

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физического института им. П.Н.
Лебедева Российской академии наук
доктор физ.-мат. наук



Савинов С.Ю.

«15» июня 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации
на диссертационную работу Кирякова А.А.

«ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОЧАРОВАННЫХ ЧАСТИЦ В μ A-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ 70 ГэВ/с»

представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности : 01.04.23 — «Физика высоких энергий».

Интенсивное изучение образования очарованных частиц продолжается уже несколько десятков лет – с момента их открытия. Увеличение энергии и интенсивности современных ускорителей позволяют исследовать редкие процессы, вести поиск эффектов, выходящих за пределы Стандартной Модели, открывать новые состояния ядерной материи. Большинство экспериментов с очарованными кварками выполнено на электронных пучках, где были изучены основные их свойства (массы, вероятности распадов и т.д.). В то же время эксперименты с адронными и ионными пучками дают возможность изучать механизмы образования очарования в различных средах от пороговых энергий до энергий ЛНС. Адронное образование с-кварка чувствительно к изменениям среды, и оно открывает возможность исследования таких объектов как кварк-глюонная плазма. При этом для лучшего понимания процессов адронизации тяжелых кварков очень важны измерения вблизи порога их образования.

Еще около 20 лет назад на ускорителе У-70 в ИФВЭ (Протвино) проводились измерения сечений образования очарованных частиц вблизи порога в beam-dump эксперименте с поглотителем мюонов, на пузырьковой камере СКАТ, в эксперименте на спектрометре БИС-2. Полное сечение образования чарма в области 40-70 ГэВ оказалось намного больше предсказаний моделей КХД, в то время как в экспериментах с энергией

налетающих протонов более 200 ГэВ измеренное сечение находилось в согласии с теорией.

Актуальность темы диссертации Кирякова А.А. подчеркивается тем, что результатов измерения сечений образования с-кварка при околопороговой энергии пока немного. Для получения новых и важных результатов автором была выполнена большая работа по развитию методики обработки данных. Особенностью работы является наличие данных, полученных на универсальном спектрометре (установке СВД-2), в составе которого имеется микростриповый вершинный детектор, способный регистрировать короткоживущие частицы с малой (миллиметры!) длиной пробега.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и выводов по теме диссертации. Ее объем составляет 169 страницы, включая 26 таблиц и 99 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 145 наименований.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы задачи и цели исследования, показаны научная новизна и практическая ценность, представлены выносимые на защиту научные положения. Приводятся сведения об апробации работы и публикациях, а также информация о личном вкладе автора.

В первой главе дается обзор исследований очарованных частиц, описание методов экспериментальных измерений и теоретических подходов к проблеме их адронного рождения. Представлены оценки полного сечения образования чарма, полученные в экспериментах разных поколений, в виде таблиц и графика энергетической зависимости сечений. Показано, что для сравнительных оценок можно использовать данные только экспериментов второго и третьего поколений, что обусловлено сложностью в анализе и пересчёте результатов с установок первого поколения. Подчеркивается важность измерений полного сечения образования чарма при низких энергиях.

Во второй главе диссертации приводится описание основных элементов установки СВД-2, триггера на взаимодействие и статистики эксперимента, которую автор использовал в диссертации. Подробно описан прецизионный вершинный детектор, оптимизированный для геометрии установки СВД, состоящий из 4-х дуплетов взаимно ортогональных плоскостей микростриповых детекторов (МСД) и одной наклонной плоскости МСД для обеспечения пространственной реконструкции проекций треков. Подробно описана двухуровневая система отбора событий, состоящая из триггера нулевого уровня, который реализует простейшую схему на выделение одинарной пучковой частицы, проходящей в область активной мишени, и триггера первого уровня на основе табличного метода

аппаратной обработки данных с активной мишени для выделения в ее пластинах первичного взаимодействия. Работа выполнена на статистике ~52 миллиона событий с неупругими pA-взаимодействиями.

В третьей главе диссертации приводится описание методов и алгоритмов, которые использовались при реконструкции событий. Подавляющая часть методов была разработана автором или при его участии в процессе работы над анализом экспериментальных данных. Подробно описываются методы восстановления координат пролёта частиц в кремниевых МСД. Стрипы с амплитудами сигнала от прохождения заряженной частицы, превышающие порог обрезания, объединяются в кластеры, и далее их координаты определяются двумя способами: методом центра тяжести и нелинейным методом. Автором определена граница применимости данных методов и представлен простейший критерий оценки качества МСД.

Большой раздел этой главы посвящен различным методикам юстировки детектирующих элементов, т.е. уточнению их положения в координатной системе установки. Это очень важная задача, т.к. недостаточно точные геодезические измерения размеров и положений элементов не всегда соответствуют реальности, что приводит к неопределенности в Z-координате хитов на проекциях XZ и YZ вершинного детектора. Автор использует прямые треки, полученные без магнитного поля, известное положение плоскостей активной мишени и информацию с наклонной плоскости вершинного детектора. В этой главе автор описывает методы определения координат первичного взаимодействия в активной мишени с учетом юстировки. При поиске вторичных вершин – кандидатов в распады очарованных частиц – используется разработанная Киряковым А.А. фильтрация данных. Применяется анализ распределений в пространстве параметров треков и безимпульсный аналог диаграммы Арментероса-Подольянского. Важным этапом в обработке данных эксперимента является реконструкция треков в магнитном спектрометре и определение импульса заряженных частиц. Большая методическая работа проведена автором при оптимизации методов реконструкции: табличный метод для предварительной оценки импульса и уточнение импульса с помощью фильтра Кальмана. Для расчетов эффективностей реконструкции использовалось моделирование по Монте-Карло и исследовалось влияние номинала магнитного поля на ошибку в определении импульса.

В четвёртой главе диссертации представлены результаты математического моделирования процессов pA-взаимодействий при импульсе протонов 70 ГэВ/с в установке СВД-2 для эксперимента E-184. Проведено их сравнение с экспериментальными данными, оптимизирован набор параметров событий для выделения двухчастичных распадов очарованных D^0 -мезонов и анти- D^0 -мезонов. Дана оценка эффективностей прохождения событий через этапы системы обработки данных эксперимента.

По результатам регистрации распадов очарованных D^0 -мезонов и анти- D^0 -мезонов получены оценки полного сечения рождения очарованных частиц на ядрах углерода, кремния, свинца и на нуклоне ядра.

Для оптимизации критериев отбора было выполнено моделирование с помощью программ FRITIOF 7.02 и GEANT 3.21. Для проверки правильности вычисления эффективности регистрации D^0 использовались события с распадом $K^0_S \rightarrow \pi^+\pi^-$, сечение рождения которых в неупругих рр-взаимодействиях и его A -зависимость известны. После анализа массового спектра системы $(K\pi)$ и выполнения визуальной процедуры физического просмотра событий был выделен сигнал от распада $D^0 \rightarrow K\pi$, который составил 51 событие. После модельной оценки эффективности регистрации $\epsilon(D^+) = 0.036$ была получена величина полного сечения рождения открытого чарма на нуклоне в рА-взаимодействиях при околопороговой энергии 70 ГэВ, которое составило: $\sigma(c\bar{c}) = 7.1 \pm 2.4(\text{стат.}) \pm 1.4(\text{сист.})$ мкбн/нуклон. Оценка полных инклюзивных сечений образования нейтральных очарованных мезонов составила: $\sigma(D^0) = 2.5 \pm 0.8(\text{стат.}) \pm 0.5(\text{сист.})$ мкбн/нуклон, $\sigma(\bar{D}^0) = 4.6 \pm 1.6(\text{стат.}) \pm 0.9(\text{сист.})$ мкбн/нуклон. Полученная оценка времени жизни D^0 -мезона совпадает с известными в литературе значениями в пределах ошибки. Измеренный параметр A -зависимости сечения рождения чарма $\alpha=1$.

В пятой главе диссертации приведены результаты обработки данных по выделению событий с распадами $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ и $D^- \rightarrow K^+\pi^-\pi^-$ в рА-взаимодействиях при энергии 70 ГэВ. Дана оценка сечения образования заряженных очарованных мезонов и их выходов, исследованы некоторые свойства D^\pm -мезонов. Оптимизация критериев отбора событий нужного класса была выполнена автором по результатам моделирования. Для этого использовались: выделение событий по кинематике, исключение фоновых событий с наличием распада K^0_S -мезона, обрезание по длине пробега вторичной частицы. Из анализа массовых спектров было выделено 15.4 ± 5.6 событий с D^+ и 15.3 ± 4.7 событий с D^- . Эффективности регистрации, полученные из моделирования, составили: $\epsilon(D^+) = 0.014$, $\epsilon(D^-) = 0.008$. Измеренные значения времени жизни заряженных D -мезонов составили: $\tau(D^+) = 291 \pm 75$ мкм, $\tau(D^-) = 341 \pm 88$ мкм. В пределах ошибок они совпадают со значениями, представленными в PDG ($\tau(D^\pm) = 311.8$ мкм). Приводятся вычисления сечений образования D^\pm -мезонов: $\sigma(D^+) = 1.2 \pm 0.4(\text{стат.}) \pm 0.2(\text{сист.})$ мкбн/нуклон, $\sigma(D^-) = 1.9 \pm 0.6(\text{стат.}) \pm 0.4(\text{сист.})$ мкбн/нуклон. Обсуждаются относительные выходы нейтральных и заряженных D -мезонов в сравнении с теоретическими моделями и результатами других экспериментов. Обнаружено, что вклады заряженных и нейтральных D -мезонов в полное сечение образования открытого чарма в рА-взаимодействиях меняются с изменением энергии взаимодействия. Так,

вклады D^0 и D^+ проявляют тенденцию к снижению с уменьшением энергии взаимодействия, а вклады \bar{D}^0 и D^- растут.

В шестой главе диссертации приводятся результаты исследования образования очарованных Λ_c^+ -барионов в pA-взаимодействиях при импульсе пучка протонов 70 ГэВ/с в трех ядерных мишенях (углерод, кремний и свинец). Автором был выполнен поиск событий с распадом $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ по схеме, описанной в главе 5. Оценка сигнала в финальном спектре эффективных масс системы ($pK^-\pi^+$) составила 21.6 ± 6 событий. Эффективность регистрации Λ_c^+ , полученная из моделирования, составила: $\epsilon(\Lambda_c^+) = 0.011$. Приводится оценка сечения образования Λ_c^+ -барионов, которое составило: $\sigma(\Lambda_c^+) = 4.0 \pm 1.6$ мкбн/нуклон. Измеренное время жизни очарованного бариона составило $\tau(\Lambda_c^+) = 65 \pm 55$ мкс. Нужно отметить, что в этой области энергий существует очень немного измерений сечения образования Λ_c^+ , и много трудностей возникает при регистрации бариона из-за малой пролетной длины (~ 0.5 мм). В этой главе автором обсуждаются относительные выходы нейтральных и заряженных D-мезонов и Λ_c^+ -барионов в сравнении с теоретическими моделями и результатами других экспериментов. Экспериментальные данные и теоретические предсказания в рамках статистической модели адронизации позволяют говорить об увеличении выхода Λ_c^+ -барионов в околопороговой области энергий и, из-за увеличения выхода в этой области энергий D-мезонов, указывают на их преимущественно парное рождение у порога рождения очарованных частиц.

В заключении диссертации автор представляет основные результаты проделанной работы и выводы, которые обосновывают актуальность и новизну исследований.

В диссертации получены следующие новые результаты, выносимые на защиту:

1. Получена экспериментальная оценка сечений инклюзивного образования очарованных частиц на нуклоне (в ед. мкбн/нуклон):

$$\sigma(D^0) = 2.5 \pm 0.8 \pm 0.5,$$

$$\sigma(\bar{D}^0) = 4.6 \pm 1.6 \pm 0.9,$$

$$\sigma(D^+) = 1.2 \pm 0.4 \pm 0.2,$$

$$\sigma(D^-) = 1.9 \pm 0.6 \pm 0.4,$$

$$\sigma(\Lambda_c^+) = 4.0 \pm 1.6$$

при энергии $\sqrt{s} = 11.5$ ГэВ в pA-взаимодействиях по трём мишеням (углерод, кремний, свинец) для всей кинематической области x_F .

2. Оценка полного сечения образования очарованных частиц на нуклоне, полученная по сумме вкладов основных парциальных сечений, приведённых в п.1 для энергии $\sqrt{s} = 11.5$ ГэВ, составляет

$$\sigma(c\bar{c}) = 7.1 \pm 2.4 \pm 1.4 \text{ мкбн/нуклон.}$$

Вклад сечения рождения других частиц в полное сечение $\sigma(c\bar{c})$ не превышает 10%.

3. Относительные выходы очарованных частиц при рождении на нуклоне равны

$$\sigma(D^0)/\sigma(c\bar{c}) = 0.35 \pm 0.16$$

$$\sigma(\bar{D}^0)/\sigma(c\bar{c}) = 0.65 \pm 0.31$$

$$\sigma(D^+)/\sigma(c\bar{c}) = 0.16 \pm 0.07.$$

$$\sigma(D^-)/\sigma(c\bar{c}) = 0.27 \pm 0.17$$

$$\sigma(\Lambda_c^+)/\sigma(c\bar{c}) = 0.56 \pm 0.27$$

Экспериментальные данные и теоретические предсказания (в рамках статистической модели адронизации) позволяют говорить об увеличении выхода Λ_c^+ -барионов в околопороговой области энергий и, из-за увеличения выхода \bar{D}^0 -мезонов, указывают на их преимущественно парное рождение. Вклады заряженных и нейтральных D-мезонов в полное сечение образования открытого чарма в pA-взаимодействиях меняются с изменением энергии взаимодействия. Вклады D^0 - и D^+ -мезонов проявляют тенденцию к снижению с уменьшением энергии взаимодействия, а вклады \bar{D}^0 - и D^- -мезонов растут.

4. Создана система анализа экспериментальных данных с установки СВД-2, которая позволяет работать с монте-карловскими данными (выходными файлами GEANT) и данными, полученными в эксперименте, тем самым обеспечивая унификацию методов анализа, а также с файлами «первичного» анализа данных. Графический пакет системы анализа позволяет осуществлять визуализацию событий. Он используется для отработки методик анализа. Встроенный «диспетчер» гистограмм позволяет проводить контроль любых распределений, получаемых в процессе обработки данных. Система анализа реализована на языке СИ++ с использованием библиотек системы ROOT. Вся система анализа создана автором диссертации, как и разработка подавляющего большинства методов анализа в ней реализованных.
5. Разработан метод первичного прецизионного выравнивания установки, который позволяет на основании простых геометрических принципов осуществлять предварительную оценку положения однокоординатных детектирующих элементов экспериментальной установки и устранить неточности начальной геодезии их проекций, которые связаны с многокомпонентностью конструкций.
6. Разработан метод модифицированного критерия Армантероса-Подольянского, позволяющий проводить быструю фильтрацию событий с распадами V^0 -частиц (отсев ложных вторичных вершин). Для работы

Вклад сечения рождения других частиц в полное сечение $\sigma(c\bar{c})$ не превышает 10%.

3. Относительные выходы очарованных частиц при рождении на нуклоне равны

$$\sigma(D^0)/\sigma(c\bar{c}) = 0.35 \pm 0.16$$

$$\sigma(\bar{D}^0)/\sigma(c\bar{c}) = 0.65 \pm 0.31$$

$$\sigma(D^+)/\sigma(c\bar{c}) = 0.16 \pm 0.07.$$

$$\sigma(D^-)/\sigma(c\bar{c}) = 0.27 \pm 0.17$$

$$\sigma(\Lambda_c^+)/\sigma(c\bar{c}) = 0.56 \pm 0.27$$

Экспериментальные данные и теоретические предсказания (в рамках статистической модели адронизации) позволяют говорить об увеличении выхода Λ_c^+ -барионов в околопороговой области энергий и, из-за увеличения выхода \bar{D}^0 -мезонов, указывают на их преимущественно парное рождение. Вклады заряженных и нейтральных D-мезонов в полное сечение образования открытого чарма в pA-взаимодействиях меняются с изменением энергии взаимодействия. Вклады D^0 - и D^+ -мезонов проявляют тенденцию к снижению с уменьшением энергии взаимодействия, а вклады \bar{D}^0 - и D^- -мезонов растут.

4. Создана система анализа экспериментальных данных с установки СВД-2, которая позволяет работать с монте-карловскими данными (выходными файлами GEANT) и данными, полученными в эксперименте, тем самым обеспечивая унификацию методов анализа, а также с файлами «первичного» анализа данных. Графический пакет системы анализа позволяет осуществлять визуализацию событий. Он используется для отработки методик анализа. Встроенный «диспетчер» гистограмм позволяет проводить контроль любых распределений, получаемых в процессе обработки данных. Система анализа реализована на языке СИ++ с использованием библиотек системы ROOT. Вся система анализа создана автором диссертации, как и разработка подавляющего большинства методов анализа в ней реализованных.
5. Разработан метод первичного прецизионного выравнивания установки, который позволяет на основании простых геометрических принципов осуществлять предварительную оценку положения однокоординатных детектирующих элементов экспериментальной установки и устранить неточности начальной геодезии их проекций, которые связаны с многокомпонентностью конструкций.
6. Разработан метод модифицированного критерия Армантероса-Подольянского, позволяющий проводить быструю фильтрацию событий с распадами V^0 -частиц (отсев ложных вторичных вершин). Для работы

метода достаточно знания о топологии события в вершинном детекторе, даже без учета первоначального знания о пространственном соответствии проекционных треков «дочерних» продуктов распада, которое может быть восстановлено из принципа компланарности векторов. Метод позволяет производить сепарацию V^0 -частиц, если их кинематические области хорошо разделимы на диаграмме Армантероса-Подольянского по параметру α , характеризующему асимметрию между продольными импульсами положительно и отрицательно заряженных частиц распада.

Новизна и значимость диссертационной работы Кирякова А.А. не вызывает сомнения. Ее основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы. Научно-практическая ценность полученных результатов на фоне немногочисленных экспериментальных данных по рождению чарма в околопороговой области энергий неоспорима. Автором выполнена большая методическая работа по обработке экспериментальных данных в физике высоких энергий, и его опыт, несомненно, пригодится другим исследователям.

Диссертация отражает большой объем проделанной автором работы. В ней подробно описаны технические особенности эксперимента, этапы обработки данных и получения результатов. Уровень диссертации в целом весьма высокий, но все-таки к ее тексту можно сделать небольшие замечания:

1. В тексте присутствует несколько избыточное количество англицизмов. Термин элайнмент, возможно, имело бы смысл заменить более распространенным в русскоязычной литературе термином юстировка. Также не всегда необходимы англицизмы бим дамп, плот, бренчинг и некоторые другие. Не всегда однородно представлены единицы измерения; например, ГэВ зачастую представлен в английской транскрипции.
2. В работе приведено сравнение полученных экспериментальных данных с монте-карловским генератором рА-столкновений FRITIOF. Возможно, для контроля автору следовало бы подумать над выполнением аналогичных моделирований и с другими существующими генераторами (Angantyr, HIJING).

Сделанные небольшие замечания несколько не умаляют качество диссертационной работы Кирякова Андрея Алексеевича. Она является законченным исследованием, выполнена на высоком уровне и свидетельствует о высокой квалификации автора. Защищаемые положения и выводы являются полностью обоснованными. Они отличаются новизной и

научной значимостью, опубликованы в ведущих журналах, доложены на целом ряде международных конференций и семинаров.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а ее автор, Киряков Андрей Алексеевич безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 — «Физика высоких энергий».

Настоящий отзыв на диссертацию рассмотрен и одобрен на расширенном семинаре Лаборатории фундаментальных свойств материи Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН.

Отзыв составил научный сотрудник Лаборатории фундаментальных свойств материи Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН

к.ф.-м.н.



Киракосян М.Р.

Руководитель Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН

д.ф.-м.н.



Далькаров О.Д.

Сведения о ведущей организации:

Полное название – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Сокращенное название – ФИАН

Адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН

Телефон: +7-499-135-42-64

Факс: +7-499-135-78-80

e-mail: postmaster@lebedev.ru

web-сайт: <http://www.lebedev.ru>

Список некоторых работ сотрудников ФИАН по теме диссертации:

1. CMS Collaboration (... V. Andreev, M. Azarkin, M. Kirakosyan et al.). Observation of prompt J/ψ meson elliptic flow in high-multiplicity pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV. Phys. Lett. B791 (2019) 172-194.
2. CMS Collaboration (... V. Andreev, M. Azarkin, M. Kirakosyan et al.). Measurement of B_s^0 meson production in pp and PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Phys.Lett. B796 (2019) 168-190
3. CMS Collaboration (... V. Andreev, M. Azarkin, M. Kirakosyan et al.). Jet properties in PbPb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. JHEP 1805 (2018) 006.
4. CMS Collaboration (... V. Andreev, M. Azarkin, M. Kirakosyan et al.). Nuclear modification factor of D^0 mesons in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Phys.Lett. B782 (2018) 474-496.
5. CMS Collaboration (... V. Andreev, M. Azarkin, M. Kirakosyan et al.). Measurements of the charm jet cross section and nuclear modification factor in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Phys.Lett. B772 (2017) 306-329.
6. ATLAS Collaboration (M. Aaboud, ... A. Shmeleva, ... V. Tikhomirov et al.). Prompt and non-prompt J/ψ elliptic flow in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector. Eur.Phys.J. C78 (2018) 784.
7. ATLAS Collaboration (M. Aaboud, ... A. Shmeleva, ... V. Tikhomirov et al.). Measurement of the prompt J/ψ pair production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector. Eur.Phys.J. C77 (2017) 76.