

ОТНОШЕНИЕ ВЫХОДОВ КУМУЛЯТИВНЫХ ПИОНОВ РАЗНОГО ЗНАКА
В ПРОТОН-ЯДЕРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ПРИ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ ОТ 17,5 ДО 63 ГэВ

И.М.Беляев*, О.П.Гаврищук, Л.С.Солин, А.Г.Карев,
В.В.Лобанов, А.Ю.Суханов

Приведены результаты исследования отношения выходов кумулятивных пионов разного знака, выполненного на спектрометре кумулятивных адронов на ускорителе ИФВЭ /Протвино/. Отношение выходов π^- и π^+ мезонов в реакции $p + Mo \rightarrow \pi^\pm + X$ под углом 159° измерено в интервале энергий протонов от 17,5 до 63 ГэВ. Показано, что отношение выходов жестких пионов с импульсом выше 300 МэВ/с близко к единице в этом интервале энергий. В импульсной зависимости отношения наблюдается рост со средним значением параметра наклона $B = (0,183 \pm 0,031) (\text{ГэВ})^{-1}$ в интервале импульсов $300 \leq q_\pi \leq 900$ МэВ/с. Результаты данной работы сопоставляются с данными других экспериментов.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Ratio of Cumulative Pion Yields of Different Sign
in Proton-Nuclear Interactions
at 17.5 up to 63 GeV Proton Energy

I.M.Belyaev et al.

Results are presented of a study of the ratio of the yields of π^+ and π^- mesons at 159° angle in the $p + Mo^{96} \rightarrow \pi + X$ reaction for $17.5 \leq E_p \leq 63$ GeV proton energy. It is shown that the ratio of the yields of hard pions ($q_\pi \geq 300$ MeV/c) over this energy range is approximate to 1. The behaviour is discussed of the π^-/π^+ ratio for the interval of pion momenta $300 \leq q_\pi \leq 900$ MeV/c which corresponds to cumulativity number from 0.7 to 1.9. The results obtained are compared with the data of other experiments.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

* Институт теоретической и экспериментальной физики,
Москва.

В настоящее время накоплен обширный экспериментальный материал о процессах кумулятивного образования адронов на ядрах^{/1/}. С ростом энергии в системе снаряд-мишень в ряде характеристик кумулятивных процессов проявляется скейлинговое поведение, что говорит об определяющей роли в этой области определенного механизма образования кумулятивных частиц, связанного, как становится общепринятым считать, с проявлением кварковых степеней свободы в ядрах.

Необходимость учета кварковой структуры адронной материи в ядрах при изучении ядерных реакций в области высоких энергий была отмечена А.М.Балдиным в 1971 г.^{/2/}, когда им была высказана гипотеза о правомерности распространения принципа масштабной инвариантности глубококонепругих взаимодействий элементарных частиц на взаимодействия релятивистских ядер. Проявление локальных свойств адронной материи в ядрах и их следствие - масштабно-инвариантное поведение наблюдаемых в эксперименте характеристик глубококонепругих ядерных реакций следует ожидать при таких значениях кинематических переменных, когда превышен характерный масштаб, определяющий деконфайнмент кварков /т.е. когда кварки в ядре можно рассматривать как квазисвободные частицы/. В работах^{/3/} было показано, что в качестве количественного критерия выполнения этого режима целесообразно использовать условие

$$b_{ik} = - \left(\frac{p_i}{m_i} - \frac{p_k}{m_k} \right)^2 = 2 \left[\frac{p_i p_k}{m_i m_k} - 1 \right] \geq 5, \quad /1/$$

где p_i - четырехимпульсы и m_i - массы адронов в реакции $I + II \rightarrow 1 + 2 + \dots$ /2/

В случае взаимодействия релятивистского ядра I с покоящимся ядром II условие /1/ означает

$$\frac{p_I p_{II}}{m_I m_{II}} = \frac{E_I}{m_I} = \frac{E_I}{A_I m_0} \geq 3,5 \quad /3/$$

$/m_0 = 931$ МэВ - атомная единица массы, A_I - атомный номер ядра I/. Таким образом, энергия на нуклон $E_I / A_I = 3,5 \div 4$ ГэВ соответствует началу асимптотического режима - режима предельной фрагментации ядер*. Представленные

* Экспериментальные данные, подтверждающие наступление асимптотического режима, были получены в опытах по кумулятивному образованию мезонов протонами и дейтонами с импульсом 6 и 8,4 ГэВ/с, выполненных на синхрофазотроне ОИЯИ^{/4/}.

ниже экспериментальные данные соответствуют области значений b_{II} , где условие /3/ заведомо выполнено $b_{II} \approx 30 \div 130$.

При теоретическом анализе возможных механизмов образования кумулятивных частиц привлекалось большое число конкретных моделей. Многие из предложенных механизмов дают, по-видимому, реальный вклад в кумулятивный процесс, однако величина этого вклада может существенно меняться с изменением порядка кумулятивности, т.е. удалением от границы кинематического предела для взаимодействия квазисвободных нуклонов. Все известные теоретические модели не выдерживают полной количественной проверки экспериментом, в частности, такие популярные подходы, как рассмотрение ферми-движения и многократного рассеяния, не могут объяснить поведения жесткой части спектра кумулятивных адронов /анализ соответствия существующих моделей и эксперимента можно найти в обзорах^{/5/}/.

Интерпретация кумулятивного эффекта, т.е. образования частиц в режиме предельной фрагментации ядер за кинематическим пределом нуклон-нуклонных взаимодействий, на основе учета многокварковых состояний в ядрах развивается в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в течение более 10 лет^{/6/}. В рамках данного подхода образование кумулятивных мезонов с малым поперечным импульсом p_{\perp} и большим значением масштабной переменной X рассматривается как результат индивидуальных столкновений квазисвободных кварков снаряда и мишени. Инклюзивное сечение процесса /2/ фрагментации частицы /ядра/ II в мезон 1 полагается пропорциональным кварк-партонной структурной функции ядра

$$E_1 d\sigma/dp_{\perp}^2 = C_q^1 \sigma_q^1 G_{II/q}(X, p_{\perp}^2), \quad /4/$$

где E_1 и q_1 - энергия и импульс мезона, $G_{II/q}(X, p_{\perp}^2)$ - кварк-партонная структурная функция частицы /ядра/ II /импульсное распределение кварков в ядре II/, C_q^1 - константа, характеризующая адронизацию кварка q в мезон 1, σ_q^1 - вероятность отсутствия взаимодействия кварка q с адронным веществом частицы /ядра/ I.

Диаграмма описанного процесса для случая образования кумулятивного пиона изображена на рис.1. Механизм рождения $\pi^+(\pi^-)$ -мезонов сводится здесь к рекомбинации валентных $u(d)$ -кварков - спектаторов, входивших до акта взаимодействия в состав многокварковой системы /МКС/ в ядре II, с соответствующими антикварками моря. Последние имеют более мягкое, чем валентные кварки, импульсное распределение, так что импульсный спектр $u(d)$ -кварков-спектаторов при адронизации искажается незначительно /мягкая адронизация/. Из соотношения /4/ следует, что отношение инклюзивных сечений образования кумулятивных π^- и π^+ -мезонов

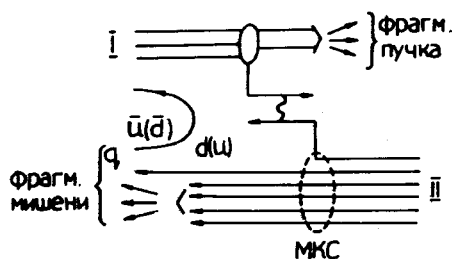


Рис. 1. Механизм образования кумулятивного пиона q как фрагмента мишени при жестком рассеянии кварка частицы I на МКС-кварке ядра-мишени II.

под углом, близким к 180° ,

$$\eta(X, p_{\perp}^2) = \frac{E_{-d} \sigma_{-d} dp_{-}}{E_{+d} \sigma_{+d} / dp_{+}} = \frac{C_{d\sigma_d}^1 G_{II/d}(X, p_{\perp}^2)}{C_{u\sigma_u}^1 G_{II/u}(X, p_{\perp}^2)} \approx \frac{C_{d\sigma_d}^1 G_{II/d}(X, 0)}{C_{u\sigma_u}^1 G_{II/u}(X, 0)} \cdot 1/5$$

Таким образом, отношение выходов кумулятивных пионов должно отражать кварковый состав МКС в ядре и X -зависимость отношения структурных функций u - и d -кварков, входящих в МКС.

Зависимость отношения η выходов пионов разного знака от энергии пучка протонов E_p в области нескольких ГэВ была изучена в работе^{/7/}. Отмечено, что отношение выходов жестких пионов $/q_{\pi} \geq 200$ МэВ/ под углом 180° при увеличении энергии протонов от 0,8 до 4 ГэВ возрастает от 0,25 до 1, что указывает, по мнению авторов, на возможную смену механизма образования жестких пионов в этом интервале энергий E_p . Относительно поведения отношения η в зависимости от импульса пионов q_{π} существующие экспериментальные данные не позволяют сделать четких выводов. На рис. 2 представлена зависимость $\eta(q_{\pi})$, полученная на основании данных по дифференциальным сечениям реакций $P+A \rightarrow \pi^{\pm}$ из работ^{/8,9/}, где изучен выход пионов под углами, близкими к 180° , в широком диапазоне значений q_{π} от 300 до 800-900 МэВ/с. В обоих случаях наблюдается существенное отклонение η от 1 при $X \geq 1$ $/q_{\pi} \geq 400 \div 500$ МэВ/с/. При $E_p = 400$ ГэВ величина η в реакции $p+Ta \rightarrow \pi^{\pm} / 160^\circ /$ монотонно убывает с увеличением q_{π} до значения $\sim 0,35$. В соответствии с описанной моделью образования кумулятивных пионов подобное поведение можно было рассматривать как проявление существенно различной X -зависимости структурных функций u - и d -МКС-кварков в тяжелых ядрах.

Исследование выхода пионов под углом 159° в реакции $p + Mo^{96} \rightarrow \pi + X$ было выполнено нами на спектрометре кумулятивных адронов /СКА/ с использованием внутренней мишени ускорителя У-70^{/10/}. Схема опыта показана на рис. 3. Наведение пучка на мишень осуществлялось при нарастающем поле ускорителя в интервале энергий E_p от 17,5 до 63 ГэВ, при этом набор информации производился одновременно в указанном диапазоне E_p . Импульсный анализ осуществлялся ана-

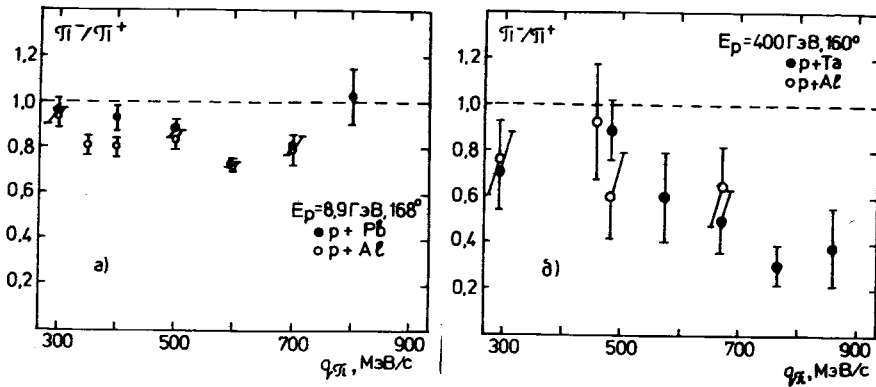


Рис. 2. Зависимость отношения выходов π^- и π^+ -мезонов от импульса по данным: а/ работы /9/ и б/ работы /8/.

Рис. 3. Схема эксперимента.

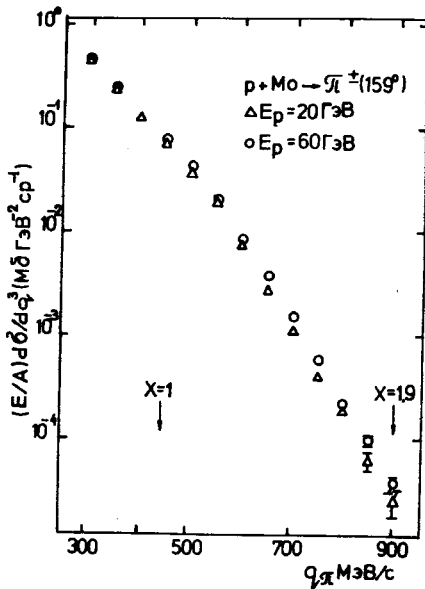
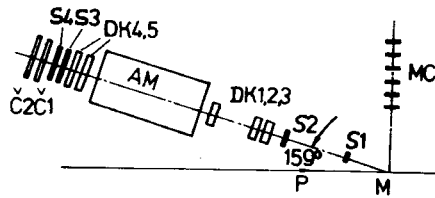


Рис. 4. Инвариантное сечение реакции $p + Mo^{98} \rightarrow \pi^\pm (159^\circ)$.

лизирующим магнитом /АМ/ с системой дрейфовых камер /ДК1÷5/. Время пролета /счетчики S1÷S4 / и величины амплитуд с черенковских счетчиков (C1, C2) использовались для идентификации частиц (π , K, p, d...). Изменение знака регистрируемых частиц осуществлялось реверсированием тока в анализирующем магните. В указанном выше диапазоне E_p было выделено пять интервалов со средним значением энергии протонов 20, 25, 30, 38

и 60 ГэВ. Полная проанализированная статистика /суммарно по трекам π^- и π^+ -мезонов/ составила 10^6 событий. В исследованном интервале импульсов $/300 \leq q_p \leq 900$ МэВ/с/ инвариантное сечение изменяется более чем на 4 порядка,

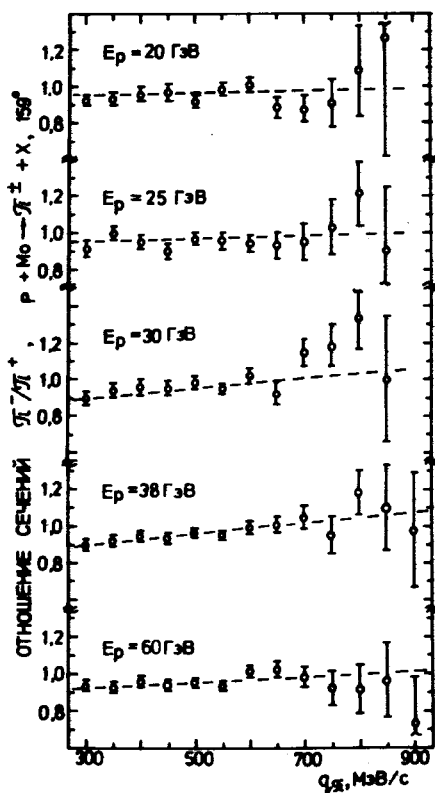
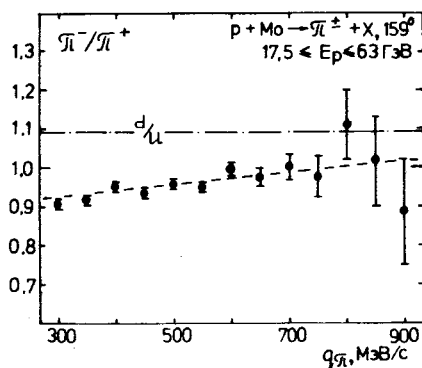


Рис. 5. Отношение (η) выходов π^- и π^+ -мезонов при пяти значениях энергии протонов. Штрихами показана аппроксимация $\eta = A + B \cdot q_\pi$.

Рис. 6. Отношение выходов π^- и π^+ -мезонов, усредненное по интервалу энергии протонов $E_p = 17,5 \div 63$ ГэВ. Штрихпунктиром отмечено отношение валентных d- и u-кварков в ядре молибдена.



а масштабная переменная $X^{/9/}$, характеризующая порядок кумулятивности, от 0,7 до 1,9 /рис. 4/.

Полученные значения величины отношения η выходов π^- и π^+ -мезонов в каждом из пяти энергетических интервалов и усредненные значения по всему проанализированному диапазону E_p показаны на рис. 5 и 6 соответственно. Результаты аппроксимации зависимости $\eta(q_\pi)$ представлены в таблице. Описание поведения величины η константой в интервале импульсов пионов $300 \leq q_\pi \leq 900$ МэВ/с выглядит неудовлетворительно по критерию χ^2 , линейная аппроксимация $\eta = A + B \cdot q_\pi$ дает значения χ^2 , близкие к единице, и показывает медленный монотонный рост η с увеличением q_π^* . Результаты по отношению интегральных выходов π^- и π^+ -мезонов при $q_\pi \geq 200/300/$ МэВ/с в исследованном нами ин-

* Быстрое уменьшение π^-/π^+ -отношения, отмеченное на тяжелом ядре в работе^{/8/}, не подтвердилось в нашем эксперименте.

тервале энергий протонов представлены на рис.7 совместно с данными Беркли^{/7/} и Дубны^{/11/} *.

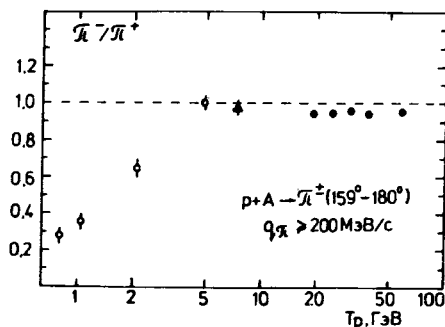
Таблица

Аппроксимация величины η : а/ константой,
б/ линейной зависимостью от q_π

| E_p ГэВ | а/ $\eta = A_0$ | | б/ $\eta = A + B(q_\pi - 0,3)$ | | |
|----------------|-------------------|----------|--------------------------------|------------------------|----------|
| | A_0 | χ^2 | A | $B(\text{ГэВ/с})^{-1}$ | χ^2 |
| 20 | 0,938 \pm 0,008 | 1,36 | 0,928 \pm 0,018 | 0,066 \pm 0,078 | 1,43 |
| 25 | 0,950 \pm 0,009 | 1,08 | 0,939 \pm 0,020 | 0,069 \pm 0,087 | 1,13 |
| 30 | 0,952 \pm 0,08 | 2,29 | 0,911 \pm 0,018 | 0,271 \pm 0,079 | 1,24 |
| 38 | 0,942 \pm 0,006 | 2,37 | 0,900 \pm 0,014 | 0,260 \pm 0,059 | 0,50 |
| 60 | 0,947 \pm 0,006 | 1,48 | 0,927 \pm 0,014 | 0,122 \pm 0,060 | 1,18 |
| 17,5 \div 63 | 0,946 \pm 0,004 | 4,48 | 0,918 \pm 0,007 | 0,183 \pm 0,031 | 1,21 |

Рис.7. Изменение величины отношения выходов жестких π^- и π^+ -мезонов под углами, близкими к 180° , с ростом энергии протонного пучка:

- - $p + \text{Cu} \rightarrow \pi^\pm(180^\circ)$ /7/
- ▲ - $p + \text{Cu} \rightarrow \pi^\pm(180^\circ)$ /11/
- - $p + \text{Mo} \rightarrow \pi^\pm(159^\circ)$ данный эксперимент.



Выводы

1. Отношение интегральных выходов кумулятивных пионов ($q_\pi \geq 450$ МэВ/с) в реакции $p + \text{Mo} \rightarrow \pi^\pm(159^\circ) + X$ в пределах ошибок постоянно и близко к единице в исследованном интервале энергий протонов $E_p = 17,5 \div 63$ ГэВ/.

* Отношение π^-/π^+ по данным работы /11/ получено как средневзвешенное значение отношений дифференциальных сечений при $q_\pi > 200$ МэВ/с.

2. Сопоставление результатов настоящей работы с данными экспериментов, выполненных при более низких энергиях протонов, позволяет заключить, что в протон-ядерных взаимодействиях отношение выходов жестких пионов, излучаемых в направлении назад ($\theta_{\pi} \approx 180^{\circ}$, $q_{\pi} \geq 200$ МэВ/с), выходит на постоянный уровень ($\eta \approx 1$) при энергии протонов $E_p \approx 4$ ГэВ/, соответствующей началу режима предельной фрагментации ядер согласно условию /1/.

3. В импульсной зависимости отношения выходов пионов $\eta(q_{\pi})$ наблюдается тенденция медленного роста с увеличением импульса пионов, что в рамках модели фрагментации кварков-спектаторов в пионы можно интерпретировать как проявление более жесткого импульсного распределения d -кварков относительно u -кварков в многокварковых конфигурациях ядер. В этой связи представляется интересным провести сравнение $\eta(q_{\pi})$ -поведения в $p + A$ -взаимодействиях в широком интервале значений A .

Авторы благодарны профессорам А.М.Балдину, И.В.Чувилу и В.С.Ставинскому за поддержку данной работы и полезные обсуждения, а также персоналу СЭО ОИЯИ и служб ускорителя ИФВЭ за обеспечение возможности проведения эксперимента в условиях кольцевого зала У-70.

Литература

1. Balдин А.М. In: Progress in Particle and Nuclear Physics, 1980, 4, p.95; Ставинский В.С. ЭЧАЯ, 1979, т.10, с.949; Лексин Г.А. В кн.: Труды XVIII Международной конференции по физике высоких энергий. Тбилиси, 1976. ОИЯИ, Д1,2-10400, Дубна, 1977, т.1, с.6.
2. Балдин А.М. Краткие сообщения по физике. ФИАН, М., 1971, т.1, с.35.
3. Балдин А.М. ДАН СССР, 1975, т.222, с.1064; Балдин А.М., Панебратцев Ю.А., Ставинский В.С. ОИЯИ, 1-84-185, Дубна, 1984; Балдин А.М., Диденко Л.А. В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, №3-4, Дубна, 1984, с.5.
4. Balдин А.М. et al. JINR, 1-8054, Dubna, 1974; Балдин А.М. и др. ОИЯИ, 1-8249, Дубна, 1974.
5. Ефремов А.В. ЭЧАЯ, 1982, т.13, с.613; Гаврилов В.Б., Лексин Г.А. X школа физики ИТЭФ. Энергоатомиздат, М., 1983, вып.1, с.46.

6. Baldin A.M. et al. Proc. Rochester Meeting. ASP/OPF, 1971, p.131; Baldin A.M. Proc. of the VI Int.Conf. on High Energy Phys. and Nucl.Struct. Santa Fe, 1975, p.621; Baldin A.M. Proc. in Particle and Nucl.Phys. (Ed. by D.Wilkinson). Pergamon Press, 1980, vol.4, p.95; Baldin A.M. Proc. CERN-JINR School of Physics. CERN, 82-04, Geneva, 1982, p.1; Baldin A.M. JINR, E2-83-415, Dubna, 1983.
7. Schroeder L.S. et al. Phys.Rev.Lett., 1979, vol.43, p.1787.
8. Nikiforov N.A. et al. Phys.Rev.C, 1980, vol.22, p.700.
9. Baldin A.M. et al. JINR, E1-82-472, Dubna, 1982.
10. Беляев И.М. и др. Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. ОИЯИ, Д2-82-568, Дубна, 1982, с.114.
11. Балдин А.М. и др. ЯФ, 1974, т.20, с.1201.

Рукопись поступила 23 апреля 1985 года.