
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау
Кафедра физики высоких энергий

Направление подготовки / специальность: 03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки: Физика и астрономия

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ СОСТОЯНИЙ
ЧАРМОНИЯ В PP СТОЛКНОВЕНИЯХ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
ALICE/ALICE3 НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ**

(научный доклад об основных результатах подготовленной научно-квалификационной
работы (диссертации))

Аспирант:

Амбарцумян Егише Викторович

(подпись аспиранта)

Научный руководитель:

Харлов Юрий Витальевич,

д-р физ.-мат. наук

(подпись научного руководителя)

Консультант (при наличии):

(подпись консультанта)

Москва 2025

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной
научно-квалификационной работы (диссертации) на тему:

**«Разработка методов регистрации состояний
чармония в pp столкновениях в экспериментах
ALICE/ALICE3 на Большом адронном коллайдере»**

Содержание

Общая характеристика работы	3
Актуальность темы исследования	3
Цели и задачи работы	3
Научная новизна работы	4
Практическая ценность результатов	4
Основные положения, выносимые на защиту	5
Степень достоверности и апробация работы	5
Вклад автора	6
Структура и объем работы	6
Основное содержание работы	7
Теоретические основы и экспериментальные методы	7
Экспериментальные установки и методики анализа	11
Экспериментальная установка ALICE в Run 3	11
Методы моделирования и анализа данных	13
Концепция детектора ALICE3	14
Детальные спецификации запланированных калориметров	16
Критерии отбора данных в анализе ALICE Run 3	17
Результаты исследования регистрации состояний чармония в ALICE и ALICE3	19
Разработка методик для ALICE Run 3	19
Перспективы для ALICE3	24
Заключение	27
Список литературы	28

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Изучение процессов при столкновении адронов и ядер при релятивистских энергиях является ключевой задачей современной физики высоких энергий. Эти исследования позволяют изучать фундаментальные свойства сильного взаимодействия, описываемого квантовой хромодинамикой (КХД). Они также направлены на исследование новых состояний ядерной материи, таких как кварк-глюонная плазма (КГП), в которой кварки и глюоны находятся в деконфайнментированном состоянии. Одним из актуальных вопросов является изучение механизмов рождения и взаимодействия тяжелых кваркониев — связанных состояний тяжелого кварка и его антикварка. Чармонии ($c\bar{c}$) служат уникальными зондами свойств КГП, позволяя исследовать экранирование цветового заряда, диссоциацию и регенерацию кваркониев [1]. Для систематического изучения этих механизмов с беспрецедентной точностью предлагается новый эксперимент ALICE3 на БАК высокой светимости [2]. Настоящая диссертация, посвященная моделированию ключевых элементов детектора ALICE3 и разработке методик анализа данных для изучения чармония, вносит вклад в проект этого эксперимента. Это позволит выбрать наиболее оптимальную измерительную аппаратуру и стратегии анализа.

Цели и задачи работы

Целью исследования является разработка и применение методик для изучения механизмов образования состояний чармония в столкновениях протонов при энергиях Большого адронного коллайдера, как в текущем эксперименте ALICE [3], так и в его будущей модернизации ALICE3 [2].

Для достижения поставленной цели были решены следующие ключевые задачи, сгруппированные по направлениям исследований:

- Разработана параметризованная модель отклика нового электромагнитного калориметра (ECAL) будущего эксперимента ALICE3 и создана на ее основе методика идентификации электронов, основанная на комплексном использовании данных трековой системы и калориметра.
- Проведено комплексное параметризованное моделирование для оценки перспектив регистрации различных состояний чармония в эксперименте ALICE3, включая P-

волновые состояния χ_c , с целью научного обоснования конструкции детектора.

- Разработан пакет программ анализа данных эксперимента ALICE для реконструкции состояний чармония и идентификации электронов. Программное обеспечение реализовано в рамках комплекса программ анализа O2Physics эксперимента ALICE.
- Проведен анализ данных, набранных сотрудничеством ALICE во время третьего сеанса Большого адронного коллайдера (БАК) в 2022–2024 гг (Run3) в столкновениях протонных пучком при энергии $\sqrt{s} = 13.6$ ТэВ. Получены оценки эффективности регистрации электронов и уровня фона для идентифицированных электронов.

Научная новизна работы

1. Впервые разработана параметрическая модель ECAL для ALICE3, демонстрирующая улучшенное разрешение по сравнению с существующими аналогами в области низких поперечных импульсов (ожидаемое разрешение по массе π^0 составляет $\sigma_M \approx 4 - 5$ МэВ/с² при $p_T \sim 2$ ГэВ/с).
2. Предложена и валидирована на моделированных данных гибридная методика идентификации электронов для ALICE3, основанная на комбинации данных трековой системы и ECAL, которая обеспечивает высокий уровень чистоты выборки (адронный фон <5-10%) при сохранении высокой эффективности. Получена оценка чистоты выборки треков, идентифицируемых как электроны с помощью разработанной гибридной методики, на данных ALICE Run 3 с pp-столкновениями при $\sqrt{s} = 13.6$ ТэВ.
3. Впервые создан и отлажен программный комплекс в среде O2Physics [4] для анализа данных ALICE Run 3, включающий разработанную методику «Tag-and-Probe», которая была валидирована на данных TPC для будущего измерения эффективности идентификации частиц с помощью калориметра PHOS.
4. Впервые детально исследована и количественно оценена возможность регистрации и разделения χ_c -мезонов через их радиационные распады в установке ALICE3, что является ключевым для физической программы эксперимента.

Практическая ценность результатов

Разработанные в диссертации модели детекторов, методики идентификации частиц и программный код могут быть непосредственно использованы коллаборацией ALICE. Они применимы при дальнейшей оптимизации конфигурации установки ALICE3, планировании ее физической программы и в текущих анализах экспериментальных данных. Разработанная

методика «Tag-and-Probe» и полученные оценки разрешения по массе являются важным вкладом в реалистичную оценку научного потенциала будущего эксперимента, в частности, демонстрируя улучшение ожидаемого разрешения на $\sim 30\%$ при использовании высокоточного сегмента ECAL.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная модель электромагнитного калориметра ECAL для эксперимента ALICE3 и предложенная методика идентификации электронов позволяют реконструировать лептоны от распадов состояний чармония с высокой чистотой (уровень адронного загрязнения менее 10% для $E > 2$ ГэВ в высокоточном сегменте), что является необходимым условием для прецизионного изучения их свойств.
2. Получены оценки чистоты выборки треков, идентифицированных как электроны, и уровня их загрязнения адронами в pp-столкновениях при $\sqrt{s} = 13.6$ ТэВ по данным ALICE Run 3.
3. Разработанный программный комплекс для анализа данных ALICE Run 3, включающий методику «Tag-and-Probe» для измерения эффективности, был успешно протестирован на данных TPC. Это закладывает методическую основу для будущих прецизионных измерений с использованием калориметра PHOS при накоплении достаточной статистики.
4. Моделирование показало, что использование высокоточного сегмента калориметра ECAL в эксперименте ALICE3 является ключевым фактором, позволяющим достичь разрешения по массе, достаточного для разделения состояний χ_{c1} и χ_{c2} в их радиационных распадах.

Степень достоверности и апробация работы

Результаты, лежащие в основе диссертации, получены с применением общепринятых методов анализа данных в физике высоких энергий, включая Монте-Карло моделирование. Полученные результаты находятся в согласии с мировыми данными. Результаты работы были доложены на 65-й Всероссийской научной конференции МФТИ https://old.mipt.ru/upload/medialibrary/2fc/lfi-978_5_89155_387_3.pdf (2023, Москва), XXVII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists <https://indico.jinr.ru/event/3792/contributions/23428/> (AYSS-2023, Дубна) и 7th International Conference on Particle Physics and Astrophysics <https://indico.particle.mephi.ru/event/436/>

[contributions/4379/](#) (ICPPA-2024, Москва). По теме диссертации опубликовано 2 работы в реферируемых журналах [5; 6], соответствующих требованиям ВАК.

Вклад автора

Личный вклад автора в получение результатов, представленных в диссертации, заключается в следующем:

- **Разработка и реализация программного кода:** Созданы и отлажены ключевые модули анализа в среде O2Physics, включая классы для сопоставления треков с кластерами в калориметре и для идентификации электронов.
- **Моделирование отклика детектора:** В программный пакет DelphesO2 [7] была реализована и валидирована параметризация отклика ECAL для ALICE3 на различные типы частиц.
- **Анализ данных и получение физических результатов:** Проведен анализ реальных данных ALICE Run 3, включая оценку фона и разработку метода Tag-and-Probe. Метод был валидирован на данных TPC ввиду ограниченной статистики PHOS. Выполнен анализ моделированных данных для ALICE3, на основе которого сделаны выводы о необходимости высокоточного сегмента ECAL.
- **Представление результатов:** Результаты работы были представлены на международных конференциях и легли в основу двух публикаций в рецензируемых журналах [5; 6].

Структура и объем работы

Научный доклад состоит из общей характеристики работы, основного содержания, заключения и списка литературы. Общий объем доклада составляет 30 страниц, включая 11 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Теоретические основы и экспериментальные методы

В первом разделе диссертации подробно рассматриваются теоретические концепции, лежащие в основе современной физики тяжелых кваркониев, а также экспериментальные методы, используемые для их исследования.

Тяжелые кварконии, будучи связанными состояниями тяжелого кварка и его антикварка ($c\bar{c}$ — чармоний, $b\bar{b}$ — боттомоний), представляют собой уникальную естественную лабораторию для изучения фундаментальных аспектов квантовой хромодинамики (КХД) — теории сильных взаимодействий. Их изучение предоставляет ключевую информацию для понимания как пертурбативных, так и непертурбативных аспектов КХД, включая механизмы адронизации и природу конфайнмента.

Ключевой особенностью этих систем является большая масса составляющих их кварков ($m_c \approx 1.27 \text{ ГэВ}/c^2$, $m_b \approx 4.18 \text{ ГэВ}/c^2$ [8]), что приводит к нерелятивистскому характеру их внутреннего движения ($v^2/c^2 \sim 0.2$ для чармония). Это обстоятельство позволяет с высокой точностью применять для их описания эффективные теории поля, в частности, нерелятивистскую КХД (NRQCD) [9; 10]. В рамках этого подхода сложная динамика взаимодействия раскладывается в ряд по степеням относительной скорости кварков v , что позволяет систематически учитывать релятивистские и квантовые поправки.

В рамках NRQCD взаимодействие между кварком и антикварком в первом приближении эффективно описывается с помощью потенциальных моделей. Наиболее успешной и широко используемой из них является потенциал Корнелла [11—13]. Этот потенциал, представленный формулой 1, феноменологически объединяет два предельных режима КХД.

$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + \sigma r \quad (1)$$

Здесь первый член, $-\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r}$, описывает кулоноподобное взаимодействие на малых расстояниях, обусловленное обменом одним глюоном, где α_s — константа сильной связи, а множитель $4/3$ является цветовым фактором. Второй член, σr , представляет собой линейно растущий потенциал, ответственный за удержание кварков (конфайнмент) на больших расстояниях, где σ — так называемый коэффициент натяжения струны.

Решение уравнения Шрёдингера с таким потенциалом позволяет с высокой точностью предсказать спектр масс и квантовые числа наблюдаемых состояний чармония. Некоторые из этих состояний и их свойства представлены в Таблице 1. Предсказанный спектр

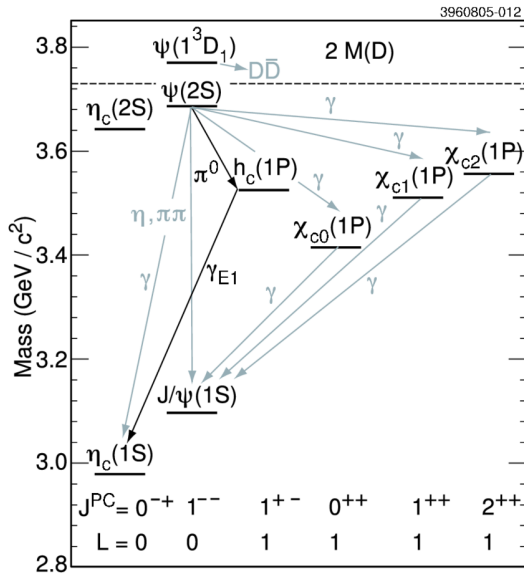


Рис. 1. Низколежащий спектр чармония и некоторые наблюдаемые переходы [14].

уровней, как показано на рисунке 1, находится в прекрасном согласии с экспериментальными данными, что является одним из триумфов кварковой модели.

Таблица 1. Свойства состояний чармония, представляющих интерес для изучения кварк-глюонной материи. Данные из [6].

Частица	Масса (МэВ/ c^2)	Энергия связи (МэВ)	Канал распада	Бренчинг распада (%)
J/ψ (1S)	3096.90	0.64	$J/\psi \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$	5.971
χ_{c0} (1P)	3414.75	0.32	$\chi_{c0} \rightarrow J/\psi\gamma$	1.27
χ_{c1} (1P)	3510.66	0.22	$\chi_{c1} \rightarrow J/\psi\gamma$	33.9
χ_{c2} (1P)	3556.20	0.18	$\chi_{c2} \rightarrow J/\psi\gamma$	19.2

Потенциальные модели, однако, недостаточны для описания динамических процессов, таких как рождение и распады кваркониев. Для этих целей применяется факторизационная теорема NRQCD, которая позволяет разделить процесс рождения кваркония на две части [9]. Первая часть — короткодействующая (short-distance), описывающая рождение пары $c\bar{c}$ в определенном цветовом и спиновом состоянии; эта часть может быть вычислена в рамках пертурбативной КХД. Вторая часть — длиннодействующая (long-distance), описывающая непертурбативный процесс перехода (адронизации) этой пары в наблюдаемый адрон. Эта непертурбативная часть параметризуется универсальными длиннодействующими матричными элементами (LDME), которые определяются из сравнения с экспериментом. Этот формализм позволяет рассматривать как цвето-синглетные (CSM), так и цвето-октетные (COM) механизмы рождения, что необходимо для согласованного описа-

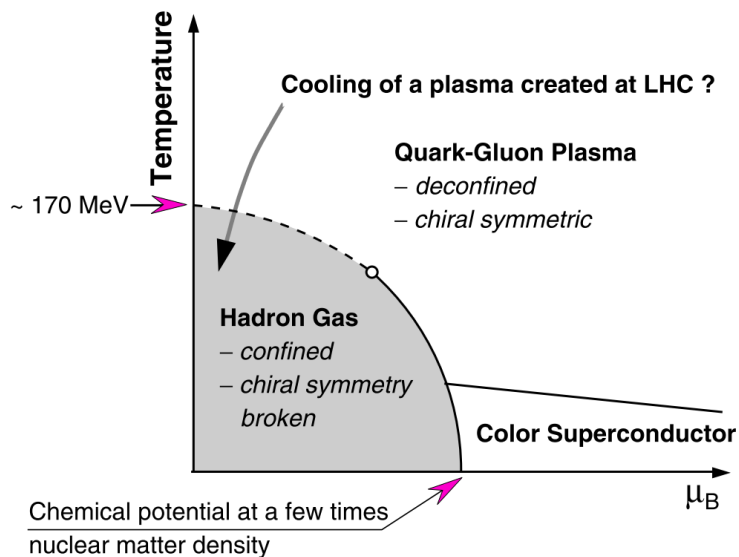


Рис. 2. Фазовая диаграмма КХД материи в зависимости от температуры и барионного химического потенциала. Сплошные линии обозначают предполагаемые фазовые переходы первого рода, а пунктирная линия указывает на возможную область кроссовера [15].

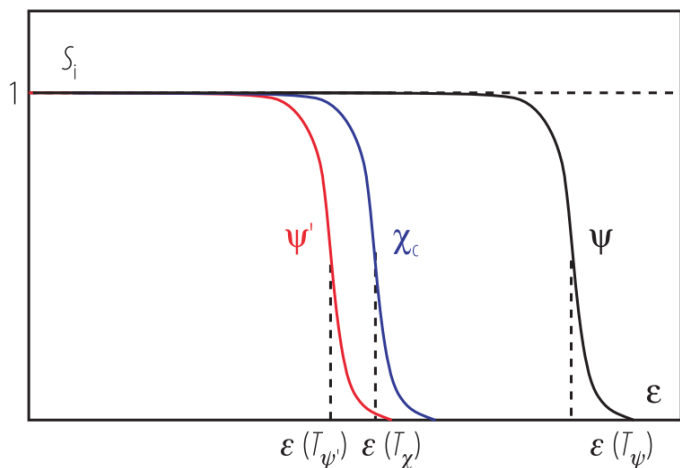


Рис. 3. Схематическое изображение вероятностей выживания (S_i) состояний чармония (ψ' , χ_c , J/ψ) в зависимости от плотности энергии (ε), иллюстрирующее последовательное подавление. Разные состояния диссоциируют при разных пороговых плотностях энергии [1].

ния экспериментальных данных по сечениям и поляризации.

Особую роль кварконии играют в исследованиях столкновений тяжелых ионов, где при экстремально высоких температурах и плотностях энергии образуется новое состояние материи — кварк-глюонная плазма (КГП), как показано на фазовой диаграмме КХД на рис. 2. В такой среде кварконии служат чувствительными зондами ее свойств. Ключевым предсказанием, сделанным Т. Матсуи и Х. Затцем, является подавление выхода J/ψ и других состояний чармония в КГП из-за экранирования цветового заряда (эффект Дебая) [16]. Подобно тому как в электролитической плазме экранируется электрический заряд, в КГП обилие свободных цветных зарядов (кварков и глюонов) ослабляет силу, связывающую c и \bar{c} кварки. Эффективный потенциал взаимодействия модифицируется средой, что приводит к диссоциации связанных состояний.

Поскольку различные состояния чармония (J/ψ , χ_c , $\psi(2S)$) обладают разными энергиями связи и, как следствие, разными размерами, они «плавятся» (диссоциируют) при

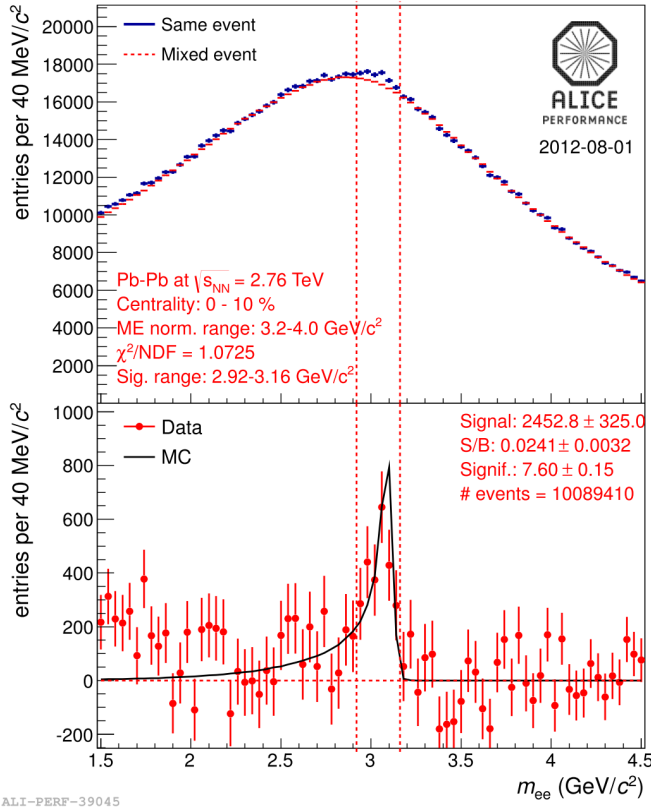


Рис. 4. Распределение по инвариантной массе для пар e^+e^- в центральных (0-10%) Pb-Pb столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ. Точки — данные ALICE, сплошная линия — результат аппроксимации. Четко виден сигнал J/ψ на фоне комбинаторного фона [21].

разных температурах плазмы, как это схематически показано на рис. 3. Более крупные и слабосвязанные состояния, такие как $\psi(2S)$, диссоциируют при более низких температурах, чем компактное и сильносвязанное основное состояние J/ψ . Этот эффект, известный как «последовательное подавление» [17; 18], позволяет использовать относительные выходы различных состояний кваркония как своего рода «термометр» КГП.

Однако экспериментальная картина, полученная на коллайдерах RHIC и LHC, оказалась сложнее. При высоких энергиях LHC становится важным и конкурирующий механизм регенерации чармония из обильно рождающихся в КГП несвязанных c и \bar{c} кварков [19; 20]. Комплексное изучение баланса между подавлением и регенерацией требует прецизионных измерений различных состояний чармония, что и является одной из центральных задач экспериментов ALICE и будущего эксперимента ALICE3. Экспериментальные методы для этих исследований основаны на регистрации продуктов распада чармония, в первую очередь дилептонных пар (e^+e^- или $\mu^+\mu^-$), как это видно на примере реконструкции J/ψ в ALICE на рис. 4.

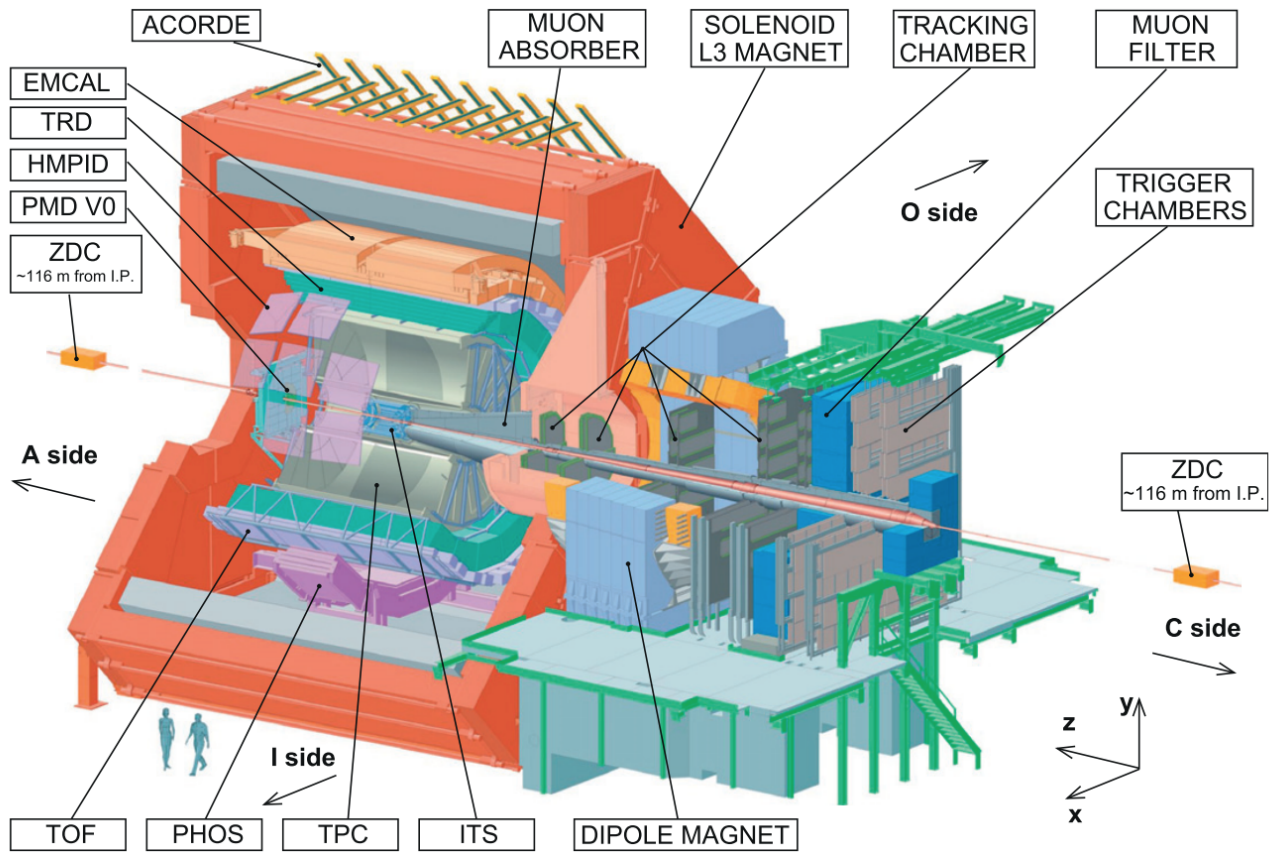


Рис. 5. Общая схема детектора ALICE [22].

Экспериментальные установки и методики анализа

Экспериментальная установка ALICE в Run 3

Эксперимент ALICE (A Large Ion Collider Experiment) на Большом адронном коллайдере (LHC) — это комплексная детекторная система, спроектированная для изучения физики столкновений тяжелых ионов и протонов при сверхвысоких энергиях [3]. Основная цель эксперимента — исследование кварк-глюонной плазмы (КГП). Для этого ALICE оснащен уникальным набором детекторов с практически полным охватом по азимутальному углу (2π) и широким покрытием по псевдобыстроте ($|\eta| < 0.9$ для центрального барреля и $2.5 < \eta < 4.0$ для мюонного спектрометра). Центральный баррель, расположенный в соленоидальном магните с полем $B = 0.5$ Т, содержит ключевые детекторы для данного анализа.

Внутренняя Трековая Система (ITS). Ближайший к точке взаимодействия детектор. В Run 3 используется обновленная система **ITS2**, состоящая из 7 слоев монолитных активных пиксельных сенсоров (MAPS) [23]. Эта технология значительно улучшила разрешение по параметру прицеливания треков, что критически важно для разделения прямых

(prompt) и не прямых (non-prompt, от распадов В-адронов) J/ψ , и повысила эффективность реконструкции частиц с низким поперечным импульсом.

Время-Проекционная Камера (TPC). Это основной трековый детектор центрального барреля, представляющий собой большой газонаполненный цилиндр [22]. TPC обеспечивает трехмерную реконструкцию треков и идентификацию частиц (PID) по их удельным ионизационным потерям энергии (dE/dx) с разрешением $\sim 5-7\%$. Это позволяет эффективно разделять электроны от адронов (пионов, каонов, протонов) в широком диапазоне импульсов. Для Run 3 TPC была модернизирована с использованием технологии считывания на основе умножителей газовых электронов (GEM), что обеспечивает возможность непрерывной регистрации данных при высоких частотах столкновений.

Времяпролетный Детектор (TOF). Система из многозачерных резистивных плоских камер (MRPC), расположенная на большем расстоянии от точки взаимодействия. TOF измеряет время пролета частиц с разрешением < 100 пс [3], что позволяет идентифицировать адроны в области средних импульсов и дополняет PID-информацию от TPC, особенно для разделения электронов от медленных адронов.

Детектор Переходного Излучения (TRD). Состоит из шести слоев радиаторов и дрейфовых камер. TRD предназначен для идентификации электронов с импульсами выше 1 ГэВ/с [3] путем регистрации переходного излучения.

Фотонный Спектрометр (PHOS). Детектор, играющий центральную роль в данном анализе. PHOS — это компактный, высокогранулярный электромагнитный калориметр, состоящий из кристаллов вольфрамата свинца ($PbWO_4$). Его основные характеристики представлены в Таблице 2. Он предназначен для прецизионного измерения энергии и координат фотонов и электронов. Его высокое энергетическое разрешение позволяет дополнять другие системы идентификации частиц (такие как TPC и TOF), особенно в области высоких энергий, где эффективность PID-детекторов, основанных на измерении скорости или ионизации, снижается. В данном анализе PHOS используется для идентификации электронов по отношению энергии кластера к импульсу трека ($E/p \approx 1$).

Электромагнитный калориметр (EMCal). Сэмплинг-калориметр типа "шашлык" со значительно большим охватом по сравнению с PHOS. Он также дополняет основные системы PID при высоких энергиях и используется для измерения энергии струй, электронов и

Таблица 2. Общие параметры детектора PHOS, по данным из [24].

Параметр	Значение
Охват по псевдобыстроте	$-0.125 \leq \eta \leq 0.125$
Охват по азимутальному углу	$\Delta\phi = 70^\circ$
Расстояние до точки взаимодействия	460 см
Модульность	Три модуля по 3584 кристалла и один половинчатый модуль на 1792 кристалла
Материал	Кристаллы вольфрамата свинца (PbWO_4)
Размеры кристалла	$22 \times 22 \times 180 \text{ мм}^3$
Толщина в радиационных длинах	$20 X_0$
Общее число кристаллов	12 544
Общая площадь	6.0 м^2
Рабочая температура	-25°C

фотонов.

Мюонный спектрометр. Расположен в области передних быстрот ($2.5 < \eta < 4.0$) и предназначен для регистрации мюонов от распадов кваркониев.

Детекторы для глобальных характеристик и триггера. Системы V0, T0, ZDC и FMD используются для измерения множественности, центральности и для формирования триггерных сигналов.

Методы моделирования и анализа данных

Разработка и оптимизация методик анализа в современной физике высоких энергий невозможны без детального моделирования как самих физических процессов, так и отклика детекторных систем. Этот подход играет ключевую роль на всех этапах эксперимента: от проектирования детекторов до разработки алгоритмов реконструкции, оценки систематических неопределенностей и сравнения результатов с теорией.

Моделирование физических процессов начинается с генерации событий с помощью Монте-Карло генераторов. В данной работе для генерации событий рождения чармония в pp -столкновениях использовался широко распространенный генератор PYTHIA 8 [25], который реализует различные теоретические подходы к описанию как пертурбативных,

так и непертурбативных аспектов КХД.

В то время как полное моделирование отклика детектора с использованием таких пакетов, как GEANT4 [26], обеспечивает наивысшую точность, оно требует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому для масштабных исследований и оптимизации дизайна будущих экспериментов целесообразно использовать методы быстрого параметризованного моделирования. В данной работе для моделирования будущего эксперимента ALICE3 был адаптирован и использован пакет DelphesO2 [5]. Автором был внесен существенный вклад в расширение функциональности DelphesO2, в частности, была реализована и отлажена модель отклика ECal на различные типы частиц. Эта работа является ключевой для исследований, представленных в диссертации.

Весь физический анализ, как реальных, так и моделированных данных, проводился в рамках нового программного фреймворка ALICE O2Physics [27]. Освоение этого фреймворка являлось одной из ключевых технических задач работы.

Концепция детектора ALICE3

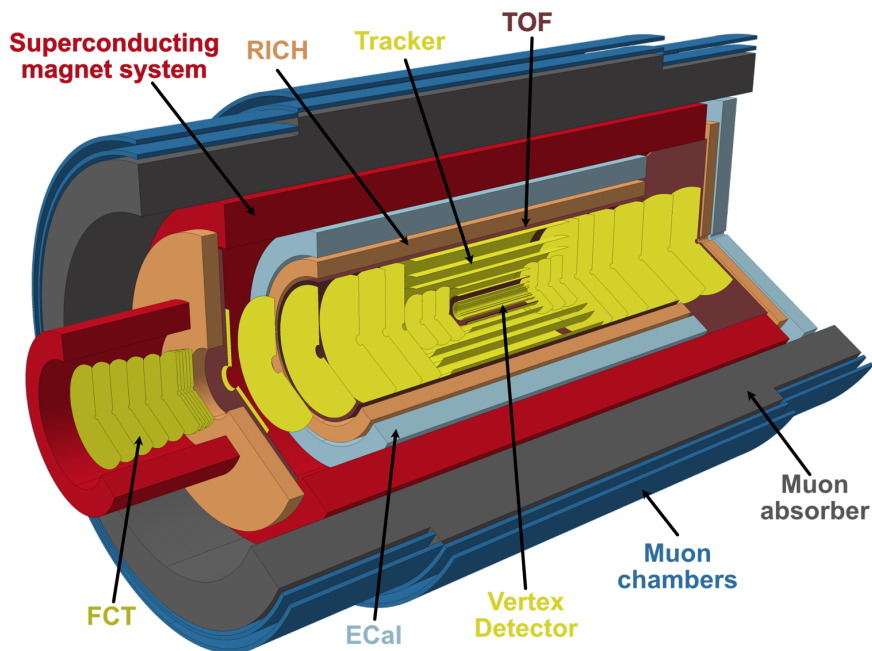


Рис. 6. Концептуальный дизайн детектора ALICE3. Изображение является иллюстрацией, основанной на информации из Letter of Intent [2].

ALICE3 — это проект детектора следующего поколения, предназначенный для работы в условиях высокой светимости HL-LHC [2]. Он будет состоять из совершенно нового, сверхлегкого трекера и систем идентификации частиц, расположенных вокруг точки вза-

имодействия. ALICE 3 будет использоваться сверхпроводящий соленоидальный магнит с полем 2 Тесла.

Ключевые элементы для данного анализа:

- **Новый трекер (ITS3+OTS):** Усовершенствованная внутренняя трековая система (ITS3), состоящая из трех слоев изогнутых кремниевых пиксельных сенсоров, и внешняя трековая система (OTS) обеспечат беспрецедентное разрешение по импульсу и положению вершины (см. Таблицу 3).

Таблица 3. Упрощенные спецификации трекера ALICE3.

Детектор	Радиальный охват (r , см)	Продольный охват ($ z $, см)	Материал (% X_0 /слой)	Разрешение (μm)
Вершинный Детектор	0.5 – 2.5	до ~ 50	0.3/3	~ 2.5
Внешний Трекер	3.75 – 80	до ~ 400	8.0/8	~ 10

- **Новый электромагнитный калориметр (ECAL):** Предполагается, что он будет расположен на расстоянии ~ 115 см от точки взаимодействия и будет состоять из центральной части (барреля) и торцевых калориметров (endcap). В данной работе рассматривается только центральная часть. Концепция барреля включает сегменты с **высоким разрешением** (HR, на основе кристаллов PbWO_4 , аналогично PHOS) и сегменты с **умеренным разрешением** (Coarse, сэмплингового типа). HR ECAL охватывает примерно в $2\pi/(70^\circ \cdot \pi/180^\circ) \approx 5.15$ раз больше азимутального угла, чем PHOS. HR ECAL охватывает примерно в $0.66/0.25 = 2.64$ раза больший диапазон псевдобыстроты, чем PHOS. В целом по геометрическому акцептансу высокоточный сегмент ECAL-а примерно в 13.6 раз больше, и к тому же он расположен ближе к точке взаимодействия, что позволяет регистрировать частицы с более низкими импульсами. ECAL будет дополнять другие системы PID, такие как RICH и TOF, особенно в области высоких энергий, где их разрешающая способность падает. Как показано в данной работе, сегмент HR является критически важным для прецизионного изучения P-волновых состояний чармония.
- **Системы идентификации частиц:** Планируется установка детектора черенковского излучения с фокусирующей аэрогелевой средой (RICH) и новой времяпролетной системы (TOF) для идентификации адронов в широком диапазоне импульсов.

Детальные спецификации запланированных калориметров

Электромагнитный калориметр ECAL эксперимента ALICE3 будет представлять собой цилиндрическую конструкцию с внутренним радиусом 1.15 м, расположенную вокруг оси сталкивающихся пучков. Аксептанс ECAL будет охватывать полный азимутальный угол и диапазон псевдобыстрот $-1.5 < \eta < 4$. Как уже сказано выше, предлагается составить ECAL из двух сегментов, высокоточного сегмента из кристаллов PbWO_4 и сегмента с умеренным разрешением сэмпингового типа. Баррель ECAL будет дополнен торцевых сегментов, выполненного также их модулей сэмпингового типа. Спецификация сегментов ECAL с описанием геометрии и выбранной технологии модулей приведена в таблице 4. Планируемое энергетическое разрешение сегментов ECAL эксперимента ALICE3 в сравнении с разрешением фотонного спектрометра PHOS эксперимента ALICE показано в таблице 5.

Таблица 4. Спецификации электромагнитного калориметра (ECAL) для ALICE3.

Параметр	Сэмплинг в барреле	Сэмплинг в торце	Высокоточный в барреле
Аксептанс	$\Delta\phi = 2\pi, \eta < 1.5$	$\Delta\phi = 2\pi, 1.5 < \eta < 4$	$\Delta\phi = 2\pi, \eta < 0.33$
Геометрия	$R_{in} = 1.15 \text{ м}, z < 2.7 \text{ м}$	$0.16 \text{ м} < R < 1.8 \text{ м}, z = 4.35 \text{ м}$	$R_{in} = 1.15 \text{ м}, z < 0.64 \text{ м}$
Технология	сэмплинг Pb + сцинтиллятор	сэмплинг Pb + сцинтиллятор	кристаллы PbWO_4
Размер ячейки	$30 \times 30 \text{ мм}^2$	$40 \times 40 \text{ мм}^2$	$22 \times 22 \text{ мм}^2$
Число каналов	$\sim 30\,000$	$\sim 6\,000$	$\sim 20\,000$
Диапазон энергий	$0.1 < E < 100 \text{ ГэВ}$	$0.1 < E < 250 \text{ ГэВ}$	$0.01 < E < 100 \text{ ГэВ}$

Таблица 5. Параметры энергетического разрешения для калориметров PHOS (ALICE) и ECAL (ALICE3). Параметры для ALICE3 являются целевыми значениями согласно LoI [2].

Детектор / Сегмент	Шумовой член, Стохастический член, Постоянный член,		
	a (ГэВ)	b ($\sqrt{\text{ГэВ}}$)	c (%)
PHOS (ALICE Run 1-3) [24]	0.013	0.0358	1.12
ECAL HR (ALICE3)	0.002	0.02	1
ECAL Coarse (ALICE3)	0.02	0.11	1

На рисунке 7 демонстрируется одно из ключевых применений разработанной модели ECAL: оценка разрешения по инвариантной массе для π^0 -мезонов. Графики показывают, что предложенный высокоточный сегмент ECAL (слева) позволяет достичь разрешения около $4\text{-}5 \text{ МэВ}/c^2$ при $p_T \sim 2 \text{ ГэВ}/c$. Такое разрешение является достаточным для прецизи-

онных измерений, в частности, для разделения радиационных распадов χ_c . Эти результаты не только подтверждают адекватность разработанной модели, но и являются важным элементом для научного обоснования выбора конструкции будущего детектора.

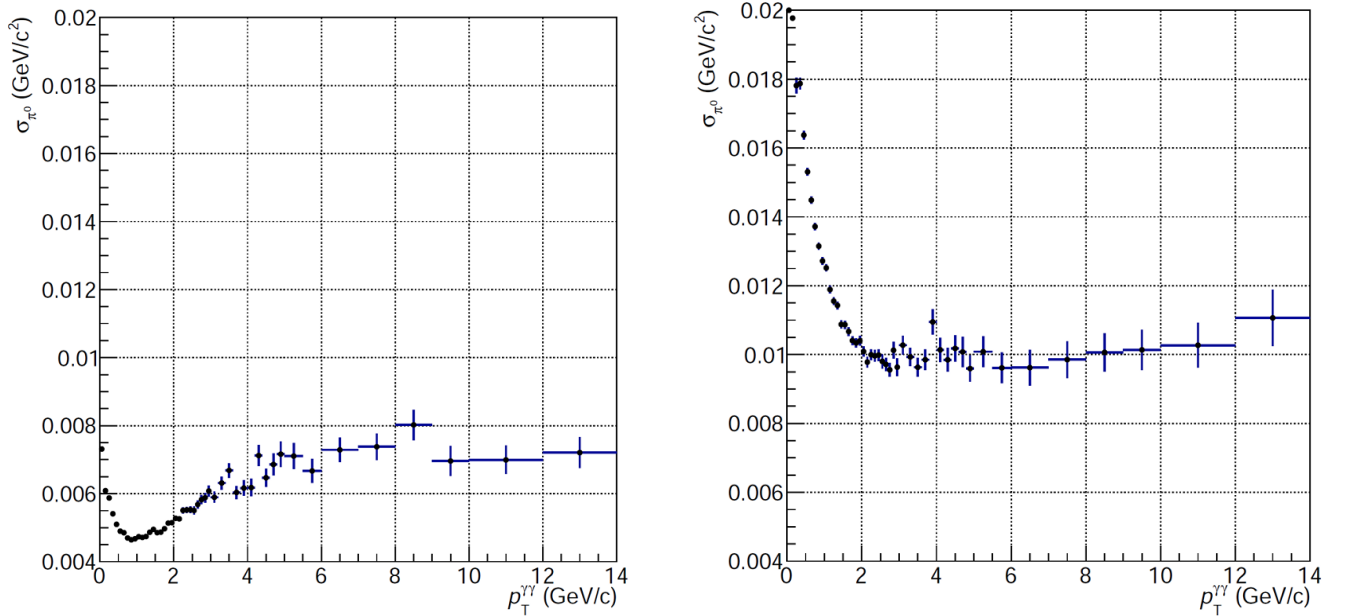


Рис. 7. Разрешение по инвариантной массе для распада $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ в зависимости от поперечного импульса π^0 , смоделированное для ALICE3 [6]. **Слева:** фотоны реконструированы в высокоточном сегменте ECAL. **Справа:** фотоны реконструированы в сэмплинговом сегменте с умеренным разрешением.

Критерии отбора данных в анализе ALICE Run 3

В анализе реальных данных pp -столкновений при $\sqrt{s} = 13.6$ ТэВ, собранных в ALICE в Run 3, для обеспечения качества данных и подавления фона применялся строгий набор критериев отбора.

Отбор событий.

- Требование на положение реконструированной первичной вершины взаимодействия вдоль оси пучка: $|V_z| < 10$ см, для отсека событий, произошедших далеко от центра детектора.
- Применение процедур подавления событий с наложением нескольких взаимодействий (pile-up rejection), что особенно важно при высокой светимости Run 3.

Отбор треков. К реконструированным трекам заряженных частиц применялись следующие критерии качества:

- **Требования к трекингу в ТРС:** Минимальное число реконструированных кластеров ≥ 70 для надежного измерения импульса и dE/dx .
- **Качество фита трека:** Максимальное значение χ^2 на степень свободы фита трека в ТРС должно быть менее 4 ($\chi^2/\text{NDF} < 4$).
- **Отбор первичных частиц:** Налагались ограничения на параметр прицеливания (DCA) трека относительно первичной вершины как в поперечной плоскости (DCA_{xy}), так и вдоль оси пучка (DCA_z). По умолчанию оба значения DCA должны быть меньше 3 см.
- **Критерии отбора кластеров PHOS:** Для анализа с использованием PHOS применялись дополнительные требования:
 - Минимальная энергия кластера 0.3 ГэВ для подавления сигналов от минимально ионизирующих частиц.
 - Временное окно для кластера: ± 25 нс при наличии калибровки по времени или ± 500 нс без нее.
 - Минимальное число ячеек в кластере ≥ 3 .
 - Анализ поперечной формы электромагнитного ливня для подавления адронного фона. Форма кластера аппроксимируется эллипсом, а для отбора кандидатов используется переменная R^2 :

$$2R^2 = \frac{(\lambda_1 - \langle \lambda_1 \rangle)^2}{\sigma_{\lambda_1}^2} + \frac{(\lambda_2 - \langle \lambda_2 \rangle)^2}{\sigma_{\lambda_2}^2} + c \cdot \frac{(\lambda_1 - \langle \lambda_1 \rangle)(\lambda_2 - \langle \lambda_2 \rangle)}{\sigma_{\lambda_1} \sigma_{\lambda_2}}, \quad (2)$$

где λ_1 и λ_2 - собственные значения ковариационной матрицы кластера, выражающей форму поверхности пересекающего конуса, содержащего ливень, с передней плоскостью калориметра [28]. Данные собственные числа упорядочены $\lambda_1 > \lambda_2$, определяя таким образом длинную и короткую оси эллипса ливня. Параметры $\langle \lambda_1 \rangle$, $\langle \lambda_2 \rangle$, σ_{λ_1} , σ_{λ_2} и c зависят от энергии кластера и параметризуются на основе моделирования. Критерий отбора для кластеров, соответствующих электромагнитным ливням, имеет вид $R^2 < 4.0$.

Выбор конкретных значений этих критериев был оптимизирован для максимизации отношения сигнал/фон и минимизации систематических неопределенностей.

Результаты исследования регистрации состояний чармония в ALICE и ALICE3

Третий раздел диссертации содержит оригинальные результаты, полученные в ходе анализа как реальных, так и моделированных данных. Основное внимание уделено разработке алгоритмов идентификации электронов, измерению их эффективности и оценке физических возможностей для изучения состояний чармония.

Разработка методик для ALICE Run 3

Основой для регистрации состояний чармония, распадающихся на e^+e^- пары, является эффективная и надежная идентификация электронов. В данной работе был разработан и отлажен полный цикл анализа для идентификации электронов в эксперименте ALICE Run 3 с использованием калориметра PHOS, реализованный в рамках ПО O2Physics.

Предварительный отбор электронов. Начальным этапом является идентификация частиц по их удельным потерям энергии (dE/dx) во время-проекционной камере (TPC). На рисунке 8 показано распределение dE/dx в зависимости от импульса. Хорошо видна белая полоса при $dE/dx \simeq 60$, соответствующая адронам, исключенным в результате идентификации в TPC для создания чистой выборки электронов. Для обогащения выборки электронами также используется информация из детектора TOF, однако перед детектором PHOS модули детектора TOF не установлены ради уменьшения вторичных взаимодействий фотонов перед PHOS.

Сопоставление треков с кластерами (Track-Cluster Matching). Следующий шаг — это сопоставление треков из TPC с энергетическими кластерами в калориметре PHOS. Точность этой процедуры напрямую влияет на подавление фона. На рисунке 9 показан пример распределения остатков. Ярко выраженный пик, описываемый Гауссовой функцией, соответствует истинным совпадениям и позволяет определить оптимальное окно для отбора (обычно $\pm 2\sigma$). Фон формируется случайными комбинациями кластеров PHOS и проекции треков на поверхность PHOS и аппроксимируется полиномом 3-й степени.

Идентификация по отношению E/p и оценка фона. Ключевым параметром является отношение измеренной энергии кластера E к импульсу сопоставленного трека p . Для электронов это отношение близко к единице ($E/p \approx 1$), в то время как для адронов, как правило, $E/p \ll 1$. На рисунке 10 показаны распределения E/p , где предварительный отбор в TPC (красная линия) значительно очищает выборку от адронного фона. Для количественной оценки адронного загрязнения была разработана процедура аппроксимации

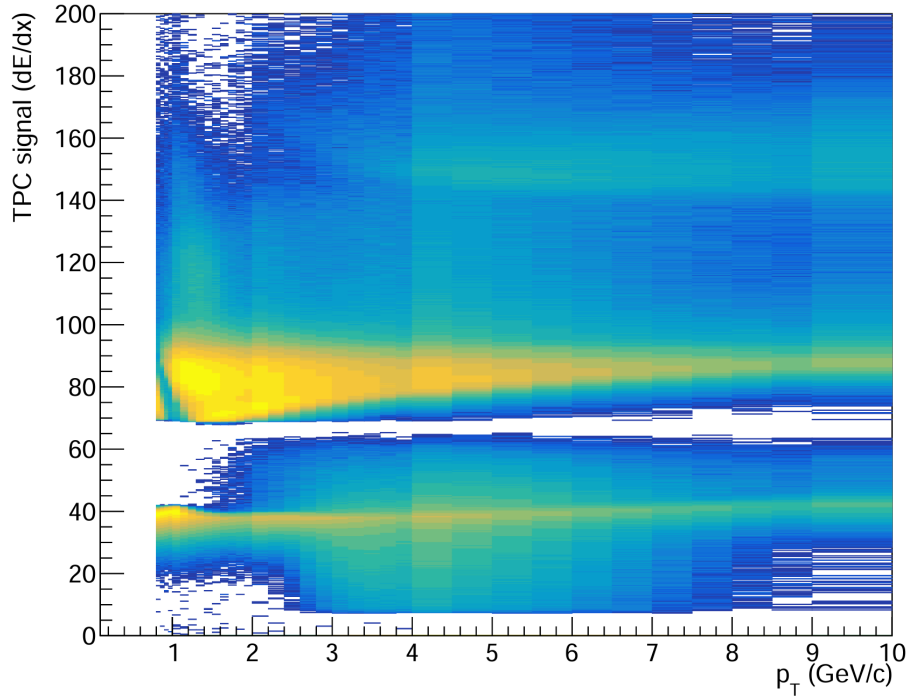


Рис. 8. Сигнал удельных ионизационных потерь энергии dE/dx в ТРС в зависимости от поперечного импульса p_T . Верхняя полоса соответствует электронам, нижние — адронам (пионы, каоны, протоны). Данные из предварительного анализа ALICE Run 3 2023 года.

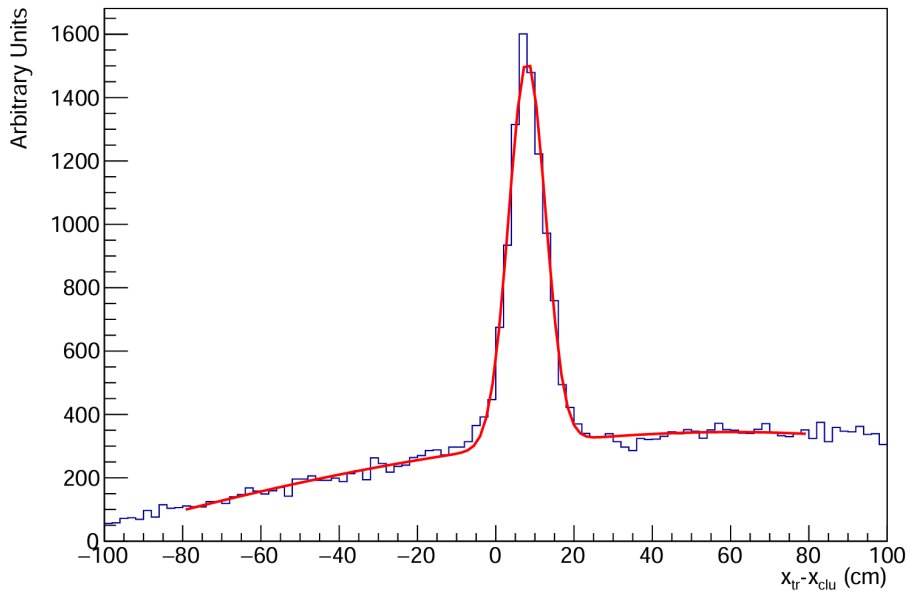


Рис. 9. Пример распределения разности координат по оси x экстраполяции трека с $1 < p_T < 1.5$ ГэВ/с до поверхности PHOS и кластера в PHOS. Четкий Гауссов пик от истинных совпадений выделяется на фоне плоского комбинаторного фона, что позволяет оптимизировать критерии отбора.

этих распределений (рисунок 11).

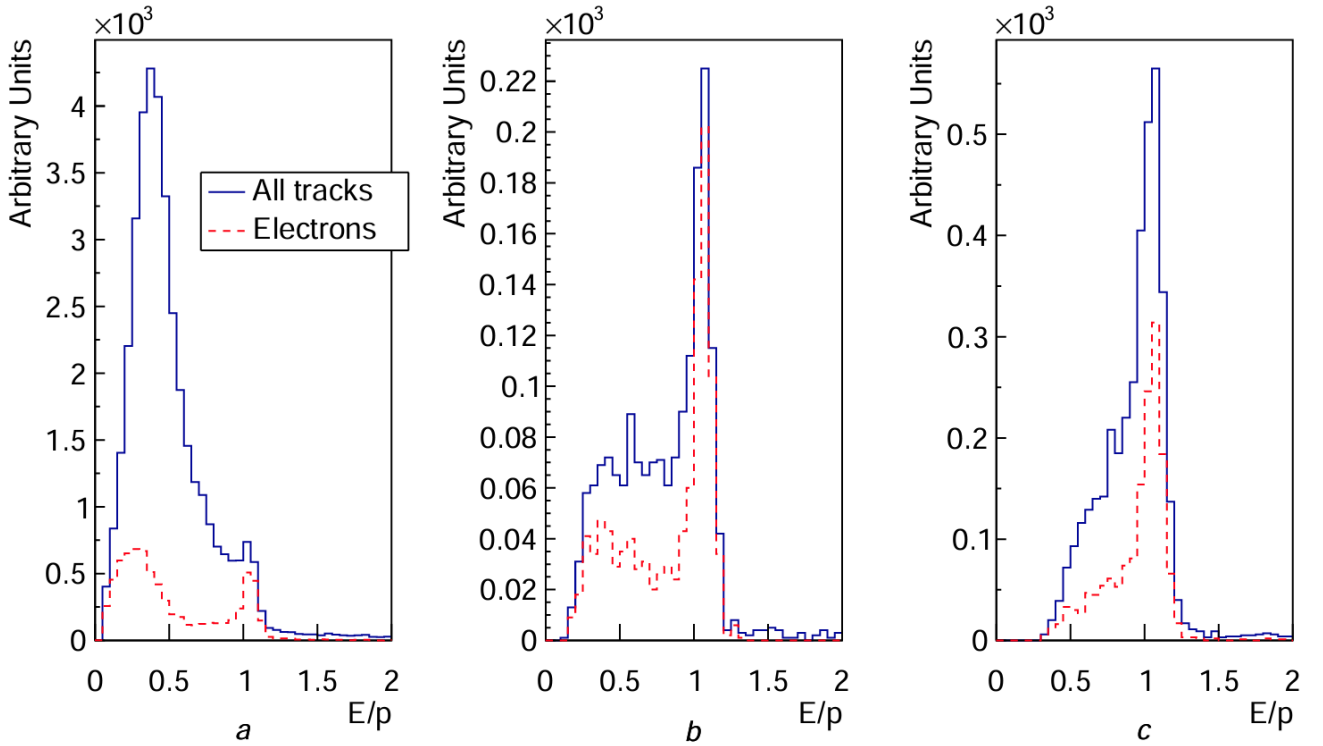


Рис. 10. Распределения отношения E/p для различных диапазонов энергии электромагнитного кластера: (а) от 1 до 3 ГэВ, (б) от 3 до 6 ГэВ, (в) от 6 до 10 ГэВ. Синие линии обозначают все сопоставленные треки, красные пунктирные — треки, идентифицированные как электроны с помощью TPC и TOF. Результат получен на предварительном наборе данных ALICE Run 3 2023 года, содержащем $0.13 \cdot 10^9$ событий с данными PHOS.

На рисунке 12 представлены итоговые результаты оценки адронного загрязнения. Видно, что комбинация TPC и PHOS позволяет достичь низкого уровня загрязнения ($< 10\%$) при энергиях выше 2 ГэВ. При этом ожидаемо, что эффективность идентификации с помощью только TPC (красные точки) ухудшается с ростом энергии, так как кривые ионизационных потерь для разных типов частиц сближаются. Для оценки систематических погрешностей варьировались диапазон фитирования, диапазон интегрирования и начальные параметры подгонки.

Разработка и валидация метода Tag and Probe. Для корректного измерения сечений рождения чармония необходимо с высокой точностью знать эффективность регистрации и идентификации продуктов их распада. В данной работе был разработан и адаптирован для среды O2Physics метод «помеченной выборки» (Tag and Probe). Этот метод позволяет измерить эффективность непосредственно на экспериментальных данных, минимизируя зависимость от Монте-Карло моделирования. Суть метода заключается в ис-

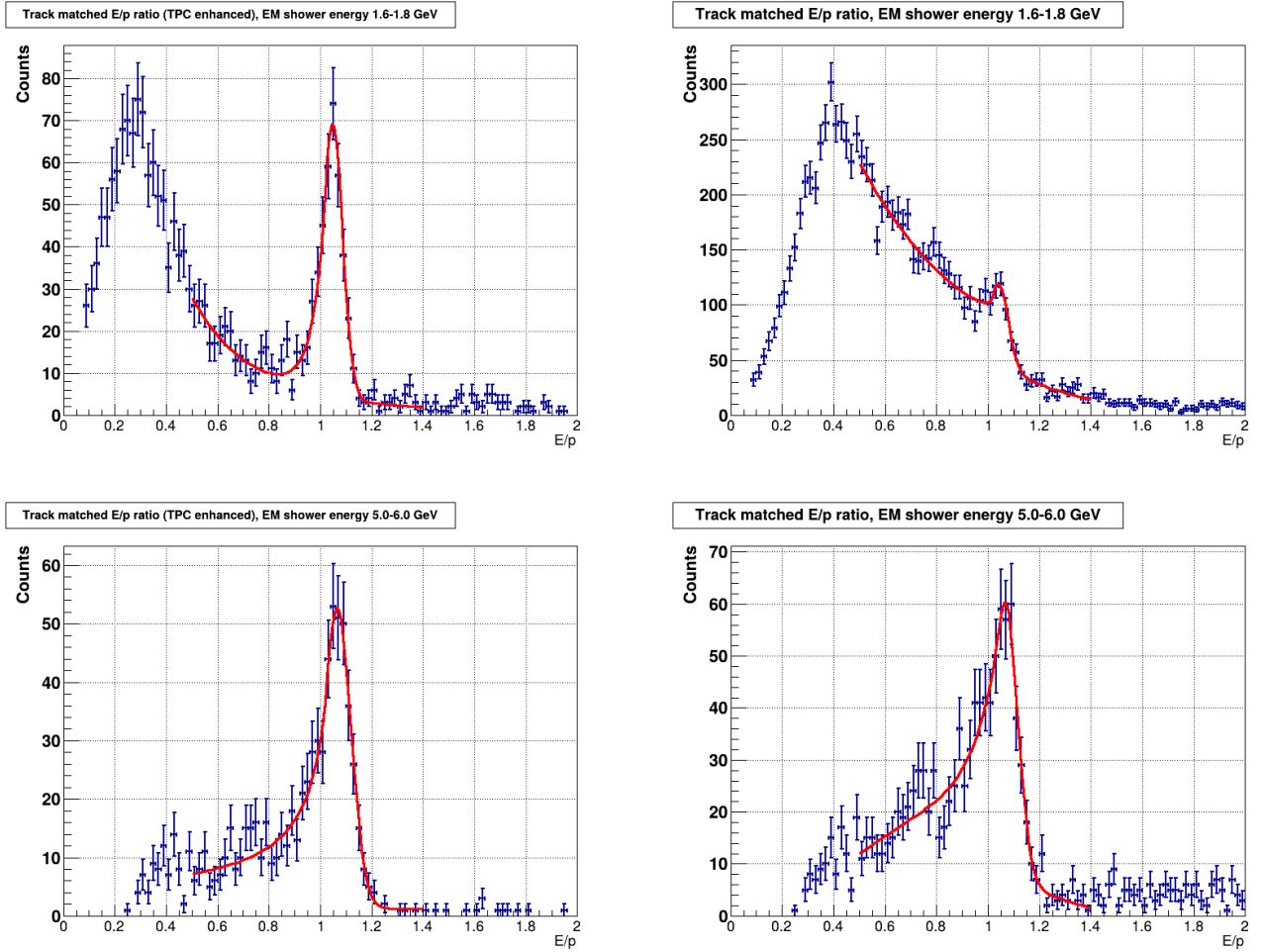


Рис. 11. Примеры аппроксимации распределений E/p для оценки адронного загрязнения для двух диапазонов энергии, $1.6 < E < 1.8$ ГэВ (верхний ряд) и $5.0 < E < 6.0$ ГэВ (нижний ряд). **Слева:** с предварительным отбором электронов в ТРС. **Справа:** без него. Отбор в ТРС значительно снижает фон, упрощая выделение сигнала электронов. Подгонка выполнена комбинацией функции Гаусса для сигнала и экспоненты от полинома 2-го порядка для фона.

пользовании чистого источника электронов из распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ (рис. 13). Один лептон («метка») идентифицируется с помощью надежных критериев, а второй («проба») используется для проверки эффективности исследуемого метода. Ввиду ограниченной статистики, доступной для калориметра PHOS на начальном этапе анализа данных Run 3, данный метод был в первую очередь отлажен и валидирован с использованием данных ТРС, где имеется высокая статистика треков. Это позволило подтвердить работоспособность всего программного комплекса. Результаты валидации метода Tag-and-Probe с использованием ТРС (рис. 14 и 15) демонстрируют его готовность к анализу, который будет проведен при накоплении большей статистики с калориметром PHOS. Эта работа является первым шагом к измерению эффективности детекторов ALICE данным методом в условиях Run 3.

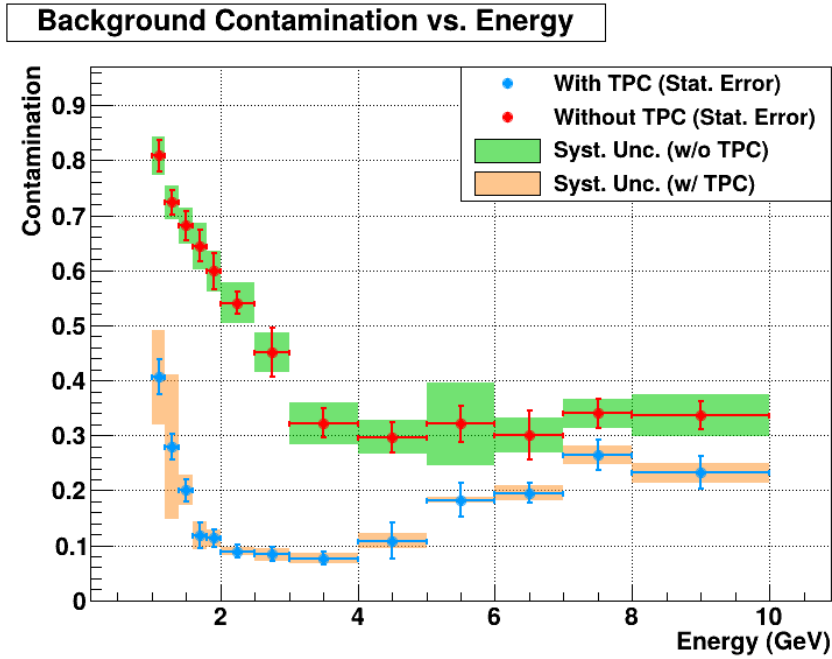


Рис. 12. Зависимость адронного загрязнения от энергии кластера со систематическими погрешностями.

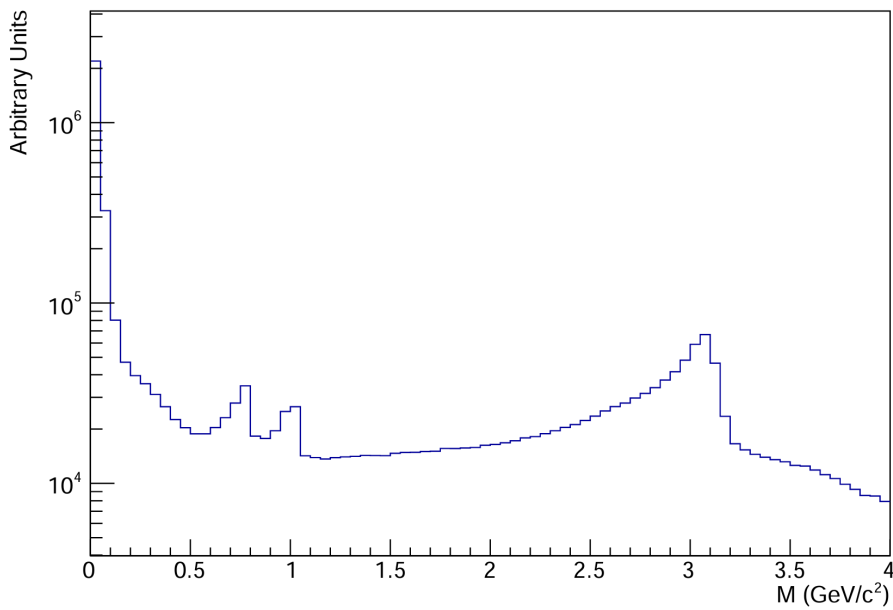


Рис. 13. Спектр инвариантной массы пар e^+e^- из предварительных данных ALICE Run 3 (2022 год) при $\sqrt{s} = 13.6$ ТэВ. Четкий сигнал J/ψ используется как источник чистых электронов для метода Tag and Probe.

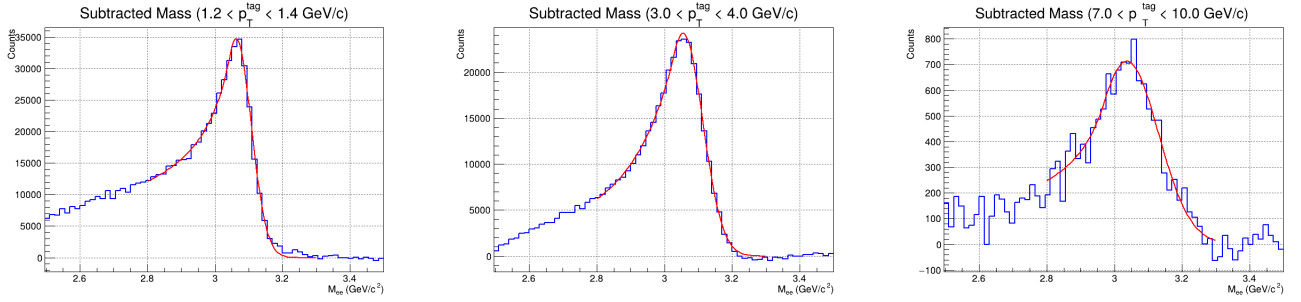


Рис. 14. Примеры сигналов J/ψ после вычитания фона в методе Tag and Probe для трех интервалов по поперечному импульсу трека-метки: $1.2 < p_T < 1.4$ ГэВ/с, $3.0 < p_T < 4.0$ ГэВ/с, и $7.0 < p_T < 10.0$ ГэВ/с. Выделение сигнала производилось методом like-sign sideband, а подгонка — с помощью функции Crystal Ball. Систематические неопределенности были оценены путем вариации ключевых параметров анализа, таких как диапазон боковых полос для фонового вычитания, диапазон фитирования сигнала, фактор ребиннинга, границы интегрирования сигнала и начальные параметры фитирования.

Перспективы для ALICE3

Результаты моделирования для ALICE3 демонстрируют высокий потенциал для изучения Р-волновых состояний чармония, что является одной из ключевых задач будущей физической программы. На рисунке 16 показано, что разработанная методика идентификации электронов с помощью ECAL обеспечивает отличное подавление адронного фона.

На рисунке 17 показаны смоделированные спектры для распада $\chi_c \rightarrow J/\psi\gamma$. Видно, что только при использовании высокоточного сегмента ECAL (левая панель) возможно четкое разделение состояний χ_{c1} и χ_{c2} . Это ожидаемое разрешение представляет собой значительное улучшение по сравнению с возможностями текущих экспериментов, где разделение данных состояний является сложной задачей. Этот результат является ключевым аргументом в пользу включения сегмента с высоким разрешением в конструкцию ALICE3.

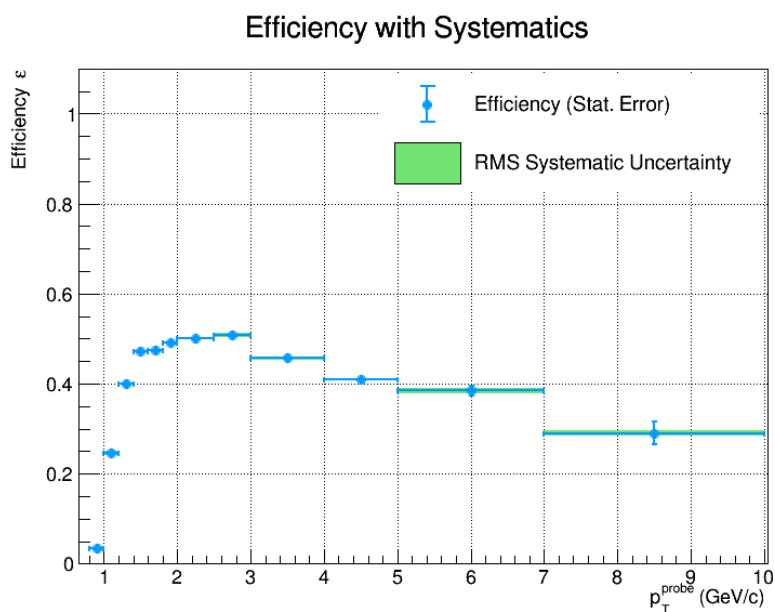


Рис. 15. Демонстрация применения метода Tag and Probe для оценки эффективности идентификации электронов с помощью ТРС. Точки данных включают статистические погрешности, а закрашенная область представляет оценку систематической неопределенности. Величина систематической неопределенности варьируется в зависимости от p_T , подчеркивая важность тщательной оценки всех потенциальных источников погрешностей.

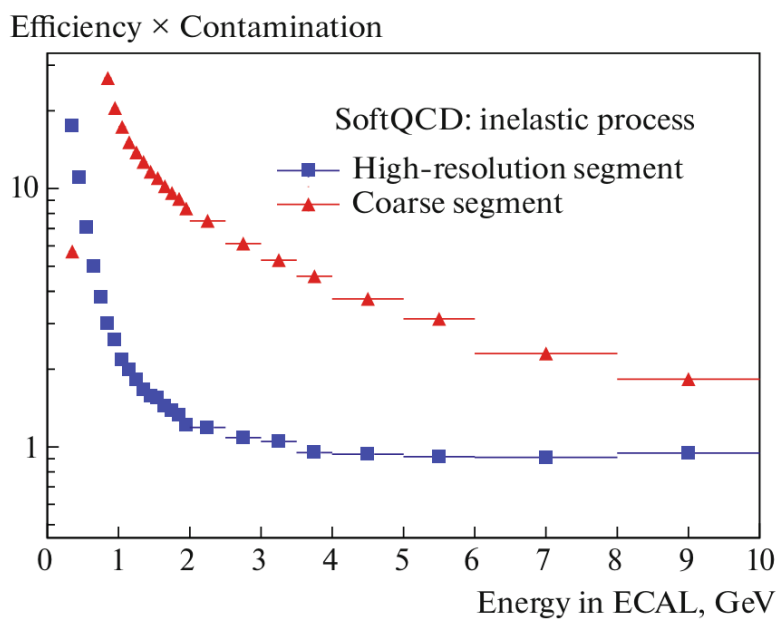


Рис. 16. Произведение эффективности на фактор загрязнения для идентификации электронов в ALICE3 [5]. Высокоточный сегмент (синие квадраты) обеспечивает значительно лучшую чистоту выборки по сравнению с сэмпинговым (красные треугольники).

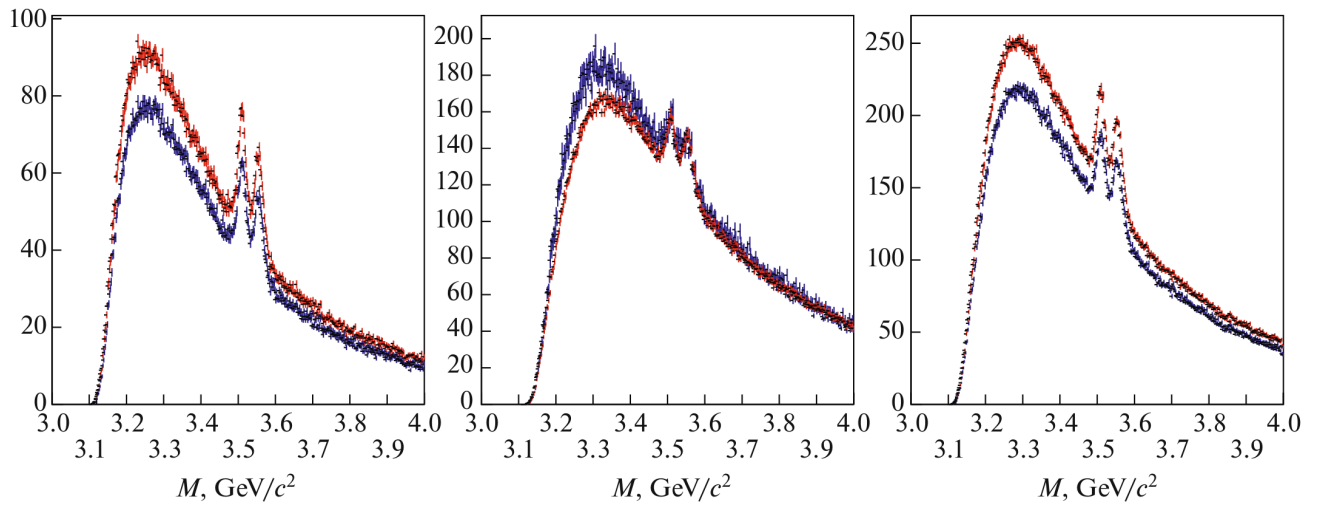


Рис. 17. Смоделированные спектры инвариантной массы $M(e^+e^-\gamma)$ для $\chi_c \rightarrow J/\psi\gamma$ в ALICE3 [5]. Сценарии: (слева) фотон и лептоны в высокоточном сегменте (HR); (в центре, справа) фотон в HR, один/оба лептона в сэмплинговом сегменте (Coarse). Синие гистограммы — сигнал MC-true, красные — реконструированный. Разделение χ_{c1} и χ_{c2} возможно только в первом сценарии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решены задачи по разработке и применению методик регистрации состояний чармония в экспериментах ALICE и ALICE3. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан и отлажен программный комплекс для анализа данных ALICE Run 3 в среде O2Physics. В рамках этого комплекса разработан и валидирован на данных TPC метод «Tag-and-Probe», заложивший основу для будущего измерения эффективности идентификации электронов с помощью калориметра PHOS.
2. Создана и верифицирована параметризованная модель отклика электромагнитного калориметра (ECAL) для будущего эксперимента ALICE3. На ее основе разработаны и оптимизированы алгоритмы идентификации электронов, обеспечивающие уровень адронного загрязнения менее 10% при энергиях выше 2 ГэВ.
3. Продемонстрировано, что высокоточный сегмент ECAL в ALICE3 играет ключевую роль для прецизионного изучения P-волновых состояний чармония χ_c , позволяя разделить состояния χ_{c1} и χ_{c2} . Этот результат стал важным вкладом в научное обоснование проекта ALICE3.

Выполненная работа вносит существенный вклад в текущий анализ данных эксперимента ALICE и в подготовку к будущим исследованиям на LHC, открывая новые возможности для изучения физики тяжелых кваркониев и свойств кварк-глюонной плазмы. В качестве перспективы дальнейшего развития темы, предложенные методики могут быть применены для анализа полномасштабных Монте-Карло симуляций для условий эксперимента ALICE Run 3. Это позволит провести прямое сравнение эффективности и чистоты идентификации электронов с результатами, полученными на реальных данных, и более точно оценить систематические неопределенности для будущих измерений сечений рождения чармония.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ
ДИССЕРТАЦИИ**

1. Hambardzumyan Y., Kharlov Y. Electron Identification with the Electromagnetic Calorimeter and Its Application for Charmonia Studies in the Experiment ALICE3 at the LHC // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2024. Vol. 21, No. 4. P. 642–645. [5]
2. Kharlov Y., Hambardzumyan Y. Perspectives on the measurement of P-wave charmonium states in the ALICE 3 experiment at the Large Hadron Collider // *Particles*. 2023. Vol. 6. No. 2. P. 450–459. [6]

Список литературы

1. *Kluberg L., Satz H.* Color Deconfinement and Charmonium Production in Nuclear Collisions // *Landolt-Börnstein - Group I Elementary Particles, Nuclei and Atoms*. — 2010. — С. 373—423. — DOI: [10.1007/978-3-642-01539-7_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-01539-7_13).
2. *Collaboration A.* Letter of intent for ALICE 3: A next-generation heavy-ion experiment at the LHC : тех. отч. / CERN. — 11.2022.
3. The ALICE experiment at the CERN LHC / Т. А. Collaboration [и др.] // *Journal of Instrumentation*. — 2008. — Август. — Т. 3, вып. 08. — S08002—S08002. — ISSN 1748-0221. — DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08002](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08002).
4. *AliceO2Group.* O2Physics: ALICE O2 Analysis repository. — 06.2025. — URL: <https://github.com/AliceO2Group/O2Physics>.
5. *Hambardzumyan Y., Kharlov Y.* Electron Identification with the Electromagnetic Calorimeter and Its Application for Charmonia Studies in the Experiment ALICE3 at the LHC // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2024. — Август. — Т. 21, вып. 4. — С. 642—645. — ISSN 15318567. — DOI: [10.1134/S1547477124700900](https://doi.org/10.1134/S1547477124700900).
6. *Kharlov Y., Hambardzumyan Y., Varlamov A.* Probing the Hot QCD Matter via Quarkonia at the Next-Generation Heavy-Ion Experiment at LHC // *Particles*. — 2023. — Т. 6, вып. 2. — ISSN 2571712X. — DOI: [10.3390/particles6020030](https://doi.org/10.3390/particles6020030).
7. *AliceO2Group.* DelphesO2: O2 interface for Delphes. — 06.2025.
8. Review of Particle Physics / S. Navas [и др.] // *Physical Review D*. — 2024. — Август. — Т. 110, вып. 3. — С. 030001. — ISSN 2470-0010. — DOI: [10.1103/PhysRevD.110.030001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.030001).

9. *Bodwin G. T., Braaten E., Lepage G. P.* Rigorous QCD analysis of inclusive annihilation and production of heavy quarkonium // *Physical Review D*. — 1995. — Февр. — Т. 51, вып. 3. — С. 1125—1171. — ISSN 0556-2821. — DOI: [10.1103/PhysRevD.51.1125](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.51.1125).
10. *Heavy Quarkonium Physics* / N. Brambilla [и др.] // *CERN Yellow Report*. — 2004. — Дек.
11. *Spectrum of Charmed Quark-Antiquark Bound States* / E. Eichten [и др.] // *Physical Review Letters*. — 1975. — Февр. — Т. 34, вып. 6. — С. 369—372. — ISSN 0031-9007. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.34.369](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.34.369).
12. *Charmonium: The model* / E. Eichten [и др.] // *Physical Review D*. — 1978. — ИЮНЬ. — Т. 17, вып. 11. — С. 3090—3117. — ISSN 0556-2821. — DOI: [10.1103/PhysRevD.17.3090](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.17.3090).
13. *Quigg C., Rosner J. L.* Quantum mechanics with applications to quarkonium // *Physics Reports*. — 1979. — Дек. — Т. 56, вып. 4. — С. 167—235. — ISSN 03701573. — DOI: [10.1016/0370-1573\(79\)90095-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(79)90095-4).
14. *Observation of the P-1(1) state of charmonium* / P. Rubin [и др.] // *Physical Review D*. — 2005. — Нояб. — Т. 72, вып. 9. — С. 092004. — ISSN 1550-7998. — DOI: [10.1103/PhysRevD.72.092004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.72.092004).
15. *ALICE: Physics Performance Report, Volume I* / A. Collaboration [и др.] // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. — 2004. — Нояб. — Т. 30, вып. 11. — С. 1517—1763. — ISSN 0954-3899. — DOI: [10.1088/0954-3899/30/11/001](https://doi.org/10.1088/0954-3899/30/11/001). — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0954-3899/30/11/001>.
16. *Matsui T., Satz H.* J/ψ suppression by quark-gluon plasma formation // *Physics Letters B*. — 1986. — Окт. — Т. 178, вып. 4. — С. 416—422. — ISSN 03702693. — DOI: [10.1016/0370-2693\(86\)91404-8](https://doi.org/10.1016/0370-2693(86)91404-8).
17. *Karsch F., Mehr M. T., Satz H.* Color screening and deconfinement for bound states of heavy quarks // *Zeitschrift fur Physik C Particles and Fields*. — 1988. — Дек. — Т. 37, вып. 4. — С. 617—622. — ISSN 0170-9739. — DOI: [10.1007/BF01549722](https://doi.org/10.1007/BF01549722). — URL: <http://link.springer.com/10.1007/BF01549722>.
18. *Satz H.* Colour deconfinement and quarkonium binding // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. — 2006. — Март. — Т. 32, вып. 3. — R25—R69. — ISSN 0954-3899. — DOI: [10.1088/0954-3899/32/3/R01](https://doi.org/10.1088/0954-3899/32/3/R01).

19. *Thews R. L., Schroedter M., Rafelski J.* Enhanced J/ψ production in deconfined quark matter // *Physical Review C - Nuclear Physics*. — 2001. — Т. 63, вып. 5. — С. 549051—549055. — ISSN 1089490X. — DOI: [10.1103/PhysRevC.63.054905](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.63.054905).
20. *Braun-Munzinger P.* Quarkonium production in ultra-relativistic nuclear collisions: suppression versus enhancement // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. — 2007. — Август. — Т. 34, вып. 8. — S471—S477. — ISSN 0954-3899. — DOI: [10.1088/0954-3899/34/8/S36](https://doi.org/10.1088/0954-3899/34/8/S36).
21. *Arsene I.-C.* J/ψ Production in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2013. — Март. — Т. 426. — С. 012023. — ISSN 1742-6588. — DOI: [10.1088/1742-6596/426/1/012023](https://doi.org/10.1088/1742-6596/426/1/012023).
22. The ALICE TPC, a large 3-dimensional tracking device with fast readout for ultra-high multiplicity events / J. Alme [и др.] // *Nucl. Instrum. Meth. A*. — 2010. — Т. 622. — С. 316—367. — DOI: [10.1016/j.nima.2010.04.042](https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.04.042).
23. *Collaboration A.* Upgrade of the ALICE Experiment: Letter of Intent // *J. Phys. G*. — 2014. — Т. 41. — С. 87001. — DOI: [10.1088/0954-3899/41/8/087001](https://doi.org/10.1088/0954-3899/41/8/087001).
24. Calibration of the photon spectrometer PHOS of the ALICE experiment / S. Acharya [и др.] // *Journal of Instrumentation*. — 2019. — Май. — Т. 14, вып. 05. — P05025—P05025. — ISSN 1748-0221. — DOI: [10.1088/1748-0221/14/05/P05025](https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/05/P05025).
25. A comprehensive guide to the physics and usage of PYTHIA 8.3 / C. Bierlich [и др.] // *SciPost Physics Codebases*. — 2022. — Ноябрь. — С. 8. — DOI: [10.21468/SciPostPhysCodeb.8](https://doi.org/10.21468/SciPostPhysCodeb.8).
26. Geant4—a simulation toolkit / S. Agostinelli [и др.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2003. — Июль. — Т. 506, вып. 3. — С. 250—303. — ISSN 01689002. — DOI: [10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8).
27. *Eulisse G., Rohr D.* The O2 software framework and GPU usage in ALICE online and offline reconstruction in Run 3 // *EPJ Web of Conferences*. — 2024. — Май. — Т. 295. — С. 05022. — ISSN 2100-014X. — DOI: [10.1051/epjconf/202429505022](https://doi.org/10.1051/epjconf/202429505022).
28. ALICE: Physics performance report, volume II / P. Cortese [и др.] // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. — 2006. — Сентябрь. — Т. 32, вып. 10. — ISSN 13616471. — DOI: [10.1088/0954-3899/32/10/001](https://doi.org/10.1088/0954-3899/32/10/001).