

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



A-646

2893/2-78

P1 - 11401

Н.С.Ангелов, С.Бацкович, В.Г.Гришин,
Т.Канарек, Ю.Надь, Ю.М.Шабельский

МНОГОНУКЛОННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
 π^- -МЕЗОНОВ С ЯДРАМИ УГЛЕРОДА
ПРИ $p = 40$ ГэВ/с

1978

P1 - 11401

Н.С.Ангелов, С.Бацкович,¹ В.Г.Гришин,
Т.Канарек, Ю.Надь, Ю.М.Шабельский²

МНОГОНУКЛОННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
 π^- -МЕЗОНОВ С ЯДРАМИ УГЛЕРОДА
ПРИ $p = 40$ ГэВ/с

Направлено в ЯФ

¹ Институт физики, Белград.

² Ленинградский институт ядерной физики
им. Б.П.Константинова.

Ангелов Н.С. и др.

P1 - 11401

Многонуکلонные взаимодействия π^- -мезонов с ядрами углерода при $p = 40$ ГэВ/с

Экспериментальные данные по множественности вторичных частиц, образовавшихся во взаимодействиях π^- -мезонов с несколькими нуклонами ядра углерода при $p = 40$ ГэВ/с (многонуکلонные взаимодействия), сравниваются с расчетами по модели многократного рассеяния.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Angelov N.S. et al.

P1 - 11401

Multinucleon Interactions of π^- -Mesons with Carbon Nuclei at $p = 40$ GeV/c

The secondary charged particle multiplicities produced in the π^- interactions with several nucleons of the carbon nucleus at 40 GeV/c are considered. The obtained experimental data are compared with the multiple scattering model predictions.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

§1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе неупругих столкновений частиц высоких энергий с атомными ядрами особый интерес представляют события, когда во взаимодействиях принимают участие не один, а несколько нуклонов ядра /многонуکلонные взаимодействия/. Изучение именно таких столкновений позволяет получить сведения о механизме множественного рождения на ядрах, который тесно связан с пространственно-временной структурой сильных взаимодействий.

Экспериментальное изучение многонуکلонных взаимодействий π^- -мезонов с $p = 40$ ГэВ/с с нуклонами ядра углерода проводилось в работе /1/. Была найдена их доля и распределение событий по множественности вторичных заряженных частиц. Там же был предложен метод выделения таких неупругих взаимодействий, в которых участвует m - нуклонов / $m \geq 2, 3, 4, 5$ / по величине электрического заряда Q , переносимого от нуклонов ядра в систему вторичных частиц. В результате были получены вероятности таких столкновений и множественности вторичных частиц при $m \geq 2, 3, 4, 5$ /1/.

В настоящей работе приводятся экспериментальные данные по π^- (mN)-взаимодействиям при $p = 40$ ГэВ/с, полученные тем же способом, что и в /1/, но на большей статистике /§2/. Результаты сравниваются с теоретическими расчетами по модели многократного рассеяния /§§3,4/ /2,3/.

§2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ОБЩИЕ КРИТЕРИИ ВЫДЕЛЕНИЯ МНОГОНУКЛОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Экспериментальные данные получены с помощью 2-метровой пропановой камеры, облученной π^- -мезонами с $p = 40 \text{ ГэВ/с}$ на серпуховском ускорителе. Статистика составляет $\approx 4000 \pi^-^{12}\text{C}$ -взаимодействий. Среди них 51% событий относится к квазинуклонным, т.е. к таким событиям, в которых присутствие ядра визуально в камере не проявляется ^{/1/}*. Еще 9% всех событий не отличаются значениями суммы электрических зарядов и средней множественности $\langle n_{\pm} \rangle$ вторичных частиц от π^-p - и π^-n -взаимодействий, однако сопровождаются вылетом дополнительных медленных протонов $p \lesssim 200 \text{ МэВ/с}$. Такие события также относятся к одонуклонным π^-N . Появление же дополнительных протонов мы связываем с процессом испарения возбужденного ядра углерода ^{/1/}. В событиях, где имеются дополнительные протоны с импульсами от 200 до 300 МэВ/с, множественность вторичных заряженных частиц больше, чем в пион-нуклонных взаимодействиях /доля таких событий составляет 7,0%/^{/1/}. По-видимому, в этом случае имеется уже значительная примесь неупругих взаимодействий с несколькими нуклонами ядра углерода. В результате доля многонуклонных $\pi^-(mN)$ -взаимодействий определена равной $40,1 \pm 1,5\%$ ^{/1/}**.

§3. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОНУКЛОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И СРАВНЕНИЕ ИХ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Вычисление доли многонуклонных взаимодействий и множественности вторичных частиц в таких взаимодей-

*В камере регистрируются протоны с $p \geq 140 \text{ МэВ/с}$.

**Неопределенность этой величины из-за выбранных критериев отбора составляет $\pm 3,5\%$.

ствиях проводилось в рамках модели многократного рассеяния, описанной в ^{/2,3/}, с учетом использованных критериев отбора событий.

В основе модели лежит связь между амплитудой упругого адрон-ядерного рассеяния и сечениями всевозможных неупругих процессов. Как показано в ^{/2/}, сечения неупругого или упругого взаимодействия с различным числом нуклонов ядра выражаются через глауберовские вклады в полное адрон-ядерное сечение. При этом считается, что родившиеся частицы с ядром не взаимодействуют. Расчеты, выполненные в рамках такой модели в ^{/2,3/}, привели к хорошему описанию средней множественности заряженных частиц и распределений по множественности в широком диапазоне энергий. Полученное согласие с опытом соответствует представлениям партонной модели ^{/4-6/} об отсутствии перерассеяний быстрых вторичных частиц /с энергией выше нескольких ГэВ/. Возможные перерассеяния более медленных частиц не оказывают заметного влияния на множественность рождающихся адронов.

Однако найденное экспериментально значение доли многонуклонных взаимодействий налагает более жесткие ограничения на возможность каскадных перерассеяний. Действительно, при движении частиц с энергией $2 \div 3 \text{ ГэВ}$ через ядерное вещество следовало бы ожидать значительного количества дополнительно выбитых нуклонов ^{/7/}. В результате появился бы класс событий, являющихся одонуклонными /или близких к ним/ с точки зрения процессов множественного рождения / $\langle n_{\pm} \rangle$, распределения по n_{\pm} и т.д./, но сопровождающихся вылетом дополнительных протонов с импульсами в несколько сотен МэВ/с. Напомним, что в соответствии с описанной экспериментальной методикой такие события считались бы многонуклонными.

Если пренебречь возможным вкладом каскадного механизма, то при высокой энергии возможны три типа процессов, являющихся, с точки зрения применяющейся методики, многонуклонными. Два из них обсуждались в ^{/2,3/}: это неупругие взаимодействия с двумя и большим числом нуклонов /расчетная доля их для $\pi^-^{12}\text{C}$ -взаимодействий составляет 30% от ре-

гистрируемого числа событий/, а также неупругое взаимодействие с одним нуклоном плюс упругое рассеяние на ядерном протоне. В $70 \div 80\%$ последних случаев протон отдачи будет иметь импульс, превышающий 200 МэВ/с . В результате доля процессов второго типа оказывается несколько больше 3% , а на долю $\pi^- \text{ N}$ - взаимодействий остается 67% общего числа событий.

Третья возможность заключается в имитации $\pi^- \text{ (mN)}$ взаимодействия таким событием, когда наряду с неупругим рассеянием на одном нуклоне из ядра вылетает /за счет ферми-движения/ не участвовавший во взаимодействии протон с импульсом $p \geq 200 \text{ МэВ/с}$. При импульсе выше 700 МэВ/с такой протон будет неотличим в камере от π^+ -мезона, что приведет к появлению дополнительной вторичной частицы.

Для оценки вероятности вылета протона из ядра мы использовали формализм, развиваемый Стрикманом и Франкфуртом /8/. Возникновение быстрых протонов объясняется в /8/ наличием в ядре конфигураций, когда два или большее число нуклонов оказываются на очень близких расстояниях. Этот подход позволяет связать между собой импульсные распределения протонов, вылетающих в переднюю и заднюю полусферы в лаб. системе, причем в передней полусфере предсказывается значительно большая множественность, чем в задней.

На рис.1 /а,б/ показаны рассчитанные нами с учетом только двухнуклонных корреляций импульсные спектры протонов, вылетающих соответственно в заднюю и переднюю полусферы в лаб. системе. Единый для обоих случаев нормировочный множитель получен путем нормировки интеграла от спектра рис.1а на наблюдаемую /9/ множественность протонов с $p \geq 300 \text{ МэВ/с}$ в задней полусфере, которая равна $0,1$ по отношению ко всем $\pi^- \text{ }^{12}\text{C}$ - взаимодействиям. Как видно из рис.1б, множественность протонов с $p \geq 700 \text{ МэВ/с}$ составляет около $0,08$. В действительности эта величина должна быть несколько больше, так как при больших импульсах скажется не учтенный нами вклад трехчастичных корреляций. В дальнейших расчетах множественность вылетающих из ядра протонов с $p \geq 700 \text{ МэВ/с}$ принималась

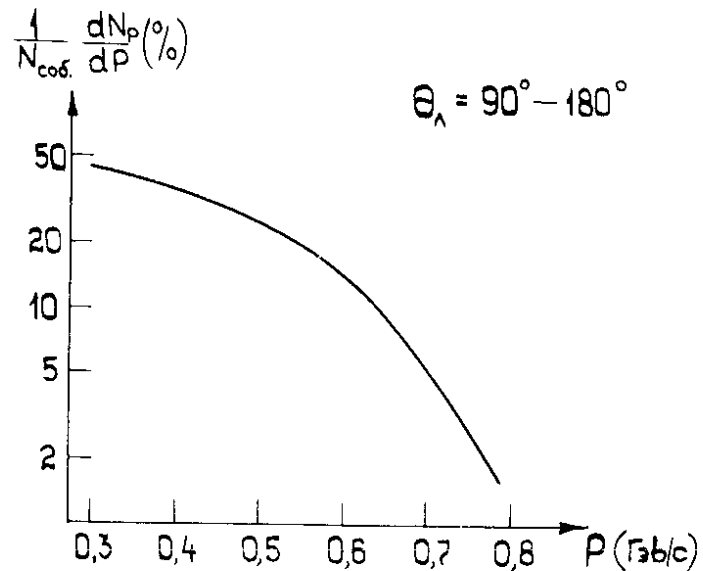


Рис. 1а. Импульсный спектр протонов, вылетающих в заднюю полусферу в лабораторной системе координат.

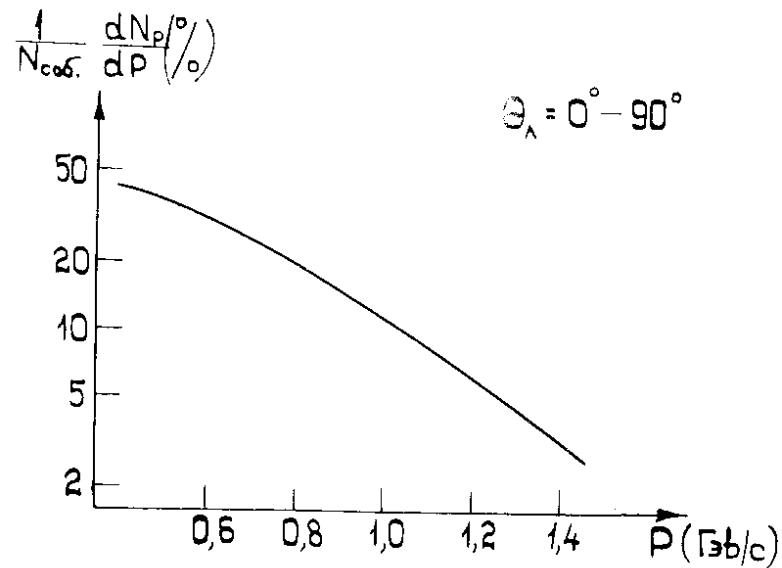


Рис.1б. Импульсный спектр протонов, вылетающих в переднюю полусферу в лабораторной системе координат.

равной 0,1. Всего же множественность протонов с $p \geq 200 \text{ МэВ/с}$ оказывается $\geq 0,3$.

По-видимому, распределение событий, содержащих дополнительные протоны, между π^-N и $\pi^-(mN)$ - взаимодействиями неравномерное, так что большая часть таких протонов сопровождает многонуклонные взаимодействия. Однако получить точное значение доли однонуклонных событий, имитирующих многонуклонные, без специального исследования невозможно. Поэтому мы приведем два варианта расчетов. В первом /вариант 1/ вклад дополнительно вылетающих протонов не учитывался вообще. Во втором /вариант 2/ считалось, что этот вклад переводит 10% π^-N -событий в разряд многонуклонных, что соответствует нормировке на экспериментально наблюдаемую долю $\pi^-(mN)$ -взаимодействий, равную 40%. При этом во втором варианте считалось также, что в каждом событии с вероятностью 0,1 имеется одна дополнительная положительно заряженная вторичная частица /т.е. протон с $p \geq 700 \text{ МэВ/с}$ / и с вероятностью 0,01 - две такие частицы. Сравнение двух вариантов расчета с экспериментальными данными по характеристикам многонуклонных $\pi^-(mN)$ взаимодействий приводится в таблице 1*.

Результаты двух вариантов расчета различаются незначительно. Столь же мало различаются и формы распределений по множественности в π^-^{12C} и $\pi^-(mN)$ - взаимодействиях. Эти распределения приведены для варианта 2 вместе с экспериментальными результатами на рис.2. Как видно из табл.1 и рис.2, результаты обоих вариантов расчета хорошо согласуются с наблюдаемыми характеристиками многонуклонных взаимодействий. Из сравнения первого варианта расчета с опытом следует, что максимальное значение вклада каскадных процессов, переводящих однонуклонные взаимодействия в многонуклонные, не превышает 10%.

*При вычислении $\langle n_{\pm} \rangle$ и D_{\pm} в отличие от расчета в /3/, учитывалось, что в 18% π^-p и в 9% π^-n -взаимодействий имеется идентифицируемый протон /1/, который не включался в число n_{\pm} .

Таблица 1

	π^-^{12C} *		$\pi^-(mN)$			
	Эксперимент	Вариант (1)	Вариант (2)	Эксперимент	Вариант (1)	Вариант (2)
$\langle n_{+} \rangle$	$6,32 \pm 0,05$	6,13	6,25	$7,88 \pm 0,08$	7,97	7,81
$\langle n_{-} \rangle$	$3,24 \pm 0,03$	3,28	3,28	$3,69 \pm 0,04$	4,03	3,84
D_{\pm}	$3,42 \pm 0,03$	3,38	3,40	$3,71 \pm 0,06$	3,68	3,61
Доля $\pi^-(mN)$ -взаимодействий				$0,40 \pm 0,02$	0,53	0,40

х) В значениях $\langle n_{\pm} \rangle$, $\langle n_{-} \rangle$ и D_{\pm} приведены поправки на неизмеримые треки вторичных частиц.

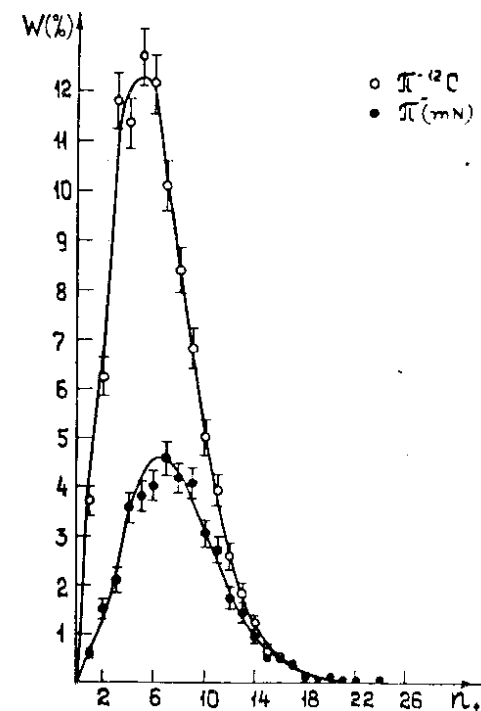


Рис.2. Распределения событий по множественности π^+ - мезонов (n_{+}) для π^-^{12C} (O) и $\pi^-(mN)$ (●) взаимодействий. Кривые - результат расчета по варианту /2/, нормированные на полное число π^-^{12C} -событий.

§4. ВЫДЕЛЕНИЕ МНОГОНУКЛОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПО ВЕЛИЧИНЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ

В работе /1/ был также предложен метод выделения многонуклонных взаимодействий по величине электрического заряда всех вторичных частиц, за исключением идентифицированных протонов / $p \leq 700 \text{ МэВ/с}$ /. В π^-p - и π^-n -взаимодействиях величина Q может принимать значения -1, 0 и -2, -1 в зависимости от наличия идентифицированного протона. Поэтому, например, величина $Q = +1$ в $\pi^-^{12}\text{C}$ -столкновениях означает, что произошло неупругое взаимодействие π^- -мезона, как минимум с двумя протонами ядра углерода; величина $Q = +2$ - неупругое взаимодействие с тремя протонами и т.д. Причем взаимодействия были существенно неупругими, так как переданные протонам импульсы составляют $|Q| \geq 0,5 \text{ ГэВ/с}^2$.

Расчеты по модели многократного рассеяния были проведены в двух вариантах. В первом, в соответствии с экспериментом /1/, учитывалось, что в π^-p -взаимодействиях в 18% событий имеется идентифицированный протон / $Q = -1$ /, а в остальных 82% случаев $Q=0$ /т.е. либо протон приобретает импульс выше 700 МэВ/с , либо происходит неупругая перезарядка типа $p \rightarrow \pi^+n$ /. В случае π^-n -взаимодействия в 9% событий $Q = -2$ /имеется идентифицируемый протон/, в остальных случаях $Q = -1$. Кроме того, учитывалось, что в случае упругого π^-p рассеяния на квазисвободном протоне в 6% случаев импульс протона отдачи превышает 700 МэВ/с . С учетом этих данных нетрудно перейти от распределения по числу упругих и неупругих взаимодействий с нуклонами ядра $^{12}\text{C}^{2,3}$ к распределению по величине Q . Второй вариант расчета отличался учетом дополнительно вылетающих протонов с

* "Неупругость" взаимодействий можно значительно усилить, отбирая события, в которых все положительно заряженные частицы имеют, например, импульсы больше $1-2 \text{ ГэВ/с}$. Однако для этого требуется большая статистика событий.

$p \geq 700 \text{ МэВ/с}$. Вероятность иметь один такой протон / $\Delta Q = +1$ / в событии считалась равной 0,1, а два протона / $\Delta Q = +2$ / - 0,01. Сравнение двух вариантов расчета с экспериментом приведено в табл. 2 и на рис. 3, 4/а, б/, 5. На рис. 4 и 5 приведено также сравнение расчета с экспериментальными значениями $\langle n_{\pm} \rangle$ и с распределениями по n_{\pm} при различных значениях Q для $\pi^- (mN)$ -взаимодействий, анализированных в предыдущем разделе.

Из сравнения расчета с экспериментом видно, что удовлетворительное согласие имеется для обоих вариантов, хотя второй вариант выглядит предпочтительнее. Это может означать, что механизм /3/, определяющий образование кумулятивных протонов, существен также и при описании многонуклонных взаимодействий.

Обращает на себя внимание тот факт, что событий с $Q \leq -3$ на порядок меньше, чем событий с $Q = -2$.

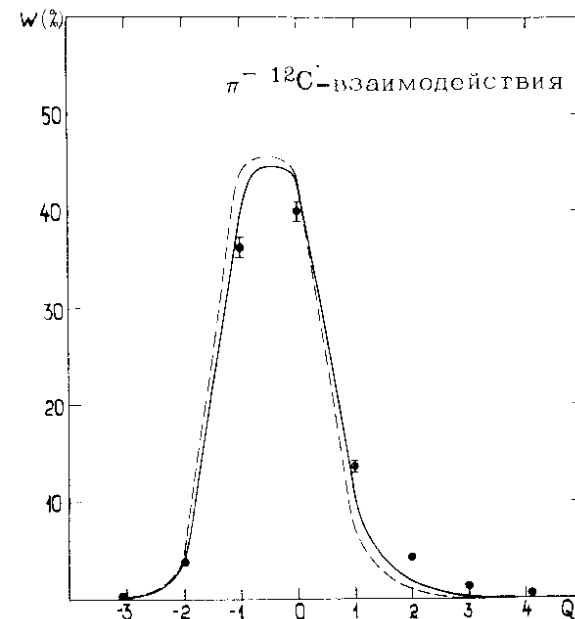


Рис.3. Распределение $\pi^-^{12}\text{C}$ -событий по величине Q . Кривые - результаты расчетов по варианту /1/ /пунктир/ и варианту /2/ /сплошные линии/.

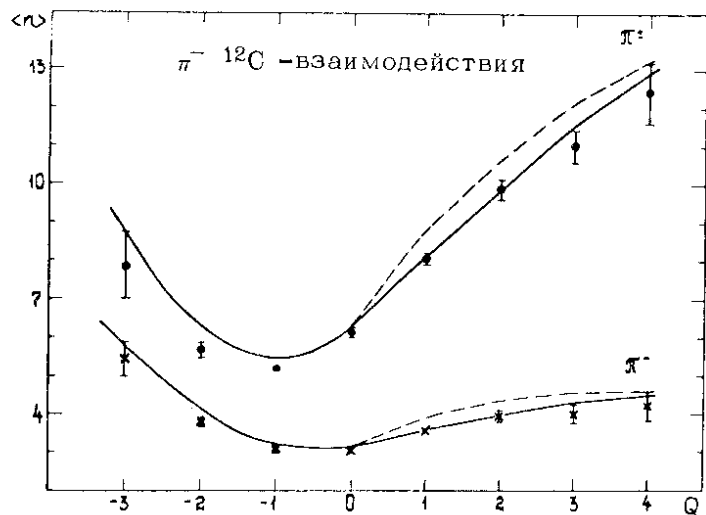


Рис.4а. Зависимость $\langle n_{+} \rangle$ (●) и $\langle n_{-} \rangle$ (○) от Q для $\pi^{-} 12C$ - взаимодействий. Кривые - результаты расчетов по варианту /1/ /пунктир/ и варианту /2/ /сплошные линии/.

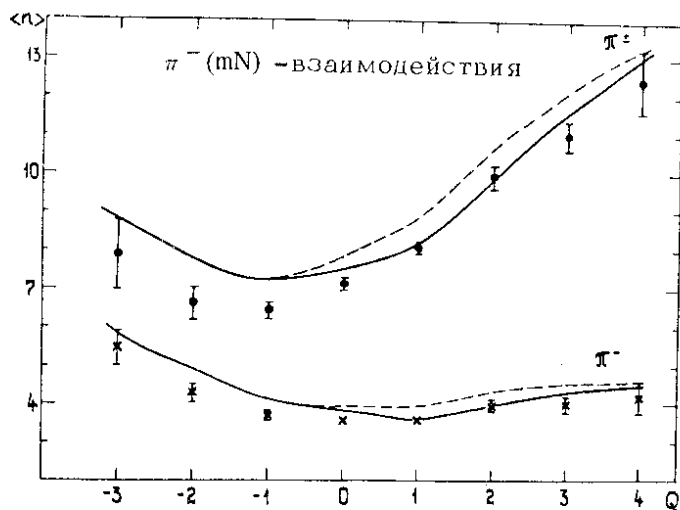


Рис.4б. Зависимость $\langle n_{+} \rangle$ (●) и $\langle n_{-} \rangle$ (○) от Q для $\pi^{-} (mN)$ - взаимодействий. Кривые - результат расчетов по варианту /1/ /пунктир/ и варианту /2/ /сплошные линии/.

Таблица 2

Q	Доля от $\pi^{-} 12C$ взаимодействий (%)		$\langle n_{+} \rangle$			
	Эксперимент	Вариант (1)	Вариант (2)	Эксперимент	Вариант (1)	Вариант (2)
-4	0,03±0,03					
-3	0,57±0,08	0,06	0,06	7,86±0,87	8,80	8,80
-2	4,19±0,28	4,3	3,8	5,64±0,20	6,28	6,29
-1	35,74±0,82	44,1	39,7	5,21±0,06	5,44	5,46
0	39,56±0,86	43,6	43,2	6,13±0,07	6,26	6,28
1	13,46±0,50	6,9	10,9	8,08±0,13	8,85	8,17
2	4,54±0,29	1,0	2,0	9,85±0,25	10,70	9,88
3	1,53±0,17	0,1	0,2	11,02±0,43	12,13	11,62
4	0,43±0,10	0,01	0,03	12,45±0,81	13,25	13,07
5	0,10±0,04					

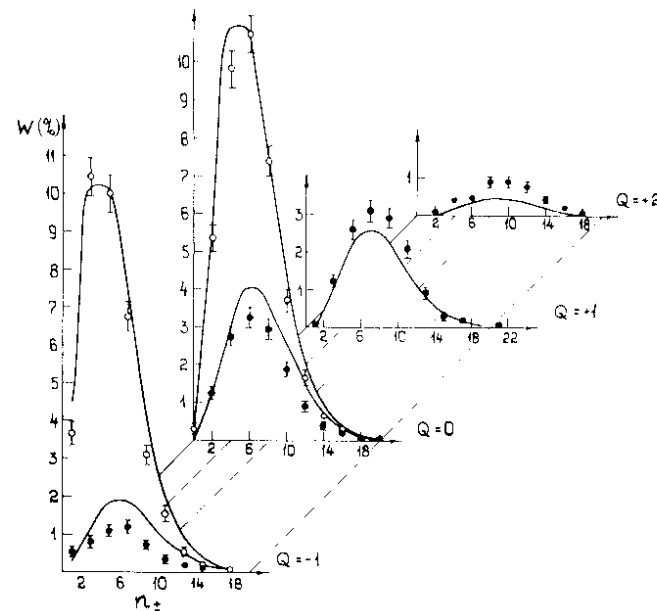


Рис.5. Распределения событий по множественности π^{-} - мезонов (n_{+}) для $\pi^{-} 12C$ (○) и $\pi^{-} (mN)$ (●) взаимодействий при значениях $Q = -1, 0 + 1, +2$. Кривые - результаты расчетов по варианту /2/, нормированные на полное число $\pi^{-} 12C$ - событий.

Даже если все события с $Q \leq -3$ возникли из событий с $Q = -2$ за счет каскадного взаимодействия с ядерными нуклонами /например, за счет неупругой перезарядки $p \rightarrow \pi^- p$ /, то и тогда вероятность такого процесса не превышает 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из сравнения расчетных характеристик многонуклонных взаимодействий и распределений по Q с экспериментом видно, что они удовлетворительно описываются в рамках модели многократного рассеяния ^{2,3}, которая объясняет происхождение $\approx 90\%$ всех событий. Согласно с опытом улучшается уже при грубом учете дополнительно вылетающих из ядра протонов. Таким образом, механизм, ответственный за кумулятивный эффект ^{8,10}, по-видимому, заметно влияет на характеристики множественного рождения на ядрах. Наибольшие отклонения от эксперимента появляются при $Q \geq +1$, т.е. для неупругих событий, в которых участвовало два и большее число протонов с $|t| \geq /ГэВ/c/ ^2$. Доля их от всех взаимодействий составляет 20%, в то время как теоретическое значение $\approx 10\%$. Для выяснения характера этих расхождений необходимо исследование импульсных и угловых характеристик вторичных частиц в событиях с $Q \geq +1$.

Мы благодарны участникам Сотрудничества по исследованию множественных процессов в пион-нуклонных взаимодействиях при $p = 40$ ГэВ/с за помощь в работе, мы признательны Е.М.Левину и М.Г.Рыскину, М.И.Стрикману и Л.Л.Франкфурту за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ангелов Н.С. и др. ОИЯИ, P1-10324, Дубна, 1976; ЯФ, 1977, 26, с.811.
2. Шабельский Ю.М. Препринт ЛИЯФ - 244, Ленинград, 1976; ЯФ, 1977, 27, с.1084.

3. Бацкович С. и др. ОИЯИ, P2-10646, Дубна, 1977; ЯФ, 1977, 26, с.1034.
4. Фейнман Р. Взаимодействие фотонов с адронами, "Мир", Москва, 1975.
5. Грибов В.Н. Материалы УШ Зимней школы ЛИЯФ по физике ядра и элементарных частиц, Ленинград, 1973, ч.2, с.5.
6. Канчели О.В. Письма в ЖЭТФ, 1973, 18, с.465.
7. Копелиович В.Б. ЯФ, 1977, 26, с.168.
8. Frankfurt L.L., Strikman M.I. Phys.Lett., 1977, 69B, p.93.
9. Азимов С.А. и др. ЯФ, 1975, 22, с.750.
10. Балдин А.М. ЭЧАЯ, 1977, 8, с.430.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 марта 1978 года.