

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Инженерно-физический институт

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема: Исследование регистрации  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$  гиперонов в эксперименте  
SPD NICA

Ф.И.О. студента Губачев Даниил Александрович

Группа 4123 Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика  
и технологии

Направленность (профиль) образовательной программы

Физика ядерных реакций низких энергий

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. А.Ю. Корзнев /  
*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 – бакалаврскую работу

**Тема:** Исследование регистрации  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$  гиперонов в эксперименте SPD NICA

Утверждена приказом № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**Ф.И.О. студента** Губачев Даниил Александрович

**Группа** 4123 **Направление подготовки** 14.03.02 Ядерные физика и технологии

**Направленность (профиль) образовательной программы**

Физика ядерных реакций низких энергий

**Выпускающая кафедра** Ядерная физика

Дата выдачи задания " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

Дата завершения  
выпускной квалификационной работы " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

г. Дубна

## Исходные данные к работе

Программный пакет SPDR00T с проработанной геометрией детекторной системы SPD, программный пакет для генерации событий в физике высоких энергий Pythia, программный пакет для анализа данных ROOT, научная литература по теме.

## Результаты работы:

1. Содержание пояснительной записки (перечень рассматриваемых вопросов)

Произведён отбор  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$  из общего числа частиц, определены оптимальные параметры отбора. Рассчитана эффективность регистрации, как функция от импульса и как функция от импульса и угла вылета частицы.

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 SPD (Spin Physics Detector) NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) - перспективный проект с обширной физической программой, цель которой – это изучение спиновой структуры нуклонов. В эксперименте планируется столкновение поляризованных пучков протонов и дейтронов. Одной из важных частиц рождаемых в таких столкновениях является  $\Lambda$ -гиперон. Примечательна она тем, что уже хорошо изучена и по её поляризации можно предположить поляризацию исходного процесса. На данном этапе эксперимента одна из основных задач – это определение параметров отбора частиц, рождаемых в столкновениях, и оценка их регистрации в детекторной системе. В данной работе представлены результаты расчёта эффективности регистрации  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$  гиперонов.

## Abstract

The SPD (Spin Physics Detector) NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) experiment is a promising project with an extensive physics program aimed at studying the spin structure of nucleons. The experiment involves the collision of polarized beams of protons and deuterons. One of the important particles produced in such collisions is the  $\Lambda$ -hyperon. It is noteworthy because it has already been well studied, and its polarization can indicate the polarization of the original process. At this stage of the experiment, one of the main tasks is to determine the parameters for the selection of the particles produced in the collisions and to evaluate their registration in the detector system. This paper presents the results of the calculation of the detection efficiency of  $\Lambda$  and  $\bar{\Lambda}$  hyperons.

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>6</b>
1.1	Система детекторов SPD . . . . .	6
1.2	Генератор событий Pythia8 . . . . .	8
1.3	Библиотека для анализа данных ROOT . . . . .	9
1.4	Библиотека SPDRROOT . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Теория</b>	<b>10</b>
2.1	$\Lambda$ и $\bar{\Lambda}$ гипероны . . . . .	10
2.2	Передача спина при поляризованных столкновениях . . . . .	10
2.3	Регистрация и методы отбора частиц . . . . .	12
2.3.1	Критерий отбора по длине пробега частицы до ее распада . . . . .	13
2.3.2	Критерий отбора по углу коллинеарности . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Набор и анализ данных</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Поиск оптимальных параметров для отбора <math>\Lambda</math> кандидатов</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Оценка эффективности реконструкции</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>Заключение</b>	<b>27</b>
	<b>Список литературы</b>	<b>28</b>

# 1 Введение

Эксперимент SPD NICA нацелен на изучение спиновой структуры барионов, в частности вклад спинов кварков и глюонов в спин бариона. Эксперимент будет проводиться на встречных поляризованных пучках протонов и дейтронов. Важной задачей в таком эксперименте является определение поляризации продуктов столкновения. Для этого хорошо подходит  $\Lambda$ -гиперон, рождаемый в таких событиях.  $\Lambda$ -гиперон изучался во многих экспериментах, в частности, хорошо изучена его поляризация [1][2][3][4] и передача спина от первичного взаимодействия частиц  $\Lambda$ -гиперону [5][6]. По его продуктам распада можно легко определить его спин, а его поляризация может предоставить данные о поляризации исходного процесса.

Исходя из этих данных,  $\Lambda$ -гиперон в эксперименте SPD NICA можно будет использовать для определения поляризации исходного процесса, что является важной задачей для эксперимента. В первую очередь нужно определить оптимальные параметры отбора  $\Lambda$ -гиперона и оценить вероятность его регистрации в зависимости от разных факторов. Чтобы выполнить данную задачу, было проведено компьютерное моделирование установки SPD, с помощью программной библиотеки SPDROOT.

## 1.1 Система детекторов SPD

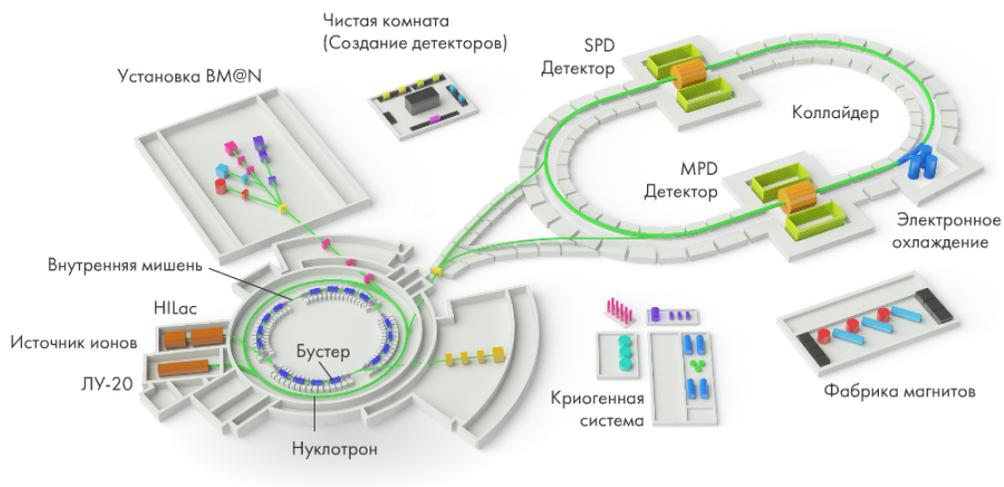


Рис. 1: Ускорительная система NICA

Ускорительный комплекс NICA [7] – система из нескольких ускорителей, предна-

значенная для ускорения частиц от протонов и дейтронов до тяжёлых ионов (см рис. 1). Состоит из двух источников ионов (ЛУ-20 - источник лёгких ионов, NiLas - источник тяжёлых ионов), бустера, нуклотрона и кольца коллайдера, в котором запланированы две точки столкновения. На NICA планируется провести 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 (Spin Physics Detector) - эксперимент на встречных пучках, предназначенный на изучение спиновой структуры нуклонов.

Комплекс детекторов SPD [8] - система детекторов, предназначенная для изучения спиновой физики, в частности вклад спинов кварков и глюонов в спиновую структуру протона и дейтрона. SPD состоит из трёх больших секций: центральной цилиндрической части и двух торцевых частиц. Схематичный рисунок установки с обозначением детекторов представлен на рис. 2. Установка состоит из вершинного детектора (Vertex detector), координатной 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).

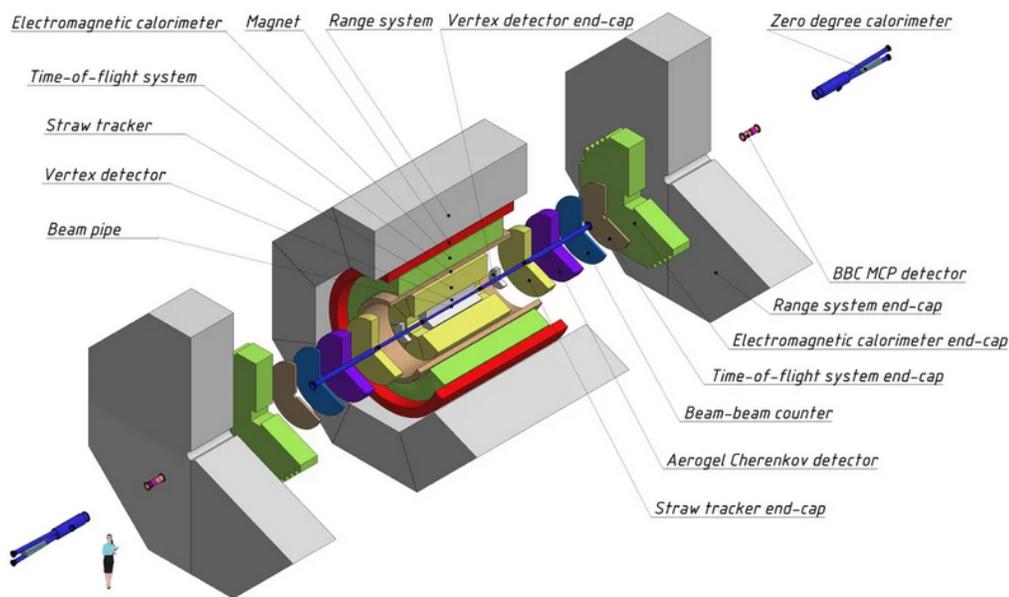


Рис. 2: Детектирующая система SPD

Основная задача вершинного детектора - это определение точки столкновения пуч-

ков и точное определение точки распада большинства рождённых в столкновении частиц. На эту роль рассматриваются два типа детекторов: DSSD и MAPS. Координатная система нужна для определения треков частиц. Цилиндрическая часть состоит из восьми секций, в каждой из которых 30 двойных слоёв straw-трубок. У всех слоёв чередуется наклон трубок относительно оси столкновения. Совместно с магнитом система может измерять импульс частиц и разделять разно заряженные частицы. 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. Каждый сегмент сделан из пластикового сцинтиллятора. Основная задача фокусирующего аэрогелевого черенковского детектора кольцевого изображения это идентификация частиц в области энергий 0.5 - 6 GeV. Детектор состоит из нескольких пластин 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 для энергий  $< 2$  GeV. В качестве времяпролётной системы в SPD будет использоваться MRPC. Электромагнитный калориметр используется для регистрации гамма квантов, которые могли родиться как напрямую в столкновении протонов, так и из распада других частиц. Мюонный детектор используется для регистрации мюонов и для разделения протонов, нейтронов и мюонов.

## 1.2 Генератор событий Pythia8

Pythia [9] - это программное обеспечение, предназначенное для моделирования взаимодействий между электронами, протонами, фотонами и некоторыми тяжёлыми ядрами при высоких энергиях. Она содержит теорию и модели для многих аспектов физики, включая жёсткие и мягкие взаимодействия, распределения партонов, партонные ливни в начальном и конечном состоянии, многопартонные взаимодействия, функции фрагментации и распады. Библиотека основана на собственных исследованиях, но так же ссылается на данные, полученные с экспериментов. Классифицируется как универсальный Монте-Карло генератор событий.

Библиотека активно используется для моделирования и анализа событий, так же используется в комбинации с другими библиотеками для моделирования экспериментов и

реконструкции треков в предполагаемых детекторах. Тем самым библиотека нужна для предварительного анализа эксперимента и понимания эффективности этого эксперимента.

Старая версия библиотеки (Pythia6) имеет версию для моделирования поляризованных частиц (SPHINX). В связи с этим она так же может использоваться для моделирования экспериментов, в которых планируется использование поляризованных пучков.

### 1.3 Библиотека для анализа данных ROOT

ROOT [10] - 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 гистограмм разных размерностей и графиков

### 1.4 Библиотека SPDRROOT

Моделирование и реконструкция событий была выполнена с помощью библиотеки SPDRROOT. SPDRROOT - это программный пакет написанный на языке C++ на основе библиотеки ROOT. Данный пакет предоставляет широкий функционал, который позволяет генерировать соударения различных частиц, точно воспроизводить геометрию детекторной системы SPD, моделировать и анализировать данные, полученные на детекторах, моделировать взаимодействие излучения с веществом детектора.

В качестве генератора столкновений в SPDRROOT используется Pythia двух разных версий: 6-й и 8-й. Для моделирования взаимодействия частиц с веществом детектора используется библиотека Geant4 [11][12]. SPDRROOT использует ROOT-макросы, в которой пользователь может легко поменять параметры генерации, геометрию детекторов, включить или выключить детектор, изменить параметры реконструкции или анализа частиц.

## 2 Теория

### 2.1 $\Lambda$ 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 так же был тот факт, что предполагаемое время жизни сильно взаимодействующей частицы, не совпадало с измеренным. Из-за  $\Lambda$ -образной “вилки” распада частица и получила имя  $\Lambda$ , а из-за её странных свойств частицу так же называли “странной”. Позже, когда развилась теория кварков, кварк, который присутствует в  $\Lambda$  частице назвали “странным”, а барионы содержащие хотя бы один  $s$  кварк начали называть гиперонами.

$\Lambda$  гиперон [13] является барионом со странностью  $S = -1$ , это самый легкий представитель гиперонов. Он имеет массу  $1115.683 \pm 0.006$  MeV, среднее время жизни  $2.632 \pm 0.02 \times 10^{-10}$  с, изоспин равный нулю, спин равный  $\frac{1}{2}$ . У  $\Lambda$ -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  $\Lambda$ -гиперон и  $\bar{\Lambda}$ -гиперон восстанавливались только по моде распада на  $p\pi^-$  и  $\bar{p}\pi^+$  соответственно.

### 2.2 Передача спина при поляризованных столкновениях

Поляризация частицы - состояние частицы с преимущественной ориентацией ее спина вдоль выбранного направления. При поперечной поляризации спин и импульс частицы перпендикулярны друг другу. При продольной поляризации спин направлен вдоль импульса частицы.

Спиральность - это квантовое число, которое представляет собой проекцию спина частицы на направление её движения. Спиральность частицы  $h$  определяется соотношением

$$h = \frac{\vec{s} \cdot \vec{p}}{|\vec{s}| |\vec{p}|}, \quad (1)$$

где  $\vec{s}$  - спин частицы,  $\vec{p}$  - её импульс. Состояние, при котором спин сонаправлен с импульсом частицы ( $h = +1$ ), называют “правой” или “положительной” спиральностью. Со-

ответственно, состояние, при котором спин противоположно направлен импульсу частицы ( $h = -1$ ), называют “левой” или “отрицательной” спиральностью.

Поляризации  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$  гиперонов широко изучались в различных аспектах спиновых эффектов в реакциях высоких энергий из-за своего распада с самоанализом спина, нарушающим четность. В частности, одним из таких эффектов является передача поляризации  $\Lambda$  от столкновения поляризованных пучков лептонов или адронов, так же называемая "передачей спина". Этот процесс предоставляет связь  $\Lambda$  поляризации с поляризованными функциями фрагментации [14] и плотностью поляризованных партонов в нуклоне. Функция фрагментации - это универсальная функция, которая представляет собой плотность вероятности того, что вылетающий партон создаст адрон с определённой долей импульса партона.

Поскольку  $s(\bar{s})$  кварк играет главную роль в составляющей спина  $\Lambda$  ( $\bar{\Lambda}$ )-гиперона, измерения передачи спина  $\Lambda$  ( $\bar{\Lambda}$ )-гиперону обеспечивают естественную связь с поляризованным партонным распределением  $s(\bar{s})$  кварков в нуклоне. Так, поперечная передача спина  $\Lambda$  ( $\bar{\Lambda}$ )-гиперону в адрон-адронных столкновениях обеспечивает связь с трансверсальностью  $s(\bar{s})$  кварков через поляризованные функции фрагментации. Таким же образом, продольная передача спина  $\Lambda$  ( $\bar{\Lambda}$ )-гиперону в адрон-адронных столкновениях обеспечивает связь с продольным распределением  $s(\bar{s})$  кварков.

Поперечная передача спина,  $D_{\text{ТТ}}$ ,  $\Lambda$ -гиперону в протон-протонных столкновениях определяется как:

$$D_{\text{ТТ}} \equiv \frac{d\sigma^{(p^\uparrow p \rightarrow \Lambda^\uparrow X)} - d\sigma^{(p^\uparrow p \rightarrow \Lambda^\downarrow X)}}{d\sigma^{(p^\uparrow p \rightarrow \Lambda^\uparrow X)} + d\sigma^{(p^\uparrow p \rightarrow \Lambda^\downarrow X)}} = \frac{d\delta\sigma^\Lambda}{d\sigma^\Lambda}, \quad (2)$$

где  $\uparrow(\downarrow)$  обозначает положительное (отрицательное) направление поляризации частиц и  $\delta\sigma^\Lambda$  - сечение поперечной поляризации. В рамках факторизации  $\delta\sigma^\Lambda$  можно записать как свертку поперечного распределения партона, поляризованного партонного сечения и поляризованной функции фрагментации.

Поляризация  $\Lambda$  ( $\bar{\Lambda}$ )-гиперонов,  $P_{\Lambda(\bar{\Lambda})}$ , может быть измерена по угловому распределению частиц в конечном состоянии через канал их слабого распада  $\Lambda \rightarrow p\pi^-$  ( $\bar{\Lambda} \rightarrow \bar{p}\pi^+$ ),

$$\frac{dN}{d\cos\theta^*} \propto A (1 + \alpha_{\Lambda(\bar{\Lambda})} P_{\Lambda(\bar{\Lambda})} \cos\theta^*), \quad (3)$$

где  $A$  - эффективность детектора, меняющаяся от  $\theta^*$ , а так же других наблюдаемых ве-

личин,  $\alpha_{\Lambda(\bar{\Lambda})}$  - параметр слабого распада,  $\theta^*$  - угол между направлением поляризации  $\Lambda(\bar{\Lambda})$ -гиперона и импульсом  $p(\bar{p})$  в системе покоя  $\Lambda(\bar{\Lambda})$ -гиперона.

Продольная передача спина,  $D_{LL}$ ,  $\Lambda$ -гиперону в поляризованных протон-протонных столкновениях определяется как:

$$D_{LL} \equiv \frac{d\sigma_{p^+p^+\rightarrow\Lambda^+X} - d\sigma_{p^+p^+\rightarrow\Lambda^-X}}{d\sigma_{p^+p^+\rightarrow\Lambda^+X} + d\sigma_{p^+p^+\rightarrow\Lambda^-X}}, \quad (4)$$

где верхние индексы  $+$  и  $-$  обозначают спиральность пучка протонов и  $\Lambda$ -гиперона

## 2.3 Регистрация и методы отбора частиц

Регистрация частиц в любой детекторной системе это трудный технологический процесс. За одну секунду в эксперименте может случиться несколько миллионов событий. В разных экспериментах рассматривают разные события, под ними обычно понимают столкновения ядер, адронов или кварк-глюонные взаимодействия. По регистрируемым частицам можно многое понять о самом событии и его результате.

Точку, в которой произошло первичное событие, называют первичной вершиной. Многие частицы, которые родились в столкновении, являются нестабильными и, проходя какое-то расстояние, распадаются. К такому явлению применяется термин вторичная вершина. Так же часто продукты распада называют “дочерними” частицами, а частицу до распада называют “материнской” частицей. В результате из одного столкновения может получиться огромное количество частиц, которые попадут в детекторную систему. Полученные данные, из разных детекторов, постепенно обрабатываются и присваиваются к соответствующей частице, рожденной в событии. Путь, который частица прошла в детекторе, называется треком.

Процедура реконструкции треков включает два этапа: поиск трека и аппроксимирование трека. Поиск треков основан на алгоритме фильтра Калмана. Алгоритм начинается с выбора кластера в начальном слое детекторов и присоединяет кластер в следующем слое, и так слой за слоем. Треки, найденные в Straw трековой системе по большому числу кластеров, затем экстраполируются в вершинный детектор. После выбора треков-кандидатов, отвечающих всем возможным комбинациям различных кластеров в одних и тех же слоях, проводится их фитирование с целью выбора наилучшего трека. И так постепенно данные с

других детекторов присваиваются определённым трекам и мы можем получить различные данные о частице: её путь, импульс, заряд, энергию. Исходя из этих данных можно также идентифицировать частицы.

В большинстве случаев мы регистрируем 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 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. Чтобы добиться существенного подавления такого комбинаторного фона, необходимо использовать критерии отбора полезных событий. В данной работе рассматриваются два критерия отбора: длина пробега частицы до ее распада и угол коллинеарности между вектором импульса и направлением частицы.

### 2.3.1 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:

$$L = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2}, \quad (5)$$

где  $(x, y, z)$  - координаты точки рождения,  $(x', y', z')$  - координаты точки распада.

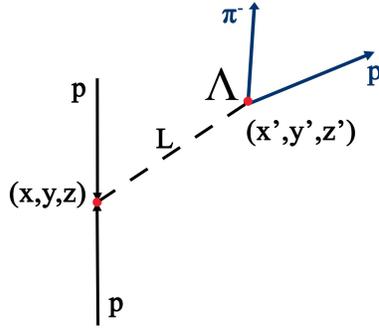


Рис. 3: Схематичное изображение длины пробега  $\Lambda$  гиперона.

### 2.3.2 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:

$$\theta_{coll} = \frac{(\overline{P}_{c.m.}, \overline{P}_{dr})}{|\overline{P}_{c.m.}| |\overline{P}_{dr}|}, \quad (6)$$

где  $\overline{P}_{c.m.}$  - вектор импульса частицы,  $\overline{P}_{dr}$  - вектор, соединяющий первичную и вторичную вершины.

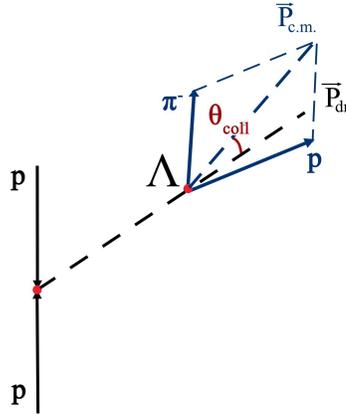


Рис. 4: Схематичное изображение угла коллинеарности для  $\Lambda$  гиперона.

### 3 Набор и анализ данных

Для анализа эффективности регистрации  $\Lambda$  гиперона на установке SPD было сгенерировано, с помощью библиотеки Pythia8, 4 миллиона столкновений p+p при энергии центра масс  $\sqrt{s} = 27\text{GeV}$ . Использовалась настройка генерации minBias = all.

В библиотеке SPDR00T процедура реконструкции треков включает два этапа: поиск трека и аппроксимирование трека. Поиск треков основан на алгоритме фильтра Калмана. Алгоритм начинается с выбора кластера в начальном слое детекторов и присоединяет кластер в следующем слое, и так слой за слоем. Треки, найденные в Straw трековой системе по большому числу кластеров, затем экстраполируются в вершинный детектор. После выбора треков-кандидатов, отвечающих всем возможным комбинациям различных кластеров в одних и тех же слоях, проводится их фитирование с целью выбора наилучшего трека с минимальным значением  $\chi^2$ . Значения указанных параметров отбора наряду со значениями  $\chi^2$  для треков продуктов распада оптимизируются для каждого типа частицы исходя из требования максимума значимости  $S/\sqrt{S+B}$ , где S и B — число полезных и фоновых событий.

Для каждого события из данной выборки, с помощью пакета KFparticle, отбирались два трека с противоположными зарядами. Для истинных событий пакет искал пары  $(\pi^-, p)$ ,  $(\bar{p}, \pi^+)$  и для создания фоновых событий искал различные комбинации  $\pi^\pm, K^\pm, p$  и  $\bar{p}$ . Такие пары образовывали кандидата в  $\Lambda$  или  $\bar{\Lambda}$  гипероны. Для каждого кандидата из их продуктов распада рассчитывались масса, импульс, угол вылета, длина пробега до распада, угол коллинеарности. Так же записывалась информация полученная напрямую из генератора, такая как pdg код [15] 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.

## 4 Поиск оптимальных параметров для отбора $\Lambda$ кандидатов

В первую очередь рассматривались треки, которые хотя бы три раза регистрировались детекторной системой, имели качество фита  $\chi/ndf < 6$  и у которых в полной мере были восстановлены данные. 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, сходимость трека к первичной вершине. Чтобы найти оптимальные параметры, рассматривалось следующее отношение:  $FOM = S/\sqrt{S+B}$ , где  $S$  - число полезных событий, а  $B$  - число фоновых событий. Гистограммы, отображающие число событий и их отношение (FOM), представлены на рисунках 5, 6, 7.

Как видно FOM принимает максимальные значения для длины пробега до распада в точке  $L = 0.74$  см, для угла коллинеарности в точке  $\theta = 0.013$  радиан, для сходимости треков к первичной вершине в точках  $\chi^2/ndf = 8.7$ .

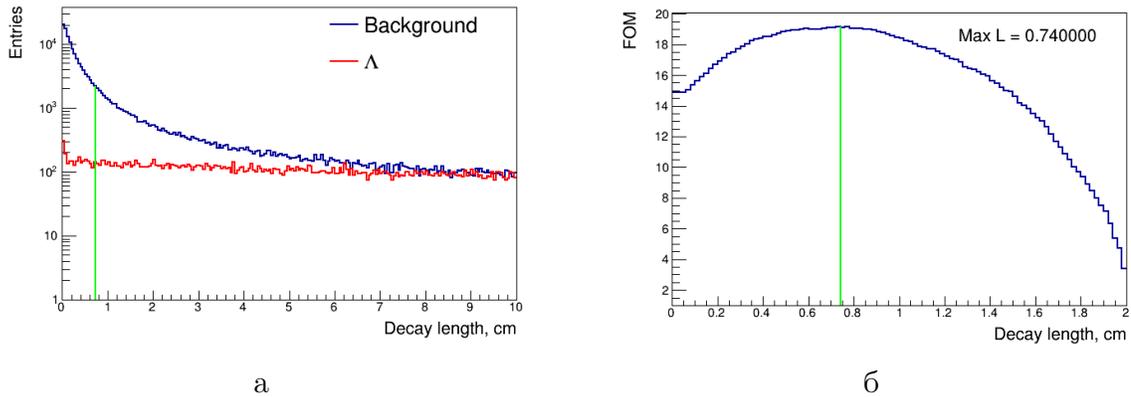
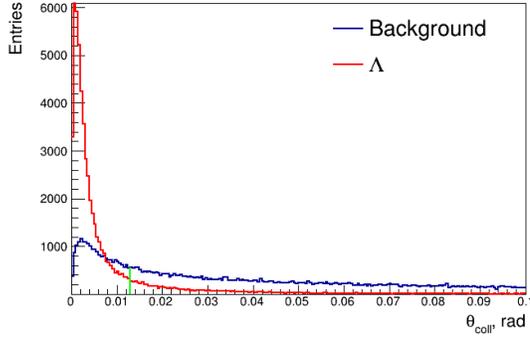
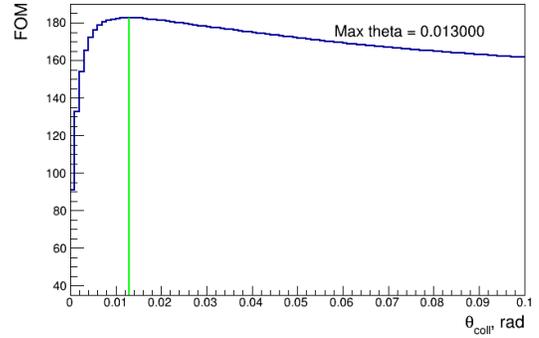


Рис. 5: Критерий отбора по длине пробега до распада  $\Lambda$ -гиперона. На рисунке а) представлены данные для  $\Lambda$  гиперона и фоновых событий, на рисунке б) представлено соотношение полезных данных к фоновым

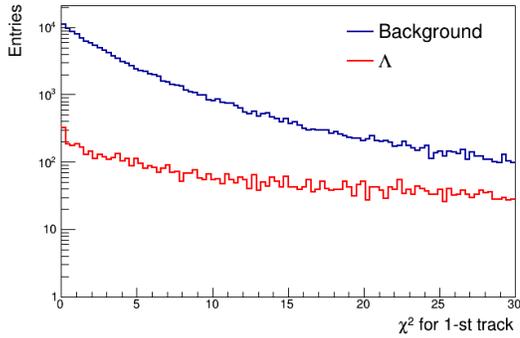


а

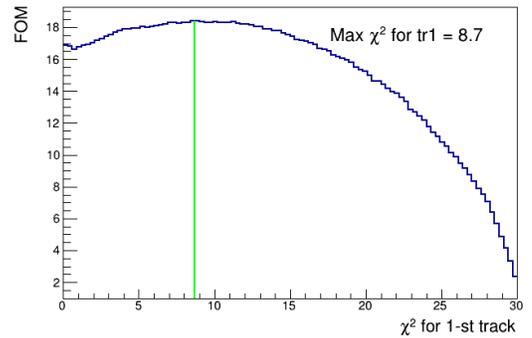


б

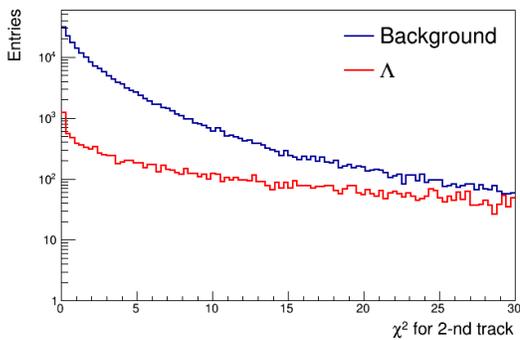
Рис. 6: Критерий отбора по углу коллинеарности. На рисунке а) представлены данные для  $\Lambda$  гиперона и фоновых событий, на рисунке б) представлено соотношение полезных данных к фоновым



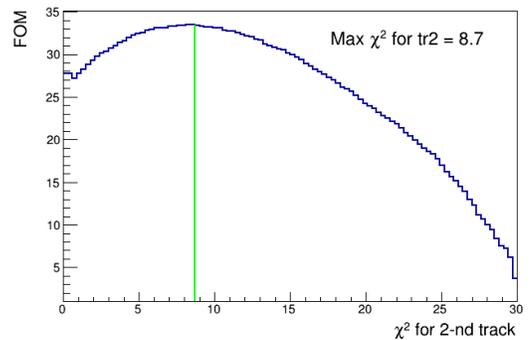
а



б



в



г

Рис. 7: Критерий отбора по сходимости трека к первичной вершине. На рисунках а) и в) представлены данные для  $\Lambda$  гиперона и фоновых событий для первого и второго трека соответственно, на рисунках б) и г) представлено соотношение полезных данных к фоновым для первого и второго трека соответственно

Распределение Арментероса-Подольянского отображает поведение рождённых в распаде противоположно заряженных частиц. По ней можно понять какую часть импульса относительно направления полёта  $V_0$  частицы унесла рождённая частица. 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.

Верхняя арка на гистограмме отображает распад  $K_s^0$ , правая отображает распад  $\Lambda$ , а левая -  $\bar{\Lambda}$ . Как видно из рисунка 8, 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 разделить частицы между собой кинематическими критериями.

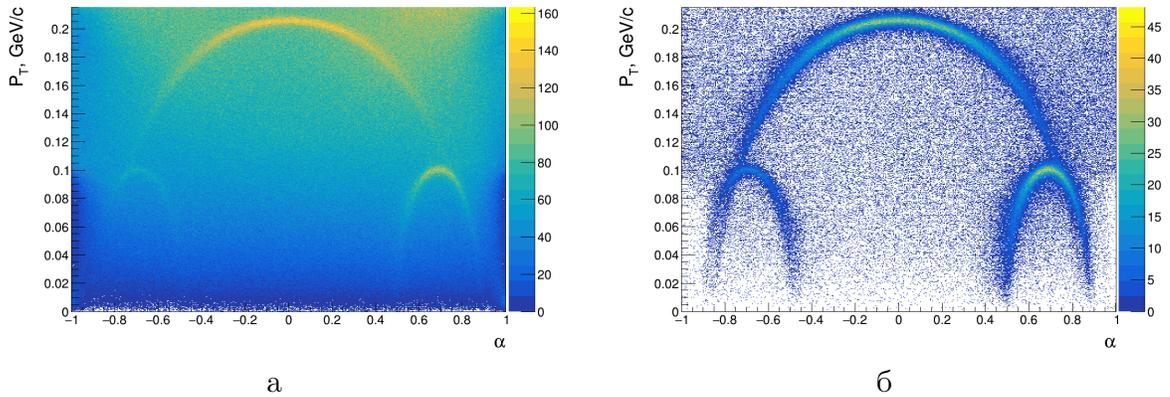


Рис. 8: Распределение Арментероса-Подольянского до кинематических критериев (а) и после (б)

Зная оптимальные критерии для отбора частиц мы можем перейти к анализу гистограммы инвариантной массы. На ней отображены массы для  $\Lambda$  кандидатов, которые удовлетворяют критерием на качество трека и кинематическим критериям. На рисунках 9, 10 представлены гистограмм инвариантной массы с разными функциями аппроксимации данных. На рисунке 9 использовались две функции Гаусса для описания данных пика массы от  $\Lambda$  гиперонов и полином третьей степени для описания фоновых событий. На рисунке 10 использовались одна функции Гаусса для пика и полином третьей степени для описания фоновых событий. Как можно заметить, сравнивая параметры  $\chi^2/ndf$  обеих аппроксимаций, аппроксимация с двумя функциями Гаусса описывает данные гистограммы лучше. В

дальнейшем для аппроксимации массы будет использоваться этот набор функций.

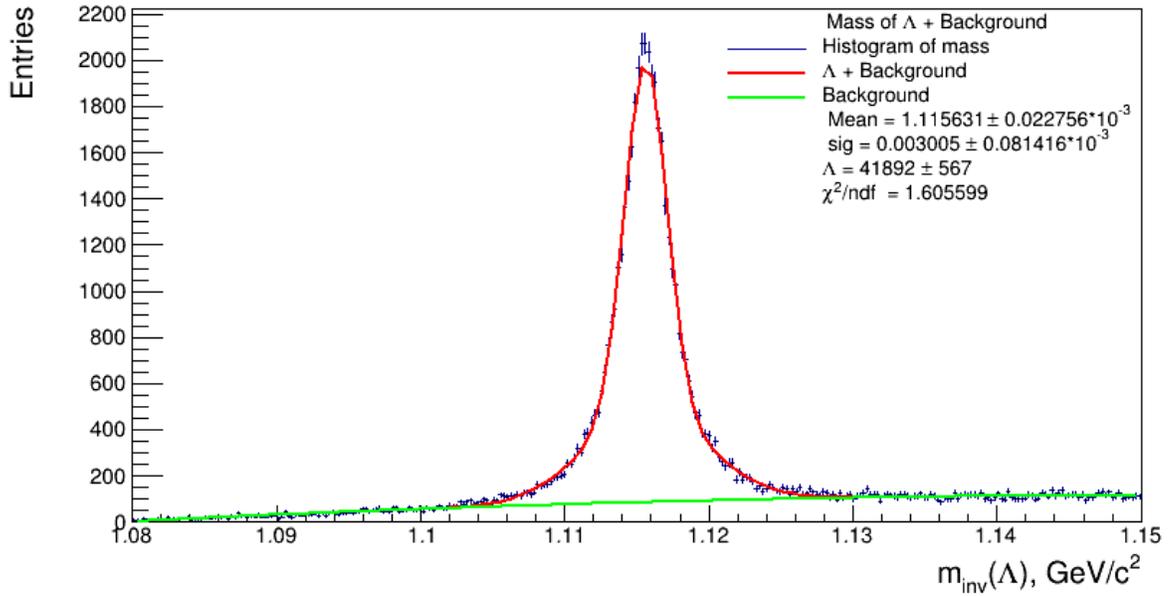


Рис. 9: Гистограмма инвариантной массы  $\Lambda$  гиперона с использованием двух функций Гаусса для аппроксимации данных

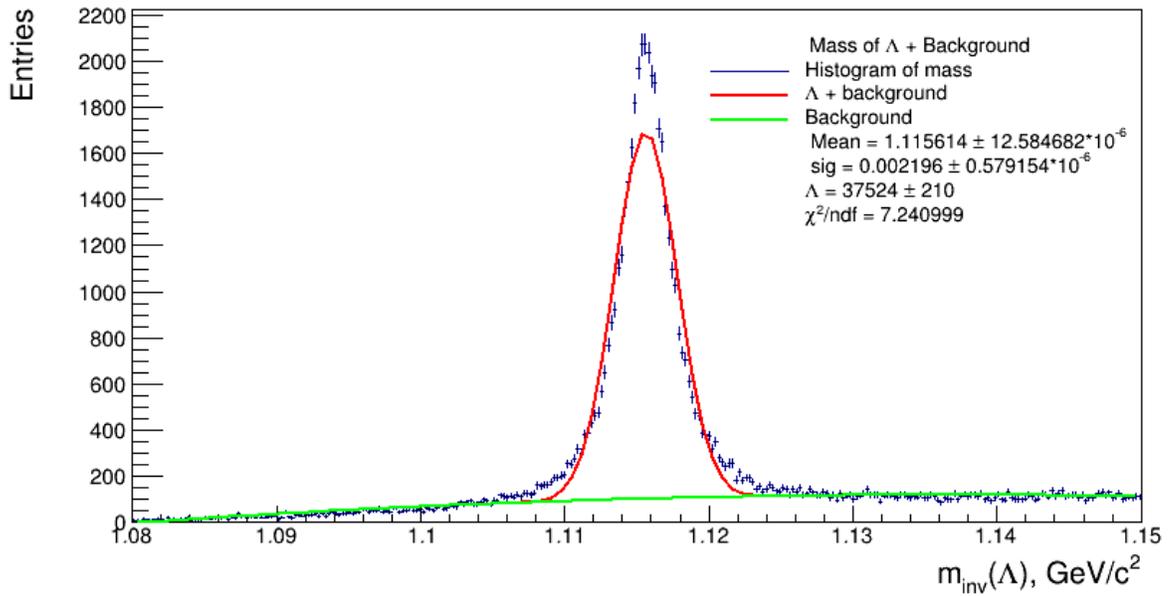


Рис. 10: Гистограмма инвариантной массы  $\Lambda$  гиперона с использованием одной функции Гаусса для аппроксимации данных

## 5 Оценка эффективности реконструкции

Оценка эффективности реконструкции нужна для понимания того, какую долю частиц мы можем зарегистрировать. В данной работе для  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$  гиперонов эффективность реконструкции рассматривалась как функция от импульса частицы, то есть анализировались частицы с разным импульсом. Разбиение было выполнено с использованием распределений всех сгенерированных частиц, с условием, что в каждом интервале примерно равное число частиц. Всего в разбиении 6 интервалов. На рисунке 11 представлены гистограммы импульса частиц, уже прошедших все критерии отбора. Зелёные линии отражают границы интервалов.

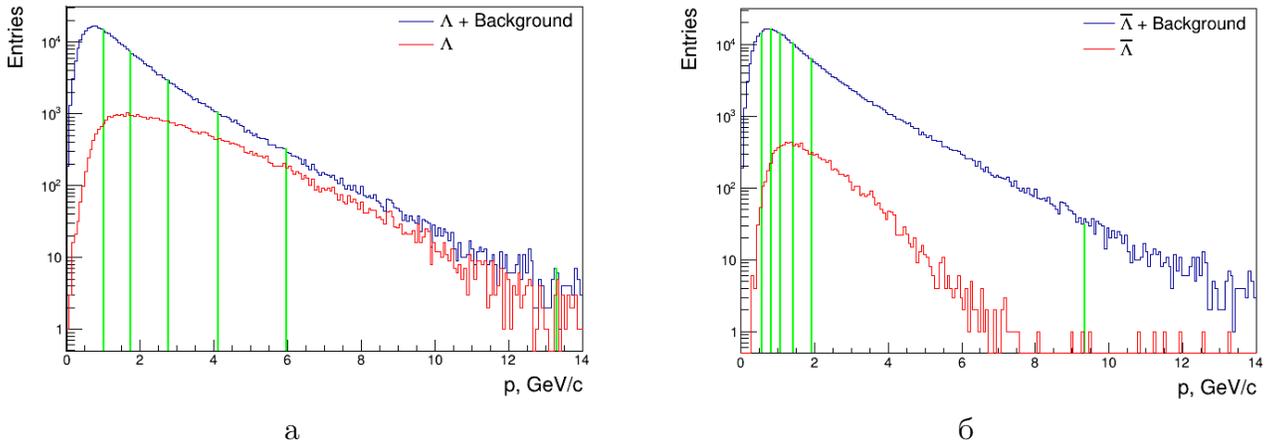


Рис. 11: Гистограммы импульса частиц, прошедших все критерии, для  $\Lambda$  (а) и  $\bar{\Lambda}$  (б). Зелёные линии отображают границы интервалов разбиения

Гистограммы инвариантной массы в каждом интервале, представлены на рисунках 12,13. Здесь красная линия отображает аппроксимацию сигнала, зелёная линия - аппроксимацию фона, синяя гистограмма - инвариантная масса всех частиц прошедших отбор. фиолетовая гистограмма - инвариантная масса фоновых событий. Аппроксимация происходила только для синей гистограммы, гистограмма фоновых событий представлена здесь только для того, чтобы понимать, как хорошо функция аппроксимирует данные.

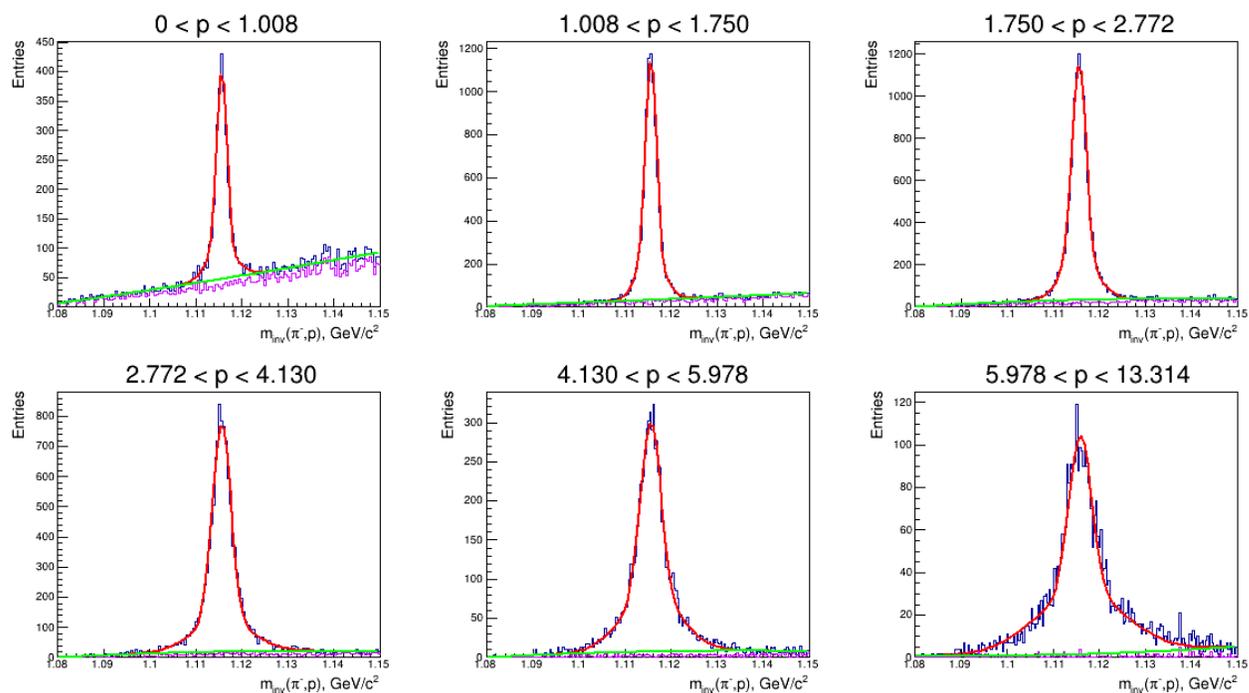


Рис. 12: Гистограммы инвариантных масс  $\Lambda$ -гиперона для каждого интервала в разбиении

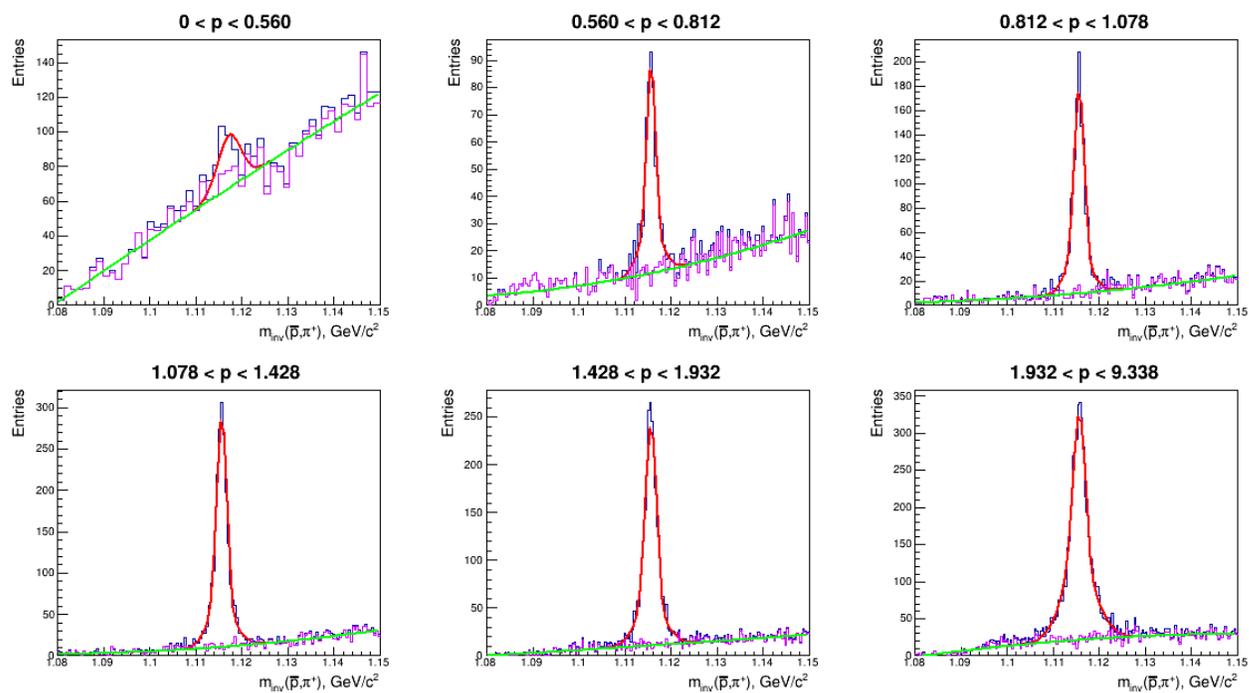


Рис. 13: Гистограммы инвариантных масс  $\bar{\Lambda}$ -гиперона для каждого интервала в разбиении

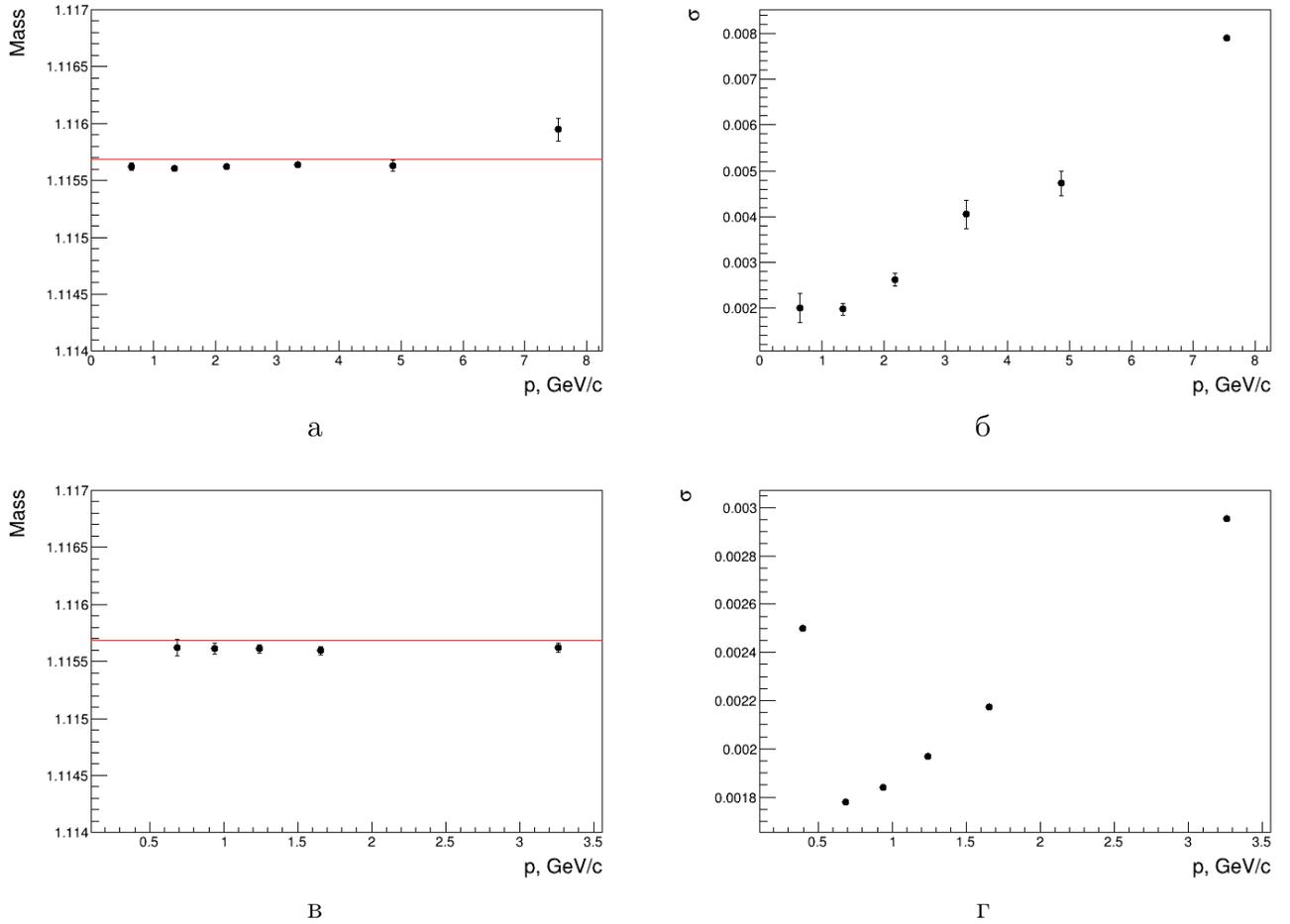


Рис. 14: Данные аппроксимации гистограмм инвариантных масс для  $\Lambda$ -гиперона (а, б) и  $\bar{\Lambda}$ -гиперона (в, г)

На рисунках 14 представлены данные аппроксимации. Можно заметить что вычисленная масса для  $\Lambda$  гиперона в каждом интервале примерно одинаковая и близка к реальным данным (красная линия). Масса для  $\bar{\Lambda}$  в каждом интервале кроме первого тоже одинакова и близка к реальным данным. Первый интервал плохо аппроксимируется ввиду малого количества  $\bar{\Lambda}$  и большого количества фоновых событий в нём. Так же наблюдается расширение пика с увеличением импульса частицы.

Для расчёта конечной эффективности регистрации, которая представляет собой отношение количества частиц, полученное из аппроксимации гистограмм инвариантной массы, к количеству сгенерированных частиц, использовалась формула 7. Как можно заметить конечная эффективность регистрации состоит из трёх коэффициентов.

$$C = \frac{N_{reconstructed}}{N_{generated}} = C_1 * C_2 * C_3 \quad (7)$$

Первый коэффициент ( $C_1$ ) - это геометрическая эффективность детектора, его способность в целом задетектировать частицу. Рассчитывается по формуле 8, как отношение количества частиц, у которых оба трека имеют хотя бы 3 случая регистрации в детекторе, к количеству сгенерированных частиц.

$$C_1 = \frac{N_{3 \text{ hits}}}{N_{generated}} \quad (8)$$

Второй коэффициент ( $C_2$ ) отображает эффективность аппроксимации полученных треков, рассчитывается по формуле 9, которая представляет собой отношение количество частиц, прошедших критерий на качество трека, к количеству частиц, имеющих 3 точки регистрации в детекторах.

$$C_2 = \frac{N_{\text{track quality}}}{N_{3 \text{ hits}}} \quad (9)$$

Третий коэффициент ( $C_3$ ) отображает эффективность кинематических критериев отбора и качества аппроксимации инвариантной массы. Рассчитывается по формуле 10, как отношение количества частиц, взятых из аппроксимации инвариантной массы, к количеству частиц, удовлетворяющих критерию на качество трека.

$$C_3 = \frac{N_{\text{kinematic cuts}}}{N_{\text{track quality}}} \quad (10)$$

Все коэффициенты представлены на рисунках 15. Чёрные точки - конечная эффективность регистрации частицы, красные - геометрическая эффективность, зелёные эффективность аппроксимации треков, синие - эффективность кинематических критериев. Как можно заметить эффективность реконструкции для  $\Lambda$ -гиперона падает с увеличением импульса, это связано в основном с серьёзным уменьшением геометрической эффективности детектора. Эффективность аппроксимации треков доходит  $\approx 40\%$ , эффективность кинематических критериев достигает  $\approx 65\%$ . Общая эффективность регистрации не превышает 25%. Для  $\bar{\Lambda}$ -гиперона эффективность реконструкции повышается с импульсом и достигает  $\approx 30\%$ .

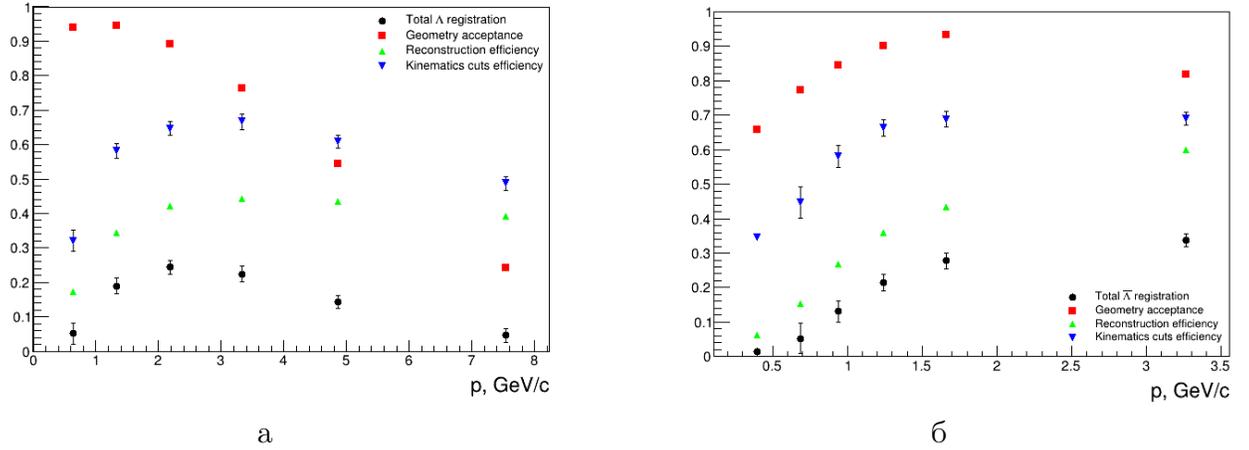


Рис. 15: Эффективность регистрации для  $\Lambda$ -гиперона (а) и  $\bar{\Lambda}$ -гиперона

Для  $\Lambda$ -гиперона был выполнен расчёт эффективности регистрации как функции от импульса и полярного угла вылета частицы. Было сделано 4 равных по количеству частиц интервала по полярному углу вылета внутри которых по 6 равных по количеству частиц интервалов по импульсу. Разбиение представлено на рис. 16.

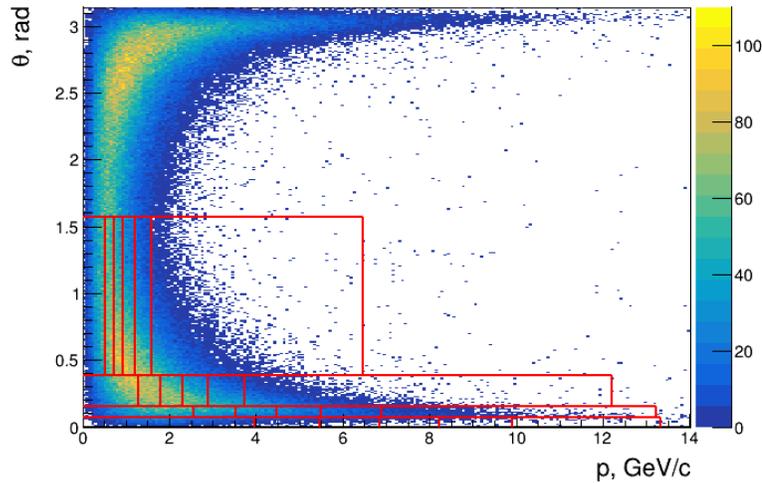


Рис. 16: Гистограмма импульса и полярного угла частиц, прошедших все критерии. Красные линии отображают границы интервалов разбиения

В каждом интервале строилась гипотеза инвариантной массы для  $\Lambda$ -гиперона и полученные данные аппроксимировались. На рисунке 17 представлена инвариантная масса, а на рисунке 18 данные аппроксимации. Как можно заметить из этих рисунков, первый интервал по полярному углу вылета частицы плохо аппроксимируется, в связи с малым числом событий в этих интервалах.

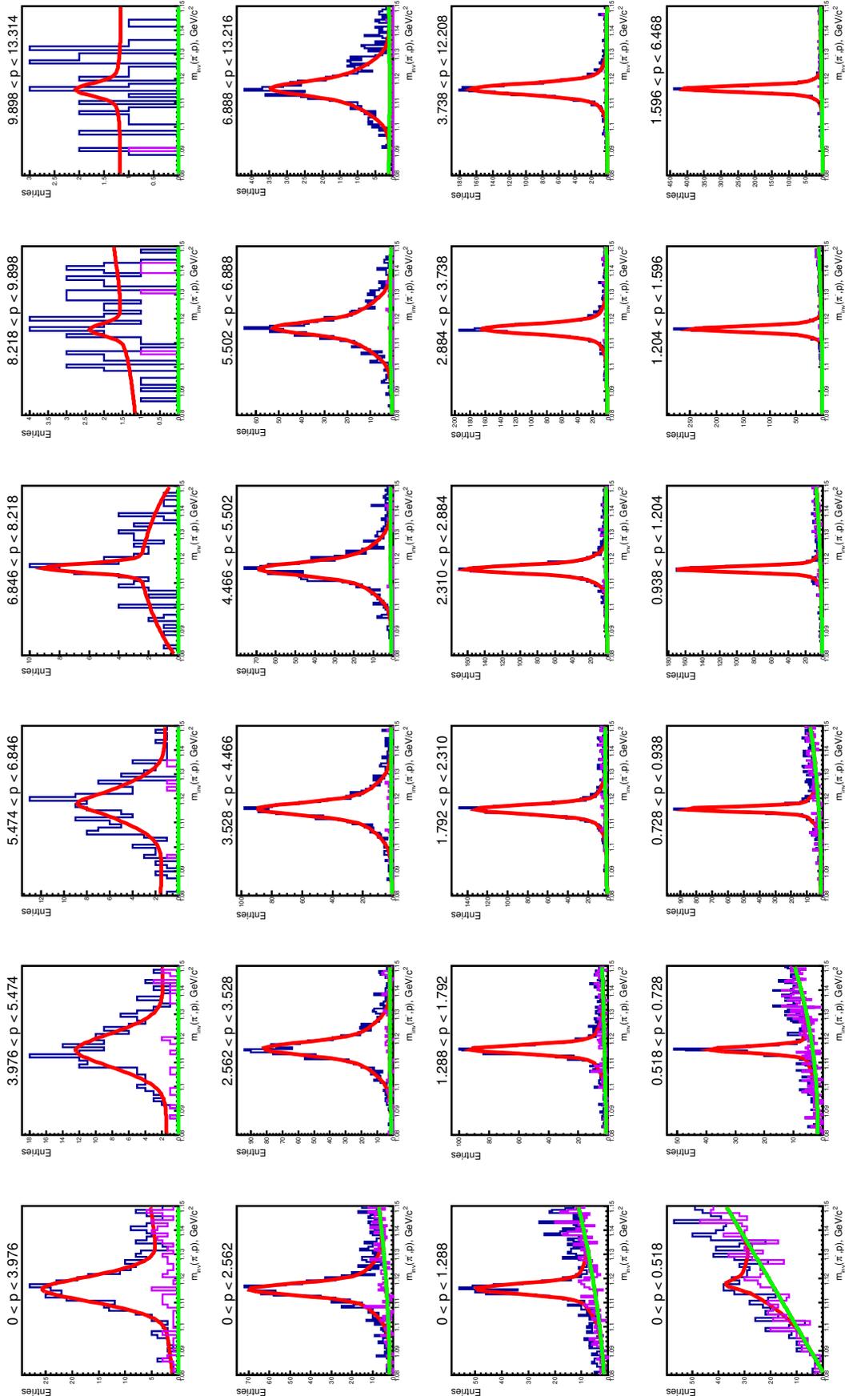
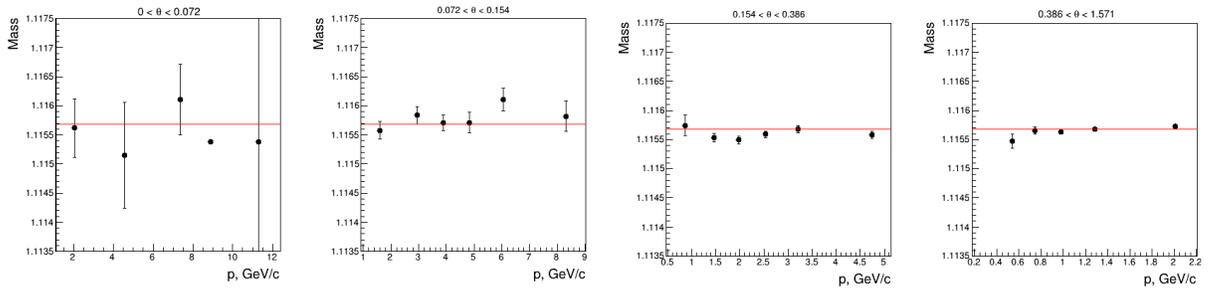
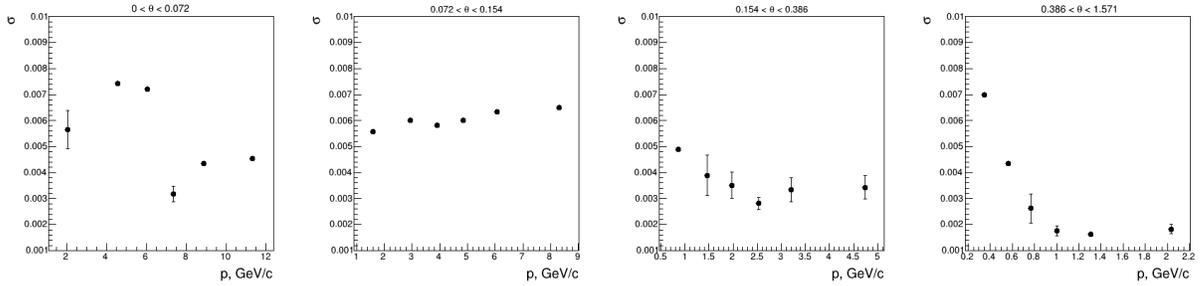


Рис. 17: Гистограммы инвариантных масс для каждого интервала в разбиении



а



б

Рис. 18: Данные аппроксимации гистограмм инвариантных масс

Данные об эффективности регистрации  $\Lambda$ -гиперона представлены на рисунке 19. Расчёт производился по тем же формулам 7-10, что и для одномерного случая. Чёрные точки - конечная эффективность регистрации  $\Lambda$ -гиперона, красные - геометрическая эффективность, зелёные эффективность аппроксимации треков, синие - эффективность кинематических критериев. 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.

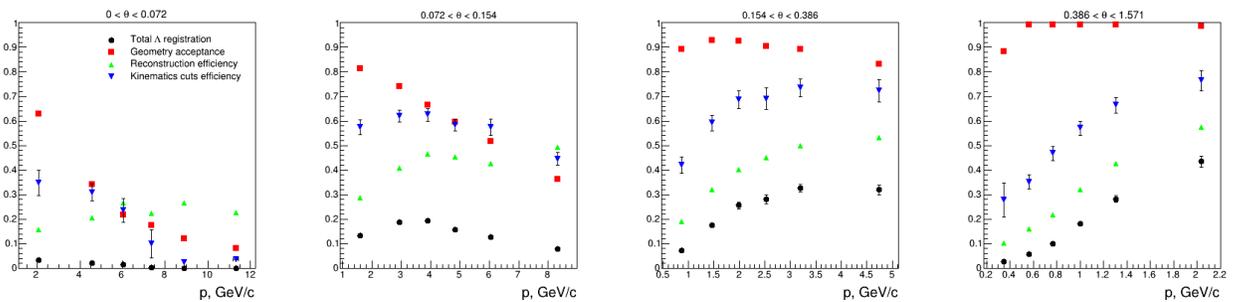


Рис. 19: Эффективность регистрации для  $\Lambda$ -гиперона

## 6 Заключение

Были проведены расчёты по определению оптимальных параметров отбора  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$ -гиперонов: длина пробега до распада частицы  $L > 0.74$  см., угол коллинеарности  $\theta_{coll} < 0.013$  рад., сходимость треков к первичной вершине  $\chi^2/ndf > 8.7$ .

Были представлены расчёты эффективности регистрации  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$ -гиперонов как функции от импульса частицы (см. рис 15). Общая эффективность регистрации  $\Lambda$ -гиперона не превышает 25%. Для  $\bar{\Lambda}$ -гиперона эффективность реконструкции повышается с импульсом и достигает  $\approx 30\%$ .

Были представлены расчёты эффективности регистрации  $\Lambda$  как функции от импульса и угла вылета частицы (см. рис. 19). Эффективность регистрации растёт, с увеличением полярного угла и достигает  $\approx 40\%$ .

Представленные данные эффективности регистрации показывают приемлемый уровень регистрации  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$ -гиперонов в установке SPD.

## Список литературы

- [1] The R608 collaboration //  *$\Lambda$  Polarization in Proton Proton Interactions From  $\sqrt{s}$  31-GeV to 62-GeV* // Phys.Lett.B 185 (1987) 209, 1987.
- [2] The STAR collaboration // *Global polarization of  $\Lambda$  and  $\bar{\Lambda}$  hyperons in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 19,6$  and 27 GeV* // Phys.Rev.C 108 (2023) 014910, 2023.
- [3] The STAR collaboration // *Global  $\Lambda$ -hyperon polarization in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 3$  GeV* // Phys.Rev.C 108 (2023) 014910, 2023.
- [4] The E704 collaboration // *Analyzing power measurement in inclusive Lambda0 production with a 200-GeV/c polarized proton beam* // Phys.Rev.Lett. 75 (1995) 3073-3077, 1995.
- [5] Qing-Hua Xu (for the STAR Collaboration) // *Longitudinal and transverse spin transfer to  $\Lambda$  and  $\bar{\Lambda}$  hyperons in p+p collisions at STAR* // arXiv:1812.10621
- [6] The COMPASS collaboration // *Measurement of the Longitudinal Spin Transfer to Lambda and Anti-Lambda Hyperons in Polarised Muon DIS* // Eur.Phys.J.C 64 (2009) 171-179, 2009.
- [7] 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).
- [8] SPD collaboration // *Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA* // (2023)
- [9] A comprehensive guide to the physics and usage of PYTHIA 8.3 // <https://arxiv.org/abs/2203.11601>
- [10] ROOT - An Object-Oriented Data Analysis Framework. // URL: <http://root.cern.ch>.
- [11] GEANT - Detector Description and Simulation Tool // CERN Program Library Long Writeup W5013. 1993.
- [12] S. Agostinelli et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research // *GEANT4 - a simulation toolkit* // A. 2003. Vol. 506.Pp. 250-303.

- [13] R.L. Workman et al. (Particle Data Group) //  $\Lambda$  *baryons* // Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022)
- [14] R.L. Workman et al. (Particle Data Group) // *Fragmentation Functions in  $e^+e^-$ , ep, and pp Collisions* // Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022)
- [15] R.L. Workman et al. (Particle Data Group) // *Monte Carlo Particle Numbering Scheme* // Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022)

## 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 «Исследование регистрации  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$  гиперонов в эксперименте 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.