

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

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**«ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ЗАВИХРЕННОСТИ И  
СПИРАЛЬНОСТИ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ТЯЖЕЛЫХ  
ИОНОВ НА УСТАНОВКЕ NICA/MPD»**

Выполнила студентка:  
409 академической группы  
Панюшкина София Сергеевна

---

Научный руководитель:  
профессор, доктор физ.-мат. наук  
Теряев Олег Валерианович

---

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

---

Допущена к защите \_\_\_\_\_  
Зав. кафедрой академик РАН  
Матвеев В. А. \_\_\_\_\_

МОСКВА  
2021

# Оглавление

Введение . . . . .	3
<b>1. Теория</b>	<b>4</b>
1.1. Квантовая хромодинамика . . . . .	4
1.2. Завихренность . . . . .	7
1.3. Способы вычисления завихренности . . . . .	8
1.4. Поляризация . . . . .	10
<b>2. Проект NICA</b>	<b>12</b>
2.1. Ускорительный комплекс NICA . . . . .	12
2.2. Эксперимент MPD . . . . .	13
2.3. TPC . . . . .	15
2.4. Времяпролетная система TOF . . . . .	16
2.5. FNCal . . . . .	16
<b>3. Результаты</b>	<b>18</b>
3.1. Данные . . . . .	18
3.2. Среда для обработки данных . . . . .	18
3.3. Поле скоростей . . . . .	19
3.4. Кинематическая релятивистская завихренность . . . . .	23
3.5. Термальная завихренность . . . . .	28
Выводы . . . . .	34
Заключение . . . . .	35
<b>Список использованных источников</b>	<b>36</b>

# Введение

Столкновения тяжелых ионов при высоких энергиях позволяют проводить уникальные исследования ядерного вещества при экстремальных барионных плотностях и температурах. Именно в таких условиях находилась вселенная на ранних этапах своего существования, т.е. спустя микросекунды после большого взрыва. Точное теоретическое описание подобных столкновений является крайне затруднительным из-за особенностей сильного взаимодействия.

Образованная в результате нецентральных столкновений система обладает большим моментом и ведет себя как квази-идеальная жидкость, поэтому можно говорить о существовании в ней завихренности. Изучение явления завихренности отдельно и вместе с другими эффектами представляет огромный интерес в современной релятивистской ядерной физике.

# Глава 1.

## Теория

### 1.1. Квантовая хромодинамика

Нуклоны (протоны и нейтроны) - наиболее часто встречающиеся стабильные частицы материи, которые состоят из кварков. Кварки - это элементарные частицы, участвующие в сильном взаимодействии, переносчиками которого являются глюоны. Кварки и глюоны обладают цветовыми зарядами, за счет обмена которыми и осуществляется взаимодействие. Теория, описывающая сильное взаимодействие называется квантовая хромодинамика (КХД) и, в отличие от теории квантовой электродинамики (КЭД), описывающей электромагнитные взаимодействия, уравнения КХД не могут быть точно решены аналитически. Подобная проблема возникает из уникальных свойств сильного взаимодействия - его переносчики, глюоны, сами несут цветовой заряд и, следовательно, обладают самодействием. Для проведения теоретических расчетов в КХД используются численные методы, например, вычисления “КХД на решетке”, суть которых сводится к численной дискретизации пространства и времени. Таким образом создается координатная сетка в которой происходит взаимодействие. Однако, область применимости подобных подходов достаточно сильно ограничена.

Наличие заряда у переносчика взаимодействия - основное отличие КХД от КЭД и из этого следует одно из удивительных свойств КХД - свойство “асимптотической свободы”. Оно заключается в том, что на сверхмалых расстояниях потенциал взаимодействия значительно ослаб-

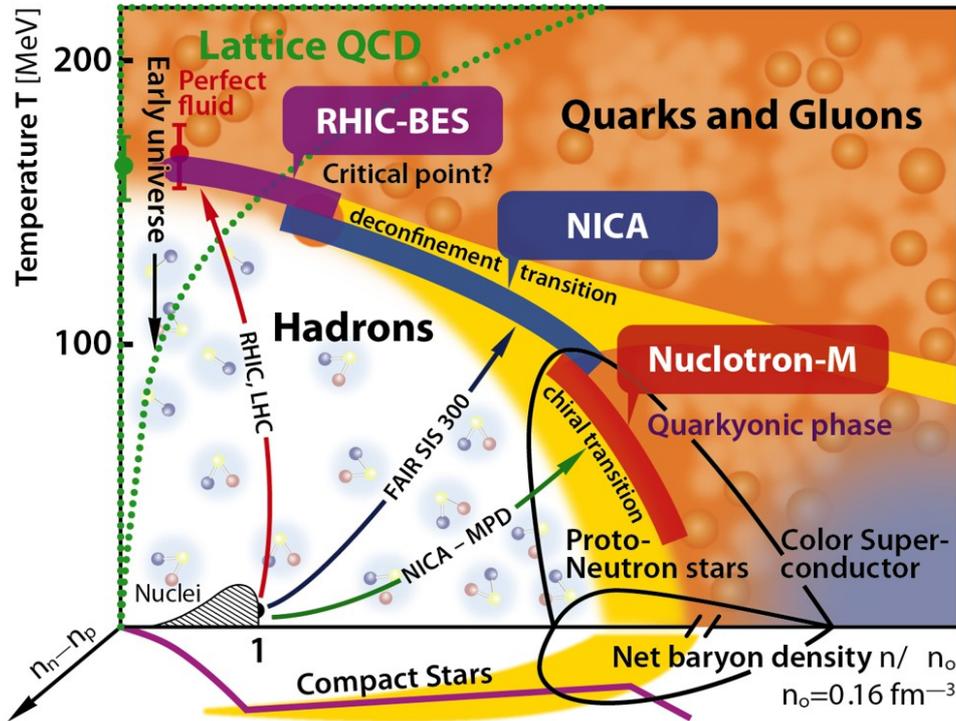


Рис. 1.1: Фазовая диаграмма ядерного вещества представленная в терминах энергетической температуры  $T$  и относительной барионной плотности  $n/n_0$ . Разными цветами показаны разные фазы ядерной материи. Отмечены области, доступные для исследования на различных экспериментальных установках. Зеленым отмечена область применимости теоретических вычислений на решетке.

ляется и кварки переходят в квази-свободное состояние. Другое важное свойство КХД состоит в явлении конфайнмента - резком росте потенциала взаимодействия при увеличении расстояния. Потенциал увеличивается до тех пор, пока энергии не станет достаточно для образования из вакуума новой кварк-антикварковой пары. Следствием конфайнмента является невозможность наблюдать объекты с явным цветовым зарядом в свободном состоянии. [1]

Из подобных свойств сильного взаимодействия следует предположение о том, что может существовать состояние квази-свободных кварков и глюонов, когда вследствие высоких температур или плотностей взаимодействие между ними слабеет и они больше не удерживаются внутри нуклонов. Такое состояние получило название “кварк-глюонная плазма”

(КГП). Предполагается, что в таком состоянии находилась Вселенная на ранних этапах развития, в первые микросекунды после Большого взрыва. При дальнейшем расширении, плотность энергии, а следовательно и температура материи уменьшалась, происходила адронизация кварков и первичный бариогенез. На определенном этапе эволюции, адроны перестали взаимодействовать, состав материи перестал меняться, и постепенно, в результате дальнейшей эволюции и охлаждения Вселенная приобрела современный вид.

Явление перехода ядерной материи в состояние “кварк-глюонной плазмы” возможно получить экспериментально. В столкновениях тяжелых ионов при достаточной энергии ускорителя достижима плотность энергии значительно превышающая среднюю плотность энергии в нуклоне  $n_0 = 0.16 \text{ ГэВ/фм}^3$ . Это означает, что возможно экспериментальное изучение КГП. Схематичное изображение фазовых переходов в ядерной среде показано на рисунке 1.1.

Процессы фазовых переходов в адронной материи можно рассматривать по аналогии с классическими термодинамическими системами. На фазовой диаграмме КХД 1.1 материя представлена в терминах энергетической температуры и барионной плотности  $n_0$  (или сопряженной с ней величиной - бариохимическим потенциалом  $\mu_0$ ). Холодная ядерная материя наблюдается в ядрах с номинальной плотностью  $n_0 = 0.16 \text{ ГэВ/фм}^3$ , состоящих из нуклонов. При умеренных температурах и плотностях нуклоны возбуждаются в короткоживущие состояния (барионные резонансы), которые распадаются, испуская мезоны или фотоны. При дальнейшем увеличении температуры могут рождаться также пары частица-античастица. Эта смесь сильно взаимодействующих частиц обычно называется адронной материей. При очень высоких температурах или плотностях адроны “плавятся” на составляющие их кварки и глюоны (происходит процесс деконфайнмента), образуя новые фазовые состояния, в которых длина свободного пробега кварка уже превышает линейные размеры нуклона.

Кварковая материя может возникать в столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ионов на короткое время, превращаясь затем в обычную адронную материю и распадаясь на конечные адроны. Схематично этот процесс изображен на рисунке 1.2. Образованная в результате столкновения тяжелых ионов система демонстрирует коллективные свойства и, следовательно, может быть описана методами релятивистской гидродинамики. В частности, большой эллиптический поток, наблюдаемый в этих столкновениях, показывает, что система является сильно связанной с очень низкой вязкостью. В связи с гидродинамическим описанием системы можно говорить о существовании предельно высокой завихренности, самой высокой, когда либо производимой в лабораторных условиях.

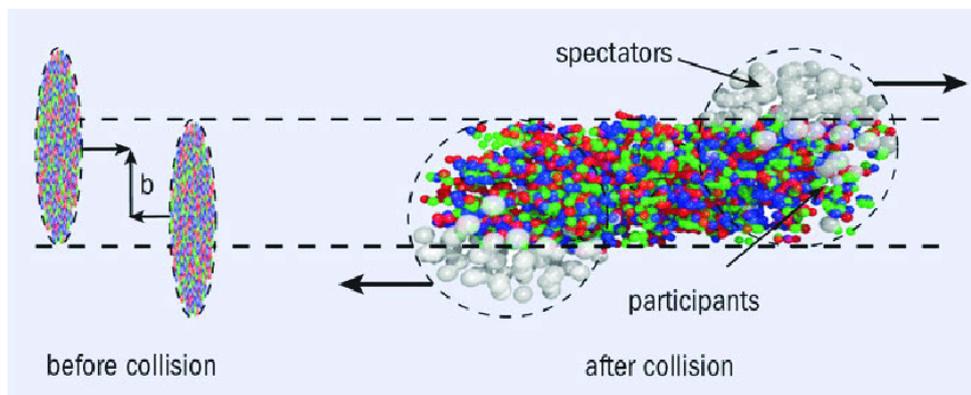


Рис. 1.2: Схематичное изображение столкновения двух тяжелых ионов. До столкновения ядра сжаты вдоль траектории движения за счет эффекта Лоренца. После столкновения в области перекрытия ядер может возникать система из квази-свободных кварков и глюонов. Цветными точками отмечены отдельные кварки и глюоны.

## 1.2. Завихренность

Завихренность является обычным эффектом как в классических, так и в квантовых жидкостях. Примеры подобного поведения можно обнаружить в системах в широком диапазоне масштабов от вращающихся галактик, торнадо в атмосфере Земли, до квантовых вихрей в сверхтекучих жидкостях.

Схожее поведение можно обнаружить и при нецентральных столк-

новениях тяжелых ионов, где существует несколько путей образования завихренности. Основным является большой угловой момент образованной системы, который можно оценить по формуле  $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = Ab\sqrt{s}/2$ , где  $b$  - прицельный параметр,  $A$  - число нуклонов в одном ядре. После столкновения его часть сохраняется в кварк-глюонной плазме в виде углового вращения жидкости. Также источниками завихренности являются сверхсильное магнитное поле, расширяющиеся струи в кварк-глюонной плазме и неоднородное пространственное расширение фаербола.

### 1.3. Способы вычисления завихренности

В классической физике завихренность - это мера локальной угловой скорости жидкости. Другими словами, завихренность говорит о том, как изменяется вектор скорости при движении на бесконечно малое расстояние в перпендикулярном направлении.

Можно представить, что мгновенно крошечная часть сплошной среды становится твердой, а вся остальная часть потока исчезает. Если при этом новая твердая частица начинает вращаться, а не просто двигаться по направлению потока, то можно говорить, что в системе существует завихренность (Рис. 1.3).

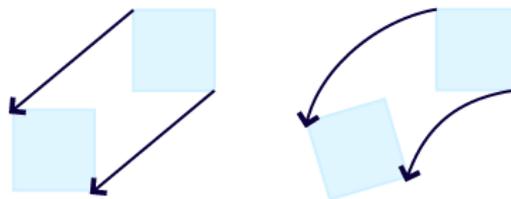


Рис. 1.3: Слева движение в системе в отсутствии завихренности, справа - при наличии завихренности.

Существует несколько определений завихренности в литературе, которые удобны для анализа эффектов, возникающих в результате наличия вращения в системе. В классической гидродинамике завихренность

определяется через ротор вектора классической скорости:

$$\vec{\omega} = \vec{\nabla} \times \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ v_x & v_y & v_z \end{vmatrix} \quad (1.1)$$

В релятивистской гидродинамике завихренность определяется формулой:

$$\omega_{\mu\nu}^{(K)} = \frac{1}{2}(\partial_\nu v_\mu - \partial_\mu v_\nu), \quad (1.2)$$

где  $v$  - 4-вектор скорости.

В настоящей работе также производится расчет термальной завихренности:

$$\begin{aligned} \omega_{\mu\nu}^{(th)} &= \frac{1}{2}(\partial_\nu \beta_\mu - \partial_\mu \beta_\nu) \\ &= \frac{1}{T}\omega_{\mu\nu}^{(K)} - \frac{1}{2T^2}(v_\mu \partial_\nu T - v_\nu \partial_\mu T) \\ &= \frac{1}{T}\omega_{\mu\nu}^{(K)} + \omega_{\mu\nu}^{(th)}(T), \end{aligned} \quad (1.3)$$

где  $\beta_\mu = (1/T)v_\mu$  - 4-вектор распространения температуры,  $v_\mu$  - гидродинамическая скорость и  $T$  - соответствующая температура. Термальная завихренность имеет несколько особенностей. Во-первых, она безразмерна в декартовых координатах, и во-вторых, является фактически постоянной величиной при глобальном равновесии вращающейся релятивистской системы. В общем, можно легко понять, что безразмерная термальная завихренность является малой величиной для большинства гидродинамических систем, хотя она может быть значительной для плазмы, образующейся при релятивистских столкновениях тяжелых ионов [3]. Также, она используется при расчете глобальной поляризации в термодинамическом подходе [3].

## 1.4. Поляризация

Огромный интерес представляет изучение связи завихренности с явлением глобальной поляризации. Основная идея о том, что частицы в нецентральных столкновениях поляризованы вдоль начального (большого) углового момента образованной плазмы была представлена более десяти лет назад [5]. Развитие этой идеи привело к утверждению, что глобальная поляризация определяется условиями локального термодинамического равновесия и количественно связана с завихренностью.

$$P_\Lambda \approx \frac{\omega}{2T} + \frac{\mu_\Lambda B}{T}, \quad (1.4)$$

где  $\mu_\Lambda$  - магнитный момент  $\Lambda$  [3].

Явление глобальной (т.е. связанной с большим угловым моментом) поляризации тесно связано с эффектом Барнета, суть которого в появлении намагниченности за счет вращения, когда часть орбитального момента, связанная с вращением системы, необратимо преобразуется в спин атомов (электронов), направленный в среднем вдоль углового момента. В физике конденсированного состояния вещества гиромангнитные явления часто обсуждаются на основе теоремы Лармора, которая утверждает, что влияние вращения на систему эквивалентно применению магнитного поля  $\vec{B} = -\gamma\vec{\Omega}$ , где  $\gamma$  - гиромангнитное соотношение.

Однако, стоит упомянуть, что возникновение поляризации в результате вращения и под действием внешнего магнитного поля концептуально разные эффекты. В частности, в случае вращения поляризация одинакова для частиц и античастиц, а во внешнем магнитном поле - противоположна. Это означает, что магнетизация из-за вращения не может быть исследована в полностью нейтральной системе и вышеупомянутая теорема Лармора не применима.

Эффекты вихревой природы могут также сильно влиять на барионную динамику системы, приводя к разделению барионов и антибарионов в направлении завихренности (перпендикулярной плоскости реак-

ции). Такой процесс называется киральным вихревым эффектом [3]. Он в свою очередь во многом похож на более известный киральный магнитный эффект, суть которого в разделении электрического заряда в направлении магнитного поля. И для достаточно достоверного теоретического описания обоих эффектов необходимо знать завихренность создаваемой системы в дополнение к эволюции электромагнитного поля.

## Глава 2.

# Проект NICA

### 2.1. Ускорительный комплекс NICA

Современная теоретическая физика предсказывает, что материя может существовать в нескольких состояниях: адронное вещество, кварк-глюонная плазма и связывающий их переходный процесс - смешанная фаза. Чтобы исследовать эти состояния при высокой барионной плотности, требуется, чтобы энергия столкновений была высокой. Также представляет интерес поиск и изучение новых форм барионной материи, которые не наблюдались раньше. В экспериментах на коллайдере RHIC была открыта новая фаза ядерной материи, но энергия ускорителя оказалась слишком высока для детального изучения свойств фазового перехода. Когда стало ясно, что существующие установки не смогут обеспечить нужную энергию столкновений, был предложен проект комплекса NICA.

The Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA) - новый сверхпроводящий ускорительный комплекс, в настоящее время строящийся на территории Объединенного Института Ядерных Исследований (ОИЯИ). Основной задачей является создание комплекса для изучения свойств сверхплотной горячей материи, образующейся при столкновении тяжелых ионов. Проект будет обеспечивать набор данных в диапазоне энергий  $\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$  ГэВ, что позволит исследовать сильно взаимодействующую материю в области с температурами и барионными плотностями, при которых теория КХД предсказывает фазовый переход между

состояниями адронного газа и кварк-глюонной плазмы.

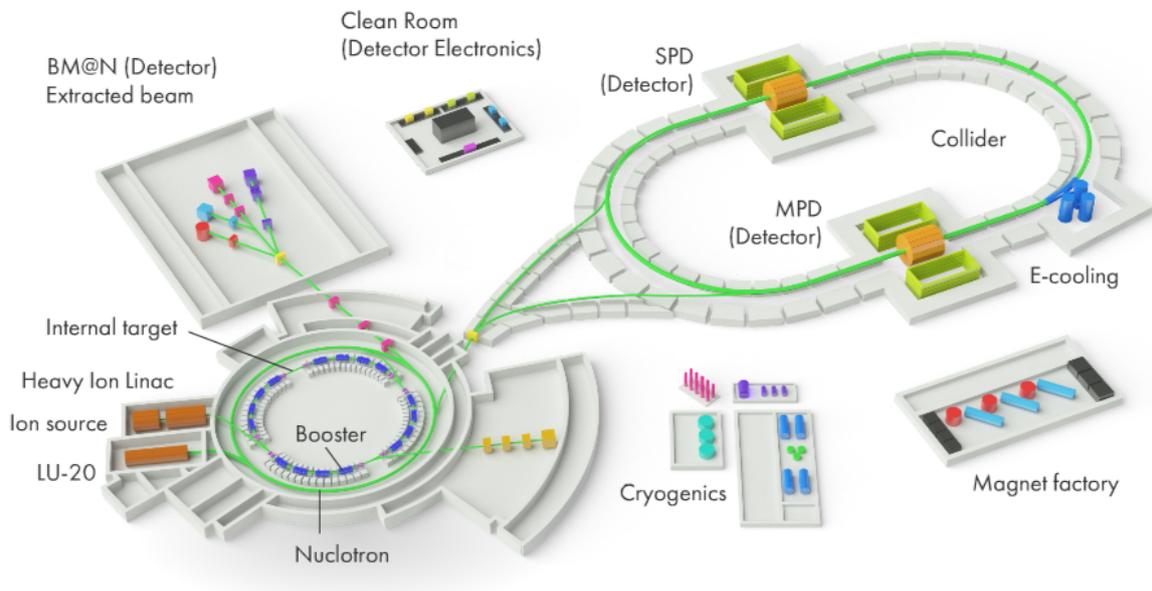


Рис. 2.1: Схема комплекса NICA

## 2.2. Эксперимент MPD

Программа эксперимента включает в себя несколько фундаментальных тем, изучение которых сегодня представляет наибольший интерес. К ним относятся:

1. Изучение свойств фазового перехода из адронного газа в состояние деконфайнмента
2. Восстановление киральной симметрии
3. Поиск критических точек КХД

Эксперимент включает одновременные измерения наблюдаемых величин, которые, предположительно, чувствительны к эффектам высокой плотности и фазовым переходам. В частности, этими наблюдаемыми являются выходы частиц, отношения выходов частиц, различные корреляции и флуктуации, потоки различных порядков.

Основная задача, которая будет решаться на ускорительном комплексе NICA, требует создания экспериментальной установки, способной

регистрировать с высокой эффективностью частицы, рождающиеся при столкновении пучков тяжелых ионов; идентифицировать их тип и определять энергию; восстанавливать вершины первичного взаимодействия и координаты рождения вторичных частиц. Все вышеперечисленное можно осуществить с помощью многоцелевого детектора (MPD).

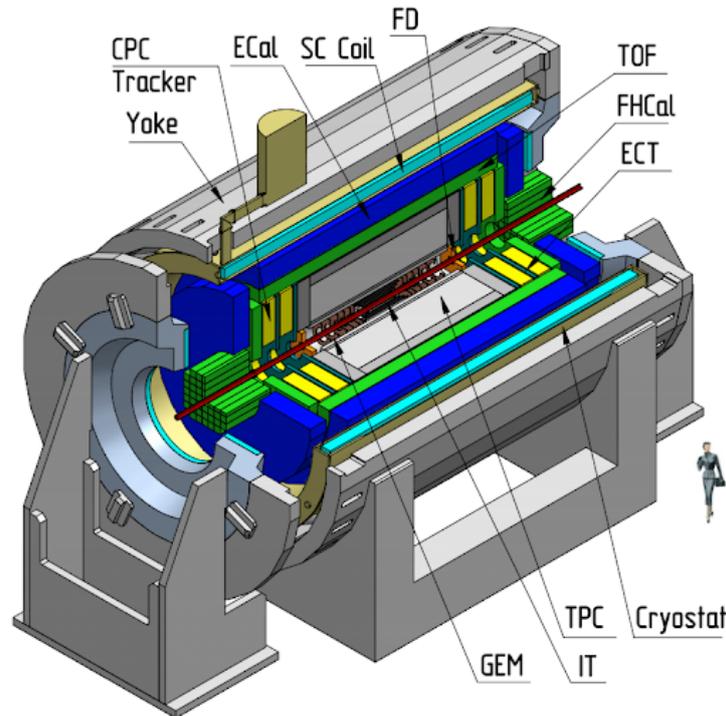


Рис. 2.2: Схема детектора MPD.

На 2.2 представлена схема детектора MPD. Установка имеет цилиндрическую форму и состоит из различных типов детекторов, расположенных вокруг точки столкновения пучков. В качестве основной трековой системы была выбрана время-проекционная камера (TPC). Вместе с внутренней трековой системой, основанной на кремниевых полупроводниковых детекторах (IT), они обеспечивают точное восстановление трека и импульса частиц, а также определяют вершину распада короткоживущих частиц. Область действия этих детекторов по псевдобыстроте -  $|\eta| < 1.2$ . Время-пролетная система (TOF) обеспечивает идентификацию частиц с импульсами до 2 ГэВ/с. Область эффективности этой системы -  $|\eta| < 2$  [9].

## 2.3. ТРС

Время-проекционная камера - основной трековый детектор МРД. Она обеспечивает точное измерение импульса заряженных частиц и их идентификацию по характерным потерям энергии  $dE/dx$ , а также по искривлению треков в магнитном поле. Также возможно определение вершины взаимодействия для адронов и лептонов в центральной области псевдобыстрот  $|\eta| < 1.2$  и при поперечных импульсах  $p_t > 100$  МэВ/с.

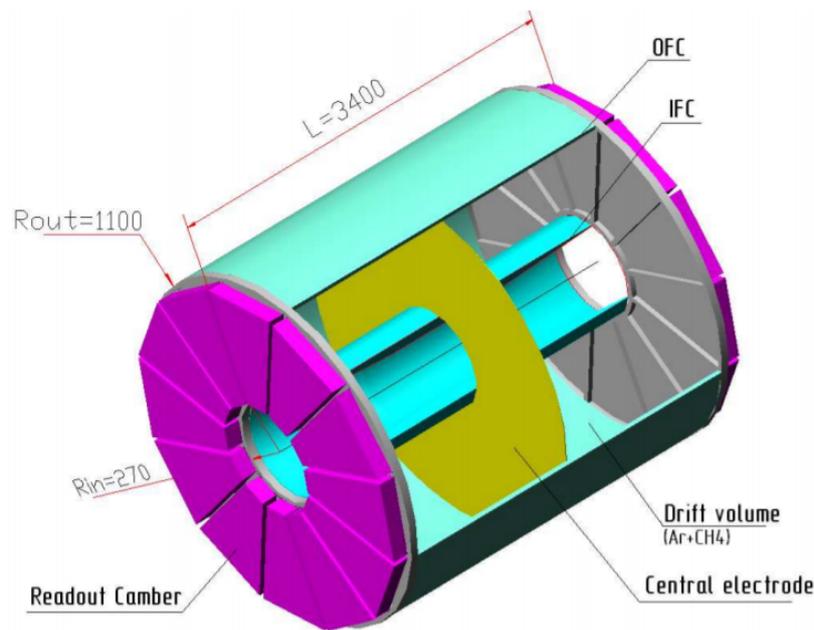


Рис. 2.3: Схема время-проекционной камеры. Пространство между OFC и IFC заполнено газовой смесью, в центре расположен катод, по краям - аноды.

Принцип работы заключается в регистрации дрейфующих вторичных заряженных частиц, которые создает первичная частица при движении в объеме детектора. Координаты определяются с помощью многопроволочных камер, расположенных на торцах детектора. Объем заполняется газовой смесью  $Ar(90\%) + CH_4(10\%)$ . Такая комбинация газов обеспечивает высокую скорость дрейфа, достигающую максимума при низком электрическом поле. Основные требования к ТРС при столкновениях  $Au - Au$ :

1. Необходимость эффективно регистрировать треки в интервале псевдобыстрот  $|\eta| < 1.2$
2. Двухтрековое разрешение порядка 1 см
3. Разрешение по  $dE/dx$  должно быть лучше 8%.

## 2.4. Времяпролетная система ТОФ

Времяпролетная система используется для более точного определения типа частиц. Совместное использование ТОФ и ТРС позволяет идентифицировать заряженные адроны и ядерные кластеры в широком диапазоне быстрот и импульсов (до 2 ГэВ/с). Стартовый сигнал для системы обеспечивает быстрый передний детектор (FD). Основные требования к ТОФ системе:

1. Широкий охват фазового пространства  $|\eta| < 2$
2. Хорошее координатное разрешение для эффективного сшивания реконструированных треков из ТРС и ТОФ
3. Стабильная работа компонентов ТОФ в магнитных полях до 1.5 Тл.

## 2.5. FHCAL

В физике тяжелых ионов определение центральности столкновения используется для изучения таких наблюдаемых явлений, как коллективный поток, кратности частиц и флуктуации, которые сильно изменяются в зависимости от центральности. Коллективный поток образующихся в столкновениях частиц является важным наблюдаемым явлением, которое содержит информацию о динамике реакции и свойствах образованной материи в фаерболе. Центральность столкновения может быть определена с помощью измерения энергии, которую уносят невзаимодействующие нуклоны (spectators на Рис. 1.2).

Передний адронный калориметр (FHCAL) был разработан специально для определения центральности и определения плоскости реакции

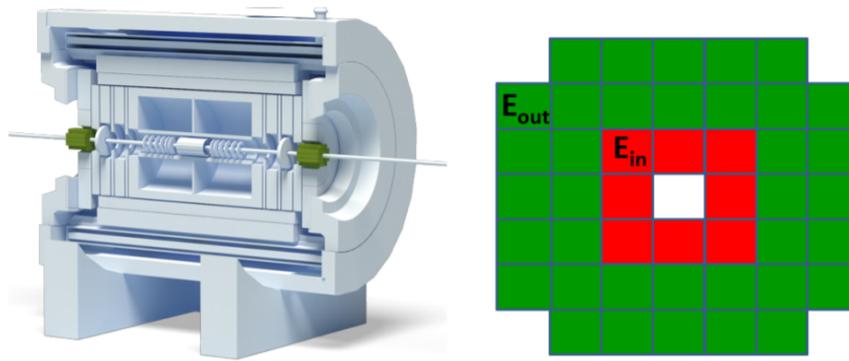


Рис. 2.4: Схема расположения FHCAL в MPD (слева) и его поперечный слой с 44 отдельными модулями (справа).

столкновений. Он состоит из двух модулей, расположенных на торцах детектора симметрично от точки взаимодействия. Обе части детектора содержат по 45 отдельных модулей, состоящих из 42 слоев свинец/сцинтиллятор с площадью поверхности  $15 \times 15$   $\text{cm}^2$ . FHCAL должен обладать несколькими качествами: иметь достаточно высокое энергетическое разрешение и модульную структуру с высокой степенью координатной детализации для определения центра распределения спектров от события к событию.

## Глава 3.

# Результаты

### 3.1. Данные

В настоящей работе используются данные Монте-Карло генератора UrQMD столкновений ядер золота при различных энергиях ( $\sqrt{s_{NN}} = 9$  и  $11$  ГэВ). Число событий  $4 \cdot 10^5$  и  $1,83 \cdot 10^5$  соответственно.

Ultra relativistic Quantum Molecular Dynamics (UrQMD) - это микроскопическая модель, которая описывает феноменологию адронных взаимодействий при низких и промежуточных энергиях ( $\sqrt{s_{NN}} < 5$  ГэВ) в терминах взаимодействий между известными адронами и их резонансами. При более высоких энергиях, ( $\sqrt{s_{NN}} > 5$  ГэВ), возбуждение цветных струн и их последующая фрагментация на адроны доминируют над многократным образованием частиц в модели UrQMD. Модель представляет собой решение методом Монте-Карло большого набора связанных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных для временной эволюции различных плотностей фазового пространства частиц.

### 3.2. Среда для обработки данных

Обработка данных производилась с помощью программного пакета ROOT. ROOT - это основанная на C++ объектно-ориентированная среда разработки, предназначенная для обработки и анализа большого объема данных, получаемых в ходе проведения экспериментов в физике высоких энергий. В дополнение к ROOT используется пакет MpdRoot (на основе

библиотек FairSoft и FairRoot).

Все сгенерированные файлы с данными, используемые в работе, хранятся со специальным расширением `.root`, которое позволяет значительно сэкономить дисковое пространство для хранения информации. Внутри файла данные хранятся в специально созданном формате - рут дерево (ROOT TTree). Оно состоит из списка независимых столбцов, называемых ветвями. Ветвь может содержать все типы данных, такие как объекты или массивы, в дополнение ко всем простым типам. Так, в используемых в этой работе файлах в ветвях записана информация об импульсах частиц, их координатах и другие данные, рассчитанные при моделировании [8].

```
-----  
| Welcome to ROOT 6.22/02                               https://root.cern |  
| (c) 1995-2020, The ROOT Team; conception: R. Brun, F. Rademakers |  
| Built for macosx64 on Aug 17 2020, 12:46:52           |  
| From tags/v6-22-02@v6-22-02                           |  
| Try '.help', '.demo', '.license', '.credits', '.quit'/.q' |  
-----  
  
root [0]
```

Рис. 3.1: Стартовый экран ROOT.

Таким образом, ROOT позволяет хранить и извлекать данные оптимальным способом, что повышает производительность ввода-вывода и упрощает последующую обработку данных. Это позволило провести тестирование, отладку и запуск всей процедуры анализа на небольших объемах модельных данных на локальной машине.

### 3.3. Поле скоростей

Поле скоростей было рассчитано с использованием энергий и импульсов всех частиц в конечном состоянии. Для вычислений использовались два метода представления взаимодействия образованной в столкновении системы - гидродинамический и кинематический. Для обоих ме-

тодов сначала пространство было представлено в виде трехмерной решетки, каждая ячейка которой является прямоугольным кубоидом со следующими параметрами:  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 25$  см. [4]

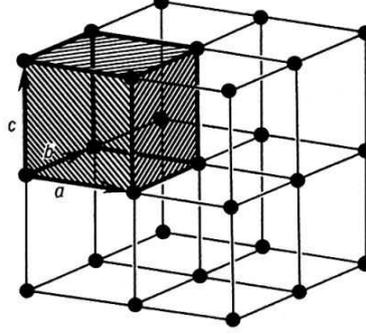


Рис. 3.2: Схема разбиения пространства

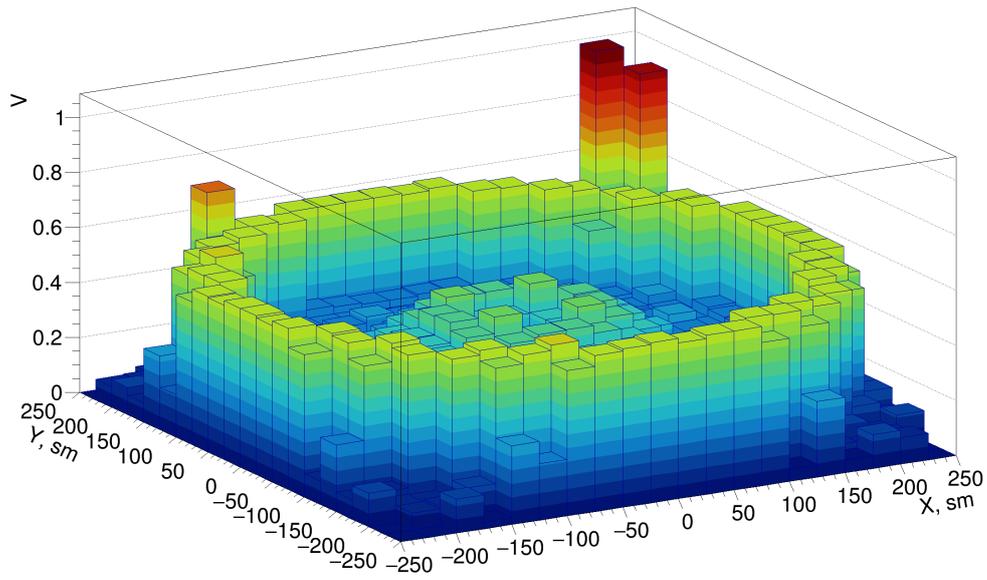
При расчете поля скоростей с помощью гидродинамического метода каждая отдельная ячейка представляется как самостоятельная капля сильно взаимодействующей жидкости, т.е. импульсы и энергии отдельных частиц суммируются внутри пространственных ячеек, где они были зафиксированы, и вычисленная скорость ячейки усредняется по событиям. Соответствующая формула для вычислений:

$$v_i^{hyd}(m, n, k) = \left\langle \frac{\sum_{track} P_i(m, n, k)}{\sum_{track} E_i(m, n, k)} \right\rangle_{event}, i = x, y, z \quad (3.1)$$

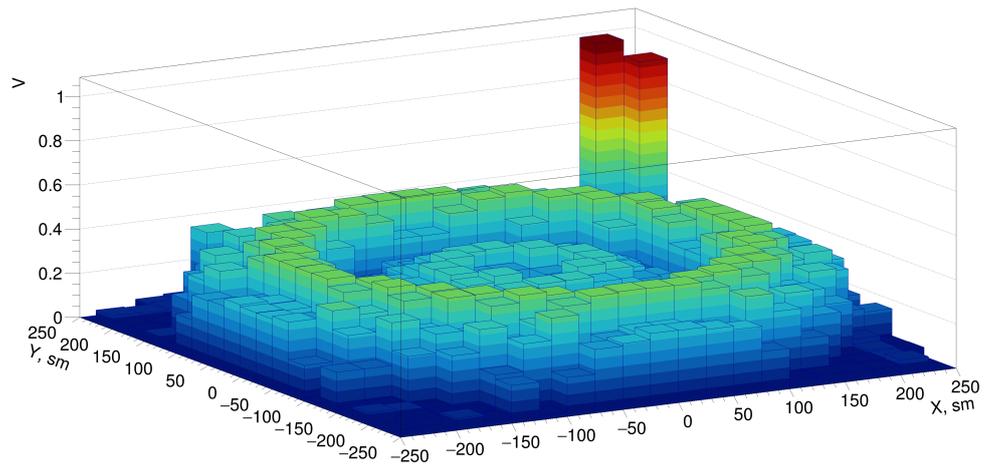
где  $(m, n, k)$  - соответствующая ячейка.

Кинематический метод рассматривает все частицы отдельно, т.е. сначала происходит расчет скоростей, затем суммирование скоростей в ячейках и усреднение по событиям:

$$v_i^{kin}(m, n, k) = \left\langle \sum_{track} \frac{p_i(m, n, k)}{E_i(m, n, k)} \right\rangle_{event}, i = x, y, z \quad (3.2)$$

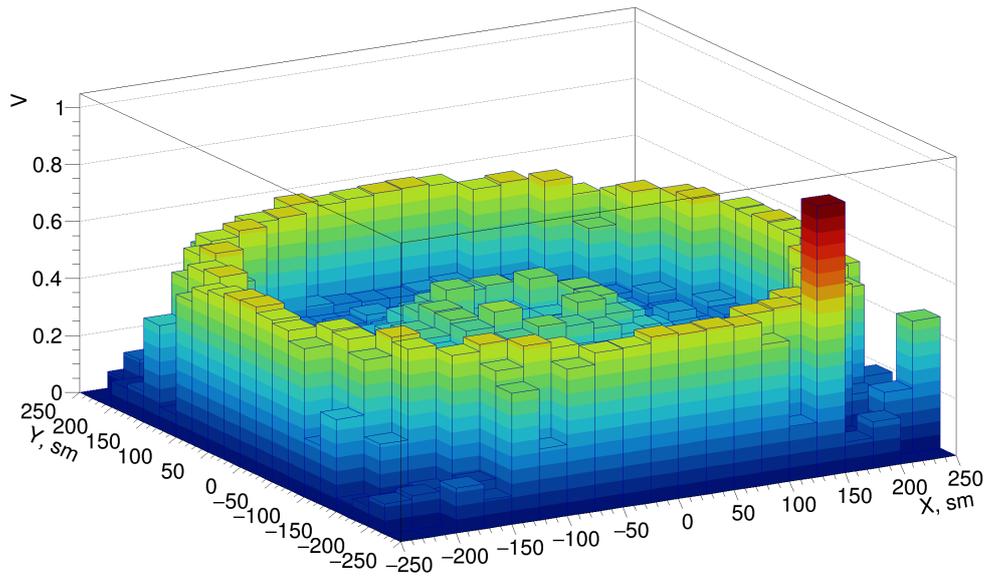


(a)

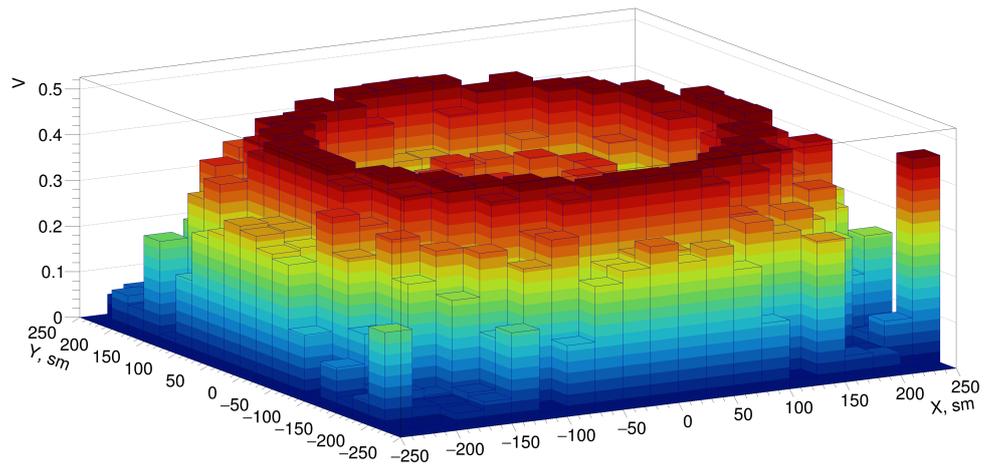


(b)

Рис. 3.3: Карта скоростей в ячейках среды в плоскости  $xy$  для слоя  $z \in (0;25)$ ,  $\sqrt{s_{NN}} = 9$  ГэВ, рассчитанная двумя методами: а) гидродинамическим б) кинематическим.



(a)



(b)

Рис. 3.4: Карта скоростей в ячейках среды в плоскости  $xy$  для слоя  $z \in (0;25)$ ,  $\sqrt{s_{NN}} = 11$  ГэВ, рассчитанная двумя методами: а) гидродинамическим б) кинематическим.

На графиках в обоих случаях видна ожидаемая качественная картина скорости: частицы, находящиеся дальше от точки взаимодействия, имеют большую скорость. Также видны различия для двух методов. Значения скорости рассчитанные кинематическим методом меньше и сильнее смещены к центру. При гидродинамическом методе ширина перифе-

рийной области является более узкой, чем при кинематическом, и практически совпадает с шириной элементарной ячейки пространства.

Для обоих методов при разных энергиях можно наблюдать расположенные в углах пики, причем для каждой энергии они находятся в разных местах. Скорее всего, причиной их появления является ошибка при генерации данных, таким образом, пики не несут физического смысла и их вклад не следует рассматривать в дальнейшем анализе.

### 3.4. Кинематическая релятивистская завихренность

Полученные двумя способами поля скоростей были использованы для расчета кинематической завихренности. Представление формулы 1.2 для численного расчета:

$$\omega_y(m, n, k) = \frac{v_x^{k+1} - v_x^k}{\Delta z} - \frac{v_z^{m+1} - v_z^m}{\Delta x} \quad (3.3)$$

На графиках прослеживается образование квадрупольной структуры завихренности, как для гидродинамического метода (Рис. 3.7), так и для кинематического (Рис. 3.8). Похожая картина раньше была представлена в других работах [6]. Наблюдается общее поведение завихренности: квадрупольная структура четко видна в центральных слоях, т.е. в области столкновения частиц, а при отдалении от точки взаимодействия, распределение становится более изотропным.

Различия методологии подсчета двух завихренностей отражается в также на амплитудах эффекта. При использовании скорости, подсчитанной гидродинамическим методом, значения получаются на порядок выше, чем при использовании кинематической скорости. Это подтверждает целесообразность использования гидродинамической модели для описания образующейся в столкновениях сильно взаимодействующей материи.

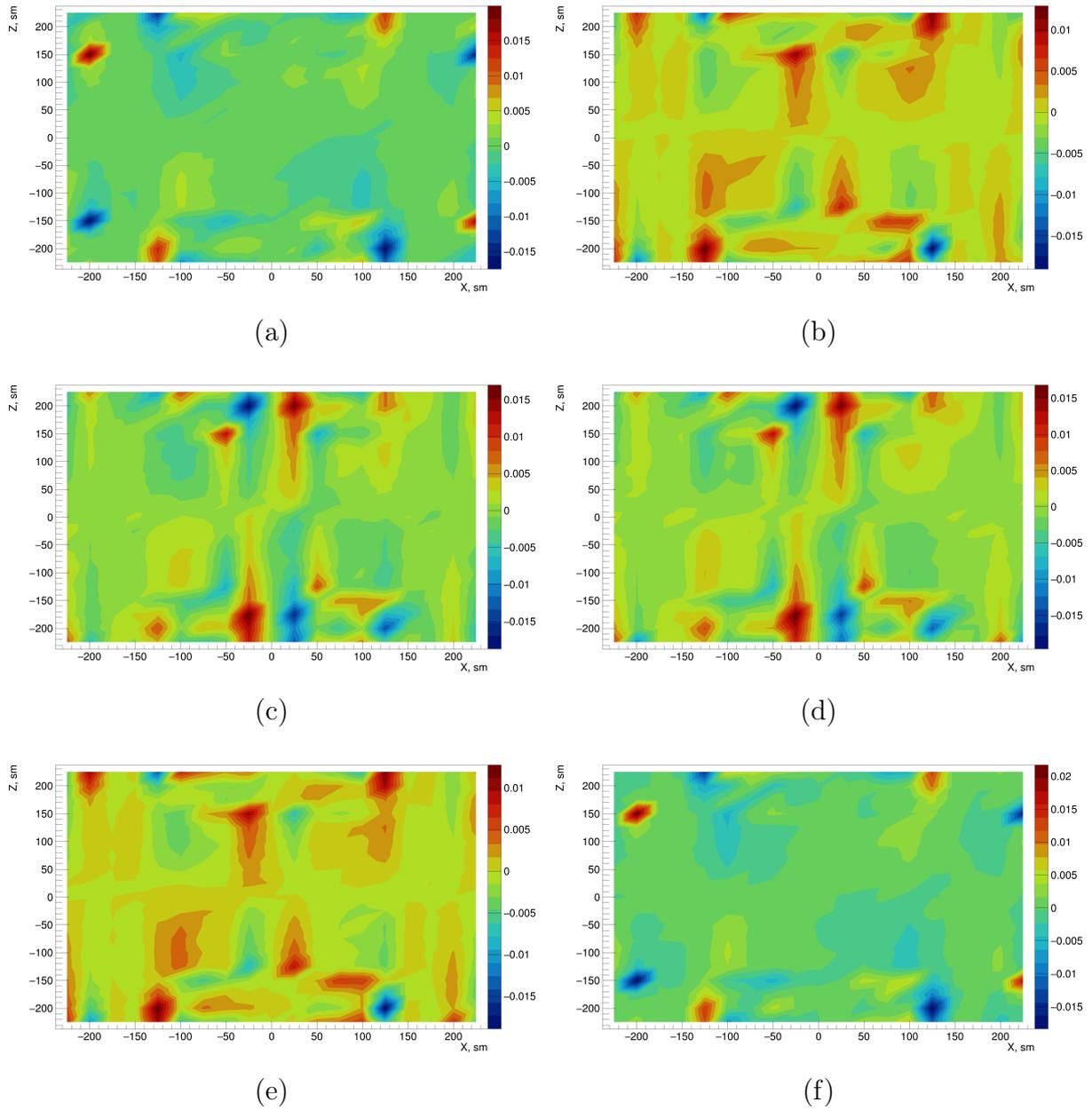


Рис. 3.5: Величина  $y$ -компоненты завихренности, подсчитанной с использованием скорости, полученной **гидродинамическим** методом в слоях а)  $y = -75$  см, б)  $y = -50$  см, в)  $y = -25$  см, д)  $y = 0$  см, е)  $y = 25$  см, ф)  $y = 50$  см.  $\sqrt{s_{NN}} = 9$  ГэВ.

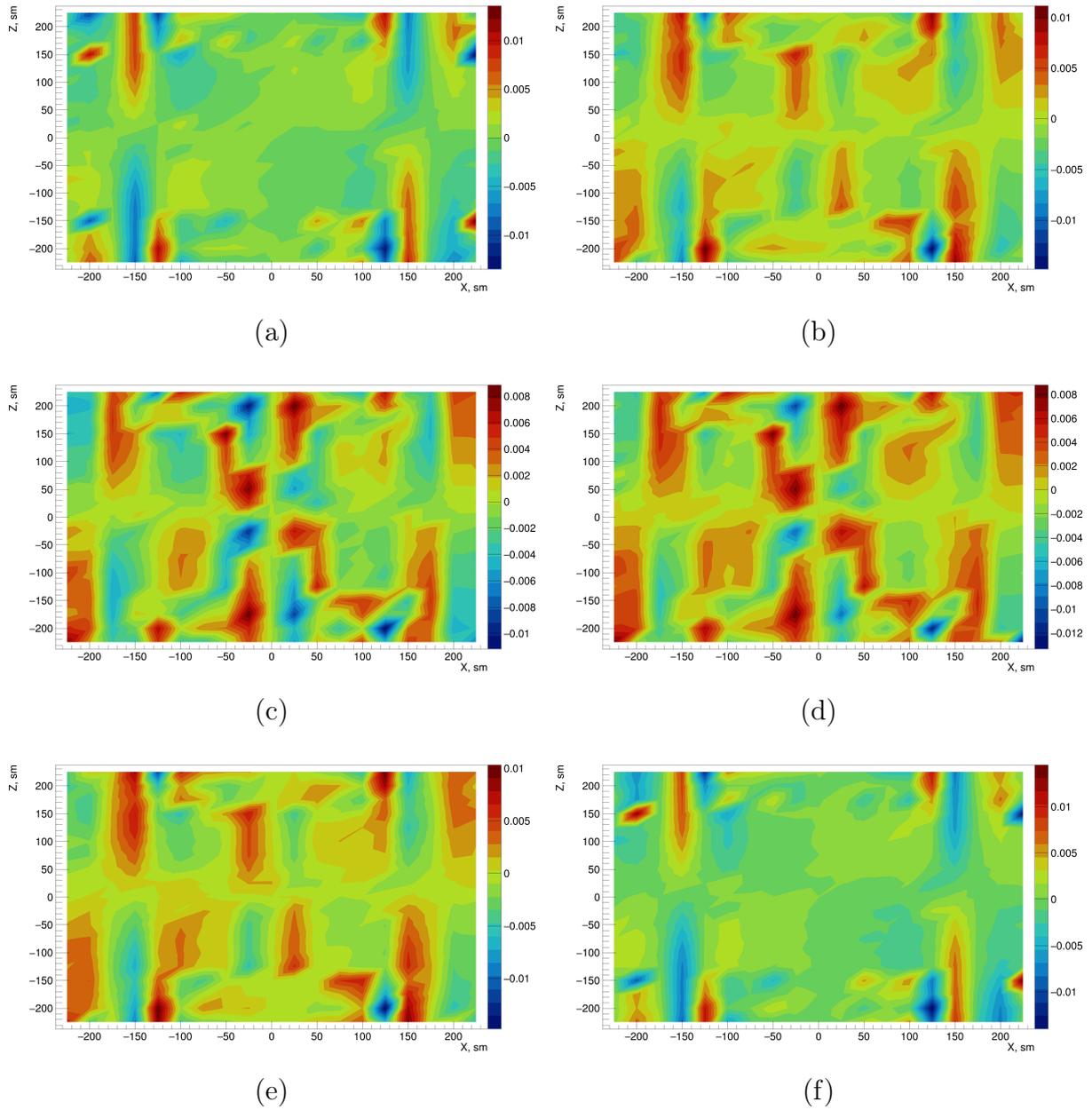


Рис. 3.6: Величина  $y$ -компоненты завихренности, подсчитанной с использованием скорости, полученной **кинематическим** методом в слоях а)  $y = -75$  см, б)  $y = -50$  см, в)  $y = -25$  см, д)  $y = 0$  см, е)  $y = 25$  см, ф)  $y = 50$  см.  $\sqrt{s_{NN}} = 9$  ГэВ.

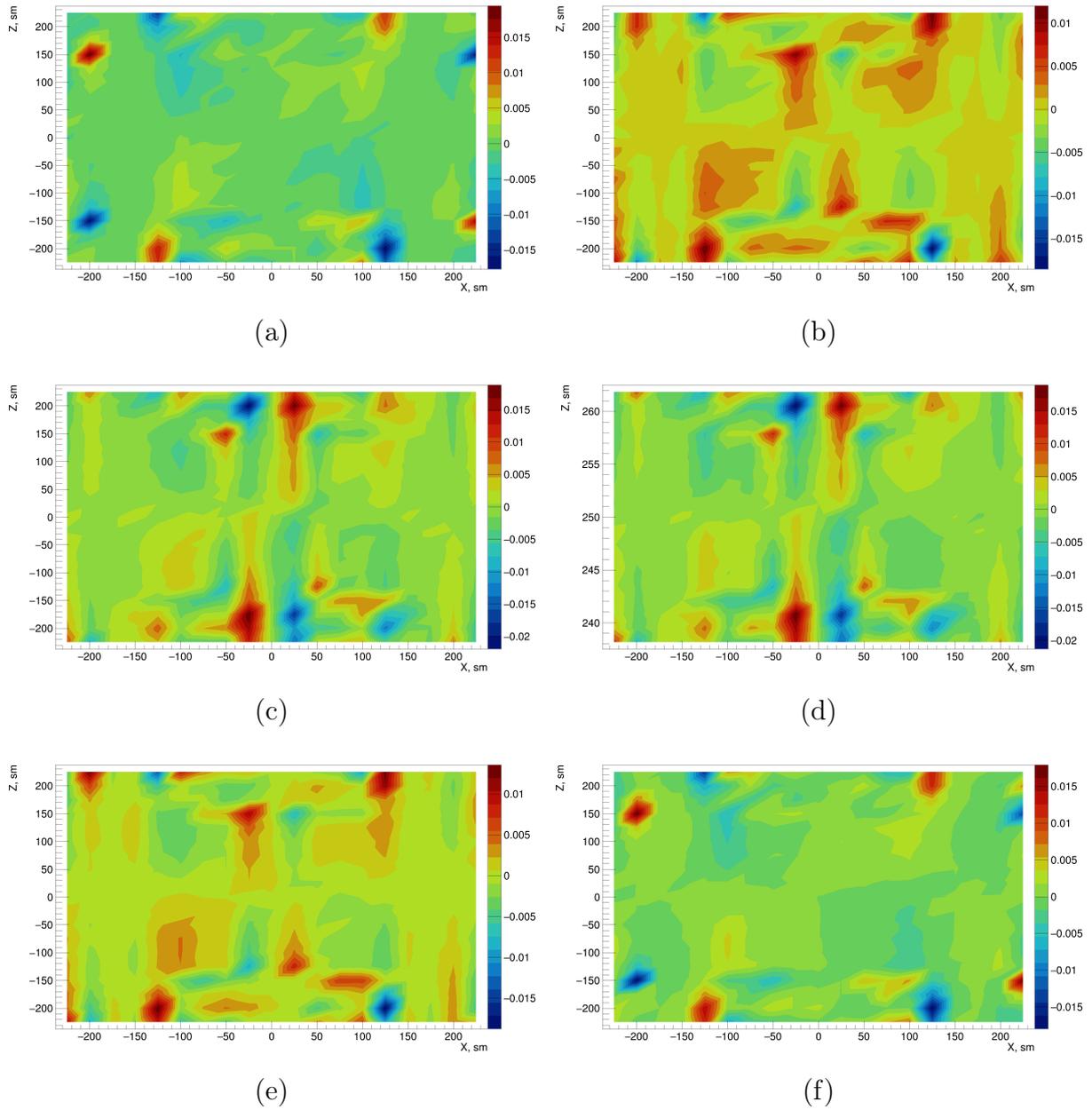


Рис. 3.7: Величина  $y$ -компоненты завихренности, подсчитанной с использованием скорости, полученной **гидродинамическим** методом в слоях а)  $y = -75$  см, б)  $y = -50$  см, в)  $y = -25$  см, д)  $y = 0$  см, е)  $y = 25$  см, ф)  $y = 50$  см.  $\sqrt{s_{NN}} = 11$  ГэВ.

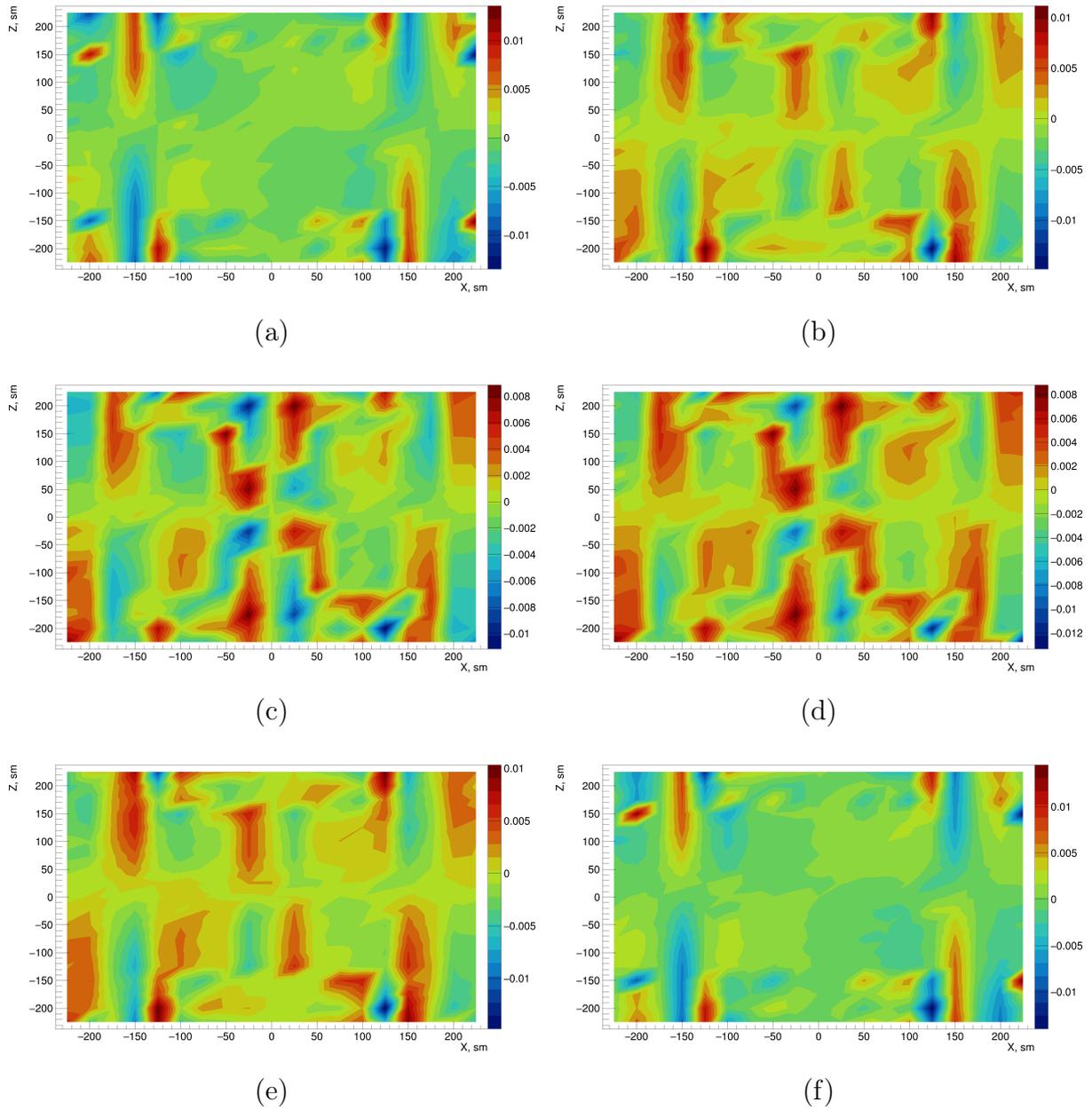


Рис. 3.8: Величина  $y$ -компоненты завихренности, подсчитанной с использованием скорости, полученной **кинематическим** методом в слоях а)  $y = -75$  см, б)  $y = -50$  см, в)  $y = -25$  см, д)  $y = 0$  см, е)  $y = 25$  см, ф)  $y = 50$  см.  $\sqrt{s_{NN}} = 11$  ГэВ.

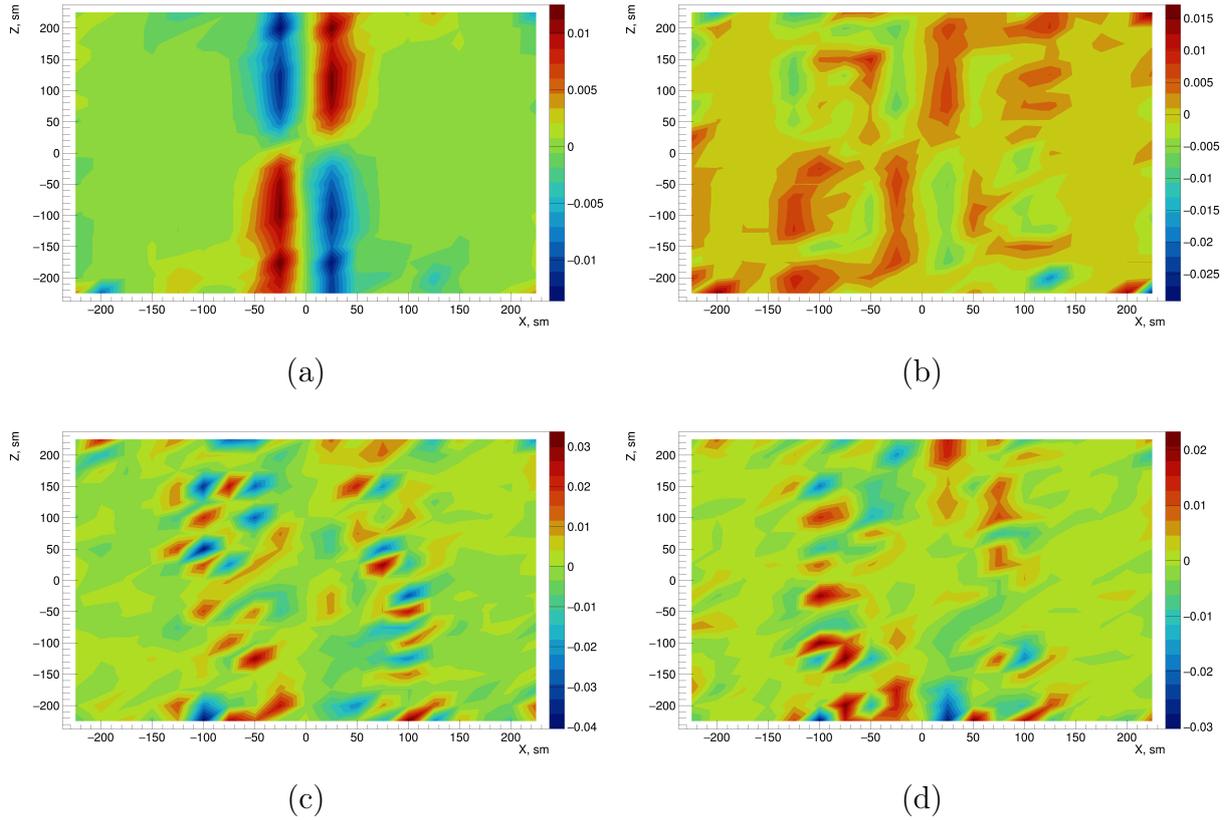


Рис. 3.9: Величина  $y$ -компоненты завихренности для различных частиц с использованием скорости, рассчитанной **гидродинамическим** методом (в центральном слое,  $\sqrt{s_{NN}} = 9$  ГэВ) а)  $p$ , б)  $\pi^-$ , в)  $K^+$ , д)  $\Lambda$ .

Были построены графики завихренности для отдельных частиц. На них видно образование ожидаемой квадрупольной структуры для протонов и отрицательно заряженных мезонов. На графиках каонов и лямбда барионов такая структуры не наблюдается, хотя порядки величин одинаковы. Такой результат можно связать с недостатком статистики каонов и лямбда частиц. Так как их мало, пространственное разделение для них не подходит, и поэтому теряется квадрупольная структура.

### 3.5. Термальная завихренность

Для расчета термальной завихренности помимо поля скоростей необходимо получить поле температуры системы. Так как напрямую из данных получить температуру невозможно, используется усреднение

поля энергии, рассчитанное по формуле:

$$T(m, n, k) = \langle E(m, n, k) \rangle. \quad (3.4)$$

Соответствующий вид формулы 1.3 для численного расчета термальной завихренности:

$$\omega_y^{th}(m, n, k) = -\frac{1}{2T^2} \left( v_x \frac{T^{k+1} - T^k}{\Delta z} - v_z \frac{T^{m+1} - T^m}{\Delta x} \right) \quad (3.5)$$

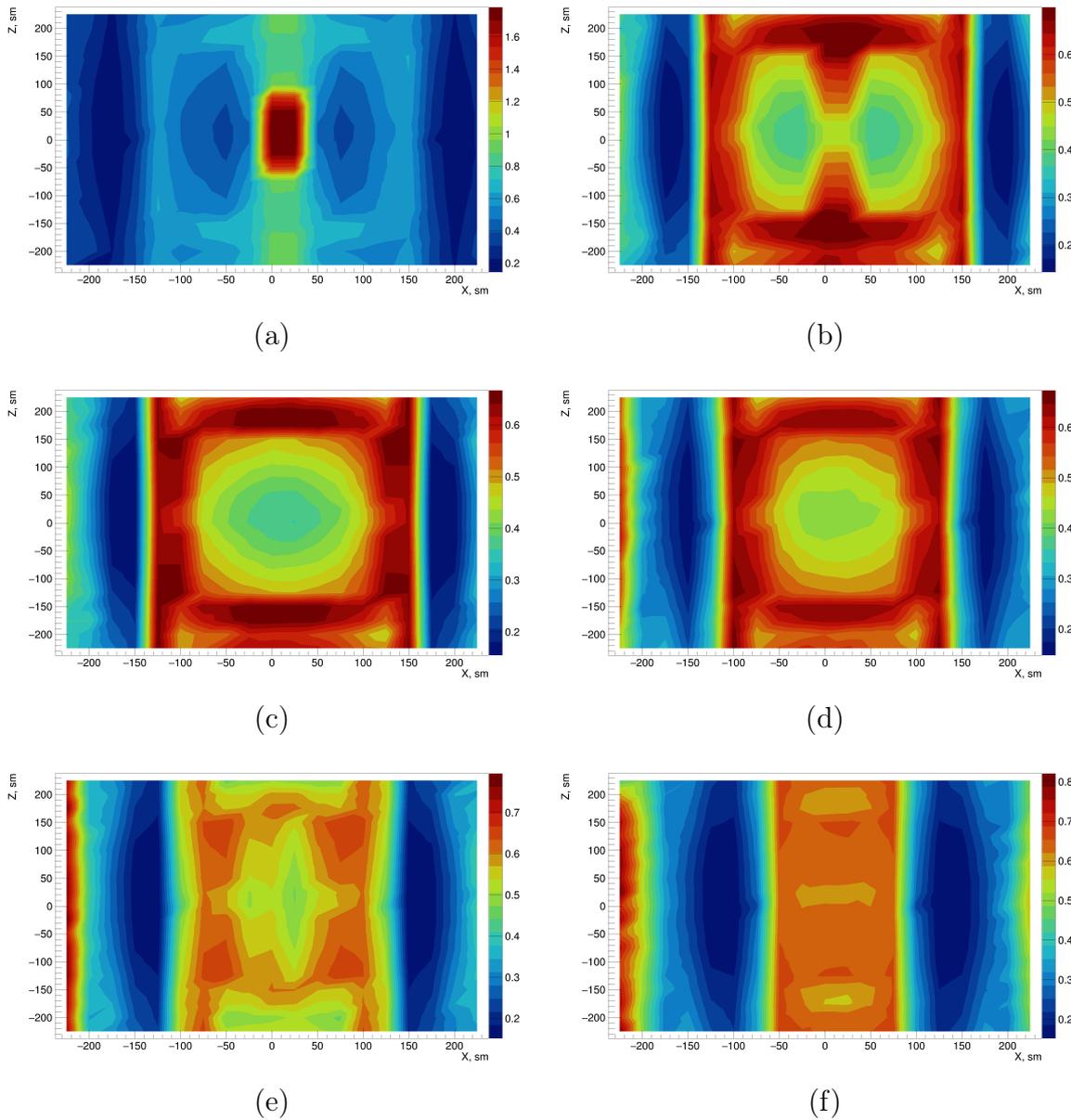


Рис. 3.10: Значение энергии для  $\sqrt{s_{NN}} = 9$  ГэВ в слоях а)  $y = 0$  см, б)  $y = 25$  см, в)  $y = 50$  см, д)  $y = 75$  см, е)  $y = 100$  см, ф)  $y = 125$  см.

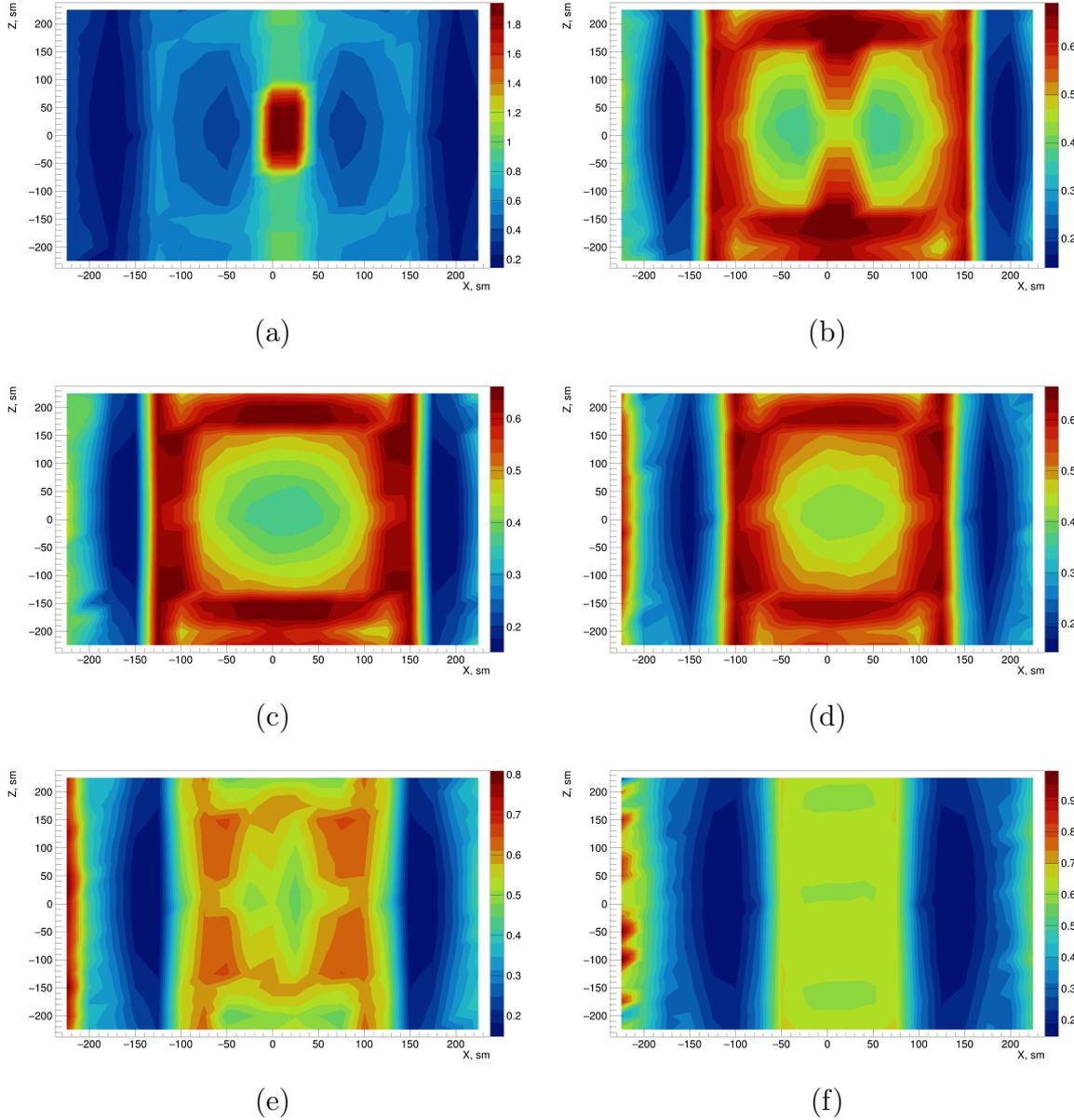


Рис. 3.11: Значение энергии для  $\sqrt{s_{NN}} = 11$  ГэВ в слоях а)  $y = 0$  см, б)  $y = 25$  см, в)  $y = 50$  см, д)  $y = 75$  см, е)  $y = 100$  см, ф)  $y = 125$  см.

На графиках видно распределение энергии в образовавшемся фаерболе. Стоит отметить, что они демонстрируют его правильную геометрию. В нецентральных столкновениях форма образующейся материи сильно зависит от прицельного параметра, поэтому фаербол приобретает эллиптическую форму, и можно определить плоскость реакции - плоскость, в которой лежит вектор прицельного параметра и ось движения пучка (Рис. 3.12). Такое пространственное формирование приводит к корреляции между координатами рождения адронов и их импульсами,

т.е. появлению коллективных потоков и азимутальной анизотропии [1].

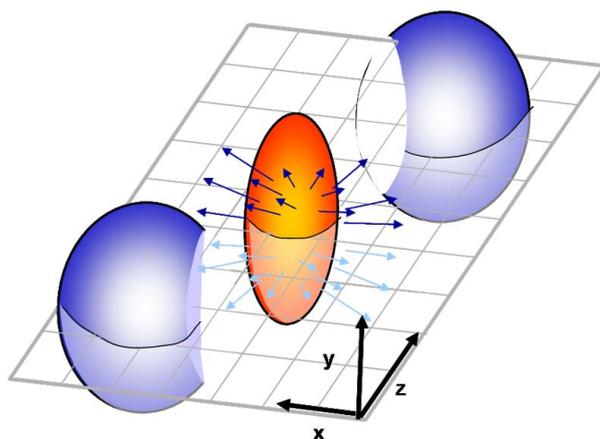


Рис. 3.12: Схема ядро-ядерного столкновения. Налетающие ядра имеют импульсы вдоль оси Z, прицельный параметр направлен вдоль оси X. Плоскость реакции XOZ. Форма образовавшегося фаерболла азимутально асимметрична.

Стоит отметить несколько неожиданных явлений. Во-первых, на полученных графиках видно весьма четкое ограничение энергии системы по оси  $X \in (-150; 150)$ . Причина такого пространственного эффекта не ясна и требуется дальнейшее исследование.

Во-вторых, происходит слишком резкое изменение поля энергии при переходе со слоя  $Y = 0$  см на слой  $Y = 25$  см. В силу недостаточного количества данных нельзя провести уменьшение разбиения координатной сетки, так как, чем больше разбиение, тем меньше частиц попадает в ячейку и построенным таким образом поле энергии не будет отражать физику изучаемых явлений. Поэтому для исследования резкого перехода требуется дальнейший расчет на большем числе событий.

Полученные графики термальной завихренности не согласуются с ранее представленной теорией. Ожидалось, что величина будет постоянной и достаточно высокой. Вместо этого наблюдаются пара образований. Первые - это точечные, которые расположены в центре слоя, в слоях близких к точке взаимодействия. Вторые размазаны вдоль оси Z при  $X = -150$ . Такая локализация вторых образований, вероятно, связана с границами по оси X в результатах для энергии. Величина термальной

завихренности сравнима с величиной кинематической завихренности.

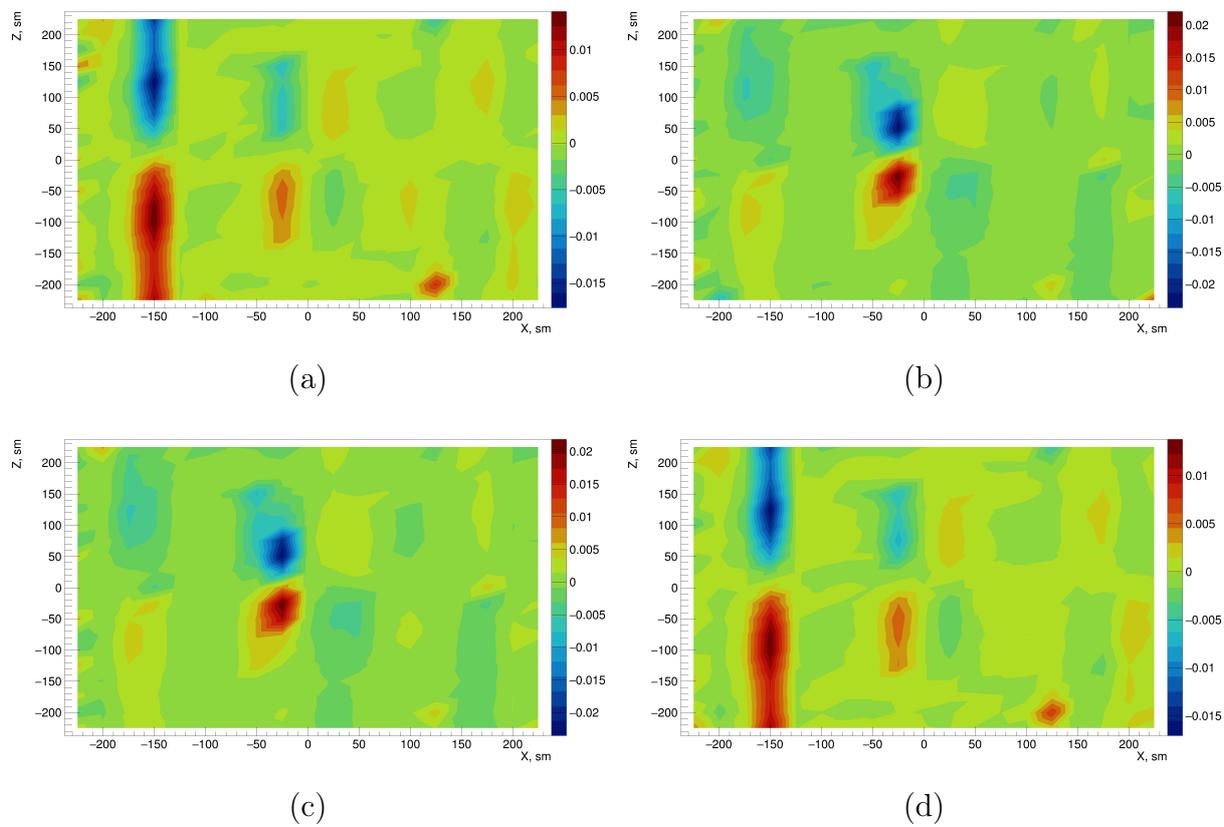


Рис. 3.13: Величина  $y$ -компоненты термальной завихренности с использованием скорости, посчитанной гидродинамическим методом в слоях а)  $y = -50$  см, б)  $y = -25$  см, в)  $y = 0$  см, д)  $y = 25$  см.  $\sqrt{s_{NN}} = 9$  ГэВ.

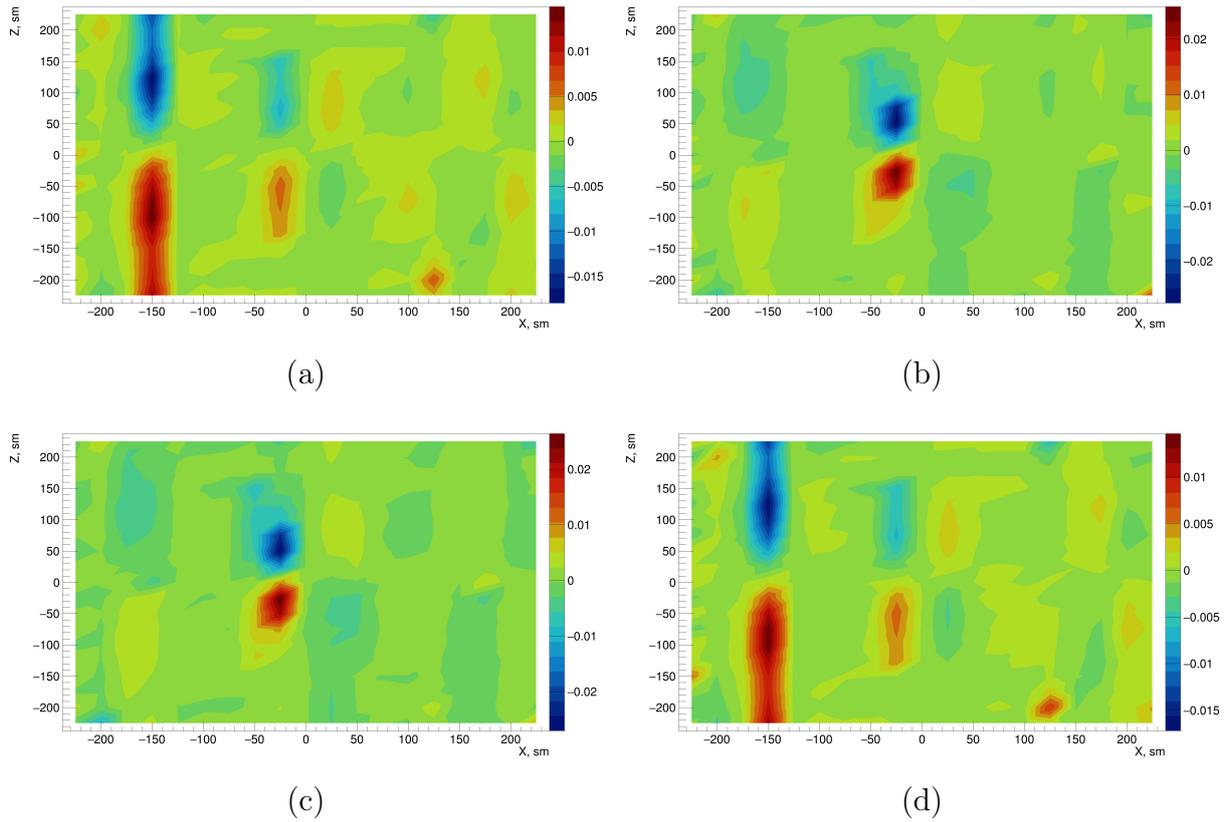


Рис. 3.14: Величина  $y$ -компоненты термальной завихренности с использованием скорости, посчитанной гидродинамическим методом в слоях а)  $y = -25$  см, б)  $y = 0$  см, в)  $y = 25$  см, г)  $y = 50$  см.  $\sqrt{s_{NN}} = 11$  ГэВ.

Можно предположить несколько причин, почему результаты оказались далеки от теоретических предсказаний. Во-первых, использование поля энергии системы вместо температуры все-таки является некорректным и необходимо искать другой подход к построению поля температур системы. Во-вторых, возможно, необходимо набрать новые данные Монте-Карло симуляций с более точно подобранными параметрами генерации.

# Выводы

Основной целью дипломной работы было исследование среды, образующейся в результате столкновения тяжелых ионов при помощи измерения величин завихренности системы.

1. Освоено программное обеспечение для обработки результатов экспериментов в физике высоких энергий - ROOT и MpdRoot.
2. На данных Монте-Карло генератора UrQMD столкновений ядер  $Au - Au$  для энергий  $\sqrt{s_{NN}} = 9, 11$  ГэВ были рассчитаны поля скоростей, используя два метода - гидродинамический и кинематический и проведено сравнение результатов двух методов.
3. Рассчитано поле энергии системы, которое продемонстрировало форму образовавшегося в столкновении фаербола.
4. Были рассчитаны кинематическая релятивистская и термальная завихренности, используя скорости, которые были посчитаны разными методами. Полученные данные показывают предпочтительность использования гидродинамического метода в дальнейшем анализе.
5. Выявлены новые эффекты и несоответствия с теорией, которые требуют дальнейших расчетов и проведения анализа на большем наборе данных.

## Заключение

В результате выполненной работы были обнаружены новые эффекты, требующие дальнейших исследований. Также планируется изучение связанной с завихренностью величины - спиральности. В будущем все полученные в ходе работы методы анализа будут использованы на данных с введенного в эксплуатацию комплекса NICA.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Д. Ю. Пересунько, Материалы курса “Столкновение ядер сверхвысоких энергий”, НИЦ “Курчатовский институт”, Москва 2016.
2. F. Becattini (U. Florence), I. Karpenko (INFN Florence), M. Lisa (Ohio State U.), I. Uppsala (Ohio State U.), S. Voloshin (Wayne State U.) “Global hyperon polarization at local thermodynamic equilibrium with vorticity, magnetic field and feed-down”, *Phys. Rev. C* 95, 054902 (2017).
3. F. Becattini, G. Inghirami, V. Rolando, A. Beraudo, L. Del Zanna, A. De Pace, M. Nardi, G. Pagliara, V. Chandra, “A study of vorticity formation in high energy nuclear collisions”, [arXiv:1501.04468[nucl-th]].
4. Oleg Teryaev, Rahim Usubov, “Vorticity and hydrodynamic helicity in heavy-ion collisions in the hadron-string dynamics model”, *Phys. Rev. C* 92, 014906 (2015).
5. Z. T. Liang and X. N. Wang, “Globally polarized quark-gluon plasma in non-central A+A collisions,” *Phys. Rev. Lett.* 94, 102301 (2005) Erratum:*Lett.* 94, 102301 (2005) Erratum: [*Phys. Rev. Lett.* 96, 039901 (2006)].
6. Yu. B. Ivanov, A. A. Soldatov, “Vorticity in heavy-ion collisions at the JINR Nuclotron-based Ion Collider Facility”, [arXiv:1701.01319 [nucl-th]].
7. NICA White Paper: “Searching for a QCD mixed phase at the nuclotron-based collider facility”, v 10.01, (2014).
8. <https://root.cern/>
9. <http://mpd.jinr.ru/mpd/>