

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Университет «Дубна»

Инженерно-физический институт

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема: Изучение эффективности реконструкции и моделирование
поляризации Λ -гиперонов на установке SPD/NICA

Ф.И.О. студента Губачев Даниил Александрович

Группа 6162 Направление подготовки 03.04.02 Физика

Направленность (профиль) образовательной программы

Физика ядра и элементарных частиц

Выпускающая кафедра Ядерная физика

Руководитель работы _____ / к. ф.-м. н. В.Ю. Алексахин /

подпись

уч. степень, И.О. Фамилия

Консультант(ы) _____ / А.В. Иванов /

подпись

уч. степень, И.О. Фамилия

Рецензент _____ / к. ф.-м. н. И.И. Денисенко /

подпись

уч. степень, И.О. Фамилия

Выпускная квалификационная работа

допущена к защите " _____ " _____ 20 _____ г.

Заведующий кафедрой _____ / Ю.Ц. Оганесян /

подпись

И.О. Фамилия

г. Дубна

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Университет «Дубна»

Инженерно-физический институт

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ / Ю.Ц. Оганесян /
подпись И.О. Фамилия

" ____ " _____ 20 ____ г.

З а д а н и е

на выпускную квалификационную работу – магистерскую диссертацию

Тема: Изучение эффективности реконструкции и моделирование поляризации

Λ-гиперонов на установке SPD/NICA

Утверждена приказом № _____ от _____

Ф.И.О. студента Губачев Даниил Александрович

Группа 6162 Направление подготовки 03.04.02 Физика

Направленность (профиль) образовательной программы

Физика ядра и элементарных частиц

Выпускающая кафедра Ядерная физика

Дата выдачи задания

" ____ " _____ 20 ____ г.

Дата завершения
выпускной квалификационной работы

" ____ " _____ 20 ____ г.

г. Дубна

Исходные данные к работе

Программный пакет SPDRoot с проработанной геометрией детекторной системы SPD,
программный пакет для генерации событий в физике высоких энергий Pythia, программ-
ный пакет для анализа данных ROOT, научная литература по теме.

Результаты работы:

1. Содержание пояснительной записки (перечень рассматриваемых вопросов)

Произведена реконструкция и отбор Λ , Σ^{*+} , Σ^{*-} и Ξ^- гиперонов. Рассчитана эффективность
регистрации Λ -гиперона как функция от импульса и угла вылета частицы. Выполнено
моделирование и реконструкция поперечной поляризации Λ -гиперона

2. Перечень демонстрационных листов (материалов)

Презентация Power Point

Консультант(ы)

_____ / А.В. Иванов /
_____ / _____ /
подпись *уч. степень, И.О. Фамилия*

Руководитель работы

_____ / к. ф.-м. н. В.Ю.Алексахин /
подпись *уч. степень, И.О. Фамилия*

Задание принял к исполнению

_____ *дата* _____ *подпись студента*

Я, Губачев Даниил Александрович, ознакомлен(а) с требованием об обязательности проверки выпускной квалификационной работы на объем заимствования. Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, научных докладов об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы (диссертации), кандидатских и докторских диссертаций, должны иметь в работе соответствующие ссылки.

Я ознакомлен(а) с Порядком проверки на объем заимствования и размещения в электронно-библиотечной системе текстов выпускных квалификационных работ и научных докладов обучающихся, согласно которому обнаружение в тексте выпускной квалификационной работы заимствований, в том числе содержательных, неправомерных заимствований, является основанием для не допуска к защите выпускной квалификационной работы и отчисления из образовательной организации.

_____ / Губачев Д.А. /
подпись *Фамилия И.О.*

" ____ " _____ 20 ____ г.

Аннотация

Эксперимент Spin Physics Detector (SPD) на ускорительном комплексе NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) — это перспективный проект с обширной программой физических исследований, направленной на изучение спиновой структуры нуклонов. В ходе эксперимента будут регистрироваться данные о столкновениях поляризованных пучков протонов и дейтронов. Одной из ключевых частиц, образующихся в таких столкновениях, является Λ -гиперон. Он примечателен тем, что уже был подробно изучен, а его поляризация может предоставить информацию о функциях распределения партонов частиц пучка. На данном этапе эксперимента необходимы исследования эффективности регистрации с использованием моделирования методом Монте-Карло. В данной работе представлен процесс генерации поперечно поляризованных Λ -гиперонов с использованием генераторов событий Монте-Карло, эффективность их реконструкции и извлечение поляризации.

Abstract

The Spin Physics Detector (SPD) experiment at the Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA) is an upcoming project with an extensive physics program focused on studying the spin structure of nucleons. The experiment will record data from collisions of polarized proton and deuteron beams. One of the key particles produced in such collisions is the Λ -hyperon. It is noteworthy because it has already been studied in detail and its polarization can provide information about parton distribution functions of beam particles. At this stage of the experiment, registration efficiency studies using Monte Carlo simulation are necessary. This work presents a process of generating transversely polarized Λ -hyperons using Monte Carlo event generators, its reconstruction efficiency and polarization extraction.

Содержание

1	Введение	7
1.1	Эксперимент SPD	7
1.2	Генератор событий Pythia	10
1.3	Библиотека для анализа данных ROOT	10
1.4	Библиотека SPDRoot	10
2	Сведения о Λ-гипероне и его поляризация	12
2.1	Λ - и $\bar{\Lambda}$ -гипероны	12
2.2	Термины и общепринятые обозначения	12
2.3	Поляризация Λ -гиперона	13
2.4	Продольный перенос поляризации	16
2.5	Поперечный перенос поляризации	17
2.6	Коэффициент поперечного переноса поляризации D_{TT} и отличия его от D_{NN}	18
2.7	Регистрация и критерии отбора частиц	20
2.7.1	Критерий отбора по сходимости дочерних частиц в первичную вершину	21
2.7.2	Критерий отбора по длине пробега частицы до ее распада	21
2.7.3	Критерий отбора по углу коллинеарности	22
3	Реконструкция Λ-гиперонов	23
3.1	Алгоритм реконструкции	23
3.2	Поиск оптимальных параметров для отбора Λ кандидатов	24
3.3	Реконструкция каскадных событий	26
3.3.1	Алгоритм реконструкции каскадных событий	26
3.3.2	Критерии отбора	26
3.3.3	Оценка Λ -/ $\bar{\Lambda}$ - гиперонов, рожденных от каскадных событий	27
3.4	Оценка эффективности реконструкции	29
4	Генерация поляризованных Λ-гиперонов в SPDRoot	33
4.1	Алгоритм для создания набора данных с поляризованным Λ -гипероном	33
4.2	Результаты извлечения поляризации после реконструкции событий	35
	Заключение	36

Список литературы	37
Приложение А	39
Приложение Б	40
Приложение В	41

1 Введение

Эксперимент SPD (Spin Physics Detector) нацелен на изучение спиновой структуры барионов, в частности вклада спинов глюонов и кварков в спин бариона. Эксперимент будет проводиться на встречных поляризованных пучках протонов и дейтронов с энергией центра масс $\sqrt{s} = 10$ и $\sqrt{s} = 27$ ГэВ. Λ -гиперон является одним из хороших кандидатов для изучения и получения информации о поляризованных функциях распределения партонов (PDF). Направление его спина легко определить по продуктам распада, что позволит измерить его поляризацию, эффекты переноса спина, а также спин-спин корреляции для пар $\Lambda\bar{\Lambda}$. В данной работе представлен алгоритм реконструкции Λ -гиперона, оптимизированные критерии отбора и сделан расчёт эффективности регистрации как функции импульса и угла вылета. Также представлен алгоритм для генерации поляризованного Λ -гиперона и результаты реконструкции поляризации.

Диплом состоит из четырёх глав. В первой главе описана установка SPD и основное программное обеспечение, использованное в анализе. Во второй главе представлены основные сведения про Λ -гиперон и измерения поляризации, также там приведён обзор данных полученных на экспериментах. В третьей главе описан процесс реконструкции Λ -гиперонов, представлены оптимальные параметры отбора, алгоритм реконструкции тяжёлых гиперонов и расчёт эффективности регистрации. В четвёртой главе описан алгоритм генерации поляризованных Λ -гиперонов на базе генератора Pythia8, его реализация в SPDRoot и проведена проверка корректности его работы в процессе полной реконструкции событий.

1.1 Эксперимент SPD

Ускорительный комплекс NICA [1] предназначен для ускорения частиц от протонов и дейтронов до тяжёлых ионов. Его схема представлена на рисунке 1. Состоит из двух источников ионов (ЛУ-20 — источник лёгких ионов, HiLac — источник тяжёлых ионов), бустера, нуклотрона и кольца коллайдера с двумя точками пересечения пучков. На комплексе NICA расположены три эксперимента: BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) — эксперимент на фиксированной мишени по изучению барионной материи, MPD (Multi-Purpose Detector) — эксперимент на встречных пучках для изучения кварк-глюонной плазмы, SPD



Рис. 1: Ускорительный комплекс NICA

(Spin Physics Detector) — эксперимент на встречных пучках, предназначенный для изучения спиновой структуры нуклонов.

Установка SPD (технический проект описан в работе [2]) состоит из трёх больших секций: центральной цилиндрической части и двух торцевых частей. Схема установки с обозначением детекторов представлена на рис. 2. Установка будет работать в два этапа с разной конфигурацией детекторов и энергиями сталкивающихся пучков.

В первой стадии будет облегченная версия установки включающая в себя центральную трековую систему на основе microMEGA, трековую систему, счётчик пучков, магнита и мюонной системы. На этом этапе энергия сталкивающихся пучков в системе центра масс будет достигать вплоть до 10 ГэВ.

Во второй стадии будет полная конфигурация детектора. Установка на втором этапе состоит из вершинного детектора (Vertex detector), трековой системы (Straw tracker), времяпролётной системы (Time-of-flight system), фокусирующего аэрогелевого черенковского детектора кольцевого изображения (Aerogel Cherenkov detector), счётчика пучков (Beam-beam counter), электромагнитного калориметра (Electromagnetic calorimeter), магнита и мюонного детектора (Range system), а также калориметра нулевого угла (Zero degree calorimeter). Энергия сталкивающихся пучков в системе центра масс будет достигать вплоть до 27 ГэВ.

Основная задача вершинного детектора — поиск вторичных вершин, в частности от распада D-мезонов. На эту роль рассматриваются два типа детекторов: DSSD и MAPS.

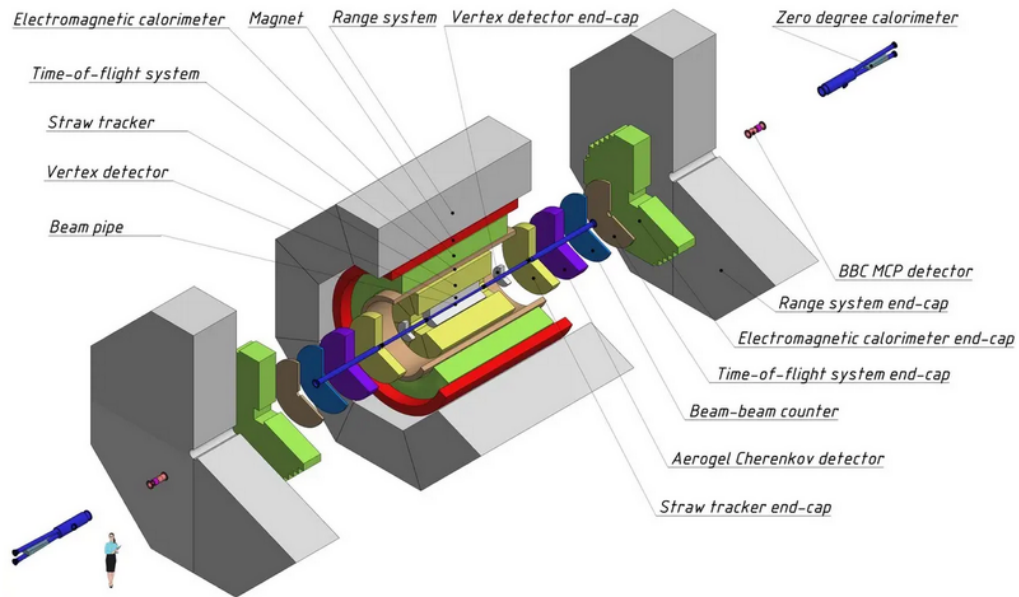


Рис. 2: Детектирующая система SPD

Трековая система нужна для реконструкции треков заряженных частиц. Цилиндрическая часть состоит из шести секций, в каждой из которых 30 двойных слоёв straw-трубок. Часть двойных слоёв straw-трубок расположены под углом относительно оси столкновения. Совместно с магнитом система позволяет измерять импульс частиц и разделять частицы по знаку заряда. Счётчик пучков используется для отслеживания поляризации сталкивающихся пучков путём измерения азимутальных асимметрий. Состоит из двух секций: внешней с 16 сегментами и внутренней с 7 сегментами. В качестве счётчиков в каждом сегменте используются пластиковые сцинтилляторы. Основная задача фокусирующего аэрогелевого черенковского детектора кольцевого изображения это идентификация частиц в области энергий 0.5 - 6 ГэВ. Детектор состоит из нескольких слоев аэрогеля с постепенно возрастающим показателем преломления, за счёт чего достигается эффект фокусировки, и фотодетекторов, с которых считывается полученное изображение. Времяпролётная система используется для идентификации пионов, каонов и протонов с энергиями до 2 ГэВ. В качестве времяпролётной системы в SPD будет использоваться MRPC (Multigap Resistive Plate Chambers). Электромагнитный калориметр используется для регистрации гамма-квантов. Мюонный детектор используется для идентификации мюонов и грубой адронной калориметрии. Калориметр нулевого угла предназначен для регистрации нейтронов.

1.2 Генератор событий Pythia

Pythia [3] — это Монте Карло генератор первичных событий, предназначенный для моделирования столкновений электронов, протонов, фотонов и некоторых тяжёлых ядер при высоких энергиях. Он содержит теоретическое описание и различные модели для моделирования столкновений, включая: жёсткие и мягкие взаимодействия, распределения партонов, партонные ливни в начальном и конечном состоянии, многопартонные взаимодействия, функции фрагментации и распады.

1.3 Библиотека для анализа данных ROOT

ROOT [4] — это программное обеспечение, предназначенное для анализа, записи и чтения данных. Разработан в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) для физики высоких энергий. Данный пакет объектно-ориентированных программ и библиотек нашёл применение, например, и в астрофизике. ROOT снабжён удобным графическим интерфейсом для просмотра информации, имеет в себе функционал для построения гistogramм разных размерностей и графиков, имеет большой модуль с математикой и работой с векторами, а также снабжен функционалом для фитирования.

1.4 Библиотека SPDRoot

Моделирование и реконструкция событий были выполнены с помощью библиотеки SPDRoot. SPDRoot — это программный пакет написанный на языке C++ на основе фреймворка FAIRRoot. Данный пакет предоставляет широкий функционал, который позволяет генерировать первичные соударения различных частиц; включает геометрию детекторной системы SPD; моделирует прохождение частиц через вещество детектора и отклик его подсистем; содержит алгоритмы восстановления треков, кластеров, а так же средства для анализа.

Моделирование с данной библиотекой делится на три больших этапа: симуляция, реконструкция, анализ. Такое деление позволяет уменьшить общее время на анализ, путём того, что для некоторых задач обычно не нужно рассчитывать заново предыдущие этапы. Этап симуляции включает генерацию первичных событий и моделирование прохождения частиц через вещество с помощью библиотеки Geant4. Этап реконструкции включает в се-

бя моделирование отклика детекторных подсистем, восстановление треков, формирование кластеров, определение энерговыделений в калориметре. Этап анализа включает реконструкцию интересующих физических событий.

В качестве генератора столкновений в SPDRoot используется Pythia двух разных версий: 6-й и 8-й. Для моделирования прохождения частиц через вещество детектора используется библиотека Geant4 [5]. SPDRoot использует ROOT-макросы, в которых пользователь задает параметры генерации, геометрию детекторов, а так же алгоритм реконструкции.

2 Сведения о Λ -гипероне и его поляризация

2.1 Λ - и $\bar{\Lambda}$ -гипероны

В пятидесятые годы двадцатого века при изучении космических лучей было обнаружено странное явление: экспериментаторы наблюдали на трековых снимках неоднократное появление двух разноименно заряженных частиц, вылетающих из одной точки без следов материнской частицы. Станным также был тот факт, что предполагаемое время жизни сильно взаимодействующей частицы, не совпадало с измеренным. Из-за Λ -образной «вилки» распада частица и получила имя Λ , а из-за её странных свойств частицу также называли «странной». Позже, когда развилась теория кварков, кварк, который присутствует в Λ частице называли «странным», а барионы содержащие хотя бы один s кварк начали называть гиперонами.

Λ -гиперон [6] является барионом со странностью $S = -1$, это самый легкий представитель гиперонов. Он имеет массу 1115.683 ± 0.006 МэВ, среднее время жизни $(2.632 \pm 0.020) \times 10^{-10}$ с, изоспин равный нулю, спин равный $\frac{1}{2}$. У Λ -гиперона есть две основные моды распада: $p\pi^-$ и $n\pi^0$ с вероятностью распада $(63.9 \pm 0.5)\%$ и $(35.8 \pm 0.5)\%$ соответственно. В данной работе Λ -гиперон и $\bar{\Lambda}$ -гиперон восстанавливались только по моде распада на $p\pi^-$ и $\bar{p}\pi^+$, соответственно.

Рождённый в столкновениях неполяризованных пучков Λ -гиперон имеет ненулевую поляризацию вдоль нормали к плоскости реакции. Такой вид поляризации называется спонтанная поляризация в поперечной плоскости (см. раздел 2.3).

В поляризованных столкновениях, помимо поляризации, есть параметры отвечающие за корреляцию спинов начальной и конечной частиц, участвующих во взаимодействии. Одним из таких параметров является деполяризующий фактор, отвечающий за перенос поляризации. Различают продольный и поперечный переносы поляризации от начальной частицы к конечной (см. раздел 2.4 и 2.5 соответственно).

2.2 Термины и общепринятые обозначения

Поляризация частицы — это состояние частицы, когда её спин преимущественно направлен вдоль какого-либо направления. Чаще всего за выделенное направление принимают нормаль к плоскости реакции $\vec{n}$, образованную векторным произведением импуль-

сов начальной и родившейся исследуемой частицей. Данное выделенное направление часто обозначают индексом « N ». Помимо этого, есть направление вдоль импульса частицы, обозначаемое нижним индексом « L », и направление образованное векторным умножением $[\vec{N} \times \vec{L}]$, обозначаемое нижним индексом « S ».

Введенные обозначения представлены на рисунке 3 для реакции $ab \rightarrow cd$ в лабораторной системе координат, где a — налетающая частица, b — частица в мишени, c — продукт реакции, d — остаток от мишени. Эти обозначения общеприняты и детально описаны в работе [7].

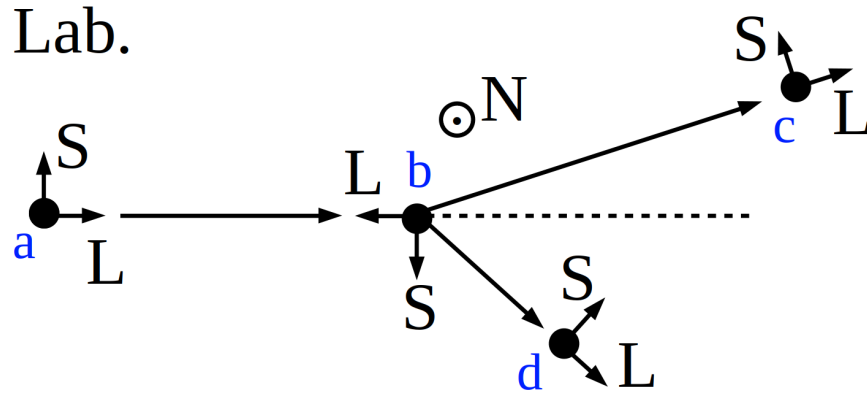


Рис. 3: Обозначения N , L , S для реакции $ab \rightarrow cd$ в лабораторной системе координат, где a — налетающая частица, b — частица в мишени, c — продукт реакции, d — остаток от мишени

Поляризацию обычно обозначают большой буквой « P » (P — polarization) с нижним индексом. Так P_Λ -поляризация лямбды, а P_b — поляризация пучка (b — beam).

Деполяризирующий фактор обозначают буквой « D » и двумя индексами снизу, которые показывают выделенные направления для начальной и конечной частицы соответственно. Сам по себе деполяризирующий фактор — это мера переноса поляризации во время перехода от начальной частицы в конечной, в нашем случае от протона из пучка к Λ -гиперону. Различают продольный перенос поляризации D_{LL} и поперечный D_{NN} и D_{TT} . О разнице между D_{NN} и D_{TT} будет написано в разделе 2.6.

2.3 Поляризация Λ -гиперона

Сначала разберём явление спонтанной поляризации Λ -гиперона для которых накоплено значительно больше экспериментальных данных чем для поляризации в поляризо-

ванных столкновениях. Спонтанная поляризация Λ -гиперона — это эффект, при котором Λ -гиперон рождается поляризованным, несмотря на отсутствие поляризации у начальных частиц реакции. Данное явление наблюдалось давно и хорошо изучено во многих работах [8, 9, 10, 11, 12].

Благодаря своему слабому двухчастичному распаду, нарушающему P -симметрию, можно легко определить поляризацию Λ -гиперона по продуктам его распада. Для этого нужно знать угол θ^* между нормалью к плоскости реакции $\vec{n}$ и импульсом протона в системе покоя Λ -гиперона $\vec{p}_p$:

$$\cos \theta^* = \cos \widehat{\vec{p}_p \vec{n}} = \frac{(\vec{p}_p \cdot \vec{n})}{|\vec{p}_p| |\vec{n}|}. \quad (1)$$

Угловое распределение Λ -гиперона имеет вид:

$$\frac{dN}{d\Omega_p} = \frac{dN_0}{d\Omega_p} (1 + \alpha_\Lambda P_\Lambda \cos \theta^*), \quad (2)$$

где α_Λ — параметр асимметрии слабого распада для Λ -гиперона, это табличная величина [6], и она составляет 0.732 ± 0.012 ; P_Λ — поляризация Λ -гиперона, $dN_0/d\Omega_p$ — угловое распределение неполяризованного Λ -гиперона.

Угловое распределение $dN_0/d\Omega_p$ в общем случае должно быть изотропно. Однако в связи с тем, что детекторы не могут покрыть полную 4π геометрию, это распределение зависит от аксептанса детектора и эффективности регистрации событий. Для учёта их влияния производится коррекция с помощью моделирования установки.

Сама же поляризация P_Λ выводится из формулы 2.

Одни из последних данных по спонтанной поляризации Λ -гиперона опубликованы коллаборацией ATLAS в 2015 году [8], рисунок 4. На рисунке также представлены данные четырех более ранних экспериментов [9, 10, 11, 12]. По оси абсцисс отложена переменная Фейнмана x_F , которая рассчитывается как $x_F = 2P_{||}/\sqrt{s}$, где $P_{||}$ компонента импульса частицы параллельная к изначальному пучку. Как можно заметить при малом параметре x_F спонтанная поляризация практически отсутствует. При увеличении x_F абсолютная величина поляризации постепенно растёт и достигает значений вплоть до 0.3.

В поляризованных столкновениях Λ -гиперон тоже рождается поляризованным. Расчёт происходит также по формуле 2, выделенное направление и рассматриваемое угло-

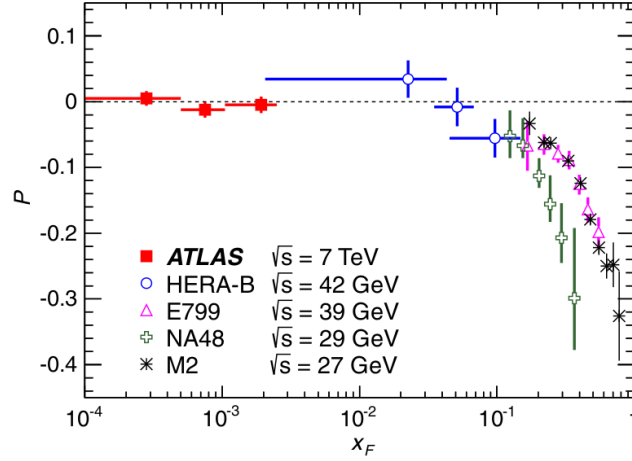


Рис. 4: Зависимость спонтанной поляризации Λ -гиперона от переменной Фейнмана x_F

ное распределение тоже совпадают. Единственным отличием является наличие поляризации пучка. Различие в поляризации Λ -гиперона при поляризованных и неполяризованных столкновениях могут свидетельствовать о наличии переноса поляризации, который будет рассмотрен в последующих разделах.

Поляризация Λ -гиперона в столкновениях поляризованных протонов на бериллиевой мишени измерялась в эксперименте на синхротроне AGS [13]. Результаты из этого эксперимента представлены на рисунке 5. Эксперимент проводился с энергией пучка 13.3 ГэВ/с и 18.5 ГэВ/с.

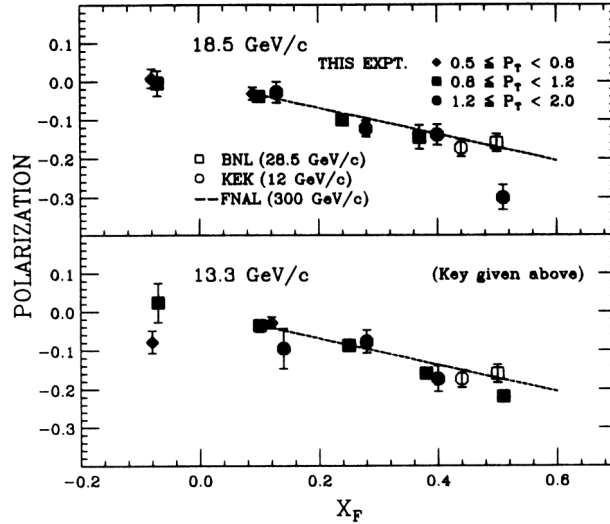


Рис. 5: Зависимость поляризации Λ -гиперона от переменной Фейнмана x_F . Сверху представлены результаты с энергией пучка 13.3 ГэВ/с. Снизу — 18.5 ГэВ/с

2.4 Продольный перенос поляризации

Введем понятия продольной и поперечной поляризации. Продольная поляризация — это преимущественная ориентация спина вдоль импульса частицы (то же самое, что и вдоль вектора $\vec{L}$). Спин, сонаправленный с импульсом, обозначают как «+», а противоположно направленный как «-».

Поперечная поляризация — это преимущественная ориентация спина перпендикулярно импульсу частицы, обычно вдоль выделенного направления $\vec{N}$. Спин сонаправленный с вектором $\vec{N}$ обозначается «↑», противоположно направленный — «↓».

Продольный перенос поляризации можно измерить, когда пучок имеет продольную поляризацию. Данный параметр характеризует зависимость продольной поляризации продукта реакции от поляризации пучка. Равенство нулю означает, что зависимости нет, а при значении равном одному, что поляризация пучка полностью передается продукту реакции. Общая формула для коэффициента продольного переноса спина имеет вид:

$$D_{LL} \equiv \frac{\sigma_{p^+p \rightarrow \Lambda^+ X} - \sigma_{p^+p \rightarrow \Lambda^- X}}{\sigma_{p^+p \rightarrow \Lambda^+ X} + \sigma_{p^+p \rightarrow \Lambda^- X}} = \frac{\Delta\sigma}{\sigma}. \quad (3)$$

Для обработки экспериментальных данных используется формула с учетом акцептанса установки (4). Здесь для расчёта продольного переноса поляризации измеряются асимметрии количества Λ -гиперонов, рождённых при разных поляризациях пучка, в малых интервалах $\cos\theta^*$:

$$D_{LL} = \frac{1}{\alpha_\Lambda P_b \langle \cos\theta^* \rangle} \frac{N^+ - RN^-}{N^+ + RN^-}, \quad (4)$$

где N^+ (N^-) обозначает выход Λ -гиперонов при положительной (отрицательной) поляризацией пучка, $R = L^+/L^-$ — отношение светимостей, $\langle \cos\theta^* \rangle$ — средний косинус θ^* в данном интервале.

На рисунке 6 представлены результаты коллаборации STAR [14] по продольному переносу поляризации в зависимости от поперечного импульса для двух наборов экспериментальных данных: 2009 года и 2015 года. Данные 2009 года были обработаны и опубликованы в статье [15]. Впоследствии коэффициент α_Λ был уточнён и результаты 2009 года были пересчитаны и опубликованы в статье [16]. Из этих результатов видно, что коэффициент продольного переноса поляризации согласуется с нулём в пределах экспериментальных

ошибок.

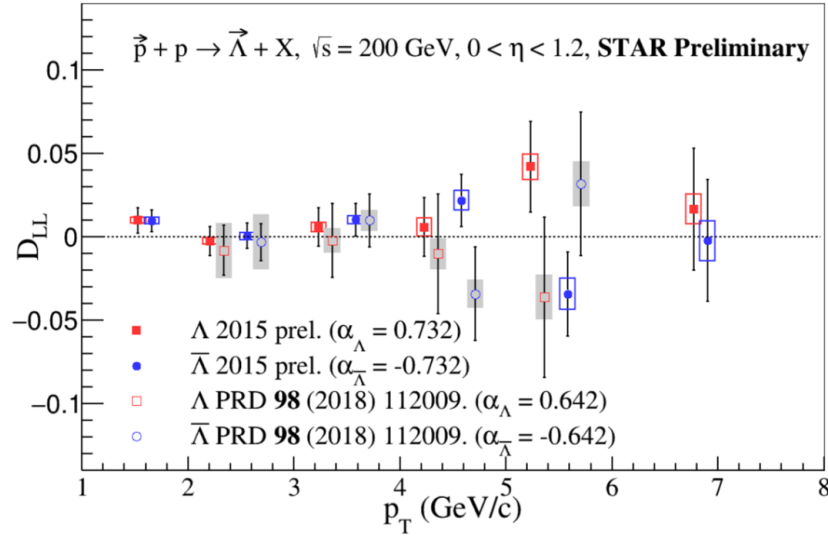


Рис. 6: Продольный перенос поляризации Λ -гиперона в зависимости от поперечного импульса P_T , рассчитанный коллаборацией STAR[14]

2.5 Поперечный перенос поляризации

Поперечный перенос поляризации можно измерить при поперечной поляризации пучка. По аналогии с продольным переносом, поперечный перенос поляризации показывает зависимость поперечной поляризации продукта реакции от поляризации пучка. В общем случае представляет собой отношение разности сечений к их сумме:

$$D_{NN} \equiv \frac{\sigma_{p^\uparrow p \rightarrow \Lambda^\uparrow X} - \sigma_{p^\uparrow p \rightarrow \Lambda^\downarrow X}}{\sigma_{p^\uparrow p \rightarrow \Lambda^\uparrow X} + \sigma_{p^\uparrow p \rightarrow \Lambda^\downarrow X}} = \frac{\Delta\sigma}{\sigma}. \quad (5)$$

Для расчёта поперечного переноса поляризации измеряются асимметрии количества Λ -гиперонов, рождённых при разных поляризациях пучка в разных полусферах. Акцептанс учитывается с помощью смены поляризации пучка на противоположную. Формула для расчёта коэффициента поперечного переноса поляризации с учётом акцептанса имеет вид:

$$D_{NN} = \frac{1}{P_b \cos \phi^*} \frac{2}{\alpha_\Lambda} \frac{(N_+^\uparrow + N_-^\downarrow) - (N_+^\downarrow + N_-^\uparrow)}{(N_+^\uparrow + N_-^\downarrow) + (N_+^\downarrow + N_-^\uparrow)}, \quad (6)$$

где $N_+^{\uparrow(\downarrow)}$ — количество Λ -гиперонов, рождённых от пучка с поляризацией смотрящий вверх(вниз) и испустивших протон в положительную полусферу относительно вектора нор-

мали к плоскости реакции, по аналогии $N_-^{\uparrow(\downarrow)}$ — количество Λ -гиперонов, испустивших протон в отрицательную полусферу, $\cos \phi^*$ — косинус угла между направлением поляризации пучка и нормалью к плоскости реакции.

Экспериментальные результаты по поперечному переносу спина представлены на рисунке 7. Точки — результаты полученные в эксперименте E704 [17] в 1997 году, звездочки — результаты эксперимента на синхротроне AGS [13], полученные в 1988 году.

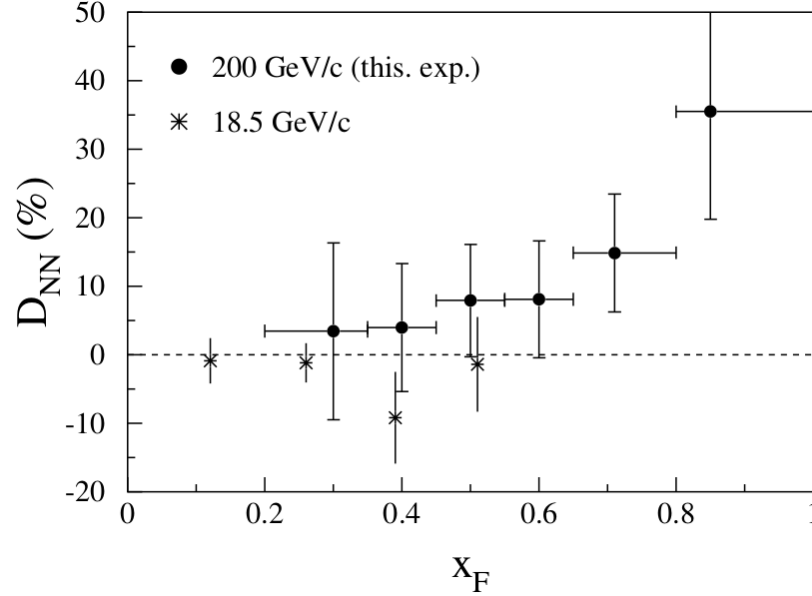


Рис. 7: Зависимость поперечного переноса поляризации D_{NN} Λ -гиперона от переменной Фейнмана x_F

Из рисунка следует, что поперечный перенос поляризации принимает значения близкие к нулю при параметре x_F больше 0 и меньше 0.5. Результаты эксперимента E704 свидетельствуют о росте D_{NN} для $x_F > 0.6$.

2.6 Коэффициент поперечного переноса поляризации D_{TT} и отличия его от D_{NN}

Альтернативный вид измерения эффектов поперечной поляризации предложен и опубликован в статье [18]. Вводится новый параметр обозначенный как D_{TT} , который, так же как и параметр D_{NN} , отвечает за поперечный перенос поляризации. Параметр D_{TT} описывает перенос поляризации от кварка, участвовавшего во взаимодействии, к конечному продукту реакции, в отличие от параметра D_{NN} , который описывает перенос поляризации

от изначальной частицы к конечному продукту реакции. В этом заключается основная разница этих двух параметров. Таким образом, для измерения параметра D_{TT} нужно оценить направление движения кварка.

Измерения параметра D_{TT} проводились коллаборацией STAR [19] и представлены на рисунке 8. Полученные данные близки к нулю, с учётом ошибок.

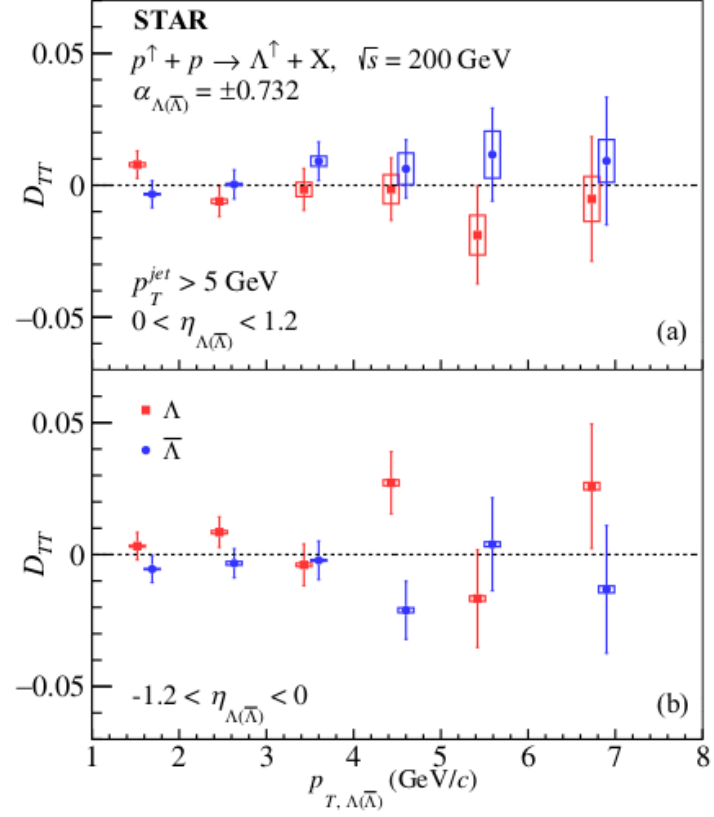


Рис. 8: Зависимость поперечного переноса поляризации D_{TT} Λ -гиперона от поперечного импульса P_T

2.7 Регистрация и критерии отбора частиц

В физике высоких энергий детекторы, используемые для регистрации частиц, состоят из нескольких систем, входящих в состав единого комплекса. Каждая система рассчитана для регистрации частиц с определенными характеристиками. Частицы, последовательно проходя через систему, оставляют определённую информацию о себе. На основе этой информации затем восстанавливаются характеристики частицы: энергия, импульс, траектория движения, удельные ионизационные потери и др.

Точку, в которой произошло первичное столкновение, называют первичной вершиной. Многие частицы, которые родились в столкновении, являются нестабильными и, проходя какое-то расстояние, распадаются. Точку распада нестабильной частицы называют вторичной вершиной. Продукты распада называют «дочерними» частицами, а частицу до распада называют «материнской» частицей.

В результате из одного столкновения может получиться большое количество частиц, которые попадут в детекторную систему. В экспериментах часто приходится выделять «сигнальные» события на огромном фоне «посторонних» событий, которых может быть в разы больше, создавая «фон». Детектор регистрирует только конечные продукты распада. Но, имея данные о них, мы можем начать реконструировать вторичные вершины, которые могли получиться в результате столкновения.

Для поиска каждой конкретной вторичной вершины, берутся кандидаты в треки продуктов её распада и аппроксимируются в одну точку, таким образом формируя кандидата вторичной вершины. В событиях, сопровождающихся рождением большого числа первичных частиц, фоном для физических сигналов, отвечающих истинным распадам короткоживущих частиц, является большое число случайных комбинаций треков, не соответствующих реальной частице. Для разделения сигнальных и фоновых событий используются различные детекторы и методы регистрации, проводят отбор событий по амплитуде и форме сигналов, по форме траекторий в детекторе и т.д. В данной работе используются три критерия отбора: вето на экстраполяцию дочерних треков в первичную вершину, длина пробега частицы до ее распада и угол коллинеарности между восстановленным импульсом и направлением частицы.

2.7.1 Критерий отбора по сходимости дочерних частиц в первичную вершину

Частицы, рождённые от Λ -гиперона, плохо экстраполируются в первичную вершину, потому что их точка рождения расположена на значительном расстоянии от первичной вершины. Вето на сходимость дочерних треков в первичную вершину является основным критерием, отсеивающим большую часть фоновых событий

2.7.2 Критерий отбора по длине пробега частицы до ее распада

Длина пробега частицы до ее распада — это расстояние, которое проходит частица от рождения до предполагаемой точки распада. За точку рождения чаще всего принимается первичная вершина. Для расчёта длины пробега частицы (L) до ее распада была использована следующая формула:

$$L = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2}, \quad (7)$$

где (x, y, z) — координаты точки рождения, (x', y', z') — координаты точки распада. Схема случая рождения Λ -гиперона в pp-столкновении с обозначением длины пробега представлена на рисунке 9.

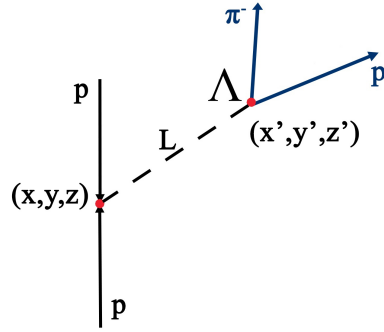


Рис. 9: Схематическое изображение случая рождения Λ -гиперона в pp-столкновении, где L — длина пробега гиперона

2.7.3 Критерий отбора по углу коллинеарности

Угол между вектором импульса частицы и вектором, соединяющим первичную и вторичную вершины, называется углом коллинеарности. Данный критерий отбирает частицы рождённые напрямую от первичной вершины, таким образом убирая комбинаторный фон. Для расчёта угла коллинеарности была использована формула:

$$\theta_{coll} = \frac{(\overline{P}_{c.m.}, \overline{P}_{dr})}{|\overline{P}_{c.m.}| |\overline{P}_{dr}|}, \quad (8)$$

где $\overline{P}_{c.m.}$ -вектор импульса частицы, $\overline{P}_{dr}$ — вектор, соединяющий первичную и вторичную вершины. Схематическое изображение представлена на рисунке 10 с обозначением угла коллинеарности.

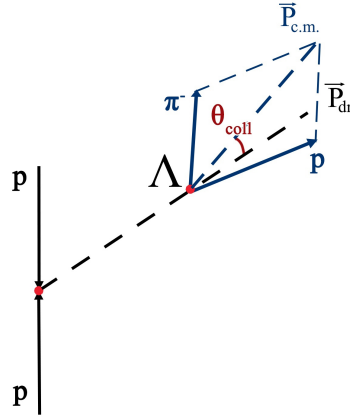


Рис. 10: Схематическое изображение случая рождения Λ -гиперона в pp - столкновении, где θ_{coll} — угол коллинеарности

3 Реконструкция Λ -гиперонов

Для анализа эффективности регистрации Λ -гиперона на установке SPD использовались централизованные наборы данных, сгенерированные с использованием вычислительных ресурсов ЦИВК ЛИТ (Центральный информационно-вычислительный комплекс Лаборатории информационных технологий ОИЯИ). В данной работе приведен анализ для двух наборов данных обозначенных внутри коллаборации как PROD2025-004 и PROD2025-020. Оба набора данных были сгенерированы с помощью библиотеки Pythia8 и включают в себя 40 миллионов pp столкновений при энергии центра масс $\sqrt{s} = 10$ и $\sqrt{s} = 27$ ГэВ соответственно. Использовалась настройка генерации $\text{minBias} = \text{all}$. Помимо отличия в энергии эти два набора данных отличаются по включенным подсистемам детекторов. В наборе данных PROD2025-004 моделирование было сделано для первой стадии детекторной установки с microMEGA в качестве центрального трекера, в наборе данных PROD2025-020 моделирование было сделано для второй стадии установки с DSSD как вершинным детектором. В данной работе весь анализ выполнен только с использованием трековой системы и вершинного детектора или центрального трекера.

3.1 Алгоритм реконструкции

Для каждого события из данной выборки, с помощью программного пакета KFparticle, отбирались два трека с противоположными зарядами. Для истинных событий искали пары (π^-, p) , $(\bar{p}, \pi^+)$ и для моделирования фоновых событий искали различные комбинации $\pi^\pm$, $K^\pm$, p и $\bar{p}$ с нулевым общим зарядом. Такие пары образовывали кандидатов в Λ - или $\bar{\Lambda}$ -гипероны. Для каждого кандидата из их продуктов распада рассчитывались масса, импульс, угол вылета, длина пробега до распада, угол коллинеарности. Также записывалась информация полученная напрямую из генератора, такая как PDG-код (Particle Data Group ID) [20] рассматриваемой частицы, PDG-код материнской частицы, импульс, угол вылета, количество хитов в детекторах. Они нужны для дальнейшей оценки того, насколько реконструированные данные совпадают со сгенерированными.

3.2 Поиск оптимальных параметров для отбора Λ кандидатов

В первую очередь рассматривались треки, которые хотя бы семь точек попадания в детекторе и имели качество аппроксимации $\chi^2/ndf < 6$. Подобные обязательные условия на треки будем далее называть критерий на качество трека и далее будем работать только с треками, удовлетворяющим этим условиям. Для качественного подавления комбинаторного фона была проведена работа по оптимизации отбора по следующим критериям: длина пробега до распада, угол коллинеарности, вето на сходимость трека к первичной вершине. Для поиска оптимальных параметров использовался критерий значимости FOM (Figure of Merit) $= S/\sqrt{S+B}$, где S — число полезных событий, а B — число фоновых событий. Большая статистика событий позволила провести детальный анализ оптимальных критериев и установить оптимальные значения параметров в зависимости от полярного угла и импульса частицы. Такие динамические критерии позволяют эффективнее подавлять фоновые события, сохраняя большую часть сигнальных. Подробные критерии для каждого участка можно увидеть в приложении А и Б для 10 и 27 ГэВ соответственно.

Распределение Арментероса-Подольянского (рис. 11) отображает, какую долю импульса относительно направления полёта V_0 -частицы уносит каждая из дочерних частиц. По оси абсцисс отложен параметр $\alpha = \frac{P_L^+ - P_L^-}{P_L^+ + P_L^-}$, где P_L^+ и P_L^- продольная составляющая импульса положительной и отрицательной частицы соответственно. По оси ординат отложен P_T — поперечный импульс рождённой частицы.

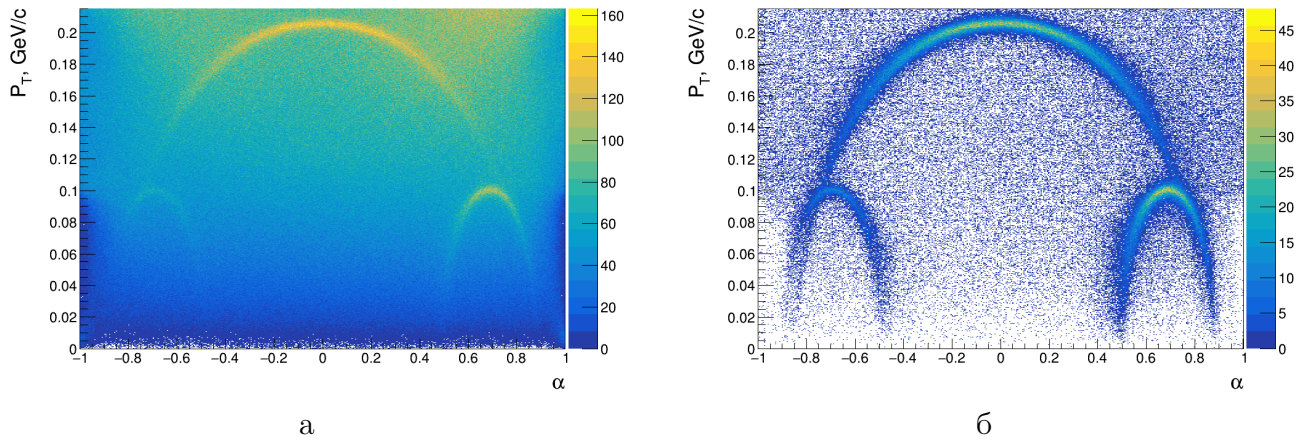


Рис. 11: Распределение Арментероса-Подольянского до применения кинематических критериев (а) и после (б)

Верхняя арка на гистограмме отображает распад K_s^0 , правая отображает распад Λ , а левая — $\bar{\Lambda}$. Как видно из рисунка 11, до включения кинематических критериев отбора на гистограмме присутствует значительное количество комбинаторного фона, а после включения мы можем чётко наблюдать три арки. В связи с тем, что при моделировании не использовались никакие детекторы для идентификации частиц, мы не можем полностью разделить частицы между собой кинематическими критериями.

Зная оптимальные критерии для отбора частиц, мы можем перейти к анализу гистограммы инвариантной массы. На рисунке 12 представлены гистограммы инвариантной массы для гипотезы Λ - и $\bar{\Lambda}$ - гиперонов на наборе данных с энергией $\sqrt{s} = 27$ ГэВ. Для фитирования использовалась сумма трёх функций Гаусса для описания сигнала и полином третьей степени для описания фона.

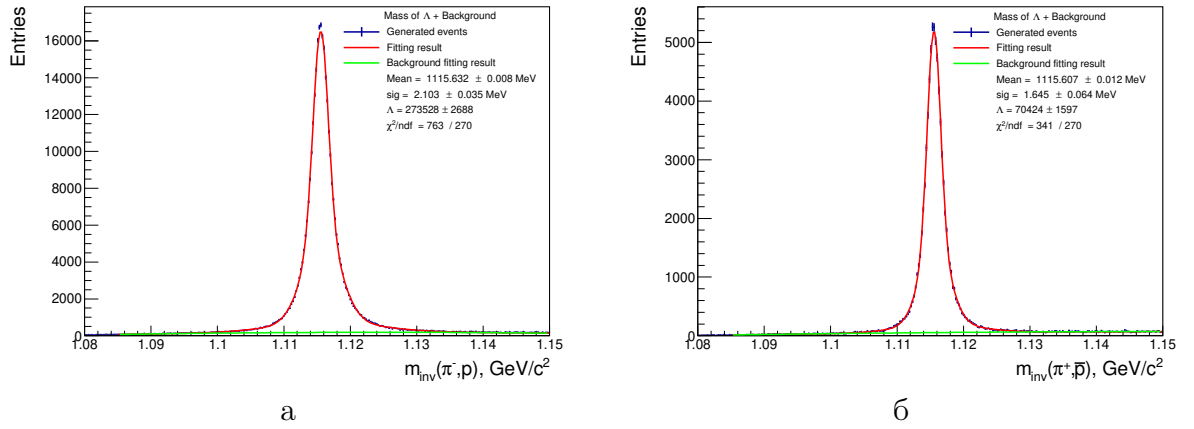


Рис. 12: Гистограмма инвариантной массы Λ - (а) и $\bar{\Lambda}$ - (б) гиперона с использованием трех функций Гаусса для фитирования данных

В результате фитирования получены инвариантные массы 1115.632 ± 0.008 МэВ и 1115.607 ± 0.012 МэВ для Λ - и $\bar{\Lambda}$ - гиперонов соответственно близки к табличному значению 1115.683 ± 0.006 МэВ. В таблице 1 представлено количество Λ - и $\bar{\Lambda}$ - гиперонов, полученные в двух наборах данных с помощью фитирования инвариантной массы.

Таблица 1: Количество Λ - и $\bar{\Lambda}$ -гиперонов, полученные в результате фитирования в двух разных наборах данных

	Λ	$\bar{\Lambda}$
27 ГэВ	273528 ± 2636	70424 ± 1597
10 ГэВ	183896 ± 1713	12646 ± 292

3.3 Реконструкция каскадных событий

Каскадными событиями обычно называют те события, где из одной вторичной вершины рождается частица, которая в дальнейшем распадается, то есть тоже образует вторичную вершину. Таким образом получается цепочка из распадов. В данной работе под каскадными событиями или распадами подразумеваются частицы, которые распадаются в процессе на лямбду, а конкретно Ξ^- , Σ^{*-} и Σ^{*+} . Поскольку для построения поляризованных функций распределения партонов желательно рассматривать частицы, рождённые непосредственно в первичной вершине, реконструкция каскадных событий важна для оценки числа Λ -гиперонов рожденных не напрямую. Помимо перечисленных выше частиц, существенный вклад в рождение Λ -гиперона вносит распад Σ^0 на $\Lambda\gamma$, который не рассматривается в данной работе, поскольку информация из калориметров не использовалась.

3.3.1 Алгоритм реконструкции каскадных событий

В реконструкции таких событий использовались все кандидаты с инвариантной массой в интервале $\pm 2\sigma$ от среднего значения. Затем к данному кандидату добавлялся трек пиона, который ещё не использовался, и с помощью пакета KFparticle формировалась новая вершина. Так с добавлением π^+ формировался кандидат в Σ^{*+} , а с добавлением трека π^- — в Ξ^- и Σ^{*-} . Информация о новых кандидатах затем записывалась в файл. Также записывался дополнительный параметр, который показывал какие кандидаты в каскады соответствуют данному кандидату в Λ -гиперон. Такая же процедура была сделана и для античастиц, для оценки прямого рождения $\bar{\Lambda}$ -гиперона.

3.3.2 Критерии отбора

Кинематические критерии применялись для отделения сигнальных событий от фоновых. Σ^* распадается за счёт сильного взаимодействия. Из-за малого времени жизни её вершина распада неотличима от первичной. Основными критериями на отбор данных частиц были коллинеарность Λ -гиперона к первичной вершине $\theta_{\Lambda \text{ coll}} < 0.01$ радиан и длина пробега до распада $L < 1$ см.

Ξ^- распадается в результате слабого взаимодействия, проходя значительное расстояние от первичной вершины, что делает её очень похожей на Λ . Основные критерии отбора в данном случае — это угол коллинеарности Ξ^- ($\theta_{\Xi^- \text{ coll}} < 0.1$ радиан) и длина пробега до

распада ($L > 1$ см).

Σ^{*-} и Ξ^- имеют одну и ту же гипотезу инвариантной массы (Λ, π^-), однако они легко сепарируются из-за разного критерия на длину пробега до распада L .

3.3.3 Оценка Λ -/ $\bar{\Lambda}$ - гиперонов, рожденных от каскадных событий

Из прошедших отбор частиц строились гистограммы инвариантных масс соответствующих частиц. Представленные ниже результаты были получены на наборе данных с энергией $\sqrt{s} = 27$ ГэВ. На рисунке 13 представлены инвариантные массы для (Λ, π^+) (слева) и (Λ, π^-) (справа) в гипотезе для Σ^* гиперонов. Фитирование выполнено с помощью полинома третьей степени для описания фоновой подложки и свертки функции Брейта-Вигнера с функцией Гаусса для описания сигнала. Ширина пика Γ в функции Брейта-Вигнера была зафиксирована в соответствии с данными PDG [21]: 36.2 МэВ для Σ^{*+} и 39.4 МэВ для Σ^{*-} .

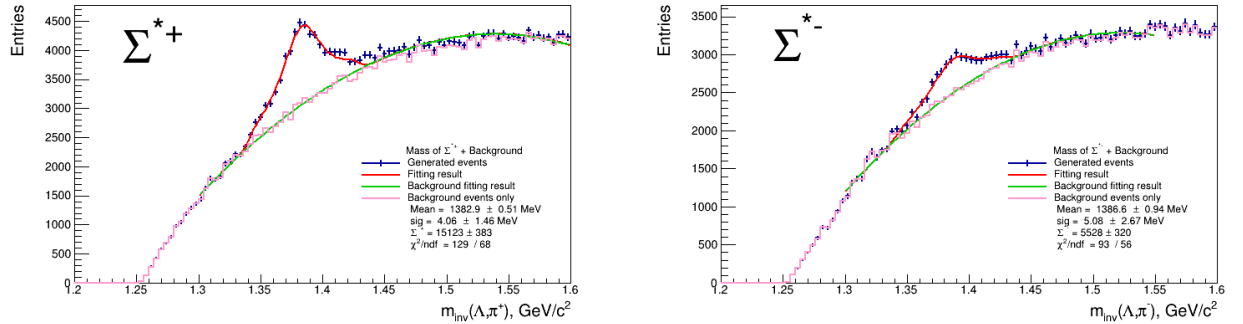


Рис. 13: Гистограмма инвариантной массы (Λ, π^+) (слева) и (Λ, π^-) (справа). Синие гистограммы — отобранные кандидаты в Σ^* гипероны, фиолетовые — фоновые события. Красная линия отображает фитирование сигнала, зелёная линия — фоновая компонента фитирования. Фитирование производилось только для синей гистограммы, гистограмма фоновых событий представлена как иллюстрация

В результате фитирования получена масса: 1382.9 ± 0.51 МэВ для Σ^{*+} и 1386.6 ± 0.94 МэВ для Σ^{*-} . Данные хорошо согласуются с табличными значениями PDG [21]: 1382.83 ± 0.34 МэВ и 1387.2 ± 0.5 МэВ для Σ^{*+} и Σ^{*-} соответственно. Получено количество частиц для Σ^{*+} и Σ^{*-} : 15123 ± 383 и 5528 ± 320 , соответственно.

На рисунке 14 представлена инвариантная масса для Ξ^- гиперона. Фитирование производилось с помощью функции Гаусса для описания сигнала.

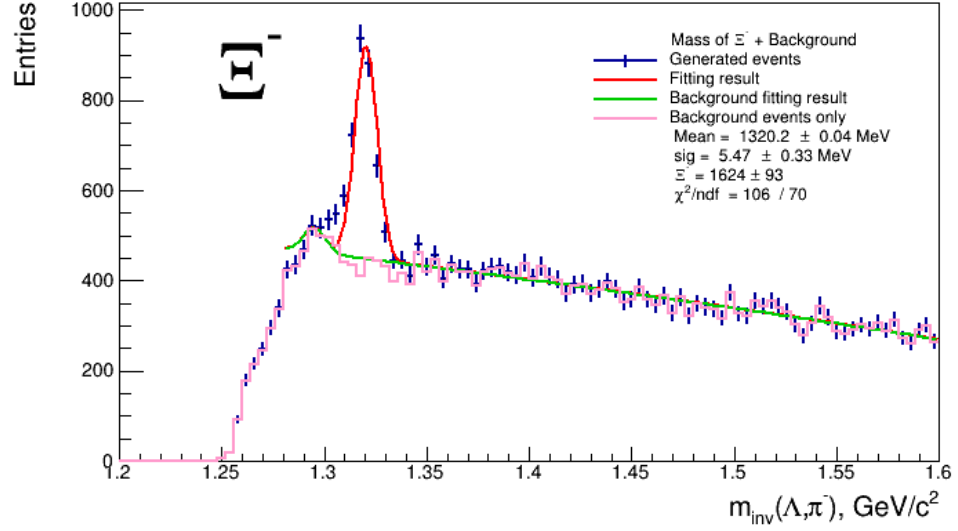


Рис. 14: Гистограмма инвариантной массы (Λ, π^-) . Синие гистограммы — отобранные кандидаты в Ξ^- гипероны, фиолетовые — фоновые события. Красная линия отображает фитирование сигнала, зелёная линия — фоновая компонента фитирования. Фитирование производилось только для синей гистограммы, гистограмма фоновых событий представлена как иллюстрация

В результате фитирования получена масса 1320.2 ± 0.04 МэВ, что близко к табличному значению PDG [22] 1321.71 ± 0.07 МэВ. Получено количество частиц: 1624 ± 93 .

Такой же анализ был сделан и для набора данных с энергией 10 ГэВ и конфигурацией первого этапа. Помимо этого данный анализ применялся для поиска соответствующих античастиц в двух наборах данных: $\bar{\Xi}^+$, $\bar{\Sigma}^{*+}$ и $\bar{\Sigma}^{*-}$. Однако фитирование инвариантной массы не производилось из-за малой статистики.

Результаты анализа для первого и второго этапа установки полученные в результате фитирования, а также данные об истинном количестве частиц, прошедших отбор представлены в таблице 2. Дополнительно в таблице представлена доля восстановленных Λ -гиперонов от общего числа.

Таблица 2: Количество каскадных событий, рождающих Λ - и $\bar{\Lambda}$ -гипероны, при энергиях $\sqrt{s} = 10$ и 27 ГэВ

Количество каскадных событий полученных в результате фитирования								
		N	$N_{\Lambda} (\bar{\Lambda})$	%		N	$N_{\Lambda} (\bar{\Lambda})$	%
Σ^{*+}	27 ГэВ	15123	273528	5,5%	10 ГэВ	8100	183896	4,4%
Σ^{*-}		5528		2,0%		2577		1,4%
Ξ^{-}		1624		0,5%		391		0,2%
$\bar{\Sigma}^{*-}$		-	70424	-		-	12646	-
$\bar{\Sigma}^{*+}$		-		-		-		-
$\bar{\Xi}^{+}$		-		-		-		-
Количество истинных каскадных событий полученный из данных генератора								
Σ^{*+}	27 ГэВ	19799	273528	7,2%	10 ГэВ	11066	183896	6,0%
Σ^{*-}		7508		2,7%		2742		1,5%
Ξ^{-}		2003		0,5%		449		0,2%
$\bar{\Sigma}^{*-}$		1994	70424	2,8%		187	12646	1,5%
$\bar{\Sigma}^{*+}$		1953		2,8%		172		1,4%
$\bar{\Xi}^{+}$		15		0,02%		6		0,04%

3.4 Оценка эффективности реконструкции

Оценка эффективности реконструкции нужна для понимания того, какую долю частиц мы можем зарегистрировать. В данной работе для Λ -гиперонов эффективность реконструкции рассматривалась как функция от импульса частицы и полярного угла.

Разбиение было выполнено с использованием распределений всех сгенерированных частиц, с условием, что в каждом интервале примерно равное число частиц. Полярный угол вылета был разбит на четыре интервала с равным числом частиц в каждом; внутри каждого углового интервала производилось дополнительное разбиение на десять импульсных интервалов. Разбиение представлено на рисунке 15.

Распределения инвариантной массы в каждом интервале представлены в приложении В. Данные распределения были фитированы суммой двух функций Гаусса

$$A_1 \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + A_2 \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right)$$

для описания сигнала и полинома второй степени для описания фона. Вычислялись среднее взвешенное для параметров μ и σ :

$$\mu = \mu_1 * \omega_1 + \mu_2 * \omega_2, \sigma = \sqrt{\sigma_1^2 * \omega_1 + \sigma_2^2 * \omega_2 + (\mu_1 - \mu_2)^2 * \omega_1 * \omega_2},$$

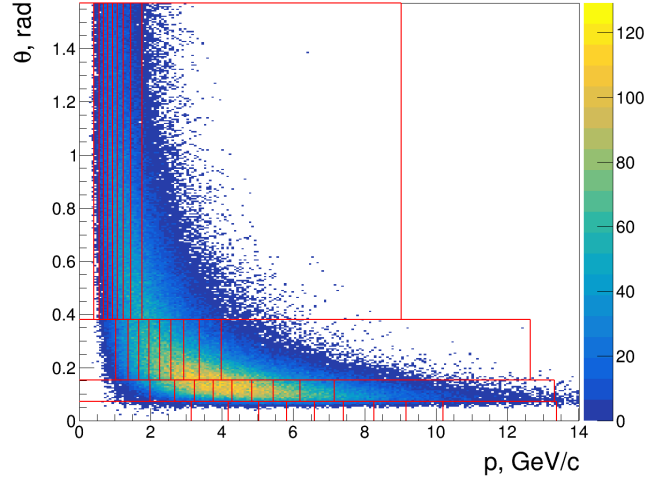


Рис. 15: Гистограмма зависимости импульса от полярного угла частицы, прошедших все критерии отбора. Красные линии отображают границы интервалов разбиения

где $\omega_1 = \frac{A_1}{A_1+A_2}$, $\omega_2 = \frac{A_2}{A_1+A_2}$. Полученные значения для μ , которое отображает массу Λ -гиперона, и σ , которая отображает ширину пика, представлены на рисунках 16 и 17 соответственно. На рисунке 16 красная линия отображает табличное значение массы PDG. Как видно, все полученные значения инвариантных масс близки к табличному значению PDG. Из рисунка 17 можно заметить, что ширина пика растёт с ростом импульса частицы. Это связано с увеличением ошибки измерения импульса при его росте.

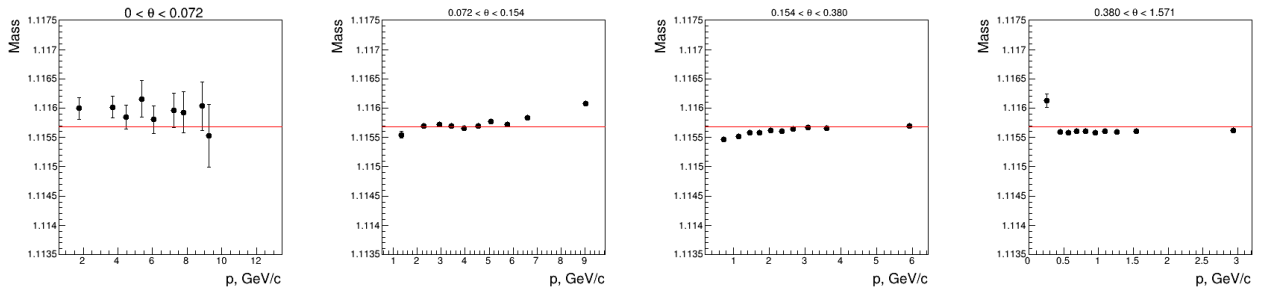


Рис. 16: Значение инвариантных масс в зависимости от импульса. Красная линия отображает табличное значение массы PDG

Для расчёта конечной эффективности регистрации, которая представляет собой отношение количества частиц, полученное из фитирования гистограмм инвариантной массы, к количеству сгенерированных частиц, использовалась формула 9. Эффективность регистрации состоит из четырёх коэффициентов:

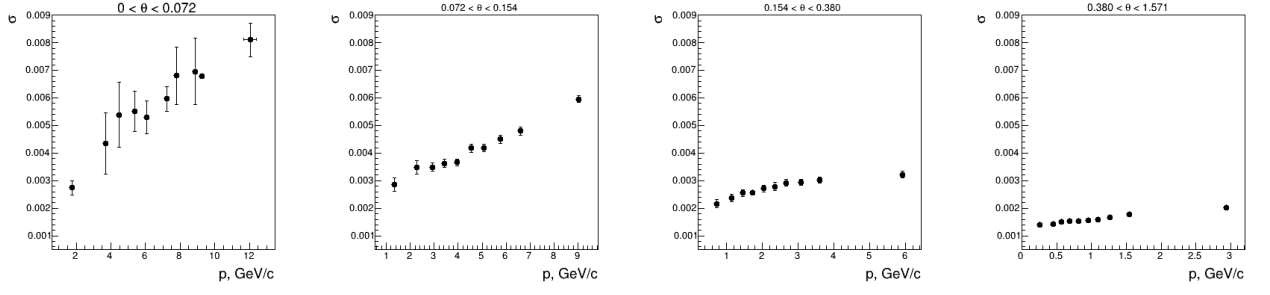


Рис. 17: Значение ширины пика инвариантной массы в зависимости от импульса

$$C = \frac{N_{reconstructed}}{N_{generated}} = C_1 * C_2 * C_3 * C_4. \quad (9)$$

Первый коэффициент (C_1) — это геометрическая эффективность детектора, его способность в целом задетектировать частицу. Рассчитывается по формуле 10, как отношение количества событий ($N_{n \text{ hits}}$), в которых оба трека имеют хотя бы 7 срабатываний в детекторе, к количеству сгенерированных событий ($N_{generated}$):

$$C_1 = \frac{N_{n \text{ hits}}}{N_{generated}}. \quad (10)$$

Второй коэффициент (C_2) отображает эффективность фитирования полученных треков, рассчитывается по формуле 11, которая представляет собой отношение количества частиц ($N_{\text{track quality}}$), прошедших критерий на качество трека, к количеству событий ($N_{n \text{ hits}}$), имеющих 7 точек срабатываний в детекторе:

$$C_2 = \frac{N_{\text{track quality}}}{N_{n \text{ hits}}}. \quad (11)$$

Третий коэффициент (C_3) отображает эффективность кинематических критериев отбора и качества фитирования инвариантной массы. Рассчитывается по формуле 12, как отношение количества частиц ($N_{\text{kinematic cuts}}$), взятых из фитирования инвариантной массы, к количеству частиц ($N_{\text{track quality}}$), удовлетворяющих критерию на качество трека:

$$C_3 = \frac{N_{\text{kinematic cuts}}}{N_{\text{track quality}}}. \quad (12)$$

Четвертый коэффициент (C_4) отображает часть частиц рождённых напрямую из первичного взаимодействия. В данной работе учитываются только каскады Σ^{*-} , Σ^{*+} и

Ξ^- . Коэффициент рассчитывается по формуле 13, как отношение разницы количества Λ -гиперонов ($N_{\text{kinematic cuts}}$) и количества каскадных частиц (N_{cascades}) к количеству частиц Λ -гиперонов ($N_{\text{kinematic cuts}}$), взятых из фитирования инвариантных масс:

$$C_4 = \frac{N_{\text{kinematic cuts}} - N_{\text{cascades}}}{N_{\text{kinematic cuts}}}. \quad (13)$$

Полученные коэффициенты в зависимости от импульса для 4-х интервалов по полярному углу представлены на рисунке 18. Где чёрные точки (C) — эффективность регистрации Λ -гиперонов, красные (C_1) — геометрическая эффективность, зелёные (C_2) — эффективность фитирования треков, синие (C_3) — эффективность кинематических критериев, розовые (C_4) — доля частиц рожденных напрямую. Из графиков видно, что эффективность регистрации растёт, с увеличением полярного угла. Малый процент регистрации при низких углах вылета и высоком импульсе можно объяснить тем, что большая часть частиц улетает в ионопровод и не попадает в детектирующие устройства.

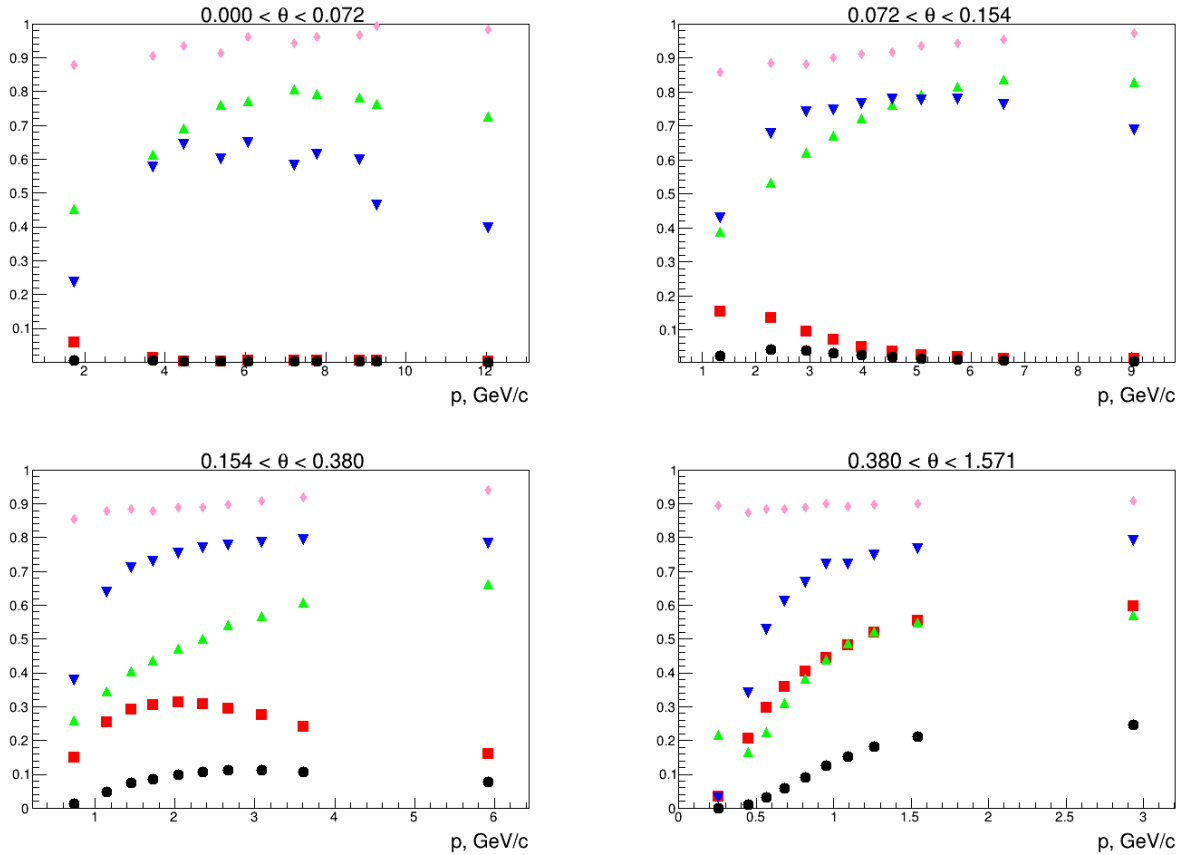


Рис. 18: Эффективность регистрации Λ -гиперона в зависимости от импульса для четырёх интервалов по полярному углу

4 Генерация поляризованных Λ -гиперонов в SPDRoot

В физике высоких энергий существует большое количество генераторов первичных взаимодействий с разными моделями: Pythia, FTF, SANC и многие др. К сожалению, генераторов со столкновениями поляризованных адронов нет, поэтому было решено адаптировать генератор Pythia8 для этих задач.

4.1 Алгоритм для создания набора данных с поляризованным Λ -гипероном

Для получения поляризованных событий на базе генератора Pythia8 был разработан следующий алгоритм, с использованием метода Неймана. Метод Неймана (rejection sampling) — универсальный способ моделирования случайных величин с заданной плотностью вероятности $f(x)$. Его суть заключается в генерации двух случайных чисел, равномерно распределённых на отрезке $[0, 1]$. Первое случайное число x_1 масштабируется на интересующий диапазон $[a, b]$, $x'_1 = a + x_1 * (b - a)$; а второе число x_2 масштабируется на максимум в нашем распределении плотности вероятности M_0 , то есть $x'_2 = M_0 * x_2$. Затем события не прошедшие проверку $f(x'_1) \leq x'_2$ отбрасываются. В данном алгоритме как случайное число x_1 выступало само сгенерированное событие, а случайное число x_2 генерировалось отдельно и домножалось на свой M_0 в зависимости от диапазона x_F .

Случайно сгенерированное событие проверялось на наличие в нем Λ -гиперона и что он распался на пару $p\pi^-$. Зная импульс протона в пучке и Λ -гиперона считалась нормаль к плоскости реакции, с помощью векторного произведения. Если импульс протона и Λ -гиперона образовывали между собой острый угол, то брался импульс другого пучка протонов. Таким образом x_F всегда считался положительным. После этого рассчитывался импульс протона в системе центра масс Λ -гиперона и считался $\cos\theta^*$ по формуле 1. Распределение значений $\cos\theta^*$ должно представлять собой прямую линию с наклоном, где наклон пропорционален поляризации $(1 + \alpha_\Lambda * P_\Lambda * \cos(\theta^*))$, поэтому случайная величина x_2 домножалась на максимум $\frac{-1 * P_\Lambda}{2\alpha_\Lambda}$. Примеры распределений представлены для первого интервала с поляризацией 0% на рисунке 19а и последнего с поляризацией -32% на рисунке 19б.

Для задачи поляризации были определены 7 точек в интервалах по переменной x_F . Информация по интервалам и значениям поляризации представлена на таблице 3. Зна-

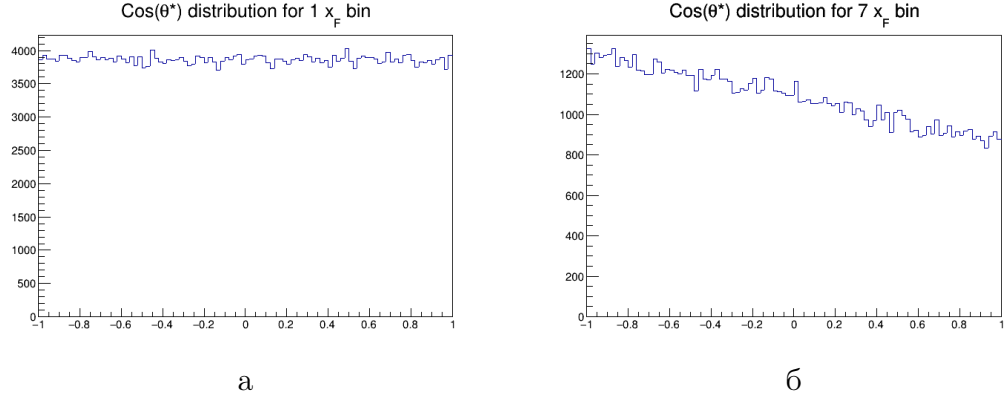


Рис. 19: Распределения $\cos(\theta^*)$ для первого (а) и последнего (б) интервалов по x_F

чение поляризации подбирались такими, чтобы хорошо согласовывались с данными экспериментов M2 (Fermilab) [9] и E799 (Fermilab) [10]. Подобранные значения поляризации, полученные после генерации и данные из экспериментов представлены на рисунке 20. Расчёты были сделаны для набора данных в 1 миллион событий. Данные, полученные после генерации, согласуются с заданными значениями в пределах ошибок.

Таблица 3: Интервалы по переменной Фейнмана и значение поляризации в этих интервалах.

x_F	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	0.5 - 0.65	0.65 - 1
P_Λ , %	0	-2	-5	-10	-15	-22	-32

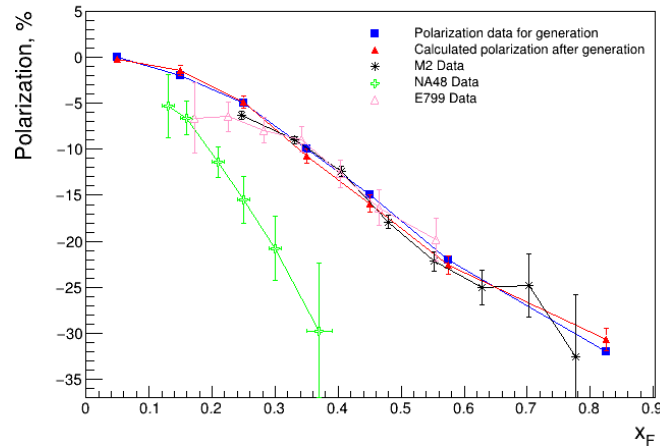


Рис. 20: Зависимость поляризации Λ -гиперона от x_F . Заданные значения — синие точки, поляризация после генерации — красные. Черные точки — данные эксперимента M2 [9], зеленые - NA48 [11], розовые — E799 [10]. Красные и синие точки совпадают в пределах ошибок

4.2 Результаты извлечения поляризации после реконструкции событий

Описанный выше алгоритм был успешно имплементирован в SPDRoot. Было сгенерировано 1 400 000 событий pp столкновений с энергией центра масс $\sqrt{s} = 27$ ГэВ, в каждом из которых родился Λ -гиперон. Все события прошли процесс преобразования сгенерированных треков в отклики детекторов и последующее восстановление в реконструированные треки, написанный в библиотеке SPDRoot. Затем применялся алгоритм восстановления Λ -гиперона описанный выше в главе 3.1. Расчёт поляризации выполнялся только для Λ в интервале $\pm\sigma$ от пика инвариантной массы $p\pi^-$. Поляризация после генерации и после реконструкции считалась следующим образом:

$$P_{\Lambda} = \frac{2}{\alpha_{\Lambda}} \frac{N_{up} - N_{down}}{N_{up} + N_{down}}, \quad (14)$$

где α_{Λ} — параметр слабого распада для Λ -гиперона, N_{down} — количество событий в гистограмме $\cos\theta^*$ в интервале $[-1, 0]$, N_{up} — количество событий в гистограмме $\cos\theta^*$ в интервале $[0, 1]$. Данный метод расчёта был представлен в статье [13]. Полученные результаты расчётов зависимости поляризации Λ -гиперона от x_F показаны на рисунке 21. Данные, полученные после генерации, расходятся с заданными значениями в пределах ошибок. Так же видно, что данные после реконструкции отклоняются от заданных значений. Это можно объяснить примесью неполяризованных Λ -гиперонов из распадов других частиц.

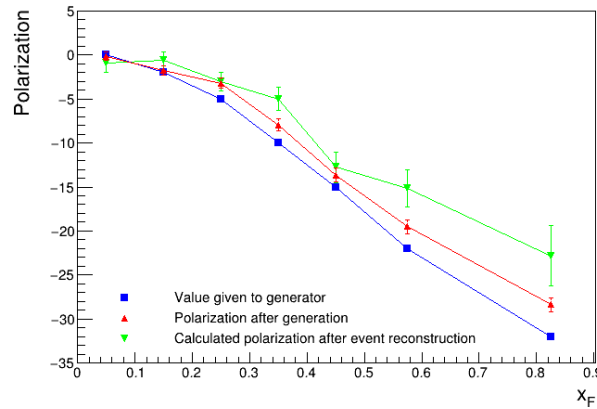


Рис. 21: Зависимость поляризации Λ -гиперона от x_F для заданных значений — синие точки; данные из генерации — красные точки; и данные из реконструкции — зелёные точки. Красные и синие точки не совпадают в пределах ошибок

Заключение

Представлен расчёт эффективности регистрации Λ -гиперонов как функция импульса и угла вылета частицы. Эффективность регистрации растёт с увеличением полярного угла и достигает $\approx 25\%$ для частиц с большим импульсом, попадающих в центральную цилиндрическую часть детектора. Представленные данные показывают приемлемый уровень регистрации Λ -гиперонов в установке SPD. Также была дана количественная оценка частиц на энергиях $\sqrt{s} = 10$ и $\sqrt{s} = 27$ ГэВ для конфигурации детектора первого и второго этапа. Количество Λ -гиперонов — 183896 ± 1713 и 273528 ± 2636 на первом и втором этапе соответственно, количество $\bar{\Lambda}$ -гиперонов — 12646 ± 292 и 70424 ± 1597 на первом и втором этапе соответственно. Представленное количество Λ - и $\bar{\Lambda}$ -гиперонов соответствует набору данных за 200 и 10 секунд для первом и втором этапе соответственно. Помимо этого сделана реконструкция каскадных событий, а именно Σ^{*-} , Σ^{*+} и Ξ^- , для оценки вклада непрямого рождения Λ -гиперонов.

Разработан и имплементирован в программное обеспечение эксперимента метод генерации Λ -гиперонов со спонтанной поперечной поляризацией. С помощью данного метода было сгенерировано и реконструировано 1.4 миллионов событий pp столкновений с энергией центра масс $\sqrt{s} = 27$ ГэВ в каждом из которых был рождён Λ -гиперон.

Список литературы

- [1] G. V. Trubnikov, N. N. Agapov, V. Alexandrov, et al. // *Project of the Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA) at JINR* // Conf. Proc. C 0806233 (2008).
- [2] SPD collaboration // *Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA* // (2023)
- [3] A comprehensive guide to the physics and usage of PYTHIA 8.3 // <https://arxiv.org/abs/2203.11601>
- [4] ROOT - An Object-Oriented Data Analysis Framework. // URL: <http://root.cern.ch>.
- [5] S. Agostinelli et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research // *GEANT4 - a simulation toolkit* // A. 2003. Vol. 506.Pp. 250-303.
- [6] R.L. Workman et al. (Particle Data Group)// *Λ baryons* // Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022)
- [7] Ashkin, E. Leader, M. L. Marshak, J. B. Roberts, J. Soffer, and G. H. Thomas // *Convention for spin parameters in high energy scattering experiments* // AIP Conference Proceedings 42, 142 (1978); <https://doi.org/10.1063/1.31281>
- [8] G. Aad et al. (ATLAS Collaboration)// *Measurement of the transverse polarization of Λ and $\bar{\Lambda}$ hyperons produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector* // Phys. Rev. D 91, 032004 (2015).
- [9] B. Lundberg et al. // *Polarization in inclusive Λ and $\bar{\Lambda}$ production at large p_T* // Phys. Rev. D 40, 3557 (1989).
- [10] E. Ramberg et al. (E799) // *Polarization of Λ and $\bar{\Lambda}$ produced by 800-GeV protons* // Phys. Lett. B 338, 403 (1994).
- [11] V. Fanti et al. (NA48) // *A measurement of the transverse polarization of Λ -hyperons produced in inelastic pN -reactions at 450 GeV proton energy* // Eur. Phys. J. C 6, 265 (1999)

- [12] I. Abt et al. (HERA-B) // *Polarization of Lambda and Anti-Lambda in 920 GeV Fixed-Target Proton-Nucleus Collisions* // Phys. Lett. B 638, 415 (2006).
- [13] B. Bonner et al // *Spin parameters measurements in Λ and K_S production* // Phys. Rev. D38, 729 (1988)
- [14] Yike Xu (STAR collaboration) // *Longitudinal and Transverse Spin Transfer of Λ and $\bar{\Lambda}$ Hyperons in Polarized $p+p$ Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV at RHIC-STAR* //SciPost Phys.Proc. 8 (2022) 125
- [15] Adam, Jaroslav et al. (STAR Collaboration) // *Improved measurement of the longitudinal spin transfer to Λ and $\bar{\Lambda}$ hyperons in polarized proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV* // Phys. Rev. D 98, 112009 (2018), doi:10.1103/PhysRevD.98.112009.
- [16] Yi Yu (STAR collaboration) // *Measurement of longitudinal spin transfer of the $\Lambda(\bar{\Lambda})$ hyperon in polarized $p+p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV at RHIC-STAR* // JPS Conf.Proc. 37 (2022) 020303
- [17] A. Bravar et al. The E704 Collaboration // *Spin Transfer in Inclusive Λ^0 Production by Transversely Polarized Protons at 200 GeV/c* // FERMILAB-Pub-96/393-E
- [18] John C. Collins, Steve F. Heppelmann, Glenn A. Ladinsky // *Measuring transversity densities in singly polarized hadron–hadron and lepton–hadron collisions* // Nuclear Physics B 420 (1994) 565–582
- [19] STAR collaboration // *Longitudinal and transverse spin transfer to Λ and $\bar{\Lambda}$ hyperons in polarized $p+p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV* // PHYSICAL REVIEW D 109, 012004 (2024)
- [20] R.L. Workman et al. (Particle Data Group) // *Monte Carlo Particle Numbering Scheme* // Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022)
- [21] S. Navas et al. (Particle Data Group) // *$\Sigma(1385)$ baryons* // Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022)
- [22] R.L. Workman et al. (Particle Data Group) // *Ξ^- baryons* // Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022)

Приложение А

Таблица 4: Кинематические критерии отбора Λ -гиперона в столкновениях с энергией центра масс $\sqrt{s} = 10$ ГэВ

Интервал по θ , рад		0 – 0.185										
Интервал по P , ГэВ/с		0-1.2	1.2-1.5	1.5-1.8	1.8-2.1	2.1-2.4	2.4-2.6	2.6-2.9	2.9-3.2	3.2-3.5	3.5-4.8	
$\chi^2_{tr1 \text{ to PV}}$		>8	>8	>8	>8	>5	>5	>5	>5	>5	>5	
$\chi^2_{tr2 \text{ to PV}}$		>8	>8	>8	>8	>5	>5	>5	>5	>5	>5	
L , см		>1	>1	>1.5	>2	>2	>2	>2	>2	>3	>3	
θ_{coll} , рад		<0.02	<0.02	<0.02	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	
Интервал по θ , рад		0.185 – 0.361										
Интервал по P , ГэВ/с		0-0.8	0.8-1.1	1.1-1.3	1.3-1.5	1.5-1.7	1.7-1.9	1.9-2.1	2.1-2.4	2.4-2.7	2.7-4.7	
$\chi^2_{tr1 \text{ to PV}}$		>8	>8	>8	>8	>6	>6	>6	>6	>6	>6	
$\chi^2_{tr2 \text{ to PV}}$		>8	>8	>8	>8	>6	>6	>6	>6	>6	>6	
L , см		>1	>1	>1	>1.5	>2	>2	>2	>2	>2	>2	
θ_{coll} , рад		<0.04	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	
Интервал по θ , рад		0.361 – 0.710										
Интервал по P , ГэВ/с		0-0.5	0.5-0.7	0.7-0.9	0.9-1	1-1.1	1.1-1.3	1.3-1.5	1.5-1.7	1.7-1.9	1.9-4.6	
$\chi^2_{tr1 \text{ to PV}}$		>8	>8	>8	>7	>7	>7	>7	>7	>7	>7	
$\chi^2_{tr2 \text{ to PV}}$		>8	>8	>8	>7	>7	>7	>7	>7	>7	>7	
L , см		>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1.5	>2	
θ_{coll} , рад		<0.025	<0.025	<0.025	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.015	<0.015	<0.015	
Интервал по θ , рад		0.710 – 1.571										
Интервал по P , ГэВ/с		0-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.1	1.1-1.3	1.3-4.1	
$\chi^2_{tr1 \text{ to PV}}$		>8	>8	>8	>8	>8	>8	>8	>8	>8	>6	
$\chi^2_{tr2 \text{ to PV}}$		>8	>8	>8	>8	>8	>8	>8	>8	>8	>6	
L , см		>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1.5	
θ_{coll} , рад		<0.03	<0.03	<0.03	<0.025	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.015	<0.015	

Приложение Б

Таблица 5: Кинематические критерии отбора Λ -гиперона в столкновениях с энергией центра масс $\sqrt{s} = 27$ ГэВ

Интервал по θ , рад		0 – 0.072										
Интервал по P , ГэВ/с		0-3.1	3.1-4.1	4.1-5	5-5.8	5.8-6.6	6.6 - 7.4	7.4-8.2	8.2-9.1	9.1-10.2	10.2-13.3	
$\chi^2_{\text{tr1 to PV}}$		>10	>10	>10	>9	>8	>8	>8	>8	>8	>8	
$\chi^2_{\text{tr2 to PV}}$		>10	>10	>10	>9	>8	>8	>8	>8	>8	>8	
L , см		>2.6	>2.6	>2.6	>2.8	>3	>3	>3.5	>3.5	>3.5	>3.5	
θ_{coll} , рад		<0.014	<0.014	<0.014	<0.014	<0.014	<0.014	<0.014	<0.014	<0.014	<0.014	
Интервал по θ , рад		0.072 – 0.154										
Интервал по P , ГэВ/с		0-1.9	1.9-2.6	2.6-3.2	3.2-3.7	3.7-4.2	4.2-4.8	4.8-5.4	5.4-6.2	6.2-7.1	7.1-13.3	
$\chi^2_{\text{tr1 to PV}}$		>10	>10	>10	>10	>10	>8	>8	>8	>8	>8	
$\chi^2_{\text{tr2 to PV}}$		>10	>10	>10	>10	>10	>8	>8	>8	>8	>8	
L , см		>2	>2	>2	>2	>2	>2	>2	>2	>2	>3	
θ_{coll} , рад		<0.015	<0.015	<0.015	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
Интервал по θ , рад		0.154 – 0.380										
Интервал по P , ГэВ/с		0-1.0	1.0-1.3	1.3-1.6	1.6-1.9	1.9-2.2	2.2-2.5	2.5-2.9	2.9-3.3	3.3-3.9	3.9-12.6	
$\chi^2_{\text{tr1 to PV}}$		>10	>10	>10	>10	>10	>8	>8	>8	>8	>8	
$\chi^2_{\text{tr2 to PV}}$		>10	>10	>10	>10	>10	>8	>8	>8	>8	>8	
L , см		>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1.5	>1.5	>1.5	>1.5	
θ_{coll} , рад		<0.015	<0.015	<0.015	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.011	<0.011	
Интервал по θ , рад		0.380 – 1.571										
Интервал по P , ГэВ/с		0-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.8	0.8-0.9	0.9-1	1-1.2	1.2-1.4	1.4-1.7	1.7-9	
$\chi^2_{\text{tr1 to PV}}$		>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10	
$\chi^2_{\text{tr2 to PV}}$		>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10	
L , см		>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1.5	
θ_{coll} , рад		<0.02	<0.02	<0.02	<0.015	<0.015	<0.015	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	

Приложение В

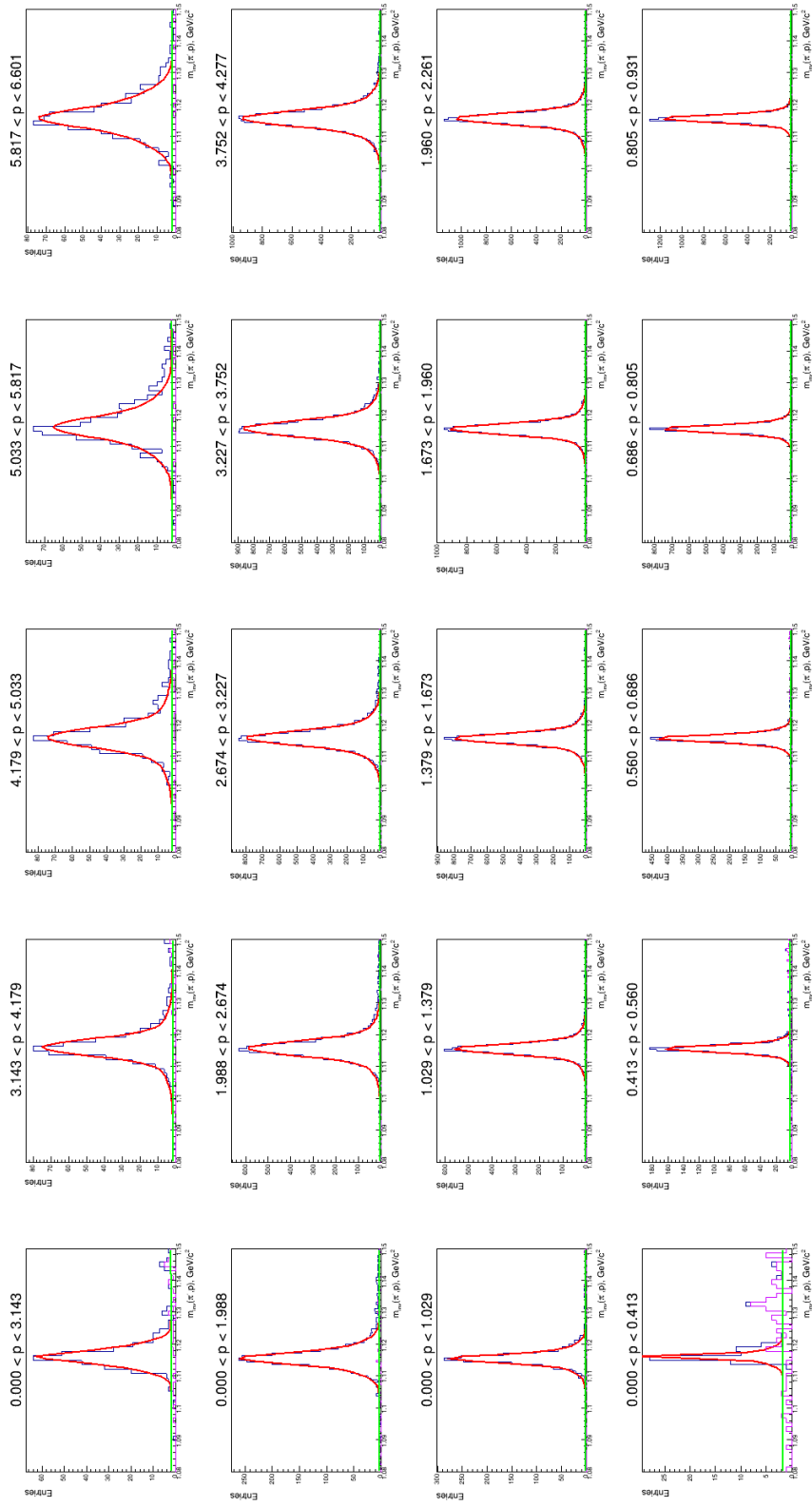


Рис. 22: Гистограммы распределения инвариантных масс (p, π^-) для каждого интервала в разбиении по полярному углу (сверху вниз) и по импульсу первые 5 интервалов (слева направо), продолжение разбиения по импульсу на следующей странице. Синие гистограммы — отобранные кандидаты в Λ -гиперон, фиолетовые — фоновые события. Красная линия отображает фитирование сигнала, зелёная линия — фоновая компонента фитирования. Фитирование производилось только для синей гистограммы, гистограмма фоновых событий представлена как иллюстрация

Продолжение приложения В

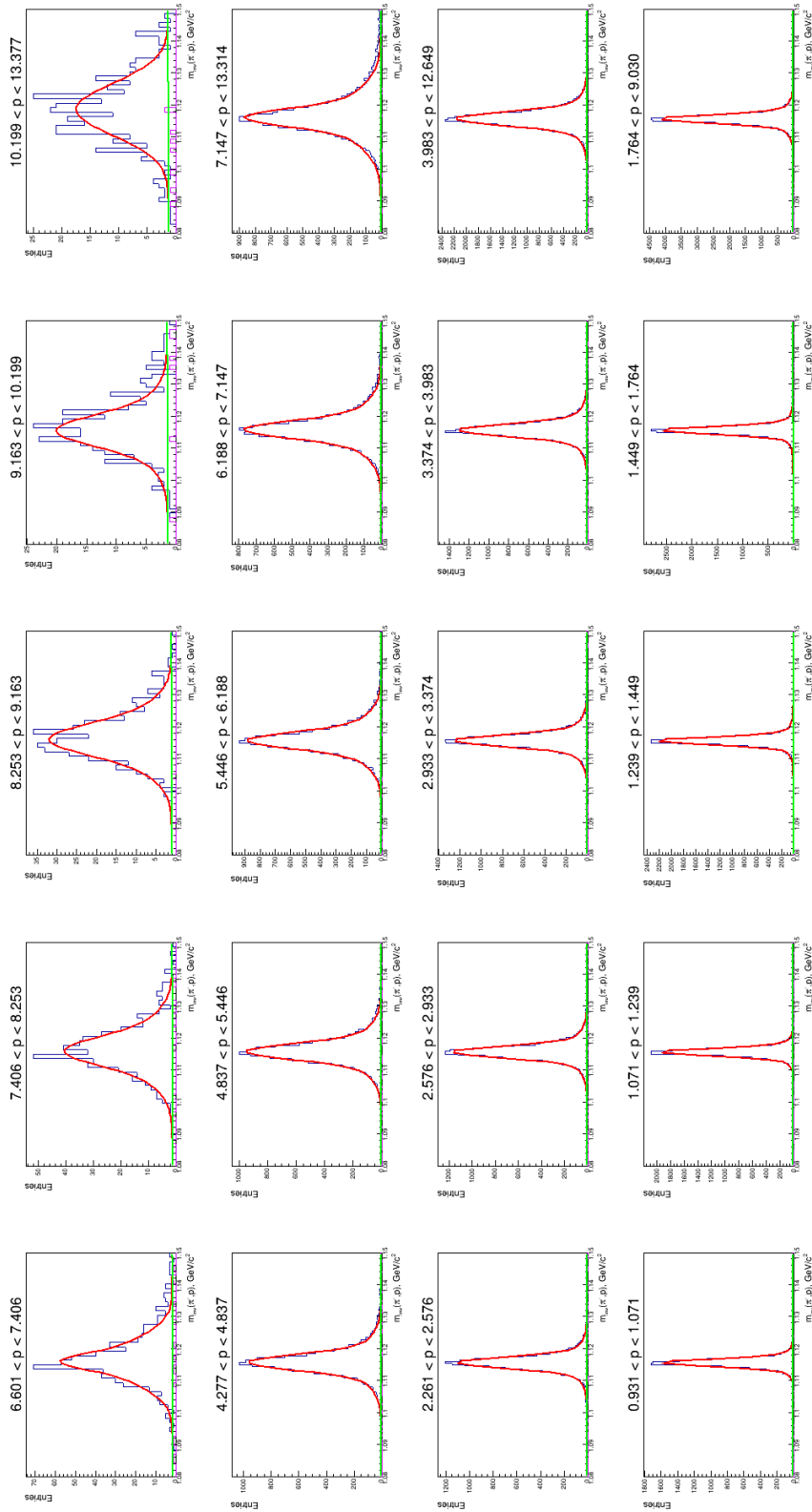


Рис. 23: Гистограммы распределения инвариантных масс (p, π^-) для каждого интервала в разбиении по полярному углу (сверху вниз) и по импульсу последние 5 интервалов (слева направо). Синие гистограммы — отобранные кандидаты в Λ -гиперон, фиолетовые — фоновые события. Красная линия отображает фитирование сигнала, зелёная линия — фоновая компонента фитирования. Фитирование производилось только для синей гистограммы, гистограмма фоновых событий представлена как иллюстрация

Согласие на предоставление права использования произведения

1. Я, Губачев Даниил Александрович, (далее – «Автор»), действующий от своего имени, обязуюсь предоставить федеральному государственному бюджетному образовательному учреждению высшего образования «Университет «Дубна» (далее – «Пользователь») право использования произведения в установленных настоящим Соглашением пределах.
2. Объектом авторских прав, право использования которого предоставляется по настоящему Соглашению, является выпускная квалификационная работа «Изучение эффективности реконструкции и моделирование поляризации Λ -гиперонов на установке SPD/NICA», в дальнейшем именуемая «Произведение».
3. Основные условия предоставления прав на использование Произведения:
 - 3.1 Разрешенные способы использования Произведения:
 - включение Произведения в цифровой виде в электронно-библиотечную систему университета (филиал);
 - извлечение метаданных Произведения и дальнейшее их использование;
 - создание страховых электронных копий Произведения на материальных носителях (CD-, DVD-дисках и т.п.) для хранения в библиотечной системе университета (филиала);
 - доведение Произведения до всеобщего сведения, включая использование в открытых и закрытых сетях (в открытых сетях – в аннотированном виде, в закрытых сетях – в объеме электронной версии Произведения, представленной Автором).
 - 3.2 Территория использования: на территории всего мира.
 - 3.3 Срок использования: в течении срока действия исключительных прав.
 - 3.4 Право сублицензирования и дальнейшей передачи полученных прав: без права сублицензирования и передачи прав.
 - 3.5 Вознаграждение за предоставление лицензии: предоставляется безвозмездно.
4. Автор гарантирует идентичность передаваемой электронной копии Произведения и печатного варианта с учетом права Автора на изъятие из электронной копии Произведения производственных, технических, экономических, организационных и других сведений, в том числе о результатах интеллектуальной деятельности в научно-технической сфере, о способах осуществления профессиональной деятельности, которые имеют действительную или потенциальную коммерческую ценность в силу неизвестности их третьим лицам.
5. Автор гарантирует, что подписание настоящего Соглашения не приведет к нарушению авторских прав интеллектуальной собственности третьих лиц.

_____/_____/

подпись Фамилия И.О.

" ____ " _____ 20 ____ г.