

3436

T-505

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

1-89-591

ТОГОО Равдандоржийн

УДК 539.172.1  
539.172.5  
539.172.12

ИССЛЕДОВАНИЕ КУМУЛЯТИВНЫХ  
ПРОТОН-УГЛЕРОДНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ  
ПРИ ИМПУЛЬСЕ  $P_p = 10$  ГэВ/с

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная  
физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1989

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергии Объединенного  
института ядерных исследований

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

ведущий научный сотрудник

ЛЮБИМОВ

Валентин Борисович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

ведущий научный сотрудник

ГЛАГОЛЕВ

Виктор Викторович

кандидат физико-математических наук

старший научный сотрудник

ЛОМАКИН

Юри Филиппович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, г. Москва

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_ 1989 г.

в \_\_\_\_ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.02  
при Лаборатории высоких энергии Объединенного института ядерных  
исследований, г. Дубна Московской области, Лаборатория высоких  
энергии, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ ОИЯИ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_ 1989 г.

Ученый секретарь Специализированного совета

*М.Ф.Лихачев*

М.Ф.ЛИХАЧЕВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Исследование процесса множественной генерации в релятивистской области энергии тесно связано с изучением коллективных взаимодействий (ударная волна, сверхплотные ядра, явление полного развала ядра мишени, кумулятивное рождение фазовые переходы ядерной материи, возможное существование кварк-глюонной плазмы и др.) в ядре.

Создание пучков атомных ядер, движущихся с около-световой скоростью, оказалось магистральным путем, на котором открываются новые законы физики, возникают принципиально новые понятия и даже новые принципы инвариантности в области релятивистской ядерной физики, основной ее объект - кварковая структура ядер. Эту структуру надо иметь в виду не только в том смысле, что из кварков состоят нуклоны ядра (кварки лишь часть времени проводят в составе нуклонов), а в том, что ядро может только локально и только в момент реакции представлять собой сложное флуктуирующее кварк-глюонное образование. В этом случае коллективные взаимодействия можно считать результатом столкновения кварков с кварками (или взаимодействия кварков и глюонов, их адронизацию), находящимися в ядерной среде.

Изучение кумулятивных адрон-ядерных взаимодействий представляет собой уникальную возможность исследования проявления кварковых и глюонных степеней свободы в атомных ядрах, что важно для понимания общей проблемы множественного рождения частиц в адрон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях.

**Цель работы.** Настоящая диссертация посвящена экспериментальному исследованию процесса множественного рождения адронов в следующих реакциях, отобранных по специальным критериям:

$$p + {}^{12}\text{C} \rightarrow h_{\text{тр}} + h_{\text{сопр}} + \dots \quad (1)$$

при первичном импульсе протона  $p_p = 10$  ГэВ/с, где  $h_{\text{тр}}$  - триггерные адроны, по которым отбирались взаимодействия кумулятивного типа,  $h_{\text{сопр}}$  - адроны "сопровождения" ( $p, \pi^+, \pi^-, \gamma, K_S^0, \Lambda^0, \dots$ ). Целью диссертации является проведение анализа экспериментальных данных по множественностям, инклюзивным спектрам, корреляционным характеристикам и классификации вторичных адронов и выявление основных закономерностей изучаемых процессов.

**Новизна работы.** Впервые в условиях 4 $\pi$  - геометрии исследованы характеристики вторичных адронов, образованных в pC-взаимодействиях кумулятивного типа при импульсе налетающего протона 10 ГэВ/с. При

этом для сравнения в ряде случаев привлекались данные по  $\pi^+C$ -взаимодействиям при 40 ГэВ/с и  $pC$  - и  $CC$  - взаимодействиям при 4.2 ГэВ/с на нуклон. Проанализированы их средние множественности, импульсные и угловые зависимости, инвариантные инклюзивные сечения, рассмотрены азимутальные корреляции кумулятивных пионов с вторичными адронами и определены размеры области формирования кумулятивных пионов и протонов в адрон - ядерных взаимодействиях в интервале импульсов налетающих адронов 10-40 ГэВ/с. Полученные результаты сравнивались с данными по "обычным" (не содержащим ни одного кумулятивного адрона) взаимодействиям и предсказаниями каскадной модели. Проведен анализ особенностей кумулятивных адрон - ядерных взаимодействий в области энергии 4-40 ГэВ в зависимости от минимального значения массы объекта, с которым взаимодействует налетающий адрон и установлена связь кумулятивных  $\pi$ -мезонов и протонов с формированием во взаимодействиях частиц с большими поперечными импульсами. Рассмотрены корреляции свойств образующихся 4-мерных протонных кластеров с кумулятивным рождением адронов. Обнаружено влияние на свойства этих кластеров процесса рождения кумулятивных пионов. Это указывает на проявление кварк-глюонных степеней свободы в адрон - ядерных соударениях в исследованной области энергий.

**Научная и практическая ценность работы.** На большом экспериментальном материале (5 тыс. "отобранных" событий, найденных и обработанных на  $\approx 200$  тыс. снимках с 2-метровой пропановой камеры) в условиях "4 $\pi$  - геометрии" и при достаточно высоких точностях измерения импульсов и углов всех вторичных заряженных частиц изучены адрон - углеродные взаимодействия кумулятивного типа, установлены корреляционные свойства между вторичными адронами. Проведенный в диссертации сравнительный анализ результатов важен как для проверки существующих, так и для разработки новых теоретических моделей множественного рождения в кумулятивных взаимодействиях и может быть использован в планировании новых экспериментов по исследованию взаимодействия адронов и ядер с ядрами при высоких энергиях.

**Публикации.** В диссертацию вошли 11 работ, опубликованных в течение 1985-1989 гг. в журналах "Ядерная физика", "Труды института физики и техники АН МНР", в сборнике "Краткие сообщения ОИЯИ", а также в виде препринтов и сообщений ОИЯИ /1-11/.

**Апробация.** Основные результаты диссертации докладывались в специализированных семинарах и симпозиумах, международных совещаниях

стран - участниц ОИЯИ по обработке снимков с 2-метровой пропановой камеры ЛВЭ ОИЯИ.

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

#### Автор защищает:

1. Прделанную работу по изучению и обработке 5268  $pC$  - взаимодействий кумулятивного типа, полученных с помощью 2-метровой пропановой пузырьковой камеры ЛВЭ ОИЯИ при первичном импульсе протона  $p_p = 10$  ГэВ/с.
2. Данные, полученные при исследовании характеристик  $\langle \bar{p}, \bar{\theta}, \bar{y}, \bar{n} \rangle$  всех вторичных частиц, рожденных в реакциях (1).
3. Результаты анализа кумулятивных адрон - углеродных взаимодействий в интервале импульсов 4-40 ГэВ/с в зависимости от массы мишени и числа частиц с большими поперечными импульсами.
4. Данные по азимутальным корреляциям кумулятивных пионов с вторичными частицами в кумулятивных  $pC$  - взаимодействиях при  $p_p = 10$  ГэВ/с.
5. Результаты определения размеров области формирования кумулятивных пионов и протонов в адрон - ядерных взаимодействиях в области энергии 10-40 ГэВ.
6. Особенности 4-мерных протонных кластеров в кумулятивных  $pC$  - и  $CC$  - взаимодействиях при  $p_p = 10$  ГэВ/с и  $p_0 = 4.2$  ГэВ/с на нуклон.

#### СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении отмечается актуальность изучения процессов множественного рождения частиц в адрон - ядерных столкновениях кумулятивного типа при высоких энергиях, а также сформулирована основная цель работы.

В первой главе диссертации описаны методические вопросы обработки экспериментальной информации.

Экспериментальные данные получены с помощью 2-метровой пропановой пузырьковой камеры ТПК-500 ЛВЭ ОИЯИ, помещенной в магнитное поле напряженностью  $H \approx 15$  кГс. Камера экспонировалась в пучке релятивистских ядер на синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий. В главе дано краткое описание пропановой пузырьковой камеры, системы фотографирования, системы вывода пучков ядер, а также магнитное поле.

Просмотр стереофотографий проводился на просмотрных столах типа

БПС-1 и БПС-2. Отобранные при просмотре события измерялись на полу - автоматах типа ПУОС и САМЕТ, работающих на линии связи с ЭВМ ЕС-1033. Точность измерения координат на пленке составляет  $\approx 10$  мкм. Математическая обработка событий проводилась на ЭВМ CDC-6500 по программе ГЕОФИТ. После проверки качества измерения треков события записывались на ленту суммарных результатов (DST). Точность определения параметров вторичных частиц оказалась равной  $\langle \Delta p/p \rangle = (9.1 \pm 0.1) \%$ ,  $\langle \Delta \theta \rangle = (0.045 \pm 0.001)$ ,  $\langle \Delta \beta \rangle = (13.2 \pm 0.3)$  мрад, где  $p$ -импульс,  $\theta$ -глубинный угол,  $\beta$ -азимутальный угол вылета частицы.

Экспериментальный материал, на котором главным образом основана диссертация, был отобран в результате просмотра  $\approx 200$  тыс.  $pC$  - взаимодействий при 10 ГэВ/с и отбора событий, имеющих "триггерные" следы, испущенные под углами, большими  $135^\circ$  по отношению к направлению первичного протона. При этом требовалось, чтобы длина этих следов в случае останавливающихся в эффективном объеме камеры протонов превышала 9 см ( $p > 380$  МэВ/с), а в случае следов релятивистских частиц было необходимо, чтобы их импульс, определенный по шаблону, превышал значение  $p = 200$  МэВ/с. Кроме этого фиксировались все взаимодействия, которые сопровождались испусканием в заднюю полусферу (ЗП) ЛСК  $\gamma$ -квантов. После измерений отбирались события, имеющие в интервале « плоских » углов  $\phi$  от 3.82 до 5.60 рад хотя бы один  $\pi^+$  - мезон с импульсом  $p_\pi > 200$  МэВ/с или протон с импульсом  $p_p > 380$  МэВ/с и  $\gamma$ -квант с энергией  $E_\gamma > 100$  МэВ. "Триггерные" следы должны были иметь глубинный угол  $\alpha$ , удовлетворяющий условию  $|\cos \alpha| \leq 1$ . В отобранных событиях регистрировались все сопутствующие нейтральные частицы ( $\gamma, K_s^0, \Lambda^0$ ), детектируемые камерой.

Были внесены поправки на потерю частиц, вылетающих под большими углами к плоскости фотографирования, а также на потери, связанные с отбором событий по "триггерным" следам.

Вторая глава посвящена изучению особенностей  $hC$  - взаимодействия с испусканием кумулятивных адронов в области энергии 4-40 ГэВ /1-6,10/.

При анализе этих особенностей рассмотрены следующие типы событий:

- T1. события с кумулятивными пионами и без кумулятивных протонов;
- T2. события, имеющиеся одновременно кумулятивные пионы и протоны;
- T3. события, имеющиеся только кумулятивные протоны, но без кумулятивных пионов;

T4. события без кумулятивных адронов ("обычные" столкновения).

Для выделения кумулятивных адронов использовалась световая переменная  $\beta^0$  ( $\beta^0 = (E - p_\parallel) / m_N$ ,  $E$ ,  $p_\parallel$  - энергия, продольный импульс частицы,  $m_N$  - масса нуклона). Кумулятивными считались пионы с  $\beta^0 > 0.6$

и протоны с  $\beta^0 > 1.2$ . В дальнейшем первые два типа событий получили название "мезонные" кумулятивные взаимодействия (МКВ), а события типа T3 - "протонные" кумулятивные взаимодействия (ПКВ).

Полученные результаты для сечений  $pC$  - взаимодействий при 10 ГэВ/с приведены в табл.1. В последней строке этой таблицы приведен результат для события с  $\gamma$ -квантами, испущенными в ЗП с  $E_\gamma > 100$  ГэВ.

Таблица 1

| Тип взаимо-<br>действия      | Число кум.<br>адронов | Число взаимо-<br>действий | $\sigma$ (мб)   |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------|
| T1                           | 1                     | 453                       | $2.0 \pm 0.2$   |
|                              | 2                     | 10                        | $0.04 \pm 0.02$ |
| T2                           | $\geq 2$              | 89                        | $0.38 \pm 0.14$ |
|                              | 1                     | 1273                      | $5.5 \pm 0.2$   |
| T3                           | 2                     | 124                       | $0.54 \pm 0.07$ |
|                              | $\geq 1$              |                           | $5.7 \pm 1.0$   |
| $pC \rightarrow \gamma_{ЗП}$ | $\geq 1$              |                           | $5.7 \pm 1.0$   |

Из табл.1 видно, что вероятность испускания дополнительного кумулятивного пиона ( $W_\pi = 2-3 \%$ ) или протона ( $W_p = 9-10 \%$ ) в 3-4 раза больше вероятности соответствующего кумулятивного взаимодействия среди неупругих  $pC$  - столкновений. Для кумулятивных  $pC$  - взаимодействий при 10 ГэВ/с получены средние импульсы - ( $\bar{p}$ ), углы испускания - ( $\bar{\theta}$ ), средние множественности - ( $\bar{n}$ ), средние поперечные импульсы -  $\bar{p}_T$  и скорости - ( $\bar{y}$ ) всех вторичных адронов, включая лидирующий (положительная частица с импульсом  $p > 1$  ГэВ/с и  $x^* = 2p_\parallel / \sqrt{s} > 0.2$ , где  $p_\parallel$  - продольный импульс в с.ц.и.  $\sqrt{s}$  - соударения и  $s$  - полная ее энергия). Обнаружены отличия свойств  $\pi^-$  - мезонов в МКВ от свойства этих мезонов в "обычных" столкновениях, в особенности это относится к значениям их средних множественностей. Не найдено существенных отличий свойств лидирующих адронов в кумулятивных взаимодействиях разного типа, но средние значения импульсов этих адронов в кумулятивных соударениях меньше, чем в "обычных" неупругих  $pC$  - взаимодействиях. Быстрые вторичные частицы (с  $p > 0.7$  ГэВ/с) в кумулятивных столкновениях не обладают в среднем большими поперечными импульсами, чем в "обычных".

По зарегистрированным  $\gamma$  - квантам, испущенным из отобранных событий, найдены средние характеристики вторичных  $\pi^0$ -мезонов. Это средняя множественность  $\bar{n}_{\pi^0} = 1.41 \pm 0.14$  и среднее значение полной энергии, идущей на образование  $\pi^0$  - мезона,  $\bar{E}_{\pi^0} = (1.37 \pm 0.37)$

ГэВ. Эти результаты в пределах ошибок согласуются с данными для заряженных пионов:  $\bar{p}_{\pi^+} = 1.14 \pm 0.05$  и  $E_{\pi^-} = (1.01 \pm 0.05)$  ГэВ.

Результаты по средним характеристикам вторичных частиц получены также для разных групп кумулятивных рС - взаимодействий, сопровождающихся испусканием странных частиц ( $K_S^0$ ,  $\Lambda^0$ ). В пределах статистической точности не обнаружено существенных различий разных типов кумулятивных взаимодействий по импульсным, угловым характеристикам вторичных  $\pi^-$  - мезонов, множественностям  $\pi^+$  - мезонов и протонов. При этом, в кумулятивных рС - взаимодействиях с рождением странных частиц наблюдается существенное уменьшение вероятности образования лидирующего адрона. Намечается тенденция к уменьшению средних импульсов  $K_S^0$  - мезонов в МКВ по сравнению с ПКВ.

Инвариантные инклюзивные сечения образования кумулятивных адронов (рис.1), испущенных в интервал телесных углов ЗП с  $\theta \geq 135^\circ$ , аппроксимировались экспоненциальной зависимостью вида:

$$E \frac{d^3\sigma}{dp^3} = \sim \exp(-\beta^0 / \langle \beta^0 \rangle) \quad (2)$$

Найдено, что значения параметра  $\langle \beta^0 \rangle$  группируются в районе  $0.14 \pm 0.17$ .

В событиях с несколькими кумулятивными адронами исследованы спектры лидирующих кумулятивных адронов, т.е. спектры кумулятивных пионов (или протонов), имеющих наибольшее значение переменной  $\beta^0$  среди всех зарегистрированных в данном взаимодействии кумулятивных пионов (протонов). Как видно из табл.2, где приведены значения параметров  $\langle \beta^0 \rangle$ , полученных при аппроксимации спектров лидирующих кумулятивных адронов выражением (2), эти параметры практически не отличаются от соответствующих значений для всех кумулятивных адронов.

Таблица 2

| Тип взаимодействия | Рассматриваемые частицы                   | Угол испускания в ЛСК $\theta$ (град) | $\langle \beta^0 \rangle$ | $\chi^2 / \text{ст.св.}$ |
|--------------------|---|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| МКВ                | $\pi^+ (\beta^0 = \beta_{\text{макс}}^0)$ | $> 90^\circ$                          | $0.161 \pm 0.011$         | 12.6/7                   |
| ПКВ                | $p (\beta^0 = \beta_{\text{макс}}^0)$     | $> 90^\circ$                          | $0.144 \pm 0.006$         | 12.0/8                   |

Сравнение результатов, полученных для рС - и  $\pi^-$ С - взаимодействий ( $p_p = 10$  ГэВ/с и  $p_{\pi^-} = 40$  ГэВ/с), различающихся по значениям инвариантной удельной энергии  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = \langle p_{I,II} \rangle / \langle M_{I,II} \rangle$ ), где  $p_{I,II}$  - 4-импульсы сталкивающихся объектов:  $M_I, M_{II}$  - их массы) в  $\sim 29$  раз, дает информацию о масштабных эффектах в кумулятивных взаимодействиях. На рис.2 это сравнение продемонстрировано в

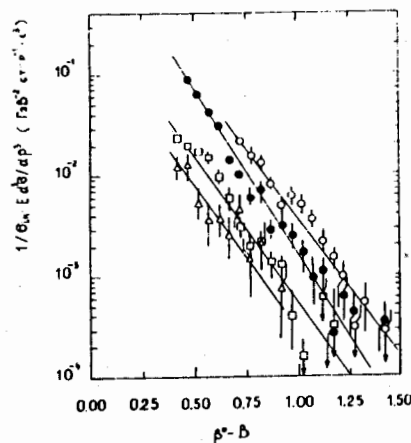


Рис.1. Инвариантные инклюзивные сечения образования адронов, по которым отбирались рС - взаимодействия кумулятивного типа. (о - пионы, • - протоны,  $\Delta$  -  $\gamma$ -кванты)

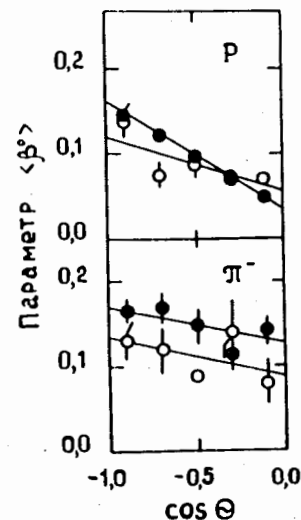


Рис.2. Угловая зависимость значений параметра  $\langle \beta^0 \rangle$  (• - рС - взаимодействия, о -  $\pi^-$ С - взаимодействия)

виде зависимости значений параметров  $\langle \beta^0 \rangle$  от угла испускания кумулятивных адронов ( $\theta$ ) в ЛСК. Прямые на этом рисунке - результат аппроксимации данных выражением вида:  $\langle \beta^0 \rangle = \text{const} + a_1 \cos \theta$ . Видно, что значения параметра  $\langle \beta^0 \rangle$  для инвариантных инклюзивных сечений образования кумулятивных  $\pi^-$  - мезонов практически не зависят от угла испускания, и в пределах ошибок угловая зависимость параметра  $\langle \beta^0 \rangle$  оказывается одинаковой для этих мезонов, испущенных из рС - и  $\pi^-$ С - взаимодействий. Для кумулятивных протонов эти распределения отличаются друг от друга.

Проанализированы особенности кумулятивных взаимодействий в зависимости от значений минимальной массы мишени, которая при достаточно высоких первичных энергиях равна  $M_t^{\text{ch}} = \sum \beta_i^0$ , где суммирование производится по всем вторичным заряженным частицам (исключая испарительные протоны с  $p_p < 250$  МэВ/с). Величину  $M_t^{\text{ch}}$  можно



связать с полной энергией в с.с.и.  $hC$  - взаимодействия :

$$\sqrt{S_{hC}} = \sqrt{M_t^{ch} S_{hp}} \quad (3)$$

где  $S_{hp}$  - полная энергия  $hp$  - взаимодействия в с.с.и. , равная  $\sqrt{2m_N E_a}$ ,  $E_a$  - первичная энергия. Это позволяет проводить сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными при разных энергиях , а также с теоретическими предсказаниями. Обнаружено , например , что  $M_t^{ch}$  - распределения , нормированного числа кумулятивных взаимодействий (рис.3) оказываются приблизительно одинаковыми для всех рассмотренных событий (  $pC$  - столкновения при  $p_p = 4.2$  и  $10$  ГэВ/с и  $\pi^- C$  - соударения при  $p_p = 40$  ГэВ/с ). Они описываются одной кривой и отличаются от  $M_t^{ch}$  - распределений для "обычных" столкновений по крайней мере до значений  $M_t^{ch} \approx 5$ . Общую тенденцию  $M_t^{ch}$  - распределений для "обычных" событий отражает кривая , рассчитанная по каскадной модели / показана на рис.3 пунктиром /. Универсальность  $M_t^{ch}$  - распределений нормированного числа кумулятивных взаимодействий (  $\sigma_c^*$  ) связана только с группой МКВ (см. рис.4а). Для этой группы характерен одинаковый рост отношения  $\sigma_c^* / \sigma_{in}^*$  с увеличением  $M_t^{ch}$  с последующим выходом на плато при значениях  $M_t^{ch} \approx 3 \pm 4$ . Сечения  $\sigma_c^*$  ( или  $\sigma_{in}^*$  ) определялись как отношения числа кумулятивных ( или неупругих  $hC$  ) событий к числу всех кумулятивных ( или неупругих  $hC$  ) взаимодействий в интервале  $\Delta M_t^{ch} = 1$ . Ничего подобного не наблюдается для ПКВ (см. рис.4в,г).

Таблица 3

| Тип взаимодействия | Первичный импульс $P_0$ (ГэВ/с) | $\langle M_t^{ch} \rangle_{cum}$ /с кум. адронами/ | $\langle M_t^{ch} \rangle_{ord}$ /без кум. адронов/ | $\langle M_t^{ch} \rangle_{cum} / \langle M_t^{ch} \rangle_{ord}$ |
|--------------------|---------------------------------|--|---|---|
| $pC$               | 4.2                             | $2.69 \pm 0.06$                                    | $1.27 \pm 0.02$                                     | $2.12 \pm 0.06$   |
|                    | 10                              | $2.80 \pm 0.16$                                    | $1.47 \pm 0.02$                                     | $1.90 \pm 0.11$   |
| $\pi^- C$          | 40                              | $2.49 \pm 0.02$                                    | $1.25 \pm 0.01$                                     | $1.99 \pm 0.02$   |

Средние значения  $M_t^{ch}$  для кумулятивных и "обычных" столкновений (табл.3) определяют среднее минимальное число нуклонов ядра мишени, участвующих в столкновении. Они практически не зависят от первичной энергии и сорта налетающего адрона и для кумулятивных взаимодействий эти числа приблизительно в 2 раза больше числа нуклонов мишени, участвующих в "обычных" столкновениях во всем диапазоне использованных энергий.

Рассмотрены  $S$  - зависимости средних множественностей и быстрот вторичных частиц (не приводятся). В этих зависимостях не наблюдаются существенных различий между двумя группами кумулятивных взаимодействий .

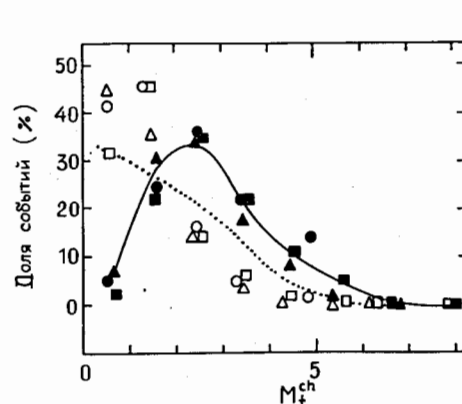


Рис.3.  $M_t^{ch}$  - зависимости нормированного числа кумулятивных и "обычных" взаимодействий.

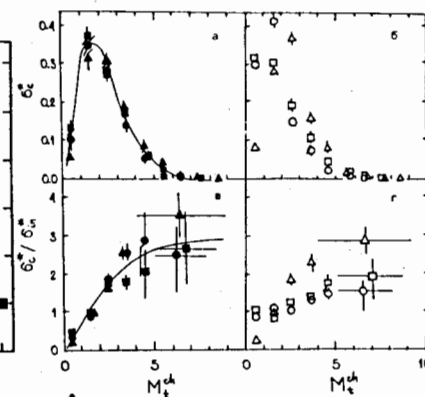


Рис.4.  $M_t^{ch}$  - зависимости нормированных сечений МКВ, ПКВ и отношений.

Намечаются отличия кумулятивных событий от "обычных" в  $S$  - зависимости средних квадратов поперечных импульсов (  $\bar{p}_T^2$  ) вторичных частиц (рис.5). Для кумулятивных взаимодействий  $\bar{p}_T^2$  растут с увеличением  $\sqrt{S}$ . Как видно из рис.6 рост значений  $\bar{p}_T^2$  связан , в основном, с кумулятивными  $\pi$  - мезонами. Для адронов "сопровождения" и кумулятивных протонов четкие корреляции  $\bar{p}_T^2$  с величиной  $M_t^{ch}$  не заметны. Для "обычных" столкновений  $S$  - зависимости  $\bar{p}_T^2$  качественно согласуются с расчетами по каскадной модели.

Для  $M_t^{ch}$  - зависимости средних значений выходов кумулятивных адронов характерно наличие одинакового для всех групп рассмотренных взаимодействий "порогового эффекта" в районе  $M_t^{ch} \approx 3 \pm 4$  (не приводится). С этих значений  $M_t^{ch}$  начинается рост выходов кумулятивных адронов.

Найдено, что значения параметра  $\langle \beta^0 \rangle$  для кумулятивных пионов практически не зависят от  $M_t^{ch}$ .

Для анализа связи кумулятивных взаимодействий с формированием в них адронов с большими поперечными импульсами изучены характеристики этих взаимодействий в зависимости от числа вторичных частиц в них

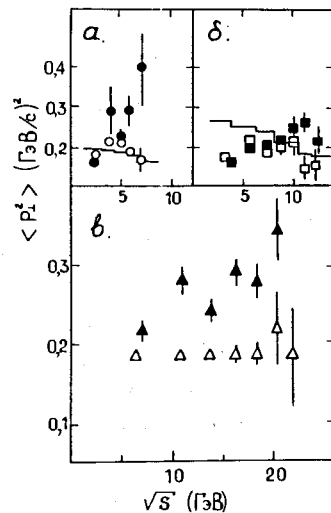


Рис.5. S - зависимости  $\langle p_T^2 \rangle$  вторичных заряженных частиц.

(N), имеющих поперечный импульс  $p_T > p_T^{GP}$ . В качестве граничного значения поперечного импульса взято  $p_T^{GP} = 0.45$  ГэВ/с, приблизительно равное среднему значению поперечного импульса всех вторичных частиц в исследуемых столкновениях. При этом наиболее четкие корреляции с числом вторичных частиц, имеющих большие поперечные импульсы, обнаруживаются только в МКВ. Это видно из рис.7, где приведены N - зависимости отношений нормированных сечений кумулятивных  $pC$  - и  $\pi^+C$  - взаимодействий при  $p_p = 10$  ГэВ/с и  $p_{\pi^-} = 40$  ГэВ/с ( $\sigma_C^*$ ) к нормированным неупругим сечениям соответствующих  $hC$  - взаимодействий ( $\sigma_{in}^*$ ). Для МКВ отношение  $\sigma_C^* / \sigma_{in}^*$  растет с увеличением N приблизительно одинаковым образом для двух ансамблей  $hC$  - столкновений. Для ПКВ с увеличением N наблюдается приблизительно постоянство этого соотношения.

В третьей главе исследованы двухчастичные корреляции в  $hA$  - взаимодействиях кумулятивного типа. В ней изложены результаты по азимутальным корреляциям в "кумулятивных"  $pC$  - взаимодействиях при  $p_p = 10$  ГэВ/с и полученные оценки размеров области испускания кумулятивных пионов и протонов в  $pC$  - и  $pTa$  - столкновениях при  $p_p = 10$  ГэВ/с и в  $\pi^-C$  - соударениях при  $p_{\pi^-} = 40$  ГэВ/с [7,8].

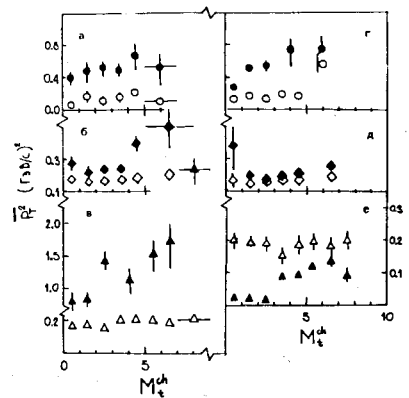


Рис.6.  $M_T^{ch}$  - зависимости  $\langle p_T^2 \rangle$  вторичных частиц в МКВ (а,б,в) и ПКВ (г,д,е).

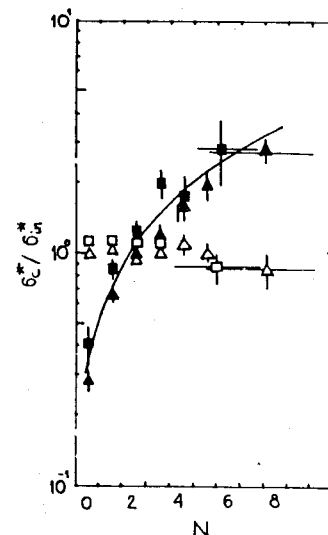


Рис.7. N - зависимости отношений нормированные кумулятивных сечений к нормированным неупругим сечениям для МКВ и ПКВ.

Для определения размеров области испускания пионов эффект интерференции тождественных бозонов выражается в виде:

$$R(P_1, P_2) = D(P_1, P_2) / D_0(P_1, P_2) \quad (4)$$

где  $P_1, P_2$  - 4-импульсы рассматриваемых частиц,  $D(P_1, P_2)$  - плотность пар тождественных частиц в фазовом пространстве,  $D_0(P_1, P_2)$  - плотность пар при отсутствии интерференции (фон). Для описания эффекта в случае  $hC$  - взаимодействий удобно пользоваться переменной  $Q^2 = -(P_1 - P_2)^2$ . Количественно корреляционный эффект извлекался из анализа Q - зависимости отношения  $R = N / N_{\phi}$ , N - число пар тождественных пионов в выбранных интервалах Q,  $N_{\phi}$  - число фоновых комбинаций. По традиционной методике это распределение аппроксимировалось выражением вида:

$$R(Q^2, r_0) = A (1 + \delta Q^2) (1 + \lambda e^{-4 Q^2 r_0^2}) \quad (5)$$

где A,  $\delta$ ,  $\lambda$ ,  $r_0$  - параметры аппроксимации, причем  $r_0$  связан с среднеквадратичным радиусом области испускания соотношением:

$r_0^{1/2} = \sqrt{3} r_0$ . В качестве фона было взято распределения по  $Q$  пар неидентичных пионов. Значения параметров  $r_0$  для кумулятивных пионов и пионов "сопровождения", полученных при аппроксимации экспериментальных распределений  $R$  выражением вида (5) равны  $1.0 \pm 0.7$  фм (для  $pC$  - взаимодействий),  $1.0 \pm 0.5$  фм (для  $\pi C$  - соударения). Для пионов "сопровождения" в этих событиях для  $r_0$  получено  $2.2 \pm 3.2$  фм.

Размеры области испускания кумулятивных протонов были определены по величине отношения  $R(k) = W/W_\phi$  в интервале значений  $k$  от 10 до 60 МэВ, где  $k = 0.5 \sqrt{Q^2}$ ,  $W$  - число пар протонов в указанном интервале  $k$ ,  $W_\phi$  - число фоновых пар протонов в этом же интервале. Фон был получен путем случайного комбинирования тех же протонов, но взятых из разных событий. Таким же способом сделаны оценки размеров области испускания протонов "сопровождения" в МКВ и ПКВ.

Используя соответствующее теоретическое распределение, связывающее величину  $R(k)$  с размерами области образования протонов, получены значения параметра  $r_0$ , которые для протонов "сопровождения" оказались равными  $1.2 \pm 0.4$  фм (МКВ);  $2.5 \pm 0.6$  фм (ПКВ) и для кумулятивных протонов -  $1.8 \pm 0.3$  фм.

Таким образом размеры области испускания кумулятивных протонов оказались сравнимыми с размерами области испускания всех остальных протонов. Для протонов "сопровождения" из МКВ эти размеры получаются меньшими. Получены указания на то, что кумулятивные пионы испускаются из области меньших размеров, чем все остальные пионы, причем эти размеры сравнимы с размерами области испускания протонов "сопровождения" в этих событиях.

В четвертой главе представлены результаты исследования в релятивистски - инвариантном подходе свойств протонных кластеров, образовавшихся в  $pC$  - и  $\pi C$  - столкновениях ( $p_p = 10$  ГэВ/с и  $4.2$  ГэВ/с). Анализ проводился в пространстве 4-мерных относительных скоростей:

$$b_{ik} = -(u_i - u_k)^2 = 2[(u_i u_k) - 1] \quad (6)$$

где  $u_j = P_j/m_j$  ( $j = i, k$ ),  $P_j$  - 4-импульсы частиц,  $m_j$  - их массы. Величина  $b_{ik}$  определяет уровень (нуклонный или кварковый), на котором рассматривается структура взаимодействующих объектов  $i$  и  $k$ . В нашем случае "промежуточной" области ( $0.1 < b_{ik} < 1$ ) вторичные протоны могут быть как частицами в классических ядерных взаимодействиях, так и продуктами фрагментации кварковых систем при соударениях на кварк - глюонном уровне. В каждом событии (с числом протонов  $N_p \geq 3$ ) рассматривались все возможные разбиения совокупности вторичных протонов на две группы. При

этом требовалось, чтобы "расстояние" между центрами кластеров  $b_{\alpha\beta} > 1.0$ , причем средние значения этих "расстояний" ( $\bar{b}_{\alpha\beta}$ ) должны были приблизительно на порядок больше средних "расстояний" частиц от центров кластеров ( $\bar{b}_k$ ) для всех рассматриваемых событий. Здесь  $b_{\alpha\beta} = -(V_\alpha - V_\beta)^2$ ,  $b_k = -(V - u_k)^2$ , где  $V_{\alpha(\beta)}$  - 4-скорость кластера.

Изучены структурные функции  $F(X) = E \frac{d^3y}{dp^3}$  в зависимости от переменных  $X = b_{iic}, x_s, b_k$ , где  $b_{iic} = -(u_{iic} - V)^2$ ,

$x_s = \frac{M_{\alpha(\beta)}(V_{\alpha(\beta)} u_{N(N)})}{m_{N(N)}(u_N u_M)}$  - доля 4-импульса налетающего ядра (N) и ядра мишени (M),  $M_{\alpha(\beta)}$  - масса кластера  $\alpha$  (или  $\beta$ ),  $m_{N(N)}$  - масса налетающего ядра (или ядра мишени). Для выделения кластеров, связанных с фрагментацией ядра мишени требовалось выполнение условия  $x_{sM} x_{sH}$ . Поведение структурных функций  $F(b_{iic})$  и  $F(x_s)$  характеризует процесс фрагментации рассматриваемого ядра в данном случае на кластеры, это энергетические характеристики фрагментирующихся систем и их структуры. Структурные функции  $F(b_k)$  определяют особенности образовавшихся кластеров, в частности их энергию распада. Анализ этих функций дает возможность установить связь между особенностями образования кластеров и их свойствами.

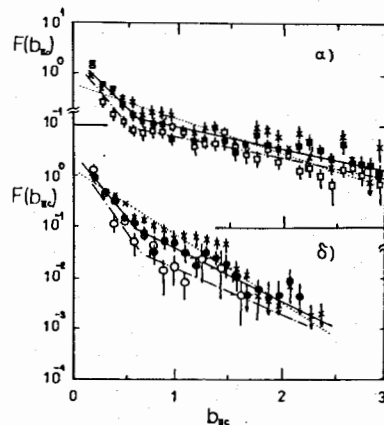


Рис.8.  $F(b_{iic})$  - распределения для  $pC$  - взаимодействий (а) и  $\pi C$  - взаимодействиях (б).

Структурные функции  $F(b_{iic})$  для кумулятивных столкновений (рис.8) имеют быстро спадающую часть при значениях  $b_{iic} \leq 0.6$  с небольшими различиями для разных групп событий и приблизительно одинаковую относительно медленно спадающую часть при  $b_{iic} \geq 0.6$ .

Для "обычных" взаимодействий два наклона в поведении структурных функций  $F(b_{iic})$  четко не проявляются. Таким образом, только кумулятивные взаимодействия можно характеризовать двумя "способами"



фрагментации ядра мишени на кластеры, различающимися, например, по средним значениям переменной  $b_{НС}$ . Им соответствуют разные структуры фрагментирующих объектов, что следует из  $F(x_s)$  - распределений (не приводится). Данные по средним множественностям кумулятивных адронов во взаимодействиях с фрагментацией на протонные кластеры либо с  $b_{НС} < 0.6$ , либо  $b_{НС} > 0.6$ , показывают, что рождение кумулятивных адронов происходит в обеих группах событий, причем кумулятивные протоны в событиях первой группы образуются несколько чаще, чем второй, например,  $\bar{n}_{p(кум)} = 0.34 \pm 0.02$  и  $0.26 \pm 0.02$  в МКВ при  $p_p = 10$  ГэВ/с. Кумулятивные пионы в обеих группах столкновений рождаются в пределах ошибок с одинаковой вероятностью  $(0.57 \pm 0.02$  и  $0.61 \pm 0.03$  для МКВ при  $p_p = 10$  ГэВ/с).

Разница между МКВ и ПКВ в образовании протонных кластеров проявляется в  $F(b_k)$  - распределениях. Это следует из значений параметров  $\langle b_k \rangle$ , которые формально можно связать со "средними температурами",  $\langle T_k \rangle = m \langle b_k \rangle / 2$ ,  $m$  - масса частицы, полученных при аппроксимации этих распределений экспоненциальными  $\sim \exp(-b_k / \langle b_k \rangle)$  или суммой экспонент  $\sim \exp(-b_k / \langle b_k \rangle_1) + \text{const} \cdot \exp(-b_k / \langle b_k \rangle_2)$ . Полученные значения температур приведены в табл.4.

Таблица 4

| Тип взаимодействия | $\langle T_k \rangle_1$<br>для рС при 10 ГэВ/с | $\langle T_k \rangle_2$<br>для рС при 10 ГэВ/с | $\langle T_k \rangle_1$<br>для СС при 4.2 ГэВ/с нуклон | $\langle T_k \rangle_2$<br>для СС при 4.2 ГэВ/с нуклон |
|--------------------|--|--|--|--|
| МКВ                | $65 \pm 5$                                     | $131 \pm 11$                                   | $43 \pm 11$  | $114 \pm 5$  |
| ПКВ                | $84 \pm 1$                                     | -  | $104 \pm 3$  | -  |
| "обычные"          | $85 \pm 1$                                     | -  | $80 \pm 1$   | -  |

Кумулятивное рождение протонов происходит, в основном, в кластерах с  $b_k < 0.6$  (называем их низкотемпературными кластерами). Этот результат скорее всего связан с тем, что этим кластером соответствуют малые значения  $b_k$ , при которых происходит рождение кумулятивных протонов. Так, в ПКВ, где не проявляются ни низко-, ни высокотемпературные кластеры, кумулятивное рождение протонов относится, в основном, к кластерам с малыми значениями  $b_k$ . Например в кластерах из ПКВ с  $b_k < 0.6$  происходит образование  $\approx 80\%$  всех кумулятивных протонов.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. С участием автора было найдено, обработано и проанализировано 5268 рС - взаимодействий при  $p_p = 10$  ГэВ/с, сопровождающихся испусканием кумулятивных  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$  - мезонов и протонов.

2. Для рС - столкновений при 10 ГэВ/с определены сечения рС - взаимодействия с рождением заряженных кумулятивных пионов в интервале углов испускания  $\theta > 135^\circ$   $\sigma_{\pi^{(кум)}} = 2.4 \pm 0.1$  мб, нейтральных кумулятивных пионов ( $\theta > 90^\circ$ ) -  $\sigma_{\pi^0(кум)} = 5.7 \pm 1.0$  мб и кумулятивных протонов ( $\theta > 135^\circ$ ) -  $\sigma_{p(кум)} = 5.7 \pm 0.2$  мб.

3. Получены данные о характеристиках всех вторичных заряженных частиц (по средним значениям импульсов -  $\bar{p}$ , углов испускания -  $\bar{\theta}$ , быстрот -  $\bar{y}$  и множественностям -  $\bar{n}$ ) в кумулятивных взаимодействиях. Наблюдаются, в частности, отличия кумулятивных событий от всех остальных по множественности вторичных частиц и их импульсным характеристикам. В особенности это относится к взаимодействиям с испусканием кумулятивных мезонов. Средние импульсы лидирующих адронов в кумулятивных взаимодействиях меньше, чем в "обычных" неупругих рС - столкновениях.

4. Исследованы инвариантные инклюзивные сечения образования кумулятивных адронов в том числе и их связь с множественностью этих адронов. Отмечается, что при образовании нескольких кумулятивных адронов не происходит формирования лидирующих кумулятивных адронов.

5. Проанализированы особенности кумулятивных рС - взаимодействий при 10 ГэВ/с с испусканием странных частиц ( $K^0$  - мезонов,  $\Lambda^0$  - гиперонов). При этом наблюдаются значительно большие множественности странных частиц в кумулятивных событиях в сравнении с остальными неупругими столкновениями. В пределах статистической точности не обнаружено существенных различий кумулятивных взаимодействий с рождением странных частиц и без них по импульсным и угловым характеристикам вторичных  $\pi^-$  - мезонов и по множественностям  $\pi^+$  - мезонов и протонов.

6. Проведен анализ характеристик кумулятивных взаимодействий в зависимости от минимальной массы мишени, с которой взаимодействует налетающий адрон. Оказалось, что в кумулятивных событиях во взаимодействиях участвуют приблизительно в два раза больше нуклонов мишени, чем в остальных столкновениях. Этот результат не зависит от первичной энергии и сорта налетающего адрона. Обнаружены корреляции рождения кумулятивных адронов с фактом формирования в этих событиях частиц с большими поперечными импульсами.

7. Исследованы азимутальные корреляции кумулятивных пионов с вторичными адронами. В пределах имеющейся статистической точности не обнаружены азимутальные корреляции кумулятивных пионов с

лидирующими адронами и пионами "сопровождения", испущенными в заднюю полусферу лабораторной системы координат.

8. Получены указания на то, что кумулятивные пионы испускаются из области меньших размеров, чем все остальные пионы. Приблизительно из области тех же размеров испускаются протоны, сопровождающие рождение этих пионов.

9. Проведен анализ 4-мерных протонных кластеров, связанных с фрагментацией мишени в мезонных и протонных кумулятивных  $pC$ - и  $\pi C$ -взаимодействиях. Во всех случаях фрагментация ядра мишени происходит на кластеры, которые можно разбить на две группы, характеризующиеся разными средними значениями энергий в системе покоя фрагментирующего объекта. Свойства протонных кластеров в мезонных и протонных кумулятивных взаимодействиях оказываются разными. Кластеры в первой группе соответствуют две температуры распада, которые коррелируют с особенностями их образования. Во второй группе, как и в "обычных" столкновениях, этих корреляций нет. Кластеры в них характеризуются одной температурой.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ц.Баатар, В.Б.Любимов, Л.Сэрдамба, Р.Тогоо, Д.Тувдендорж. Средние характеристики вторичных частиц в кумулятивных  $\pi C$ -взаимодействиях при 40 ГэВ/с. Сообщения ОИЯИ, Р1-85-698, Дубна, 1985.
2. Д.Армутлииски, Н.Ахабабян, ..., Р.Тогоо и др. Свойства  $pC$ -взаимодействия при  $p_p = 10$  ГэВ/с с испусканием кумулятивных пионов и протонов. Препринт ОИЯИ, Р1-85-939, Дубна, 1985; Ядерная физика, т.44, вып.6, 1986, с.1495.
3. Д.К.Копылова, В.Б.Любимов, В.Ф.Никитина, Р.Тогоо, Д.Тувдендорж, У.Д.Шеркулов. Угловая зависимость параметров наклона инвариантных инклюзивных сечений образования кумулятивных адронов в  $pC$ -взаимодействиях при 10 ГэВ/с и  $\pi C$ -взаимодействиях при 40 ГэВ/с. Сообщения ОИЯИ, Р1-86-109, Дубна, 1986.
4. Д.Армутлииски, Е.Богданович, ..., Р.Тогоо и др. Исследование  $pC$ -взаимодействий при  $p_p = 10$  ГэВ/с с испусканием кумулятивных нейтральных пионов. Препринт ОИЯИ, Р1-86-459, Дубна, 1986; Ядерная физика, т.45, вып.6, 1987, с.1676.
5. Д.Армутлииски, Р.Н.Бекмирзаев, ..., Р.Тогоо и др. Образование  $\Lambda^0$ -гиперонов и  $K_S^0$ -мезонов в кумулятивных  $pC$ -взаимодействиях при 10 ГэВ/с. Препринт ОИЯИ, Р1-87-97, Дубна, 1987; Ядерная физика, т.47, вып.3, 1988, с.739.
6. Ц.Баатар, В.Б.Любимов, Р.Тогоо, Д.Тувдендорж. Анализ кумулятив-

ных адрон-ядерных взаимодействий при 4 - 40 ГэВ/с в зависимости от массы мишени. Препринт ОИЯИ, Р1-87-807, Дубна, 1987; Ядерная физика, т.48, вып.3(9), 1988, с.764.

7. Д.Армутлииски, В.Г.Гришин, ..., Р.Тогоо и др. Размеры области формирования кумулятивных пионов и протонов по данным для  $pC$ - и  $\pi C$ -взаимодействий при  $p_p = 10$  ГэВ/с и  $p_p = 40$  ГэВ/с. Сообщения ОИЯИ, Р1-87-924, Дубна, 1987.
8. Д.К.Копылова, В.Б.Любимов, В.Ф.Никитина, Р.Тогоо, У.Д.Шеркулов. Азимутальные корреляции кумулятивных адронов с вторичными частицами в  $pC$ -взаимодействиях при 10 ГэВ/с. Сообщения ОИЯИ, Р1-86-251, Дубна, 1986.
9. В.Б.Любимов, Р.Тогоо. Свойства 4-мерных барионных кластеров в кумулятивных ядро-ядерных столкновениях. Краткие сообщения ОИЯИ, 7(33), Дубна, 1988.
10. Ц.Баатар, В.Б.Любимов, Р.Тогоо, Д.Тувдендорж. Зависимость характеристик адрон-углеродных взаимодействий при 4-40 ГэВ/с с испусканием кумулятивных  $\pi$ -мезонов и протонов от массы мишени и их связь с формированием частиц с большими поперечными импульсами. Сообщения ОИЯИ, Р1-89-46, Дубна, 1989.
11. Ц.Баатар, Ц.Батсайхан, В.Б.Любимов, Р.Тогоо, Б.Хурелбаатар, Д.Тувдендорж. К вопросу о методике выделения взаимодействия на угледе при облучении пропановой камеры (р, d, He, C). Труды института физики и техники АН МНР, т.27, 1988, Улан-Батор, с.35.

Рукопись поступила в издательский отдел  
8 августа 1989 года.