

П-161



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-89-576

ПАНЕБРАТЦЕВ
Юрий Анатольевич

УДК 539.17
539.143

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КУМУЛЯТИВНОГО
РОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ
И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КВАРКОВ В ЯДРАХ**

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

**Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук**

Дубна 1989

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

доктор физико-математических наук, профессор

БУДАГОВ
Олиан Арамович

БОРЕМОВ
Анатолий Ваоильевич

ЛЕКСИН
Георгий Александрович

Ведущее научно-исследовательское учреждение -
Институт ядерных исследований АН СССР, г.Троицк.

Защита диссертации соотвоя " " _____ 1989 г. в
_____ часо. на заседании специализированного совета Д-047.01.02
при Лаборатории высоких энергий Объединенного интитута ядерных
исследований по адресу:

г.Дубна, Московокой области, Лаборатория высоких энергий
ОИЯИ, конференц-зал ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разоолан " " _____ 1989 г.

Ученый секретарь
специализированного-совета

М.Ф.Лихачев

М.Ф.Лихачев

Актуальность проблемы. В семидесятые годы создан новый подход к описанию фундаментальных взаимодействий, базирующийся на теоретически и экспериментально обоснованном предположении о том, что окружающий нас мир построен из кварков и лептонов, а переносчиком взаимодействий являются калибровочные поля. В качестве квантово-полевой калибровочной теории сильных взаимодействий выступает квантовая хромодинамика (КХД), которая применяется не только для описания сил, связывающих кварки в адроны, но и для построения теории ядерных сил. Несмотря на то, что основные положения КХД, как теоретической схемы, сформулированы и нашли экспериментальное подтверждение, существует ряд кардинальных вопросов, нуждающихся в дальнейшем экспериментальном и теоретическом исследовании. Среди них поиск и исследование многокварковых и экзотических состояний, изучение поведения кварков на больших расстояниях, поиски фазового перехода вещества из адронной в кварковую фазу и другие.

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию кумулятивного рождения частиц в адрон-ядерных процессах, то есть рождению частиц в области предельной фрагментации ядер за пределами двухчастичной кинематики взаимодействия падающего адрона с нуклоном ядра. Кумулятивный эффект был предсказан в 1970 году А.М.Балдиным* на основе обобщения масштабной инвариантности на процессы столкновения релятивистских ядер, то есть была высказана и обоснована теоретическая гипотеза о том, что свойства спектров вторичных частиц высокой энергии, образующихся при столкновении релятивистских ядер, определяются локальными свойствами адронной материи.

В 1971 году в экспериментах группы В.С.Ставинского** на синхрофазотроне ОИЯИ в реакции $d + \text{Cu} \rightarrow \pi^+ + \dots$ при энергии первичных протонов 5 ГэВ/нуклон были обнаружены вторичные пионы, энергия которых существенно превышала кинематический предел для случая взаимодействия отдельных нуклонов дейтерия с мишенью, т.е. было экспериментально обнаружено явление кумулятивного мезообразования.

Экспериментальные исследования инклюзивного рождения протонов в кинематически запрещенной области в ядерных реакциях при высоких энергиях, начатые в ИТЭФ Г.А.Лексиним с сотрудниками в середине 60-х годов***, привели к открытию явления ядерного скейлинга.

* Балдин А.М. Краткие сообщения по физике, 1971, т.1, с.35.

** Балдин А.М. и др. ОИЯИ, Р1-5819, Дубна, 1971.

*** Бажков Ю.Д. и др. Изв. АН СССР. Сер. физ., 1966, т.30, с.521.

С момента обнаружения кумулятивного эффекта мы рассматривали его как сигнал о наличии в ядрах "капелек адронной материи" (или многокварковых конфигураций), по своей структуре сильно отличающихся от свободных нуклонов. Дальнейшее изучение кумулятивных процессов дало основания для введения необычных для ядерной физики кварк-партоновых представлений не только о структуре нуклонов, но также и о структуре самого ядра. Исследование кварковой структуры ядер дает принципиально новую информацию о мультикварковых системах и взаимодействиях, механизме ядерных реакций при высоких энергиях.

В настоящее время исследование проявлений кварк-глюонных степеней свободы в ядрах занимает значительное место в научной программе ряда советских и зарубежных научных центров. Среди наиболее значимых проблем, которые изучаются экспериментально, отметим исследование кумулятивных процессов на ядрах и исследование ядерных структурных функций (ОИЯИ, ИТЭФ, ЕРФИ, ЦЕРН, СЛАК), изучение эффектов цветового экранирования (ОИЯИ, ИФВЭ, Брукхейвен), поиски в ядро-ядерных столкновениях при высоких энергиях нового состояния вещества - кварк-глюонной плазмы (ОИЯИ, ЦЕРН, Брукхейвен).

Изучение проявлений кварк-глюонных степеней свободы в ядрах является чрезвычайно актуальным и составляет одну из главных перспектив фундаментальных исследований в области современной ядерной физики.

Цель работы - экспериментальное исследование процессов кумулятивного рождения частиц в адрон-ядерных взаимодействиях :

- 1) физическое обоснование постановки эксперимента и выбор адекватной задаче методики;
- 2) создание математического обеспечения эксперимента и обработка экспериментальных данных;
- 3) изучение в pA - и dA -взаимодействиях энергетических спектров пионов при различных углах эмиссии, угловых зависимостей и зависимостей сечений генерации пионов от атомного веса ядра-мишени;
- 4) изучение кумулятивного рождения частиц на легчайших ядрах дейтерия и гелия;
- 5) изучение процессов кумулятивного рождения странных мезонов (K^+ и K^-) в протон-ядерных и дейтрон-ядерных взаимодействиях;
- 6) анализ экспериментальных данных по кумулятивному рождению частиц, формулировка важнейших свойств атомных ядер как кварк-глюонных систем.

Научная новизна работы. В Лаборатории высоких энергий ОИЯИ создана физическая установка ДИСК-2, позволившая провести большую программу экспериментов на синхрофазотроне по исследованию

кумулятивного рождения частиц в протон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях. На установке была освоена методика работы в высокоинтенсивных пучках первичных частиц (до $5 \cdot 10^{11}$ частиц/с при толщине мишени до 10 г/см^2). Именно работа в пучках высокой интенсивности позволила впервые получить целый ряд принципиально новых экспериментальных данных о процессах кумулятивного мезообразования.

Получены новые экспериментальные данные по энергетическим спектрам пионов при различных углах регистрации и угловым зависимостям сечений кумулятивного рождения, наиболее подробные экспериментальные данные по A -зависимости сечений кумулятивного рождения пионов.

Впервые выполнено систематическое исследование кумулятивного рождения π^+ -мезонов на легких ядрах протонами с импульсом $8,9 \text{ ГэВ/с}$. Измерены энергетические спектры пионов с углом эмиссии 180° относительно направления первичного пучка для ядер дейтерия и гелия. Для ядра гелия выполнены измерения энергетических спектров при различных углах эмиссии, а также угловые зависимости инвариантных дифференциальных сечений при фиксированной величине импульса. Проведено измерение энергетического спектра π^+ -мезонов в протон-протонных взаимодействиях с нулевой составляющей поперечного импульса (т.е. под углом 180°).

Впервые проведено измерение сечений рождения кумулятивных протонов под углом 180° из ядер дейтерия и гелия и показано, что величины сечений рождения кумулятивных протонов существенно превышают сечения рождения пионов с тем же импульсом. Изучены угловые зависимости сечений. Сравнение поведения энергетических спектров и угловых зависимостей сечений на легчайших и тяжелых ядрах подтвердило предположение о локальном характере кумулятивных процессов.

Впервые выполнено систематическое исследование кумулятивного рождения странных мезонов (K^+ и K^-). Изучены экспериментальные спектры при различных углах эмиссии (168° , 120° , 90°), зависимость сечения рождения K^+ - и K^- -мезонов от атомного веса ядра мишени, изучена угловая зависимость сечений рождения каонов.

Совокупность экспериментальных данных по кумулятивному мезообразованию, полученных в настоящих экспериментах, позволила впервые изучить свойства кварк-партоновых структурных функций ядер, показать их универсальный характер для различных ядер и вторичных частиц. На основании экспериментальных данных сделан вывод о том, что кварк-партоновые структурные функции ядер качественно отличаются от кварк-партоновых структурных функций нуклонов и не могут быть сведены к суперпозиции последних.

Научно-практическая значимость. Экспериментальные результаты диссертационной работы до настоящего времени являются наиболее полными данными по кумулятивному мезообразованию частиц на ядрах.

Полученные в работе экспериментальные данные стимулировали развитие новых теоретических подходов к объяснению процессов кумулятивного рождения частиц в адрон-ядерных реакциях.

Универсальный характер ядерных структурных функций позволил использовать экспериментальные данные, впервые полученные при исследовании адрон-ядерных реакций, для предсказания результатов экспериментов в eA -, γA -, $\bar{A}A$ -взаимодействиях. Кроме того, сделаны предсказания для сечений рождения кумулятивных η -, ω -, ρ -мезонов, Δ -изобар и других частиц в адрон-ядерных реакциях.

Результаты измерений, выполненных в диссертационной работе, использовались при планировании корреляционных экспериментов.

Апробация работы и публикации. Результаты, вошедшие в диссертацию, неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах ЛВЭ и ЛПФ ОИЯИ, специализированном научном семинаре по релятивистской ядерной физике ЛВЭ, семинаре научно-экспериментального методического отдела ЛВЭ; докладывались автором на пленарном заседании отделения ядерной физики АН СССР (Москва, 1984), на Всесоюзных рабочих совещаниях по предельной фрагментации ядер (Ереван, 1980, 1984; Москва, 1982, 1986), на проблемном семинаре "Взаимодействие частиц и ядер с ядрами при высоких энергиях" (Ташкент, 1981), Всесоюзной конференции по малонуклонным системам (Киев, 1985), Симпозиуме по ненуклонным степеням свободы в ядрах (Гатчина, 1987), Международном совещании по проблемам релятивистской ядерной физики (Дубна, 1982), на VII и VIII Международных семинарах по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 1984, 1986), X Международной конференции "Частицы и ядра" (Гейдельберг, ФРГ, 1984), IV Международном совещании по исследованиям на ускорителе САТУРН (Ла-Лонде, Франция, 1986), Европейской конференции по физике высоких энергий (Уппсала, Швеция, 1987), XXIV Международной конференции по физике высоких энергий (Мюнхен, ФРГ, 1988).

Результаты также были представлены на Европейскую конференцию по физике частиц (Будапешт, 1977), XIX и XXI Международные конференции по физике высоких энергий (Токио, 1978; Париж, 1982).

Основные результаты изложены в 19 публикациях.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы.

Во введении обосновывается актуальность и раскрывается содержание темы диссертации, сформулирована цель работы, изложена новизна и научно-практическая значимость полученных результатов, описан план диссертации.

В первой главе описана экспериментальная установка ДИСК-2 и приводятся ее характеристики. Обсуждаются вопросы математического обеспечения эксперимента и обработки экспериментальных данных.

В §1 дано описание установки ДИСК-2, созданной в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ для исследования процессов кумулятивного рождения частиц (π^{\pm} , K^{\pm} , \bar{p} , p , d , t , ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$) в инклюзивной реакции $I + II \rightarrow 1 + \dots$. Принципиальная схема установки приведена на рис.1. Эксперимент проводился на выведенном пучке синхрофазотрона ОИЯИ. Пучок

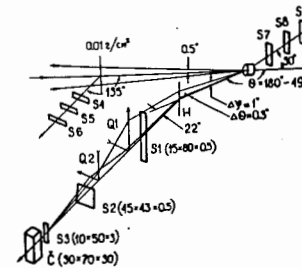


Рис.1. Схема установки ДИСК-2.

первичных частиц I - протоны или дейтроны с импульсом 8,9 ГэВ/с либо ядра с импульсом 4,5 ГэВ/с на нуклон - сфокусировался на мишень II (диаметр сфокусированного на мишень пучка около 15 мм). Использовался большой набор мишеней (более двадцати различных атомных ядер от водорода до урана). Диаметр "твердых" мишеней 30 мм и толщина от 0,1 до 10 г/см² в зависимости от условий эксперимента. На

установке также использовалась и специально разработанная в научно-инженерном криогенном отделе ЛВЭ мишень*. Особенностью криогенной мишени установки является размещение в одном вакуумном кожухе с большой выходной апертурой сосудов с жидким водородом, дейтерием и гелием. Криогенные мишени имели диаметр 50 мм и размер по пучку 50 (140) мм. Сосуды мишеней изготовлены из майлара толщиной 120 мкм.

Вторичные частицы 1 (фрагменты ядра-мишени) регистрировались в интервале углов относительно направления первичного пучка от 49° до 180° и в интервале импульсов от 0,15 до 1,6 ГэВ/с.

Магнитно-оптический канал спектрометра состоит из анализирующего магнита и дублета квадрупольных линз, формирующих пучок вторичных частиц. Импульсное разрешение спектрометра - 8,6% (полная ширина на половине высоты). Акцептанс установки - $1,72 \cdot 10^{-4}$ ср.

* Голованов ЛБ и др. ПТЭ, 1978, т.3, с.41.

Идентификация вторичных частиц осуществлялась путем независимых измерений времени пролета на двух базах (3,8м и 1м). Среднеквадратичная ошибка измерений составляет 260 пс. Для повышения надежности выделения полезных событий проводились измерения ионизационных потерь в сцинтилляторах и интенсивности излучения Вавилова - Черенкова в твердом радиаторе. Для регистрации пионов с импульсом выше 900 МэВ/с использовался газовый пороговый черенковский счетчик.

Относительную интенсивность пучка ускоренных частиц измеряет телескоп счетчиков $M_D (S_4, S_5, S_6)$. Градуировка телескопа осуществлялась методом измерения наведенной активности в углероде (с точностью $\pm 5\%$) при облучении полистирола (C_8H_8) в фокусе первичного пучка.

В §2 описана организация сбора данных с установки в экспериментах на линии с ЭВМ ЕС-1040. Рассмотрена структурная схема и временная диаграмма процесса сбора данных. Приведен алгоритм управления аппаратурой установки в процессе сбора данных и представления информации экспериментатору.

В §3 рассмотрен комплекс программ реального времени и обработки экспериментальных данных. В процессе эксплуатации установка работала сначала на линии с ЭВМ ЕС-1040 (1975-1978 гг.) и начиная с 1979 г. на линии с ЭВМ 1040 (1085). Программа для работы на линии с ЭВМ выполняла функции контроля, накопления и анализа информации. Управление работой программы велось в режиме диалога экспериментатор - ЭВМ. В диссертации подробно рассмотрено математическое обеспечение, созданное для ЭВМ-1040 (1085).

При разработке комплекса программ реального времени для установки ДИСК-2 на ЭВМ ЕС 1040 нами был использован опыт создания аналогичных систем для установок БИС-2 и "Кристалл".

Программы обработки данных используются в режиме работы на линии (on-line) и в режиме off-line. Каждая зарегистрированная установкой частица анализируется по следующим критериям: время пролета на разных базах, ионизационные потери в сцинтилляторах, интенсивность вспышки черенковского излучения. Этот анализ составляет основу обработки данных и позволяет надежно идентифицировать регистрируемые частицы, оценить вклад случайных совпадений при работе в первичных пучках высокой интенсивности.

В §4 описана программа для моделирования работы установки методом Монте - Карло.

Во второй главе обсуждаются результаты экспериментов по исследованию кумулятивного рождения π^+ -мезонов на ядрах. К моменту

начала исследований на установке ДИСК-2 (1976 г.) в экспериментах, выполненных в ЛВЭ ОИЯИ, был установлен масштабно-инвариантный характер инклюзивных сечений кумулятивного мезообразования, начиная с энергий 5 ГэВ; показано, что энергетический спектр рожденных пионов в системе координат, связанной с фрагментирующим ядром, имеет экспоненциальный характер $E \frac{d\sigma}{d\vec{p}} = a(A) \exp(-T/T_0)$, причем параметр T_0 в пределах точности эксперимента не зависит от знака рожденных пионов, не зависит от энергии первичных протонов (был исследован интервал энергий от 4 до 9 ГэВ), для широкого диапазона атомных ядер не зависит от атомного веса фрагментирующего ядра. Было установлено, что зависимость инвариантного сечения от атомного веса фрагментирующего ядра имеет степенной характер $E \frac{d\sigma}{d\vec{p}} = \rho_0 A^n$, где показатель степени n для кумулятивных пионов близок к единице.

При планировании дальнейших экспериментальных исследований кумулятивного рождения пионов на установке ДИСК-2 были поставлены следующие задачи:

1. Освоить работу в пучках высокой интенсивности первичных частиц и провести измерения сечений рождения пионов при больших значениях кумулятивного числа.

2. Измерить энергетические спектры пионов при различных углах эмиссии и изучить угловую зависимость сечений кумулятивного пионообразования.

3. Используя большой набор атомных ядер, включая легкие ядра и ядра-изотопы, подробно исследовать A -зависимость сечений рождения кумулятивных пионов.

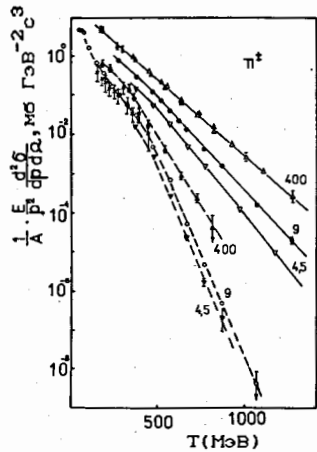
Результатам экспериментального исследования отмеченных выше проблем и посвящена вторая глава диссертации.

В §1 описана постановка опыта и процедура вычисления инвариантных дифференциальных инклюзивных сечений.

В §2 приведены измеренные сечения рождения положительно и отрицательно заряженных пионов в протон - ядерных и дейтрон - ядерных взаимодействиях. Были изучены энергетические спектры π^\pm -мезонов в протон-ядерных и дейтрон-ядерных взаимодействиях при импульсе первичных частиц 8,9 ГэВ/с при различных углах эмиссии (168° , 120° , 90°) на мишенях из алюминия и свинца, а также угловая зависимость сечений рождения пионов с фиксированным значением величины импульса в угловом интервале ($50^\circ \div 180^\circ$). Изучены A -зависимости сечений рождения пионов в различных кинематических областях.

В §3 обсуждаются результаты измерений энергетических спектров и угловых зависимостей сечений рождения кумулятивных пионов. Сечения рождения пионов измерены для интервала импульсов от 125 МэВ/с до

1200 МэВ/с для угла регистрации 168° . В изученном диапазоне импульсов сечение меняется на девять порядков величины. Максимальному измеренному импульсу 1200 МэВ/с соответствует величина сечения на нуклон $5 \cdot 10^{-36}$ см² на единицу фазового объема. При этом значение кумулятивного числа равно $\approx 3,4$ нуклонных масс. Энергетические спектры пионов при различных углах эмиссии и различных первичных энергиях



приведены на рис. 2. Установлено, что зависимость сечения рождения пионов от их кинетической энергии при различных углах наблюдения можно приближенно описать экспоненциальной зависимостью $\exp(-T/T_0)$. Параметр T_0 зависит от угла эмиссии вторичных пионов. Его значение с точностью до 10% совпадает для ядер свинца и алюминия. Для угла регистрации 168° наблюдалась зависимость параметра T_0 от энергии рожденных пионов. Для кинетических энергий пионов ($T_\pi \leq 380$ МэВ) значение параметра $T_0 \approx 65-70$ МэВ, в то время как для $T_\pi \geq 380$ МэВ значение $T_0 \approx 50$ МэВ.

Рис.2. Энергетические спектры пионов, измеренные в pPb- и dPb-взаимодействиях при импульсе 8,9 ГэВ/с и pTa- взаимодействиях при энергии 400 ГэВ, из работы*. Сплошные линии относятся к углу наблюдения 90° , а пунктирные к углу наблюдения 168° .

При любых энергиях рожденных пионов наблюдается рост сечений с ростом энергии на нуклон взаимодействующих ядер. Если при малых энергиях ($T_\pi \leq 380$ МэВ) параметр T_0 в аппроксимации $\exp(-T/T_0)$ практически не зависит от первичной энергии, то в жесткой части спектра ($T_\pi \geq 380$ МэВ) параметр T_0 зависит от первичной энергии.

Измерения угловой зависимости сечений рождения пионов для фиксированного значения величины импульса (500 МэВ/с в pA- и 700 МэВ/с в dA-взаимодействиях) показали, что логарифм сечения рождения кумулятивных пионов в первом приближении линейно зависит от косинуса угла эмиссии (рис.3).

В §4 обсуждаются зависимости сечений рождения пионов от атомного веса фрагментирующего ядра. Как отмечалось выше, при исследовании кумулятивного рождения π^\pm -мезонов было обнаружено, что сечение

* Nikiforov N.A. et al. Phys. Rev., 1980, v.22c, p.700.

пропорционально атомному весу фрагментирующего ядра. В данной работе мы изучили детали этого явления, выяснили, как наступает этот режим и какие факторы его регулируют. Для изучения A-зависимости сечения рождения кумулятивных пионов использовался большой набор атомных ядер (более 20 ядер с различным значением атомного веса). На рис. 4 символами (o, ●) обозначены наиболее подробные экспериментальные данные по сечениям инклюзивного рождения π^\pm -мезонов с импульсом 500 МэВ/с и углом регистрации 168° для π^- и 180° для π^+ -мезонов, что соответствует значению кумулятивного числа $\approx 1,3$.

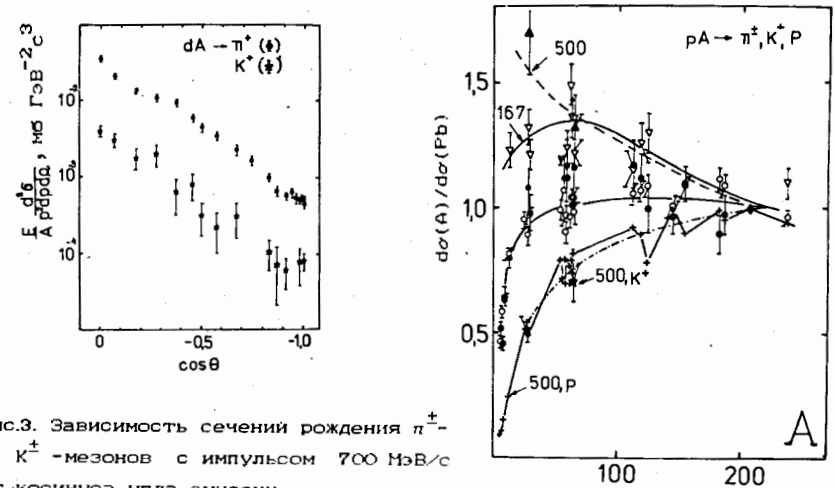


Рис.3. Зависимость сечений рождения π^\pm - и K^\pm -мезонов с импульсом 700 МэВ/с от косинуса угла эмиссии.

Рис.4. Зависимость отношения $d\sigma(A)/d\sigma(Pb)$ для π^\pm , K^\pm , p от атомного веса фрагментирующего ядра.

Из данных, приведенных на рис.4, видно, что для кумулятивных пионов сечение рождения на нуклон фрагментирующего ядра (обозначим его $d\sigma(A)$) сначала быстро растет с ростом A, но начиная с $20 \div 30$ оно остается примерно постоянным, т.е. выходит на режим A^1 . Анализ данных показывает, что для ядер среднего атомного веса наблюдается небольшое ($12\% + 17\%$) превышение отношения $d\sigma(A)/d\sigma(Pb)$ над единицей. Кроме того, для ядер среднего атомного веса наблюдается также превышение (до 20%) сечений рождения положительных пионов над сечением рождения π^- -мезонов. Анализ экспериментальных данных показывает, что в деталях A-зависимость очень нерегулярна. Сечение для ближайших ядер-изотопов изменяется сильнее, чем усредненный характер зависимости.

На рис.4 приведены данные для A-зависимости выхода пионов с импульсом 500 МэВ/с для угла 90° (\blacktriangle) и для пионов с импульсом 167 МэВ/с для угла 168° (∇). Для обсужденных выше и этих данных сечение взаимодействия пионов с нуклонами ядер ~ 20 мб. Тем не менее для наборов (167 МэВ/с, 168° ; 500 МэВ/с, 90°) A-зависимости имеют существенно другой характер (зависимость типа $A^{2/3}$).

В работе изучена зависимость сечений рождения пионов от атомного веса ядра мишени при различных импульсах и углах эмиссии и показано, что характер A-зависимости определяется не импульсом и углом эмиссии, а кумулятивным числом.

В §5 изучено отношение выходов кумулятивных пионов разного знака. Значение этого отношения слабо зависит от атомного веса ядра мишени, угла эмиссии и импульса вторичных пионов. В интервале импульсов 300-1500 МэВ/с это отношение слабо меняется от значения $\approx 0,9$ до 0,7.

Третья глава посвящена исследованию кумулятивного рождения частиц при взаимодействии протонов с импульсом 8,9 ГэВ/с с легчайшими ядрами.

Экспериментальные исследования кумулятивного рождения пионов и протонов легчайшими ядрами представляют значительный интерес по следующим причинам:

1. Согласно гипотезе кумулятивного ядерного эффекта его свойства определяются локальными свойствами ядерной материи. Сравнение закономерностей кумулятивного рождения частиц на легчайших и тяжелых ядрах позволило выполнить экспериментальную проверку этой гипотезы.

2. Реакция фрагментации дейтрона в протон является ключевой для изучения нуклонных степеней свободы (волновой функции дейтрона) на малых расстояниях, поиска ненуклонных степеней свободы.

3. Дейтроны выделены с теоретической точки зрения как простейшая ядерная система. Их исследование находится на границе между физикой элементарных частиц и атомного ядра. Эти данные оказались чрезвычайно полезными для развития новых теоретических подходов.

В §1 описана процедура определения инвариантных инклюзивных сечений. Рассмотрены величины поправок, которые использовались при вычислении сечений рождения пионов на легких ядрах.

Экспериментально измеренные сечения приведены в §2. Изучено рождение π^\pm -мезонов при взаимодействии протонов с импульсом 8,9 ГэВ/с с ядрами дейтерия, гелия. Измерены энергетические спектры для различных углов эмиссии (180° , 120° , 90°) и угловые зависимости при фиксированном значении импульса в интервале углов от 50° до 180° .

Получены данные о рождении π^\pm -мезонов в pp-взаимодействии для нулевой поперечной составляющей импульса пиона. Изучены энергетические спектры протонов из ядер дейтерия и гелия для угла эмиссии 180° и угловые зависимости сечений.

В §3 описаны результаты экспериментов по рождению π^\pm -мезонов на легчайших ядрах. Измерены сечения рождения π^+ и π^- -мезонов под углом 180° во взаимодействии протонов с импульсом 8,9 ГэВ/с с ядрами водорода (рис.5). Отметим, что спектры положительных пионов измерены почти до кинематической границы pp-реакции ($T_\pi / T_\pi^{\text{max}} \approx 0,95$).

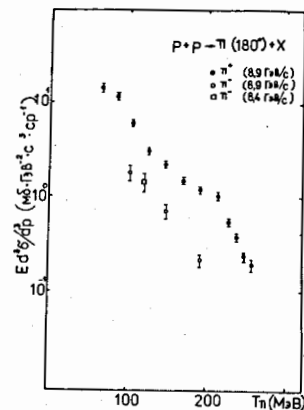


Рис.5. Инвариантные сечения рождения пионов в pp-взаимодействиях в зависимости от кинетической энергии.

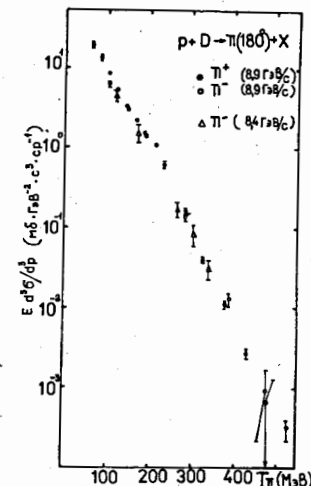


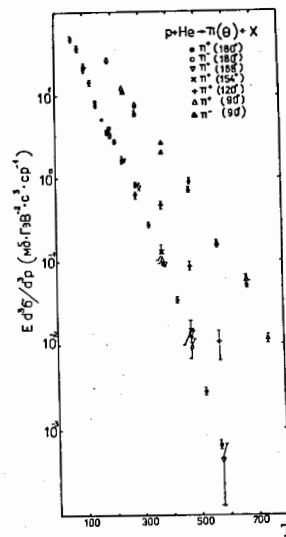
Рис.6. Инвариантные сечения рождения пионов на дейтронах в зависимости от кинетической энергии.

На рис.6 приведены экспериментальные данные по сечениям рождения π^\pm -мезонов под углом 180° во взаимодействии протонов с импульсом 8,9 ГэВ/с с ядрами дейтерия. Показано, что, как и следовало ожидать, для рождения пионов в кинематически разрешенной области для NN-столкновений спектры пионов на ядрах дейтерия и водорода подобны вплоть до кинематической границы NN-взаимодействий. Кроме того, выполняется соотношение $E d\sigma/dp(D \rightarrow \pi) \approx E d\sigma/dp(H \rightarrow \pi^+) + E d\sigma/dp(H \rightarrow \pi^-)$.

Новым и нетривиальным, с точки зрения традиционной ядерной физики, является тот экспериментальный факт, что параметр наклона энергетического спектра пионов, рожденных ядрами дейтерия при $T_\pi > T_\pi^{\text{max}}(NN)$, слабо меняется по сравнению с его значением для кинематически разрешенной области. Действительно, при аппроксимации спектра зависимостью $\exp(-T/T_0)$ значение параметра T_0 равно $(51,0 \pm 1,2)$ МэВ

в "мягкой" части спектра и равно $(35.3 \pm 0,9)$ МэВ в кумулятивной области ($T_{\pi} > 280$ МэВ). Экстраполяция значений сечений из "мягкой" части спектра к значениям кумулятивного числа $\approx 1,7$ дает разницу с экспериментально измеренной величиной сечений только ~ 10 раз.

На рис.7 приведены экспериментальные данные по сечениям рождения π^{\pm} -мезонов при взаимодействии протонов с импульсом 8,9 ГэВ/с с ядрами гелия для различных углов эмиссии (180° , 168° , 154° , 120° , 90°).



Описание энергетических спектров пионов экспоненциальной зависимостью $\exp(-T/T_0)$ дает следующее значение T_0 для случая фрагментации гелия в пионы. Для угла эмиссии пионов 180° в "мягкой" части спектра параметр T_0 равен $(47,9 \pm 1,1)$ МэВ и $(41,7 \pm 0,6)$ МэВ в кумулятивной части спектра. Значение параметра T_0 зависит от угла эмиссии и равно $(54,4 \pm 2,9)$ МэВ и $(84,0 \pm 0,5)$ МэВ для углов регистрации 120° и 90° соответственно.

Рис.7. Зависимость от кинетической энергии инвариантных сечений рождения пионов в pHe- взаимодействиях.

Показано, что наблюдается примерно линейная зависимость логарифма сечения рождения пионов на гелии при фиксированной величине импульса в зависимости от косинуса угла эмиссии при изменении $\cos\theta_{\pi}$ от -1 до 0,6. Как уже отмечалось выше, этот экспериментальный факт является следствием линейной зависимости кумулятивного числа от косинуса угла эмиссии.

В §4 обсуждаются результаты по кумулятивному рождению протонов и дейтронов во взаимодействии протонов высокой энергии с легчайшими ядрами. Инклюзивная реакция $p + D \rightarrow p + \dots$ является простейшей и ключевой для понимания нуклонных степеней свободы в ядро-ядерных взаимодействиях, определения ненуклонной компоненты в структурной функции дейтрона. При постановке эксперимента мы считали, что кумулятивное рождение нуклонов на ядрах связано с высокоимпульсной компонентой волновой функции, и, следовательно, в этих процессах можно изучить свойства ядерной материи на малых межнуклонных расстояниях.

На рис.8 приведены результаты измерений инклюзивных сечений рождения кумулятивных протонов и дейтронов, испущенных под углом 180°

при взаимодействии протонов с импульсом 8,9 ГэВ/с, с ядрами дейтерия и гелия в зависимости от энергии вторичных частиц. Как видно из рисунка, все зависимости сечений от кинетической энергии в первом приближении можно описать экспоненциальной зависимостью $\exp(-T/T_0)$, причем параметр T_0 равен $(38,0 \pm 1,5)$ МэВ для фрагментации гелия в протоны, $(29,0 \pm 1,8)$ МэВ для фрагментации дейтронов в протоны и $(17,0 \pm 1,0)$ МэВ для фрагментации гелия в дейтроны. Отметим, что на ядре свинца значение параметра T_0 равно ≈ 40 МэВ.

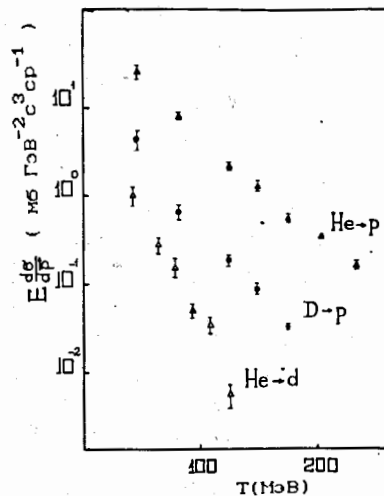


Рис.8. Инклюзивное сечение образования кумулятивных протонов и дейтронов при взаимодействии протонов с дейтронами и гелием.

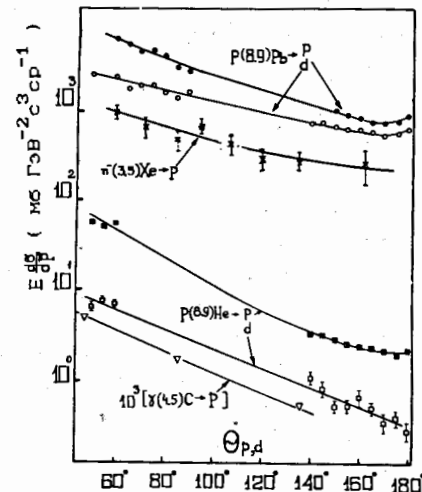


Рис.9. Зависимость инвариантных инклюзивных сечений от угла эмиссии протонов и дейтронов с импульсом 500 МэВ/с.

На рис.9 показана зависимость инклюзивного сечения рождения протонов и дейтронов с импульсом 500 МэВ/с от угла эмиссии $\theta_{p,d}$. Из данных, приведенных на рисунке, видно подобие не только угловых зависимостей для различных процессов (pA , πA , γA), но и, что нам представляется особенно важным, подобие угловых зависимостей сечений фрагментации ядер He и Pb в протоны и дейтроны при импульсе первичных протонов 8,9 ГэВ/с.

Эксперимент показал, что при равных значениях импульса сечения рождения протонов на легчайших ядрах примерно на два порядка превышают сечения рождения пионов. Также показано, что характеристики импульсных

спектров и угловых зависимостей на легком ядре гелия и тяжелом ядре свинца практически совпадают. Этот результат является одним из свидетельств локального характера кумулятивного рождения протонов.

В §5 экспериментальные данные по кумулятивному рождению пионов и протонов, в том числе и легчайшими ядрами, анализируются как с точки зрения традиционной ядерной физики (ферми-движение нуклонов в среднем ядерном поле, механизм внутриядерных перераспределений, каскадные и термодинамические модели), так и в рамках развитого в работах Н.И.Стрикмана и Л.Л.Франк-Фурта релятивистского импульсного приближения.

Экспериментальные результаты, полученные при исследовании закономерностей кумулятивного рождения частиц на легчайших ядрах оказались чрезвычайно информативными. Они позволили осуществить критическую проверку практически всех теоретических моделей кумулятивного рождения частиц. В настоящее время преобладает точка зрения, состоящая в том, что традиционные методы ядерной физики (ферми-движение в среднем поле ядра, механизм перераспределений и внутриядерных каскадов и др.) не могут объяснить известных свойств кумулятивного рождения частиц, хотя дают вклад, как поправки, особенно в "мягкой" части спектра. Наша точка зрения, подтвержденная экспериментально, состоит в том, что явление кумулятивного рождения частиц связано с поведением ядерной материи на малых межнуклонных расстояниях, т.е. с высокоимпульсной частью волновой функции ядра. В работах* показано, что "дополнительная" высокоимпульсная компонента возникает за счет сближения двух или нескольких нуклонов в ядре (малонуклонных корреляций). Основной вклад от высокоимпульсной компоненты волновой функции дейтрона в сечение рождения кумулятивных нуклонов дает так называемый спектаторный механизм. Использование реалистической волновой функции дейтрона позволяет описать спектры протонов вплоть до импульсов 500 МэВ/с (это соответствует относительно импульсу нуклонов в дейтроне ≈ 800 МэВ/с). Для описания результатов измерений сечений кумулятивного рождения протонов при импульсах больше чем 500 МэВ/с, в ряде моделей вводят дополнительную шестикварковую компоненту. Подробно этот вопрос рассмотрен в пятой главе диссертации.

В рамках релятивистского импульсного приближения показано, что спектры кумулятивных пионов, рожденных во взаимодействии протонов высоких энергии с дейтронами, нельзя описать в этой модели при импульсах ≥ 450 МэВ/с. Различие в конце спектра превышает порядок величины**.

* Стрикман Н.И., Франкфурт Л.Л. ЭЧАЯ, 1980, т.11, с.950

** Каптарь Л.П. и др. ЯФ, 1985, т.42, с.777.

В четвертой главе обсуждаются результаты экспериментов по кумулятивному рождению K^+ -мезонов во взаимодействии протонов и дейтронов с импульсом 8,9 ГэВ/с с ядрами. Изучение кумулятивного рождения странных частиц позволяет провести ряд принципиально новых и нетривиальных проверок кварк-партоновой картины кумулятивных процессов.

В §1 обсуждаются методические вопросы, связанные с регистрацией каонов, приведены таблицы экспериментальных данных. В работе выполнено исследование кумулятивного рождения K^+ - и K^- -мезонов в протон-ядерных и дейтрон-ядерных взаимодействиях при импульсе первичных частиц 8,9 ГэВ/с. Измерены энергетические спектры K^+ -мезонов при различных углах эмиссии (90° , 120° , 168°), зависимость сечений рождения K^+ -мезонов с импульсом 700 МэВ/с от угла эмиссии, зависимость сечений рождения K^+ и K^- -мезонов от атомного веса ядра мишени.

В §2 обсуждаются энергетические спектры и угловые зависимости сечений рождения K^+ и K^- -мезонов в pA- и dA-взаимодействиях. Показано, что энергетические спектры K^+ - и K^- -мезонов хорошо описываются экспоненциальной зависимостью $\exp(-T/T_0)$, но параметр T_0 зависит от сорта рожденных частиц (π , K^+ , K^-) и угла эмиссии. Значения параметра T_0 для алюминия и свинца совпадают с точностью примерно 10%. На рис. 10. приведены энергетические спектры каонов, измеренные в pPb- и dPb- взаимодействиях. Сплошными линиями на рисунке отмечены данные для угла регистрации 90° , а пунктирными - для угла 168° .

Также показано, что представление сечений рождения положительных и отрицательных каонов в зависимости от их кинетической энергии указывает на сильную зависимость сечений от первичной энергии (этот вывод сделан на основе наших данных и данных при энергии 400 ГэВ из работы*). На рис.3 символами (★) обозначены экспериментальные данные по зависимости от косинуса угла наблюдения инклюзивного сечения рождения K^+ -мезонов с импульсом 700 МэВ/с для ядра свинца при облучении дейтронами с импульсом 8,9 ГэВ/с. Из рисунка видно подобие зависимостей для положительных каонов и пионов.

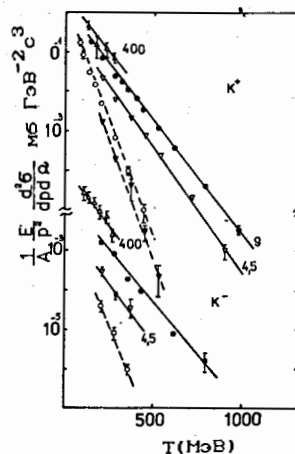


Рис.10. Энергетические спектры K^+ -мезонов.

* Nikiforov N.A. et al. Phys. Rev., 1980, v.22C, p.700.

В §3 проведено сравнение экспериментальных данных по кумулятивному рождению пионов и каонов на ядрах. Представление сечений рождения мезонов в зависимости от их кинетической энергии не отражает удовлетворительным образом такие существенные характеристики кумулятивного эффекта, как предельная фрагментация ядер, универсальный характер поведения спектров различных частиц. Поэтому В.С.Ставиным* было предложено использовать для анализа экспериментальных данных масштабную переменную X (кумулятивное число). По физическому смыслу X - это минимальная масса мишени, выраженная в единицах нуклонной массы, при взаимодействии с которой первичного адрона как целого возможно рождение наблюдаемой частицы.

Представление сечений рождения пионов и каонов в зависимости от кумулятивного числа X позволило выявить ряд замечательных свойств. Спектр кумулятивных мезонов (π^+ , π^- , K^+ , K^-) в зависимости от X имеет простое экспоненциальное поведение $\exp(-X/\langle X \rangle)$. Причем параметр $\langle X \rangle$ имеет универсальный характер не только для различных ядер (от алюминия до свинца), но и для различных по кварковому составу вторичных частиц.

Отметим еще одну чрезвычайно интересную закономерность. Величины сечений рождения пионов и K^+ -мезонов при одинаковом значении масштабной переменной X приблизительно равны друг другу. Для случая рождения K^- -мезонов при равной величине кумулятивного числа отношение сечений рождения пионов и K^- -мезонов $\approx 5\%$.

В §4 обсуждаются результаты измерений зависимости сечения рождения каонов от атомного веса ядра-мишени. При обсуждении A -зависимости сечений рождения пионов мы установили, что сечение рождения пионов, деленное на атомный вес фрагментирующего ядра сначала растет с увеличением атомного веса ядра до $A \approx 20+30$, но для атомных ядер с $A \geq 30$ сечение на нуклон остается примерно постоянным (т.е. реализуется зависимость типа A^1). Измерения A -зависимости сечений рождения K^- -мезонов в pA - и dA -взаимодействиях указывают на то, что зависимости отрицательно заряженных каонов и пионов от атомного веса ядра мишени подобны.

Из рис. 4, где символами (+) обозначены экспериментальные данные для отношения $d\sigma(A)/d\sigma(Pb)$, видно, что поведение A -зависимости сечений для кумулятивных протонов и пионов существенно отличается. Сечения рождения кумулятивных протонов, деленные на атомный вес фрагментирующего ядра, растут с ростом A , и только для $A \geq 100$ можно говорить о поведении A -зависимости, близком к A^1 . Описание

* Ставицкий В.С. Сообщение ОИЯИ P2-9572. Дубна, 1976.

экспериментальных данных по сечениям рождения протонов на различных ядрах зависимостью вида A^1 дает значение показателя степени $\approx 1,3+1,5$.

На рис.4 символами (*) обозначены экспериментальные данные для сечений рождения K^+ -мезонов с импульсом 500 МэВ/с и углом регистрации 168° . Эти данные указывают на различное поведение A -зависимости сечений рождения пионов и K^+ -мезонов и подобие зависимостей от атомного веса фрагментирующего ядра для K^+ -мезонов и протонов. По нашему мнению, как для протонов, так и для K^+ -мезонов существует подавление выхода этих частиц на легких ядрах и атомных ядрах среднего атомного веса, обусловленное фактором "нелокальности". Рождение K^+ -мезонов сопровождается рождением A -гиперонов и, следовательно, затрагивает нуклонные степени свободы в ядрах. В этом мы видим подобие A -зависимостей для случая рождения K^+ -мезонов и протонов.

В пятой главе работы экспериментальные данные по кумулятивному рождению частиц обсуждаются в рамках кварк-партоновых представлений о механизме адрон-ядерных реакций при высоких энергиях. В рамках кварк-партоновой модели фрагментации показана связь экспериментально измеряемых сечений рождения мезонов с импульсным распределением кварков в ядре. Введено понятие кварк-партоновой структурной функции ядра и изучены ее свойства. Рассмотрены различные варианты сравнения результатов расчета с экспериментальными данными.

В §1 обсуждаются условия, при которых в адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях становятся существенными кварковые степени свободы в ядре, а нуклоны нельзя рассматривать как квазичастицы ядерной материи. В качестве количественного критерия, выделяющего область, в которой адроны утрачивают свою роль квазичастиц ядерной материи, А.М.Балдин* предложено использовать

$$b_{ik} = - (p_i/m_i - p_k/m_k)^2 = 2 (p_i p_k / m_i m_k - 1) \gg 1,$$

где p_i - четырехимпульсы, а m_i - массы адронов, участвующих в реакции $I + II \rightarrow 1 + \dots$. Физический смысл критерия состоит в том, что при больших относительных четырехскоростях взаимодействие между кварками, входящими в состав объекта i , и кварками, входящими в состав объекта k , ослабевает настолько, что его можно рассматривать по теории возмущений.

В §2 обсуждаются экспериментальные данные, свидетельствующие в пользу того, что распределение кварков и глюонов в нуклонах, находящихся внутри атомных ядер, существенно отличается от их распределения в свободных нуклонах. Иначе говоря, мы представим

* Baldin A.M. Nucl. Phys., 1985, v.434A, p.695.

доказательства того, что кварк-партонные структурные функции ядер являются самостоятельными (не сводимыми к однонуклонным) объектами адронной физики. Тот факт, что при определенных условиях кварки являются квазисвободными частицами, позволяет нам изучать их распределение в ядрах. В 1980 году А.М. Балдин* ввел новую физическую концепцию - кварк-партонную структурную функцию ядра. Им было высказано и обосновано предположение о том, что сечение фрагментации ядра в мезон, измеренное экспериментально в инклюзивном процессе $h + A \rightarrow \pi + \dots$, пропорционально импульсному распределению кварков в ядрах (кварковый стриппинг с последующей мягкой адронизацией):

$$E_1 d\sigma/dp \propto B_{A/q}(X, p_T^2).$$

При анализе экспериментальных данных мы используем переменную X , которая для адронных процессов отличается от переменной Бьеркена учетом массовых поправок.

На основании наших экспериментальных данных по кумулятивному рождению мезонов в протон-ядерных взаимодействиях при импульсе первичных протонов 8,9 ГэВ/с установлены следующие основные свойства кварк-партонных структурных функций $B(X, p_T^2)$, где X - масштабная переменная, определенная в интервале $0 < X < A$ (кумулятивная область соответствует $X > 1$):

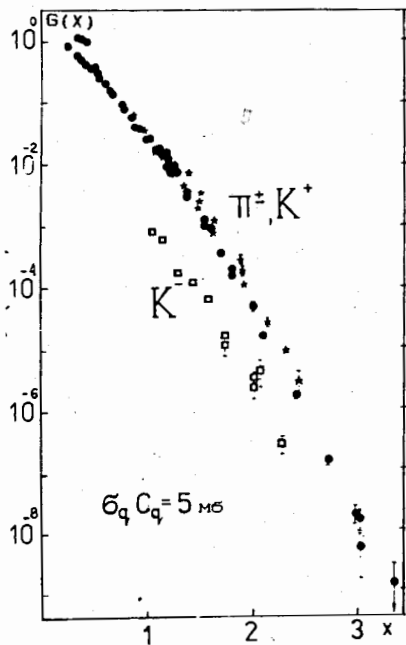


Рис.11. Структурная функция $B(X)$.

1. В области $0,6 < X < 3,5$ функция $B(X, 0)$ имеет универсальные свойства для различных ядер и может быть приближенно описана зависимостью

$$B(X, 0) = \text{const } A^{m(X)} \exp(-X/\langle X \rangle).$$

При этом для средних и тяжелых ядер $\langle X \rangle \approx 0,14$ в пределах 10% точности. Показатель степени $m(X) = 2/3 + X/3$ для интервала $0,6 \leq X \leq 1$ и $m(X) \approx 1$ при $X > 1$ и $A > 20 \div 30$. На рис.11 показано поведение структурной функции $B(X, 0)$ в зависимости от X .

*Baldin A.M. Proc. Conf. on Extreme State in Nucl. Syst., Dresden, 1980, v.1, p.1.

2. Сечение рождения пионов на легчайших ядрах (дейтерия и гелия) так же, как для средних и тяжелых ядер, можно приближенно описать зависимостью $\exp(-X/\langle X \rangle)$. Однако если на средних и тяжелых ядрах значение параметра $\langle X \rangle$ при описании спектра кумулятивных пионов равно $\approx 0,14$, то для случая рождения пионов на ядрах дейтерия параметр $\langle X \rangle$ равен $0,098 \pm 0,002$ в интервале $1,0 \leq X \leq 1,6$. Отметим, что аппроксимация $\exp(-X/\langle X \rangle)$ является приближенной и наблюдается небольшая зависимость $\langle X \rangle$ от X . На рис.12 приведены значения $\langle X \rangle$ для различных интервалов X для случая рождения π^\pm -мезонов под углом 180° ($p_T \approx 0$) на ядрах дейтерия.

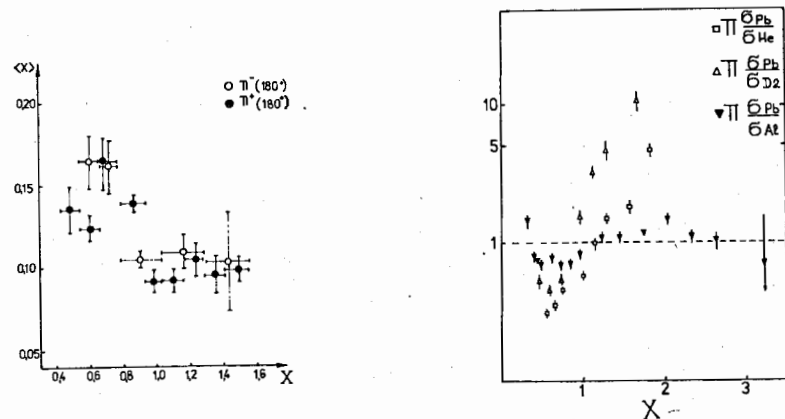


Рис. 12. Зависимость параметра $\langle X \rangle$ от X при описании спектра пионов из дейтрона функцией $\exp(-X/\langle X \rangle)$. Рис. 13. Зависимость от X отношений сечений рождения пионов (на нуклон) от X при описании спектра пионов на ядрах дейтерия, гелия, алюминия (см. рис.13). Величина $d\sigma(\text{Pb})/d\sigma(A) < 1$ при $X < 1$, что является следствием обсуждаемой выше зависимости показателя степени m от X . В области $X > 1$ отношение структурных функций ядра свинца к структурной функции легчайших ядер существенно превышает единицу. Это обусловлено тем, что в ядре дейтерия отсутствуют конфигурации, включающие кварки более двух нуклонов. Однако для ядер свинца и алюминия отношение сечений на нуклон примерно равно единице для значения переменной $X \geq 1$.

3. Изучена зависимость от X отношений сечений рождения пионов (на нуклон) на ядре свинца и ядрах дейтерия, гелия, алюминия (см. рис.13). Величина $d\sigma(\text{Pb})/d\sigma(A) < 1$ при $X < 1$, что является следствием обсуждаемой выше зависимости показателя степени m от X . В области $X > 1$ отношение структурных функций ядра свинца к структурной функции легчайших ядер существенно превышает единицу. Это обусловлено тем, что в ядре дейтерия отсутствуют конфигурации, включающие кварки более двух нуклонов. Однако для ядер свинца и алюминия отношение сечений на нуклон примерно равно единице для значения переменной $X \geq 1$.

Большое внимание как экспериментаторов, так и теоретиков вызвали результаты ЕМС-коллораации. В этих экспериментах в глубоконеупругом лептон-ядерном рассеянии было обнаружено, что в области $X \sim 0,5$

распределения кварков в нуклоне железа и в нуклоне дейтрона заметно различаются. Показано, что с ростом A структурная функция (сечение) уменьшается.

В кумулятивной области зависимость структурной функции от атомного веса ядра имеет совершенно другой характер, а именно рост сечений на нуклон ядра с ростом A при $A \leq 30$ и затем выход на константу (см. рис.4). Наши данные для $X > 1$ по отношению сечений рождения кумулятивных пионов на тяжелом атомном ядре и дейтроне мы рассматриваем как экспериментальное предсказание для лептон-ядерных реакций. В диссертации выполнено сравнение наших результатов по измерению этого отношения с результатами измерения аналогичного отношения при $X > 1$ в группе С. Рока (СЛАК) в экспериментах по рассеянию электронов на ядрах алюминия и дейтерия и отмечается согласие результатов, полученных в адрон-ядерных реакциях и электрон-ядерном рассеянии.

Считаем важным и то экспериментальное наблюдение, что как в глубоконеупругом рассеянии, так и в адрон-ядерных реакциях величина отношения сечений (на нуклон) рождения пионов (структурных функций) на тяжелом ядре и дейтроне равна единице в области $X \approx 0,9$, а не при $X \approx 0,5$, как получается в расчетах в рамках ядерных моделей с учетом только нуклонных степеней свободы.

4. Поведение сечений рождения K^+ - и π^+ -мезонов в зависимости от X (структурная функция) имеет универсальный характер $\exp(-X/0,14)$. Выполняется следующее приближенное соотношение между сечениями кумулятивного рождения пионов и положительных каонов при одинаковом значении X :

$$E_1 \frac{d\sigma}{dp}(\pi^+) \approx E_1 \frac{d\sigma}{dp}(\pi^-) \approx E_1 \frac{d\sigma}{dp}(K^+) .$$

Этот экспериментальный факт можно понять в рамках фрагментационной модели. Действительно, кумулятивные π^+ и K^+ -мезоны образуются в результате подхвата валентным u -кварком антикварка \bar{d} или \bar{s} .

При равных значениях масштабной переменной X сечение рождения K^- -мезонов составляет $\sim 5\%$ от величины рождения K^+ -мезонов и пионов. Этот результат находится в согласии с предсказаниями кваркового механизма для кумулятивных процессов. Действительно, валентные кварки сталкивающихся объектов входят в состав K^+ и π^+ -мезонов, но не входят в состав K^- .

Результаты измерений показали, что отношение сечений рождения K^+/K^- (или π^+/K^-) остается постоянным в интервале значений масштабной переменной X от 1 до 2,5. Этот результат мы рассматриваем как первое экспериментальное указание на существование "жесткого моря" в ядрах в области $X > 1$. Причем импульсное распределение кварков в этом жестком море подобно распределению валентных кварков.

5. Наши экспериментальные данные по сечениям рождения пионов для углов эмиссии 90° и 168° и данные ИТЭФ* для угла 119° позволили провести анализ экспериментальных данных по зависимости от p_T^2 (θ). Показано, что зависимость $\Phi(p_T^2) = d\sigma(X,0)/d\sigma(X,p_T^2)$ довольно слабая. В области $X > 1$ зависимости сечений от X при разных углах отличаются друг от друга на константу, которая зависит от угла наблюдения.

6. Выполнено сравнение сечений рождения кумулятивных пионов и каонов при энергии 9 ГэВ и 400 ГэВ и показано примерное равенство сечений генерации этих частиц при равных значениях масштабной переменной X . Отметим, что в представлении данных в зависимости от кинетической энергии отличие при этих двух энергиях превышает порядок величины. Показано, что выход на скейлинговое поведение в переменной X происходит при энергии ≈ 9 ГэВ, причем из данных по рождению мезонов в dA -взаимодействиях при энергии 4,5 ГэВ на нуклон следует, что сечения при этой энергии превышают сечения при более высоких энергиях, то есть выход на скейлинговое поведение происходит "сверху".

В §3 выполнен обзор теоретических моделей, рассматривающих процесс кумулятивного рождения частиц на кварковом уровне. Совокупность экспериментальных данных по кумулятивному рождению частиц ядрами не может быть объяснена в рамках традиционных представлений о ядре как совокупности отдельных квазисвободных нуклонов и дает весомые основания для объяснения явления на базе представлений о существовании в ядрах мультикварковых состояний, изменении свойств нуклона, помещенного в ядерную среду. В работе проанализированы различные варианты кварк-партоновых моделей, проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Выполнена большая программа экспериментов по исследованию кумулятивного рождения частиц во взаимодействиях протонов и дейтронов с импульсом 8,9 ГэВ/с с атомными ядрами. Использование в установке магнитного анализа, а также идентификация вторичных частиц по времени пролета, ионизационным потерям и интенсивности черенковского излучения позволили надежно регистрировать вторичные частицы (пионы, каоны, протоны и барионные фрагменты) при работе установки в пучках высокой интенсивности (до нескольких единиц на 10^{11} частиц в секунду).

* Бояринов С.В. и др. ЯФ, 1987, т.46, с.1472.

Именно работа в высокоинтенсивных пучках первичных частиц позволила измерить сечения рождения пионов в жесткой части спектра (вплоть до значений кумулятивного числа 3,5), выполнить систематическое исследование кумулятивного рождения странных мезонов.

Создано математическое обеспечение спектрометра ДИСК-2.

Программное обеспечение использовалось при проведении экспериментов на установке ДИСК-2 на синхрофазотроне ОИЯИ и обработке результатов измерений в период с 1975 по 1988 гг.

Главной особенностью экспериментальных данных, полученных на установке ДИСК-2, является измерение сечений рождения кумулятивных пионов на ядрах в жесткой части спектра. В течение почти десяти лет эти экспериментальные данные были единственным результатом по измерению сечений при значениях кумулятивного числа больше двух. Исследование жесткой части спектра чрезвычайно важно для интерпретации результатов измерений в рамках кварк-партоновых представлений.

2. Для большого набора атомных ядер (более 20 ядер с разными значениями атомного веса A) выполнено исследование A - зависимости сечений кумулятивного рождения пионов. Показано, что зависимость отношения сечений на нуклон на ядре A и свинце сначала резко растет с ростом A , но начиная с $A \approx 20-30$ значение отношения с точностью 10 - 20% равно единице, что свидетельствует о зависимости типа A^1 . Подробные исследования A - зависимости сечений показали, что ее поведение регулируется не импульсом и углом эмиссии вторичных пионов, а их кумулятивным числом.

3. Выполнено систематическое исследование кумулятивного рождения пионов на легчайших ядрах дейтерия и гелия. Эти данные чрезвычайно важны, поскольку в этом случае можно провести точный учет ядерных эффектов и извлечь непосредственную информацию о кварковой структуре легчайших ядер.

Обнаружено, что форма спектра пионов, рожденных в pD - взаимодействиях при кинетических энергиях пионов $T_\pi < T_\pi^{\max}$ (NN) повторяет форму спектра пионов, рожденных в pp - взаимодействиях, а сами величины сечений удовлетворяют соотношению:

$$Ed^3\sigma/d^3p (pD \rightarrow \pi) \approx Ed^3\sigma/d^3p (pN \rightarrow \pi^+) + Ed^3\sigma/d^3p (pN \rightarrow \pi^-)$$

При переходе к кумулятивной области, т.е. для энергии рожденных пионов $T_\pi > T_\pi^{\max}$ (NN) параметр наклона спектра меняется слабо.

4. Измерены энергетические спектры и угловые зависимости сечений рождения протонов на дейтроне и гелии. Обнаружено существенное превышение сечений рождения кумулятивных протонов по сравнению с сечениями рождения кумулятивных пионов.

Установлено, что поведение энергетических спектров и угловые зависимости сечений рождения протонов на ядрах гелия и свинца практически совпадают и близки к энергетическому спектру и угловой зависимости сечений рождения протонов на дейтерии. Это является серьезным аргументом в пользу локального характера кумулятивных процессов.

5. Проведено сравнение экспериментальных данных по рождению пионов и протонов на ядре дейтерия с результатами расчета в рамках релятивистского импульсного приближения. Показано, что протонный спектр описывается с использованием реалистической волновой функции до импульсов ~ 500 МэВ/с, а спектр пионов до импульса ~ 450 МэВ/с. Различие между экспериментально измеренными сечениями и результатами расчета в конце спектра составляет примерно порядок величины. Для объяснения этой разницы в ряде теоретических моделей вводится шестикварковая компонента в волновой функции дейтрона.

6. Выполнено систематическое исследование кумулятивного рождения каонов в протон-ядерных и дейтрон-ядерных взаимодействиях. Обнаружено, что зависимость сечения рождения кумулятивных пионов и каонов от масштабной переменной X имеет экспоненциальное поведение $\exp(-X/\langle X \rangle)$, причем величина параметра $\langle X \rangle \approx 0.14$ имеет с точностью до 10% универсальное значение не только для различных ядер, но и для различных вторичных частиц.

Установлено, что в кумулятивных процессах для тяжелого ядра при одинаковом значении масштабной переменной X выполняется соотношение:

$$Ed^3\sigma/d^3p (\pi^+) \approx Ed^3\sigma/d^3p (\pi^-) \approx Ed^3\sigma/d^3p (K^+)$$

7. Обнаружено, что величина сечений рождения K^- - мезонов составляет $\approx 5\%$ от сечения рождения K^+ - мезонов при одинаковых X . Величина отношения сечений рождения K^+ - и K^- - мезонов в интервале от 1,0 до 2,5 не зависит от значения масштабной переменной X . Этот нетривиальный результат в некоторых моделях объясняется путем введения в структурную функцию ядра дополнительного "жесткого" кварк - антикваркового моря.

8. Установлено, что A - зависимость сечений рождения K^+ - мезонов близка к протонной, в то время как A - зависимость сечений рождения K^- - мезонов повторяет A - зависимость сечений рождения пионов.

9. На основе кварк - партоновой модели фрагментации показано, что экспериментально измеряемые сечения рождения мезонов можно связать с импульсным распределением кварков в ядре. Введено понятие кварк - партоновой структурной функции ядра и изучены ее свойства. На основании

экспериментальных данных сделан вывод о том, что кварк-партонные структурные функции ядер качественно отличаются от кварк-партонных структурных функций нуклонов в ядре и не могут быть сведены к суперпозиции последних.

10. В работе проанализированы теоретические подходы по объяснению процессов кумулятивного рождения и сделан вывод о том, что основой для объяснения явления служит кварк-партонный механизм.

11. Результаты, впервые полученные на установке ДИСК-2, подтверждены в других экспериментах по исследованию кумулятивных процессов.

Результаты, изложенные в диссертационной работе, опубликованы в работах :

1. Аверичева Т.В., Балдин А.М., Басиладзе С.Г., Бондарев В.К., Гиорданеску Н., Голованов Л.Б., Крячко А.П., Мазарский В.Л., Манятовский А.Н., Матюшевский Е.А., Мороз Н.С., Нежданова С.А., Никитюк Н.М., Панебратцев Ю.А., Повторейко А.А., Рихвицкий С.В., Ставинский В.С., Хренов А.Н., Цвинева А.П. Установка для исследования кумулятивного рождения частиц (ДИСК). - Сообщение ОИЯИ 1-11317, Дубна, 1978.

2. Иванченко И.М., Карпенко Н.Н., Панебратцев Ю.А., Садовников В.Н., Сеннер А.Е., Сеннер Л.А., Ставинский В.С. Комплекс программ реального времени для исследования на установке ДИСК-2 кумулятивного рождения частиц. - Сообщение ОИЯИ 10-81-754, Дубна, 1981.

3. Панебратцев Ю.А., Ставинский В.С. Программа для моделирования работы установки ДИСК-2 методом Монте - Карло. - Сообщение ОИЯИ Р1-82-434, Дубна, 1982.

4. Baldin A.M., Khrenov A.N., Manyatovsky A.N., Moroz N.S., Panebratsev Yu.A., Povtorejko A.A., Rikhvitsky S.V., Stavinsky V.S. Angular and Energy Dependens of Cumulative Particle Production Cross Sections, European Conf. on Part. Phys., Budapest, 1977. Book of Abstracts, p. 37 .

5. Балдин А.М., Бондарев В.К., Голованов Л.Б., Мазарский В.Л., Манятовский А.Н., Мороз Н.С., Панебратцев Ю.А., Повторейко А.А., Рихвицкий С.В., Ставинский В.С., Хренов А.Н., Цвинева А.П. Кумуляция легких ядер. Сообщение ОИЯИ, Р1-11168, Дубна, 1977.

6. Балдин А.М., Бондарев В.К., Голованов Л.Б., Мазарский В.Л., Манятовский А.Н., Мороз Н.С., Панебратцев Ю.А., Повторейко А.А., Рихвицкий С.В., Ставинский В.С., Хренов А.Н., Цвинева А.П. Экспериментальные данные по кумулятивному рождению пионов при взаимодействии протонов с импульсом 8,9 ГэВ/с с легкими ядрами. - Сообщение ОИЯИ, 1-82-28, Дубна, 1982.

7. Балдин А.М., Бондарев В.К., Гиорданеску Н., Манятовский А.Н., Мороз Н.С., Панебратцев Ю.А., Пенця М., Повторейко А.А., Рихвицкий С.В., Ставинский В.С., Хренов А.Н. Экспериментальные данные по кумулятивному рождению положительных и отрицательных каонов в рРb - взаимодействии. - Сообщение ОИЯИ, 1-80-488, Дубна, 1980.

8. Baldin A.M., Bondarev V.K., Ghiordanescu N., Khrenov A.N., Litvinenko A.G., Manyatovsky A.N., Moroz N.S., Panebratsev Yu.A., Pentia M., Rikhvitsky S.V., Stavinsky V.S. Experimental Data on Inclusive Cross Section for Cumulative Production of Pions, Kaons, Antiprotons and the Quark-Parton Structure Function of Nuclei. Сообщение ОИЯИ, Е1-82-472, Дубна, 1982.

9. Балдин А.М., Панебратцев Ю.А., Ставинский В.С. О распределении кварков в ядрах, ДАН СССР, т. 279, с. 1352, 1984.

10. Бондарев В.К., Зарубин П.И., Литвиненко А.Г., Мозелев А.А., Мороз Н.С., Панебратцев Ю.А., Рихвицкий С.В., Ставинский В.С., Хоршева Г.Е., Хренов А.Н. А - зависимость сечений кумулятивного рождения π^- -мезонов с поперечным импульсом 1100 МэВ/с. - Сообщение ОИЯИ, 1-84-706, Дубна, 1984.

11. Бондарев В.К., Зарубин П.И., Литвиненко А.Г., Мозелев А.А., Мороз Н.С., Панебратцев Ю.А., Рихвицкий С.В., Ставинский В.С., Хоршева Г.Е., Хренов А.Н. А-зависимость сечений кумулятивного рождения π^- -мезонов в протон-ядерных взаимодействиях. - Краткие сообщения ОИЯИ, 4-84, Дубна, 1984, стр.5.

12. Балдин А.М., Бондарев В.К., Панебратцев Ю.А., Пенця М., Литвиненко А.Г., Ставинский В.С. О распределении кварков в ядрах. Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий, ОИЯИ, Д, 2-84-599, Дубна, 1984, стр. 194.

13. Baldin A.M., Bondarev V.K., Khrenov A.N., Litvinenko A.G., Moroz N.S., Panebratsev Yu.A., Pentia M., Rikhvitsky S.V., Stavinsky V.S. Experimental Studies of Quark Distribution in Nuclei. Proc. II Int. Conf. on Nucleus - Nucleus Collisions, Wisby, Sweden, vol. 1 : Contr. Papers, p. 75, 1985.

14. Baldin A.M., Bondarev V.K., Zarubin P.I., Khrenov A.N., Litvinenko A.G., Moroz N.S., Panebratsev Yu.A., Pentia M., Rikhvitsky S.V., Stavinsky V.S. A-Dependence of Cross Section for Cumulative Processes. Proc. II Int. Conf. on Nucleus - Nucleus Collisions, Wisby, Sweden, vol. 1 : Contr. Papers, p. 73, 1985.

15. Бондарев В.К., Зарубин П.И., Литвиненко А.Г., Панебратцев Ю.А., Ставинский В.С. Новые экспериментальные данные по кумулятивному рождению частиц релятивистскими ядрами. - Труды VIII Межд. семинара по пробл. физики высоких энергий, Дубна, ОИЯИ, Д, 2-86-668, 1987, стр. 245.

16. Bondarev V.K., Zarubin P.I., Litvinenko A.G., Panebratsev Yu.A., Stavinsky V.S. Experimental Studies of Cumulative Particle Production at the Dubna Synchrophasotron and Quark Distribution in Nuclei. - In. : Proc. Quatriemes Journees D'Etudes SATURN la Physique avec MIMAS, La - Londe - Les - Maures, p. 416, 1986.

17. Baldin A.M., Bondarev V.K., Khrenov A.N., Litvinenko A.G., Moroz N.S., Panebratsev Yu.A., Pentia M., Rikhvitsky S.V., Stavinsky V.S. Experimental Data on Limiting Fragmentation of Nuclei and the Quarks Distribution in Nuclei. - Particle and Nuclei Tenth International Conference. Book of Abstracts, vol. 2, p. J11, Heidelberg, 1984.

18. Baldin A.M., Panebratsev Yu.A., Stavinsky V.S. Quark Distribution in Nucleus (hadronic interaction). Proc. of the Int. Europhys. Conference on High Energy Physics, vol. 1, p. 463, Uppsala, Sweden, 1987

19. Panebratsev Yu.A. Dubna Results on Particle Production in Hadron - Nucleus Interactions. Proc. of the XXIV International Conf. on High Energy Physics, Springer - Verlag Berlin, Heidelberg 1989, p. 1406.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 августа 1989 года.