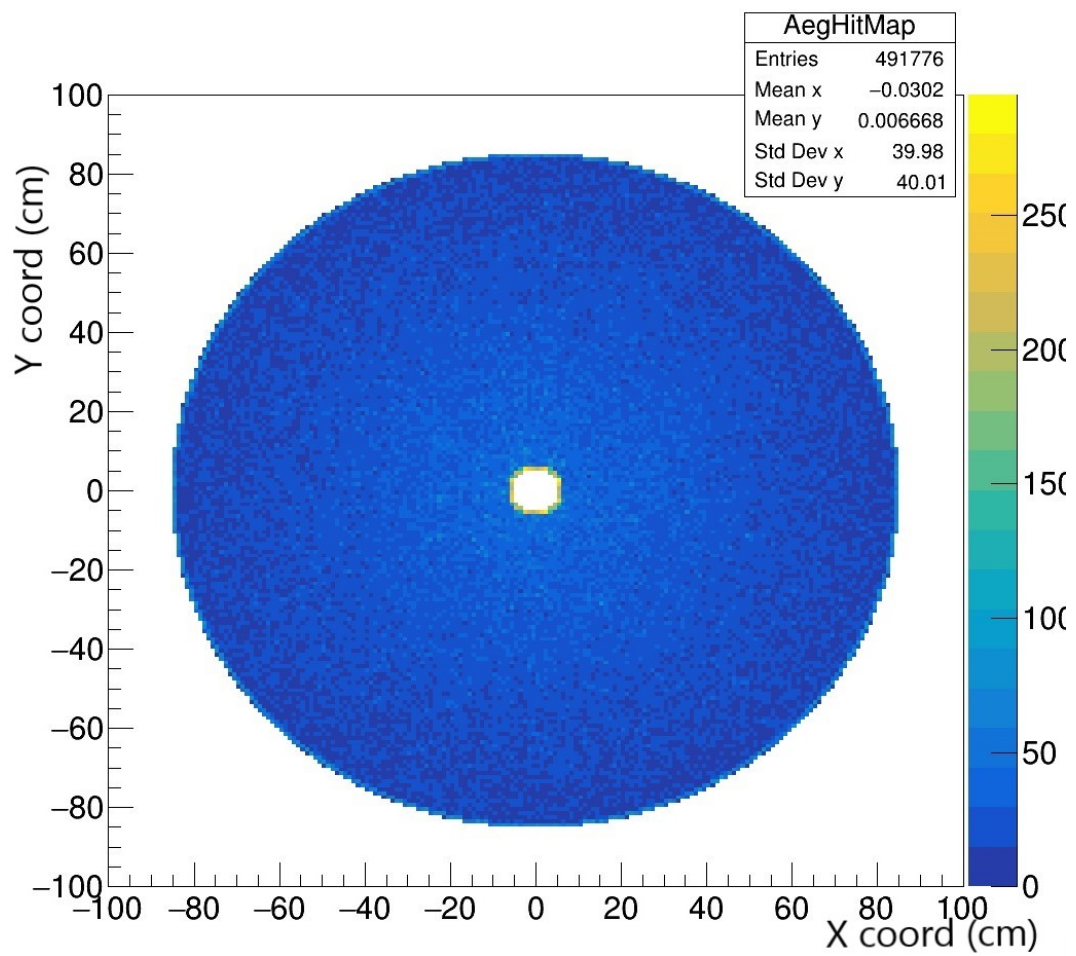


Рисунок 3 — Карта попаданий FARICH

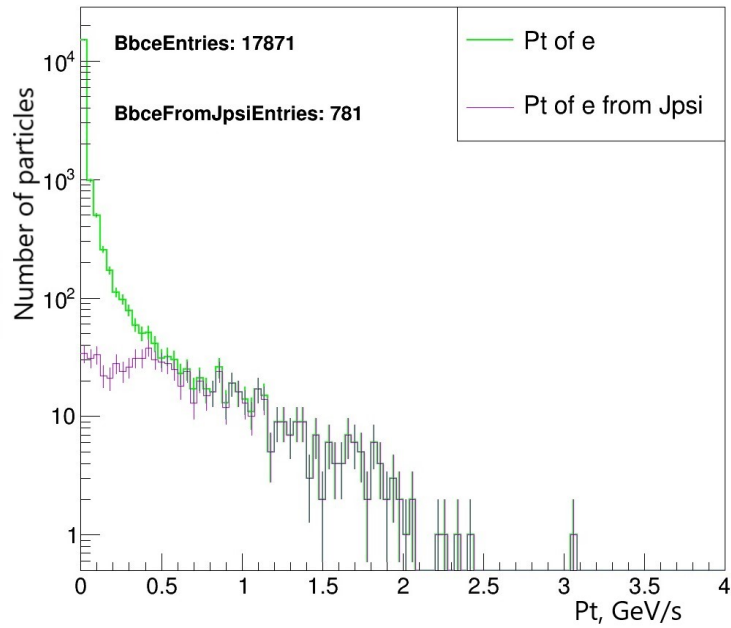


Рисунок 4 — Распределение по трансверсальному импульсу электронов в Beam-beam Counter

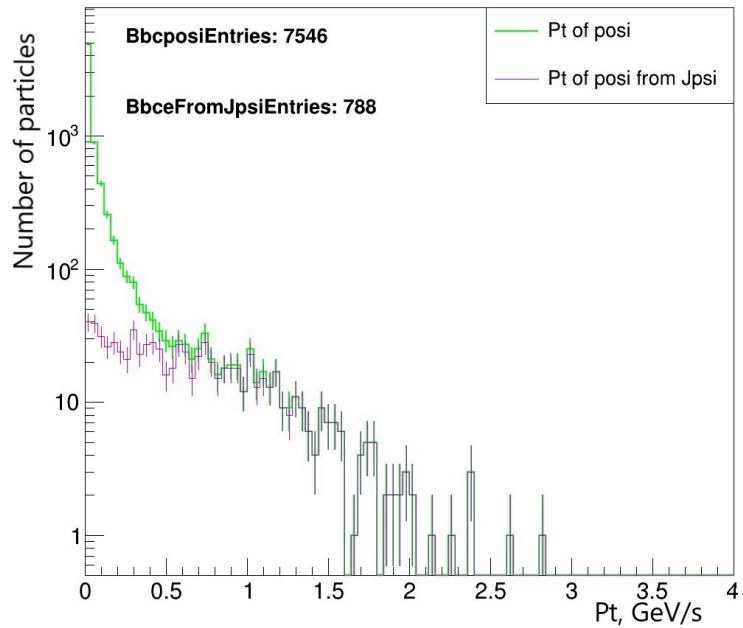


Рисунок 5 — Распределение по трансверсальному импульсу позитронов в Beam-beam Counter



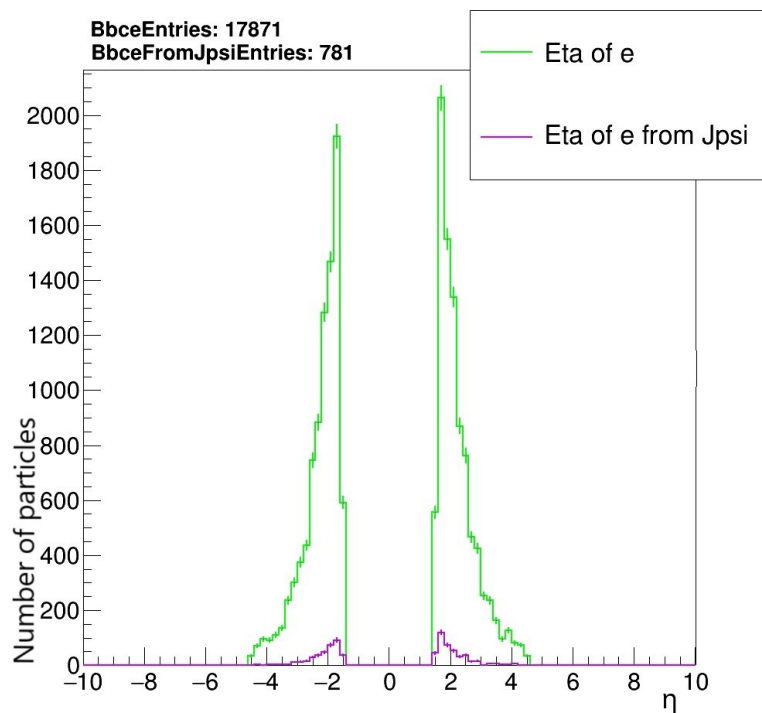


Рисунок 6 — Распределение по псевдобыстроте электронов в Beam-beam Counter

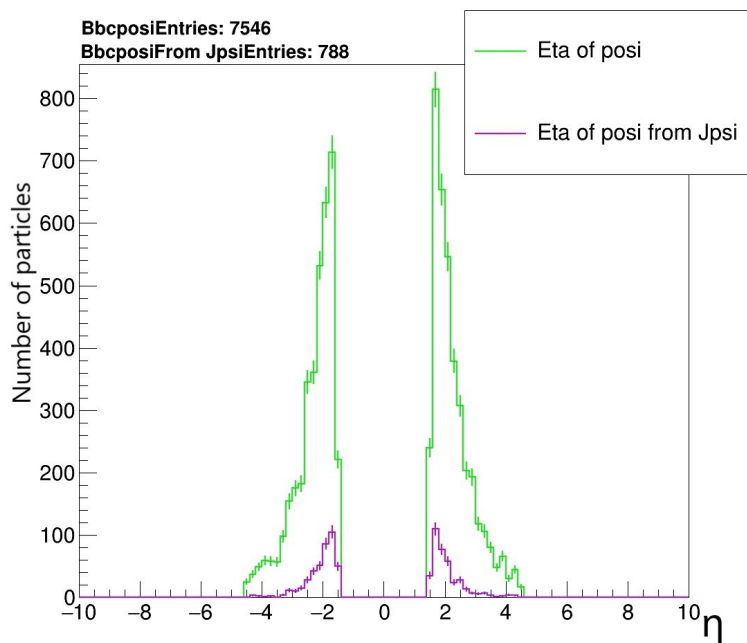


Рисунок 7 — Распределение по псевдобыстроте позитронов в Beam-beam Counter

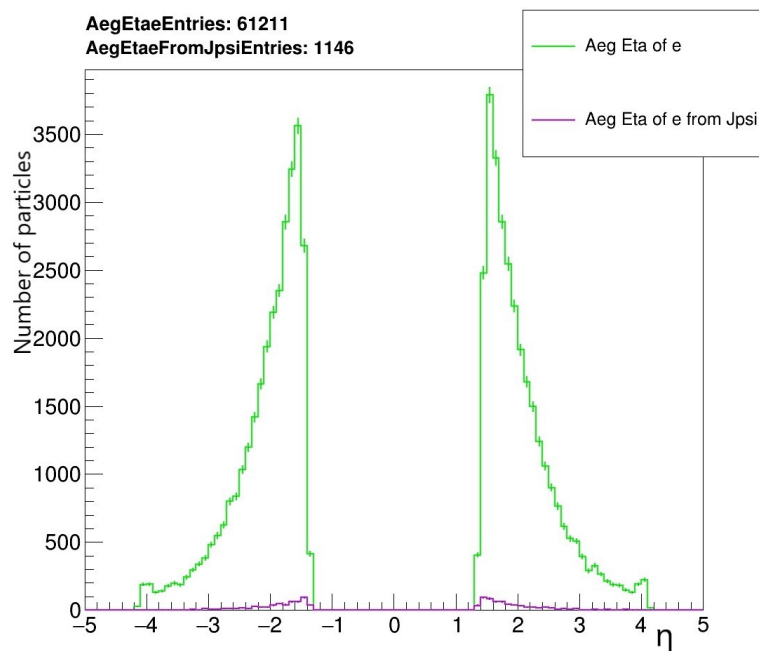


Рисунок 8 — Распределение по псевдобыстроте электронов в Аэрогелевом детекторе

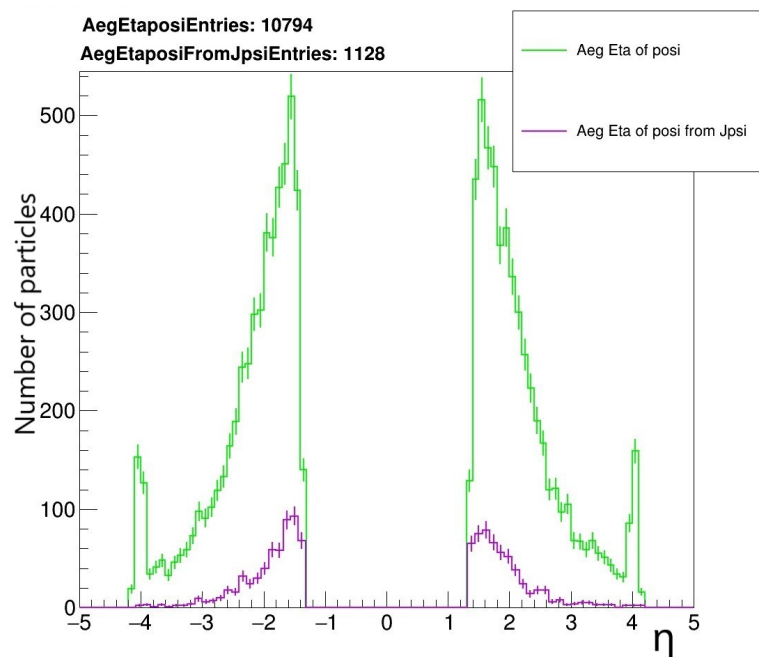


Рисунок 9 — Распределение по псевдобыстроте позитронов в Аэрогелевом детекторе

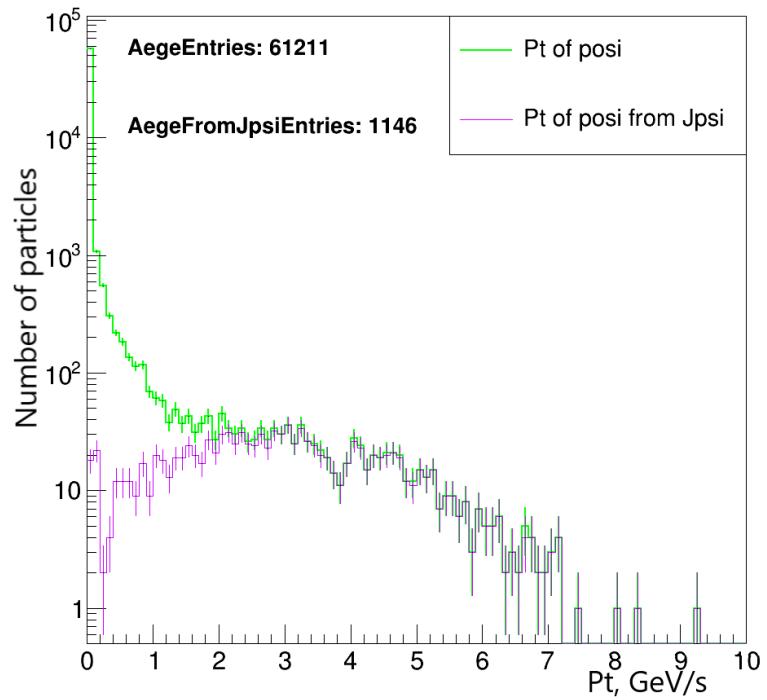


Рисунок 10 — Распределение по трансверсальному импульсу электронов в Аэрогелевом детекторе

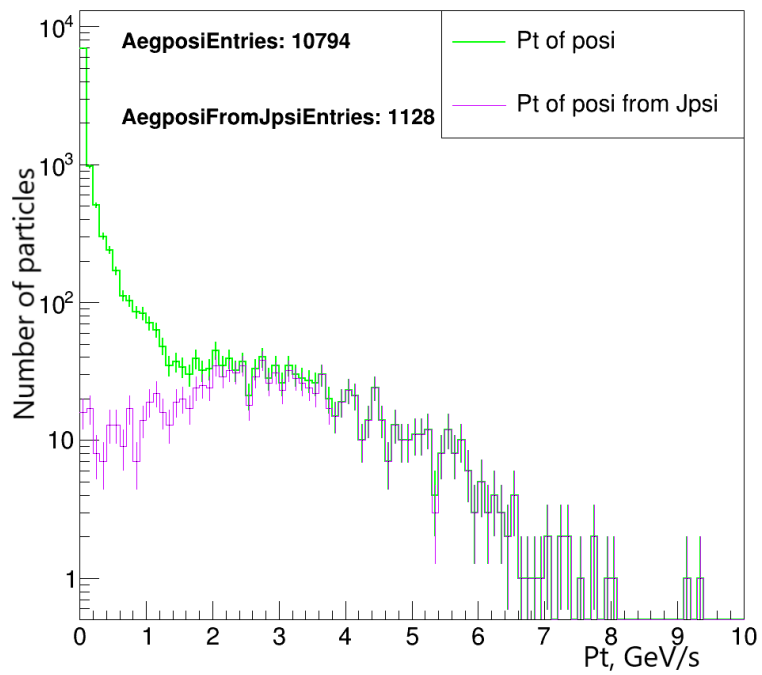


Рисунок 11 — Распределение по трансверсальному импульсу позитронов в Аэрогелевом детекторе

## 4 Заключение

В данной работе была выполнена симуляция и анализ распада  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  в среде SPDRoot. Были получены важные данные, которые могут значительно способствовать дальнейшему изучению взаимодействий элементарных частиц и уточнению теоретических моделей в области физики высоких энергий.

Построенные диаграммы отражают распределение характеристик распавшихся частиц и являются ключевыми для понимания динамики распада, а также для эффективной оптимизации методов детекции частиц в современных экспериментальных установках.

Полученные результаты могут быть сопоставлены с предсказаниями теоретических моделей, что поможет в проверке их точности или в необходимости их доработки. Сравнительный анализ с ранее полученными экспериментальными данными предоставляет дополнительный контекст для оценки физики процесса.

Результаты. Первая генерация, реконструкция и анализ событий распада  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  в нескольких детекторах успешно завершены, за исключением части работы с электромагнитным калориметром и трековой системой.

Дальнейшие шаги. Необходимо пересмотреть код для устранения ошибок, связанных с нулевым значением вхождений в Электромагнитный калориметр. Ожидается работа с нерассмотренными детекторами, их геометрией. Ожидается комбинирование откликов детекторов для восстановления частиц.

## Список использованных источников

1. Мегaproект NICA. — URL: <https://nica.jinr.ru/ru/>. — (дата обр.: 25.12.2024).
2. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA / V. Abazov [и др.]. — 2024. — Апр. — arXiv: 2404.08317 [hep-ex].
3. *Окунь Л. Б.* Физика элементарных частиц. — Москва : URSS, 2008.
4. Review of particle physics / S. Navas [и др.] // Phys. Rev. D. — 2024. — Т. 110, № 3. — С. 030001. — DOI: 10.1103/PhysRevD.110.030001.