

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

КУРСОВАЯ РАБОТА

**«РОЖДЕНИЕ СТРАННЫХ ЧАСТИЦ В СТОЛКНОВЕНИЯХ
AU+AU ПРИ ЭНЕРГИИ 27 ГэВ/НУКЛОН В ЭКСПЕРИМЕНТЕ
STAR»**

Выполнил студент:
409 академической группы
Карташов Никита Янович

Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук
Апарин Алексей Андреевич

ДУБНА
2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Теоретическое введение	4
Глава 2. Описание эксперимента STAR	7
2.1 Ускоритель RHIC	7
2.2 Детектор STAR	8
Глава 3. Обработка экспериментальных данных	11
3.1 Экспериментальные данные	11
3.2 Отбор качественных событий и треков	11
3.3 Реконструкция странных адронов	13
Глава 4. Результаты	16
4.1 Распределение инвариантной массы	16
4.2 Спектры поперечного импульса	17
ВЫВОДЫ	19
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	20

ВВЕДЕНИЕ

При больших температурах и барионных плотностях ожидается возникновение нового состояния адронного вещества - кварк-глюонной плазмы (КГП). Такие условия могут быть созданы в соударениях тяжелых ионов на современных коллайдерах. Одними из признаков возникновения кварк-глюонной плазмы являются повышение выхода странных частиц и лептонов, уменьшение выхода кваркониев и изменение поляризации Λ -гиперонов. Данная работа посвящена реконструкции странных адронов – Λ гиперонов и короткоживущих странных каонов K_S^0 , рожденных в столкновениях Au+Au при энергии 27 ГэВ/нуклон на релятивистском коллайдере тяжелых ионов RHIC (Брукхейвенская национальная лаборатория, США) в рамках программы BES-II в эксперименте STAR.

В главе 1 приводится теоретическое введение. В главе 2 приводится краткое описание ускорителя RHIC и эксперимента STAR. В главе 3 описывается алгоритм реконструкции странных адронов. В главе 4 описаны результаты работы – распределения инвариантных масс и спектры поперечного импульса странных адронов.

Глава 1. Теоретическое введение

Общую картину физики элементарных частиц задает Стандартная модель. Согласно ей, все вещество состоит из 6 кварков, 6 лептонов и 12 соответствующих им античастиц. Всего существует три фундаментальных взаимодействия – сильное, переносчиком которого являются 8 глюонов, слабое, переносчиком которого являются 3 тяжелых бозона Z и W^\pm и электромагнитное, переносчиком которого является фотон. Кварки участвуют во всех трех взаимодействиях, электроны, мюоны и таоны – в слабом и электромагнитном, нейтрино – только в слабом. Массы лептонов и кварков интерпретируются как константы взаимодействия с полем Хиггса.

масса→	$\approx 2.3 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ ГэВ}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ ГэВ}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ ГэВ}/c^2$
заряд→	2/3	2/3	2/3	0	0
спин→	1/2	1/2	1/2	1	0
	u верхний	c очарованный	t истинный	g глюон	H бозон Хиггса
	$\approx 4.8 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 95 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ ГэВ}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
КВАРКИ	d нижний	s странный	b прелестный	γ фотон	
	$0.511 \text{ МэВ}/c^2$	$105.7 \text{ МэВ}/c^2$	$1.777 \text{ ГэВ}/c^2$	$91.2 \text{ ГэВ}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e электрон	μ мюон	τ тау	Z Z бозон	
ЛЕПТОНЫ	$< 2.2 \text{ эВ}/c^2$	$< 0.17 \text{ МэВ}/c^2$	$< 15.5 \text{ МэВ}/c^2$	$80.4 \text{ ГэВ}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	W W бозон	
					КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ

Рис. 1.1: Стандартная модель элементарных частиц

Адроны – частицы, состоящие из кварков, которые так же участвуют в сильном взаимодействии. Адроны, состоящие из трех кварков называются барионами, из трех антикварков – антибарионами, из пары кварков – мезонами.

При рассмотрении частиц $\Delta^-(ddd)$, $\Delta^+(uuu)$ или $\Omega^-(sss)$ возникает проблема – кварки в них находятся в одном и том же квантовом состоянии, их орбитальные моменты равны нулю, а спины сонаправлены, что приводит к нарушению принципа Паули. Это потребовало введения нового квантового числа – цвета.

Глюоны – переносчики сильного взаимодействия. Это безмассовые частицы, имеющие спин 1. Важная особенность глюонов – возможность взаимодействовать не только с кварками, но и друг с другом. Это приводит к тому, что константа сильного взаимодействия $\alpha_s \rightarrow 0$ на малых расстояниях, и наоборот, $\alpha_s \rightarrow \infty$ на больших расстояниях.

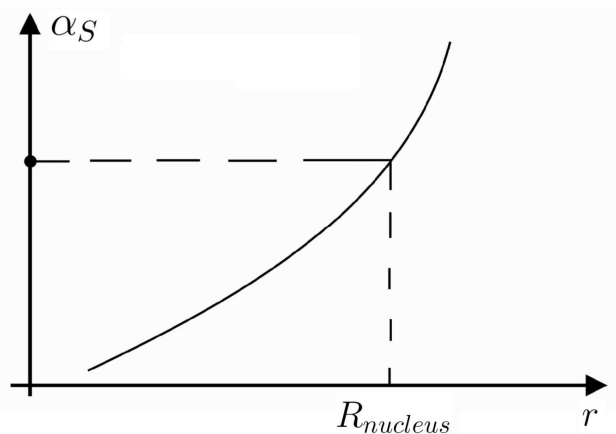


Рис 1.2: Зависимость константы сильного взаимодействия от расстояния между кварками

Из этого вытекают следующие важные свойства сильного взаимодействия:

- Асимптотическая свобода при $r \rightarrow 0$, то есть отсутствие взаимодействия кварков на малых расстояниях
- Конфаймент при $r \gg R_{nucleus}$, то есть невозможность наблюдения кварков в свободном состоянии – при попытке “вытянуть” кварк из адрона возникнет пара кварк+антикварк, образуя два новых адрона

При всех ли внешних условиях сильновзаимодействующая материя образует адроны? Ответить на этот вопрос можно, рассмотрев систему адронов/кварков как термодинамическую систему. Ее состояние задается с помощью температуры и барионного химического потенциала.

Ожидается, что при больших плотностях и/или больших температурах адроны настолько сблизятся, что кварки внутри адрона способны покинуть его и проходить на расстояния большие, чем 1 фм – произойдет деконфаймент.



Рис 1.3: Фазовая диаграмма КХД

Переходы между адронной материей и КГП могут быть двух видов:

- При $\mu \approx 0$ – кроссовер, плавный переход из фазы в фазу без скачков производных термодинамических потенциалов
- При $\mu > \mu_{crit}$ - фазовый переход первого рода

Глава 2. Описание эксперимента STAR

2.1 Ускоритель RHIC

RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) – первый и один из двух действующих коллайдеров тяжелых ионов. Расположен в Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL), штат Нью-Йорк. На данный момент – второй по мощности коллайдер тяжелых ионов.

Ускорение ионов в RHIC происходит следующим образом:

- Источник ионов электронного пучка EBIS создает первоначально ускоренные ионы, попадающие в бустер.
- В бустере происходит ускорение до 95 МэВ/нуклон. На выходе из него стоит пленка, которая сбивает все электроны с атома золота за исключением двух электронов К-оболочки, на выходе заряд иона - +77.
- Ионы выводятся в синхротрон с переменным градиентом, AGS, где окончательно формируется пучок, выводимый в основной коллайдер RHIC. На выходе из AGS пучок имеет энергию 8.86 ГэВ/нуклон, последние два электрона выбиваются.
- Основной коллайдер имеет два канала – синий и желтый.

Образуемый пучок распределяется по сгусткам примерно по 10^9 ядер в каждом. Интенсивность пучка – $2 \cdot 10^{26} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Длина сгустка – около 20 см. Время между пересечениями сгустков – 600 мкс. Энергия может меняться в пределах от 8.86 до 200 ГэВ/нуклон. В точках столкновения каналы сводятся. В тех же местах находятся детекторы, в том числе и STAR.

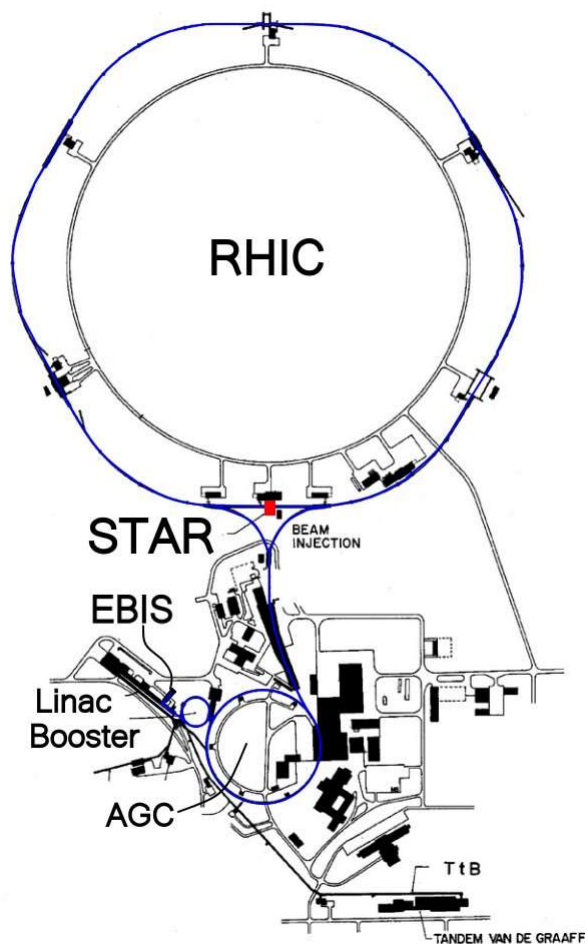


Рис 2.1: Схема ускорительного комплекса

2.2 Детектор STAR

Эксперимент STAR (Solenoidal Tracker At RHIC) - это один из двух основных экспериментов на релятивистском коллайдере тяжелых ионов (RHIC). Основная научная цель STAR состоит в изучении формирования кварк-глюонной плазмы (КГП), состояния вещества, которое, как считается, образуется при достаточно высокой плотности энергии. Общий вид детектора представлен на рисунке ниже.

Детектор состоит из нескольких подсистем: время-проекционной камеры (TPC); магнитов; время-пролетной камеры (TOF); калориметра нулевого градуса (ZDC), и других.

STAR Detector

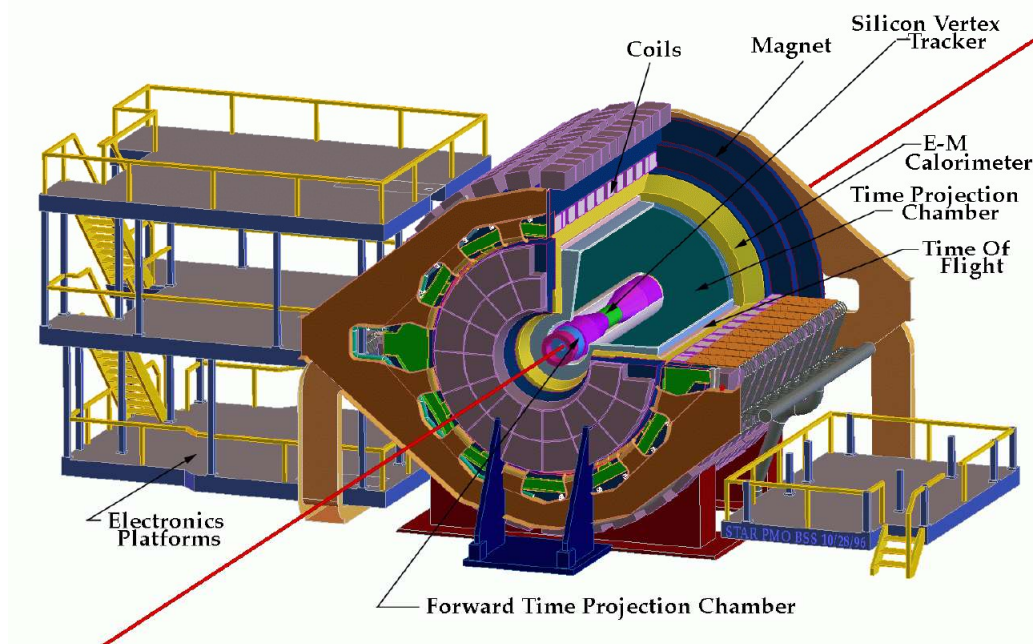


Рис 2.2: Общий вид детектора STAR

В данной работе были использованы данные, полученные от время-проекционной камеры, ТРС.

ТРС заполнена газом P10 (10% метана и 90% аргона). Детектор разделен на две части высоковольтной мембраной, благодаря которой создается электрическое поле \vec{E} , направленное к ней. Клетки внешнего и внутреннего поля делают электрическое поле более однородным, что важно для восстановления треков. Внешним магнитом внутри области ТРС также создается однородное магнитное поле \vec{B} .

Частица, образовавшаяся в результате столкновения, ионизирует газ, образуя множество электронов и ионов. Электроны разлетаются к анодам, на которых находятся считывающие площадки. Зная, в какую из ячеек попадает электрон, а также время, которое прошло от момента столкновения, можно восстановить точку ионизации. По совокупности таких точек восстанавливается трек изначальной частицы, а также импульс, потери энергии и др. По направлению отклонения в

магнитном поле определяется заряд частицы. Наконец, положение вершины определяется на основании экстраполяции треков во внутреннюю часть детектора.

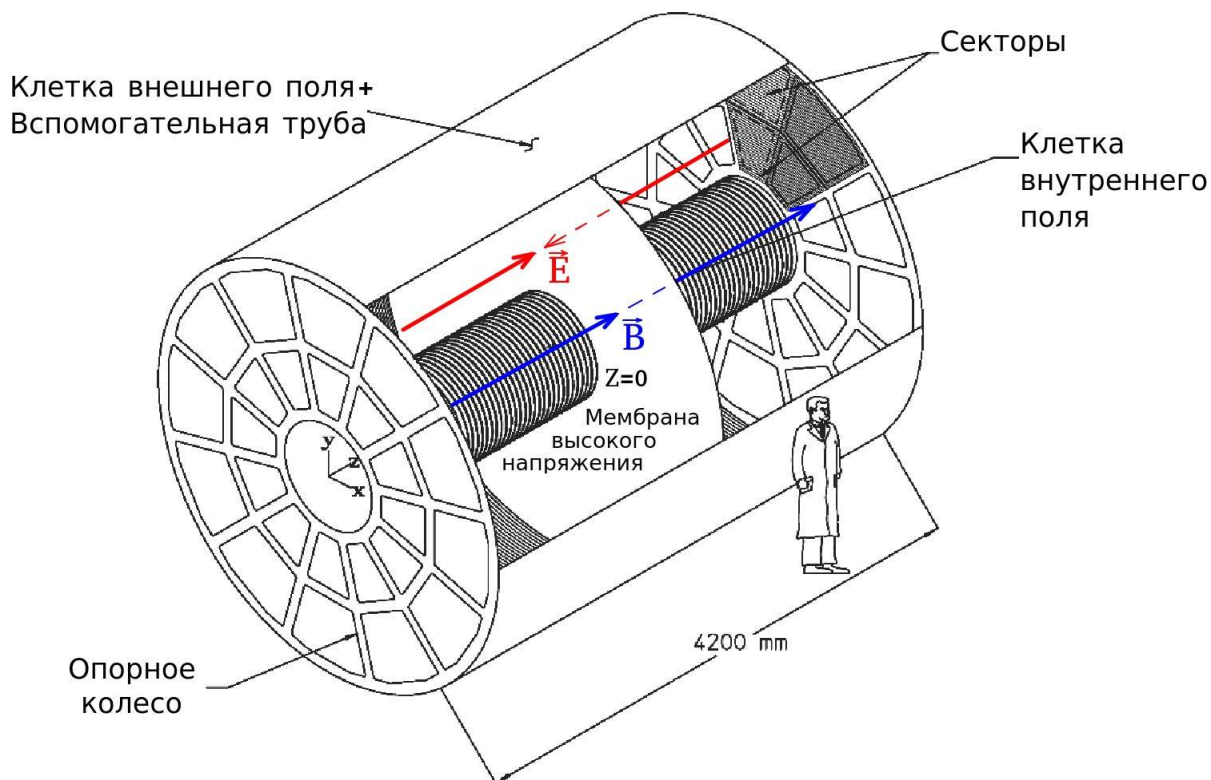


Рис 2.3: Время-проекционная камера

Глава 3. Обработка экспериментальных данных

3.1 Экспериментальные данные

Данные, используемые в этой работе, были получены в ходе программы BES-II. Всего было обработано около 500 тысяч событий.

3.2 Отбор качественных событий и треков

Не все события и не все треки достаточно качественны для анализа. Например, ион пучка мог столкнуться с трубой, а трек частицы, рожденной в подходящем событии – слишком коротким. Подобные данные не могут быть использованы для анализа.

Критерии отбора для событий:

- а. Вершина события по оси, параллельной оси движения пучка, должна лежать не далее чем в 30 см от геометрического центра детектора, иначе образовавшиеся частицы могут не попадать в боковую сторону детектора.
- б. Вершина в плоскости, перпендикулярной оси движения пучка, должна находиться не далее чем в 2 см от оси пучка, тем самым исключая события взаимодействия иона и трубы.
- в. Ультрапериферические события (80-100 %) в работе не рассматриваются.

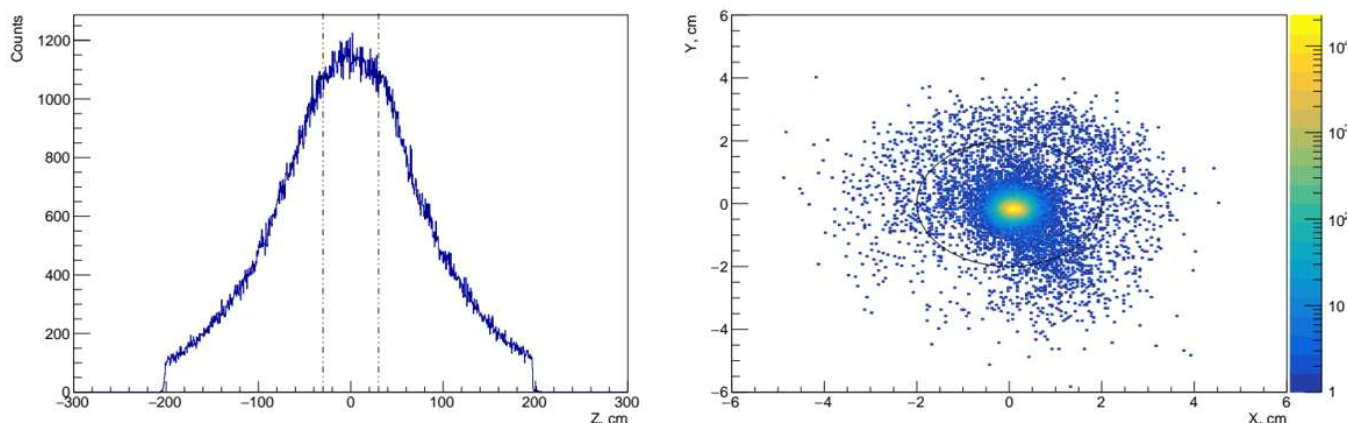


Рис 3.1 Положение вершины события. Слева – по оси пучка, справа – в

плоскости, перпендикулярной оси пучка

На треки частиц были наложены следующие условия:

- а. Поперечный импульс трека $p_T > 0.1$ ГэВ/с. Это ограничение связано с особенностью работы ТРС - частицы с малым поперечным импульсом плохо детектируются время-проекционной камерой.
- б. Псевдобыстрота $\eta \in [-1; 1]$, что соответствует попаданию трека в боковую поверхность ТРС.
- в. Количество точек трека $N_{\text{Hits}} > 16$. Данное ограничение связано со следующими причинами. Первая – большое количество точек – большее качество трека, и следовательно – более качественный анализ. Вторая – в области значений 12-15 явно наблюдается пик, связанный с прохождением частицы через высоковольтную мембрану ТРС. Это может привести к образованию двух смещенных треков, соответствующих одной частице.

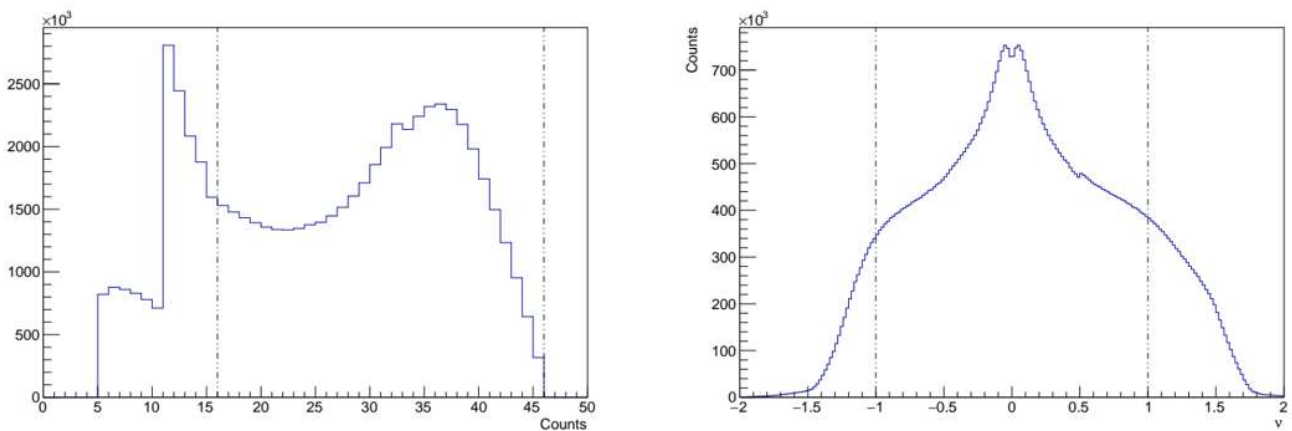


Рис 3.2 Количество срабатываний ТРС (слева) и распределение треков по псевдобыстроте (справа)

- г. Ионизационные потери треков должны соответствовать ионизационным потерям требуемых частиц. Для этой оценки используется параметр $n\sigma_{\text{particle}}$:

$$n\sigma_{\text{particle}} = \frac{1}{\sigma_{\text{particle}}} \log \frac{\langle dE/dx \rangle_{\text{measured}}}{\langle dE/dx \rangle_{\text{particle}}},$$

Где $\sigma_{particle}$ – разрешение ТРС по ионизационным потерям для данного типа частиц, $\langle dE/dx \rangle_{measured}$ – измеренные ионизационные потери, $\langle dE/dx \rangle_{particle}$ – теоретическая зависимость ионизационных потерь от импульса для данного типа частиц

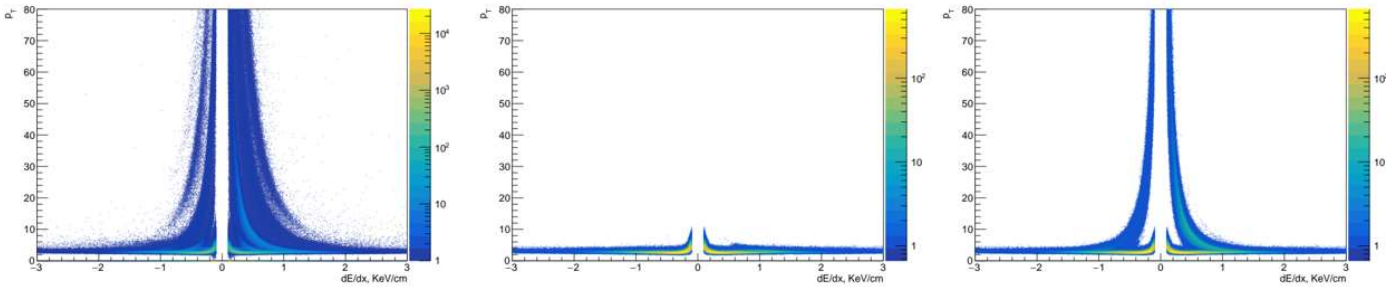


Рис 3.3: распределение треков по ионизационным потерям и поперечному импульсу. Слева – до наложения условий, по центру – треки, отобранные для реконструкции каонов, справа – треки, отобранные для реконструкции лямбда-гиперонов

3.3 Реконструкция странных адронов

В работе изучается рождение Λ гиперонов и короткоживущих странных каонов K_S^0 . Рассматриваемые моды распада:

$$K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- (69.20\%);$$

$$\Lambda(\bar{\Lambda}) \rightarrow p(\bar{p}) + \pi^-(\pi^+) (63.9 \%).$$

Обе рассматриваемые частицы – короткоживущие странные нейтральные адроны. Они не могут напрямую наблюдаться в ТРС. Однако их противоположно заряженные дочерние частицы в ТРС наблюдаться могут. Такие частицы имеют общее обозначение - V_0 .

В этой работе была применена техника инвариантной массы. Отобранные треки протонов и пионов экстраполируются попарно, и если пара отвечает заданным топологическим и кинематическим условиям, рассчитывается инвариантная масса система. Если инвариантная масса системы попадает в пик, соответствующий массе родительской частицы,

считается, что кандидат найден, после производится расчет его поперечного импульса для дальнейшего анализа.

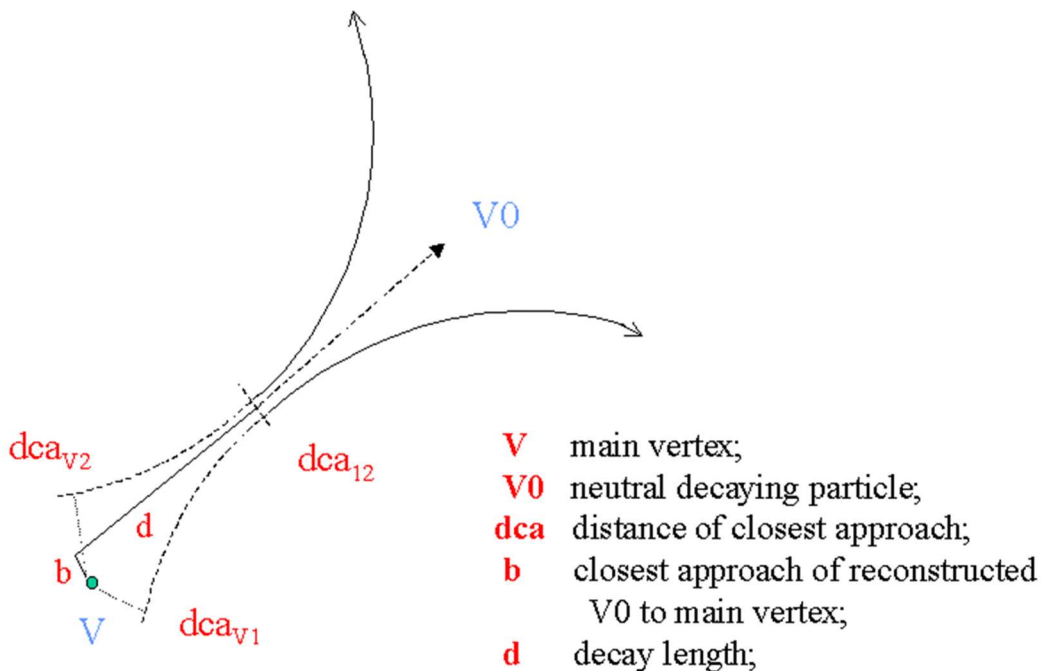


Рис 3.4: Схема распада V_0

Для анализа были применены следующие условия:

а. Расстояние наибольшего сближения дочерних частиц друг к другу $DCA_{12} < 0.8$. Это ограничение наложено для отделения частиц, которые родились как дочерние частицы в одном и том же акте распада V_0 .

б. Расстояние наибольшего сближения дочерних частиц к вершине события $DCA_{V1,V2}$:

для каонов: $DCA > 0.7$ см

для лямбда-гиперонов: $DCA_p > 1$ см, $DCA_\pi > 0.3$ см.

Это ограничение наложено для отделения частиц, рожденных в распадах V_0 от частиц, рожденных в первичной вершине события

в. Расстояние наибольшего сближения V_0 к вершине события $b < 0.8$ см. Это ограничение наложено для отделения V_0 , которые родились в первичной вершине

г. Длина распада $d_\Lambda > 2.5$ см, $d_K > 3$ см – типичные длины распада для данных типов частиц

После определения кандидатов исходя из топологических условий, производится анализ критерия Арментероса – Подолянского. Он был разработан для анализа подобных двух частичных распадов. Основа критерия - вычисление модуля поперечного (по отношению к направлению движения $V0$ - частицы) импульса p_t и некоторой безразмерной переменной α , характеризующей асимметрию между продольными импульсами $p_{||}$ положительно и отрицательно заряженных частиц из определенной $V0$ «вилки». Вследствие, каждому событию распада $V0$ - частицы можно сопоставить некоторую точку на плоскости (α, p_t) .

$$\alpha = \frac{p_L^+ - p_L^-}{p_L^+ + p_L^-}$$

Зависимость p_t от α для каждого рода частиц разная, что вкупе с анализом распределения инвариантных масс парных систем позволяет отсеять ложных кандидатов, возникающих из-за неверной идентификации дочерних частиц и следовательно – неверно приписанной им массой.

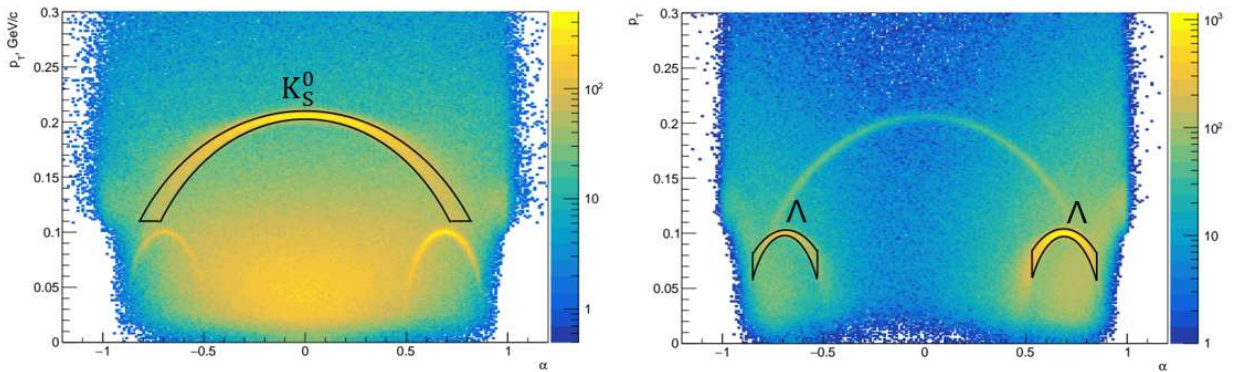


Рис 3.5: Диаграмма Арментероса-Подолянского с наложенными ограничениями.

Глава 4. Результаты

4.1 Распределение инвариантной массы

Ниже представлены спектры инвариантной массы для каждого рода частиц. Для дальнейшего анализа были отобраны кандидаты, масса которых лежит в пределах трех стандартных отклонений от среднего

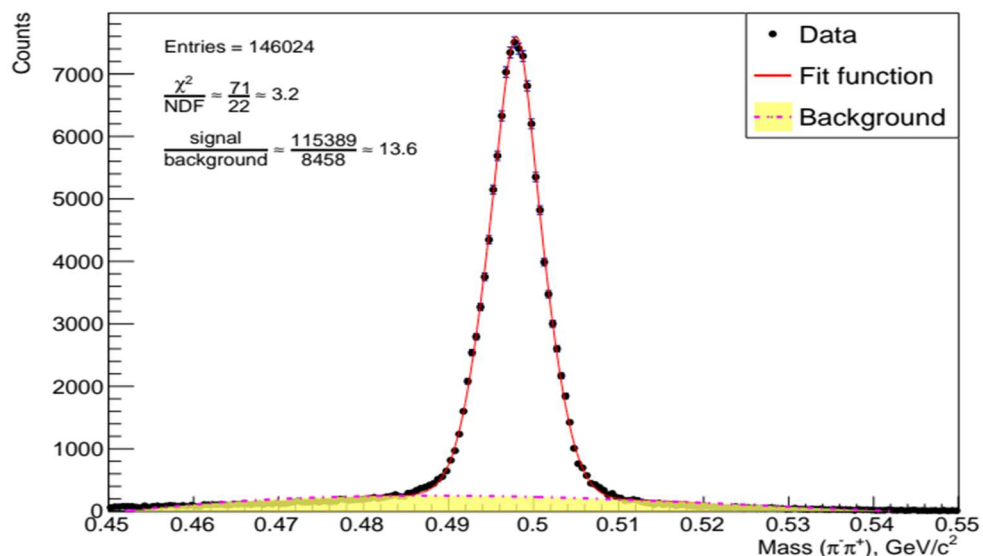


Рис 4.1 Спектр инвариантной массы $\pi^+\pi^-$

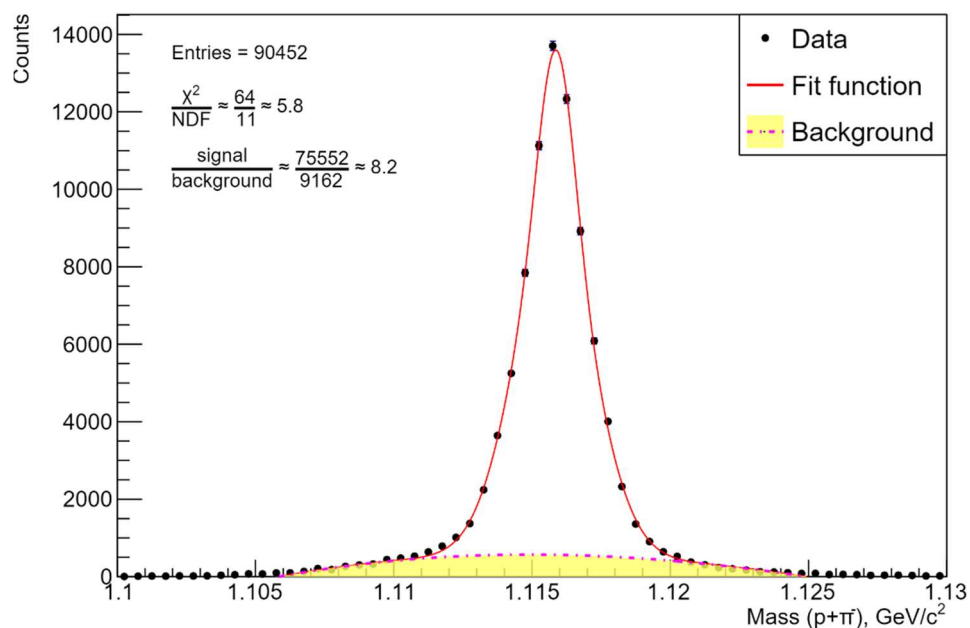


Рис 4.2 Спектр инвариантной массы $\rho^+\pi^-$

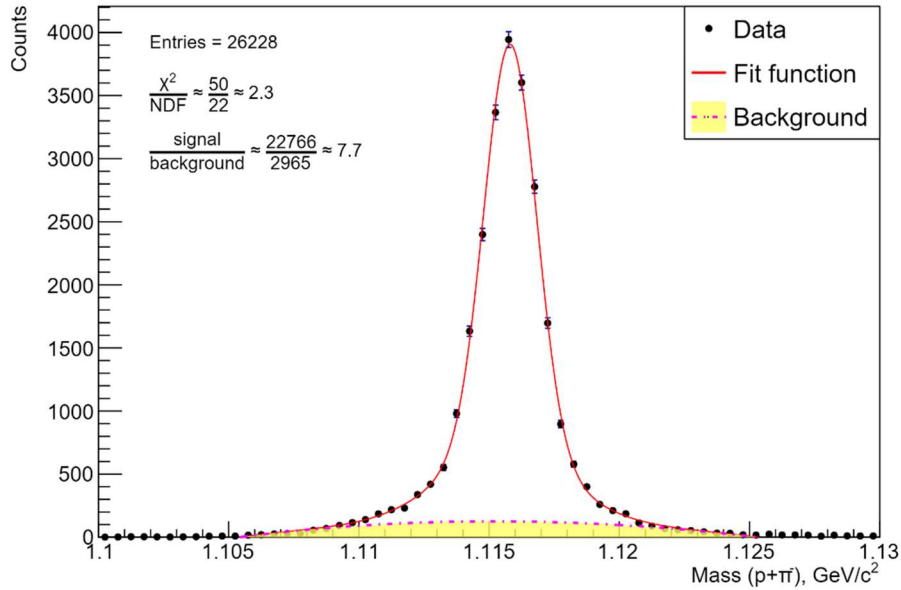


Рис 4.3 Спектр инвариантной массы $\bar{p} \pi^+$

4.2 Спектры поперечного импульса

Ниже представлены спектры поперечного импульса K_S^0 , Λ и $\bar{\Lambda}$. Линии разных цветов отображают классы центральности, наиболее центральные – выше, периферические – ниже. Спектры разных классов центральности нормированы на 10^N для лучшей читаемости. Падение выхода странных адронов при малых поперечных импульсах объясняется малой эффективностью детектора на малых импульсах.

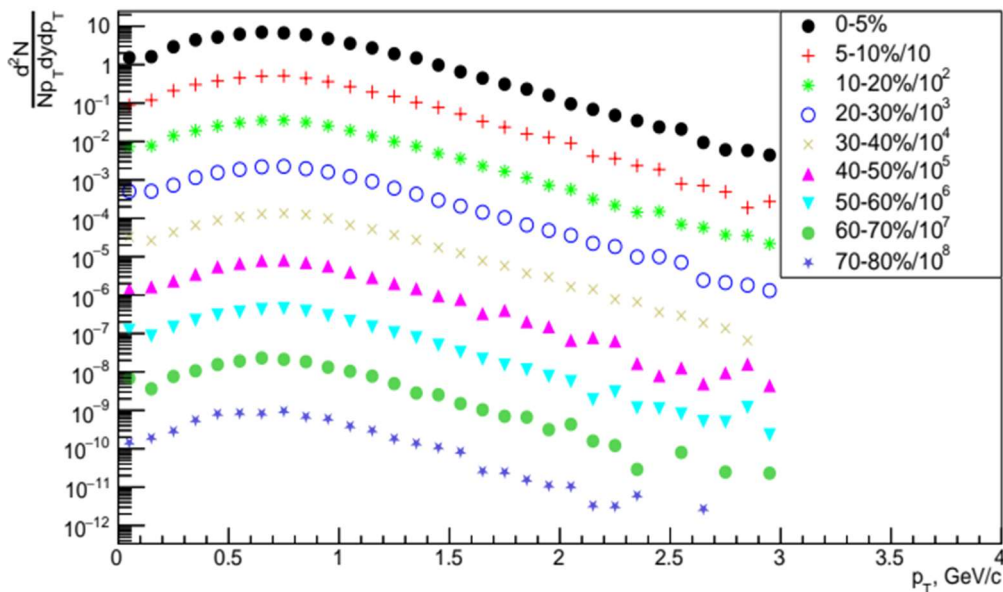


Рис. 4.4 Спектр поперечного импульса K_S^0

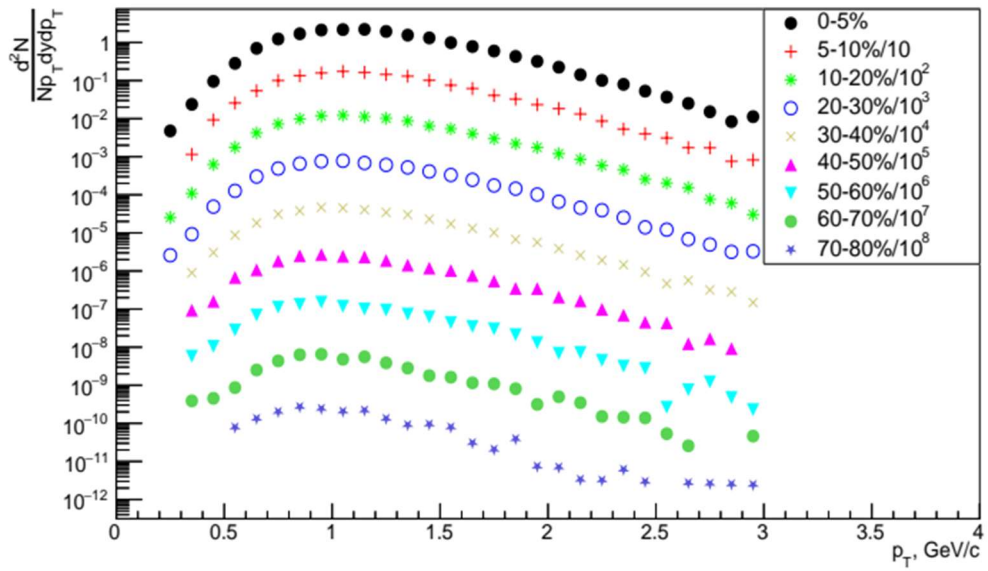


Рис 4.5 Спектр поперечного импульса Λ

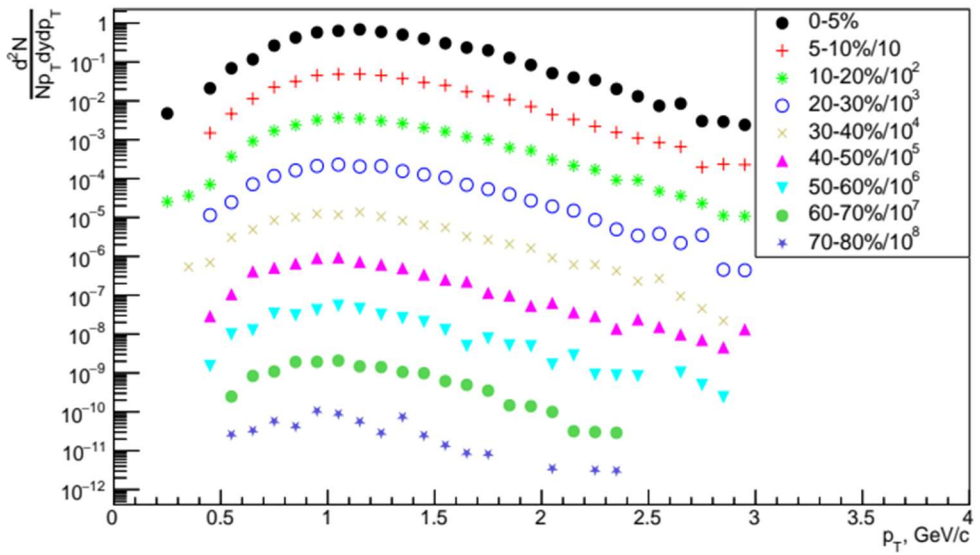


Рис 4.6: Спектр поперечного импульса $\bar{\Lambda}$

ВЫВОДЫ

В рамках выполнения данной работы были получены спектры поперечного импульса странных адронов в рамках эксперимента STAR:

1. В ходе выполнения работы были получены навыки работы с программным пакетом ROOT и библиотеками StROOT.
2. Произведена работа по отбору событий, треков и восстановлению топологии распада V_0 .
3. Из экспериментальных данных программы BES-II был получен сигнал K_S^0 , Λ и $\bar{\Lambda}$.
4. Получены спектры поперечного импульса K_S^0 , Λ и $\bar{\Lambda}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Столкновения ультрарелятивистских ядер позволяют экспериментально исследовать большие масштабы энергии, температур и плотностей ядерной материи, что в условиях современного развития теоретических методов может быть крайне затруднительно. Анализ как самого спектра поперечной массы, так и величин, которые можно извлечь из него, к примеру – фактора ядерной модификации и поперечной массы – позволяют исследовать условия, возникающие в столь горячем и плотном веществе, как кварк-глюонная плазма.

План дальнейших работ: увеличение объема обрабатываемых данных и введение коррекций на эффективность детектора. И, наиболее важное – производство подобного анализа на всех энергиях программы BES-II и извлечение иных параметров – фактора ядерной модификации, спектра поперечной массы, извлечение термодинамических параметров системы, образующейся в результате столкновения.

Список литературы

1. L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration) // Bulk properties of the medium produced in relativistic heavy-ion collisions from the beam energy scan program. – Physical Review C 96, 044904, 2017
2. J. Adam et al. (STAR Collaboration) // Strange hadron production in Au+Au collision at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 11.5, 19.6, 27$ and 39 GeV. – Physical Review C 102, 034909, 2020
3. K. H. Ackermann et al. (STAR Collaboration) // The STAR Time Projection Chamber: A Unique Tool for Studying High Multiplicity Events at RHIC. – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A499 659-678, 2003