

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2011-106

На правах рукописи  
УДК 539.172.12, 539.172.5

ГОСТКИН  
Михаил Иванович

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ  
 $\pi^\pm, p + C, Si \rightarrow \pi^\pm, p \dots$  ПРИ 3–15 ГэВ/с  
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2011

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова  
Объединенного института ядерных исследований и Европейском центре  
ядерных исследований.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Шелков Георгий Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Глаголев Владимир Викторович  
(ЛЯП ОИЯИ, г. Дубна)  
доктор физико-математических наук  
Болотов Владимир Николаевич  
(ИЯИ РАН, г. Москва)

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

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседа-  
нии диссертационного совета Д 720.001.03 при Лаборатории ядерных про-  
блем им. В. П. Дзелепова в Объединенном институте ядерных исследова-  
ний, расположенном по адресу: Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-  
Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного инсти-  
тута ядерных исследований.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные пе-  
чатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого сек-  
ретаря диссертационного совета.

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



Батусов Юрий Александрович.

материала мишени. Точность существующих теоретических моделей также недостаточна для проведения подобных расчетов. В связи с этим, экспериментальное измерение сечений рождения пионов пучками пионов и протонов на углероде с точностью не хуже 10% имеет решающее значение при проектировании мюонного коллайдера.

Точное измерение данных сечений также важно для расчетов потоков и спектров атмосферных нейтрино, так как свойства ядер углерода близки свойствам ядер азота — основной компоненты земной атмосферы. При этом, при энергиях первичных протонов менее 20 ГэВ, основная часть вторичных пионов испускается в диапазоне углов  $> 15^\circ$ . В настоящее время потоки и спектры атмосферных нейтрино определяются экстраполяцией измерений выходов пионов в малые углы, и имеют значительную погрешность. Таким образом, прямое экспериментальное измерение сечений рождения пионов на ядрах снизит погрешность определения потоков и спектров нейтрино и даст возможность уменьшить систематическую ошибку в экспериментах по поиску нейтринных осцилляций (таких, как Super KamioKande).

Сочетание измерений сечений образования адронов (включая более тяжелые частицы, такие как дейтроны) на ядрах углерода с аналогичными измерениями на других ядрах (например меди и др.) позволяет исследовать их зависимость от массы и заряда ядер, что явится критической проверкой теорий, претендующих на полное описание адрон-ядерных взаимодействий. Можно отметить повышение интереса к подобным теориям, связанное с планируемой реализацией программ по исследованию ядро-ядерных столкновений (эксперименты на ускорительных комплексах FAIR и NICA), поэтому получение экспериментальных данных хорошего качества по адрон-ядерным взаимодействиям в настоящее вре-

мя является актуальной задачей.

### **Цель работы**

Получение новых экспериментальных данных для проектирования мюонного источника мюонного коллайдера, расчетов нейтринных спектров в экспериментах по поиску осцилляций атмосферных нейтрино и развития теории сильных взаимодействий, включая:

1. измерение дважды дифференциальных сечений образования протонов и заряженных пионов в реакциях  $\pi^{\pm}, p + C, Si \rightarrow \pi^{\pm}, p + X$ , при импульсе пучков от 3 до 15 ГэВ/с, в диапазоне углов вылета от  $20^{\circ}$  до  $125^{\circ}$  и для поперечных импульсов вторичных частиц от 0.1 до 1.25 ГэВ/с;
2. сравнение выходов и спектров вторичных адронов (включая дейтроны) на различных ядрах в зависимости от их массового числа;
3. разработку и применение методов калибровки в измерении времени пролета в спектрометре больших углов и ионизационных потерь во время проекционной камере эксперимента HARP [4].

Диссертация обобщает результаты завершенных работ автора, выполненных в 1999-2011 г.г. в Объединенном институте ядерных исследований и Европейском центре ядерных исследований.

### **Научная новизна**

Впервые с недостигавшейся ранее полнотой измерены сечения рождения протонов и заряженных пионов при взаимодействии пионов и протонов с ядрами углерода и меди в при импульсах пучков 3-15 ГэВ/с и в широком диапазоне углов вылета вторичных частиц. Получены зависимости сечений и множественностей от энергии пучка и массы ядра.

Впервые измерены отношения выходов дейтронов к выходу протонов на различных ядрах в том же диапазоне импульсов пучков.

### **Практическая значимость**

Получены новые экспериментальные данные принципиального научного значения: они необходимы для проектирования мюонного источника ускорителя нового поколения — мюонного коллайдера; эти данные существенны для интерпретации результатов экспериментов по поиску осциллирующих атмосферных нейтрино.

Разработана методика измерения ионизационных потерь во время-проекционной камере эксперимента HARP, что позволило учесть влияние аппаратурных эффектов. Созданы новые методы калибровки камер RPC в случае применения их для прецизионного измерения времени пролета, позволившие достичь собственного разрешения 127 пикосекунд. Данные методы и созданное на их основе программное обеспечение применены при анализе данных эксперимента HARP и могут использоваться в новых экспериментах с аналогичными детекторами.

Измерены выходы и спектры вторичных адронов (включая дейтроны), а также их зависимости от энергии пучка и массового числа ядер мишени. Это новые экспериментальные данные, которые могут быть использованы для развития теории адрон-ядерных реакций, а также применены для уточнения и расширения возможностей программ-генераторов адронных взаимодействий [5].

### **Автор защищает**

1. Результаты экспериментального исследования процессов инклюзивного рождения протонов и заряженных пионов на ядрах углерода и меди при энергии налетающих протонов и пионов 3, 5, 8, 12, 15 ГэВ/с в диапазоне углов вылета  $20^\circ - 125^\circ$ .

2. Измерение отношения выходов дейтронов к выходу протонов в реакциях  $p + A \rightarrow (p, d) + X$  при импульсе налетающих протонов 3-15 ГэВ/с, где  $A = Be, C, Cu, Sn, Ta, Pb$ .

3. Методы калибровки и результаты их применения для измерений ионизационных потерь во времяпроекционной камере эксперимента HARP.

4. Методы калибровки и результаты их применения для измерений времени пролета частиц в спектрометре больших углов эксперимента HARP.

### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались (в том числе и автором) на международных конференциях по физике высоких энергий ICHEP-2008, EPS-NEP-2009, ICHEP-2010, на совещании по физике нейтрино (ЦЕРН, октябрь 2009 г.), на конференциях по камерам RPC в Сеуле (2005 г.) и в Бомбее (2008 г.), на семинарах Объединенного института ядерных исследований и Европейского центра ядерных исследований. Основные результаты опубликованы в журналах «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research», «European Physical Journal C - Particles and Fields», «Journal of Instrumentation».

Присуждена первая премия Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (2008-2009 г.) за цикл работ «Измерение сечений рождения адронов в протон-ядерных и пион-ядерных взаимодействиях на пучках с импульсами 3-15 ГэВ/с» (в составе группы HARP-CDP).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

# Содержание работы

Во Введении сформулированы цели работы, обоснованы ее новизна, практическая ценность и актуальность.

Первая глава содержит описание экспериментальной установки HARP (рис. 1). Детектор HARP состоит из спектрометра малых углов, спектрометра больших углов и системы мониторингирования пучка.

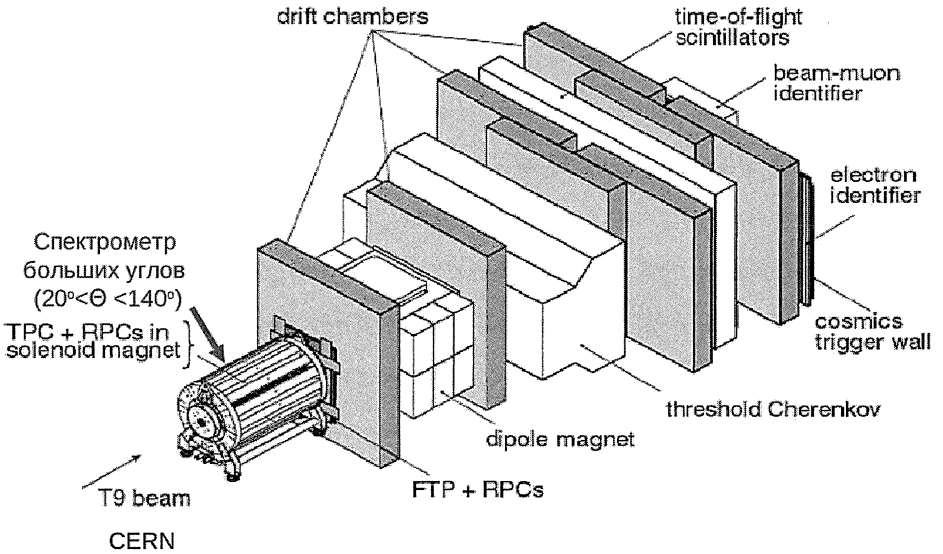


Рис. 1. Экспериментальная установка HARP.

Система мониторингирования пучка состоит из 4 многопроволочных пропорциональных камер, которые измеряют координаты и направление пучковой частицы с точностью  $\approx 1$  мм и  $\approx 0.2$  мрад, двух пороговых черенковских детекторов и времяпролетной системы из трех сцинтилляционных детекторов. Времяпролетная система и черенковские детекторы использовались для идентификации частиц пучка. Кроме того, времяпро-

летная система позволяла определять момент взаимодействия частиц в мишени с точностью 107 пикосекунд.

Спектрометр малых углов построен на основе дипольного магнита; для восстановления треков частиц использовались большие плоские дрейфовые камеры; для идентификации частиц использовались времяпролетный спектрометр, пороговый черенковский детектор и электромагнитный калориметр. Расположенная за калориметром мюонная система выполняла функцию идентификации мюонов.

Спектрометр больших углов представлял собой времяпроекционную камеру ТРС, окруженную пластинами резистивных плоскопараллельных камер RPC. Эти детекторы помещены в соленоидальный магнит с равномерным магнитным полем 0.7 Т, параллельным направлению пучка ускорителя.

Используемые мишени помещались внутри ТРС, которая регистрировала треки вторичных заряженных частиц, позволяя определить их импульсы и углы выхода из мишени, а также идентифицировать частицы по ионизационным потерям  $dE/dx$ . Система RPC позволяла идентифицировать частицы по времени пролета.

Автор принимал активное участие в разработке концепции проекта NARP с учетом радиационной обстановки в месте расположения детекторов, в моделировании ключевых свойств спектрометрического комплекса, в эксплуатации установки во время набора данных, а также в анализе собранных экспериментальных данных.

**Вторая глава** посвящена калибровке спектрометра больших углов [A1], [A2], [A3], [A4], [6]. Она состоит из двух разделов. Первый посвящен калибровке ТРС, второй — калибровке RPC. В первом разделе приводятся дизайн и характеристики ТРС, описана процедура устрани-



ния существенных дисторсий (искажений) формы треков, измеряемых в ТРС, вызванных недостатками аппаратуры. Из-за ограниченных сроков проведения эксперимента (1.5 года) полностью устранить эти аппаратурные недостатки не удалось. Остались нескомпенсированными дисторсии двух принципиально разных типов: статические, имеющиеся постоянно, и динамические, возникающие при работе ускорителя вследствие накопления объемного заряда ионов аргона внутри ТРС. Величина дисторсий составляла 8-10 мм (статические) и 10-15 мм (динамические, к концу сброса ускорителя) при радиусе ТРС всего около 400 мм.

Для внесения поправок на дисторсии проведена детальная калибровка ТРС, описанная в работе [A1]. Использовались треки, проходившие через узкие зоны перекрытия камер RPC, что позволяло предсказывать «неискаженные» траектории частиц. В результате были получены поправки, которые сократили статические дисторсии до 100-150 микрон, а динамические - до 200-250 микрон. Треки восстанавливались с систематической погрешностью в пространственной координате не более 300 микрон. Погрешность измерения импульса частиц составила около 2%, а разрешение по поперечному импульсу  $\sigma(1/P_T) = 0.20 - 0.25$  (ГэВ/с)<sup>-1</sup>.

Основная часть раздела посвящена описанию разработанной методике калибровки измерений ионизационных потерь  $dE/dx$  в ТРС и применению этой методики в условиях эксперимента HARP.

Удельная ионизация  $dE/dx$  вычислялась, как отношение просуммированных зарядов сигнальных пластин к эффективной длине трека. С целью достижения наилучшего разрешения по  $dE/dx$  исключались заряды с двух сигнальных пластин, имеющих максимальный заряд. Во время набора данных регистрировались атмосферное давление и температура плоскости сигнальных пластин, что позволило рассчитать поправки на изменение

температуры и давления газа в ТРС.

Наблюдаемая удельная ионизация  $(dE/dx)_0$  корректировалась на давление и температуру согласно полученной формуле:

$$dE/dx = (dE/dx)_0 / (P1 [1 + P2 \cdot (\xi - \xi_0)]), \quad (1)$$

где  $\xi = T/P$  и  $\xi_0 = 0.318$ . Параметр  $\xi_0$  получен, как отношение характерных температуры  $T_0 = 25^\circ C = 298 K$  и давления  $P_0 = 938$  гПа.

Для определения коэффициентов  $P1$  и  $P2$  использовались измерения  $(dE/dx)_0$  отрицательных пионов в диапазоне импульсов 0.45-0.80 ГэВ/с, для которых ионизационные потери близки к минимальным.

Численно  $dE/dx$  в уравнении (1) определяется из аппроксимации распределения ионизационных потерь функцией Гаусса, причем диапазон  $dE/dx$  обрезан для больших  $dE/dx$  на уровне 50% от максимума пика (рис. 2).

Ожидаемая линейность функции  $dE/dx(\xi)$  подтверждается данными для шести секторов ТРС (рис. 3).

Выбор значения  $\xi_0 = 0.318$  определяется тем, что он позволяет уменьшить корреляцию между параметрами  $P1$  и  $P2$ . Параметр  $P1$  численно равен ионизационным потерям  $dE/dx$  при  $\xi = 0.318$ . Для восьми различных наборов данных этот параметр варьируется в пределах  $\pm 5\%$  от среднего значения. Эти вариации представляют собой внутреннюю «амплитудную нестабильность» ТРС установки HARP.

Принципиальным достижением коррекции ионизационных потерь для каждого трека согласно формуле (1) явилось устранение зависимости ионизационных потерь от давления и температуры. Более того, они стали представлять собой нормированную величину: минимальная ионизация  $dE/dx$  становится близка к единице. Проведение коррекций отдельно

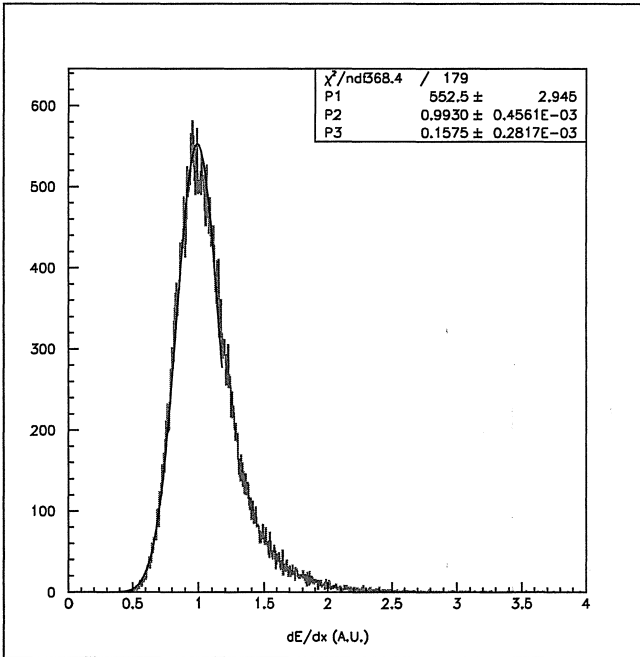


Рис. 2. Аппроксимации распределения ионизационных потерь функцией Гаусса.

для каждого набора данных позволило устранить эффект долговременного дрейфа сбора заряда с сигнальных пластин.

Кроме того, была проведена коррекция ионизационных потерь на зависимость от полярного угла  $\theta$ , которая возникает из-за исключения сигнальных пластин с двумя максимальными зарядами. Предложенная поправочная функция имеет вид:

$$dE/dx = (dE/dx)_0 / (C0 + C1 / \sin \theta + C2 / \sin^2 \theta),$$

где  $C0$ ,  $C1$ ,  $C2$  - секторозависимые коэффициенты.

Предложенные автором коррекции позволили превзойти разрешение (22-25%), ранее достигнутое в коллаборации HARP-CDP. В результате вышеуказанных коррекций достигнуто разрешение  $dE/dx \approx 16\%$ , что близ-

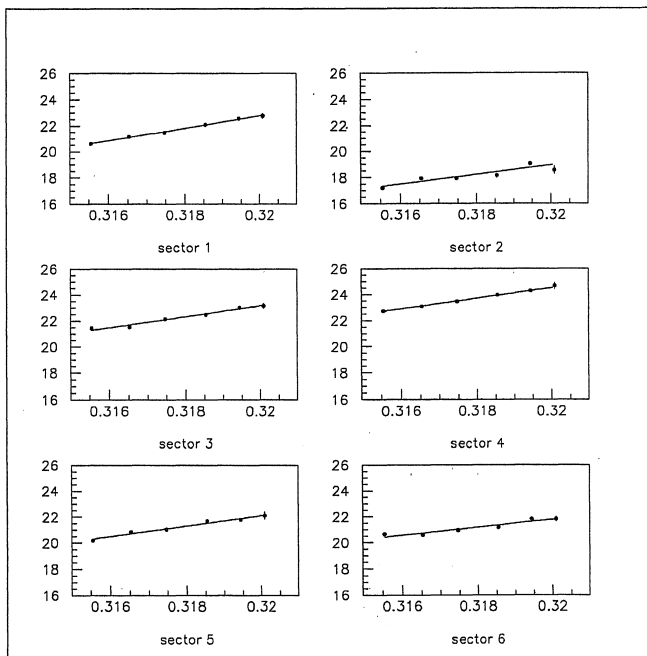


Рис. 3. Зависимость удельных ионизационных потерь  $dE/dx$  от  $\xi = T/P$  (К/гПа) для 6 секторов TPC.

ко к теоретическому пределу для данной конструкции детектора. Измерения  $dE/dx$  позволяли разделять пионы и протоны до импульсов около 800 МэВ/с (рис. 4(а)).

Во втором разделе описываются принцип работы RPC, дизайн и электроника считывания RPC HARP, условия эксплуатации; приводится детальное описание калибровки системы RPC [A3].

Ключевыми поправками были коррекции на суточные колебания температуры и на зависимость времени регистрации сигнала от его амплитуды. Поправка на суточные колебания температуры достигала 500 и более пикосекунд и определялась отдельно для каждого из 240 каналов. По-

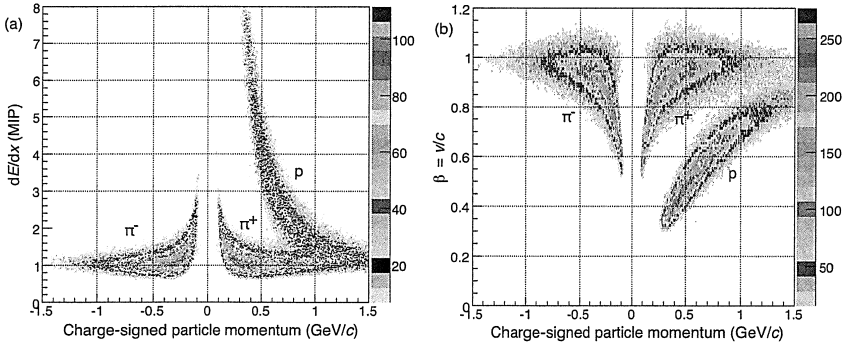


Рис. 4. Результаты калибровки измерения: (а) ионизационных потерь в ТРС, (б) времени пролета в спектрометре больших углов.

правка на зависимость времени от амплитуды сигнала достигала нескольких наносекунд и вычислялась в два этапа. На первом этапе корректировался основной эффект, предполагавшийся одинаковым для всех каналов, на втором этапе устранялись отдельно для каждого канала меньшие эффекты. Следует отметить, что измеряемое время пролета по величине составляло несколько наносекунд, а поправки сравнимы с измеряемым временем пролета. Поэтому выполненный нами расчет поправок обеспечил достижение высокоэффективной идентификации частиц по времени пролета.

Другие поправки, в основном, учитывают особенности распространения сигналов вдоль поверхности камеры. В частности, корректировалось измеренное время прихода сигнала в зависимости от координаты точки попадания частицы в камеру. Эта зависимость связана как с распространением сигнала вдоль пластин RPC, так и с распространением сигнала в кабелях электроники. Величины этих поправок достигали 200 пикосекунд.

Собственное временное разрешение RPC определялось с помощью

треков, проходящих через области перекрытий RPC. В результате калибровок, проведенных по созданной методике, собственное разрешение RPC составило в среднем 127 пикосекунд. Этот результат наряду с [7], [8] можно отнести к лучшим в мире на момент опубликования в литературе.

Время пролета частицы  $t_{\text{TOF}}$  вычислялось по формуле

$$t_{\text{TOF}} = t_{\text{RPC}} - t_{\text{tgt}} - t_0 ,$$

где  $t_{\text{RPC}}$  - время, измеренное RPC после всех коррекций,  $t_{\text{tgt}}$  - время прихода пучковой частицы на мишень, измеренное пучковыми счетчиками, а  $t_0$  - константы, характеризующие каждый из каналов RPC. Значение  $t_0$  определялось при помощи треков  $\pi^-$  с  $0.25 \text{ GeV}/c \leq p_T \leq 0.9 \text{ GeV}/c$  по формуле

$$t_0 = t_{\text{RPC}} - t_{\text{tgt}} - t_{\text{TOF}}^{\text{expected}} ,$$

где  $t_{\text{TOF}}^{\text{expected}}$  - время пролета, вычисляемое из импульса пиона, измеренного в TPC.

Разрешение по времени пролета складывалось из собственного разрешения RPC (127 пикосекунд), точности измерения времени попадания пучковой частицы на мишень (107 пикосекунд) и более мелких вкладов ( $\approx 50$  пикосекунд). Суммарно разрешение по времени пролета составляло 175 пикосекунд. Такое разрешение обеспечило разделение пионов и электронов в диапазоне импульсов 150-200 МэВ/с, где энергетические потери пионов и электронов в газе TPC сравнимы, что не позволяет провести идентификацию по  $dE/dx$ . В этом диапазоне она возможна только с использованием RPC. Разделение пионов и протонов осуществлялось вплоть до импульсов 1.5 ГэВ/с на пролетной базе порядка 50-100 см. (рис. 4(b)). Это достижение ставит времяпролетную систему HARP в число лучших устройств подобного типа.

**В третьей главе** описана разработанная при участии автора методика обработки экспериментальных данных и представлены полученные экспериментальные результаты [A5], [A6]. Приводятся обсуждение экспериментальных результатов и сравнение их с результатами других экспериментов.

Представлены результаты измерений дифференциальных сечений  $d^2\sigma/(dp \cdot d\Omega)$  рождения  $\pi^\pm$  и протонов во взаимодействиях  $\pi^\pm$  и протонов с мишенями из углерода и меди. Измерения проводились при импульсах пучковых частиц 3, 5, 8, 12 и 15 ГэВ/с в диапазоне поперечных импульсов вторичных частиц от 100 МэВ/с до 1.25 ГэВ/с. Угловой акцептанс по полярному углу измерений составлял  $20 \div 125$  градусов от оси пучка.

Для каждой из комбинаций типа мишени, сорта вторичной частицы, типа и импульса пучковой частицы представлено до 96 значений дифференциального сечения (8 интервалов по углу рассеяния и 12 по поперечному импульсу вторичной частицы). В качестве примера на рис. 5 приведены дифференциальные сечения рождения протонов и заряженных пионов в интервале углов вылета  $20^\circ - 30^\circ$  на углеродной мишени для протонов с импульсами 3, 8, 15 ГэВ/с. Сечения приведены в зависимости от поперечного импульса, причем «отрицательные» импульсы соответствуют отрицательно заряженным частицам. Характерная погрешность измеренных сечений  $3 \div 10\%$ . Полученные результаты существенно превосходят в большинстве интервалов имеющиеся в литературе как по полноте, так и по точности измерений и включены в международную базу данных Durham Hepdata [9].

На рис. 6 представлено сравнение полученных результатов с результатами экспериментов E802 [10] (верхний рисунок), E910 [11] (центральный рисунок) и «коллаборация NARP» [12] (нижний рисунок) на ядрах ме-

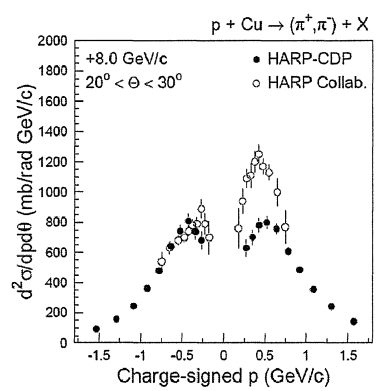
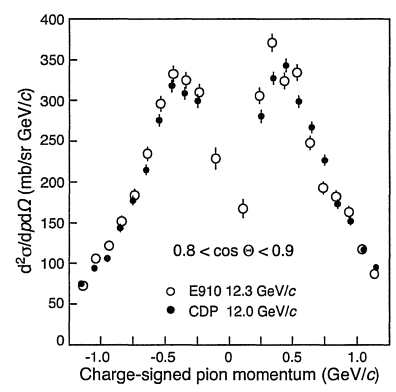
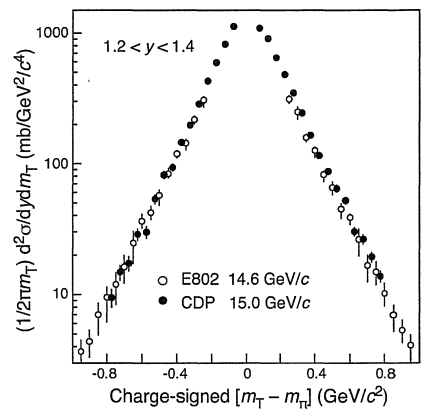
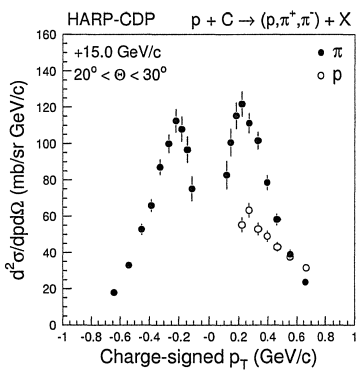
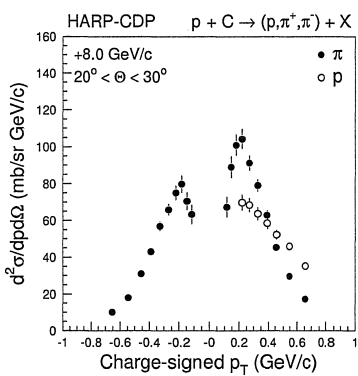
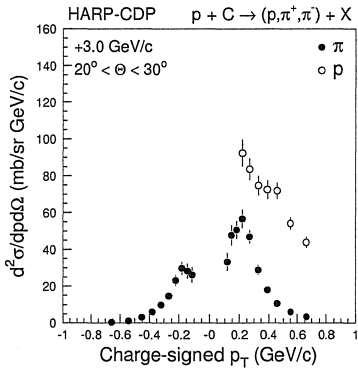


Рис. 5. Сечения рождения адронов на угле- роде.

Рис. 6. Сравнение с экспериментами E802, E910 (BNL) и «HARP Collaboration» на ядрах меди.



ди. Сравнение с экспериментом E802 показано в терминах Лоренц-инвариантного сечения в зависимости от поперечной массы. Результаты хорошо согласуются с большинством ранее опубликованных существенно менее полных данных. В то же время имеется значительное (до полутора раз) расхождение с результатами, опубликованными коллаборацией HARP в 2007-2009 гг.

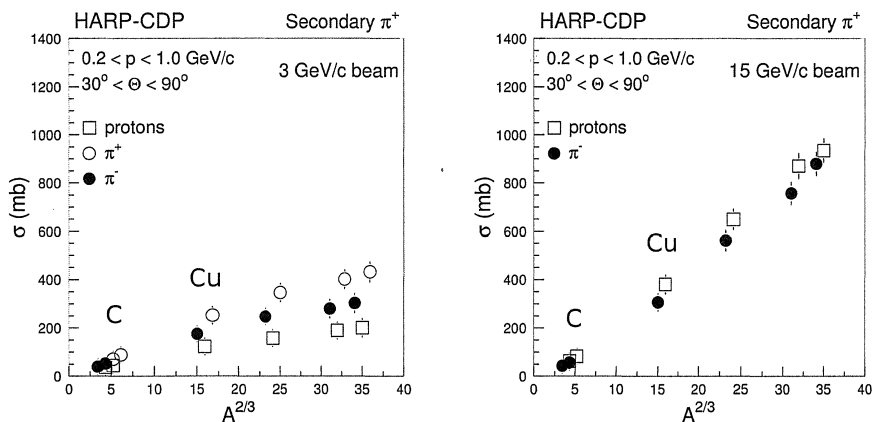


Рис. 7. Зависимость выхода пионов от ядра мишени.

Помимо дифференциальных сечений представляются также некоторые «интегральные» характеристики взаимодействия адронных пучков с ядрами: интегральное сечение рождения пионов в зависимости от энергии пучковых частиц (рис. 7), средняя множественность рождения частиц в пересчете на одно неупругое взаимодействие (рис. 8) и др. [A5], [A6], [13], [14], [15], [16], [17]. Данные по углероду и меди получены и использованы автором в диссертации, остальные данные также получены с участием автора. Данные по углероду и меди, непосредственно полученные автором, хорошо согласуются с общим ходом зависимостей выхода и множествен-

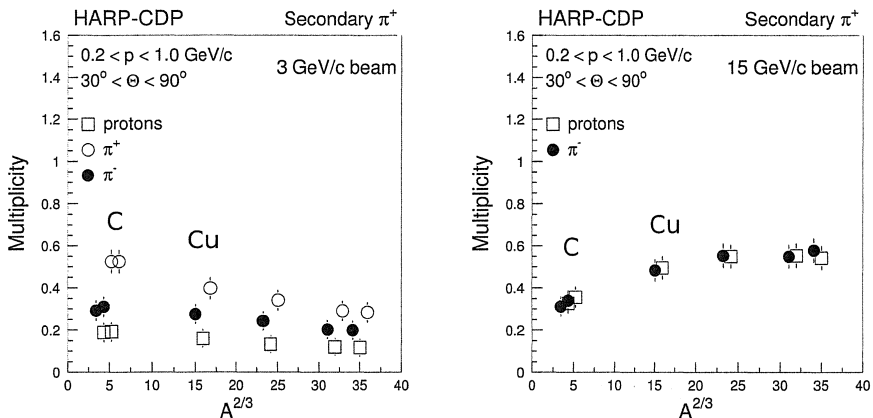


Рис. 8. Зависимость множественности пионов от ядра мишени.

ности пионов от атомного номера ядра мишени, измеренных коллаборацией с участием автора.

Интегральное сечение вычисляется по формуле:

$$\sigma = \Sigma \frac{d^2\sigma}{dp \cdot d\Omega} \cdot \left( \frac{\Delta p_T}{\langle \sin\theta \rangle} \right) \cdot (2\pi\Delta\cos\theta) \quad (2)$$

где  $d^2\sigma/(dp \cdot d\Omega)$  - измеренные дифференциальные сечения рождения пионов, суммирование проводится по всем диапазонам поперечного импульса и полярного угла,  $\Delta p_T$  и  $\Delta\cos\theta$  - ширины соответствующих диапазонов, а величина  $\langle \sin\theta \rangle$  - усредненная по каждому диапазону. Интегральное сечение приводится для рождения пионов в переднюю полусферу ( $30^\circ < \theta < 90^\circ$ ) при импульсах пионов от 0.2 до 1 ГэВ/с. На рис. 7 и 8 сечение и множественность показаны в зависимости от величины  $A^{2/3}$ , которая приблизительно пропорциональна площади ядра.

Впервые измерено отношение выхода дейтронов к выходу протонов в реакциях  $p+A \rightarrow (p, d)+X$  при импульсе налетающих протонов 3-15 ГэВ/с,

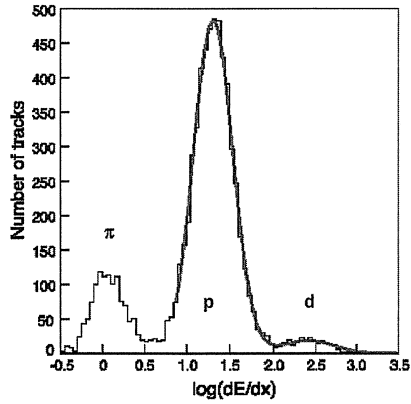


Рис. 9. Ионизационные потери вторичных частиц. Пики соответствуют пионам, протонам, дейтронам.

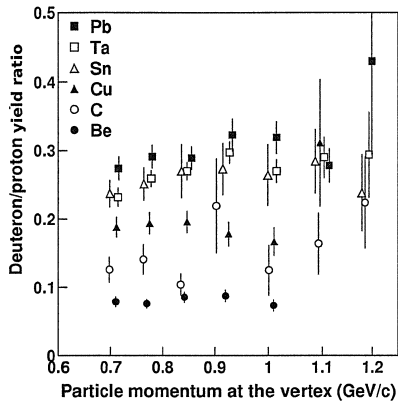


Рис. 10. Отношение выходов дейтронов и к выходу протонов в реакции  $p + A \rightarrow (p, d) + X$  при импульсе налетающих протонов 8 ГэВ/с;  $A = Be, C, Cu, Sn, Ta, Pb$ .

где  $A = Be, C, Cu, Sn, Ta, Pb$ . Идентификация дейтронов проводилась только по ионизационным потерям  $dE/dx$  согласно разработанной нами методике. На рис. 9 приведено распределение по логарифму ионизационных потерь. Можно отметить удовлетворительное разделение протонов и дейтронов. Результаты для диапазона  $30^\circ - 45^\circ$  приведены на рис. 10. Указанное отношение возрастает примерно в 4 раза при переходе от легких к тяжелым ядрам. Экспериментальные данные не согласуются с предсказаниями GEANT4 [18], [19], в базу данных которого необходимо внести изменения для использования при планировании новых экспериментов и обработки данных.

## Заключение

### Основные результаты и выводы

1. Впервые систематически измерены инклюзивные дважды дифференциальные сечения образования протонов и заряженных пионов в реакциях  $\pi^\pm, p + C, Cu \rightarrow \pi^\pm, p + X$ . Измерения проведены при импульсе пучков от 3 до 15 ГэВ/с, в диапазоне углов вылета от  $20^\circ$  до  $125^\circ$  и для поперечных импульсов вторичных частиц от 0.1 до 1.25 ГэВ/с. Достигнута точность 3-10%. В результате были получены наиболее полные из всех известных в настоящее время экспериментальные данные об образовании заряженных пионов и протонов в этих реакциях. Эти сведения включены в международную базу данных Durham Hepdata и могут быть использованы, в том числе, для уточнения предсказаний программ - генераторов адронных взаимодействий, при проведении других экспериментов.

2. Результаты, полученные на ядрах углерода, необходимы для выбора наилучшего материала мишени в мюонном источнике при проектировании ускорительного комплекса нового поколения — мюонного коллайдера. В настоящее время графитовая мишень рассматривается как один из основных вариантов и окончательный выбор будет определяться возможностью достижения требуемой интенсивности потока пионов при заданной мощности протонного драйвера.
3. Измеренные в данной работе сечения образования вторичных адронов на ядрах углерода позволят достичь более высокой точности расчетов потока и спектра атмосферных нейтрино, открывают возможность снижения систематической ошибки при интерпретации результатов экспериментов по поиску нейтринных осцилляций, а также могут быть использованы при планировании новых нейтринных экспериментов.
4. Измеренные сечения и множественности пионов на ядрах углерода и меди, непосредственно полученные автором, являются наиболее полными и точными в настоящее время и согласуются с общим ходом зависимостей выхода и множественности пионов от различных ядер мишени, измеренные коллаборацией с участием автора. Измерения выполнены для различных типов налетающих частиц ( $p$ ,  $\pi^\pm$ ), при импульсе пучка от 3 до 15 ГэВ/с в диапазоне углов вылета от  $20^\circ$  до  $125^\circ$ . Впервые систематически измерено отношение выходов дейтронов к выходу протонов на различных мишенях. Эти результаты позволяют извлечь новую информацию об адрон-ядерных взаимодействиях и будут использованы для развития теории сильного взаимодействия.

5. Предложена методика и проведена калибровка измерения ионизационных потерь во времяпроекционной камере эксперимента HARP. Данная методика позволила устранить влияние ряда аппаратурных эффектов, снижающих точность измерения (паразитные сигналы в электронике, зависимость коэффициента усиления от температуры и т.д.) В результате достигнуто разрешение  $dE/dx \approx 16\%$ , что близко к теоретическому пределу для данного типа камер.
6. Разработаны методы и проведена калибровка измерения времени пролета в спектрометре больших углов эксперимента HARP. Так как в эксперименте HARP впервые в мировой практике для измерения времени пролета вторичных частиц были использованы камеры RPC, это потребовало создания новых методов калибровки, учитывающих особенности прецизионного измерения времени при помощи этих камер. Достигнуто собственное разрешение камер RPC 127 пикосекунд, что позволило определять время пролета с точностью 175 пикосекунд. В сочетании с измерением ионизационных потерь в камере TPC это дало возможность надежно идентифицировать частицы в спектрометре больших углов эксперимента HARP.

**Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

- A1. Ammosov V., ..., Gostkin M. et al. The HARP Time Projection Chamber: Characteristics and physics performance // Nucl. Instrum. Meth. 2008. Vol. A588. Pp. 294–317.

- A2. Ammosov V., ..., Gostkin M. 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. Ammosov V., ..., Gostkin M. et al. The HARP resistive plate chambers: Characteristics and physics performance // Nucl. Instrum. Meth. 2009. Vol. A602. Pp. 639–643.
- A4. Ammosov V., ..., Gostkin M. et al. The HARP resistive plate chambers: Characteristics and physics performance // Nucl. Instrum. Meth. 2007. Vol. A578. Pp. 119–138.
- A5. Bolshakova A., ..., Gostkin M. et al. Cross-sections of large-angle hadron production in proton and pion-nucleus interactions IV: Copper nuclei and beam momenta from  $\pm 3$  GeV/c to  $\pm 15$  GeV/c // Eur. Phys. J. 2009. Vol. C64. Pp. 181–241.
- A6. Bolshakova A., ..., Gostkin M. et al. Cross-sections of large-angle hadron production in proton- and pion-nucleus interactions VI: carbon nuclei and beam momenta from  $\pm 3$  GeV/c to  $\pm 15$  GeV/c // Eur. Phys. J. 2010. Vol. C70. Pp. 573–633.

## **Цитированная литература**

1. International linear collider, Reference Design report // ILC-report-2007-001.
2.  $\mu^+\mu^-$  Collider: A Feasibility Study (Muon Collaboration) // FNAL-Conf-96/092 (1996).

3. Project X as a Proton Driver for a Neutrino Factory and/or a Muon Collider // Muons, Inc., FNAL (2010).
4. Catanesi M. G., ..., Gostkin M. et al. Proposal to study hadron production for the neutrino factory and for the atmospheric neutrino flux // CERN-SP-SC-99-35,CERN-SPSC-P-315. 1999.
5. Bolshakova A., ..., Gostkin M. et al. HARP-CDP hadroproduction data: Comparison with FLUKA and GEANT4 simulations // Eur. Phys. J. 2010. Vol. C70. Pp. 543–553.
6. Ammosov V., ..., Gostkin M. et al. Multi-gap glass resistive plate chambers in HARP // Nucl.Phys.Proc.Suppl. 2006. Vol. B158. Pp. 56–59.
7. Shao M., Li L. A study on the intrinsic time resolution of the MRCP used in the STAR-TOF // Int.J.Mod.Phys. 2007. Vol. E16. Pp. 2476–2483.
8. Akindinov A. et al. The MRPC detector for the ALICE Time Of Flight System: Final Design and Performance // Nucl.Phys.Proc.Suppl. 2006. Vol. B158. Pp. 60–65.
9. Durham Hepdata // <http://durpdg.dur.ac.uk/HEPDATA/>.
10. 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.
11. 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.
12. 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.



13. Bolshakova A., ..., Gostkin M. 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.
14. Bolshakova A., ..., Gostkin M. 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.
15. Bolshakova A., ..., Gostkin M. et al. Cross-Sections of Large-Angle Hadron Production in Proton- and Pion-Nucleus Interactions. III. Tantalum Nuclei and Beam Momenta from  $\pm 3$  GeV/c to  $\pm 15$  GeV/c // Eur. Phys. J. 2009. Vol. C63. Pp. 549–609.
16. Bolshakova A., ..., Gostkin M. et al. Cross-Sections of Large-Angle Hadron Production in Proton- and Pion-Nucleus Interactions V: Lead Nuclei and Beam Momenta from  $\pm 3$  GeV/c to  $\pm 15$  GeV/c // Eur. Phys. J. 2010. Vol. C66. Pp. 57–117.
17. Bolshakova A., ..., Gostkin M. et al. Cross-sections of large-angle hadron production in proton- and pion-nucleus interactions VII: tin nuclei and beam momenta from  $\pm 3$  GeV/c to  $\pm 15$  GeV/c // CERN-PH-EP/2011-069. 2011. Pp. 1–68.
18. Agostinelli S. et al. G4—a simulation toolkit // Nucl. Instrum. and Meth. A. 2003. Vol. 506, no. 3. Pp. 250 – 303.
19. Allison J. et al. Geant4 developments and applications // Nuclear Science, IEEE Transactions on. 2006. Vol. 53, no. 1. Pp. 270–278.

Отпечатано методом прямого репродуцирования  
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 26.10.2011.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,68. Уч.-изд. л. 1,32. Тираж 100 экз. Заказ № 57465.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)