

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

УДК 539.121.667

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Изучение ультрапериферических столкновений в тяжелых ионах

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

_____ С. Л. Тимошенко

Студент

_____ А. О. Журкина

Москва 2021

Содержание

Введение	2
Цель и мотивация	2
Физика ультрапериферических столкновений	3
Поток фотонов	4
Области изучения UРС	6
Детектирование ультрапериферических столкновений	7
Рождение векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях	8
Изучение данных экспериментов	11
Проделанная работа	15
Представление результатов	16
Заключение	23
Список используемых источников	24

Введение

В 1924 году Ферми разработал метод [1], известный как метод эквивалентных (или виртуальных) фотонов, в котором он рассматривал электромагнитные поля заряженной частицы как поток виртуальных фотонов. Десять лет спустя Вайсзаккер и Уильямс расширили этот подход, включив в него ультрарелятивистские частицы. Движущиеся высокозарядные ионы переносят сильные электромагнитные поля, которые действуют как поле фотонов. Столкновения при больших параметрах удара и адронные взаимодействия невозможны, поэтому ионы взаимодействуют посредством фотон-ионных и фотон-фотонных столкновений, известных как ультрапериферические столкновения.

Цель и мотивация

Изучение ультрапериферических столкновений, физики процессов, применимость и перспективы. Изучение реакции рождения векторного ρ мезона и его распада на два пиона. Рассмотрение распределения $\pi^+\pi^-$ масс в диапазоне 1400-1700 МэВ, для более детального исследования возбужденных состояний $\rho'(1450)$ и $\rho''(1700)$.

Физика ультрапериферических столкновений

Ультрапериферические столкновения, UPC - это реакции, в которых два иона взаимодействуют через свое облако виртуальных фотонов. Интенсивность электромагнитного поля и, следовательно, количество фотонов в облаках, окружающих ядро, пропорциональны Z^2 . Таким образом, эти типы взаимодействий наиболее предпочтительны при столкновении тяжелых ионов.

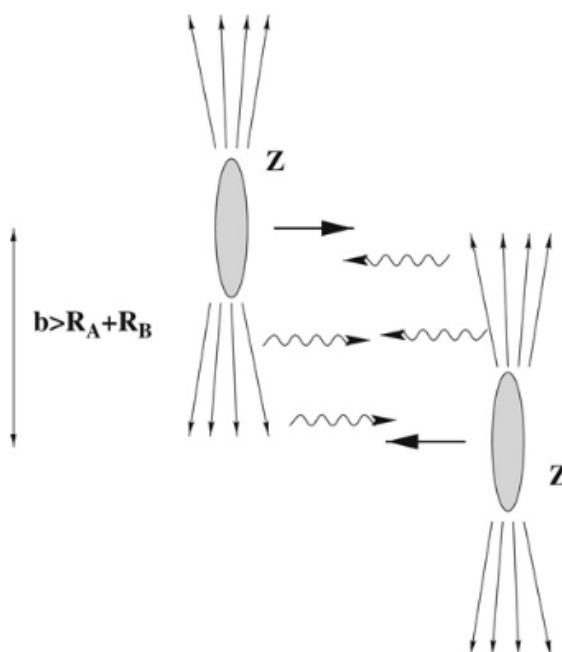


Рисунок 1 — Принципиальная схема ультрапериферического столкновения двух ионов. Прицельный параметр b больше суммы двух радиусов $R_A + R_B$.

На рис. 1 схематично показано ультрапериферическое столкновение тяжелых ионов. Блинная форма ядер обусловлена лоренцевым сжатием. Когда два ядра сталкиваются, могут происходить два типа электромагнитных процессов:

1. фотон-фотонные столкновения - взаимодействия, при которых излучаемые фотоны взаимодействуют друг с другом;
2. фотоядерные столкновения, когда один излучаемый фотон взаимодействует с составной частью другого ядра.

Эти два процесса показаны на рис. 2а и 2б. На этих диаграммах ядро, излучающее фотон, остается нетронутым после столкновения. На рис. 2в изображено геометрическое представление потоков фотонов в точке вне ядер 1 и 2, при столкновении с прицельным параметром b . Также показано электрическое поле фотонов в этой точке. Однако возможно и ультрапериферическое взаимодействие, при котором одно или оба ядра распадаются. Распад может происходить за счет обмена дополнительным фотоном.

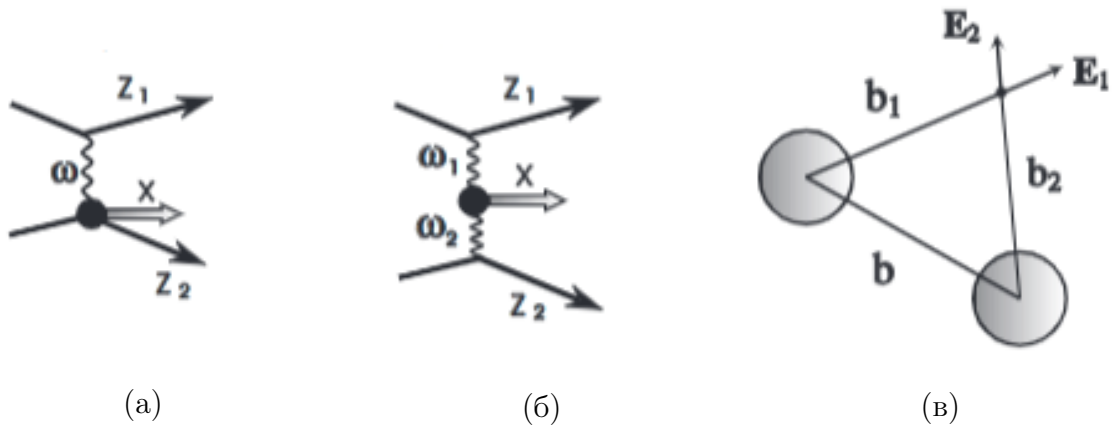


Рисунок 2 — Схематическое изображение электромагнитных процессов при столкновении двух ядер.

Поток фотонов

При ион-ионном столкновении с прицельным параметром b , время взаимодействия $\Delta t \sim b/\gamma V$ [2]. В расчетах ультрапериферических AB -столкновений обычно требуется, чтобы прицельный параметр был больше суммы двух ядерных радиусов, $b > R_A + R_B$. Максимально возможный поперечный импульс фотона, испускаемого ядром A $p_T \lesssim \hbar c/R_A$. В продольном направлении максимально возможный импульс умножается на фактор Лоренца, γ , из-за лоренцевского сжатия ионов в этом направлении $k \lesssim \hbar c\gamma/R_A$. Следовательно, максимальная энергия $\gamma\gamma$ -столкновения в симметричном A -столкновении составляет $2\hbar c\gamma/R_A$. В лабораторной системе координат максимальная энергия фотона равна $\omega_{max} = \hbar/\Delta t \sim \gamma\hbar V/b$, где γ - лоренц-фактор частицы, $\gamma = \sqrt{1 - V^2/c^2}$. Для сколь-

зующего столкновения, когда два ядра едва соприкасаются, мы можем принять $b_{min} = 2R_A$, а максимальная энергия фотона составляет $\gamma\hbar V/2R_A$ ($R_A =$ радиус ядра). Максимальная энергия фотона составляет примерно $\hbar/2R_A Am_p c$ энергии иона. Здесь Am_p - масса иона. Для тяжелых ионов $R_A \approx 7fm$, так что ω_{max} составляет около $0.03/A$ энергии ионов. Для протонов R_A не очень хорошо определено, но принятие ω_{max} равным 10% энергии протона является разумным практическим правилом.

Таблица 1 — Некоторые виды ионов, максимальная энергия и светимость для нескольких ускорителей. Также показаны максимальные эффективные энергии γp и $\gamma\gamma$. Для протонных пучков максимальная эффективная энергия фотонов принята равной 10% от энергии протонов, хотя существует некоторый поток при более высоких энергиях.

Accelerator	Ions	Max. Energy (CM) per Nucleon pair	Luminosity	Max. γA Energy	Max. $\gamma\gamma$ Energy
RHIC	Au+Au	200 GeV	4×10^{26}	24 GeV	6.0 GeV
RHIC	p+p	500 GeV	6×10^{30}	79 GeV	50 GeV
LHC	Pb+Pb	5.6 TeV	10^{27}	705 GeV	178 GeV
LHC	p+p	14 TeV	10^{34}	3.1 TeV	1.4 TeV

Области изучения UPC

Существуют три области двухфотонной физики, которые могут быть изучены с помощью UPC на LHC: процессы QED в сильных электромагнитных полях; процессы QCD; поиски новой физики. При низких энергиях фотонов можно изучать процессы QED в сильных электромагнитных полях. При более высоких энергиях фотонов могут представлять интерес двухфотонные процессы QCD. Большой поток фотонов позволяет более детально изучать процессы, которые можно отделить от дифракционных процессов $\gamma A \rightarrow X A$. В двойном векторном рождении мезонов могут быть изучены не только легкие мезоны типа ρ_0 , но также $J/J\psi/\psi$ или пары двух разных векторных мезонов. Образование пар векторных мезонов можно отличить от образования двух независимых векторных мезонов некогерентного γA -рассеяния, поскольку поперечные импульсы двух векторных мезонов, образующихся в $\gamma\gamma$ -процессах, гораздо больше и взаимосвязаны. Большой поток фотонов мотивировал предыдущие новые физические исследования, такие как Хиггс и образование суперсимметричных частиц в двухфотонных взаимодействиях. Однако экспериментальные ограничения на массы многих новых частиц увеличились в последние годы, что делает их открытие в $\gamma\gamma$ -процессах на LHC маловероятным. И все же хотя поперечные сечения невелики, высокие энергии, длинные пробеги, большая светимость пучка и высокий диапазон инвариантных масс в столкновениях двух фотонов дают некоторые преимущества.

Детектирование ультрапериферических столкновений

События центральных столкновений характеризуются очень высокой множественностью. Поэтому все основные детекторы тяжелых ионов настроены на обработку большого количества данных в этом случае. С другой стороны, множественность ультрапериферических столкновений сравнительно невелика. Ионы не сильно взаимодействуют друг с другом и движутся практически без возмущений в направлении пучка. Необходимо принимать во внимание фон. Изучены несколько основных источников фона для двухфотонных процессов: периферийные адронные ядерные столкновения, взаимодействие пучка с газом, космические лучи, фотонно-ядерные столкновения и померонные процессы. Космические лучи и газовые реакции в пучке представляют собой проблему, главным образом, на стадии запуска, потому что более точный анализ данных на более поздней стадии отклоняет такие события. Подробное моделирование методом Монте-Карло было выполнено для отделения сигнала от фона. Было обнаружено, что наиболее важными критериями, которые отличают $\gamma\gamma$ -события от фона, являются [3] :

1. множественность: многие двухфотонные реакции, которые могут быть обнаружены на RHIC, имеют две или четыре заряженных частицы в конечном состоянии;
2. сумма поперечного импульса частиц в конечном состоянии должна быть маленькой, порядка $\sqrt{2}\hbar c/R$;
3. распределение скоростей центра масс системы $\gamma\gamma$ сосредоточено вокруг нуля при небольшой ширине;

Рождение векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях

Как было описано выше одной из наиболее интенсивно изучаемых реакций УРС является реакция рождения векторных мезонов. Рождение векторных мезонов происходит через виртуальный фотон γ^* посредством процесса $\gamma^*p \rightarrow Vp$. Этот процесс обычно рассматривается как трехступенчатый; виртуальный фотон γ^* флуктуирует в пару $q\bar{q}$, которая взаимодействует с протоном и адронизируется в векторный мезон V . Рождение мезонов с вектором основного состояния, $V = \rho, \omega, \Phi, J/\Psi, \gamma$. Эксклюзивное $\pi^+\pi^-$ производство было измерено ранее в аннигиляционном процессе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, а также в фотопроизводстве. Распределение $\pi^+\pi^-$ масс показывает сложную структуру в диапазоне масс 1000–2000 МэВ. Представлены доказательства наличия двух возбужденных состояний векторных мезонов в области 1600 МэВ: $\rho'(1450)$ и $\rho''(1700)$. Для мезона $\rho'(1450)$ доминирующим распадом является 4π - распад, для мезона $\rho''(1700)$ - 2π . Теоретический анализ согласованности 2π - и 4π - электромагнитных форм факторов и длины $\pi\pi$ -рассеяния и полный анализ данных о 2π - и 4π - конечных состояниях в e^+e^- аннигиляции и реакциях фоторождения, позволил утверждать, что для получения согласованной картины необходимо два резонанса. Предполагается, что $\rho'(1450)$ является преимущественно радиально возбужденным $2S$ -состоянием, а $\rho''(1700)$ - орбитально возбужденным $2D$ -состоянием. Кроме того, существует еще мезон $\rho_3(1690)$ со спином 3, который имеет моду $\pi\pi$ -распада. Сценарий с двумя перекрывающимися резонансами подтверждается и другими данными. В интервале 1,35–2,4 ГэВ произведены измерения форм фактора пиона и обнаружен глубокий минимум около 1,6 ГэВ. Наилучшее соответствие было получено с гипотезой ρ -подобных резонансов при 1420 и 1770 МэВ с шириной около 250 МэВ. Решающее свидетельство режима $\pi\pi$ -распада как $\rho'(1450)$, так и $\rho''(1700)$

дает аннигиляция $p\bar{p}$ в состоянии покоя. Высокостатистические исследования распадов $\tau \rightarrow \pi\pi\nu_\tau$ и $\tau \rightarrow 4\pi\nu_\tau$ также требуют $\rho'(1450)$, но не чувствительны к $\rho''(1700)$, потому что они слишком близки к массе τ . В недавнем исследовании распада $\tau \rightarrow \pi\pi\nu_\tau$ с очень высокой статистикой, проведенном в Belle, сообщается о первом наблюдении как $\rho'(1450)$, так и $\rho''(1700)$ в τ распадах. Структура этих ρ -состояний еще не до конца ясна. Различные режимы распада $\rho'(1450)$ и $\rho''(1700)$ наблюдаются при аннигиляции pn и pp , но однозначных выводов сделать нельзя. Необходимо собрать больше данных, чтобы прояснить природу состояний, особенно в диапазоне энергий выше 1,6 ГэВ.

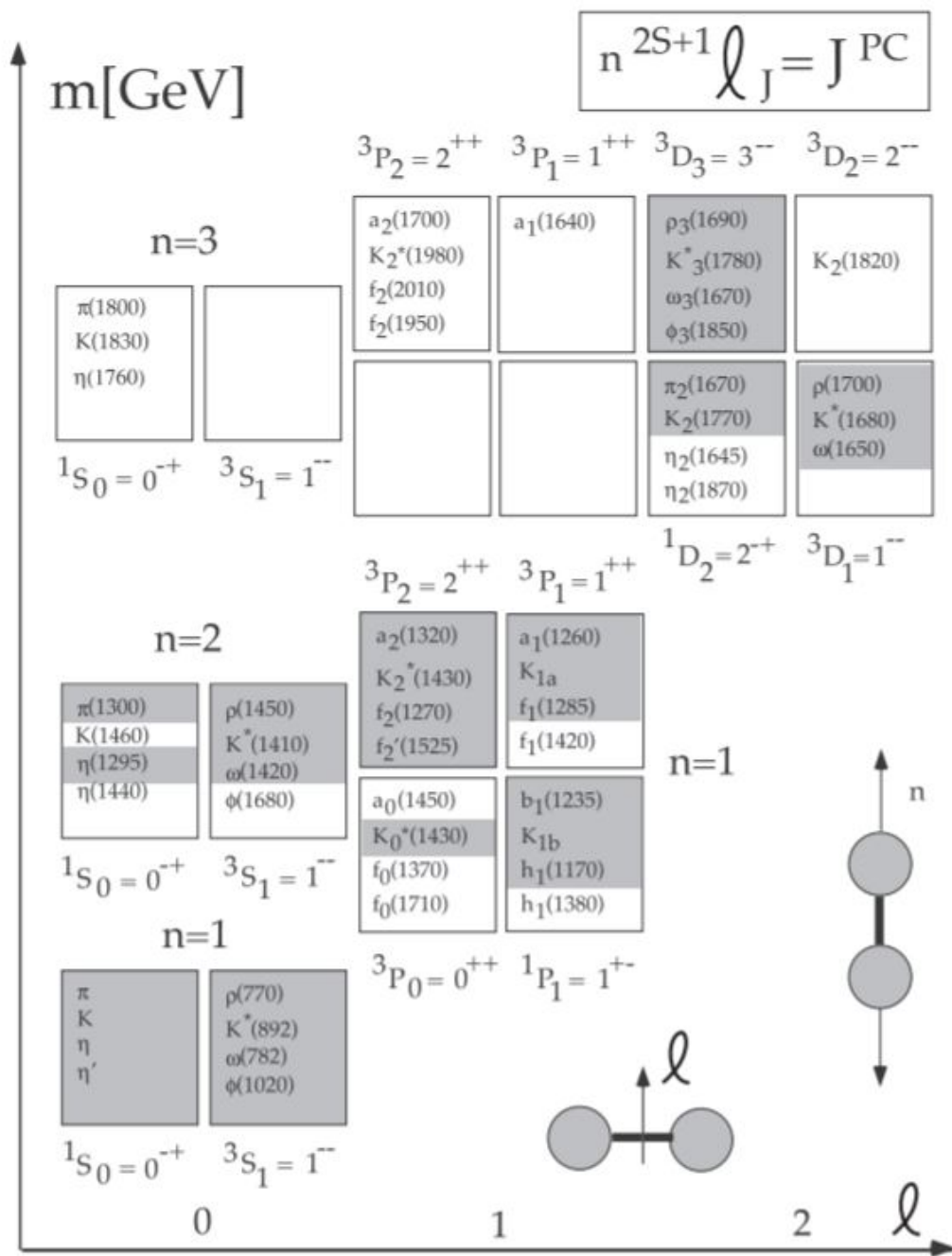


Рисунок 3 — Диаграмма основных и возбужденных состояний легких мезонов.

Исследования данных экспериментов

Ниже приведены примеры экспериментов и реакций, в процессе которых проводился поиск и изучение $\rho''(1700)$.

Experiment	Reaction
BELL	$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \nu_\tau$
ZEUS	$e p \rightarrow \pi^+ \pi^- p$
RVUE	$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^-$
BABR	$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$
OBLX	$0.0 \bar{p} p \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$

Рисунок 4 — Примеры экспериментов и реакций, в процессе которых проводился поиск и изучение $\rho''(1700)$.

Были изучены публикации эксперимента ZEUS, в процессе которых получены распределения по поперечному импульсу, по инвариантной массе пионов и зависимость отношения поперечных сечений $\sigma(\rho')/\sigma(\rho)$ и $\sigma(\rho'')/\sigma(\rho)$ от параметра Q^2 .

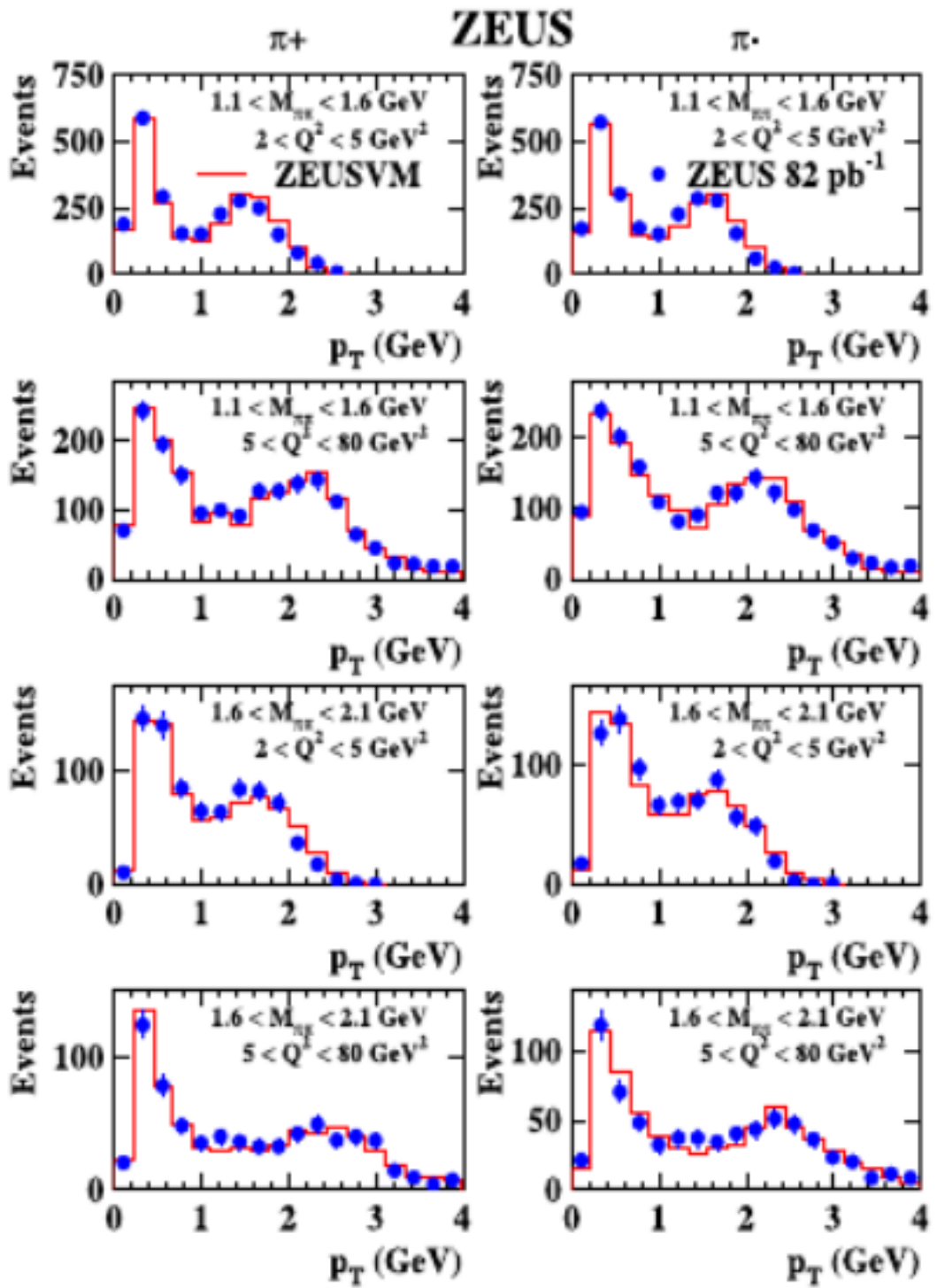


Рисунок 5 — Распределение по поперечному импульсу.

ZEUS

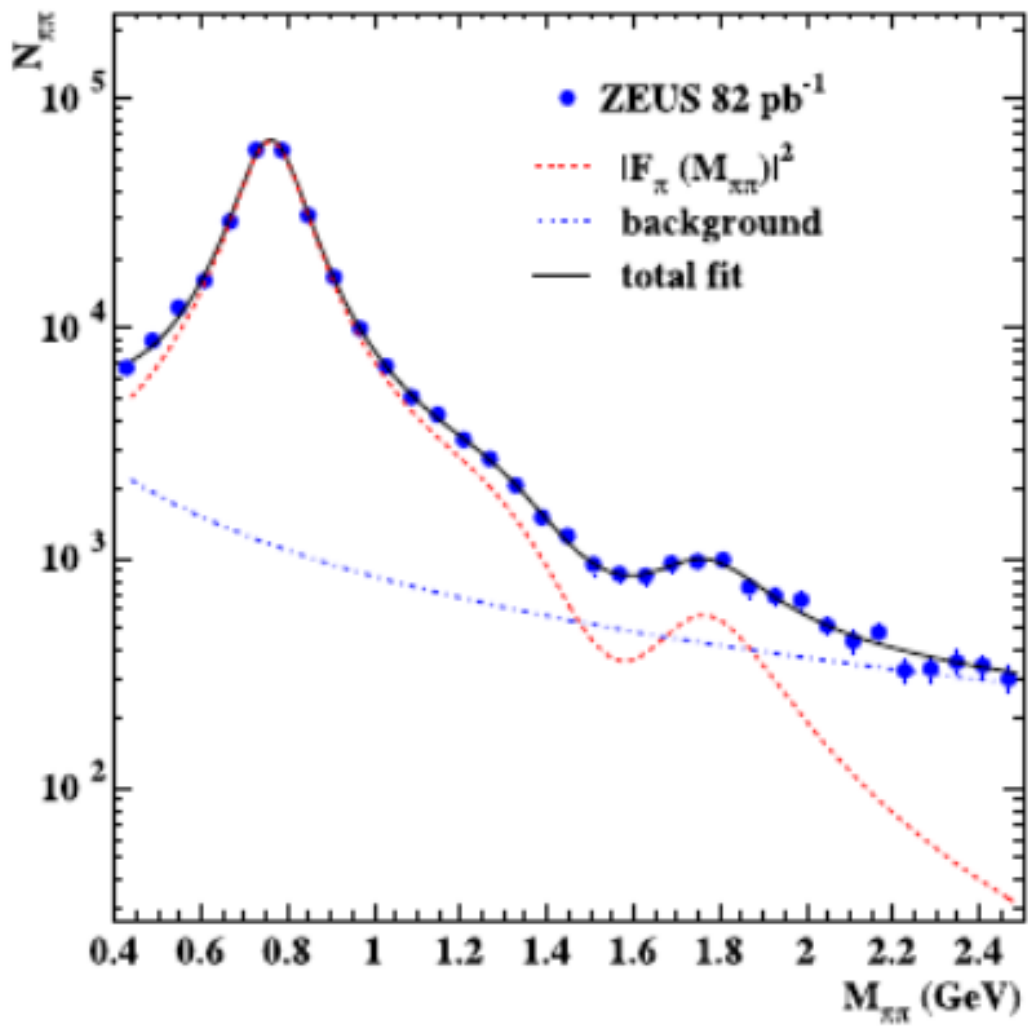


Рисунок 6 — Распределение по инвариантной массе пионов.

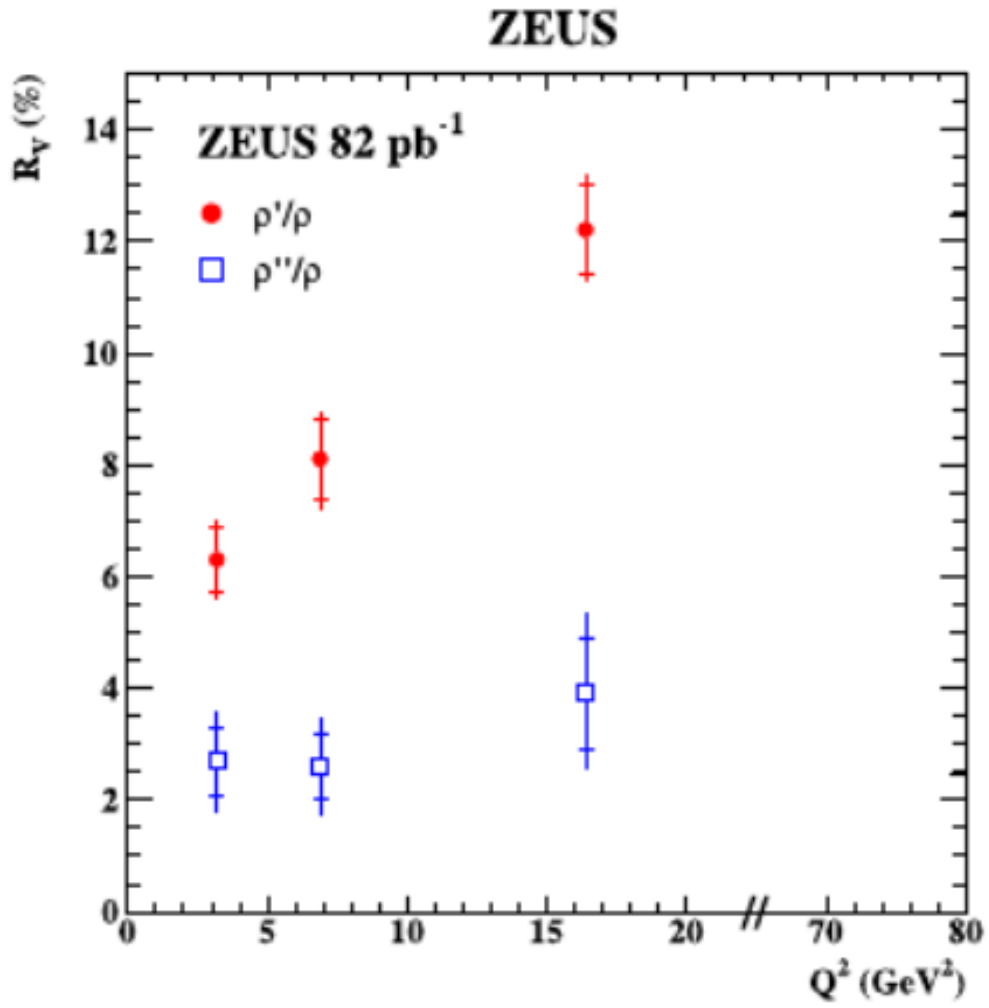


Рисунок 7 — Зависимость отношения поперчных сечений $\sigma(\rho')/\sigma(\rho)$ и $\sigma(\rho'')/\sigma(\rho)$ от параметра Q^2 .

Проведенная работа

В течение семестра была проведена ознакомительная работа с теоретическими материалами и литературой о возбужденном состоянии ρ мезона. Проведено ознакомление со стратегией анализа данных, пройден туториал, в процессе которого был написан софт для непосредственного анализа данных, на основании которого был написан собственный макрос. С помощью написанного макроса удалось проанализировать данные, содержащиеся в трех датасетах, имеющие облачное хранение. Анализ произведен в качестве «отладки» программы и для проверки ее корректной работы перед запуском в GRID. Целью анализа был поиск $\rho''(1700)$ в двухканальном распаде. В качестве результатов анализа получены распределения по поперечному импульсу и псевдобыстроте для одного трека и для суммы двух треков, распределение по инвариантной массе. Также было построено распределение количества треков в событие.

Представление результатов

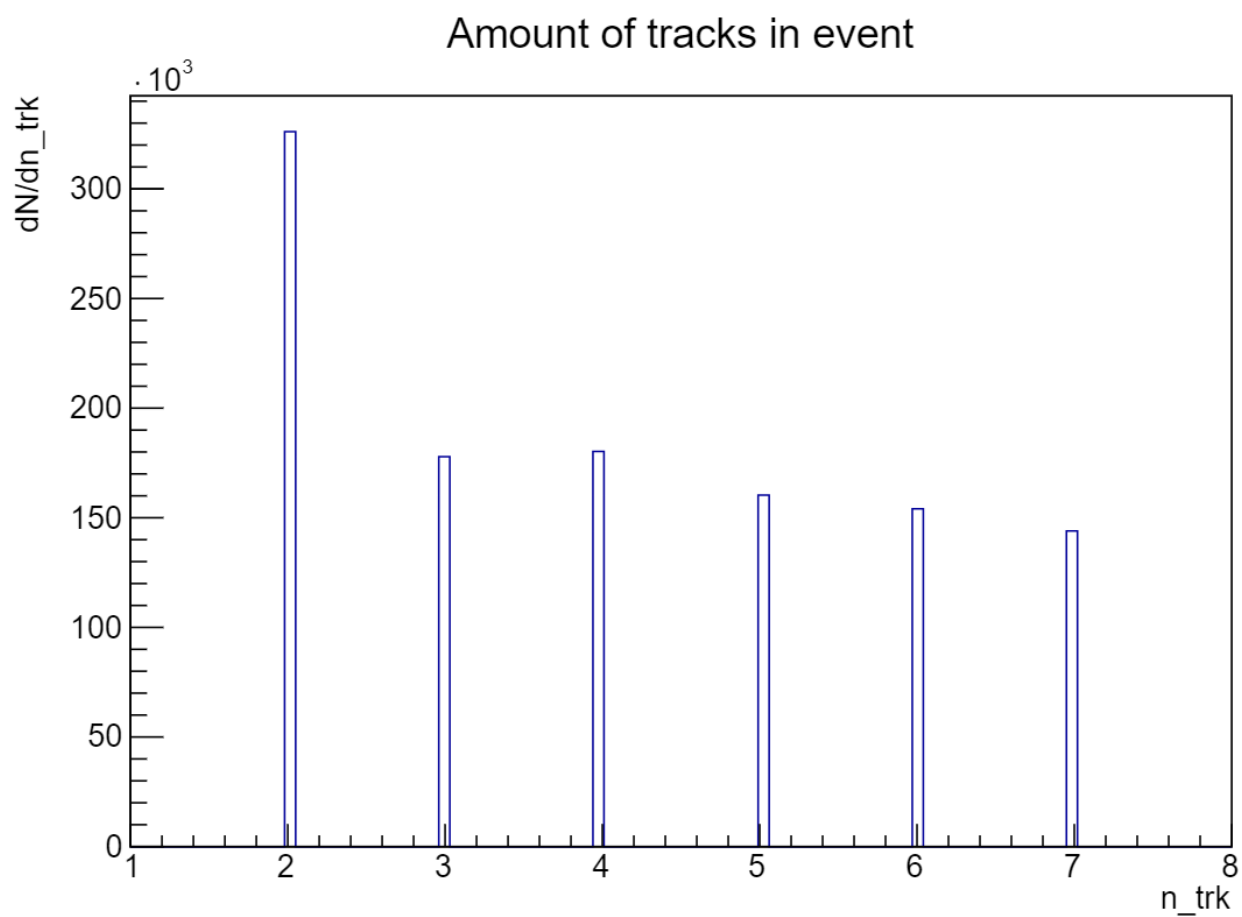


Рисунок 8 — Распределение по количеству треков в событии.

Представление результатов

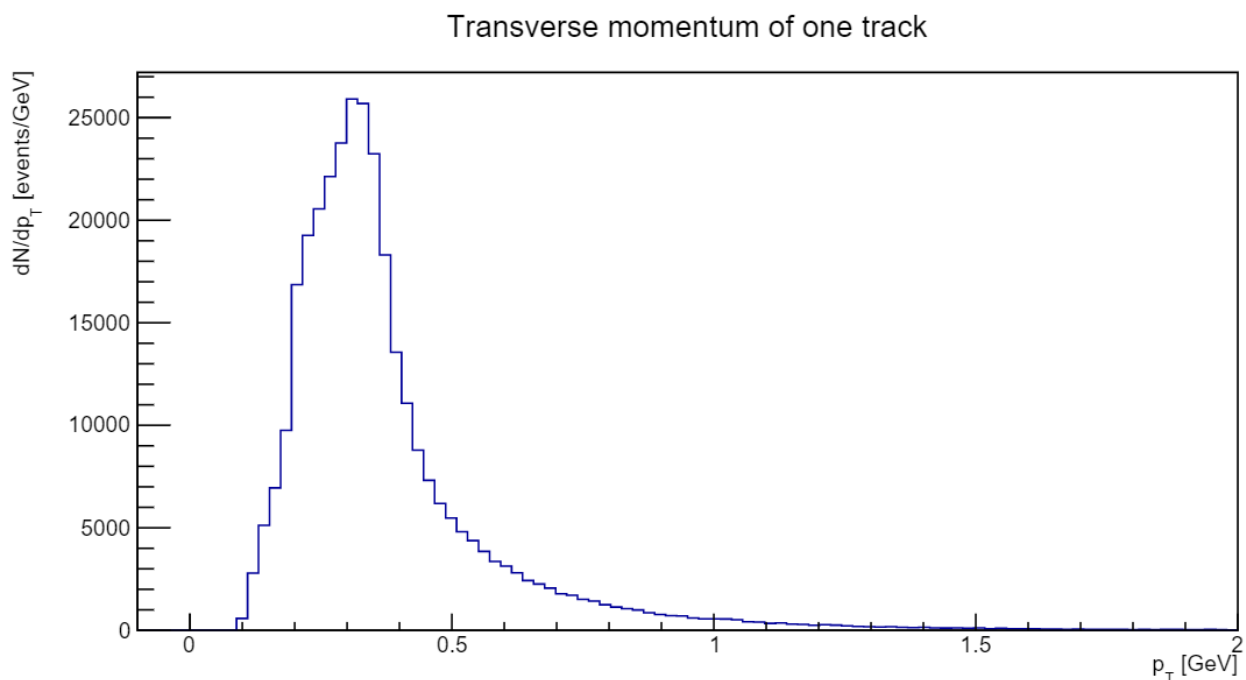


Рисунок 9 — Распределение по поперечному импульсу p_T для одного трека.

Представление результатов

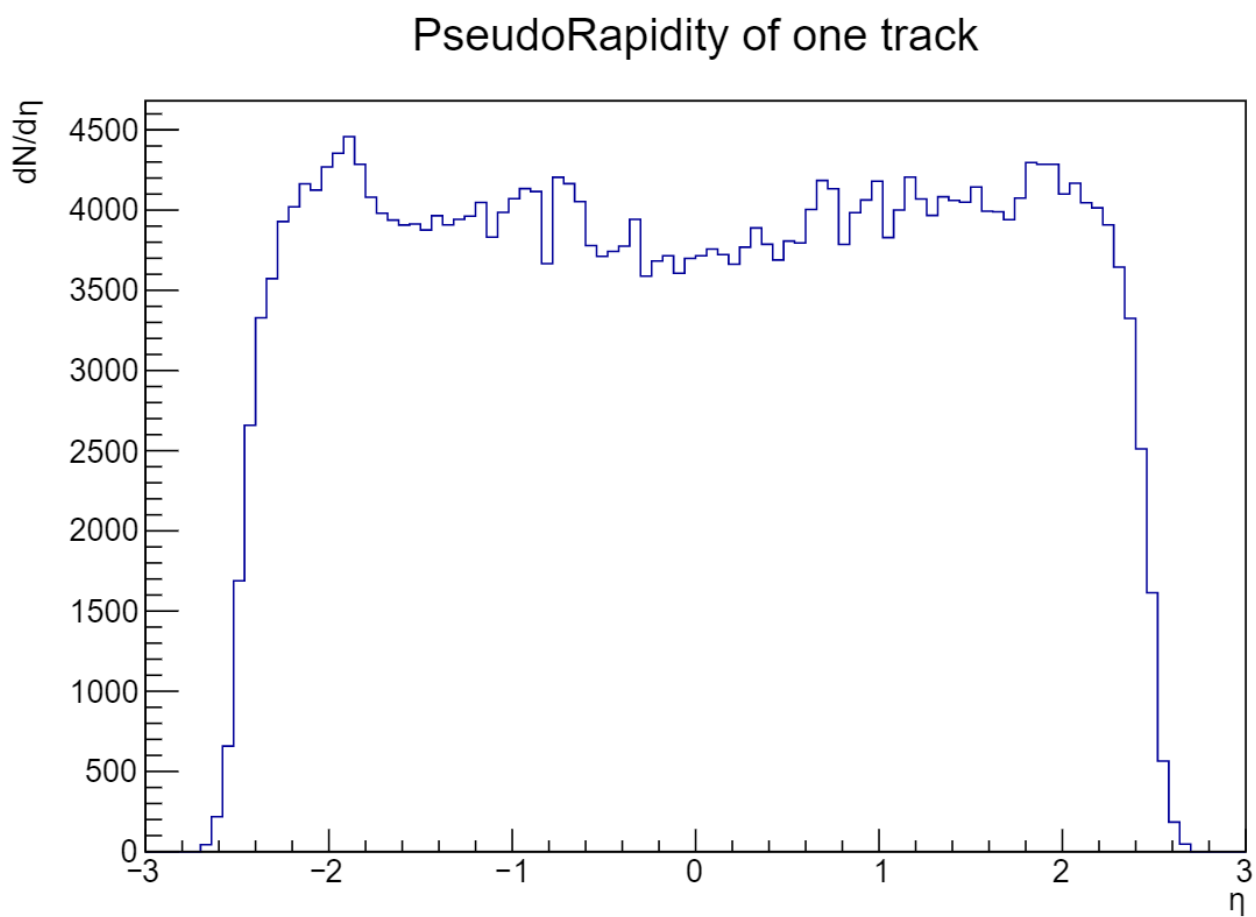


Рисунок 10 — Распределение по псевдобыстроте η для одного трека.

Представление результатов

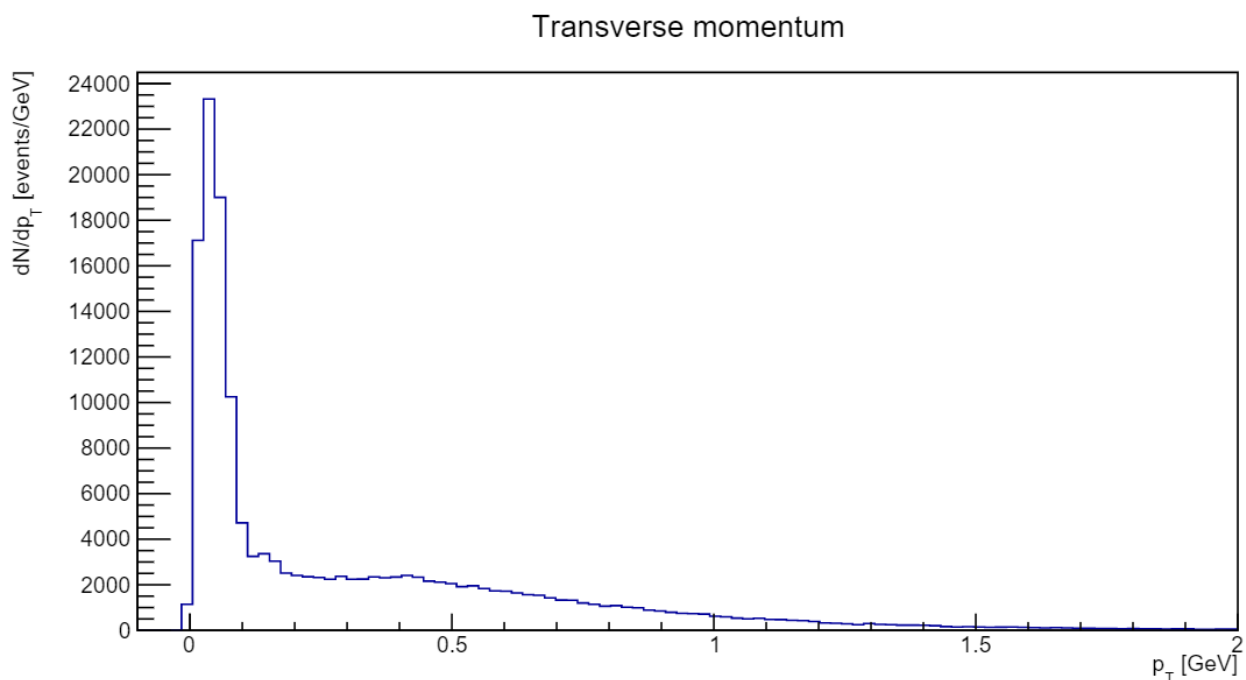


Рисунок 11 — Распределение по поперечному импульсу p_T для суммы двух треков.

Представление результатов

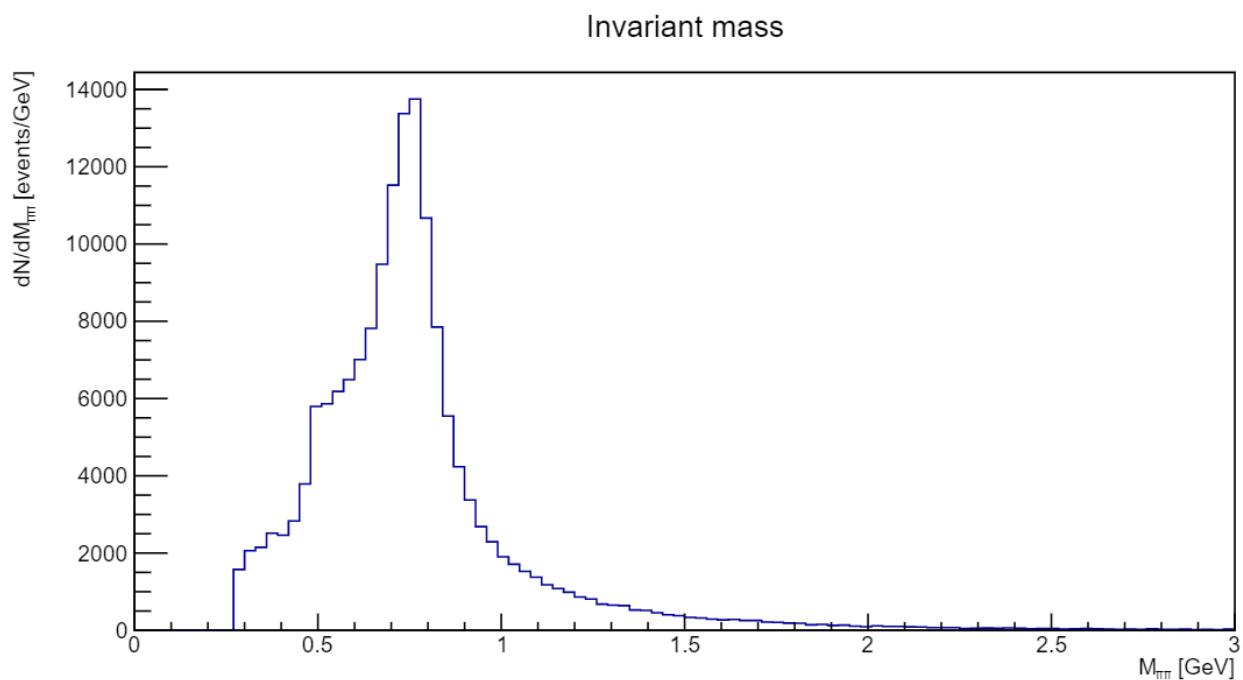


Рисунок 12 — Распределение по инвариантной массе пионов.

Представление результатов

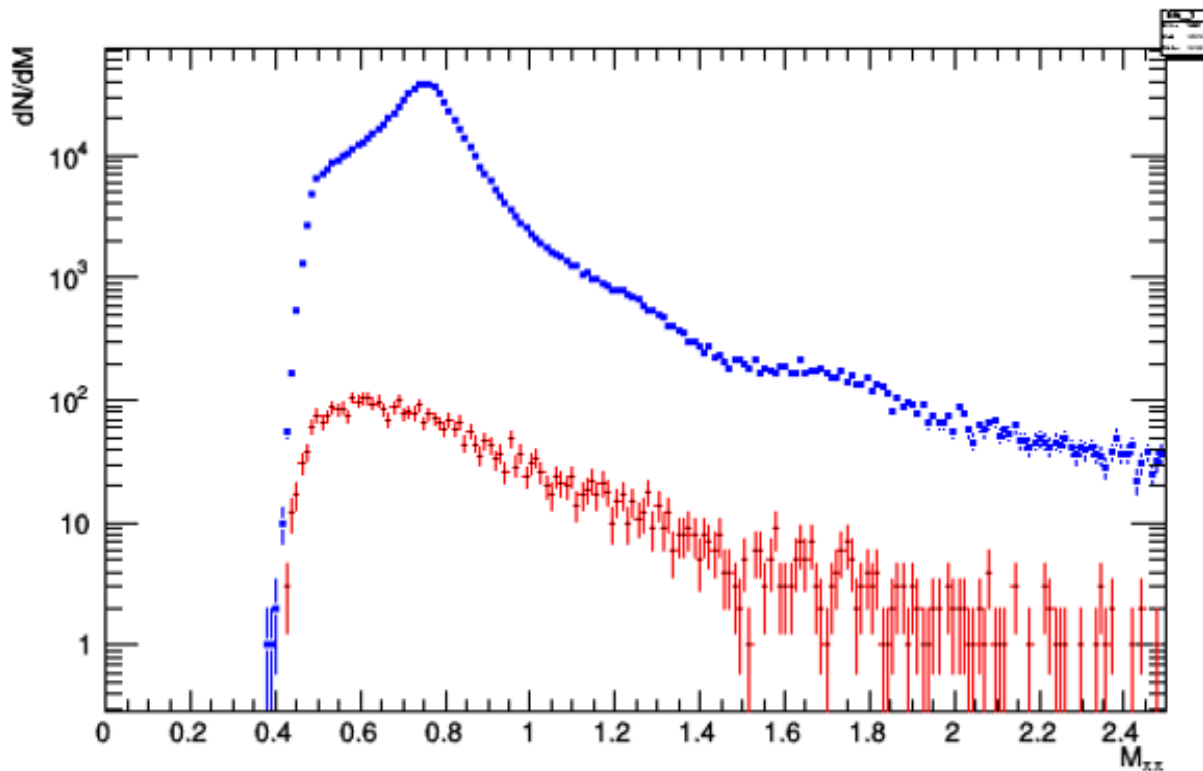


Рисунок 13 — Распределение по инвариантной массе пионов.

Представление результатов

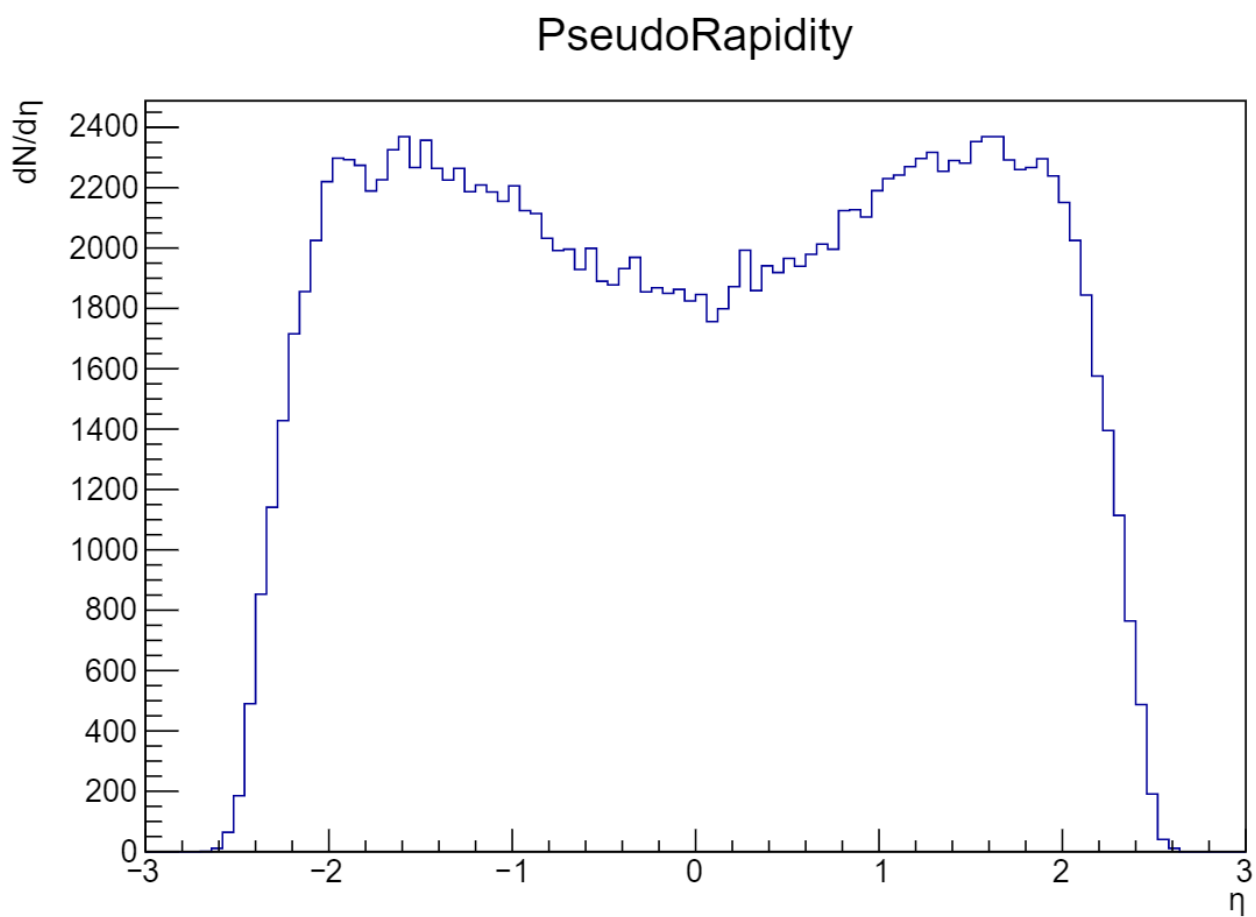


Рисунок 14 — Распределение по псевдобыстроте η для суммы двух треков.

Заключение

Малая множественность и небольшой фон ультрапериферических столкновений (особенно по сравнению с центральными столкновениями) - это хорошие условия для поиска новой физики. В следующем году планируется новый запуск, который будет обладать еще более высокими энергетическими характеристиками, что позволит расширить области изучения УРС. Для того, чтобы иметь возможность получения доступа к данным будущих экспериментов и непосредственного участия в них необходимо глубже изучить данный тип столкновений и провести более детальный анализ данных, полученных на сегодняшний день. Что касается изучения ρ -подобных резонансов необходимо более тщательно изучить результаты экспериментов, имеющихся на данный момент и провести более глубокий и тщательный собственный анализ. Для этого необходимо завершить запуск в GRID написанного макроса. После чего появится доступ к необходимым данным и возможность получить большую статистику распределений. На данный момент с запуском в GRID возникли технические трудности, которые находятся в процессе обсуждения и решения со специалистами поддержки. Этот процесс занял много времени, в связи с чем анализ был проведен недостаточно тщательно. В последствие планируется наложить ограничения на некоторые характеристики, учесть фон, что может позволить более детально изучить $\rho''(1700)$. Глобальной задачей является получение отношения поперечных сечений $\sigma(\rho'')/\sigma(\rho)$. Одним из этапов которой является получение отношения количества частиц $N(\rho'')/N(\rho)$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Baur G.* Coherent $\gamma\gamma$ and γA interactions in very peripheral collisions at relativistic ion colliders // *Physics Reports.* — 2002. — Vol. 364, no. 5. — P. 359–450. — ISSN 0370-1573. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0370-1573\(01\)00101-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0370-1573(01)00101-6).
2. *Bertulani C. A., Klein S. R., Nystrand J.* PHYSICS OF ULTRA - PERIPHERAL NUCLEAR COLLISIONS // *Annual Review of Nuclear and Particle Science.* — 2005. — Vol. 55, no. 1. — P. 271–310. — ISSN 1545-4134. — URL: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.nucl.55.090704.151526>.
3. *Klein S. R.* Ultra-peripheral collisions and hadronic structure // *Nuclear Physics A.* — 2017. — Vol. 967. — P. 249–256. — ISSN 0375-9474. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2017.05.098>.