

1-2011-63

На правах рукописи  
УДК 539.172.12, 539.172.5

Ж-537

ЖЕМЧУГОВ  
Алексей Сергеевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АДРОНОВ С ЯДРАМИ БЕРИЛЛИЯ  
ДЛЯ РАЗВИТИЯ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Специальность: 01.04.16 — физика ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2011

С 343

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Шелков Георгий Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Сапожников Михаил Григорьевич  
(ЛФВЭ ОИЯИ, г. Дубна)  
кандидат физико-математических наук  
Суворов Всеволод Михайлович  
(ПИЯФ РАН, г. Гатчина)

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт  
ядерной физики им. Д.В. Скобельцына  
МГУ им. М.В. Ломоносова

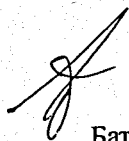
Защита состоится «\_\_\_» сентября 2011 г. в \_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 720.001.03 при Лаборатории ядерных про-  
блем им. В. П. Джелепова в Объединенном институте ядерных исследо-  
ваний, расположенном по адресу: Московская область, г. Дубна, ул. Жо-  
лио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного ин-  
ститута ядерных исследований.

Автореферат разослан «8» июля 2011 г..

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные  
печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого  
секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук, профессор



Батусов Юрий Александрович

## Общая характеристика работы

Актуальность работы Измерение выходов и спектров вторичных частиц в адрон-ядерных взаимодействиях является классической задачей физики атомного ядра и элементарных частиц. Получаемые при этом данные традиционно служат экспериментальной основой для теории ядерных взаимодействий, а также широко применяются при решении практических задач в тех областях, где использование теоретических предположений не позволяет достичь требуемой точности и достоверности расчетов. Примером подобных задач может служить расчет источников пионов при проектировании пионных каналов на ускорителях или планировании ускорительных нейтринных экспериментов. Получение экспериментальных данных в области энергий от 1 до 20 ГэВ является особенно важным в связи с тем, что в этом диапазоне еще не построена строгая микроскопическая теория и неприменимы хорошо разработанные методы пертурбативной квантовой хромодинамики. Более того, адрон-ядерные реакции в настоящее время изучены даже менее, чем ядро-ядерные взаимодействия. В результате, для описания процессов в указанной области широко применяются феноменологические и полуфеноменологические модели, использующие подгоночные параметры для достижения удовлетворительного описания экспериментальных данных. В последнее время развитие экспериментальной техники и средств автоматизации сделало возможным проведение прецизионных измерений практически во всех областях физики элементарных частиц. При этом, на первый план выходят поиск и измерение редких физических явлений, требующие адекватного учета вкладов известных физических процессов, как правило, оцениваемых в ходе численного модели-

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

рования эксперимента методом Монте-Карло. Систематическая погрешность моделирования зачастую становится одним из заметных вкладов в общую систематическую погрешность измерений. В свою очередь, проверка правильности и повышение точности предсказаний феноменологических моделей возможны только при наличии соответствующих экспериментальных данных хорошего качества. Однако, именно в этой области энергий имеющиеся экспериментальные данные довольно фрагментарны и, как правило, получены в ограниченном кинематическом диапазоне. В связи с этим, точное и систематическое измерение спектров вторичных адронов в адрон-ядерных взаимодействиях для возможно более широкого диапазона ядер, сорта и энергии падающих частиц является необходимым условием как для дальнейшей разработки теории ядерных взаимодействий, так и для развития методов и повышения точности моделирования физических процессов при планировании и обработке данных в современном физическом эксперименте.

**Цель работы** Проверка правильности ряда феноменологических моделей ядерных реакций, используемых в широко распространенном и применяемом для моделирования практически всех современных и планируемых установок (включая эксперименты на LHC и FAIR) программном пакете Geant4 [1, 2] на основе новых экспериментальных данных по образованию адронов на ядрах бериллия, включая:

1. систематическое измерение инклюзивных дифференциальных сечений образования вторичных адронов с углом вылета  $20^\circ$ - $125^\circ$  в реакциях  $\pi^+, \pi^-, p + Be \rightarrow \pi^+, \pi^-, p + X$  при импульсе пучка от 3 до 15 ГэВ/с, с точностью не хуже 10%;
2. применение результатов измерений для проверки предсказаний фе-

номенологических моделей ядерных реакций, используемых в программном пакете Geant4.

### 3. методические исследования:

- а) разработку метода и алгоритмов коррекции паразитных кросс-токов во времяпроекционной камере широкоапертурного спектрометра HARP;
- б) разработку метода и алгоритмов реконструкции треков в широкоапертурном спектрометре HARP;
- в) разработку программного обеспечения для статистического моделирования событий в широкоапертурном спектрометре HARP.

В основу работы положены исследования, выполненные автором в составе группы CERN-Дубна-Протвино (HARP-CDP) в ходе эксперимента HARP.

**Научная новизна** Впервые систематически измерены дифференциальные сечения образования вторичных протонов и заряженных пионов в реакциях  $\pi^+, \pi^-, p + Be \rightarrow \pi^+, \pi^-, p + X$  при импульсе пучка 3,0; 5,0; 8,9 (8,0 для пучка  $\pi^-$ ); 12,0 и 15,0 ГэВ/с в диапазоне углов вылета  $20^\circ$ - $125^\circ$ . Достигнута точность измерения сечений равная 3-10%. Впервые измерен выход вторичных каонов по отношению к выходу пионов в реакции взаимодействия протонов с импульсом 8,9 ГэВ/с с ядрами бериллия.

**Практическая значимость** Разработан алгоритм и создан комплекс программ для геометрической реконструкции треков во времяпроекционной камере установки HARP. Разработан метод коррекции ряда нежелательных эффектов, снижающих точность измерения, таких как пара-

зитные сигналы (кросс-токи), а также ионизационные потери и многократное кулоновское рассеяние вторичных частиц в материале мишени. Эти алгоритмы и программы были использованы в анализе данных эксперимента HARP и могут использоваться при обработке данных других экспериментов, использующих сходную аппаратуру.

Сравнение полученных экспериментальных данных о выходах вторичных адронов в адрон-ядерных взаимодействиях с предсказаниями феноменологических моделей, используемых в программном пакете Geant4, позволило выявить ряд недостатков этих моделей, которые были устранены в последующих версиях программного пакета.

В ходе данной работы получен большой экспериментальный материал, полная обработка которого даст новую информацию о механизме взаимодействия частиц в ядерной среде.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

1. впервые систематически измерены инклюзивные дифференциальные сечения образования протонов и заряженных пионов в реакциях  $\pi^+, \pi^-, p + Be \rightarrow \pi^+, \pi^-, p + X$  при импульсе пучка 3 – 15 ГэВ/с, в диапазоне углов вылета 20°-125°. Достигнута точность измерения сечений равная 3-10%;
2. впервые измерен выход каонов по отношению к выходу пионов в реакции взаимодействия протонов с импульсом 8,9 ГэВ/с с ядрами бериллия;
3. разработан и применен на практике метод коррекции паразитных кросс-токов в камере TPC широкоапертурного спектрометра HARP;

4. разработан и применен на практике алгоритм геометрической реконструкции треков в камере TPC HARP;
5. разработан и применен на практике метод коррекции ионизационных потерь и многократного кулоновского рассеяния вторичных частиц в мишени;
6. разработано программное обеспечение для статистического моделирования событий в широкоапертурном спектрометре HARP;
7. разработана процедура отбора данных, удовлетворяющих критериям надежной работы широкоапертурного спектрометра и точного измерения дифференциальных сечений;
8. проведено сравнение результатов измерений с предсказаниями некоторых широко распространенных моделей ядерных реакций, используемых в программном пакете Geant4. Выявлено значительное расхождение результатов моделирования и экспериментальных данных, вызванное недостатками данных моделей.

**Апробация работы** Полученные автором и при его участии результаты, включенные в диссертацию, докладывались на семинарах ЛЯП ОИЯИ, на общем семинаре CERN, были представлены на Международных конференциях по физике высоких энергий в Филадельфии (2008 г.) и Париже (2010 г.), а также на Международной конференции по физике высоких энергий Европейского физического общества в Кракове (2009 г.). Основные результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в 5 печатных работах.

**Структура и объем диссертации** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

## Содержание работы

Во Введении рассмотрена проблема образования адронов в пион- и протон-ядерных взаимодействиях при энергии пучка менее 20 ГэВ. Приводится краткий обзор экспериментальных работ, посвященных этой теме. Сформулирована цель данной диссертации, коротко изложено ее содержание. Обоснована актуальность диссертационной работы и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту результаты и положения.

В первой главе описаны постановка и ход эксперимента HARP и показано устройство экспериментальной установки.

Цель эксперимента HARP состояла в точном измерении дифференциальных сечений образования адронов во взаимодействиях протонов и заряженных пионов с различными ядрами на фиксированной мишени. Эксперимент проводился в 2001 и 2002 гг. на вторичном пучке протонного синхротрона CERN. В состав пучка входили, в основном, протоны и заряженные пионы с импульсом в диапазоне от 1,5 до 15 ГэВ/с, с небольшой примесью мюонов и незначительным количеством антипротонов и заряженных каонов. При малых импульсах в пучке также присутствовала электронная компонента. Относительное содержание различных типов частиц изменялось в зависимости от выбранного импульса пучка. Канал обеспечивал импульсный разброс  $\delta p/p \approx 1\%$  и позволял выбрать либо положительно, либо отрицательно заряженные частицы. В дальнейшем, знак заряда частиц пучка будет явно указываться при указании импульса (например, +8 ГэВ/с или -3 ГэВ/с). Детектор в эксперименте HARP был спроектирован для регистрации и измерения свойств вторич-

ных частиц в диапазоне телесного угла, близком к  $4\pi$ . Он состоял из двух основных подсистем – малоапертурного спектрометра и широкоапертурного спектрометра. Схема детектора показана на рис. 1.

В работе используются данные, полученные в 2002 году на бериллиевой мишени с толщиной, равной 5% ядерной длины. Наибольшая статистика событий на этой мишени ( $\sim 8 \times 10^6$ ) была набрана при импульсе пучка +8,9 ГэВ/с. При импульсах пучка  $\pm 3,0$ ,  $\pm 5,0$ ,  $-8,0$ ,  $\pm 12,0$  и  $\pm 15,0$  ГэВ/с было зарегистрировано число событий  $\sim 1 - 2 \times 10^6$  для каждой конфигурации, что вполне достаточно для статистически обеспеченного измерения дифференциальных сечений.

Широкоапертурный спектрометр HARP позволял регистрировать вторичные заряженные частицы в угловой апертуре от  $15^\circ$  до  $140^\circ$ . Основным элементом спектрометра была времяпроекционная камера (TPC), предназначенная для измерения импульса вторичных частиц и их идентификации по ионизационным потерям в газе. Внутри камеры располагалась мишень, окруженная цилиндрическим сцинтилляционным счетчиком (ТС). Снаружи камера была окружена двумя слоями плоских камер с резистивными пластинами (RPC), предназначенных для идентификации вторичных частиц по времени пролета. Все детекторы были помещены в магнитное поле с индукцией 0,7 Тл, направленное вдоль оси пучка.

Малоапертурный спектрометр был предназначен для регистрации вторичных частиц с углом вылета менее  $15^\circ$ . В данной работе измерения, сделанные с его помощью, не используются. Исключение составляют идентификатор мюонов и электромагнитный калориметр, которые применялись для оценки примеси мюонов и электронов в пучке.

Для контроля параметров пучка использовались сцинтилляционные

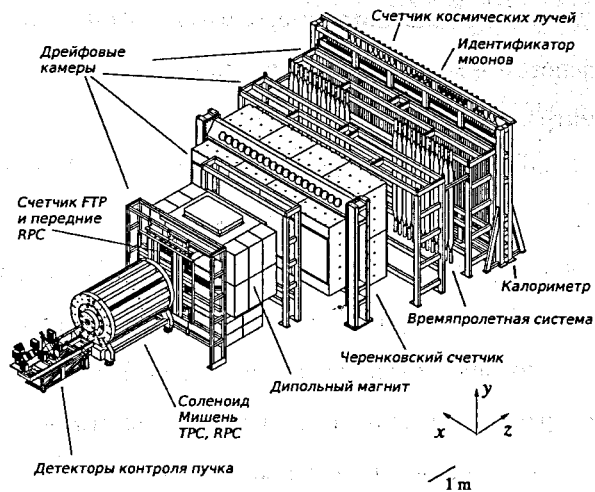


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки HARP

счетчики BS и TDS, а также счетчики HALO-A и HALO-B, имеющие сквозное отверстие и включенные в схему антисовпадений для подавления гало пучка. Идентификация пучковых частиц осуществлялась времяпролетной системой на базе сцинтилляционных счетчиков TDS, TOF-A и TOF-B, с пролетной базой 24,3 м, а также двумя пороговыми черенковскими счетчиками VCA и VCB. Для измерения направления полета частиц и восстановления вершины применялись многопроволочные пропорциональные камеры MWPC1-3.

Прохождение частицы по каналу пучка и попадание ее в мишень (сигнал BEAM) устанавливались по совпадению сигналов со счетчиков BS, TOF-A, TOF-B и TDS во время строб-импульса с ускорителя, и отсутствию в это время сигналов в счетчиках HALO-A и HALO-B. Факт взаимодействия частицы в мишени устанавливался по сигналу со сцинтилляционных счетчиков ITS или FTP в совпадении с сигналом BEAM,

при этом вырабатывался триггер для записи события. Для последующей нормировки измеренных сечений каждое 64-е событие, для которого присутствовал сигнал BEAM, регистрировалось безотносительно к сигналу о взаимодействии в мишени.

Для моделирования, калибровки и реконструкции событий в широкоапертурном спектрометре были созданы комплексы программ TrcSimulation и TrcReconstruction, основанные на методах и алгоритмах, разработанных группой HARP-CDP при участии автора и опубликованных в [A1], [3].

Во второй главе представлено подробное описание методов геометрической реконструкции событий в камере TPC в детекторе HARP.

Регистрация свободных электронов, появляющихся в результате ионизации и дрейфующих в камере TPC, происходила на одном из ее торцов, представляющем собой многопроволочную камеру с запирающей сеткой. Сетка препятствовала дрейфу положительных ионов в рабочий объем камеры TPC. Сигналы снимались с 3972 катодных пластин, расположенных концентрическими рядами, разделенными на шесть секторов. После предварительного усиления и формирования сигналы оцифровывались при помощи быстрых параллельных АЦП. По каждому триггеру сохранялось 300 отсчетов АЦП, соответствующих полному времени дрейфа 30 мкс.

На работу камеры TPC HARP влиял ряд недостатков, вызванных недочетами, допущенными при ее изготовлении и эксплуатации. Один из них был вызван паразитной связью между входными и выходными цепями предусилителей, приводившей к появлению ложных сигналов (кросстоков). Кроме того, электрическое и магнитное поля внутри камеры были искажены. Часть искажений присутствовала постоянно, но некоторые

были вызваны накоплением объемного заряда в камере во время сброса и менялись с течением времени. В искаженных полях дрейф электронов отклонялся от прямолинейной траектории, причем суммарное отклонение могло достигать 10 мм и приводило к значительным систематическим погрешностям при измерении импульса частиц. Влияние этих недостатков устранялось на стадии реконструкции событий, для чего были разработаны соответствующие методы калибровки камеры ТРС.

Реконструкция треков в камере ТРС проводилась следующим образом. Прежде всего, корректировались помехи, вызванные паразитными сигналами. Для этого был разработан модельно-независимый метод, основанный на результатах анализа отклика электроники считывания на пробный заряд. Были выявлены и классифицированы связи между различными каналами и составлены карты кросс-токов. На их основе был разработан алгоритм коррекции помех произвольной величины, который позволял определить для каждого канала поправку к форме и амплитуде сигнала. В результате, влияние паразитных сигналов удалось снизить до уровня, при котором помехи не сказывались на результатах физических измерений в камере ТРС. Амплитуды сигналов в каждом канале корректировалась в соответствии с отклонением коэффициента усиления в канале от среднего уровня. Шумящие и «мертвые» каналы выявлялись в каждом сеансе, и исключались из дальнейшего анализа соответствующего набора данных.

Изолированные во времени группы сигналов на соседних пластинах ТРС (отдельно в каждом ряду) объединялись в кластеры. Для устранения остаточных эффектов кросс-тока при вычислении  $r\phi$ -координаты кластера использовалось не больше трех сигнальных пластин, расположенных в ряду последовательно и получивших наибольший заряд. Вычисленные

координаты кластеров корректировались для устранения влияния искажений полей внутри камеры ТРС с погрешностью менее 300 мкм. Для анализа пространственных образов, составленных кластерами, и распознавания отдельных треков был использован метод гистограмм, первоначально предложенный в эксперименте TOPAZ [4]. Этот метод был модифицирован с учетом особенностей эксперимента HARP и успешно применялся для восстановления треков частиц с поперечным импульсом 50 МэВ/с и выше. Эффективность реконструкции треков была определена путем визуального сканирования событий и составила  $95 \pm 1\%$  (для треков с  $|p_T| > 0,1$  ГэВ/с и  $20^\circ < \theta < 135^\circ$ ). Импульс частиц и их ионизационные потери в газе определялись после аналитической аппроксимации треков. При этом, для устранения остаточных эффектов, вызванных кросс-токами и искажениями полей внутри и на краях камеры ТРС, проводилась коррекция сагитты треков. Величина поправки варьировалась в небольших пределах в зависимости от азимутального и полярного угла и определялась из требования равенства времени пролета отрицательно и положительно заряженных пионов с равным импульсом, составляя в среднем  $\delta(1/p_T) \sim 0,05$  (ГэВ/с) $^{-1}$ .

Использование первичной вершины при аппроксимации трека позволяет почти вдвое улучшить разрешение при измерении поперечного импульса частицы. Однако, при включении первичной вершины в фит трека следует учитывать эффект, возникающий из-за ионизационных потерь и рассеяния вторичной частицы при движении в мишени и в материале детектора. Для этого была применена процедура реконструкции положения «виртуальной» первичной вершины, которая не имела бы смещения относительно экстраполяции трека, зарегистрированного в камере ТРС. Ее положение определялось методом последовательных

приближений путем вычисления ожидаемого смещения вследствие многократного кулоновского рассеяния и ионизационных потерь частицы в веществе. Полученная виртуальная вершина использовалась при окончательной аппроксимации трека. Все вычисления производились для трех гипотез о типе частицы, в предположении что частица является электроном, пионом или протоном. Описанная процедура одновременно позволяла определить значения импульса и угла вылета частицы в вершине, которые затем использовались при расчете дифференциальных сечений.

В результате, были достигнуты следующие характеристики камеры TPC HARP. Абсолютная величина импульса частиц измерялась в камере с систематической ошибкой менее 2%. Импульсное разрешение  $\sigma(1/p_T)$  было равно  $0,20 \text{ (ГэВ/с)}^{-1}$ , и ухудшалось до  $0,25 \text{ (ГэВ/с)}^{-1}$  при малых углах вылета или малой скорости частиц. При подобном разрешении, вероятность неправильной идентификации заряда частицы с  $p_T$ , равным  $2 \text{ ГэВ/с}$ , не превышала 2-3%. Угол вылета частиц измерялся с разрешением  $\delta\theta \sim 9$  мрад (для полярного угла, равного  $60^\circ$ ). Систематическая ошибка измерения полярного угла составляла менее 2 мрад. Ионизационные потери минимально ионизирующих частиц измерялись с разрешением 16% (для треков длиной более 300 мм).

Следует упомянуть критику представленной методической работы и полученных результатов, опубликованную в [5]. Замечания касаются, в основном, процедур калибровки камер RPC и коррекции эффектов, вызванных искажениями поля в камере TPC, которые не рассматриваются подробно в данной работе. Эти замечания вызваны различиями в результатах, достигнутых при калибровке широкоапертурного спектрометра группой HARP-CDP и коллаборацией HARP. Следует отметить, что указанные различия объясняются недочетами, допущенными при прове-

дении анализа данных коллаборацией HARP, поэтому критические замечания, высказанные коллаборацией HARP, не имеют под собой достаточных оснований.

Результаты второй главы опубликованы в работе [A1]. Комментарии по поводу критических замечаний к этой работе, опубликованных в [5], даны в работе [A2].

В третьей главе описана процедура анализа данных и приводятся результаты измерений инклюзивных дифференциальных сечений рождения протонов и заряженных пионов в реакциях  $\pi^+, \pi^-, p + Be \rightarrow \pi^+, \pi^-, p + X$  при импульсе пучка в диапазоне от 3 до 15 ГэВ/с, и выхода каонов в реакции  $p + Be \rightarrow K^+ + X$  при импульсе пучка 8,9 ГэВ/с.

Для последующего анализа отбирались события, в которых однозначно восстановлена траектория пучковой частицы, определен ее тип, а в соответствующем сбросе ускорителя отсутствовали резкие изменения интенсивности. Положение места попадания пучковой частицы в мишень должно лежать в радиусе 12 мм от номинального положения пучка, совпадающего с центром мишени.

Отбирались треки, зарегистрированные только в 1, 3, 4 и 6 секторах камеры TPC. Для надежного восстановления параметров частицы требовалось, чтобы трек состоял не менее чем из 10 кластеров. Вектор импульса трека в вершине не должен лежать вблизи стыков между секторами в пределах  $10^\circ$  по азимутальному углу с одной стороны, и  $2^\circ$  с другой. Этот критерий был обусловлен пониженной эффективностью регистрации вблизи стыков, и зависел от знака заряда частицы: для частиц противоположного заряда, а также при изменении направления индукции магнитного поля критерий менялся на противоположный. Угол



вылета треков должен лежать в пределах от  $20^\circ$  до  $125^\circ$ . Кроме того, требовалось, чтобы экстраполяция трека проходила через область мишени. При вычислении значений дифференциальных сечений применялись поправки, учитывающие эффективность регистрации треков, экспериментальное разрешение спектрометра, влияние критериев отбора событий, а также вероятности повторного взаимодействия вторичных частиц в мишени и распада вторичных пионов.

Для абсолютной нормировки потока пучковых частиц отбирались события, которые были зарегистрированы по решению нормировочного триггера. При этом требовалось, чтобы пучковая частица удовлетворяла тем же критериям, что и при отборе событий с взаимодействием в мишени.

Статистическое моделирование событий осуществлялось при помощи комплекса программ TrcSimulation, разработанного на основе программного пакета Geant4. Была создана модель широкоапертурного спектрометра, учитывающая взаимодействие пучковой частицы в мишени, прохождение вторичных частиц через вещество и моделирование отклика детекторов, которая позволяла достоверно воспроизвести экспериментально измеренные величины. Для моделирования взаимодействия протонов с импульсом ниже  $12 \text{ ГэВ}/c$  был использован стандартный набор моделей физических процессов QGSP\_BIC. Для моделирования взаимодействия пионов, а также протонов с импульсом  $12$  и  $15 \text{ ГэВ}/c$  применялся специально разработанный набор моделей физических процессов HARP\_CDP. Для расчета содержания электронов и мюонов в пучке была создана программа моделирования магнитооптического тракта T9 протонного синхротрона CERN.

Для идентификации вторичных частиц каждой из них приписыва-

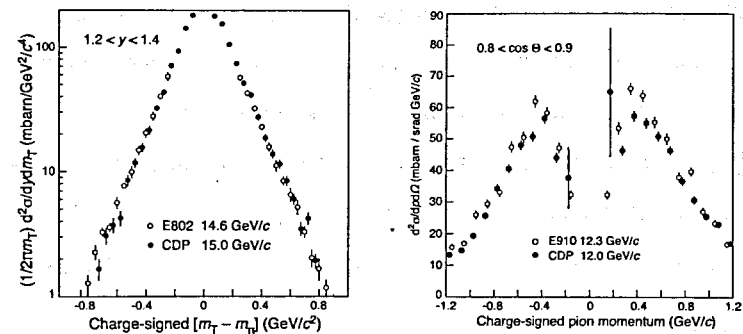


Рис. 2. Слева: сравнение измеренных в данной работе (черные точки) сечений рождения заряженных пионов в реакции  $p + Be \rightarrow \pi^+, \pi^- + X$  при импульсе пучка  $+15.0 \text{ ГэВ}/c$  с сечениями, измеренными в эксперименте E802 при импульсе пучка  $+14.6 \text{ ГэВ}/c$  (белые точки). Справа: сравнение измеренных в данной работе (черные точки) сечений рождения заряженных пионов в реакции  $p + Be \rightarrow \pi^+, \pi^- + X$  при импульсе пучка  $+12.0 \text{ ГэВ}/c$  с сечениями, измеренными в эксперименте E910 при импульсе пучка  $+12.3 \text{ ГэВ}/c$  (белые точки).

лась вероятность являться протоном, пионом (мюоном) или электроном. Сумма этих вероятностей нормировалась на единицу, чтобы сохранить число частиц. Вероятности для каждой частицы вычислялись исходя из измерений ионизационных потерь в камере TPC и времени пролета при помощи камер RPC с учетом относительного содержания частиц данного типа в выходном продукте реакции. Относительное содержание частиц определялось путем статистического моделирования с последующим взвешиванием для достижения согласия с экспериментальными данными. Особая процедура была разработана для идентификации каонов и дейтронов.

Идентификация пучковых частиц проводилась на основании сиг-

налов черенковских счетчиков и измерений времени пролета в системе детекторов контроля пучка. Содержание мюонов в пучке оценивалось при помощи идентификатора мюонов. Электроны при малых импульсах (3–5 ГэВ/с) отсеивались детекторами контроля пучка. При более высоких импульсах их содержание в пучке оценивалось при помощи электромагнитного калориметра и программы моделирования тракта пучка.

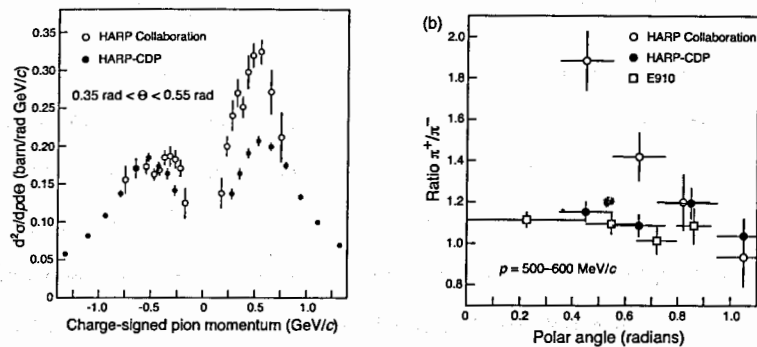


Рис. 3. Слева: сравнение измеренных в данной работе (черные точки) сечений рождения заряженных пионов в реакции  $p + Be \rightarrow \pi^+, \pi^- + X$  при импульсе пучка +12.0 ГэВ/с с результатами, полученными коллаборацией HARP (белые точки). Показаны полные ошибки. Справа: для этой же реакции показано сравнение измеренного в данной работе (черные точки) отношения выходов  $\pi^+/\pi^-$  с результатами коллаборации HARP (белые точки) в зависимости от полярного угла; приведено аналогичное отношение, измеренное в эксперименте E910 при импульсе пучка +12.3 ГэВ/с. Результаты коллаборации HARP показаны с полными ошибками. Для результатов, полученных в эксперименте E910 и в данной работе, показаны только статистические ошибки.

Для каждой комбинации налетающих и вторичных частиц сечения были измерены в интервалах поперечного импульса вторичных частиц  $p_T$  (в диапазоне от 0,1 до 1,25 ГэВ/с) и полярного угла их вылета  $\theta$  (в

диапазоне от  $20^\circ$  до  $125^\circ$ ). При каждом импульсе пучка  $\pm 3,0; \pm 5,0; -8,0; +8,9; \pm 12,0$  и  $\pm 15,0$  ГэВ/с измерения были проведены в 96 интервалах  $p_T$  и  $\theta$ . Систематическая ошибка определялась, в основном, экспериментальным разрешением спектрометра и погрешностями, связанными с абсолютной нормировкой потока, оценкой эффективности регистрации вторичных частиц, расчетом относительного содержания частиц данного типа в выходном продукте реакции и учетом влияния критериев отбора, и составляла в большинстве интервалов от 3 до 5%.

Большая статистика событий, набранная при импульсе пучка 8,9 ГэВ/с, позволила измерить выход вторичных каонов по отношению к выходу пионов в реакции  $p + Be \rightarrow K^+ + X$ . Указанное отношение, усредненное по углу вылета в диапазоне  $20^\circ < \theta < 32^\circ$  и по импульсу в диапазоне от 400 до 700 МэВ/с, равно

$$R_K(p, \theta) = \frac{d^2\sigma_K(p, \theta)/dpd\Omega}{d^2\sigma_\pi(p, \theta)/dpd\Omega} \approx 0.02 \pm 0.003.$$

Результаты данной работы находятся в хорошем согласии с измерениями на протонных пучках с импульсом 14,6 и 12,3 ГэВ/с, выполненными в экспериментах E802 [6] и E910 [7], соответственно (рис. 2). В то же время, они существенно отличаются от результатов, опубликованных коллаборацией HARP [8] (рис. 3). Это тем более примечательно, если учесть, что в анализе, проведенном коллаборацией HARP, были использованы те же исходные экспериментальные данные, что и в данной работе. Указанное различие объясняется недочетами, допущенными при анализе данных коллаборацией HARP и связанными, главным образом, с недостаточно хорошей калибровкой камер TPC и RPC.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [A3, A4]. Причины расхождения измеренных сечений с результатами, полученными

коллекцией HARP, опубликованы как приложение к [A3].

В четвертой главе полученные результаты использованы для проверки правильности феноменологических моделей ядерных взаимодействий, применяемых в программном пакете Geant4.

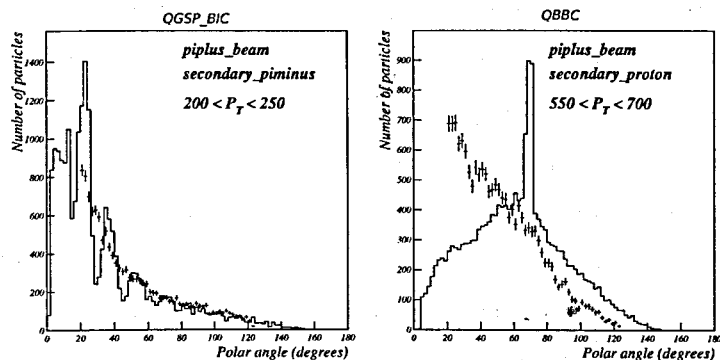


Рис. 4. Набор моделей QGSP\_BIC (слева): распределение угла вылета  $\pi^-$ -мезонов, образованных налетающими  $\pi^+$ -мезонами; набор моделей QBBC (справа): распределение угла вылета протонов, образованных налетающими  $\pi^+$ -мезонами. Кресты соответствуют экспериментальным данным, сплошная линия показывает результат моделирования с помощью Geant4. Масштаб выбран исходя из равенства интегральных выходов частиц в интервале углов от  $20^\circ$  до  $125^\circ$ .

Экспериментально измеренные спектры протонов и заряженных пионов при импульсе пучка  $+8,9$  ГэВ/с и  $-8,0$  ГэВ/с были сравнены с предсказаниями этих моделей (в работе использовалась версия пакета Geant4 9.1). Анализ результатов сравнения, в котором за основной критерий взята возможность адекватного описания экспериментально измеренной формы угловых спектров вторичных частиц, позволил выявить существенные недостатки пакета Geant4: ни один набор моделей не был признан удовлетворительно описывающим все данные одновременно.

Для большинства наборов моделей были отмечены узкий пик вторичных протонов с углом вылета, близким к  $70^\circ$ , и наличие структуры в распределении вторичных пионов (рис. 4). Эти характерные особенности спектра не наблюдаются в экспериментальных данных. По результатам данной работы, авторами пакета Geant4 указанные недостатки были устранены в последующих версиях программы [9].

Сравнение измеренных отношений выходов  $K^+/\pi^+$  и  $d/p$  из ядер бериллия под действием протонов с импульсом  $+8,9$  ГэВ/с с предсказаниями некоторых моделей, входящих в состав пакета Geant4, показало, что модель FRITIOF неплохо описывает данные, но не воспроизводит зависимость от импульса для каонов. Предсказания модели бинарного внутриядерного каскада с результатами измерений не согласуются.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [A3, A5].

## Заключение

### Основные результаты и выводы

1. Впервые систематически измерены инклюзивные дифференциальные сечения образования протонов и заряженных пионов на ядрах бериллия протонами и заряженными пионами с импульсом  $\pm 3,0$ ;  $\pm 5,0$ ;  $-8,0$ ;  $+8,9$ ;  $\pm 12,0$  и  $\pm 15,0$  ГэВ/с (знак импульса соответствует знаку электрического заряда частиц в пучке). Измерения выполнены на установке HARP в диапазоне углов вылета частиц от  $20^\circ$  до  $125^\circ$ . Достигнута точность измерения сечений равная 3–10%. Полученные результаты являются экспериментальной основой для развития теории сильных взаимодействий и имеют важное значе-

ние для уточнения параметров феноменологических моделей ядерных реакций.

2. Впервые измерен выход вторичных каонов по отношению к выходу пионов в реакции взаимодействия протонов с ядрами бериллия при импульсе пучка 8,9 ГэВ/с. Измерения сделаны в угловом диапазоне  $20^\circ < \theta < 32^\circ$ . Указанное отношение равно  $0.02 \pm 0.003$ .
3. Полученные данные восполняют пробел в той области, где в настоящее время точные экспериментальные измерения особенно востребованы в связи с проектированием новых ускорительных комплексов (нейтринная фабрика, мюонный коллайдер), необходимостью расчета нейтринных спектров в экспериментах с ускорительными и атмосферными нейтрино и повышением требований к точности предсказаний программ моделирования.
4. Проведено сравнение результатов измерений с предсказаниями ряда феноменологических моделей ядерных реакций, используемых в широко распространенном и применяемом для моделирования практически всех современных и планируемых установок (включая эксперименты на LHC и FAIR) программном пакете Geant4. Выявлено значительное расхождение результатов моделирования и экспериментальных данных, вызванное недостатками этих моделей. По результатам данной работы, авторами пакета Geant4 в последующих версиях программы указанные недостатки были устранены. В настоящее время, улучшенная версия пакета Geant4 применяется для расчетов в ОИЯИ, CERN и других исследовательских центрах физики высоких энергий.

5. Выполнена методическая работа, включающая в себя:

- а) разработку методов и программного обеспечения для калибровки отдельных каналов камеры ТРС, коррекции паразитных сигналов, геометрической реконструкции треков и первичной вершины, и вычисления поправки на ионизационные потери и многократное кулоновское рассеяние вторичных частиц в материале мишени;
- б) разработку программного обеспечения для статистического моделирования событий в широкоапертурном спектрометре HARP;
- в) разработку процедуры отбора данных, удовлетворяющих критериям надежной работы широкоапертурного спектрометра и точного измерения дифференциальных сечений.

#### **Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

- A1. Ammosov V., ..., Zhemchugov A. et al. The HARP Time Projection Chamber: Characteristics and physics performance // Nucl. Instrum. Meth. 2008. Vol. A588. Pp. 294–317.
- A2. Ammosov V., ..., Zhemchugov A. et al. Rebuttal to: Comments on 'The HARP Time Projection Chamber: characteristics and physics performance' // Nucl. Instrum. Meth. 2008. Vol. A588. Pp. 321–322.
- A3. Bolshakova A., ..., Zhemchugov A. et al. Cross-sections of large-angle hadron production in proton- and pion-nucleus interactions I: beryllium

nuclei and beam momenta of +8.9 GeV/c and -8.0 GeV/c // Eur. Phys. J. 2009. Vol. C62. Pp. 293–317.

A4. Bolshakova A., ..., Zhemchugov A. et al. Cross-sections of large-angle hadron production in proton- and pion-nucleus interactions II: beryllium nuclei and beam momenta from  $\pm 3$  GeV/c to  $\pm 15$  GeV/c // Eur. Phys. J. 2009. Vol. C62. Pp. 697–754.

A5. Bolshakova A., ..., Zhemchugov A. et al. Comparison of Geant4 hadron generation with data from the interactions with beryllium nuclei of +8.9 GeV/c protons and pions, and of -8.0 GeV/c pions // Eur. Phys. J. 2008. Vol. C56. Pp. 323–332.

### Цитированная литература

1. Agostinelli S. et al. Geant4 – a simulation toolkit // Nucl. Instrum. and Meth. 2003. Vol. A506, no. 3. Pp. 250 – 303.
2. Allison J. et al. Geant4 developments and applications // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. Vol. 53, no. 1. Pp. 270–278.
3. Ammosov V. et al. The HARP resistive plate chambers: Characteristics and physics performance // Nucl. Instrum. Meth. 2009. Vol. A602. Pp. 639–643.
4. Fujii K., Kawabata S., Miyamoto A., Ochiai F. Track reconstruction with the TRISTAN TOPAZ TPC // Nucl. Instrum. Meth. 1988. Vol. A264. P. 297.

5. HARP Collaboration. Comments on: “The Harp Time Projection Chamber: Characteristics and physics performance” by V. Ammosov et al. // Nucl. Instrum. Meth. 2008. Vol. 588, no. 3. Pp. 318 – 320.

6. Abbott T. et al. Measurement of particle production in proton induced reactions at 14.6 GeV/c // Phys. Rev. 1992. Vol. D45. Pp. 3906–3920.

7. Chemakin I. et al. Inclusive soft pion production from 12.3 and 17.5 GeV/c protons on Be, Cu, and Au // Phys. Rev. 2002. Vol. C65. P. 024904.

8. Catanesi M. G. et al. Large-angle production of charged pions with 3–12.9 GeV/c incident protons on nuclear targets // Phys. Rev. 2008. Vol. C77. P. 055207.

9. Uzhinsky V. et al. GEANT4 simulation of hadronic interactions at 8–10 GeV/c: response to the HARP-CDP group // Eur. Phys. J. 2009. Vol. C61. Pp. 237–246.

Получено 29 июня 2011 г.