

**На правах рукописи**

**Киряков Андрей Алексеевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ  
ОЧАРОВАННЫХ ЧАСТИЦ В pA - ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ 70  
ГэВ/c**

**01.04.23 – физика высоких энергий**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук.

Протвино – 2019

УДК 539.1.07

Работа выполнена в НИЦ «Курчатовский институт» - Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова (г. Протвино).

Научный руководитель (консультант) доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» - Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова, Воробьев А.П..

Официальные оппоненты:

Бережной А.В., доктор физ.-мат. наук, НИИЯФ МГУ, заведующий лабораторией тяжёлых кварков и редких распадов;

Кузнецов О.М., доктор физ.-мат. наук, Объединённый институт ядерных исследований, ведущий научный сотрудник Научно-экспериментального отдела спиновой структуры адронов и редких процессов.

Ведущая организация ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) г. Москва.

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при НИЦ «Курчатовский институт» - Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова по адресу: 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, дом 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте

<http://ihep.ru/pages/main/6582/6745/index.shtml>

НИЦ «Курчатовский институт» - Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю. Г. Рябов

## **Общая характеристика работы**

В диссертации обобщены результаты экспериментальных исследований образования очарованных частиц в околопороговой области энергий их рождения [1 - 5], выполненных на установке СВД-2, описана экспериментальная установка и, разработанная для этого эксперимента, методика обработки экспериментальных данных. Для проведения исследований использовалась статистика, полученная в рА-взаимодействиях при импульсе протонного пучка 70 ГэВ/с ( $\sqrt{s} = 11.5$  ГэВ) на трёх мишенях: С (углерод), Si (кремний) и Pb (свинец). Исследовались инклюзивные реакции образования очарованных частиц, распадающихся по каналам:  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ ,  $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ ,  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ ,  $D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-$ ,  $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$ . Оценка полного сечения образования очарованных частиц выполнялась по распадам нейтральных D-мезонов и по суммарному сечению рождения очарованных частиц в инклюзивных реакциях. Представлена оценка относительных выходов очарованных частиц в околопороговой области энергий их рождения. В диссертации уделено значительное внимание методическим вопросам обработки данных эксперимента.

### **Актуальность работы.**

На сегодняшний момент имеется большое количество экспериментальных данных по рождению очарованных частиц в адронных взаимодействиях, но все они, в основном, получены при энергиях пучков выше 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).

В последнее время появились теоретические предсказания, в рамках статистической модели адронизации (см. ссылки в [3 - 5]), о значительном изменении относительных выходов очарованных частиц в околопороговой области энергий. Представленные в диссертации результаты хорошо согласуются с этими предсказаниями и во многом дополняют результат полученный Сотрудничеством БИС-2.

### **Практическая ценность работы.**

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 неадекватности 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 сейчас полностью игнорировать в связи с их крайней противоречивостью, большой неточностью в оценке сечений и невозможностью выделения мод распада, то с установок следующих поколений получен уже более качественный результат, который может быть использован в дальнейших разработках теоретических моделей, а также при планировании экспериментов для исследования очарованных частиц при более низких энергиях (например, CBM GSI, MPD NICA).

В работе представлены некоторые методики анализа данных, разработанные автором в процессе работы над данным экспериментом. Все методы основаны на простых принципах и не требуют глубоких познаний в математическом анализе, что расширяет возможность их дальнейшего применения.

**Целью диссертационной работы является:**

- измерение сечений образования очарованных частиц в  $pA$  – взаимодействиях при импульсе пучка протонов  $70 \text{ ГэВ/с}$  на трёх мишенях:  $C$  (углерод),  $Si$  (кремний) и  $Pb$  (свинец);
- экспериментальная оценка полного сечения образования очарованных частиц на нуклоне ядра;
- экспериментальная оценка относительных выходов разного типа очарованных частиц в  $pA$ - взаимодействиях при  $70 \text{ ГэВ/с}$  (в околопороговой области энергий их рождения).

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать основные требования к детекторам установки и системе обработки данных эксперимента.
2. Разработать методику обработки данных, необходимую для выделения частиц с «открытым» очарованием в инклюзивных реакциях их рождения на трёх мишенях в эксперименте на установке СВД-2.
3. Разработать ряд алгоритмов необходимых для выделения частиц с «открытым» очарованием в эксперименте.
4. Разработать программное обеспечение для обработки данных эксперимента.

## Научная новизна работы.

Полученные результаты, по сечениям образования очарованных частиц в околопороговой области энергий, дополняют скудную базу экспериментальных данных по данной теме. Проведённая оценка относительных выходов очарованных частиц свидетельствует о том, что в околопороговой области энергий выходы  $\bar{D}^0$ - и  $D^-$ -мезонов значительно преобладают над выходами  $D^0$ - и  $D^+$ -мезонов. В тоже время огромный относительный выход  $\Lambda_c^+$ -барионов, сравнимый с выходом  $\bar{D}^0$ -мезонов, указывает на их преимущественно парное рождение в околопороговой области. Измеренное полное сечение рождения «открытого» чарма на нуклоне при энергии  $\sqrt{s}=11.5$  ГэВ значительно выше предсказаний QCD моделей. Относительный выход очарованных частиц в околопороговой области имеет энергетическую зависимость.

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Измерения сечений инклюзивного образования очарованных частиц:  $D^0, \bar{D}^0, D^\pm, \Lambda_c^+$  при энергии  $\sqrt{s}=11.5$  ГэВ в рА – взаимодействиях на трёх мишенях: С (углерод), Si (кремний) и Pb (свинец).
2. Экспериментальную оценку полного сечения образования очарованных частиц на нуклоне ядра.
3. Оценку относительных выходов очарованных частиц:  $D^0, \bar{D}^0, D^\pm, \Lambda_c^+$  при энергии  $\sqrt{s}=11.5$  ГэВ.
4. Методику обработки данных, используемую в эксперименте на установке СВД-2, для выделения частиц с «открытым» очарованием в инклюзивных реакциях их рождения на трёх мишенях.
5. Разработанный автором метод предварительного элаймента, как простой метод предварительной оценки положения детектирующих

элементов экспериментальной установки и устранения «разбега проекций».

6. Разработанный автором без импульсный критерий Армантероса-Подольского, как простой метод выделения и сепарации событий с распадом  $V^0$  - частиц.

#### **Апробация работы и публикации.**

Основные материалы, изложенные в диссертации, были опубликованы в шести печатных работах [1 - 6]. Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на следующих конференциях:

1. P.Ermolov, A. Kiriakov, A. Kubarovsky, V. Nikitin, V. Popov, I. Rufanov, L. Tikhonova, V.Volkov, A. Vorobiev, The status and physics program of the Spectrometer with Vertex Detector, The Sixth International Workshop “Very High Multiplicity Physics”, Dubna, Russia, 16-17April, 2005.
2. А.А. Кирыков (Сотрудничество СВД-2), «Измерение сечения образования очарованных барионов в pA-взаимодействиях при 70 ГэВ/с», Международный семинар, посвящённый 90-летию со дня рождения проф. Лихачёва Михаила Фёдоровича, 25 ноября 2013г. <http://lhe.jinr.ru/Likhachev-90.shtml>
3. E.S. Kokoulina, E. Ardashev, A.G. Afonin, V. Balandin, G. Bogdanova, M. Bogolyubsky, O.P. Gavrishchuk, S. Golovnia, S. Gorokhov, V. Golovkin, D. Karmanov, A. Kiryakov, V. Kramarenko, A. Leopold, Y. Petukhov, A. Pleskach, V. Popov, V. Riadovikov, V. Ronjin, I. Rufanov, Y. Tsyupa, V. Volkov, A. Vorobiev, A. Voronin, A. Yukaev, V. Zapolsky, E. Zverev, “Charm production nearby threshold in pA-interactions at 70 GeV”, 38-th International Conference on High Energy Physics

(ICHEP2016), (Chicago, USA, 3-10 August 2016),  
<http://pos.sissa.it/282/720>, [arXiv:1703.05639](https://arxiv.org/abs/1703.05639).

Дополнительно, результаты, изложенные в данной диссертации, также докладывались сотрудниками коллаборации СВД-2 на следующих международных конференциях и семинарах:

1. Доклад на научной сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (ИТЭФ, 23 ноября 2009г.).
2. Доклад на Международной конференции XXXIX International Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD-2009) (г. Гомель, Белоруссия, с 03.09.09 по 11.09.09).
3. Доклад на Международной конференции CHARM-2013 (Манчестер, Англия, октябрь 2013г.).
4. Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН (г. Протвино, Россия, 5-8 ноября 2013г.).
5. Международный семинар, посвящённый 90-летию со дня рождения проф. Лихачёва Михаила Фёдоровича, (г. Дубна, Россия, 25 ноября 2013г.), <http://lhe.jinr.ru/Likhachev-90.shtml>
6. Доклад на Международной сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий", (г. Москва, МИФИ, 17-21 ноября 2014 г.).
7. Доклад на Международной конференции QUARKS-2016 (г. Пушкин, Россия, май 29 – июнь 4, 2016г.), DOI: 10.1051/epjconf/201612502016

### **Личный вклад автора.**

Автором были выполнены следующие работы:



- В GEANT3.21 (МК): полная переработка описания установки СВД-2 с внесением пассивных конструкций; имитация отклика детектирующих элементов согласно физическим принципам их работы и шумовым характеристикам электроники считывания; идеология подключения входных файлов генерации (FRITIOF) и формата выходных файлов МК; учёт влияния триггера первого уровня установки.
- «Распутывание» каналов регистрации детектирующих элементов.
- Элайнмент подсистем установки: Вершинный Детектор (ВД) и магнитный спектрометр (МС).
- Создание системы первичного анализа. Система включает в себя, восстановление: координат пролёта и траекторий частиц; вершин взаимодействия и распада (вторичные вершины); импульсов частиц с учётом заряда; а так же первичные методы фильтрации событий на выделение событий с вторичной вершиной.
- Разработка критериев отбора событий, на пост-обработку, для распадов очарованных частиц.
- Расчёт эффективностей регистрации очарованных частиц методом Монте-Карло.
- Расчёт сечений рождения очарованных частиц.
- Расчёт эффективности работы триггера установки ( $K_{tr}$ ).
- Анализ распадов очарованных частиц.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация 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.

### **Краткое содержание работы**

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

**В первой главе** даётся краткий обзор исследований очарованных частиц, содержащий описание методов экспериментальных исследований и теоретических подходов к проблеме адронного рождения очарованных частиц. Рассмотрены только частицы имеющие «открытое очарование».

На рисунке 1 представлены оценки полного сечения  $\sigma_{\bar{c}c}$  от коллабораций: ALICE, ATLAS, LHCb, STAR, PHENIX полученных в период 2011÷2016 гг.; а так же добавлены данные 2018 года от коллаборации LHCb полученные при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 86.6 \text{ GeV}$  в pA-взаимодействиях. Как не трудно заметить (рис.1), последние 10÷15 лет для сравнительных оценок используются данные только экспериментов второго и третьего поколений; что обусловлено сложностью в анализе и пересчёте результатов с установок первого поколения. Так, коллаборации ALICE и ATLAS, с завидной регулярностью осуществляют переоценку и уточнение своих результатов, что в частности обусловлено появлением новых данных по брэнчингам распадов и коэффициентам фрагментации. В связи с этим, в последние

несколько лет, наметилась тенденция на понижение энергии взаимодействия (переход на фиксированную мишень коллаборацией LHCb), что возможно поспособствует пересмотру экспериментальных данных полученных при низких энергиях в рА-взаимодействиях до 2005 года.

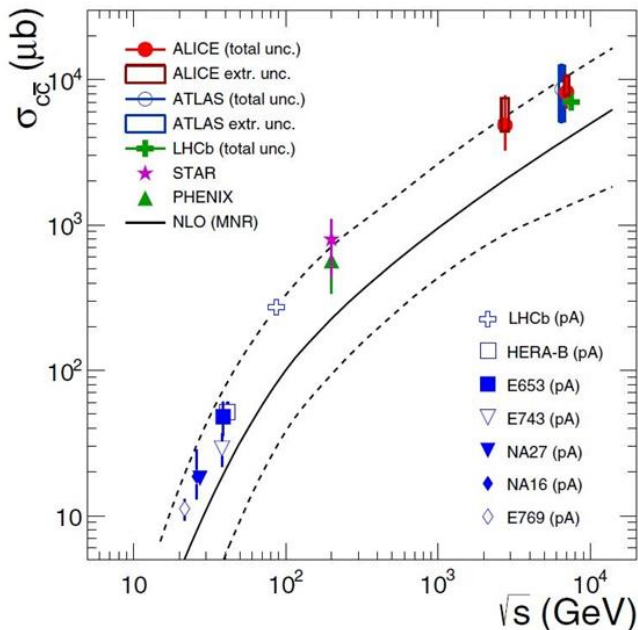


Рис.1. Энергетическая зависимость полного сечения образования очарованных частиц в рр-взаимодействиях. Данные от рА-взаимодействий для  $\sqrt{s} < 100$  GeV и от рр-взаимодействий для  $\sqrt{s} > 100$  GeV. Данные для рА-взаимодействий были отмасштабированы как  $1/A$ . Теоретическая оценка (сплошная линия) и интервал неопределённости (штриховая линия) рассчитаны по модели NLO pQCD (MNR).

Необходимо заметить, что все экспериментальные оценки полного сечения  $c\bar{c}$  (рис.1), за последние 10 лет, располагаются около верхней границы неопределённости теоретических оценок модели NLO pQCD.

**Во второй главе** диссертации приводится краткое описание основных элементов установки СВД-2, триггера на взаимодействие и статистики эксперимента.

Существенный прогресс в исследовании очарованных частиц на выведенных пучках достигнут к настоящему времени, благодаря развитию техники прецизионных вершинных детекторов, основанной на электронной методике, и внедрению мощных вычислительных систем, способных быстро обрабатывать большой объем экспериментальных данных. Техника прецизионных вершинных детекторов позволяет делать быструю оценку промаха вторичных треков относительно первичной вершины для отбора событий с распадами короткоживущих частиц, а также восстанавливать вершины этих распадов. Кроме того, в состав прецизионных вершинных детекторов могут быть включены мишени с различными атомными номерами. Поэтому для проведения эксперимента по исследованию образования очарованных частиц в рА-взаимодействиях при импульсе протонов 70 ГэВ/с было предложено использовать прецизионный вершинный детектор, структура которого оптимизирована для этого импульса протонов. Функции прецизионного вершинного детектора состояли в следующем: должны обеспечиваться точные измерения координат точки взаимодействия ( $\pm 150$  мкм) и координат на траекториях первичной и вторичных заряженных частиц ( $\pm 5$  мкм), позволяющие установить факт взаимодействия первичной частицы в мишени и наличие вторичных вершин, близлежащих к первичной; должны гарантироваться высокое ( $\sim 3$  мрад) двухтрековое разрешение для заряженных частиц, испущенных под малыми углами, и обеспечиваться эффективное восстановление траекторий заряженных

частиц; должна обеспечиваться реконструкция вторичных вершин, расположенных на расстоянии до 5 мм от первичного взаимодействия, и привязка к ним вторичных треков. Для реализации подобных точностей, в реконструкции треков и вершин, был разработан Вершинный Телескоп (ВТ) состоящий из 4-х дуплетов взаимно ортогональных плоскостей микростриповых детекторов (МСД) и одной наклонной плоскости МСД для обеспечения пространственной реконструкции проекций треков. Первый (по пучку) дуплет МСД имел расстояние между стрипами 25мкм, тем самым обеспечивая координатное разрешение  $\sim 7$ мкм; все следующие (по пучку) МСД с шагом между стрипами 50мкм (координатное разрешение  $\sim 14$ мкм).

Для определения импульсов заряженных частиц в состав установки входит широкоапертурный магнитный спектрометр. Пропорциональные камеры были сгруппированы в 10 блоков, три из которых установлены перед магнитом, а семь – в магните МС-7А (длина ярма по пучку 3 м, апертура  $1.8 \times 1.2 \text{ м}^2$  (ширина  $\times$  высота), напряженность поля  $B = 1.18 \text{ Тл}$  при токе 4 кА). В каждом блоке камер может быть от двух до трех плоскостей, проволочки в которых располагаются в вертикальном (Y) или двух “косых” (U, V) направлениях. В зависимости от размера камеры количество проволочек в каждой плоскости может быть от 448 до 704. Общее используемое количество плоскостей составляет 18, а общее количество сигнальных проволочек  $\sim 11$  тысяч. Расположение детекторов, включенных в системы мониторинга пучка, вершинного детектора и системы запуска, показано на рисунке 2. Сцинтилляционные детекторы С1, С2, С4 имеют размеры  $80 \times 80$ ,  $80 \times 80$  и  $6 \times 6$  мм

соответственно; С3 имеет отверстие для пропуска пучка. Пучок направлен вдоль оси Z, его поперечное сечение имеет размер  $\sim 3$  мм.

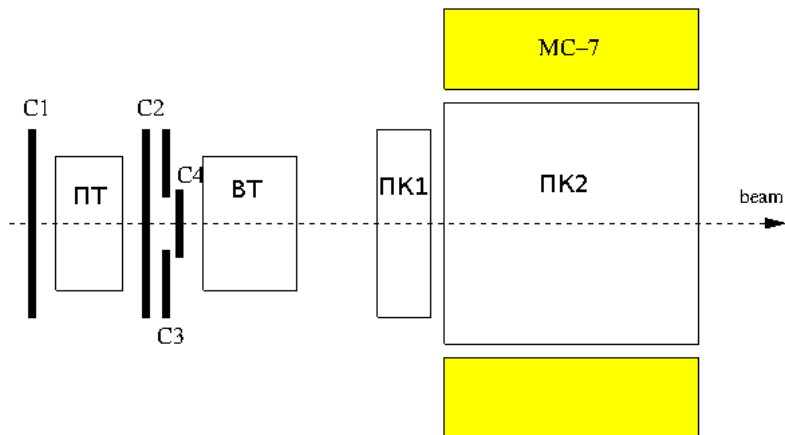


Рис.2. Схема установки СВД-2: С1÷С4 – сцинтилляционные счётчики триггерной системы; ПТ – пучковый телескоп; ВТ – вершинный телескоп с активной мишенью; ПК1, ПК2 – пропорциональные камеры магнитного спектрометра; МС-7 – широкоапертурный дипольный магнит.

Лабораторная система координат (ЛСК) установки – правая Декартова система координат. Ось Z направлена по пучку протонов; ось X – влево, ось Y – вверх. Центр ЛСК размещён в центре первой плоскости (по пучку) активной мишени (АМ), которая расположена в боксе вершинного телескопа (ВТ).

АМ состояла из 7 плоскостей, пять из которых активные – кремниевые МСД (толщина 300мкм) с шагом между полосами 1мм и две пассивные: свинец (толщиной 240мкм) и углерод (толщиной 540мкм).

На установке СВД-2, использовалась двухуровневая система отбора событий:

- 1) триггер нулевого уровня: собран на сцинтилляционных счётчиках С1÷С4 (рис.2) и реализует простейшую схему на

выделение одинарной пучковой частицы проходящей в область АМ;

- 2) триггер первого уровня: на основе табличного метода аппаратной обработки данных с АМ; реализует логику выделения взаимодействия в области АМ.

Статистика эксперимента SERP-E-184 при импульсе протонов пучка 70 ГэВ/с набрана при триггере, требующем наличие сигнала от трех и более частиц в любой из пяти плоскостей АМ и наличие сигнала от двух и более частиц в следующей за ней плоскости.

Объём статистики неупругих взаимодействий составил ~52 миллиона событий; при интенсивности протонного пучка:  $(5\div 6) \cdot 10^5$  частиц за сброс ускорителя.

**В третьей главе** приводится описание методов и алгоритмов, которые использовались при реконструкции событий. Подавляющая часть методов была разработана автором либо при его участии в процессе работы над анализом экспериментальных данных.

В разделе 3.1 приводится краткая последовательность системы обработки данных, которая присуща для большинства экспериментов.

В разделе 3.2 подробно описываются методы восстановления координат пролёта в кремниевых МСД [6]. Раздел 3.2 разбит на пять частей:

- В разделе 3.2.1 описывается метод восстановления кластеров<sup>1</sup>, где затрагивается проблема угловой эффективности МСД, которая сказывается на методике выделения кластеров.
- В разделе 3.2.2 описывается проблема образования многочастичных кластеров<sup>2</sup>, и приводятся критерии на их выделение. Многочастичные кластеры образуются под малыми углами, относительно направления движения пучковой частицы, из-за большой плотности треков заряженных частиц от неупругого взаимодействия.
- В разделе 3.2.3 описываются методы разделения многочастичных кластеров: «Стандартный метод» - разделение кластеров по «провалу» в амплитудном спектре ( $A(N_{\text{strip}})$ ), но на данный случай приходится всего ~10% от всей совокупности многочастичных кластеров; «Равновесный метод» - разделение кластеров на основании предположения о сравнимости ионизационных потерь частиц вызвавших образование многочастичного кластера.
- В разделе 3.2.4 описываются методы восстановления координат пролёта частиц в МСД: метод «центра тяжести» и «нелинейный» метод. Для «нелинейного» метода, на основании Монте-Карло расчётов, произведено упрощение формализма метода через линейное представление интегральной кривой. На основании оценочных расчётов, для ВТ установки СВД-2, определена граница

---

<sup>1</sup> Кластер – последовательное объединение стрипов, в которых амплитуда сигнала, от прохождения заряженной частицы, превышает порог обрезания по амплитуде.

<sup>2</sup> Многочастичный кластер – кластер образованный пролётом нескольких заряженных частиц.



применимости данных методов; которая составила  $\pm 5^0$  по полярному углу.

- В разделе 3.2.5 затрагиваются проблемы, к которым приводит не оптимально устанавливаемый порог на обрезание амплитуды сигнала с МСД. Представлен простейший критерий оценки качества МСД.

Раздел 3.3 посвящен различным методикам элайнмента детектирующих элементов установки. В связи с конструктивными особенностями детекторов установки (многоэлементность конструкций, наличие защитных кожухов и т.д.), таких как АМ или ВД, не представляется возможным произвести точную расстановку/замеры их активных элементов как относительно друг друга, так и относительно других детекторов установки. В тоже время, сходимость «основных» методов элайнмента, очень сильно зависит от начального приближения в положении детектирующих элементов; для этого был разработан метод «предварительного» элайнмента (раздел 3.3.1).

Цели и задачи «предварительного» элайнмента:

1. расчёт начального приближения в положении детектирующих плоскостей по  $Z$ - координате (вдоль оси пучка);
2. устранение неопределённости в  $Z$  координате между проекциями  $XOZ$  и  $YOZ$  детектирующих элементов («разбег» проекций).

«Предварительный» элайнмент не отменяет алгоритмов «основного» элайнмента, а позволяет устранить неопределённости в положении детектирующих элементов и подготовить выборку хитов, соотнесённых с пространственно восстановленными треками, для «основного» элайнмента. В диссертации представлен простой пример работы метода при оценке положения плоскостей АМ, ВД и ПК; но метод представлен

только в базовом изложении, без описания возможности автоматизации, что довольно громоздко. Для его работы используются события, полученные с триггером на взаимодействие и без магнитного поля (треки представляются в виде прямых линий).

«Основной» элайнмент (раздел 3.3.2). В данном разделе представлены два метода:

- Первый метод: разрабатывался для вершинного телескопа (ВТ). Так как ВТ является основным детектором установки (для восстановления «первичных» и «вторичных» вершин), то его элайнменту уделено особое внимание. В базовой идеологии метод «основного» элайнмента схож с методом «предварительного» элайнмента; т.е. он использует треки из событий с взаимодействием в АМ, с максимальной «развёрткой» по углу и в отсутствие магнитного поля. Сшивка проекций осуществляется:
  - по  $Z$ -координате, за счёт фиксированного положения плоскостей АМ;
  - по азимутальному углу, за счёт фиксации угла наклона  $U$ -плоскости (наклонная плоскость).

На рисунке 3, в качестве примера, представлены распределения по положению вершины взаимодействия ( $z_v$ , для 7 плоскостей АМ) восстановленной по двух-лучевым событиям (для каждой проекции в отдельности) на разных этапах элайнмента, для одного из дисбалансов геометрии ВТ.

На рисунке 3а показаны исходные распределения положения вершины взаимодействия. Произведён учёт только поперечных смещений детектирующих плоскостей ( $\Delta x^*/\Delta y^*$ ), при этом

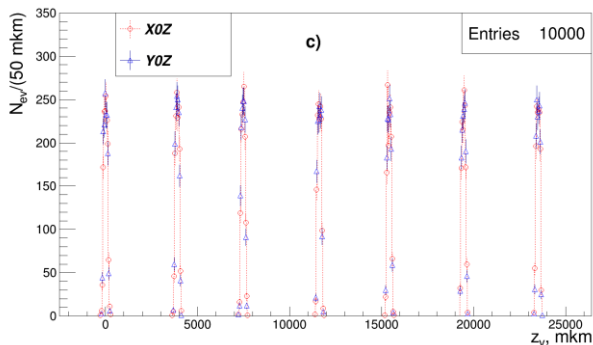
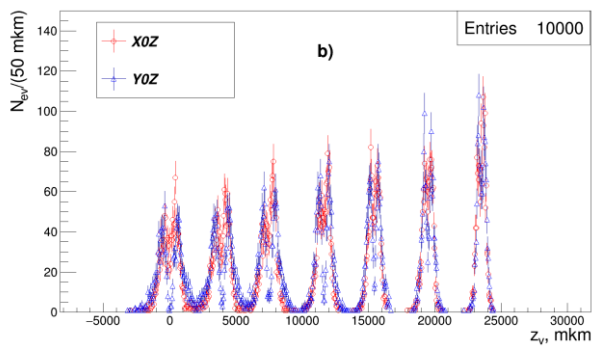
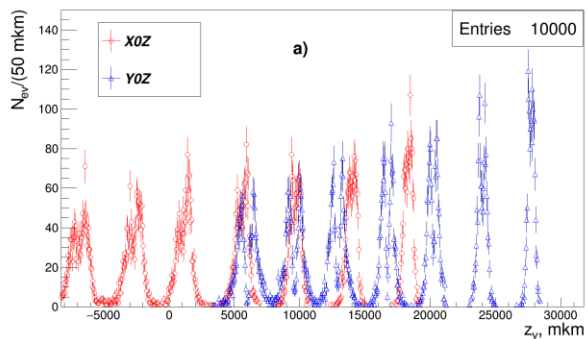


Рис.3. Распределения по положению вершины взаимодействия (МК-события):  
 а) первоначальные распределения (существенный «разбег» проекций);  
 б) после «предварительного» элайнмента (устранение «разбега» проекций);  
 с) после «основного» элайнмента.

наблюдается существенный «разбег» положения вершин взаимодействия между проекциями.

Рисунок 3б получен после «предварительного» элайнмента. Произведён расчёт начального приближения в положении детектирующих плоскостей по Z-координате  $(\tilde{z}_i, \tilde{z}_j)$ , наблюдается устранение «разбега» в положения вершин взаимодействия между проекциями.

Рисунок 3с – после «основного» элайнмента. Выполнено окончательное определение всех параметров разбалансировки геометрии ВД.

- Второй метод: ничем не примечателен; реализует простейший метод элайнмента по одиночным трекам для пропорциональных камер спектрометра. Выборка данных подготавливается на основании выполненного элайнмента ВТ. Основные требования к выборке данных:

1. отсутствие магнитного поля;
2. использование триггера на взаимодействие, позволяет:
  - а) произвести уточнение угловых и прицельных параметров треков в ВД за счёт использования координат вершины взаимодействия в аппроксимации треков;
  - б) улучшить точность восстановления параметров дисбаланса геометрии камер спектрометра, за счёт использования треков из события с максимальной «развёрткой» треков по углу.

В разделе 3.4 представлено несколько методов и алгоритмов восстановления «первичной» и «вторичных» вершин в событии, а также

методы и критерии быстрой фильтрации событий (выделение событий нужного класса).

- В разделе 3.4.1 представлено описание метода предварительного восстановления вершины взаимодействия. Основными причинами для разработки данного метода послужили:
  - малое число хитов на трек (максимально: 4 хита, по числу плоскостей МСД в проекции);
  - малое отношение сигнал/шум для МСД ( $\approx 8 \div 10$ ), что в случае МСД с предусилителями GASSIPLEX (порог обрезания по амплитуде сигнала:  $2.5 \cdot \sigma_{\text{noise}} = 5\text{ADC}$ ) приводит к заметной зашумленности данных; а в случае МСД с предусилителями VIKING (порог обрезания по амплитуде сигнала:  $5 \cdot \sigma_{\text{noise}} = 10\text{ADC}$ ) приводит к потере данных.

В данных условиях, для более надежного восстановления треков, была необходима дополнительная информация, в качестве которой использовалась предварительно восстановленная вершина взаимодействия.

- В разделе 3.4.2 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 простые кинематические критерии на выделение событий с распадом  $V^0$ , а также разработанный автором метод фильтрации на базе

критерия Армантероса – Подолянского не требующий предварительных знаний о: зарядах, импульсах и пространственном соответствии проекций треков «дочерних» продуктов распада  $V^0$ .

Раздел 3.5 посвящен описанию первичного 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; эффективную апертуру магнитного спектрометра.

**В четвёртой главе** представлены результаты математического моделирования процессов рА-взаимодействий при 70 ГэВ/с в установке СВД-2 для эксперимента E-184, полученные с помощью программ 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 получены оценки полного сечения рождения очарованных частиц на ядрах углерода, кремния, свинца и нуклоне ядра [1, 2].

В разделе 4.1 представлены результаты математического моделирования:

- в разделе 4.1.1 приводится настройка генератора (FRITIOF) и обсуждается проблема влияния числа неупругих взаимодействий, налетающего нуклона с нуклонами ядра мишени, на «деформацию» дифференциальных спектров получаемых по экспериментальным данным (в предположении единичного акта взаимодействия);
- в разделе 4.1.2 кратко описывается настройка GEANT3.21 и идея формирования выходных данных;
- раздел 4.1.3 посвящён описанию основных критериев отбора событий и оценке эффективностей регистрации на основании МК-расчётов. В Приложении П.2, описан метод разделения гипотез для моды ( $K^{\mp}\pi^{\pm}$ ).

В разделе 4.2 приводятся экспериментальные спектры и их предварительное сравнение с МК-распределениями. В Приложении П.3, представлен анализ влияния «отражений» на оценку сигнала нейтральных D-мезонов.

В разделе 4.3 приводится оценка полного сечения образования очарованных частиц, рассчитанного несколькими способами, и сравнение полученного результата с теоретическими моделями и экспериментальными результатами других экспериментов. Оценка величины полного сечения образования очарованных частиц на нуклоне в pA-взаимодействиях при околопороговой энергии  $\sqrt{s} = 11.5$  ГэВ, составила:

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

Оценка полных инклюзивных сечений образования нейтральных очарованных мезонов, составила:

$$\sigma(D^0) = 2.5 \pm 0.8(\text{стат.}) \pm 0.5(\text{сист.}) \text{ (мкбн/нуклон)}$$

$$\sigma(\bar{D}^0) = 4.6 \pm 1.6(\text{стат.}) \pm 0.9(\text{сист.}) \text{ (мкбн/нуклон)}.$$

В разделе 4.4 приводится оценка времени жизни нейтральных  $D^0$  – мезонов и дифференциальные распределения по:  $p_t^2$  и  $x_F$ .

**В пятой главе** приведены результаты обработки данных по выделению событий с распадами  $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$  и  $D^- \rightarrow K^+\pi^-\pi^-$  в pA-взаимодействиях при 70 ГэВ/с. Дана оценка сечения образования заряженных очарованных мезонов и их выходов, измерены некоторые свойства  $D^\pm$ -мезонов [3].

В разделе 5.1 представлена последовательность предварительных критериев отбора событий нужного класса, которая выполняется на первом этапе анализа данных (на этапе формирования 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. Представлены «сырые» спектры эффективных масс  $D^\pm$ -мезонов (рис.4).

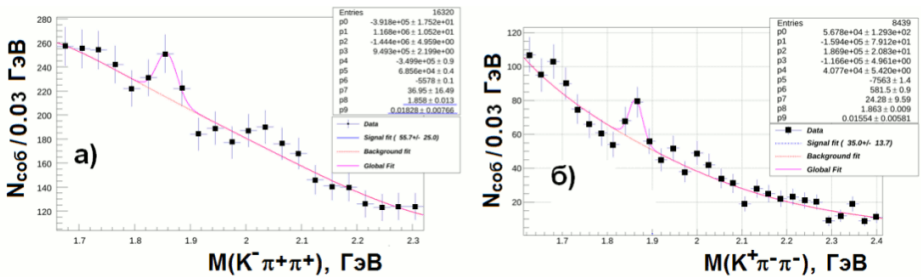


Рис.4. Спектры эффективных масс систем  $(K^-\pi^+\pi^+)$  (а) и  $(K^+\pi^-\pi^-)$  (б) после отбора событий с трёхлучевыми вторичными вершинами.

В разделе 5.2 приводится сравнение основных распределений (по «приведённой» длине пробега, импульсу и  $x_F$ ) для экспериментального



фона и МК-фона, как качество настройки МК. Описывается выбор и обоснование критериев отбора событий на пост-обработку:

- выделение событий по кинематике (попадание в фазовый объём по Далитц-плоту);
- отсев фоновых событий с наличием распада  $K^0_s$ -мезона;
- обрезание по «приведённой» длине пробега<sup>3</sup>.

В разделе 5.3 представлены экспериментальные спектры эффективных масс  $D^\pm$ -мезонов и приводится их количественная оценка:

$$D^+: 15.4 \pm 5.6 \text{ событий};$$

$$D^-: 15.3 \pm 4.7 \text{ событий}.$$

В разделе 5.4 приводится оценка времени жизни  $D^\pm$ -мезонов, по полученным экспериментальным данным, как факт их обнаружения (PDG  $D^\pm$ :  $\tau = 311.8$  мкм):

$$D^+: \tau = 291 \pm 75 \text{ мкм};$$

$$D^-: \tau = 341 \pm 88 \text{ мкм}.$$

В разделе 5.5 приводится расчёт сечения образования  $D^\pm$ -мезонов:

$$\sigma(D^+) = 1.2 \pm 0.4(\text{стат.}) \pm 0.2(\text{сист.}) \text{ (мкбн/нуклон)}$$

$$\sigma(D^-) = 1.9 \pm 0.6(\text{стат.}) \pm 0.4(\text{сист.}) \text{ (мкбн/нуклон)}.$$

В разделе 5.6 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 очарованных частиц в  $pA$ -взаимодействиях, меняются с изменением

---

<sup>3</sup>  $L_{пр} = L * M/P$ , где  $L$ - расстояние между «первичной» и «вторичной» вершиной;  $M$ - эффективная масса «материнской» частицы;  $P$ - импульс «материнской» частицы.

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 растут.

**В шестой главе** исследуется образование очарованных  $\Lambda_c^+$ -барионов в рА- взаимодействиях при импульсе пучка протонов 70 ГэВ/с на трёх ядерных мишенях – углерод, кремний и свинец (эксперимент SERP-E-184) [4, 5]. Эти исследования являются продолжением программы изучения очарованных частиц в околопороговой области энергий в данном эксперименте и дополняют ранее полученные экспериментальные результаты по рождению заряженных и нейтральных D-мезонов (см. Гл.4 и 5) [1-3, 5].

В разделе 6.1 приводится «сырой» экспериментальный спектр эффективных масс распада  $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^- \pi^+$ , после применения предварительных критериев отбора (рис.5). Оценка сигнала, без разделения гипотез, составила:  $56.4 \pm 20.5$  событий.

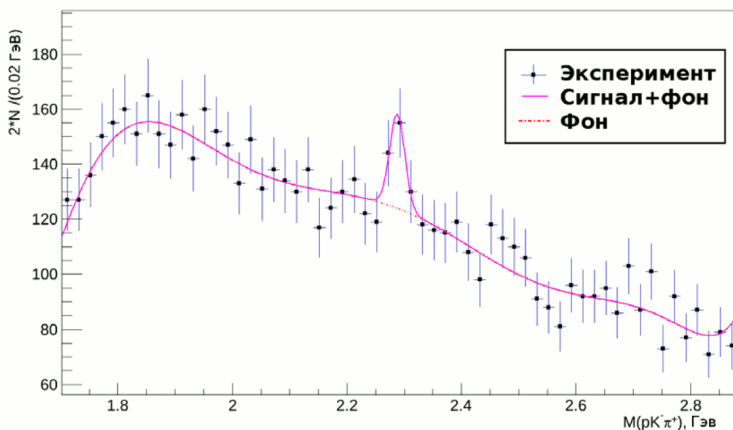


Рис.5. Спектр эффективных масс системы  $(pK^- \pi^+)$  (две гипотезы) после первичного отбора событий с трёхлучевыми вторичными вершинами.

В разделе 6.2 приводится сравнение основных распределений (по «приведённой» длине пробега, импульсу и  $x_F$ ) для экспериментального фона и МК-фона, как качество настройки МК.

В разделе 6.3 описывается выбор и обоснование критериев отбора событий на пост-обработку:

- выделение фазового пространства распада (Далитц-плот);
- критерий на отсев ложных вершин с распадом  $K_S^0$ ;
- критерий по импульсу  $\Lambda_c^+$ -бариона;

а так же окончательный спектр эффективных масс с оценкой величины сигнала:  $21.6 \pm 6$  событий.

В разделе 6.4 приводится расчёт оценки сечения образования  $\Lambda_c^+$ -барионов, которое составило:  $\sigma_\Lambda = 4.0 \pm 1.6$  мкбн/нуклон.

В разделе 6.5 приводится оценка времени жизни  $\Lambda_c^+$ -барионов, по полученным экспериментальным данным, как факт их обнаружения (PDG:  $\sigma_t = 59.9$  мкм):  $\sigma_t = 65 \pm 55$  мкм.

В разделе 6.6 обсуждаются относительные выходы нейтральных и заряженных  $D$ -мезонов, и  $\Lambda_c^+$ -барионов, в сравнении с теоретическими моделями и результатами других экспериментов (рис.6). Экспериментальные данные и теоретические предсказания (см. ссылки в [3-5], рис.7) позволяют говорить об увеличении выхода  $\Lambda_c^+$ -барионов в околопороговой области энергий; и с увеличением выхода в этой области энергий  $\bar{D}^0$ -мезонов указывают на их преимущественно парное рождение у порога рождения очарованных частиц.

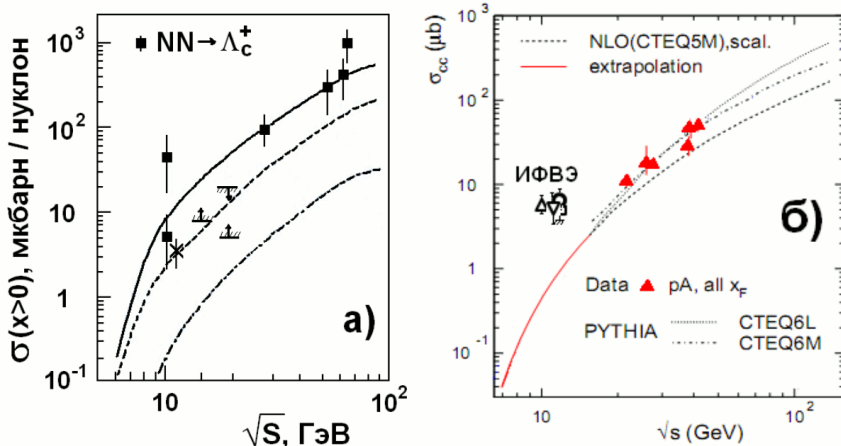


Рис.6. а) Сечения рождения  $\Lambda_c^+$ -барионов для области  $x_F > 0$ . Сечение из данной работы обозначено знаком X. Теоретические кривые: сплошная линия – для периферической модели, пунктирные линии – для двух вариантов модели КХД. б) Полные сечения образования чарма в рА-взаимодействиях (см. ссылки в [4]); группа экспериментов ИФВЭ:  $\circ$  – СВД-2,  $\nabla$  - А.Е. Astratyan,  $\square$  – SCAT,  $\Delta$  - БИС-2.

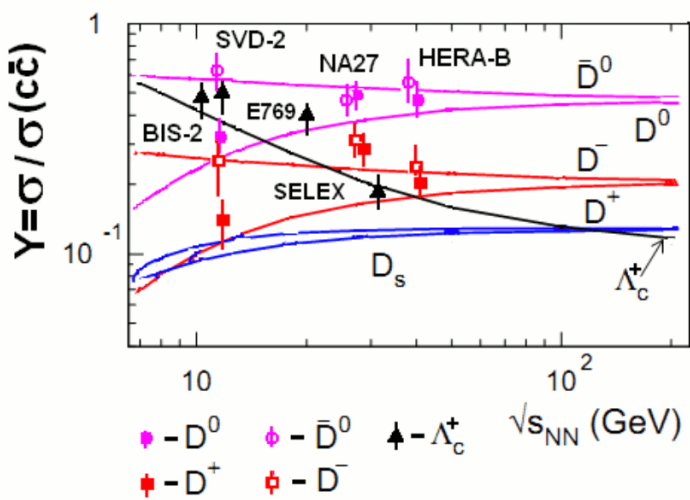


Рис.7. Выходы очарованных частиц. Экспериментальные точки (см. таблица 1) и теоретические кривые (см. ссылки в [3-5]).

Таблица 1. Выходы очарованных частиц в сравнении с теоретическими моделями и результатами других экспериментов.

Выход \ Частица	PYTHIA pp-вз.	FRITIOF pA-вз.	СВД-2 pA-вз.	Другие эксперименты		
				NA-27	HERA-B	
$D^0$	0.28	0.51	$0.35 \pm 0.16$	$0.57 \pm 0.08$	$0.44 \pm 0.18$	
$\bar{D}^0$	0.74	0.59	$0.65 \pm 0.31$	$0.43 \pm 0.09$	$0.54 \pm 0.23$	
$D^+$	0.13	0.29	$0.16 \pm 0.07$	$0.31 \pm 0.06$	$0.19 \pm 0.08$	
$D^-$	0.24	0.27	$0.27 \pm 0.17$	$0.34 \pm 0.06$	$0.25 \pm 0.11$	
$\Lambda_c^+$	0.55	0.36	$0.56 \pm 0.27$	$0.52 \pm 0.35$	$0.42 \pm 0.13$	$0.18 \pm 0.01$
				БИС-2	Е-769	SELEX-2

**В заключении** диссертации представлены основные выводы по результатам диссертационной работы:

1. Получена экспериментальная оценка сечений инклюзивного образования очарованных частиц на нуклоне:

$$\sigma(D^0) = 2.5 \pm 0.8 \pm 0.5 \text{ мкбн/нуклон};$$

$$\sigma(\bar{D}^0) = 4.6 \pm 1.6 \pm 0.9 \text{ мкбн/нуклон};$$

$$\sigma(D^+) = 1.2 \pm 0.4 \pm 0.2 \text{ мкбн/нуклон};$$

$$\sigma(D^-) = 1.9 \pm 0.6 \pm 0.4 \text{ мкбн/нуклон};$$

$$\sigma(\Lambda_c^+) = 4.0 \pm 1.6 \text{ мкбн/нуклон};$$

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

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  $\Lambda_c^+$ -барионов в околопороговой области энергий и, с увеличением 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 МК-данными (выходные файлы GEANT) и полученными в эксперименте данными, тем самым обеспечивая унификацию методов анализа, а также с файлами «первичного» анализа данных (DST). Графический пакет системы анализа позволяет осуществлять визуализацию событий и 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 элайнмента 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-Подольского, позволяющий проводить быструю фильтрацию событий с распадами  $V^0$ - частиц (отсев ложных вторичных вершин). Для работы метода достаточно знания о топологии события в ВД, 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 плоте Армантероса-Подольского по параметру  $\alpha$ , характеризующему асимметрию между продольными импульсами положительно и отрицательно заряженных частиц распада.

## Список литературы

1. В.Н. Рядовиков (от имени Сотрудничества СВД-2<sup>4</sup>), «Регистрация рождения и распадов нейтральных очарованных мезонов в рА-взаимодействиях при 70 ГэВ на установке СВД-2», Ядерная Физика, 2010, том 73, №9, с. 1585-1596; [arXiv:1004.3676](https://arxiv.org/abs/1004.3676).
2. В.Н. Рядовиков (от имени Сотрудничества СВД-2<sup>4</sup>), «Свойства нейтральных очарованных мезонов в рА-взаимодействиях при 70 ГэВ», Ядерная Физика, 2011, том 74, №2, с. 342–349; [arXiv:1106.1563](https://arxiv.org/abs/1106.1563).
3. В.Н. Рядовиков (от имени Сотрудничества СВД-2<sup>4</sup>), «Регистрация заряженных очарованных  $D^\pm$  - мезонов в рА- взаимодействиях при 70 ГэВ на установке СВД-2», Ядерная Физика, 2014, том 77, №6, с. 756-764; [arXiv:1311.1960](https://arxiv.org/abs/1311.1960).
4. В.Н. Рядовиков (от имени Сотрудничества СВД-2<sup>4</sup>), «Измерение сечения образования очарованных барионов в рА- взаимодействиях при 70 ГэВ/с», Ядерная Физика, 2016, том 79, №2, с. 106–116.
5. A. Aleev ..., A. Kiriyakov et al., «Charmed particles production in рА-interactions at  $\sqrt{s} = 11.8$  GeV», Eur. Phys. J. A53 (2017) no.3, 45; DOI: 10.1140/epja/i2017-12230-9

---

<sup>4</sup> А.Н. Алеев, Е.Н. Ардашев, А.Г. Афонин, В.П. Баландин, С.Г. Базиладзе, С.Ф. Бережнев, Г.А. Богданова, М.Ю. Боголюбский, А.М. Вишневецкая, В.Ю. Волков, А.П. Воробьев, А.Г. Воронин, В.Ф. Головкин, С.Н. Головня, С.А. Горохов, Н.И. Гришин, Я.В. Гришкевич, Г.Г. Ермаков, П.Ф. Ермолов, В.Н. Запольский, Е.Г. Зверев, С.А. Зоткин, Д.С. Зоткин, Д.Е. Карманов, В.И. Киреев, А.А. Кириков, В.В. Константинов, В.Н. Крамаренко, А.В. Кубаровский, Н.А. Кузьмин, Л.Л. Курчанинов, Г.И. Ланщиков, А.К. Лефлат, С.И. Лютов, М.М. Меркин, Г.Я. Митрофанов, В.С. Петров, Ю.П. Петухов, А.В. Плескач, В.В. Попов, В.М. Роньжин, Д.В. Саврина, В.А. Сенько, М.М. Солдатов, Л.А. Тихонова, Т.П. Топурия, Н.Ф. Фурманец, А.Г. Холоденко, Ю.П. Цюпа, Н.А. Шаланда, А.И. Юкаев, В.И. Якимчук.



6. Киряков А.А., Рядовиков В.Н., Кубаровский А.В., Попов В.В., «Методы реконструкции координат в кремниевых микростриповых детекторах», журнал Приборы и техника эксперимента, 2004, №5, с. 48-55.

*Рукопись поступила \_\_ октября 2019 года.*



Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

А.А. Киряков

Исследование процессов образования очарованных частиц в рА-  
взаимодействиях при 70 ГэВ/с.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы MS Word.

---

Подписано к печати 26.10.2019. Формат 60×84/16. Цифровая печать.  
Печ.л. 2.12. Уч.-изд.л. 1,63. Тираж 100. Заказ 2. Индекс 3649.

---

НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ

142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

<http://www.ihep.ru>;

библиотека: <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

---

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ, 2019

---