

M-546

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-86-740

МЕТРЕВЕЛИ

Заза Валерианович

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНОГО РОЖДЕНИЯ АДРОНОВ
И АДРОНИЗАЦИИ КВАРКОВ (ДИКВАРКОВ)
В МЯГКИХ П⁻р-
И КУМУЛЯТИВНЫХ П⁻С-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ
ПРИ ИМПУЛЬСЕ 40 ГэВ/с**

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

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

Дубна, 1986

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований и в Институте физики высоких энергий Тбилисского государственного университета.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук	Валентин Григорьевич
профессор	Гришин
кандидат физико-математических наук	Лидия Александровна
	Диденко

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник	Владимир Алексеевич Никитин
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник	Алексей Борисович Кайдалов

Ведущее научно-исследовательское учреждение - Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва.

Защита диссертации состоится "25" декабря 1986 г. в 10⁰⁰ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна Московской области, Лаборатория высоких энергий ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "25" ноября 1986 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
кандидат физико-математических наук

М.Ф.Лихачев

М.Ф.Лихачев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время большое внимание в изучении взаимодействий частиц при высоких энергиях уделяется процессам струйного рождения адронов. Если партоны действительно не существуют в свободном состоянии, то при высоких энергиях они переходят в струи адронов, которые более полно отражают их свойства, нежели отдельные адроны.

Физика струй адронов связана, в основном, с жесткими процессами. Динамика образования струй адронов в этих процессах хорошо известна и описывается в рамках квантовой хромодинамики (КХД). Но КХД не описывает стадию перехода партонов в адроны.

Описание мягких адрон-адронных и адрон-ядерных взаимодействий в рамках КХД затруднительно. Поэтому изучение образования струй адронов и адронизации партонов в этих процессах, сравнение их характеристик с аналогичными данными в жестких процессах может дать новую информацию как о динамике мягких адрон-адронных и адрон-ядерных взаимодействий, так и об особенностях механизма адронизации партонов в этих процессах.

Цель работы:

- исследование струйного рождения адронов и адронизации кварков (дикварков) в мягких P - и кумулятивных P -взаимодействиях при $P = 40$ ГэВ/с традиционным методом с помощью неинвариантных переменных;
- сравнение характеристик струй с аналогичными данными по глубоконеупругим $\nu(\bar{\nu})p$ -взаимодействиям и e^+e^- -аннигиляции при одинаковой инвариантной адронной энергии;
- изучение характеристик струй адронов с помощью инвариантных переменных в пространстве относительных четырехмерных скоростей.

Новизна и научная ценность работы. Получены обширные данные о струйных характеристиках вторичных частиц в P -взаимодействиях при 40 ГэВ/с, которые дополняют информацию о струйном рождении частиц в адрон-адронных взаимодействиях в других экспериментах (Кр, пр).

Впервые проводился детальный анализ струйного рождения адронов в кумулятивных адрон-ядерных взаимодействиях. Показано, что наблюдается образование двух струй адронов, общие характеристики которых в пределах экспериментальных ошибок совпадают с аналогичными данными для мягких адрон-адронных и e^+e^- -взаимодействий при одинаковых энергиях в с.ц.и. взаимодействующих частиц. Функции фрагментации кварков и дикварков из мультикварковых систем в адроны в кумулятивных адрон-ядерных, в мягких адрон-адронных и e^+e^- -взаимодействиях совпадают в пределах экспериментальных ошибок при одинаковых инвариантных энергиях взаимодействия.

Впервые использован метод релятивистски-инвариантного анализа струйного рождения частиц в пространстве относительных четырехмерных скоростей в разных типах взаимодействий (Pp , pp , PC , \bar{N}) в широком интервале энергий. С помощью такого подхода найдена новая универсальная характеристика множественных процессов, не зависящая от энергии и состава кварковой системы.

Полученные экспериментальные данные важны для проверки различных теоретических подходов к описанию процессов адрон-адронных и адрон-ядерных взаимодействий, для разработки новых теоретических моделей множественного рождения частиц.

Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что они могут быть использованы при планировании новых экспериментов по исследованию взаимодействий адронов с адронами и ядрами при высоких энергиях.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы представлялись на Международных конференциях по физике высоких энергий в Париже (1982 г.), Лейпциге (1984 г.), Бари (1985 г.), на Всесоюзном семинаре "Кварки-84" (Тбилиси, 1984 г.), на Всесоюзном семинаре по взаимодействиям частиц и ядер высоких энергий с ядрами (Ташкент, 1985 г.), на УП и УШ Международных семинарах по проблемам физики высоких энергий в Дубне (1984 г., 1986 г.), а также докладывались на совещаниях международного Сотрудничества по исследованиям на двухметровой пропановой камере, семинарах ЛВЭ ОИЯИ и ИФВЭ ТГУ.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в журнале "Ядерная физика", в препринтах, сообщениях ОИЯИ и в материалах вышеупомянутых международных конференций.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Текст содержит 147 страниц, включая 18 таблиц и 47 рисунков. Список литературы состоит из 124 наименований.

Автор защищает:

1. Результаты исследования 14300 неупругих Pp - и 6500 полнотью измеренных PC -взаимодействий при импульсе 40 ГэВ/с.
2. Данные, полученные при исследовании струйного рождения частиц и их характеристик традиционным методом с помощью переменных "сферисита", "траст" и др. в мягких Pp - и кумулятивных PC -взаимодействиях при $P = 40$ ГэВ/с.
3. Результаты анализа поведения функции фрагментации кварков и дикварков в адроны (P^\pm , K^0 , Λ) в мягких Pp - и кумулятивных PC -взаимодействиях при $P = 40$ ГэВ/с.
4. Данные, полученные при изучении струйного рождения частиц новым методом, с помощью инвариантных переменных в пространстве относительных четырехмерных скоростей.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечается актуальность исследования процессов струйного рождения частиц в адрон-адронных и адрон-ядерных взаимодействиях, сформулирована основная цель работы и приведено краткое содержание диссертации.

В первой главе описывается методика эксперимента.

Экспериментальный материал получен с помощью двухметровой пропановой пузырьковой камеры ДТПК-500 ЛВЭ ОИЯИ. Приводятся основные характеристики камеры и системы фотографирования. Среднее значение напряженности магнитного поля в рабочем объеме ДТПК-500 составляет $H \approx 15$ кГс. Камера экспонировалась в пучке P -мезонов с импульсом $P = (40,00 \pm 0,24)$ ГэВ/с на серпуховском ускорителе.

Просмотр стереофотоснимков проводился на просмотрных столах БПС-1, БПС-2 и САМЕТ. Всего было просмотрено около 100 тыс. кадров. Эффективность двойного просмотра для звезд составляет 99,7%, а для V^0 -частиц и Y -квантов - 99,0%. Зарегистрированные события идентифицировались по стандартным для пропановых камер критериям как Pp -, Pn - и PC -взаимодействия.

Отобранные при просмотре события измерялись на полуавтоматах типа ПУОС, работающих на линии с ЭВМ БЭСМ-4. Последующий обсчет результатов измерений и формирование ленты суммарных результатов (DST) производились на ЭВМ CDC-1604A. На заключительном этапе получения DST проводился отбор событий, а также V^0 -частиц и Y -квантов с учетом эффективной области их регистрации и качества измерений. В результате точность определения параметров вторичных пионов оказалась равной:

$$\langle \Delta P/P \rangle = (13,9 \pm 0,3)\%,$$

$$\langle \Delta \text{tg } \alpha \rangle = 0,0061 \pm 0,0001,$$

$$\langle \Delta \beta \rangle = (0,0037 \pm 0,0001) \text{ рад},$$

где P - импульс частицы, α - глубинный угол, а β - азимутальный угол.

Окончательно на магнитную ленту суммарных результатов было записано 14276 неупругих Pp -взаимодействий и 6480 Pp -столкновений без взаимодействий пионов с квазисвободными нуклонами ядер углерода. В Pp -событиях было идентифицировано 753 $K_S^0 (K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)$ -мезонов и 345 $\Lambda (\Lambda \rightarrow p \pi^-)$ -гиперонов; в Pp -событиях - 550 K_S^0 -мезонов и 234 Λ -гиперонов. Этот экспериментальный материал был использован для получения физических результатов, вошедших в данную работу.

Во второй главе исследуются струйные характеристики Pp -взаимодействий при $P = 40 \text{ ГэВ/с}$. Они сравниваются с аналогичными данными по e^+e^- -аннигиляции, в которых динамика образования струй адронов хорошо известна (рис.1в). В e^+e^- -аннигиляции при $\sqrt{s} \leq 30 \text{ ГэВ}$ в основном рождаются две струи адронов.

Весь дальнейший анализ струйных характеристик вторичных частиц проводится в с.ц.и. взаимодействующих объектов. Дифракционные процессы исключаются при наличии в событии хотя бы одной заряженной частицы с $|x_F| > 0,8$ ($x_F = 2 P_{i+}^* / \sqrt{s}$).

Данные анализируются в предположении о том, что основной вклад во множественное рождение частиц в Pp -взаимодействиях дают две струи адронов, образовавшиеся в результате фрагментации не-про-взаимодействовавших кварков и ди-кварков, входящих в состав первичных адронов, а вклад от взаимодействующих кварков считается незначительным (рис.1а).

Струйное поведение вторичных заряженных частиц исследовалось с помощью переменных "сферисити" (S) и "траст" (T):

$$S = \frac{3}{2} \min \left(\sum_{i=1}^{n_+} P_{i+}^2 / \sum_{i=1}^{n_+} P_i^2 \right), \quad (1)$$



Рис.1. Схема Pp - (а), кумулятивных Pp - (б), e^+e^- - (в), S - (г) взаимодействий.

$$T = \max \left(\sum_{i=1}^{n_+} |P_{i+}| / \sum_{i=1}^{n_+} |P_i| \right). \quad (2)$$

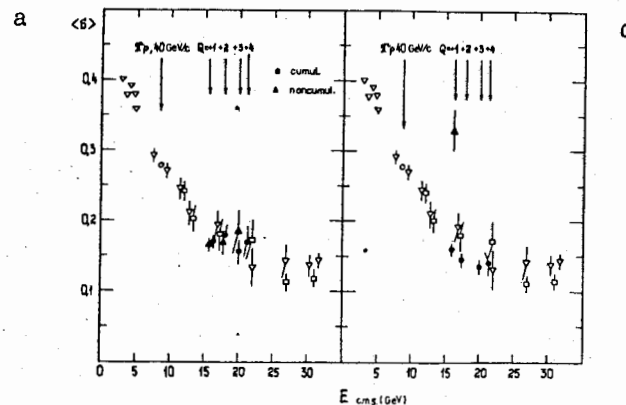


Рис.2. Зависимость $\langle S \rangle$ от $E_{\text{с.ц.и.}}$: ∇ , \square - для e^+e^- -аннигиляции; \circ - для Pp -взаимодействий; \bullet - для кумулятивных Pp -столкновений с величиной $\beta_0 > 1,0$; \blacktriangle - для кумулятивных Pp -столкновений; а) - для струй частиц с $x_{F_i} > 0,05$; б) - для струй частиц с $x_{F_i} < -0,05$.

На рис.2 показана зависимость средних значений переменной сферисити $\langle S \rangle$ от энергии в с.ц.и. e^+e^- -взаимодействий для множественности заряженных частиц $n_+ > 4$. Здесь же представлены данные, соответствующие Pp -столкновениям с энергией $E_{\text{с.ц.и.}} = 8,7 \text{ ГэВ}$. Видно, что значения величины $\langle S \rangle$ в Pp -столкновениях хорошо согласуются с существующей зависимостью этих переменных от энергии в с.ц.и. e^+e^- -взаимодействия. Аналогичная картина имеет место и при анализе с помощью переменной траст (T).

Большие различия для Pp - и e^+e^- -взаимодействий наблюдаются в ориентации оси струи относительно первичного направления сталкивающихся частиц. Распределения событий по величине $|\cos \Theta|$, где Θ - угол между осью струи и первичным направлением, для двух типов взаимодействий показывают, что, в отличие от e^+e^- -аннигиляции, ось струи в Pp -столкновениях ориентирована, в основном, под малыми углами ($\langle \Theta \rangle = 19,1^0 \pm 0,1^0$ для заряженных частиц) к направлению движения сталкивающихся частиц. Эта разница обусловлена различием в динамике

образования струй в Πp - и e^+e^- -взаимодействиях и означает, что в Πp -взаимодействиях струи адронов образуются, в основном, в процессах фрагментации спектровых кварков и дикварков.

На основе проведенного сравнения делается заключение, что в Πp -взаимодействиях при $P = 40$ ГэВ/с в большинстве событий наблюдается образование двух струй адронов, коллимированных в направлении движения сталкивающихся частиц в их с.ц.и.

Показано, что множественности заряженных частиц в струях в Πp -столкновениях, а также средние значения их поперечных и продольных импульсов относительно оси струй совпадают с аналогичными данными для e^+e^- -взаимодействий при той же энергии в с.ц.и. сталкивающихся частиц.

Анализ среднего заряда струи $\langle Q \rangle = \sum (N_+ - N_-) / N_{\text{собр}}$ (N_+ и N_- - число положительных и отрицательных частиц в струе) в Πp -взаимодействиях в зависимости от величины $X = \sum |x_F|$ показывает, что при $X \geq 0,5$ для струй, летящих вперед, и $X \geq 0,8$ для струй, летящих назад, величины $\langle Q \rangle$ совпадают со значениями $-0,5$ и $0,83$ соответственно, вычисленными в аддитивной кварковой модели.

В третьей главе изучается фрагментация кварков и дикварков в пионы и странные частицы в Πp -взаимодействиях при $P = 40$ ГэВ/с. Проводится сравнение с аналогичными данными по глубоконеупругим $\nu(\bar{\nu})p$ -взаимодействиям, полученным с помощью водородной пузырьковой камеры ВЕВС в ЦЕРНе, со средними значениями эффективной массы для νp - и $\bar{\nu} p$ -взаимодействий $\langle W \rangle = 5,43$ и $4,63$ ГэВ соответственно, а также по e^+e^- -взаимодействиям.

В $\nu(\bar{\nu})p$ -взаимодействиях получены фрагментационные функции $D_{u(d)}^{\pi^{\pm}}$ и $D_{uu(u\bar{d})}^{\pi^{\pm}}$, а также инвариантные функции $F_{u(d)}^{\pi^{\pm}}(x_F)$ и $F_{uu(u\bar{d})}^{\pi^{\pm}}(x_F)$, которые определяются следующим образом:

$$D^{\pi^{\pm}}(x_F) = \frac{1}{N_{\text{ев}}} \frac{dN^{\pi^{\pm}}}{dx_F}, \quad (3)$$

$$F^{\pi^{\pm}}(x_F) = \frac{1}{6\epsilon} \int E \frac{d\sigma^{\pi^{\pm}}}{dP} dP_1^2 = \frac{1}{N_{\text{ев}}} \cdot \frac{E^*}{\pi P_{11\text{max}}} \cdot \frac{dN^{\pi^{\pm}}}{dx_F} \approx \frac{1}{\pi} |x_F| D^{\pi^{\pm}}(x_F), \quad (4)$$

где E^* и $P_{11\text{max}}$ - энергия и максимальный продольный импульс Π^+ -мезонов в о.ц.и. вторичных частиц. Сопоставляя схемы Πp - и $\nu(\bar{\nu})p$ -взаимодействий (рис.1а,г) и предполагая, что легкие кварки \bar{u} и d взаимодействуют одинаково, можно написать следующие соотношения для функций фрагментации Π^+ -мезонов:

$$D_{\Pi^+}^{\pi^+}(x_F) = \frac{1}{2} D_{\nu p}^{\pi^+}(x_F) + \frac{1}{2} D_{\bar{\nu} p}^{\pi^+}(x_F) \quad \text{для } x_F \geq 0,1 \quad (5)$$

$$D_{\Pi^+}^{\pi^-}(x_F) = \frac{1}{3} D_{\nu p}^{\pi^-}(x_F) + \frac{2}{3} D_{\bar{\nu} p}^{\pi^-}(x_F) \quad \text{для } x_F \leq -0,1 \quad (6)$$

Здесь учитываются зарядово-сопряженные соотношения для фрагментации кварков: $D_{\bar{u}}^{\pi^+}(x_F) = D_u^{\pi^-}(x_F)$, $D_{\bar{d}}^{\pi^+}(x_F) = D_d^{\pi^-}(x_F)$. Аналогичные соотношения должны выполняться и для инвариантных функций $F^{\pi^{\pm}}(x_F)$.

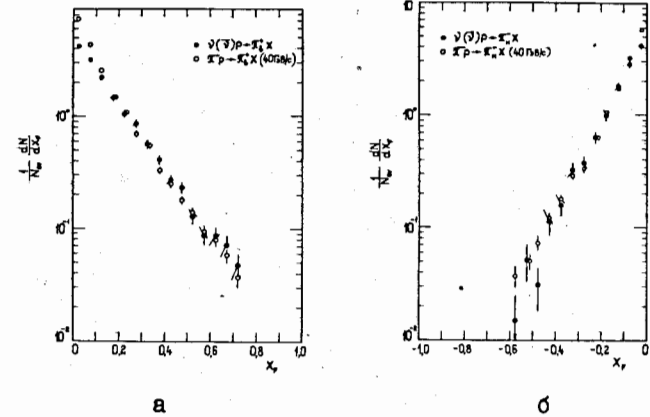


Рис.3. Фрагментационные функции $D^{\pi^{\pm}}(x_F)$: а) $D^{\pi^+}(x_F > 0)$: $\bullet - \frac{1}{2} D_{\nu p}^{\pi^+} + \frac{1}{2} D_{\bar{\nu} p}^{\pi^+}$; $\circ - D_{\Pi^+}^{\pi^+}$; б) $D^{\pi^-}(x_F < 0)$: $\bullet - \frac{1}{3} D_{\nu p}^{\pi^-} + \frac{2}{3} D_{\bar{\nu} p}^{\pi^-}$; $\circ - D_{\Pi^+}^{\pi^-}$.

На рис.3а,б приведены функции фрагментации $D^{\pi^{\pm}}(x_F)$ для $x_F(\pi^+) > 0$ и $x_F(\pi^-) < 0$ для Πp - и $\nu(\bar{\nu})p$ -взаимодействий, определенные по формулам (5), (6) и нормированные по площади в области $|x_F| > 0,1$. Из рисунков видно, что полученные распределения хорошо согласуются друг с другом, за исключением области $|x_F| \leq 0,1$, в которой для Πp -взаимодействий существует вклад от взаимодействующих кварков (рис.1а). Распределения по $D^{\pi^{\pm}}(x_F)$ в области фрагментации кварков имеют наклон меньше, чем в области фрагментации дикварков.

Аналогичная картина наблюдается при сравнении инвариантных функций $F^{\pi^{\pm}}(x_F)$.

Изучение фрагментации кварков и дикварков в K^0 - и Λ -частицы в Πp -взаимодействиях проводится на основе сравнения с аналогичными данными для e^+e^- -аннигиляции (такие данные для $\nu(\bar{\nu})p$ -взаимодействий отсутствуют).

Анализируются инклюзивные сечения $\frac{1}{B} \frac{d\sigma}{dx_F}$ для K^0 -мезонов и Λ -гиперонов, где $B = P^*/E^*$ и $x_F = 2E^*/\sqrt{s}$. Сравняются распределения $\frac{1}{B} \frac{d\sigma}{dx_F}$ для K^0 -мезонов и Λ -гиперонов в передней и задней полусферах с.ц.и. Πp -взаимодействия при $P = 16$ и 40 ГэВ/с с соответствующими данными по pp -взаимодействиям при $P = 205$ и 405 ГэВ/с и

e^+e^- -аннигиляции при $\sqrt{s} = 14$ и 33 ГэВ (см. рис.4). В таблице I приведены результаты аппроксимации этих распределений зависимостью $\frac{1}{B} \frac{d\sigma}{dx_E} = A \exp(-Bx_E)$.

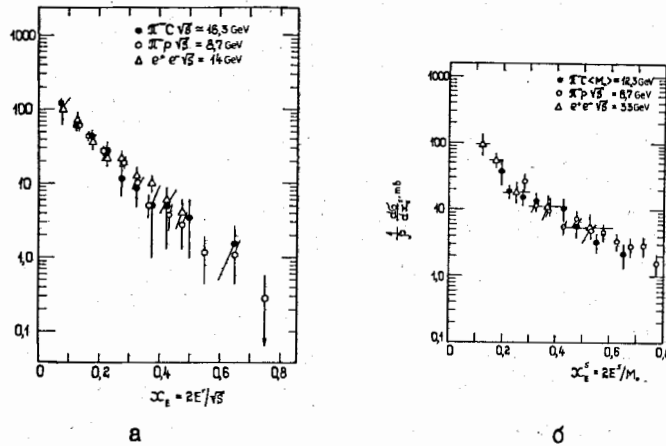


Рис.4. Инклюзивные сечения $(1/B)d\sigma/dx_E$: а) для K^0 -мезонов в передней полусфере в с.ц.и. P_r -, кумулятивных ПГС- и e^+e^- -столкновений; б) для Λ -гиперонов в задней полусфере в с.ц.и. P_r -, выделенной подсистемы пионов (M_0) кумулятивных ПГС- и e^+e^- -взаимодействий.

Показано, что фрагментация дикварков в мягких адронных взаимодействиях в K^0 - и Λ -частицы в пределах экспериментальных ошибок не зависит от энергии первичных частиц ($E = 16+405$ ГэВ). Зависимость функции фрагментации кварков и дикварков в K^0 -мезоны от величины X_E в e^+e^- -аннигиляции и в мягких P_r - и pp -взаимодействиях в пределах экспериментальных ошибок одинакова в области $0,15 \leq X_E \leq 0,5$. Зависимость функции фрагментации кварков в Λ -частицы от величины X_E в P_r -взаимодействиях в области $X_E > 0,3$ и в e^+e^- -соударениях в области $X_E > 0,1$ имеет одинаковый характер. А функция фрагментации дикварков в Λ -гипероны в адрон-адронных столкновениях отличается от функции фрагментации кварков в те же частицы в рассматриваемых типах взаимодействий (см. табл.1).

Было также проведено сравнение инвариантных функций для P_r^+ , K^0 -, Λ -частиц, полученных в модели кварк-глюонных струн с экспериментальными данными по P_r -взаимодействиям при 40 ГэВ/с. Модель хорошо описывает экспериментальные распределения*.

* В.Г.Гришин и др. ОИЯИ, РИ-86-617, Дубна, 1986.

Таблица I. Значения параметра B, полученные при аппроксимации инклюзивных сечений зависимостью $\frac{1}{B} \frac{d\sigma}{dx_E} = A \exp(-Bx_E)$

Тип частицы и тип событий	Вперед в с.ц.и.	Область аппроксим.	Назад в с.ц.и.	Область аппроксим.
K^0 -мезоны ПГС (кумулят.)	9 ± 2	$X_E > 0,1$	8 ± 4	$X_E^C \gg 0,15$
K^0 -мезоны Пр, 40 ГэВ/с	10 ± 1	$X_E > 0,15$	9 ± 1	$X_E > 0,15$
Λ -гипероны ПГС (кумулят.)	13 ± 4	$X_E > 0,15$	$5,2 \pm 0,7$	$X_E^C \gg 0,2$
Λ -гипероны Пр, 40 ГэВ/с	8 ± 3	$X_E > 0,3$	$3,6 \pm 0,4$	$X_E > 0,3$
Λ -гипероны Пр, 16 ГэВ/с	10 ± 1	$X_E > 0,45$	$4,4 \pm 0,3$	$X_E > 0,45$
K^0, Λ -частицы e^+e^-	8	$X_E > 0,1$	-	-

* $X_E^C = 2E^C/M_0$, где E^C - энергия частиц в кумулятивных ПГС-взаимодействиях в с.ц.и. подсистемы, выделенной в результате исключения протонов; M_0 - инвариантная энергия выделенной подсистемы.

Проводится анализ корреляций по множественности между частицами, летящими в переднюю и заднюю полусферы в с.ц.и. Показано, что существующие корреляции связаны с противоположно заряженными медленными частицами ($|x_E| \leq 0,1$). Быстрые частицы ($|x_E| > 0,1$) рождаются независимо. Эти данные свидетельствуют о том, что фрагментация кварков и дикварков в мезон-нуклонных взаимодействиях происходит независимым образом.

В четвертой главе проводится анализ характеристик струй адронов в кумулятивных ПГС-взаимодействиях. Полученные результаты сравниваются с данными для мягких P_r -взаимодействий и e^+e^- -аннигиляции. В кумулятивных процессах адронизация кварков из мультикварковых состояний предполагается "мягкой", и поэтому свойства адронов в кумулятивных струях должны быть подобны тем, которые уже изучались в разных процессах (рис.1).

Для анализа отбирались группы многокучонных ПГС-взаимодействий с суммарным зарядом вторичных частиц $Q = +1, +2, +3, +4$, который определялся по формуле $Q = N_+ - N_-$. Анализ проводился в с.ц.и. столкно-

вения первичных Π^- -мезонов с соответствующим числом n_N нуклонов мишени. Энергия столкновения определялась согласно формуле: $E_{с.ц.и.} = (2n_N m_N E_\pi + n_N^2 m_N^2 + m_\pi^2)^{1/2} \approx (2n_N m_N E_\pi)^{1/2}$.

Выделение кумулятивных струй в ΠC -взаимодействиях проводилось в соответствии с условием: $\beta_i = \sum_j (E_i - P_{ij}) / m_N > 1,0$, где суммирование ведется по всем заряженным частицам, которые принадлежат струе, летящей в заднюю полусферу в о.ц.и. взаимодействия.

Для выделенных таким образом кумулятивных ΠC -соударений показано, что наблюдается рождение двух адронных струй, летящих по направлению движения первичного пиона и против этого направления в с.ц.и. столкновения. Величина сферисити для обеих струй совпадает с данными для e^+e^- и адрон-адронных взаимодействий при одинаковых энергиях в с.ц.и. (см. рис.2).

Все изученные характеристики - множественность, продольные и поперечные импульсные распределения адронов относительно оси струй, летящих по направлению движения первичного пиона, - в кумулятивных ΠC -столкновениях совпадают с аналогичными распределениями адронов в e^+e^- -столкновениях и в Πp -взаимодействиях.

Для анализа кумулятивных струй и сравнения распределений вторичных частиц в струях с аналогичными данными по e^+e^- -аннигиляции в кумулятивных ΠC -взаимодействиях выделялась подсистема вторичных частиц, идентичная по составу системе вторичных частиц, рождающихся в e^+e^- -столкновениях. В данном случае анализировалась подсистема пионов в собственной системе покоя; протоны из анализа исключались. Инвариантная энергия выделенной подсистемы M_0 определялась следующим образом: $M_0 = \sqrt{(\sqrt{s} - E_p^*)^2 - P_p^{*2}}$, где E_p^* и P_p^* - суммарные энергия и импульс исключенных протонов.

Показано, что распределения пионов по продольным и поперечным импульсным характеристикам в кумулятивных струях не отличаются от распределений Π^+ -мезонов в струях, образующихся в e^+e^- -столкновениях при одинаковых инвариантных энергиях пионных систем.

Полученные результаты указывают на то, что формирование струй пионов в кумулятивных адрон-ядерных взаимодействиях происходит, в основном, за пределами ядра. Они образуются в результате фрагментации непроявляющихся валентных кварков, входящих в состав первичного адрона, и в результате адронизации мультикварковых состояний, имеющих в ядре-мишени (рис.1б).

В пятой главе изучается фрагментация кварков и мультикварковых состояний в K^0 - и Λ -частицы в кумулятивных ΠC -взаимодействиях при $P = 40$ ГэВ/с.

Сравниваются инклюзивные сечения $\frac{1}{A} \frac{d^6}{dx_i}$ для K^0 - и Λ -частиц в передней и задней полусферах с.ц.и. кумулятивных ΠC -взаимодействий при $P = 40$ ГэВ/с с данными по Πp -взаимодействиям при $P = 40$

ГэВ/с и e^+e^- -аннигиляции при $\sqrt{s} = 14$ и 33 ГэВ (см. рис.4). В таблице I приведены результаты аппроксимации этих распределений зависимостью $(1/\beta) d^6/dx_i = A \exp(-Bx_i)$.

Показано, что функции фрагментации кварков $D_q^{K(\Lambda)}(x_E)$ в K^0 -мезоны и Λ -гипероны в кумулятивных ΠC -взаимодействиях, в e^+e^- -аннигиляции и в мягких Πp -соударениях имеют одинаковую зависимость от x_E .

Функции фрагментации дикварков $D_{qq}^{K(\Lambda)}(x_E)$ в K^0 - и Λ -частицы из мультикварковых состояний в ядре-мишени в кумулятивных ΠC -взаимодействиях совпадают с аналогичными данными для Πp -взаимодействий.

Функции фрагментации дикварков $D_{qq}^K(x_E)$ в кумулятивных ΠC -взаимодействиях и кварков $D_q^K(x_E)$ в e^+e^- -аннигиляции в пределах экспериментальных ошибок одинаковы в области $x_E \leq 0,4$ для K^0 -мезонов, а аналогичные функции для Λ -гиперонов в этих процессах отличаются друг от друга.

Полученные результаты показывают, что фрагментация кварков в странные частицы в кумулятивных взаимодействиях, в мягких адронных соударениях и в e^+e^- -аннигиляции имеет универсальный характер, а механизм фрагментации кварков и дикварков отличается друг от друга.

В шестой главе представлен релятивистски-инвариантный анализ струйного рождения адронов в Πp^- , pp^- , $\bar{p}p^-$, ΠC^- , pC^- и \bar{N} -взаимодействиях в пространстве относительных четырехмерных скоростей.

Как было показано выше, анализ струйного поведения вторичных частиц традиционно проводится с помощью релятивистски-неинвариантных переменных (см. формулы (1), (2)). Характеристики струй при этом зависят не только от системы отсчета, в которой проводится анализ (отметим, что с.ц.и. взаимодействующих объектов не так просто выделить в адрон-адронных и адрон-ядерных взаимодействиях), но зависят и от типа фрагментирующей системы.

В новом инвариантном методе анализа множественного рождения частиц, предложенном А.М.Балдиным, процессы

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

рассматриваются в пространстве, точками которого являются четырехмерные скорости $u_i = P_i / m_i$, где P_i - четырехимпульс частицы, а m_i - их массы.

Положительные, инвариантные величины, имеющие смысл квадратов расстояний в этом пространстве:

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

где $i, k = \bar{I}, \bar{II}, 1, 2, 3, \dots$, являются основными переменными, описывающими относительное движение частиц.

Таблица 2. Значения $\langle \theta_k \rangle$ при $X_{M,N} > 0,1$

Тип взаимодействия	$P_{\text{лаб.}}$ (ГэВ/с) \sqrt{W} (ГэВ)	Область фрагментации	$\langle \theta_k(\pi^+) \rangle^*$
pp	205 ($\sqrt{s} = 19,7$)	фрагм. мишени	$4,5 \pm 0,1$
$\bar{p}p$	40 ($\sqrt{s} = 8,7$)	фрагм. пучка	$4,21 \pm 0,03$
$\bar{p}C$	40	фрагм. пучка	$4,19 \pm 0,04$
$\bar{N}N$	$\langle W \rangle = 8$	фрагм. тока	$4,12 \pm 0,17$
$\bar{p}p$	40 ($\sqrt{s} = 8,7$)	фрагм. мишени	$4,06 \pm 0,04$
$\bar{p}C$	40	фрагм. мишени	$4,36 \pm 0,04$
$\bar{N}N$	$\langle W \rangle = 8$	фрагм. мишени	$4,16 \pm 0,30$
$\bar{p}p$	22,4 ($\sqrt{s} = 6,6$)	фрагм. мишени	$3,95 \pm 0,03$
$\bar{N}N$	$\langle W \rangle = 4,9$	фрагм. тока	$3,68 \pm 0,11$
$\bar{N}N$	$\langle W \rangle = 3,5$	фрагм. тока	$3,17 \pm 0,11$
$\bar{N}N$	$\langle W \rangle = 4,9$	фрагм. мишени	$3,45 \pm 0,19$
$p(C_3H_8)+pTa$	10	фрагм. мишени	$2,13 \pm 0,04$
$\bar{p}p$	12 ($\sqrt{s} = 4,9$)	фрагм. мишени	$3,53 \pm 0,01$
$\bar{p}p$	5,7 ($\sqrt{s} = 3,6$)	фрагм. мишени	$3,21 \pm 0,01$
$\bar{N}N$	$\langle W \rangle = 3,5$	фрагм. мишени	$2,75 \pm 0,15$

* В таблице приводятся статистические ошибки. Систематические ошибки, связанные с неправильной идентификацией положительных частиц, входящих в определение оси струи, составляют $5 \pm 10\%$.

В этом пространстве реализуется принцип ослабления корреляций, который дает возможность рассматривать струи как кластеры адронов с относительно малыми значениями θ_{ik} в этом пространстве *.

Ось струи определяется как единичный четырехмерный вектор V , который находится из условия минимума величины

$$\sum_k \theta_k = - \sum_k (V - u_k)^2 \quad (9)$$

Минимум величины (9) соответствует

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

Отбор частиц, принадлежащих струе, проводится с помощью релятивистски-инвариантных переменных

$$x_{M,N}^{\pm} = (m_i/m_{\bar{i}})(u_i \cdot N_{\bar{i}}) \gg (0,1 \div 0,2), \text{ где } N_{\bar{i}} = u_{\bar{i}} / (u_{\bar{i}} \cdot u_{\bar{i}}),$$

(10)

$$\text{и } x_{M,N}^{\pm} = (m_i/m_{\bar{i}})(u_i \cdot N_i) \gg (0,1 \div 0,2), \text{ где } N_i = u_i / (u_i \cdot u_i),$$

для струй, образующихся, соответственно, в области фрагментации налетающей частицы и частицы-мишени.

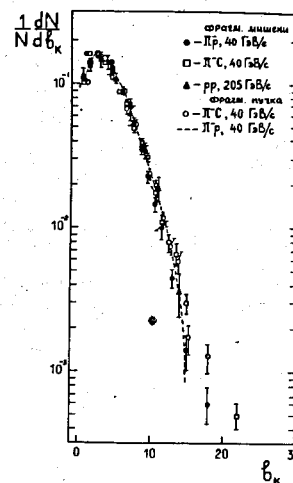


Рис. 5. Распределение \bar{p} -мезонов по θ_k в области фрагментации пучка ($X_M \gg 0,1$ и $X_M \leq 0,1$) и мишени ($X_M > 0,1$ и $X_M \leq 0,1$) для разных типов реакций.

На рис. 5 приводятся распределения по θ_k для струй, выделенных в соответствии с условиями (10) для $\bar{p}p$, $\bar{p}C$ и pp -взаимодействий. В таблице 2 представлены значения $\langle \theta_k \rangle$ как для мягких процессов ($\bar{p}p$, $\bar{p}C$, pp , $\bar{p}p$), так и для жестких $\bar{N}N$ -соударений. Видно, что распределения адронов по θ_k в струях имеют универсальный характер как в мягких, так и в жестких столкновениях частиц, не зависящий ни от типа фрагментирующей системы (N , \bar{p} , C , q), ни от энергии взаимодействия для $P_{\text{лаб.}} \gg 22$ ГэВ/с ($\sqrt{s} = W \gg 6$ ГэВ). Представляется, что эта универсальность обусловлена свойствами взаимодействия цветных зарядов с вакуумом и означает, что адронизация цветных зарядов в вакууме имеет статистический характер, не зависящий от способа их образования.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Проведен анализ струйного рождения вторичных частиц на следующем экспериментальном материале: $\bar{p}p$ - и $\bar{p}C$ -взаимодействиях при $P = 40$ ГэВ/с, pp -взаимодействиях при $P = 205$ ГэВ/с, $\bar{N}N$ -взаимодействиях с $\langle E_T \rangle = 35$ ГэВ. Общая статистика составляет около 40000 событий.

* А.М.Балдин, Л.А.Диденко. - В сб.: "Краткие сообщения ОИЯИ", № 3-84, Дубна, 1984, с.5; № 8-85, Дубна, 1985, с.5.

2. Показано, что в мягких P_r - и кумулятивных P_C -взаимодействиях при импульсе 40 ГэВ/с (впервые в адрон-ядерных взаимодействиях) наблюдается образование двух струй адронов, коллимированных по направлению движения первичных сталкивающихся частиц в их с.ц.и. (т.е. в области фрагментации пучка и мишени). Струи интерпретируются как результат адронизации непроявляющихся кварков (дикварков) от первичного пиона (протона) для P_r -взаимодействий или мультикварковых состояний (для кумулятивных P_C -взаимодействий).

3. Общие струйные характеристики, такие, как сферисити, траст, средняя множественность заряженных частиц в струях, средние значения продольных и поперечных импульсов частиц относительно оси струй и др. в пределах экспериментальных ошибок совпадают для мягких P_r -кумулятивных P_C - (для адрон-ядерных взаимодействий показано впервые) и e^+e^- -взаимодействий при одинаковых энергиях в с.ц.и. взаимодействующих частиц.

4. Показано, что функции фрагментации кварков и дикварков в адроны в мягких адрон-адронных, в кумулятивных адрон-ядерных (анализ проводился впервые), в глубокоэластичных $\nu(\bar{\nu})p$ - и e^+e^- -взаимодействиях совпадают в пределах экспериментальных ошибок при одинаковых энергиях в с.ц.и. сталкивающихся частиц. Функции фрагментации кварков и дикварков в этих процессах отличаются друг от друга, если их рассматривать с помощью релятивистски-неинвариантных переменных (традиционный анализ).

Перечисленные результаты указывают на то, что адронизация кварков и дикварков в таких различных процессах, как мягкие адрон-адронные, кумулятивные адрон-ядерные, глубокоэластичные $\nu(\bar{\nu})p$ - и e^+e^- -взаимодействия, имеет универсальный характер.

5. Формирование струй адронов в кумулятивных взаимодействиях адронов с легкими ядрами происходит, в основном, за пределами ядра.

6. Впервые был использован метод релятивистски-инвариантного описания множественных процессов в пространстве относительных четырехмерных скоростей и новый метод выделения адронных струй в разных типах взаимодействий (P_r , pp , $\bar{p}p$, P_C , $\bar{\nu}N$) в интервале энергий 6+205 ГэВ.

7. Показано, что в отличие от традиционного неинвариантного подхода в пространстве четырехмерных относительных скоростей распределения вторичных заряженных частиц по квадрату четырехмерной скорости θ_k относительно оси струй в мягких адрон-адронных (P_r , pp , $\bar{p}p$), адрон-ядерных (P_C), а также в глубокоэластичных лептон-ядерных ($\bar{\nu}N$)-взаимодействиях как в области фрагментации мишени, так и в области фрагментации пучка одинаковы, т.е. адронизация кварков, дикварков и мультикварковых систем в этих переменных имеет универсальный характер.

8. Распределения и средние значения квадратов разности четырехмерных скоростей $\langle \theta_k \rangle$ пионов относительно оси струй в мягких адрон-адронных (P_r , pp , $\bar{p}p$), адрон-ядерных (P_C) и глубокоэластичных лептон-ядерных ($\bar{\nu}N$)-столкновениях не зависят от энергии взаимодействия в интервале $\sqrt{s} = W = 6+26$ ГэВ.

Таким образом, в релятивистски-инвариантном подходе найдена новая универсальная характеристика множественных процессов, не зависящая от энергии и состава кварковой системы, которая характеризует динамику адронизации цветных кварков.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, Т.Канарек, З.В.Метревели, В.С.Мурзин, Л.И.Сарычева. Анализ множественного рождения в P_r -взаимодействиях при импульсе 40 ГэВ/с с помощью коллективных переменных. - ЯФ, 1983, 37, 915.
2. В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, Т.Канарек, З.В.Метревели. Изучение инклюзивных характеристик частиц в струях в P_r -взаимодействиях при импульсе 40 ГэВ/с. - ОИЯИ, PI-83-306, Дубна, 1983.
3. В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, Т.Канарек, З.В.Метревели. Сравнение струйного поведения мезонов в P_r -столкновениях при импульсе 40 ГэВ/с с данными e^+e^- -аннигиляции. - ОИЯИ, PI-82-754, Дубна, 1982; - ЯФ, 1983, 38, 967.
4. В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, З.В.Метревели. Фрагментация кварков и дикварков в P_r -взаимодействиях при $P = 40$ ГэВ/с. - ОИЯИ, PI-83-823, Дубна, 1983; - ЯФ, 1984, 40, 936.
5. 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 P_r -взаимодействиях при $P = 40$ ГэВ/с. - ОИЯИ, PI-84-79, Дубна, 1984; - ЯФ, 1985, 41, 684.
6. 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.ц.и. в P_r -взаимодействиях при $P = 40$ ГэВ/с. - ОИЯИ, PI-85-259, Дубна, 1985; - ЯФ, 1986, 43, 609.

7. А.М.Балдин, В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, А.А.Кузнецов, З.В.Метревели. Изучение образования струй адронов в кумулятивных ПС-взаимодействиях при импульсе 40 ГэВ/с. - ОИЯИ, РИ-83-483, Дубна, 1983; - ЯФ, 1984, 39, 1215.
8. В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, А.А.Кузнецов, З.В.Метревели. Струи адронов с участием странных частиц в кумулятивных ПС-взаимодействиях при $P = 40$ ГэВ/с. - ОИЯИ, РИ-84-205, Дубна, 1984; - ЯФ, 1985, 41, 371.
9. А.М.Балдин, Б.В.Баткня, 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.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 ноября 1986 года.