

Отзыв научного руководителя

на диссертацию КИРЯКОВА Андрея Алексеевича

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

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 - физика высоких энергий

Существование четвёртого кварка (получившего название - очарованного) было предсказано теоретически исходя из симметрии кварков и лептонов с целью объяснения наблюдавшегося экспериментально подавления слабых нейтральных токов, меняющих странность. Это предсказание было подтверждено в конце 1974 года открытием JAF и др. частиц, которые интерпретировались как мезоны со скрытым очарованием, т.е. состоящие из очарованного кварка и очарованного антикварка. Эти открытия положили начало интенсивному исследованию рождения очарованных частиц. Первая частица с новым квантовым числом «очарование», D-мезон, была открыта в 1976 году в e^+e^- - аннигиляции. К настоящему времени имеется большая информация о свойствах очарованных адронов (время жизни, массы, моды распада) и получены оценки сечения их рождения в e^+e^- - аннигиляции, в лептон-адронных, в фотон-адронных и адрон - адронных взаимодействиях. Первые прямые доказательства образования частиц с открытым очарованием (барионов и мезонов) были получены на коллайдере ISR (ЦЕРН) при энергии взаимодействия частиц в системе центра масс 50-60 ГэВ. Полученные полные сечения рождения частиц с открытым очарованием были большими 100÷500 мкб и во многом модельнозависимыми. При более низких энергиях $\sqrt{s} \sim 20-30$ ГэВ были получены существенно меньшие значения полного сечения образования частиц с открытым очарованием в столкновениях адронов на ускорителях ЦЕРН, ФНАЛ. В области энергий, доступных для проведения экспериментов по исследованию рождения частиц с открытым очарованием, на ускорителе ИФВЭ ($\sqrt{s} \sim 10$ ГэВ) до настоящего времени экспериментальных измерений полного сечения образования частиц с открытым очарованием выполнено немного. Это: эксперимент с использованием узкоапертурного спектрометра БИС-2 и пучка нейтронов со средней энергией 43 ГэВ; эксперимент по измерению выхода прямых e^\pm , образовавшихся в $p\bar{p}$ - взаимодействиях при импульсе протонов 70ГэВ/с, beam-dump эксперимент при импульсе протона 70ГэВ/с и измерение выхода мюонов; эксперимент с быстроциклирующей пузырьковой камерой и водородной мишенью. Оценки полных сечений образования частиц с

открытым очарованием, полученные в этих экспериментах, являются модельнозависимыми и в большинстве экспериментов значительно превышают предсказания моделей КХД.

Диссертация Кирякова Андрея Алексеевича посвящена актуальной теме исследованию образования частиц с открытым очарованием в околопороговой области энергии их рождения в протон - ядерных взаимодействиях в эксперименте на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ - НИЦ «Курчатовский институт».

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

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель работы и задачи исследований, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность результатов.

Актуальность темы диссертационной работы, прежде всего, состоит в том, что на сегодняшний день имеется большое количество экспериментальных данных по рождению очарованных частиц в адронных взаимодействиях, но все они, в основном, получены при энергиях пучков свыше 200 ГэВ и хорошо согласуются с результатами, получаемыми в различных теоретических моделях. Ситуация в околопороговой области энергий рождения очарованных частиц кардинально иная, как по количеству экспериментальных данных, так и по предсказаниям различных моделей о сечении образования очарованных частиц (различаются в десятки раз). Результаты экспериментов носят часто противоречивый характер. Это объясняется тяжёлыми экспериментальными условиями: малое сечение образования (типичное значение - одна пара очарованных частиц на тысячу взаимодействий); большое число частиц в событиях с их образованием (средняя множественность заряженных частиц в событии ~ 6); малое время жизни очарованных частиц; относительно небольшая вероятность распада очарованных частиц по регистрируемым каналам. Кроме того, многие эксперименты измеряли сечение только для малой области фазового пространства, часто при больших значениях переменной Фейнмана. В этом случае, полное сечение вычисляется экстраполяцией данных и является сильно модельно зависимой величиной.

Практическая ценность работы состоит в том, что полученные результаты относятся к мало изученной области образования очарованных частиц ($\sqrt{s} < 20$ ГэВ). Все теоретические модели дают значительный разброс в предсказаниях сечения образования частиц с открытым очарованием и относительных

выходов очарованных частиц для данной области энергий. Проблема неоднозначности теоретических предсказаний для околопороговой области энергий рождения очарованных частиц существует уже не один десяток лет со времён установок первого поколения («beam-dump» эксперименты). Но, если данные «beam-dump» экспериментов можно было бы полностью игнорировать в связи с их крайней противоречивостью, большой неточностью в оценке сечений и невозможностью выделения мод распада, то на установках следующих поколений (БИС-2, СВД-2) получен уже более качественный результат, который может быть использован в дальнейших разработках теоретических моделей, а также при планировании экспериментов для исследования очарованных частиц при низких энергиях (например, CBM GSI, MPD NICA).

В работе приводится описание методов и алгоритмов, которые использовались при обработке данных эксперимента SERP-T-184, проведённого на установке СВД-2. Подавляющая часть методов была разработана автором либо при его участии в процессе работы над анализом экспериментальных данных. Все методы основаны на достаточно простых математических принципах, что расширяет возможность их дальнейшего применения.

В первой главе диссертации приведён обзор теоретической и экспериментальной ситуации в изучении образования очарованных частиц в адронных взаимодействиях.

Вторая глава содержит краткое описание основных элементов установки СВД-2 розданной Сотрудничеством трёх институтов: НИИЯФ МГУ - ГНЦ ИФВЭ - ОИЯИ, триггера на взаимодействие и статистики эксперимента. Представлена общая структурная схема установки и дано описание её элементов, информация с которых использовалась в данной работе: кремниевые микростриповые детекторы; широкоапертурный магнитный спектрометр; реализации триггера на взаимодействие с использованием активной мишени; статистика эксперимента и раскладка событий по материалам мишени. Следует отметить, что существенный прогресс в исследовании очарованных частиц на выведенном протонном пучке ускорителя У-70 (ГНЦ ИФВЭ) достигнут, благодаря развитию техники прецизионных вершинных детекторов, освоенной и развитой Сотрудничеством НИИЯФ МГУ и ГНЦ ИФВЭ, основанной на электронной методике с использованием полупроводниковых микростриповых детекторов. Кроме того, в состав прецизионного вершинного детектора включена активная полупроводниковая мишень с материалами различного атомного номера.

Третья глава посвящена описанию методов и алгоритмов, которые использовались при обработке, набранной статистики. Подавляющая часть методов была разработана диссертантом в процессе работы над анализом экспериментальных данных. Приводится краткая последовательность процедур, которая используется в созданной системе обработки данных эксперимента. Подробно описываются методы восстановления координат пролёта заряженных частиц в кремниевых микростриповых детекторах, которые оптимизируются для обработки данных проведённого эксперимента. Один из разделов этой главы посвящен различным методикам элайнмента детектирующих элементов установки. В разделе описываются два используемых метода элайнмента: Первый метод разрабатывался для вершинного детектора и в своей базовой идеологии похож на метод «Постоянных коэффициентов». Так как вершинный детектор является основным детектором установки для восстановления «первичных» и «вторичных» вершин, то его элайнменту уделено особое внимание. Второй метод реализует метод элайнмента по одиночным трекам для пропорциональных камер спектрометра. Выборка данных подготавливается на основании, выполненного элайнмента вершинного детектора. В этой главе также представлено несколько алгоритмов восстановления «первичной» и «вторичных» вершин в событии, а так же методы и критерии быстрой фильтрации событий (выделение событий нужного класса). Вводится понятие «пространства параметров треков $\{a,b\}$ », основная задача которого упростить представление и восприятие информации о событии (в части касающейся вершин). На основании данного представления разработаны: алгоритм поиска вершин по пространственно восстановленным трекам и его аналог для быстрой фильтрации событий на наличие «вторичных» вершин - поиск вершин по проекциям треков. В Приложении П.1 приведены кинематические критерии на выделение событий с распадом V^0 - частиц, а также разработанный автором метод фильтрации на базе критерия Армантероса-Подольянского. Последний раздел главы посвящен описанию используемого в работе предварительного метода реконструкции треков в спектрометре. Метод позволяет производить оценку импульса с учётом заряда частицы и осуществляет подбор хитов в трек, что создает некоторую переопределенность выборки исходных параметров для основного метода, базирующегося на фильтре Кальмана. При описании метода затронуты вопросы, касающиеся планирования эксперимента в части выбора номинала магнитного поля и его влияния на точность восстановления импульса и эффективную апертуру магнитного спектрометра.

В четвёртой главе представлены результаты математического моделирования процессов рА-взаимодействий при импульсе протона 70 ГэВ/с в установке СВ Д-2 для эксперимента Е-184, полученные с помощью

программам FRITIOF7.02 и GEANT3.21. Проведено их сравнение с экспериментальными данными, оптимизирован набор параметров событий для выделения двухчастичных распадов очарованных D^0 -мезонов. Дана оценка эффективностей прохождения событий через этапы системы обработки данных эксперимента. По результатам регистрации распадов очарованных D^0 мезонов впервые получены оценки сечения рождения очарованных частиц на ядрах углерода, кремния, свинца и нуклоне ядра, рассчитанные двумя способами, и проведено сравнение полученного результата с теоретическими моделями и данными других экспериментов. В протон-ядерных столкновениях исследуется поведение параметра A -зависимости α от кинематических переменных. Несмотря на небольшую статистику сигнала и, вследствие этого, большие ошибки, была предпринята попытка посмотреть зависимость α от p_{t2} и x_F . Экспериментальные данные указывают на уменьшение параметра α с ростом p_{t2} и с увеличением x_F . Измеренные дифференциальные распределения по p_{t2} и x_F для очарованных D^0 -мезонов сравниваются с данными других экспериментов.

В пятой и шестой главах диссертации приведены результаты обработки данных эксперимента по выделению событий с распадами $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ и $D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-$ и очарованных Λ_c^+ -барионов. Дана оценка сечения образования заряженных очарованных мезонов и барионов и их относительных выходов, измерены некоторые свойства частиц. Представлена последовательность критериев отбора событий нужного класса, которая выполняется на первом этапе анализа данных (на этапе подготовки DST). Представленные критерии (их идеология), во многом схожи с критериями, использовавшимися при выделении событий с D^0 -мезонами, так как основная концепция этого этапа не изменилась - выделение событий с наличием вторичной вершины. Используя Монте Карло моделирование для образования и распада D^\pm -мезонов и Λ_c^+ -барионов в эксперименте автором диссертации были разработаны критерии отбора нужного класса событий с минимально возможным фоном с использованием контурных диаграмм Далитца для распада трёхчастичных систем. В результате были получены полные инклюзивные сечения образования D^\pm -мезонов и Λ_c^+ -барионов на нуклоне ядра. Обсуждаются относительные выходы нейтральных и заряженных D -мезонов и Λ_c^+ -барионов, в сравнении с теоретическими моделями и результатами других экспериментов. Обнаружено, что вклады заряженных и нейтральных D -мезонов и Λ_c^+ -барионов в полное сечение образования открытого чарма в pA -взаимодействиях, меняются с изменением энергии взаимодействия. Так, вклады D^0 - и D^+ -мезонов проявляют тенденцию к снижению с уменьшением энергии взаимодействия, а вклады \bar{D}^0 - и D^- -мезонов и Λ_c^+ -барионов растут.

В Заключении приведены основные физические результаты, полученные при обработке данных эксперимента по исследованию образования очарованных частиц в рА - взаимодействиях при импульсе пучка протонов 70 ГэВ/с. Отмечается, что оценка полного сечения образования открытого чарма на нуклоне, полученная, используя измерения вклада нейтральных D-мезонов в эту величину из другого эксперимента (HERA-B), хорошо согласуется с суммой вкладов основных компонентов в эту величину из представленной диссертационной работы. Как видно из результатов эксперимента вклады очарованных частиц в полное сечение их рождения меняются с энергией реакций. Большая разница в выходах очарованных частиц и античастиц впервые наблюдалась в нейтрон-ядерных взаимодействиях при средней энергии пучка нейтронов 43 ГэВ в эксперименте БИС-2. Были зарегистрированы распады античастиц (\bar{D}^0 и D^- -мезонов), но не были обнаружены распады частиц (D^0 - и D^+ -мезонов). Сечения рождения частиц оказались ниже порога чувствительности этого эксперимента. Такое поведение вкладов D-мезонов находит свое объяснение в возможном влиянии ядерной материи на образование этих частиц. В настоящее время имеется несколько теоретических работ, в которых рассматриваются различные механизмы влияния ядерной материи на изменение выходов частиц с энергией. Полученные результаты по выходам D-мезонов совместимы с предсказаниями модели статистической адронизации. Выход Λ_c^+ -барионов растёт вместе с выходами \bar{D}^0 и D^- -мезонов с уменьшением энергии реакции. Это указывает на рост сечения рождения пар $\Lambda_c^+ D^-$ и $\Lambda_c^+ \bar{D}^0$ около порога рождения очарованных частиц. Сечение парного рождения этих частиц оценивалось по моделям кварк-глюонных струн. Оно оказалось, примерно, в 10 раз больше предсказаний КХД моделей и близким к измеренным в экспериментах СВД-2 и БИС-2 сечениям. Наблюдаемая в эксперименте А-зависимость (α -параметр) инклюзивного сечения рождения $D^0 + \bar{D}^0$ -мезонов, как функция кинематических переменных, отличается от наблюдаемого поведения при высоких энергиях.

Актуальность и новизна полученных результатов не вызывает сомнения. Результаты опубликованы, автореферат полностью отражает содержание диссертации. Следует особо отметить научно-практическую значимость данной работы. Полученные результаты, несомненно, могут быть использованы при разработке теоретических моделей и планировании новых экспериментов для исследования очарованных частиц при низких энергиях (например, CBM GSI, MPD NICA).

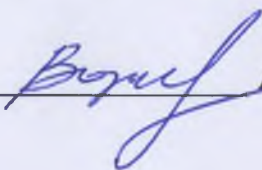
Диссертация не содержит серьёзных смысловых погрешностей, написана ясно, хорошим языком и достаточно полно отражает содержание проделанной работы.

Диссертация удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, и ее автор, Киряков Андрей Алексеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 - физика высоких энергий.

Научный руководитель,

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ

«02» 03 _____ 2020г.

 А.П. Воробьев

Подпись А.П. Воробьева удостоверяю

Учёный секретарь

НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ



Н.Н. Прокопенко