



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

П 444

1-88-813

**ДИДЕНКО**  
Лидия Александровна

**АСИМПТОТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АДРОННЫХ СТРУЙ  
И БАРИОННЫХ КЛАСТЕРОВ  
В ИНВАРИАНТНОМ МЕТОДЕ АНАЛИЗА**

**Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика**

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1988

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОПОНЕНТЫ:**

доктор физико-математических наук, профессор

ГОВОРКОВ  
Борис Борисович

доктор физико-математических наук, профессор

ЛУКЬЯНОВ  
Валерий Константинович

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

КУРЕШИН  
Алексей Борисович

Ведущее научно-исследовательское учреждение - Физический институт АН СССР им. П.Н. Лебедева.

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 1989 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании специализированного совета Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований; г. Дубна Московской области, Лаборатория высоких энергий, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ДВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 1989 года.

Учёный секретарь специализированного совета

*М.Ф. Лихачев* - М.Ф. Лихачев

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Развитие физики высоких энергий неразрывно связано с формированием представлений о внутренней структуре адронов и ядер. Открытие таких динамических закономерностей, как масштабная инвариантность в процессах глубоконеупругого рассеяния лептонов на протонах, фейнмановского скейлинга во взаимодействиях адронов с адронами и др., указывало на точечный характер этих взаимодействий и привело к представлениям о кварк-партонной структуре адронов. В экспериментах по изучению предельной фрагментации различных ядер была показана справедливость масштабной инвариантности для взаимодействий релятивистских ядер. На основе этих данных было высказано предположение о том, что ядро, начиная с некоторой переданной энергии, можно рассматривать как кварк-партонную систему, в которой кварки, относящиеся к различным нуклонам, обобщаются. Эти идеи в дальнейшем получили подтверждение в работах по изучению кварк-партонной структурной функции ядер в процессах глубоконеупругого рассеяния лептонов на ядрах (EMC- эффект).

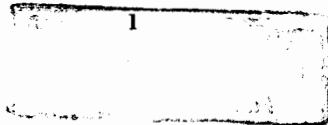
Согласно существующим представлениям цветные кварки в свободном состоянии существовать не могут и переходят в бесцветные состояния - струи адронов.

Развитие физики высоких энергий последних лет в значительной мере обусловлено широкими исследованиями процессов образования адронных струй в различных типах взаимодействий:  $e^+e^-$  - аннигиляции, адрон-адронных, адрон-ядерных и глубоко-неупругих лептон-нуклонных столкновениях. Струи адронов более полно отражают свойства кварков, нежели отдельные адроны. В связи с исследованиями, проводимыми в этом направлении, необходимо отметить следующие актуальные задачи:

I. Изучение взаимодействия кварков на больших расстояниях

Подавляющее большинство работ по исследованиям свойств адронных струй посвящено так называемым жестким процессам, которые характеризуются большой передачей импульса кваркам (физика малых расстояний). Динамика жестких процессов описывается квантовой хромодинамикой. Однако адронизация кварков в рамках этой теории не описывается (проблема конфайнмента). В этом случае используются феноменологические модели.

Как показали исследования последних лет, наиболее характерные свойства мягких адрон-адронных столкновений подобны свойствам струй,



образующихся в жестких взаимодействиях частиц. Отсюда возникла гипотеза "мягкого обесцвечивания", которая заключается в том, что характеристики адронных струй не зависят от происхождения цветной кварковой системы ( типа взаимодействия), а определяются квантовыми числами и энергией кварков-родителей. В связи с этим всестороннее исследование свойств адронных струй в различных взаимодействиях как мягких, так и жестких, нахождение общих закономерностей и различий представляются важными для понимания механизма адронизации цветных кварковых систем и в конечном счете - для решения проблем конфайнмента.

2. Для изучения процессов рождения адронных струй в экспериментах традиционно используются лоренц-неинвариантные переменные: "сферисити", "траст" и др.

Анализ обычно проводится в с.ц.и. взаимодействующих частиц. Однако ввиду составной структуры адронов и ядер экспериментальное определение в каждом индивидуальном случае с.ц.и. практически невозможно и требует привлечения модельных представлений. Полученные таким образом экспериментальные результаты становятся модельно зависимыми. В связи с этим для изучения свойств адронных струй в адрон-адронных, адрон-ядерных и ядро-ядерных соударениях необходимо было ввести релятивистски инвариантные методы их выделения и анализа.

3. В работах /1,2,3/ был предложен релятивистски-инвариантный подход к анализу процессов множественного рождения в пространстве относительных четырехмерных скоростей с целью единого релятивистски-инвариантного описания основных следствий кварковой структуры адронов и ядер: масштабной инвариантности, предельной фрагментации, образования адронных струй и др. В рамках этого подхода было получено предсказание относительно асимптотических свойств адронных струй. Отмечалось /4/, что в адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях можно ожидать образование барионных кластеров, свойства которых будут подобны свойствам струй, рожденных во взаимодействиях частиц высоких энергий.

Экспериментальное изучение асимптотических свойств адронных струй и барионных кластеров в релятивистски-инвариантном подходе имеет важное значение для понимания процессов адронизации цветных кварковых систем, а также для решения проблем детектирования и описания кварк-глюонной плазмы как предельного асимптотического состояния возбужденной ядерной материи.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- изучение свойств адронных струй и процессов адронизации раз-

личных кварковых систем в мягких  $\pi^-p$ - и кумулятивных  $\pi^-C$ -взаимодействиях; сравнение полученных результатов с аналогичными данными по глубоконеупругим  $\nu(D)P$  - взаимодействиям и  $e^+e^-$  аннигиляции

- развитие релятивистски-инвариантного метода выделения и анализа свойств адронных струй и барионных кластеров в пространстве, относительных четырехмерных скоростей.

- экспериментальное изучение асимптотических свойств адронных струй и барионных кластеров в релятивистски-инвариантном подходе. Для анализа использовались экспериментальные данные по  $\pi^-p$ - и  $\pi^-C$ -взаимодействиям при  $P = 40$  ГэВ/с,  $pp$  - соударениям ( $P = 205$  ГэВ/с);  $\nu N$  - взаимодействиям ( $\langle E_{\nu} \rangle = 35$  ГэВ);  $pC, dC, aC, CC$  - столкновениям ( $P = 4,2 \cdot A$  ГэВ/с), а также  $pC$  - соударениям при  $P = 10$  ГэВ/с.

- нахождение общих закономерностей в образовании адронных струй и барионных кластеров.

#### НОВИЗНА РАБОТЫ И НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ:

- получены обширные данные о струйных характеристиках вторичных частиц в мягких  $\pi^-p$  - взаимодействиях при  $P = 40$  ГэВ/с, которые дополняют информацию о свойствах адронных струй в мягких адрон-адронных взаимодействиях, полученных в других экспериментах ( $K^{\pm}p, pp$ ).

- впервые проводится детальное изучение свойств адронных струй и функций фрагментации кварков и дикварков в кумулятивных адрон-ядерных взаимодействиях.

Показано, что свойства адронных струй и функций фрагментации однопипных кварковых систем (кварков, дикварков) в мягких  $\pi^-p$ -, кумулятивных  $\pi^-C$  и  $e^+e^-$  - столкновениях одинаковы в пределах ошибок эксперимента при одинаковых инвариантных энергиях в с.ц.и. взаимодействия.

- впервые для выделения и анализа свойств адронных струй предложен и использован релятивистски-инвариантный метод, основанный на минимизации суммы квадратов относительных четырехмерных скоростей вторичных частиц.

- впервые для широкого класса реакций в релятивистски-инвариантных переменных экспериментально установлены асимптотические закономерности в поведении адронных струй и барионных кластеров: показано, что адронные струи и барионные кластеры обладают универсальными свойствами по двум релятивистски-инвариантным параметрам подобия  $x_k$  и  $b_k$ , один из которых масштабно-инвариантен, а другой масштабно-неинвариантен.



- впервые на разнообразном экспериментальном материале в релятивистски-инвариантном подходе показано, что адронизация кварков, ди-кварков и мультикварковых систем ядра углерода существенно не зависит от происхождения и свойств цветной кварковой системы.

- впервые в ядро-ядерных взаимодействиях выделены два типа нуклонных кластеров, различающихся своими свойствами.

Полученные экспериментальные данные подтверждают справедливость основных следствий принципа ослабления корреляций и принципа автомодельности второго рода, сформулированных в релятивистски-инвариантном подходе. Полученные результаты важны для развития и разработки новых феноменологических моделей множественных процессов, понимания природы конфайнмента, а также для дальнейшего развития теории сильных взаимодействий.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ работы определяется тем, что, полученные экспериментальные данные и выводы по изучению свойств адронных струй и барионных кластеров в различных взаимодействиях использованы при разработке программ научных исследований для запланированных экспериментов на нуклотроне и У-70.

#### АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты и выводы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории высоких энергий и Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, Научно-исследовательского института ядерной физики Московского государственного университета, на Школе по физике в Институте теоретических и экспериментальных исследований (г. Москва), на сессиях Ученого совета по физике высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, на УП, УШ и IX Международных семинарах по проблемам физики высоких энергий (г. Дубна, 1984, 1986, и 1988 гг.), на Всесоюзном семинаре по взаимодействиям частиц и ядер высоких энергий с ядрами (г. Ташкент, 1985 г.), на Всесоюзном семинаре "Кварки-84" (г. Тбилиси, 1984 г.); представлялись на Международных конференциях по физике высоких энергий в Лейпциге (1984 г.), в Бари (1985 г.), в Беркли (1986 г.), на XI Международной конференции "Частицы и ядра" в Киото (1987 г.) на XIII Международном симпозиуме по многочастичной динамике в г. Ташкенте (1987 г.), на III Международной конференции по ядро-ядерным столкновениям в Сан-Мало (1988 г.).

Основные результаты диссертации опубликованы в препринтах и сообщениях ОИЯИ, в журналах "Ядерная физика" и "Z. Physik C", в материалах вышеупомянутых семинаров и конференций.

Список публикаций приводится в конце автореферата.

ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Текст содержит 250 страниц, включая 25 таблиц и 88 рисунков. Список литературы состоит из 138 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность исследования процессов рождения адронных струй и барионных кластеров в различных взаимодействиях, формулируется основная цель работы. Кратко охарактеризовано экспериментальное состояние этих вопросов, приводится краткое содержание разделов диссертации.

В первой главе диссертации описывается методика эксперимента. Экспериментальный материал получен с помощью двухметровой пропановой ( $C_3H_8$ ) пузырьковой камеры ДТПК-500 ЛВЭ ОИЯИ. Приводятся основные характеристики камеры и системы фотографирования. Камера экспонировалась в пучке отрицательных пионов с импульсом  $P = 40,00 \pm 0,24$  ГэВ/с на ускорителе в Серпухове (У-70); в пучках протонов с импульсами  $2 + 10$  ГэВ/с и в пучках релятивистских ядер дейтерия, гелия и углерода при первичном импульсе 4,2 А ГэВ/с на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ. Среднее значение напряженности магнитного поля в рабочем объеме ДТПК-500 составляло  $\langle H \rangle = 15$  кГс.

Просмотр стереофотоснимков проводился на просмотровых столах БПС-1, БПС-2 и САМЕТ. Зарегистрированные события при взаимодействии  $\pi^-$ -мезонов с пропаном ( $C_3H_8$ ) идентифицировались по стандартным для пропановых камер критериям как  $\pi^-$ ,  $\bar{p}-n$  и  $\bar{p}-C$ -соударения. В работе описаны также критерии отбора  $pC$ ,  $dC$ ,  $aC$  и  $CC$ -событий из взаимодействий протонов и релятивистских ядер с пропаном.

Отобранные при просмотре события измерялись на полуавтоматах типа ПУОС, работающих на линии с ЭВМ. Последующий обсчет результатов измерений и формирование ленты суммарных результатов (DST) проводились на ЭВМ CDC-1604A и CDC-6500.

Средние ошибки измерений импульсов вторичных заряженных частиц в пропановой камере оказались равными  $\sim 13\%$  в пионном облучении и  $11,5\%$  в протонном и ядерном облучениях. Число неизмеримых треков составило  $\sim 3\%$  от их полного числа. В камере регистрировались также нейтральные  $V^0$ -частицы по заряженным продуктам распада и  $\gamma$ -кванты. Эффективность нахождения при просмотре  $V^0$ -частиц и  $\gamma$ -квантов составила 99,0%.

Поскольку камера находилась в магнитном поле, отрицательные и поло-

жительные частицы на фотоснимках разделялись по знаку кривизны следов. Все отрицательные частицы, за исключением идентифицированных электронов, считались  $\pi^-$ -мезонами. Методика 2-метровой пропановой камеры позволяет разделить визуально  $\pi^+$ -мезоны и протоны по пробегу и ионизации в интервале импульсов  $150 \leq P_{had} \leq 800$  МэВ/с. В случае облучения камеры  $\pi^-$ -мезонами все положительные частицы с  $P_{had} > 800$  МэВ/с считались  $\pi^+$ -мезонами; доля неидентифицированных протонов среди них составила ~15%. В протонном и ядерном облучениях камеры положительные частицы с  $P_{had} > 800$  МэВ/с считались протонами, а доля неидентифицированных  $\pi^+$ -мезонов среди них не превышала 10%. В работе рассмотрены также вопросы идентификации более тяжелых однозарядных барионов.

Общая статистика анализируемых событий, полученных с помощью пропановой камеры, составила ~62000.

Во второй главе изучаются свойства адронных струй, образующихся в мягких  $\pi p$ -взаимодействиях при импульсе 40 ГэВ/с. Анализ проводится с помощью традиционных переменных "сферисити" ( $S$ ) и "траст" ( $T$ ) в с.ц.и.  $\pi p$ -столкновения. Предполагалось, что струи адронов в мягких  $\pi p$ -взаимодействиях образуются в основном в результате фрагментации непривзаимодействовавших кварков и дикварков, входящих в состав первичных частиц, а вклад от взаимодействующих кварков считался незначительным (рис.1).

Такое предположение не противоречит последним модельным представлениям мягких адрон-адронных столкновений: модель цветной трубки, модель дуально-топологической унитаризации и др.

Характеристики адронных струй в  $\pi p$ -событиях, выделенных с помощью переменных  $S$  и  $T$ , сравниваются с аналогичными данными для процессов  $e^+e^-$ -аннигиляции, в которых свойства струй наиболее хорошо изучены. В  $e^+e^-$ -аннигиляции при  $\sqrt{s} \approx 30$  ГэВ/с

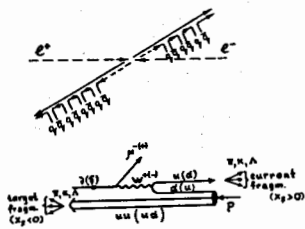
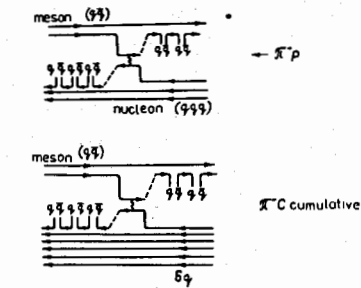


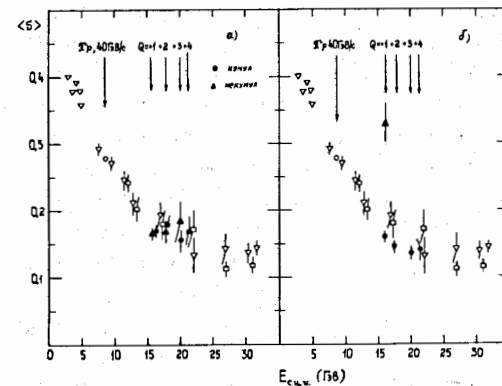
Рис.1. Схема  $\pi p$ -, кумулятивных  $\pi-C$ ,  $e^+e^-$ -,  $\nu(\bar{\nu})p$ - взаимодействий.

в основном рождаются две струи адронов. При сравнении этих данных дифракционные события в  $\pi p$ -взаимодействиях исключались.

На рис.2 показана зависимость средних значений переменной сферисити  $\langle S \rangle$  от энергии в с.ц.и.  $e^+e^-$ -взаимодействий для множественности вторичных заряженных частиц  $n_{\pm} \geq 4$ . Здесь же представлены данные, соответствующие  $\pi p$ -столкновениям с энергией  $E$  с.ц.и. = 8,7 ГэВ. Видно, что значения величины  $\langle S \rangle$  в  $\pi p$ -столкновениях хорошо согласуются с существующей зависимостью этих переменных от энергии в с.ц.и.  $e^+e^-$ -взаимодействия. Большие различия для  $\pi p$ -и  $e^+e^-$ -столкновений наблюдаются в ориентации оси струй относительно первичного направления сталкивающихся частиц, что связано с различием в динамике образования струй в мягких  $\pi p$ - и жестких  $e^+e^-$ -взаимодействиях. Показано, что средние значения поперечных и продольных импульсов вторичных заряженных частиц относительно оси струй в пределах ошибок эксперимента в мягких  $\pi p$ -событиях совпадают с аналогичными данными для  $e^+e^-$ -взаимодействий при одинаковой энергии в с.ц.и. сталкивающихся частиц.

Рис.2.

Зависимость  $\langle S \rangle$  от  $E$  с.ц.и.:  $\nabla, \square$  - для  $e^+e^-$ -аннигиляции;  $\circ$  - для  $\pi p$ -взаимодействий;  $\bullet$  - для кумулятивных  $\pi-C$ -столкновений;  $\blacktriangle$  - для некумулятивных  $\pi-C$ -столкновений; а) - для струй частиц, летящих в переднюю полусферу в с.ц.и.; б) - для струй частиц, летящих в заднюю полусферу в с.ц.и.



На основе полученных результатов делается вывод о том, что в мягких  $\pi p$ -взаимодействиях при  $P = 40$  ГэВ/с в большинстве событий наблюдается образование двух струй адронов, характеристики которых в пределах ошибок экспериментов совпадают с характеристиками струй в  $e^+e^-$ -аннигиляции при одинаковых энергиях в с.ц.и. Струи в  $\pi p$ -взаимодействиях коллимированы по направлению движения сталкивающихся частиц.

В мягких  $\pi^-p$ -соударениях изучаются функции фрагментации  $\mathcal{D}(x_F)$  кварков и дикварков в пионы и странные ( $\Lambda^0, K^0$ ) частицы. Проводится сравнение с аналогичными данными по глубоконеупругим  $\nu(\bar{\nu})p$ -взаимодействиям, полученным с помощью водородной пузырьковой камеры BEBC, со средними значениями инвариантной энергии  $\langle W \rangle = 5,43$  и  $4,63$  ГэВ, а также по  $e^+e^-$ -взаимодействиям. Из сопоставления схем  $\pi^-p$  и  $\nu(\bar{\nu})p$ -взаимодействий (рис.1), где струи адронов образуются в результате адронизации выбитых кварков и оставшихся от протона дикварков, и в предположении о том, что легкие кварки  $\bar{u}, d$  взаимодействуют равновероятно, были записаны следующие соотношения для функций фрагментации кварков и дикварков в пионы:

$$\mathcal{D}_{\pi^+}^{\bar{u}}(x_F) = \frac{1}{2} \mathcal{D}_{\nu p}^{\bar{u}}(x_F) + \frac{1}{2} \mathcal{D}_{\bar{\nu} p}^{\bar{u}}(x_F) \quad - \text{фрагментация кварка, (1)}$$

$$\mathcal{D}_{\pi^+}^{\bar{d}}(x_F) = \frac{1}{3} \mathcal{D}_{\nu p}^{\bar{d}}(x_F) + \frac{2}{3} \mathcal{D}_{\bar{\nu} p}^{\bar{d}}(x_F) \quad - \text{фрагментация дикварка. (2)}$$

Здесь учитывались зарядовосопреженные соотношения для фрагментации кварков:

$$\mathcal{D}_u^{\bar{u}}(x_F) = \mathcal{D}_u^{\bar{u}}(x_F) \quad \text{и} \quad \mathcal{D}_u^{\bar{d}}(x_F) = \mathcal{D}_u^{\bar{d}}(x_F)$$

На рис.3 а, б приведены функции фрагментации  $\mathcal{D}^{\bar{u}}(x_F)$  кварков ( $x_F > 0$ ) и  $\mathcal{D}^{\bar{d}}(x_F)$  дикварков ( $x_F < 0$ ), полученные в эксперименте для мягких  $\pi^-p$ -взаимодействий, и функции, рассчитанные по формулам (1) и (2) с использованием данных по  $\nu(\bar{\nu})p$ -столкновениям.

Как видно из рисунков, полученные распределения согласуются друг с другом в пределах ошибок экспериментов во всей области  $x_F$ , за исключением области  $|x_F| \leq 0,1$ , в которой для  $\pi^-p$ -взаимодействий существен вклад от взаимодействующих кварков. Однако распределения  $\mathcal{D}^{\bar{u}}(x_F)$  в области фрагментации кварков имеют наклон меньше, чем в области фрагментации дикварков. На основе анализа этих данных, а также изучения фрагментации кварков и дикварков в странные  $\Lambda^0$  и  $K^0$ -частицы сделан вывод о том, что функции фрагментации кварков (дикварков) в  $\pi^\pm, \Lambda^0$  и  $K^0$ -частицы в мягких  $\pi^-p$ ; жестких  $\nu(\bar{\nu})p$ - и  $e^+e^-$ -столкновениях одинаковы в пределах ошибок эксперимента при одинаковых энергиях в с.ц.и. Однако функции фрагментации кварков и дикварков между собой различаются.

В третьей главе изучается образование струй адронов в кумулятивных  $\pi^-C$ -столкновениях, в которых по общепринятым представлениям взаимодействие происходит с мультикварковыми системами ядра углерода (рис.1). Можно ожидать, что адронизация кварков из мультикварковых состояний будет "мягкой" и свойства адронов в кумулятивных струях будут подобны свойствам струй в уже рассмотренных мягких

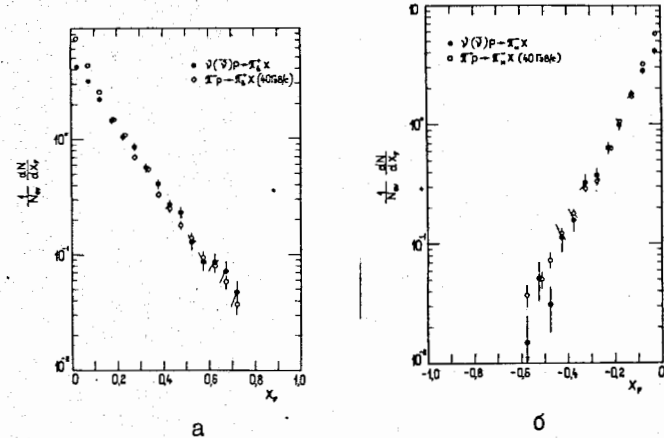


Рис.3. Функции фрагментации  $\mathcal{D}^{\bar{u}}(x_F)$  :  
 а)  $\mathcal{D}^{\bar{u}}(x_F > 0)$  :  $\bullet \frac{1}{2} \mathcal{D}_{\nu p}^{\bar{u}} + \frac{1}{2} \mathcal{D}_{\bar{\nu} p}^{\bar{u}}$ ;  $\circ \mathcal{D}_{\pi^- p}^{\bar{u}}$   
 б)  $\mathcal{D}^{\bar{d}}(x_F < 0)$  :  $\bullet \frac{1}{3} \mathcal{D}_{\nu p}^{\bar{d}} + \frac{2}{3} \mathcal{D}_{\bar{\nu} p}^{\bar{d}}$ ;  $\circ \mathcal{D}_{\pi^- p}^{\bar{d}}$ .

$\pi^-p$ - и жестких  $\nu(\bar{\nu})p$ - и  $e^+e^-$ -столкновениях.  
 Для анализа отбирались группы многоуклонных  $\pi^-C$ -взаимодействий с суммарным зарядом вторичных частиц  $Q = +1, +2, +3, +4$ , что определяло число взаимодействующих нуклонов от ядра углерода  $\nu_N \geq 2$ . Анализ проводился в с.ц.и. столкновения  $\pi^-$ -мезонов с  $\nu_N$  нуклонами. Энергия в с.ц.и. столкновения  $E_{с.ц.и.}$  определялась по формуле:

$$E_{с.ц.и.} \approx \sqrt{2 \nu_N m_N E_{\pi}} \quad (3)$$

Выделение кумулятивных струй в  $\pi^-C$ -взаимодействиях проводилось в соответствии с условием

$$\beta_0 = \sum_i (E_i - P_{i1}) / m_N \geq 1,0 (1,5), \quad (4)$$

где суммирование велось по всем заряженным частицам, летящим в заднюю полусферу в с.ц.и.  $\pi^- \nu_N$ -взаимодействий. Это означает, что кумулятивные  $\pi^-C$ -столкновения регистрировались по наличию в них (в задней полусфере с.ц.и.) группы вторичных частиц, характеристики которой выходили за кинематику пион-нуклонных соударений. Доля отобранных событий составила  $\sim 18\%$  от полного числа  $\pi^-C$ -взаимодействий. Для выделенных таким образом событий находилась величина сферисити, изучались множественности, продольные и поперечные импульсные характеристики частиц относительно осей струй.

Показано, что в кумулятивных  $\pi^-C$  - соударениях наблюдается рождение в основном двух струй адронов, для которых средняя величина сферисити совпадает с данными для  $e^+e^-$  - и мягких адрон-адронных взаимодействий при одинаковых энергиях в с.ц.и. (рис.2). Струи адронов коллимированы по направлению движения первичного  $\pi^-$ -мезона и против этого направления в с.ц.и.  $\pi^-N$  - столкновения. В рамках модельных представлений они интерпретируются как результат адронизации непривзаимодействовавших валентных кварков, входящих в состав первичных  $\pi^-$ -мезонов, (передняя полусфера в с.ц.и.) и адронизации мультикварковых систем ядра-углерода (задняя полусфера в с.ц.и.).

На рис.4а функции фрагментации кварков  $\mathcal{D}(x_E)$  в  $K^0$ -мезоны сравниваются с аналогичными данными для  $\pi^-p$ - и  $e^+e^-$  столкновений. Представленные зависимости можно аппроксимировать экспоненциальными функциями:

$$\mathcal{D}(x_E) = A \exp(-Bx_E), \quad \text{где} \quad x_E = \frac{2E}{\sqrt{s}}. \quad (5)$$

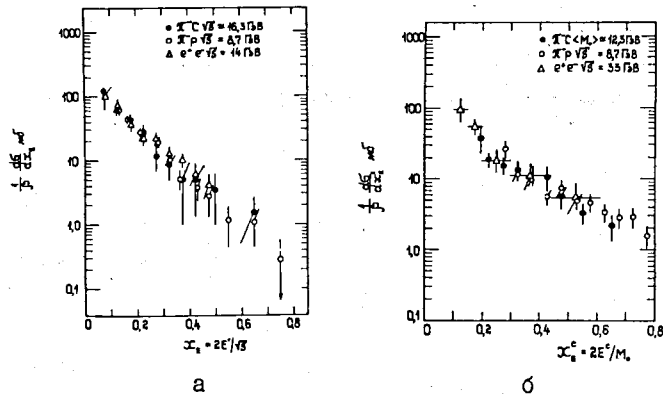


Рис.4.

Функции фрагментации  $\frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dx_E}$  : а) для  $K^0$ -мезонов в передней полусфере в с.ц.и.  $\pi^-p$ - , кумулятивных  $\pi^-C$ - и  $e^+e^-$  - столкновений; б) для  $\Lambda^-$ -гиперонов в задней полусфере в с.ц.и.  $\pi^-p$ - , кумулятивных  $\pi^-C$ - и  $e^+e^-$ -столкновений.

Значения параметра  $B$  приведены в таблице.

Из таблицы видно, что величины  $B$  в процессах фрагментации кварков в различных типах взаимодействий в пределах ошибок эксперимента одинаковы.

Средние значения параметра  $B$ 

Тип частиц, тип взаимодействия	Фрагментация кварков	Область аппроксимации	Фрагментация дикварков	Область аппроксимации
$K^0$ -мезоны $\pi^-C$ , кумул.	$9 \pm 2$	$x_E \geq 0,1$	$8 \pm 4$	$x_E^C \geq 0,15$
$K^0$ -мезоны $\pi^-p$ , 40 ГэВ/с	$10 \pm 1$	$x_E \geq 0,15$	$9 \pm 1$	$x_E \geq 0,15$
$\Lambda^-$ -гипероны $\pi^-C$ , кумул.	$13 \pm 4$	$x_E \geq 0,15$	$5,2 \pm 0,7$	$x_E^C \geq 0,2$
$\Lambda^-$ -гипероны $\pi^-p$ , 40 ГэВ/с	$8 \pm 3$	$x_E \geq 0,3$	$3,6 \pm 0,4$	$x_E \geq 0,3$
$\Lambda^-$ -гипероны $\pi^-p$ , 16 ГэВ/с	$10 \pm 1$	$x_E \geq 0,45$	$4,4 \pm 0,3$	$x_E \geq 0,45$
$K^0, \Lambda^-$ - частицы, $e^+e^-$ - взаимодействия	$\sim 8$	$x_E \geq 0,1$	-	-

Результаты проведенного анализа показали, что все изученные характеристики вторичных частиц в струях, летящих по направлению движения первичного пиона, а также функции фрагментации кварков в пионы и странные  $\Lambda^0, K^0$ - частицы совпадают в пределах экспериментальных ошибок с аналогичными данными для  $e^+e^-$  - и мягких  $\pi^-p$ -столкновений при одинаковых энергиях в с.ц.и.

Для детального изучения свойств кумулятивных струй и сравнения распределений вторичных частиц в струях с аналогичными данными по  $e^+e^-$  - аннигиляции и мягким  $\pi^-p$ -соударениям в кумулятивных  $\pi^-C$ - событиях выделялась подсистема вторичных частиц, идентичная по составу системе вторичных частиц, рождающихся в  $\pi^-p$ - и  $e^+e^-$ -столкновениях. Так, для сравнения распределений  $\pi^\pm$ -мезонов по переменным  $x$  и  $y$  в кумулятивных струях с данными по  $e^+e^-$  - столкновениям выделялась подсистема вторичных пионов  $M_0$ , которая анализировалась в собственной системе покоя; протоны из анализа исключались. Инвариантная энергия подсистемы  $M_0$  определялась следующим образом:

$$M_0 = \sqrt{(E_p^* - E_p^*)^2 - p_p^{*2}}, \quad (6)$$

где  $E_p^*$  и  $p_p^*$  - суммарная энергия и импульс исключенных протонов.

Для изучения функций фрагментации дикварков и сравнения с данными по  $\pi$ - $p$  - соударениям в кумулятивных  $\pi$ - $C$  - взаимодействиях выделялась подсистема  $M_0$  вторичных частиц, состоящая из  $n$  - мезонов и одного бариона (идентифицированного протона или  $\Lambda$  - частицы). Энергия подсистемы  $M_0$  вычислялась согласно формуле (6).

На рис.46 приведены функции фрагментации дикварков в  $\Lambda$  - частицы в кумулятивных  $\pi$ - $C$ - и мягких  $\pi$ - $p$  - столкновениях. Показаны также аналогичные зависимости для процессов фрагментации кварков в  $e^+e^-$  - аннигиляции. Значения параметров  $B$ , полученные при аппроксимации представленных зависимостей экспоненциальной функцией (5), представлены в таблице.

Из таблицы видно, что величина  $B$  для функций фрагментации дикварков в  $K^0$ - и  $\Lambda$  - частицы в кумулятивных  $\pi$ - $C$  - и мягких  $\pi$ - $p$  - взаимодействиях одинакова в пределах экспериментальных ошибок и почти в два раза меньше (для  $\Lambda$  - частиц), чем для функций фрагментации кварков в  $e^+e^-$  - столкновениях. Статистика  $K^0$ -мезонов в задней полусфере  $\pi$ - $p$  - и кумулятивных  $\pi$ - $C$ -событий недостаточна для однозначных выводов.

Результаты проведенного анализа показали, что одночастичные распределения пионов в кумулятивных струях совпадают в пределах ошибок с распределением пионов в струях в  $e^+e^-$  - аннигиляции при одинаковых инвариантных энергиях пионных подсистем; функций фрагментации дикварков в  $K^0$  - и  $\Lambda$  - частицы также одинаковы в кумулятивных  $\pi$ - $C$ - и мягких  $\pi$ - $p$  - взаимодействиях.

Полученные данные указывают на то, что: 1) формирование струй адронов в кумулятивных  $\pi$ - $C$  - столкновениях происходит в основном за пределами ядра углерода; 2) адронизация цветных кварковых систем одного типа (кварков или дикварков) не зависит от способа их образования.

В четвертой главе дается описание основ релятивистски-инвариантного подхода к анализу процессов множественного рождения в пространстве относительных четырехмерных скоростей, подробно описывается метод выделения адронных струй и барионных кластеров.

В релятивистски-инвариантном методе анализа процессы множественного рождения

$$\bar{1} + \bar{n} \rightarrow 1 + 2 + 3 + \dots \quad (7)$$

рассматриваются в пространстве, точками которого являются четырехмерные скорости  $u_i = P_i/m_i$ , где  $P_i$  - четырехимпульсы частиц, а  $m_i$  - их массы. Положительные инвариантные величины, описывающие относительное движение частиц:

$$v_{ik} = - (u_i - u_k)^2 = 2 [(u_i \cdot u_k) - 1], \quad (8)$$

где  $i, k = 1, 2, 3, \dots$ , являются основными переменными, с помощью которых проводится анализ.

С помощью величин  $v_{ik}$  предлагается проводить классификацию релятивистских ядерных взаимодействий, определяющую уровень (нуклонный или кварковый), на котором происходит взаимодействие частиц.

Как показали экспериментальные данные, в пространстве относительных четырехскоростей реализуется принцип ослабления корреляций, который заключается в том, что корреляции между точками  $i$  и  $k$  быстро убывают и стремятся к 0 при стремлении  $v_{ik} \rightarrow \infty$ . Принцип был сформулирован А.М.Балдиным по аналогии с принципом ослабления корреляций в статистической физике.

Показано, что корреляционная длина в пространстве относительных четырехмерных скоростей равна  $v_{ik} \approx 1+2$ .

Принцип ослабления корреляций подразумевает, что при достаточно больших величинах  $v_{ik}$  в процессах множественного рождения частиц могут образовываться некоррелированные ("изолированные") группы вторичных частиц, например  $\alpha$  и  $\beta$ . В этом случае инвариантное сечение, описывающее процессы множественного рождения  $W(\dots, v_{ik}, \dots)$ , факторизуется на множители, относящиеся к группам  $\alpha$  и  $\beta$ .

Принцип ослабления корреляций дает возможность ввести инвариантное определение адронных струй: струи в этом пространстве рассматриваются как кластеры адронов с относительно малыми значениями  $v_{ik}$ . Ось струи определяется как единичный четырехмерный вектор

$$V = \sum_k u_k / \sqrt{(\sum_k u_k)^2}, \quad (9)$$

где суммирование производится по всем частицам струи (кластера).

Важной закономерностью процессов множественного рождения частиц является принцип автономности второго рода, который был сформулирован [3] по аналогии с автономностью решений задач механики сплошных сред. Заключается он в том, что свойства "изолированных" систем  $\alpha(\beta)$  при достаточно больших величинах  $v_{\alpha\beta} = -(V_\alpha - V_\beta)^2 \rightarrow \infty$  должны зависеть от двух типов параметров подобия: масштабно-инвариантных  $v_k$  и масштабно-инвариантных  $\chi_k$ . Математически принцип ослабления корреляции и принцип автономности можно объединить в следующей записи:



$$W(v_{\alpha}, v_{\beta}, v_{\gamma}, \dots, v_{\alpha k}, v_{\beta k}, \dots) \xrightarrow{v_{\alpha\beta} \rightarrow \infty} \frac{1}{v_{\alpha\beta}} W^{\alpha}(v_{\alpha i}, x_i = \frac{v_{\alpha i}}{v_{\alpha\beta}}) W^{\beta}(v_{\beta k}, x_k = \frac{v_{\beta k}}{v_{\alpha\beta}}(IO))$$

Параметры  $m$  находятся из эксперимента или предсказываются теорией. Переменная  $x_k = \frac{v_{\beta k}}{v_{\alpha\beta}}$  при  $v_{\alpha\beta} \rightarrow \infty$  переходит в известную переменную светового фронта  $x_k = u_{\beta k} - u_{\alpha k}$ . Отсюда видно, что предлагаемая формулировка автомодельности (IO) содержит как частный случай масштабную инвариантность.

Предполагается, что для процесса образования адронных струй будут справедливы сформулированные закономерности, и, следовательно, можно получить предсказание относительно асимптотических свойств струй.

Из автомодельности величин  $W^{\alpha(\beta)}$  следует, что в процессах множественного рождения частиц могут наблюдаться промежуточные асимптотики. В связи с этим было высказано предположение о том, что в ядерных столкновениях возможно образование барионных кластеров, свойства которых, аналогично свойствам адронных струй, также будут характеризоваться асимптотическими закономерностями, но при этом величины  $v_{ik}$ , описывающие барионные кластеры будут находиться в другой кинематической области.

Экспериментальное изучение асимптотических свойств адронных струй и барионных кластеров легло в основу дальнейшего анализа широкого круга реакций.

Подробно описан релятивистски-инвариантный метод выделения адронных струй и барионных кластеров, основанный на минимизации суммы квадратов относительных четырехмерных скоростей. В предположении двухотруйной (двухкластерной) конфигурации события минимизируется величина

$$A_2 = \min \left[ -\sum_k (V^{\alpha} - u_k^{\alpha})^2 - \sum_i (V^{\beta} - u_i^{\beta})^2 \right] \quad (II)$$

В результате применения такой процедуры было показано, что в  $\bar{p}$ - $\pi$ - $\pi$  и  $pp$ -соударениях в пространстве относительные четырехскоростей наблюдается кластеризация в основном на два кластера (струи) со средними размерами  $\langle v_k \rangle \approx 4$  и "расстоянием" между ними  $\langle v_{\alpha\beta} \rangle = 26 \pm 30$ . Полученный результат согласуется с данными анализа струйного рождения частиц в трехмерном импульсном пространстве.

В пятой главе изучаются свойства адронных струй в пространстве относительных четырехскоростей, образующихся в мягких и жестких соударениях частиц. Анализируются  $\bar{p}$ - $\pi$ ,  $\bar{p}$ - $\pi$ -взаимодействия при импульсе 40 ГэВ/с,  $pp$ -соударения при  $P = 205$  ГэВ/с  $p$ - $\pi$  и  $p$ - $\pi$ -столкновения при  $P = 10$  ГэВ/с,  $\bar{p}N$ -взаимодействия со средней энергией  $\langle E_{\bar{p}} \rangle = 35$  ГэВ/с, для сравнения привлекаются также данные анализа  $\bar{p}p$ -столкновений при  $P = 5,7; 12$  и  $22,4$  ГэВ/с.

С помощью релятивистски-инвариантных переменных  $x_M$  и  $x_N$ , характеризующих долю четырехимпульсов первичных частиц, уносимую вторичными пионами, выделялись струи, образовавшиеся в областях фрагментации пучка и мишени. В мягких адрон-адронных соударениях образование таких струй интерпретировалось как результат адронизации непровазаимодействовавших валентных кварков или дикварков; в адрон-ядерных столкновениях - с адронизацией более сложных кварковых систем (мультикварковых). В  $\bar{p}N$ -столкновениях также выделялись струи, образующиеся в процессах фрагментации выбитого кварка и оставшегося от нуклона дикварка.

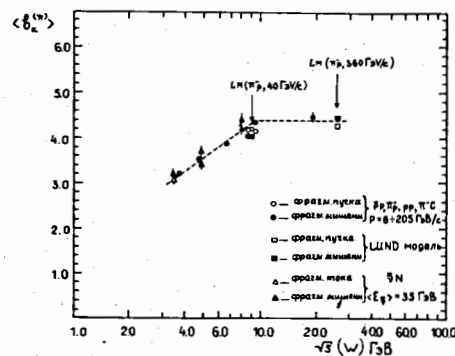
Изучались распределения пионов в струях по переменной

$$v_k = -(V - u_k)^2 \quad (I2)$$

Результаты совместного анализа свойств пионных струй в рассматриваемых реакциях приводятся на рис.5. Здесь представлены средние значения  $\langle v_k(\pi^-) \rangle$  для  $\pi^-$ -мезонов в струях, образующихся в процессах фрагментации различных кварковых систем, в зависимости от энергии в с.ц.и. взаимодействия  $\sqrt{S} = W$  (для случая  $\bar{p}N$ -столкновений  $W$  - инвариантная энергия адронной системы). На рис.5 приво-

Рис.5.

Зависимость средних значений  $\langle v_k \rangle$  для  $\pi^-$ -мезонов в струях в различных процессах от энергии  $\sqrt{S} = W$  в с.ц.и.



дятся также расчёты для  $\bar{p}p$ -взаимодействий при  $P=40$  и  $360$  ГэВ/с, смоделированных в рамках LUND модели. Как видно из рисунка, величина  $\langle v_k \rangle$  одинакова в пределах ошибок экспериментов как в

мягких, так и в жестких взаимодействиях частиц и не зависит от типа фрагментирующей кварковой системы при одинаковых энергиях в с.ц.и. Для значений  $P_{\text{max}} > 22$  ГэВ/с ( $\langle v_{\alpha\beta} \rangle \gg 10$ ) распределение пионов по переменной  $v_k$  во всех рассматриваемых реакциях характеризуется приблизительно асимптотическим поведением, при котором среднее значение  $\langle v_k \rangle \approx 4$ . Изучение инвариантных функций  $E_{\alpha\beta}^2$  в зависимости от переменной  $v_k$   $F(v_k)$  показало, что средняя кинетическая энергия пионов в системе покоя струй, образующихся в процессах фрагментации кварков,

дикварков и мультикварковых систем ядра углерода, одинакова и равна

$$\langle T_k \rangle = m_{\pi} \langle v_k \rangle / 2 = 154 \pm 10, \text{ МэВ.}$$

Полученная универсальность свидетельствует о том, что свойства адронных струй не зависят от происхождения и свойств породивших их цветных кварковых систем и, с точки зрения квантовой хромодинамики, указывает на то, что характеристика струй в значительной мере определяется взаимодействием цветных зарядов с КХД - вакуумом.

Универсальность наблюдается также и в распределении пионов в струях по масштабнo-инвариантной переменной  $\mathcal{X}_k$  (рис.6).

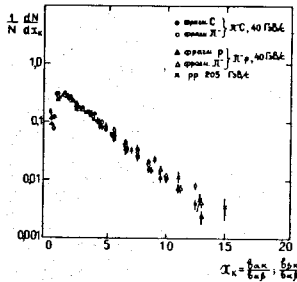


Рис.6.

Распределения  $\pi^-$ - мезонов по переменной  $\mathcal{X}_k$  в струях, образующихся в области фрагментации пучка и мишени в различных типах взаимодействий.

Изучение распределений струй по величине  $v_{\alpha\beta}$  показало, что они, в соответствии с предсказанием (II), описываются степенной зависимостью типа

$$\frac{dN}{dv_{\alpha\beta}} = \frac{A}{v_{\alpha\beta}^m} \quad (13)$$

в области  $v_{\alpha\beta} \gtrsim 10$  как для мягких, так и для жестких взаимодействий. Величина параметра  $m$  оказалась равной  $m \approx 3$  и в пределах ошибок не зависит от типа и энергии взаимодействия в области  $P_{lab} = 40+205$  ГэВ/с.

Таким образом, совокупность экспериментальных результатов по изучению свойств адронных струй в релятивистски-инвариантном подходе показывает справедливость основных следствий принципа ослабления корреляций и принципа автомодельности.

В работе в релятивистски-инвариантном подходе изучаются распределения адронных струй  $E_s \frac{d^3N}{d^3p_s}$  в  $\pi p$ -,  $\pi C$ - и  $pp$ -взаимодействиях в зависимости от переменных

$x_s = \frac{M_s}{m_{\pi}(M)} \frac{(V \cdot u_{\pi}(T))}{(u_{\pi} - u_{\bar{\pi}})}$  и  $v_{s\bar{s}}(T) = -(V - u_{\bar{s}}(T))^2$ , ( $M_s$  - эффективная масса струй), которые отражают распределения кварковых систем различного типа в первичных частицах. Показано, что эти распределения различны для струй, образующихся в процессах фрагментации различных типов кварковых систем, входящих в состав взаимодействующих  $\pi^-$ - мезонов, протонов и ядер  $C$ .

Средняя величина  $\langle \mathcal{X}_s \rangle$  для пионных струй, образующихся в процессах фрагментации дикварков от протона, равна  $\langle \mathcal{X}_s \rangle = 0,14 \pm 0,01$  в процессах фрагментации кварков, входящих в состав  $\pi^-$ -мезонов,  $\langle \mathcal{X}_s \rangle = 0,41 \pm 0,01$ , в кумулятивных взаимодействиях с ядром углерода  $\langle \mathcal{X}_s \rangle = 0,34 \pm 0,02$ .

В шестой главе изучается процесс образования барионных кластеров в адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях в интервале энергий 4+40 ГэВ/с на нуклон. Анализируются  $pC$ ;  $dC$ ;  $\alpha C$ -,  $CC$  - соударения при  $P = 4,2 \cdot A$  ГэВ/с;  $pC$  -столкновениях при  $P = 10$  ГэВ/с и  $\pi C$  - взаимодействия при  $P = 40$  ГэВ/с.

В пространстве относительных четырехмерных скоростей дается оценка средних размеров  $\langle v_k \rangle$  барионных кластеров, состоящих из нуклонов-спектаторов, которые образуются в результате развала возбужденного ядра. Такие процессы относятся к области классической ядерной физики. К протонам-спектаторам относились протоны с импульсом  $150 \leq P_{lab} \leq 300$  МэВ/с. Показано, что средние значения  $\langle v_k \rangle$  для протонов в кластерах, образующихся от одного и того же ядра-мишени, равны  $\langle v_k \rangle \approx 0,03$  и не зависят от типа взаимодействия (для налетающих  $p$ -,  $d$ -,  $\alpha$ -,  $C$ - и  $\pi^-$ - частиц) и его энергии в интервале 4+40 ГэВ/с.

В диссертации представлен общий анализ конфигурации вторичных заряженных частиц в с.ц.и. неупругих  $CC$  - взаимодействиях в трехмерном импульсном пространстве, выполненный традиционными методами с помощью переменных сферисити и траст. Показано, что эти события в среднем характеризуются двухструйным разлетом вторичных частиц в с.ц.и.  $CC$  - столкновения, что качественно согласуется с конфигурацией  $CC$  - событий, смоделированных на основе каскадной модели (ДКМ).

Однако в силу того, что экспериментальное определение с.ц.и. в каждом индивидуальном случае  $CC$  - взаимодействий практически невозможно, для изучения кластеризации провзаимодействовавших протонов так же, как и для анализа струй адронов во взаимодействиях частиц высоких энергий, использовался релятивистски-инвариантный подход. Отбирались протоны с импульсом  $0,3 \leq P_{lab} \leq 3,0$  ГэВ/с и события с множественностью протонов в них  $n_p \geq 4$ .

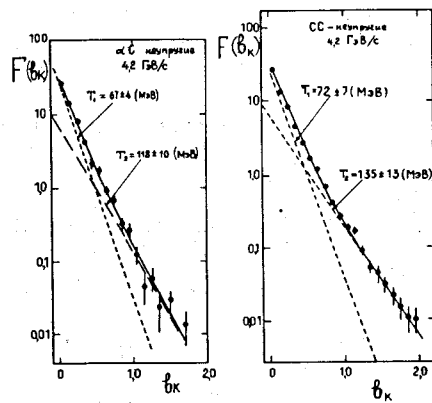
С помощью процедуры (II) выделялись две группы протонов с центрами  $V_{\alpha}$  и  $V_{\beta}$ . Показано, что средний размер таких групп в пространстве 4-скоростей оказался равным  $\langle v_k \rangle \approx 0,32 \pm 0,34$ , а среднее "расстояние" между ними  $\langle v_{\alpha\beta} \rangle = 2,3 \pm 0,3$ , т.е.  $\langle v_{\alpha\beta} \rangle \gg \langle v_k \rangle$ . Полученный результат говорит о том, что в пространстве четырехмерных скоростей в  $CC$  - взаимодействиях наблюдается образование в основном

двух кластеров протонов. Число неразделенных событий с множественностью  $N_{p \geq 4}$  составило  $\sim 15\%$ . Вклад  $CC$  - взаимодействий с образованием трех и более кластеров по проведенным оценкам не превышал  $\sim 10\%$ .

Изучение распределений двух кластеров по переменной  $v_{\beta} = -(V_{\alpha} - V_{\beta})^2$  показало, что оно, в соответствии с предсказанием (10), описывается степенной зависимостью (13) в области  $v_{\beta} \geq 2$  с величиной параметра  $m \approx 4$ .

Аналогичная процедура выделения двух протонных кластеров применялась к  $pC$ ,  $dC$  и  $\alpha C$  - столкновениям. В случае  $pC$ - и  $dC$ -соударений наблюдалось образование, в основном, одного кластера в области фрагментации ядра-мишени.

В работе представлен анализ автомодельных свойств протонных кластеров, образующихся в рассматриваемых реакциях в области фрагментации мишени. На основе изучения инвариантных  $F(v_k)$  (рис. 7) распределений протонов в  $\alpha C$ - и  $CC$ -соударениях было показано, что в этих событиях образуются кластеры двух типов:



один имеет среднюю кинетическую энергию в системе покоя  $\langle T_k \rangle_1 = 60+70$  МэВ, а другой -  $\langle T_k \rangle_2 = 120+130$  МэВ.

Рис. 7.

Инвариантные функции  $F(v_k)$  для протонов в кластерах, образующихся в  $dC$ - и  $CC$ -взаимодействиях в области фрагментации мишени. Сплошные линии - результат аппроксимации экспериментальных данных зависимостью  $F(v_k) = A_1 \exp(-\frac{v_k}{\langle v_k \rangle_1}) + A_2 \exp(-\frac{v_k}{\langle v_k \rangle_2})$ .

В  $pC$  и  $dC$  - взаимодействиях наблюдается рождение протонных кластеров только одного типа со средней кинетической энергией  $\langle T_k \rangle_1 = 60+70$  МэВ. Как показал анализ, свойства кластеров первого типа для одного и того же ядра мишени универсальны по двум параметрам подобия:  $v_k$  и  $x_k$  (рис. 8 а, б), т.е. не зависят от типа налетающей частицы ( $\pi^-$ ,  $p$ ,  $d$ ,  $\alpha$ ,  $C$ ) и энергии взаимодействия в интервале 4+40 ГэВ/с.

Таким образом, основные результаты по изучению свойств барионных кластеров в адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях также

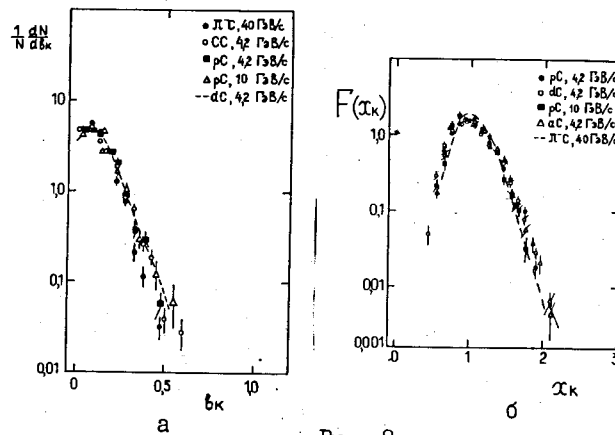


Рис. 8.

Распределения протонов с импульсами  $300 \leq P_{lab} \leq 800$  МэВ/с по переменным  $v_k$  (а) и  $x_k$  (б) в кластерах, образующихся во взаимодействиях адронов и ядер с ядрами углерода при различных энергиях.

подтверждают справедливость основных следствий принципа ослабления корреляций и принципа автомодельности и свидетельствуют о существовании промежуточной асимптотики.

Более детальное исследование свойств протонных кластеров показало, что кластеры с кинетической энергией  $\langle T_k \rangle = 120+130$  МэВ рождаются в многонуклонных столкновениях ядер и характеризуются относительно большими поперечными импульсами и анизотропным угловым распределением протонов в системе покоя кластера. Свойства кластеров этого типа в зависимости от типа взаимодействия и его энергии требуют дальнейших исследований.

В заключении изложены основные результаты и выводы работы.

1. Проведен анализ свойств адронных струй и барионных кластеров на следующем экспериментальном материале:  $\pi^-p$ - и  $\pi^-C$ -взаимодействия при импульсе 40 ГэВ/с,  $pP$  - столкновения при  $P = 205$  ГэВ/с,  $\bar{\nu}N$  - взаимодействия с  $\langle E_{\nu} \rangle = 35$  ГэВ,  $pC$ ,  $dC$ ,  $\alpha C$ ,  $CC$  - соударения с  $P = 4, 2 \cdot A$  ГэВ/с и  $pC$  - столкновения с  $P = 10$  ГэВ/с. Общая статистика событий составила  $\sim 62000$ .

2. С помощью традиционных алгоритмов анализа струйного рождения показано, что в мягких  $\pi^-p$ - и кумулятивных  $\pi^-C$ -взаимодействиях при импульсе 40 ГэВ/с наблюдается образование в основном двух

струй адронов, коллимированных по направлению движения первичных сталкивающихся частиц в их с.ц.и. Струи интерпретируются как результат адронизации непрвзаимодействовавших кварков (дикварков) от первичного пиона (протона) для  $\pi p$ - взаимодействий и мультикварковых систем  $\pi C$  - взаимодействий.

3. Впервые показано, что характеристики струй, а также функции фрагментации кварков (дикварков) в адроны ( $\pi^\pm, \Lambda^0, K^0$ ) в кумулятивных  $\pi C$ - взаимодействиях в пределах экспериментальных ошибок совпадают с аналогичными данными для мягких  $\pi p, \nu(\bar{\nu})p$ - и  $e^+e^-$ - взаимодействий при одинаковых энергиях адронов в их с.ц.п. Полученный результат указывает на то, что формирование адронных струй в кумулятивных взаимодействиях с легкими ядрами происходит в основном за пределами ядра.

4. Впервые процессы множественного рождения частиц анализируются в релятивистски-инвариантном подходе - в пространстве относительных четырехмерных скоростей:

$$v_{ik} = - \left( \frac{p_i}{m_i} - \frac{p_k}{m_k} \right)^2.$$

С помощью этих переменных в рассматриваемых типах взаимодействий экспериментально изучены следующие наиболее общие закономерности: принцип ослабления корреляций, принцип автономности второго рода, промежуточные асимптотики.

Предложен релятивистски-инвариантный метод выделения адронных струй (кластеров), с помощью которого проведен анализ процессов образования адронных струй и барионных кластеров. Метод основан на минимизации суммы квадратов относительных четырехмерных скоростей:

$$A_2 = \min \left[ - \sum_k^{n_a} (V_\alpha - u_k^\alpha)^2 - \sum_k^{n_b} (V_\beta - u_k^\beta)^2 \right]$$

и определении на этой основе центров кластеров (осей струй)  $V_\alpha$  и  $V_\beta$ .

5. Впервые экспериментально показана справедливость основных следствий принципа ослабления корреляций и принципа автономности второго рода, сформулированных в релятивистски-инвариантном подходе для процессов множественного рождения:

а) показано, что в  $pC, dC, \alpha C, \pi C$  - и  $CC$ -столкновениях при импульсах  $4,2 + 40$  ГэВ/с образуются барионные кластеры, свойства которых подобны свойствам пионных струй, рожденных во взаимодействиях частиц высоких энергий, но лежат в другой кинематической области переменных  $v_{ik}$ ;

б) свойства пионных струй и барионных кластеров универсальны по двум релятивистски-инвариантным параметрам подобия: масштабному-неинвариантному  $v_k$  и масштабному-инвариантному  $x_k$ . Это означает, что

распределения пионов в струях по переменным  $v_k$  и  $x_k$  не зависят от типа столкновения (для мягких адрон-адронных, адрон-ядерных и жестких  $\bar{N}N$  - взаимодействий) и при  $P \geq 22$  ГэВ/с ( $v_{\beta} \geq 10$ ) не зависят от энергии взаимодействия. Аналогично, распределения протонов в кластерах по этим переменным для одного и того же ядра мишени (в нашем случае углерода) не зависят от типа налетающей частицы и её энергии в интервале  $P_{lab} = 4+40$  ГэВ/с на нуклон;

в) распределения пионных струй и нуклонных кластеров по величине  $v_{\beta}$  - "расстоянию" между осями струй (центрами кластеров) в соответствии с предсказанием [18] описываются степенной зависимостью типа

$$\frac{dN}{dv_{\beta}} = \frac{A}{v_{\beta}^m}$$

в области  $v_{\beta} \geq 10$  для мягких адрон-адронных, адрон-ядерных и  $\bar{N}N$  - взаимодействий и  $v_{\beta} \geq 2$  для нуклонных кластеров.

Величина параметра  $m \approx 3$  в процессах образования пионных струй в пределах ошибок одинакова для мягких и жестких взаимодействий частей и не зависит от энергии столкновения в интервале

$$P_{lab} = 40 + 205 \text{ ГэВ/с.}$$

Для нуклонных кластеров величина  $m \approx 4$ .

6. Показано, что средние размеры пионных струй и барионных кластеров в пространстве относительных четырехмерных скоростей существенно различаются:

- средняя величина  $\langle v_k \rangle$  для пионных струй составляет  $\langle v_k \rangle \approx 4$ ;
- для барионных кластеров, образующихся в промежуточной области релятивистских ядерных столкновений,  $\langle v_k \rangle = 3 \cdot 10^{-1}$ ;
- размер барионных кластеров в процессах классической ядерной физики равен  $\langle v_k \rangle \approx 10^{-2}$ .

7. В рамках кварк-глюонных модельных представлений о мягких адрон-адронных, адрон-ядерных (во взаимодействиях с легкими ядрами) и  $\bar{N}N$  - столкновениях обнаруженные закономерности множественного рождения частиц означают, что адронизация кварков, дикварков и других цветных кварковых систем в мягких, жестких и кумулятивных взаимодействиях частиц имеет универсальный характер в пространстве относительных четырехмерных скоростей, не зависящий от происхождения и свойств цветной кварковой системы.

Средняя кинетическая энергия пионов в системе покоя струй, образующихся в процессах адронизации кварков, дикварков и мультикварковых систем ядра углерода, равна  $\langle T_k \rangle = 154 \pm 10$  МэВ.

Полученная универсальность указывает на то, что адронизация цветных кварковых систем определяется в значительной мере динамикой их взаимодействия с КХД-вакуумом.



8. Проведен анализ инвариантных  $\mathcal{X}_2 = \frac{M_S}{m_{\pi}(p)} \frac{(V \cdot U_{\pi}(l))}{(U_{\pi} \cdot U_{\pi})}$  распределений пионных струй, отражающих распределение партонов в первичных взаимодействующих частицах. Показано, что средняя величина  $\langle \mathcal{X}_2 \rangle$  для пионных струй, образующихся в процессах фрагментации дикварков от протонов, равна  $\langle \mathcal{X}_2 \rangle = 0,14 \pm 0,01$ , в процессах фрагментации кварков, входящих в состав пионов,  $\langle \mathcal{X}_2 \rangle = 0,41 \pm 0,01$ , в кумулятивных процессах на ядре углерода  $\langle \mathcal{X}_2 \rangle = 0,34 \pm 0,02$ .

9. Впервые в  $\alpha$ -С- и СС - взаимодействиях при импульсе  $4,2 \cdot A \frac{\text{ГэВ}}{8}$  выделены два типа нуклонных кластеров, различающихся своими свойствами. Один из них характеризуется средней кинетической энергией в системе покоя  $\langle T_{\kappa} \rangle_1 = 60 \pm 70$  МэВ, изотропным в пределах ошибок угловым распределением протонов в системе покоя кластера и малыми поперечными импульсами. Другой - средней кинетической энергией  $\langle T_{\kappa} \rangle_2 = 120 \pm 10$  МэВ, анизотропным угловым распределением протонов и относительно большими поперечными импульсами.

Свойства кластеров первого типа для одного и того же ядра мишени имеют универсальный характер в пространстве относительных четырехмерных скоростей (см. п. 5 б).

Таким образом, совокупность экспериментальных данных по изучению процессов множественного рождения в различных взаимодействиях в релятивистски-инвариантном подходе показывает, что большую роль в них играет образование адронных струй и барионных кластеров. Экспериментально установлено, что свойства кластеров и струй характеризуются универсальными асимптотическими закономерностями в пространстве относительных четырехмерных скоростей в соответствии с принципом ослабления корреляций и принципом автомодельности второго рода.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

##### В РАБОТАХ:

1. В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, Т.Канарек  
"Сравнение струйного поведения адронов в  $\bar{\pi}$ -p-столкновениях при импульсе 40 ГэВ/с с данными по  $e^+e^-$  - аннигиляции". Препринт ОИЯИ, PI-81-542, Дубна, 1981 г.
2. В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, Т.Канарек, З.В.Метревели, В.С.Мурзин, Л.И.Сарычева.  
"Анализ множественного рождения в  $\bar{\pi}$ -p-взаимодействиях при импульсе 40 ГэВ/с с помощью коллективных переменных" - ЯФ, 1983, т. 37, с. 915.

3. В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, Т.Канарек, З.В.Метревели.  
"Изучение инклюзивных характеристик частиц в струях в  $\bar{\pi}$ -p-взаимодействиях при импульсе 40 ГэВ/с". ОИЯИ, PI-83-306, Дубна, 1983.
4. В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, С.М.Елисеев, Т.Канарек, З.В.Метревели, В.С.Мурзин.  
"Анализ струйного поведения адронов в  $\bar{\pi}$ -C-взаимодействиях при импульсе 40 ГэВ/с". ОИЯИ, PI-82-393, Дубна, 1982; ЯФ, 1983, т. 38, с. 687.
5. Г.Н.Агакишиев, ... Л.А.Диденко и др.  
"Анализ коллективных свойств вторичных частиц в СС-взаимодействиях при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон". ОИЯИ PI-82-508, Дубна, 1982; ЯФ, 1983, т. 37, с. 1495.
6. В.Г.Гришин, Л.А. Диденко, З.В.Метревели.  
"Фрагментация кварков и дикварков в  $\bar{\pi}$ -p взаимодействиях при  $P = 40$  ГэВ/с". - ОИЯИ, PI-83-823, Дубна, 1983; ЯФ, 1984, т. 40, с. 936.
7. А.М.Балдин, В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, А.А.Кузнецов, З.В.Метревели.  
"Изучение образования струй адронов в кумулятивных  $\bar{\pi}$ -C-взаимодействиях при импульсе 40 ГэВ/с". - ОИЯИ, PI-83-483, Дубна, 1983; ЯФ, 1984, т. 39, с. 1215.
8. В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, В.М. Карнауков, К.Кока, А.А.Кузнецов, З.В.Метревели.  
"Фрагментация кварков и дикварков в странные частицы в  $\bar{\pi}$ -p взаимодействиях при  $P=40$  ГэВ/с". - ОИЯИ, PI-84-79, Дубна, 1984; ЯФ, 1985, т. 41, с. 684.
9. В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, А.А.Кузнецов, З.В.Метревели.  
"Струи адронов с участием странных частиц в кумулятивных  $\bar{\pi}$ -C- взаимодействиях при  $P = 40$  ГэВ/с". - ОИЯИ, PI-84-205; Дубна, 1984; ЯФ, 1985, т. 41, с. 371.
10. L.A. Didenko, V.G. Grishin, A.A. Kuznetsov, Z.V. Metreveli.  
"Quark (Diquark) Fragmentation in Soft  $\bar{\pi}$ -p-Interactions at  $P=40$  GeV/c". JINR, E1-84-263, Dubna, 1984; Материалы семинара "Кварки-84", т. П, с. 281, Москва, ИИИ АН СССР, 1985.
11. А.М.Балдин, В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, А.А.Кузнецов, З.В.Метревели.  
"Струи адронов в кумулятивных процессах в  $\bar{\pi}$ -C-взаимодействиях при  $P = 40$  ГэВ/с". ОИЯИ, E1-84-317, Дубна, 1984; Труды УИ Международного семинара по проблемам физики высоких энергий; с. 233, Дубна, 1984.

12. A.M. Baldin, L.A. Didenko, V.G. Grishin, A.A. Kuznetsov, Z.V. Metreveli. "Universality of Hadron Jets in Soft and Hard Particle Interactions at High Energies". JINR, E1-85-415, Dubna, 1985; Z.Phys. C33, (1987), с.363.
13. А.М.Балдин, Б.В. Батюня, И.М.Граменицкий, В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, А.А.Кузнецов, З.В.Метревели.  
"Четырехмерные струи адронов - универсальные характеристики множественного рождения частиц". - ОИЯИ, РИ-85-820, Дубна, 1985; ЯФ, 1986, т.44, с.1209.
14. А.М.Балдин, Л.А.Диденко.  
"Описание множественного рождения частиц в пространстве относительных скоростей". В сб. "Краткие сообщения ОИЯИ" № 3-84, с.5, Дубна, 1984.
15. А.М.Балдин, Л.А.Диденко.  
"Релятивистски инвариантный анализ корреляционных явлений в процессах множественного рождения".  
В сб.: "Краткие сообщения ОИЯИ", № 8-85, с.5, Дубна, 1985.
16. В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, А.А.Кузнецов, З.В.Метревели.  
"Корреляции по множественности вторичных заряженных частиц, рожденных в передней и задней полусферах в с.д.и. в  $\pi p$ -взаимодействиях при  $P = 40$  ГэВ/с". - ОИЯИ, РИ-85-259, Дубна, 1985; ЯФ, 1986, т.43, с.609.
17. A.M. Baldin, L.A. Didenko, V.G. Grishin, A.A. Kuznetsov, G.M. Maneva, Z.V. Metreveli, P.P. Temnikov. "Hadron Jets in Deep-Inelastic  $\gamma$  N-Interactions and Universality of the Jet Properties in Relative Four-Velocity Space".  
  
В сб. "Краткие сообщения ОИЯИ", № I /21/-87, с.17, Дубна, 1987.
18. A.M. Baldin, L.A. Didenko, V.G. Grishin, A.A. Kuznetsov, Z. V. Metreveli. "Universal Four-Dimensional Hadron Jets and the Observability of Colour Charge". JINR, E1-87-142, Dubna, 1987.
19. Д.Армутлийски, А.М.Балдин, В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, А.А.Кузнецов, З.В.Метревели.  
"Универсальность свойств четырехмерных барионных кластеров в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях в интервале энер-

гий 4+40 ГэВ/с". - В сб.: "Краткие сообщения ОИЯИ", № 4 /24/, с.5, Дубна, 1987г.

20. А.М.Балдин, В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, А.А.Кузнецов, З.В.Метревели.  
"Кластеризация в пространстве четырехмерных относительных скоростей и инвариантные распределения адронных струй". - ОИЯИ, РИ-87-552, Дубна, 1987; ЯФ, т.48, с.995, (1988).
21. - А.М.Балдин, В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, А.А.Кузнецов.  
"Автомодельные свойства барионных кластеров во взаимодействиях  $p, d, He, C,$  и  $\pi^-$  - частиц с ядрами углерода в интервале импульсов 4+40 ГэВ/с на нуклон". - ОИЯИ, РИ-88-331, Дубна, 1988.
22. А.М.Балдин, Л.А.Диденко.  
"Асимптотические свойства адронной материи в пространстве четырехмерных относительных скоростей". Лекции для молодых ученых. ОИЯИ, РИ-87-912, Дубна, 1987.

#### ЦИТИРОВАННЫЕ РАБОТЫ:

1. А.М.Балдин, Л.А.Диденко.  
"Краткие сообщения ОИЯИ", № 3-84, Дубна: ОИЯИ, 1984, с.5.
2. А.М.Балдин, Л.А.Диденко.  
"Краткие сообщения ОИЯИ", № 8-85, Дубна: ОИЯИ, 1985, с.5.
3. А.М.Балдин, А.А.Балдин.  
"Краткие сообщения ОИЯИ", № 17-86, Дубна: ОИЯИ, 1986, с.19.
4. А.М.Балдин и др. Краткие сообщения ОИЯИ, № 2 /22/-87 Дубна: ОИЯИ, 1987, с.17.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 ноября 1988 года.

**Редактор М.И.Зарубина. Макет Р.Д.Фоминой.**

**Подписано в печать 28.11.88.**

**Формат 60x90/16. Офсетная печать. Уч.-изд.листов 1,99.**

**Тираж 100. Заказ 41326.**

**Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.  
Дубна Московской области.**