

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Б 12

P1-87-807

Ц.Баатар*, В.Б.Любимов, Р.Тогоо, Д.Тувдендорж*

АНАЛИЗ КУМУЛЯТИВНЫХ
АДРОН-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
ПРИ 4–40 ГэВ/с В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ МАССЫ МИШЕНИ

Направлено в журнал "Ядерная физика"

*Институт физики и техники АН МНР,
Улан-Батор

1987

ВВЕДЕНИЕ

Использованный в работе^{/1/} метод анализа особенностей неупругих адрон-ядерных взаимодействий в зависимости от массы объекта, с которым взаимодействует налетающий адрон /массы мишени - M_t /, применен для исследования кумулятивных адрон-ядерных столкновений. Масса мишени в этом подходе M_t^{ch} определяется по вторичным заряженным частицам, и поэтому $M_t^{ch} \leq M_t$, так как нейтральные вторичные частицы обычно не учитываются. При достаточно высоких первичных энергиях из законов сохранения можно получить^{/2/} $M_t^{ch} = \sum (E - p_{||})_i / m_N$, где суммирование производится по всем вторичным заряженным частицам с энергией E и продольным импульсом в ЛСК $p_{||} / m_N$ - масса нуклона/. Определенную таким образом величину массы мишени можно, вообще говоря, связать с полной энергией в с.ц.и. адрон-ядерного взаимодействия^{/1/}. Это позволяет проводить широкое сравнение получаемых результатов с имеющимися экспериментальными данными при разных энергиях, а также с предсказаниями квантовой хромодинамики.

МЕТОДИКА

В работе был использован экспериментальный материал по pC - и π^-C -взаимодействиям, полученный в рамках сотрудничества по обработке снимков с 2-метровой пропановой камеры Лаборатории высоких энергий ОИЯИ из серии облучения камеры пучками протонов (с импульсами 4,2 и 10 ГэВ/с) на ускорителе ЛВЭ и пучком π^- -мезонов с импульсом $p_{\pi^-} = 40$ ГэВ/с на ускорителе ИФВЭ /Серпухов/. В основном статистика событий по pC - и π^-C -взаимодействиям получена в результате измерений и анализа всех взаимодействий первичных частиц в пропане. Часть материала по pC -столкновениям при $P_p = 10$ ГэВ/с получена в результате специального отбора событий, сопровождающихся испусканием по крайней мере одного π^\pm -мезона (с $P_p > 200$ МэВ) или протона (с $P_p > 380$ МэВ/с) в интервале углов в ЛСК с $\theta \geq 135^\circ$, а также γ -квантов с $E_\gamma > 100$ МэВ и углами испускания $\theta_\gamma > 90^\circ$. При анализе к кумулятивным относились события, имеющие заряженный или нейтральный π -мезон с $\beta^\circ > \beta_{гр}^\circ (\pi)$ или протон с $\beta^\circ >$

$> \beta_{гр}^{\circ}(p)$. Здесь $\beta^{\circ} = (E - P_{||})/m_N$ - кумулятивное число рассматриваемого адрона. Используемые для отбора кумулятивных взаимодействий значения величин $\beta_{гр}^{\circ}$ вместе со статистикой событий приведены в табл. 1. Другие подробности методики отбора событий описаны в [3,4].

Таблица 1

Статистика событий					
Тип взаимодействия	Первичный импульс P_0 (ГэВ/с)	Полное число событий	$\beta_{гр}^{\circ}$		Число событий с $\beta^{\circ} \geq \beta_{гр}^{\circ}$
			протон	π -мезон	
pC	4,2	4693	1,1	0,4	337
	10	6264	1,2	0,6	2495
π^- C	40	8791	1,2	0,6	2165

В работе получены распределения событий по величине M_t^{ch} , исследованы зависимости от M_t^{ch} множественных характеристик взаимодействий, распределений по быстротам, поперечным импульсам. Отметим, что среди вторичных частиц отрицательные считались π^- -мезонами, среди положительных производилась визуальная /по ионизации/ идентификация протонов и π^+ -мезонов до импульса $p = 0,8$ ГэВ/с. Остальные положительные частицы не идентифицировались. Среди последних, по нашим оценкам, $\approx 90\%$ составляют протоны. Поэтому в случаях, когда необходимо было знать их природу /при вычислении M_t^{ch} , продольных быстрот и т.д./, они считались протонами. Из рассмотрения исключались медленные /в основном испарительные/ протоны с импульсом $P_p < 0,25$ ГэВ/с.

Все результаты, полученные для кумулятивных взаимодействий, сравниваются с данными для "обычных" столкновений, то есть взаимодействий, не сопровождающихся испусканием кумулятивных адронов. Для pC-взаимодействий при $P_p = 4,2$ и $P_p = 10$ ГэВ/с проведены сравнения с результатами расчета по каскадной модели [5]. Отдельно исследованы особенности кумулятивных адронов в зависимости от массы мишени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ ВСЕХ ВТОРИЧНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

На рис. 1 показано распределение нормированного числа кумулятивных и "обычных" событий по величине M_t^{ch} . Видно, что распределения для кумулятивных взаимодействий приблизительно оди-

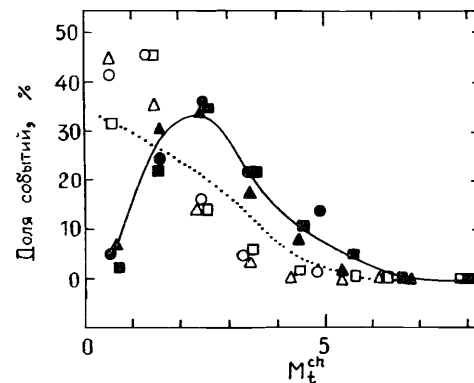


Рис. 1. M_t^{ch} -зависимость нормированного числа кумулятивных /черные символы/ и "обычных" /светлые/ pC- и π^- C-взаимодействий ($\circ \bullet$ - pC при $P_p = 4,2$ ГэВ/с, $\square \blacksquare$ - pC при $P_p = 10$ ГэВ/с, $\Delta \blacktriangle$ - π^- C при $P_{\pi^-} = 40$ ГэВ/с). Пунктирная кривая - расчет по каскадной модели, сплошная кривая проведена от руки по точкам, соответствующим кумулятивным столкновениям.

наковы для всех групп рассмотренных событий (pC-взаимодействий при 4,2 и 10 ГэВ/с и π^- C-взаимодействий при 40 ГэВ/с). Они описываются одной кривой /на рисунке она проведена от руки/ и отличаются от M_t^{ch} -распределений "обычных" pC- и π^- C-столкновений по крайней мере до значений $M_t^{ch} = 5$. Общую тенденцию распределений для "обычных" событий отражает кривая, полученная в рамках каскадной модели /показана на рис. 1 пунктиром/. Средние значения величин M_t^{ch} для кумулятивных и "обычных" столкновений приведены в табл. 2. Видно, что значения $\langle M_t^{ch} \rangle$, которые определяют среднее минимальное число нуклонов ядра мишени, участвующих в столкновении, практически не зависят от первичной энергии и для кумулятивных взаимодействий эти числа приблизительно в 2 раза больше числа нуклонов мишени, участвующих в "обычных" столкновениях во всем диапазоне использованных энергий.

Таблица 2

Средние значения M_t^{ch}				
Тип взаимодействия	Первичный импульс P_0 (ГэВ/с)	$\langle M_t^{ch} \rangle_{cum}$ /с кумулятивными адронами/	$\langle M_t^{ch} \rangle_{ord}$ /без кумулятивных адронов/	$\frac{\langle M_t^{ch} \rangle_{cum}}{\langle M_t^{ch} \rangle_{ord}}$
pC	4,2	$2,69 \pm 0,06$	$1,27 \pm 0,02$	$2,12 \pm 0,06$
	10	$2,80 \pm 0,16$	$1,47 \pm 0,02$	$1,90 \pm 0,11$
π^- C	40	$2,49 \pm 0,02$	$1,25 \pm 0,01$	$1,99 \pm 0,02$

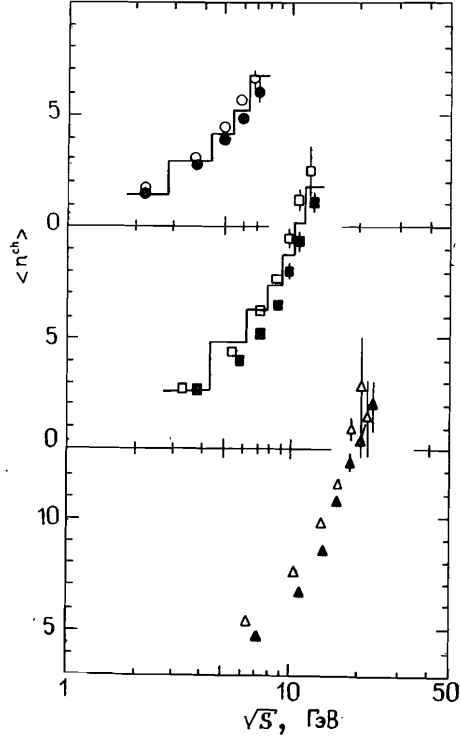


Рис. 2. S-зависимости средних множественностей вторичных заряженных частиц /обозначения точек те же, что и на рис. 1/. Гистограмма - результат расчета по каскадной модели.

Рассмотрены зависимости средней множественности вторичных заряженных частиц от переменной \sqrt{S} . Вместе с результатами расчетов по каскадной модели они приведены на рис. 2. Здесь $S = M_{i\text{ch}}^2 S_{hN}$ - квадрат полной энергии в с.ц.и. адрон-ядерного взаимодействия $^{1/}$ / S_{hN} - квадрат полной энергии в с.ц.и. адрон-нуклонного взаимодействия/.

Экспериментальные S-зависимости средней множественности вторичных частиц аппроксимировались выражениями вида

$$\langle n_{ch} \rangle = a + b \ln S, \quad /1/$$

$$\langle n_{ch} \rangle = a + b \ln S + c (\ln S)^2, \quad /2/$$

$$\langle n_{ch} \rangle = a S^b, \quad /3/$$

$$\langle n_{ch} \rangle = a + b \exp(c \sqrt{\ln S / Q_0^2}), \quad /4/$$

где a, b, c - свободные параметры /параметр Q_0 равен 1,0 ГэВ/. Кривые взяты из работы $^{6/}$. Выяснилось, что наилучшим образом S-зависимости средней множественности аппроксимируются выражением /2/ /гипотеза фейнмановского скейлинга $^{7/}$ / и /4/ /предсказания квантовой хромодинамики $^{8/}$ /. Результаты для параметров a, b, c этой аппроксимации приведены в табл. 3. Видно, что аппроксимация не дает существенной разницы между кумулятивными и "обычными" столкновениями. В удовлетворительном согласии с данными при 4,2 и 10 ГэВ/с находятся результаты расчета по каскадной модели.

Не наблюдается существенных различий между этими группами взаимодействий по быстрым распределениям вторичных заряжен-

Таблица 3

Результат аппроксимации S-зависимости $\langle n_{ch} \rangle^*$

Тип взаимодействия	P_0 (ГэВ/с)	Тип формул	Класс взаимодействия	a	b	c	$\chi^2 / \text{ст.своб}$
pC	4,2	2	Обычн.	4,4±0,4 (3,5)	-3,1±0,3 (-2,5)	1,0±0,1 (0,9)	0,6/3
			Кумул.	4,6±1,2	-3,1±0,8	0,9±0,2	1,4/3
	10	4	Обычн.	1,6±0,1 (1,2)	(2,1±0,9)10 ⁻⁸ (6,0·10 ⁻⁸)	4,0±0,2 (3,5)	2,8/3
			Кумул.	1,6±0,3	(1,5±0,3)10 ⁻⁸	4,1±0,7	0,9/3
πC	4,2	2	Обычн.	11,0±1,0 (6,4)	-6,8±0,6 (-3,6)	1,4±0,1 (0,9)	2,6/5
			Кумул.	11,6±2,0	-7,1±0,1	1,4±0,2	7,6/5
	10	4	Обычн.	2,4±0,1 (1,9)	(0,6±0,3)10 ⁻⁸ (0,8·10 ⁻⁸)	4,4±0,2 (3,3)	3,7/5
			Кумул.	2,2±0,4	(0,3±0,3)10 ⁻⁸	4,7±0,5	7,0/5
πC	40	2	Обычн.	24,6±2,4	-10,6±1,1	1,5±0,1	6,5/4
			Кумул.	27,6±3,2	-12,1±1,4	1,6±0,1	2,9/4
πC	40	4	Обычн.	4,8±0,2	(2,5±1,7)10 ⁻⁴	4,4±0,3	10,3/4
			Кумул.	4,4±0,4	(1,2±12,0)10 ⁻⁴	4,6±0,4	3,7/4

*Цифры в скобках - расчеты по каскадной модели.

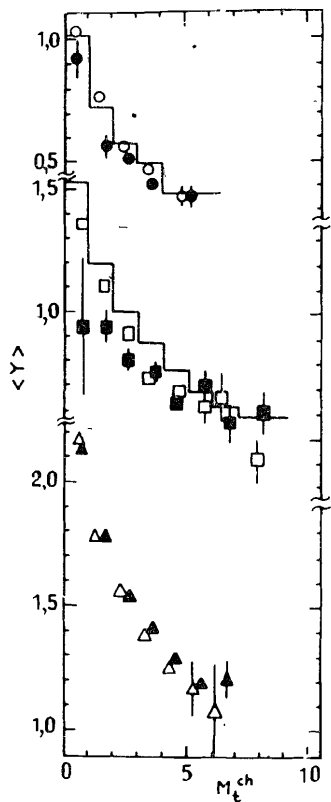


Рис. 3. M_t^{ch} -зависимости средних продольных быстрот вторичных заряженных частиц /обозначения те же, что и на рис. 2/.

ных частиц. Зависимости средних быстрот $\langle u \rangle$ в ЛСК от массы мишени M_t^{ch} вместе с результатами расчета по каскадной модели приведены на рис. 3.

Намечаются отличия кумулятивных событий от "обычных" по зависимости средних квадратов поперечных импульсов вторичных частиц /они приведены на рис. 4/. Для кумулятивных столкновений $\langle P_{\perp}^2 \rangle$ растут с увеличением \sqrt{S} . Этот рост удовлетворительно описывается формулой /9/ :

$$\langle P_{\perp}^2 \rangle = A + BS / \ln(S/\Lambda^2), \quad /5/$$

где Λ - квантово-хромодинамический параметр обрезания, который был взят равным 0,2 ГэВ, А и В - свободные параметры. Результаты для параметров А и В, полученные при аппроксимации экспериментальных S-зависимостей $\langle P_{\perp}^2 \rangle$ выражением /5/, приведены в табл.4.

Для "обычных" столкновений S-зависимости $\langle P_{\perp}^2 \rangle$ качественно согласуются с расчетами по каскадной модели.

Таблица 4
Результаты аппроксимации S-зависимостей $\langle P_{\perp}^2 \rangle$

Тип взаимодействия	P_0 (ГэВ/с)	A	B	χ^2 /ст. своб.
pC	4,2	0,140 + 0,021	0,0265 + 0,0067	6/3
	10	0,119 + 0,014	0,0155 + 0,0022	14/5
π^- C	40	0,210 + 0,020	0,0025 + 0,0008	10/5

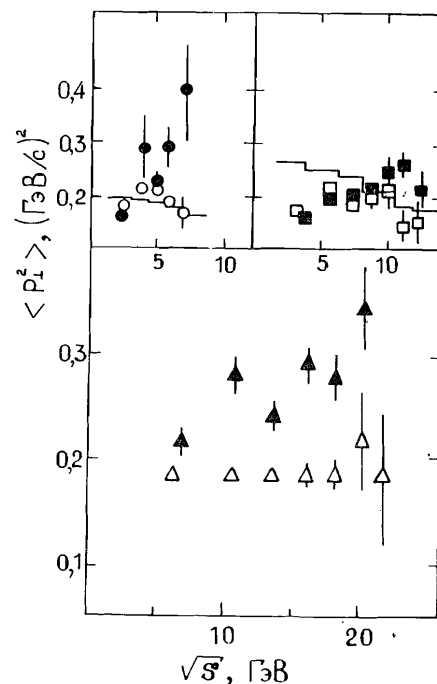


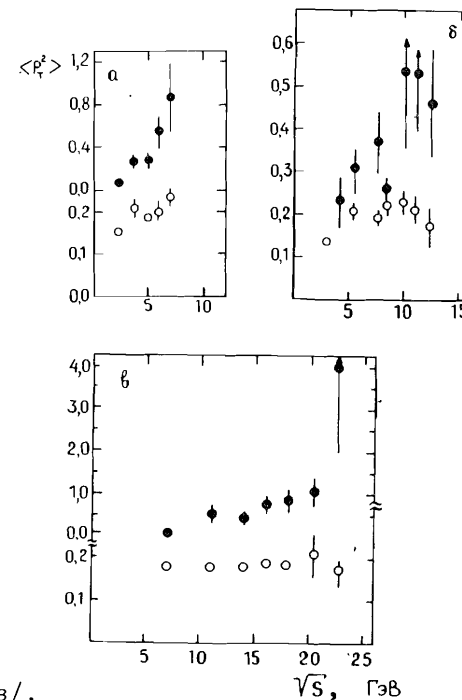
Рис. 5. S-зависимость средних квадратов поперечных импульсов кумулятивных адронов /черные кружки/ и всех остальных заряженных вторичных частиц /светлые/ в кумулятивных pC- и π^- C-столкновениях при $P_p=4,2$ ГэВ/с /а/, $P_p=10$ ГэВ/с /б/, $P_p=40$ ГэВ/с /в/.

Отметим, что наблюдаемый рост значений $\langle P_{\perp}^2 \rangle$ в кумулятивных событиях связан, в основном, с кумулятивными адронами в этих столкновениях. Это видно из рис. 5, где приведены S-зависимости $\langle P_{\perp}^2 \rangle$ отдельно для кумулятивных и всех остальных частиц в кумулятивных взаимодействиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ КУМУЛЯТИВНЫХ АДРОНОВ

На рис. 6 приведена зависимость средних множественностей кумулятивных адронов от массы мишени M_t^{ch} . Характерно для этих распределений наличие одинакового для всех групп, рассмотрен-

Рис. 4. S-зависимости средних квадратов поперечных импульсов вторичных заряженных частиц /обозначения те же, что и на рис. 2/.



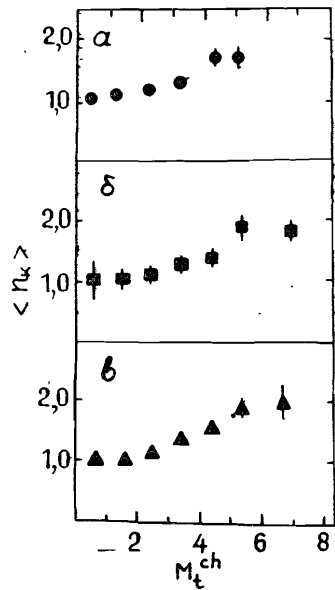


Рис. 6. M_t^{ch} -зависимости средних множественностей кумулятивных адронов в кумулятивных pC- и π^- C-взаимодействиях при $P_p = 4,2$ ГэВ/с /а/, $P_p = 10$ ГэВ/с /б/ и $P_{\pi^-} = 40$ ГэВ/с /в/.

ных взаимодействий "порогового" эффекта в районе $M_t^{ch} = 3 \div 4$. С этих значений M_t^{ch} начинается рост множественностей кумулятивных адронов.

Исследованы инклюзивные спектры кумулятивных адронов для групп событий с разными значениями M_t^{ch} . Эти спектры, построенные в зависимости от кумулятивного числа β° , имеют приблизительно экспоненциальный вид и поэтому были аппроксимированы выражениями вида

$$E d^3\sigma / dp^3 \sim \exp(-\beta^\circ / \langle \beta^\circ \rangle). \quad /6/$$

Полученные результаты для $\langle \beta^\circ \rangle$ показаны на рис. 7 отдельно для протонов и π^- -мезонов. Видно, что значения $\langle \beta^\circ \rangle$ для кумулятивных пионов практически не зависят от M_t^{ch} , для кумулятивных протонов заметна тенденция к росту $\langle \beta^\circ \rangle$ с увеличением массы мишени по крайней мере для энергий больших 4,2 ГэВ.

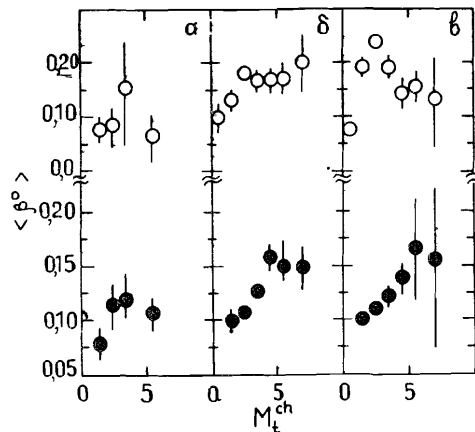


Рис. 7. M_t^{ch} -зависимости показателя наклона структурной функции для кумулятивных пионов /светлые кружки/ и кумулятивных протонов /черные кружки/ в pC- и π^- C-взаимодействиях при $P_p = 4,2$ ГэВ/с /а/, $P_p = 10$ ГэВ/с /б/ и $P_{\pi^-} = 40$ ГэВ/с /в/.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ особенностей кумулятивных pC- и π^- C-взаимодействий (при $P_p = 4,2$, $P_p = 10$ ГэВ/с и $P_{\pi^-} = 40$ ГэВ/с) в зависимости от минимального значения массы объекта, с которым взаимодействует налетающий адрон (M_t^{ch}). Он показал:

1/ универсальный характер распределений числа кумулятивных событий по величине M_t^{ch} для всех рассмотренных групп взаимодействий и, следовательно, независимость от первичной энергии среднего минимального числа нуклонов мишени, участвующих в кумулятивном взаимодействии. Оно оказалось в 2 раза больше числа взаимодействующих нуклонов мишени в "обычных" столкновениях;

2/ отсутствие существенных различий M_t^{ch} -зависимостей средних множественностей и продольных быстрот вторичных заряженных частиц для кумулятивных и "обычных" столкновений;

3/ наблюдаемое отличие M_t^{ch} -распределений значений $\langle P_1^2 \rangle$ вторичных заряженных частиц для кумулятивных и "обычных" событий связано, в основном, с кумулятивными адронами;

4/ расчеты по каскадной модели, выполненные для первичных энергий 4 и 10 ГэВ, удовлетворительно согласуются с результатами для "обычных" столкновений.

Из результатов, относящихся к особенностям самих кумулятивных адронов, следует отметить:

1/ наличие одинакового для всех рассмотренных энергий "порогового" эффекта в M_t^{ch} -распределениях средней множественности кумулятивных адронов;

2/ независимость показателя наклона инклюзивных спектров кумулятивных пионов от массы объекта, с которым взаимодействует налетающий адрон. Причем это имеет место во всем диапазоне рассмотренных энергий.

Авторы благодарны коллективу сотрудничества по обработке снимков с 2-метровой пропановой камеры за помощь в работе и обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баатар Ц. и др. Препринт ОИЯИ, P1-86-721, Дубна, 1986; ЯФ, 1987, т.46, с.1464.
2. Биргер Н.Г., Смородин Ю.А. - ЖЭТФ, 1959, т.36, с.1159; т.37, с.1355.
3. Агакишиев Г.Н. и др. - ЯФ, 1986, т.44, с.1495; ЯФ, 1987, т.45, с.1676.
4. Абдурахимов А.У. и др. Препринт ОИЯИ, 1-6967, Дубна, 1973.

5. Гудима К.К., Тонеев В.Д. - ЯФ, 1978, т.27, с.669.
6. Bartel W. et al. - Z.Phys., Ser.C, 1983, v.20, p.187.
7. Feynman R.P. - Phys.Rev.Lett., 1969, v.23, p.1415.
8. Konishi K. Rutherford Lab., 1979, RL 79-035;
Furmanski W. et al. - Nucl.Phys., 1979, v.B155, p.253;
Bassaeto A. et al. - Nucl.Phys., 1980, v.B163, p.477.
9. Webber B.R. - Physica Scripta, 1982, v.25, p.198.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 ноября 1987 года.

Баатар Ц. и др.

P1-87-807

Анализ кумулятивных адрон-ядерных взаимодействий
при 4-40 ГэВ/с в зависимости от массы мишени

При помощи 2-метровой пропановой камеры проанализированы особенности кумулятивных pC - и πC -взаимодействий при $P_p=4,2$, $P_p=10$ ГэВ/с и $P_{\pi^-}=40$ ГэВ/с в зависимости от минимального значения массы объекта, с которым взаимодействует налетающий адрон. Изучены множественные характеристики кумулятивных столкновений, распределения по быстротам и поперечным импульсам вторичных частиц в них, инклюзивные спектры кумулятивных адронов. Обнаружен, в частности, универсальный характер распределений числа кумулятивных взаимодействий, распределений по множественности кумулятивных адронов.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Baatar Ts. et al.

P1-87-807

Analysis of Hadron-Nuclear Interactions at
4-40 GeV/c as a Function of Target Mass

Special properties of cumulative pC and πC interactions at $P_p=4.2$, $P_p=10$ GeV/c and $P_{\pi^-}=40$ GeV/c are analysed by means of 2m propane chamber as a function of minimum value of a mass of object with which an incident hadron interacts. Multiple characteristics of cumulative collisions, distributions over velocities and transverse momenta of secondaries in them, as well as inclusive spectra of cumulative hadrons are studied. Universal character of distributions of cumulative interactions, cumulative hadron multiplicity distributions has been discovered.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987