

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

И Ф В Э 87-17  
ОНФ FNAL-564

В.В.Аммосов<sup>2</sup>, Р.Аммар<sup>9</sup>, А.Бакич<sup>10</sup>, В.И.Баранов<sup>2</sup>,  
Т.Барнет<sup>11</sup>, Ю.А.Батусов<sup>4</sup>, С.А.Бунятов<sup>4</sup>, Р.Вилкес<sup>11</sup>,  
В.Вильчинска<sup>6</sup>, Г.Вильчински<sup>6</sup>, Л.Войводик<sup>1</sup>, Б.Войсек<sup>6</sup>,  
В.Волтер<sup>6</sup>, П.А.Горичев<sup>3</sup>, Дж.Гресс<sup>9</sup>, Р.Дэвис<sup>9</sup>, О.К.Егоров<sup>3</sup>,  
М.Иванова<sup>8</sup>, Н.Квак<sup>9</sup>, В.И.Клюхин<sup>2</sup>, Э.Д.Колганова<sup>3</sup>,  
Д.Копшадж<sup>9</sup>, О.М.Кузнецов<sup>4</sup>, В.И.Корешев<sup>2</sup>, С.Крживджински<sup>11</sup>,  
Дж.Лорд<sup>11</sup>, В.В.Люков<sup>4</sup>, И.В.Махлюева<sup>3</sup>, А.Ольшевски<sup>6</sup>,  
П.В.Питухин<sup>2</sup>, Л.Пик<sup>10</sup>, Е.А.Пожарова<sup>3</sup>, Р.Раймер<sup>9</sup>,  
Р.Розенбладт<sup>11</sup>, Г.Рубин<sup>5</sup>, В.И.Сиротенко<sup>2</sup>, Е.А.Слободюк<sup>2</sup>,  
В.Смарт<sup>1</sup>, В.А.Смирнитский<sup>3</sup>, Р.Стамп<sup>9</sup>, В.И.Третьяк<sup>4</sup>,  
Х.Чернев<sup>6</sup>, В.В.Шаманов<sup>3</sup>, В.Г.Шевченко<sup>3</sup>, А.Юрак<sup>6</sup>

ИЗУЧЕНИЕ ИНКЛЮЗИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЗАРЯЖЕННЫХ АДРОНОВ  
ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ НЕЙТРИНО  
С ЯДРАМИ ФОТОЭМУЛЬСИИ И НЕОНА

Направлено в ЯФ

- 
- <sup>1</sup>ФНАЛ, Батавия, США  
<sup>2</sup>ИФВЭ, Серпухов, СССР  
<sup>3</sup>ИТЭФ, Москва, СССР  
<sup>4</sup>ОИЯИ, Дубна, СССР  
<sup>5</sup>ИИТ, Чикаго, США  
<sup>6</sup>ИЯФ, Краков, ПНР  
<sup>7</sup>ИЯИЯЭ, София, НРБ  
<sup>8</sup>Пловдивский университет, НРБ  
<sup>9</sup>Канзасский университет, Лоуренс, США  
<sup>10</sup>Сиднейский университет, Австралия  
<sup>11</sup>Вашингтонский университет, Сиэтл, США

Аннотация

Аммосов В.В. и др. Изучение инклюзивных характеристик заряженных адронов во взаимодействиях нейтрино с ядрами фотоэмульсии и неона: Препринт ИФВЭ 87-17. FNAL-564. - Серпухов, 1987. - 9 с., 4 рис., 1 табл., библиогр.: 12.

Представлены результаты сравнительного анализа инклюзивных характеристик вторичных адронов во взаимодействиях нейтрино с ядрами фотоэмульсии и неона при энергиях 10-200 ГэВ. Показано, что совокупность данных по множественному образованию вторичных частиц удовлетворительно описывается в рамках модели партон-адронного каскада со средним квадратом поперечной массы партона  $\mu^2 = 0,08 \text{ ГэВ}^2$ .

Abstract

Ammosov V.V. et al. Study of charged Hadrons Inclusive Characteristics in Neutrino Interactions with Photoemulsion and Neon Nuclei: IHEP Preprint 87-17. FNAL-564. - Serpukhov, 1987. - p. 9, figs. 4, table 1, refs.: 12.

Comparative analysis results of the secondary hadrons inclusive characteristics in neutrino interactions with photoemulsion and neon nuclei at the energies of 10-200 GeV are presented. It is shown that the whole complex of data on the multiplicity production of the secondary particles is satisfactorily described in the frames of the parton-hadron cascade with the mean square of the transverse parton mass  $\mu^2 = 0.08 \text{ GeV}^2$ .

## ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению взаимодействий частиц высоких энергий с ядрами обусловлен рядом фундаментальных идей, одна из которых заключается в возможности использовать ядро как пространственно-временной анализатор процесса множественного рождения адронов. К настоящему времени установлено, что только модели, основанные на мультипериферической картине сильных взаимодействий, позволяют описать с единой точки зрения основные черты столкновений частиц с ядрами<sup>/1/</sup>. Характерной чертой таких моделей, в частности модели партон-адронного каскада (ПАК), является наличие длины формирования вторичных адронов<sup>/2/</sup>. Взаимодействия нейтрино с ядрами дают возможность наиболее прямой проверки гипотезы о длине формирования адронов<sup>/3/</sup>.

В настоящей работе приводятся данные сравнительного анализа инклюзивных характеристик вторичных адронов во взаимодействиях нейтрино с ядрами фотоэмульсии и неона. Важной чертой такого анализа явилась сопоставимость условий проведения экспериментов с разными мишенями. Полученные экспериментальные данные сравниваются с расчетом по модели ПАК<sup>/1/</sup>.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Данные, на которых основываются результаты работы, получены при облучении 15-футовой пузырьковой камеры (ПК) ФНАЛ в нейтринном пучке с широким энергетическим спектром до 200 ГэВ. Фотоэмульсия была помещена в рабочий объем ПК, а сама камера использовалась для спектрометрии вторичных частиц и локализации зоны поиска взаимодействий в фотоэмульсии<sup>/4/</sup>. Для исследования взаимодействий нейтрино с ядрами неона использовалась тяжелая неон-водородная смесь (64% атомов неона)<sup>/5/</sup>.

Для анализа было отобрано 182  $\nu E\pi$ - и  $\sim 4000$   $\nu Ne$ -взаимодействий, идущих по каналу заряженного тока, при обрезаниях  $E_{\nu} > 10$  ГэВ и  $P_{\mu} > 4$  ГэВ/с. Средние значения энергии нейтрино  $E_{\nu}$  квадрата переданного адронам 4-импульса  $Q^2$  инвариантной массы

адронов  $W^2$  для отобранных событий равны соответственно:  $\langle E_\nu \rangle = 50 \text{ ГэВ}$ ;  $\langle Q^2 \rangle = 10 (\text{ГэВ}/c)^2$ ;  $\langle W \rangle = 5 \text{ ГэВ}$ . Детальное описание экспериментальных условий – критериев отбора событий, методики определения энергии нейтрино, процедуры поиска событий в ядерной фотоэмульсии, способов введения поправок на ненайденные взаимодействия – можно найти в работах<sup>/4,6/</sup>.

В настоящей работе ядерные эффекты исследуются для  $s$ -частиц (релятивистские частицы) и для  $g$ -частиц (серые частицы по терминологии, принятой в фотоэмульсионных экспериментах). Серые частицы в основном являются протонами с импульсом  $0,25 < P < 0,8 \text{ ГэВ}/c$ . Разделение  $s$ - и  $g$ -частиц в фотоэмульсии проводилось по ионизации, а в ПК – по их импульсу.

При анализе инклюзивных распределений, для которых требуется знание импульса и заряда частицы, использовались только  $s$ -частицы, вылетающие в конусе с углом раствора  $2\alpha = 120^\circ$  по отношению к оси нейтринного пучка. Это обусловлено тем, что в фотоэмульсионном эксперименте при больших углах вылета частиц значительно падает эффективность их регистрации в ПК. При данном обрезании в ПК регистрируется 81% релятивистских частиц. На остальные частицы, вылетающие под заданным углом по отношению к оси нейтринного пучка, вводились нормировочные поправки.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Простейшее представление об участии ядра в образовании вторичных адронов во взаимодействии налетающей частицы с ядром основывается на модели простого внутриядерного каскада (ПВК), в которой вновь образовавшиеся адроны могут сразу же начать взаимодействовать с оставшимися нуклонами ядра<sup>/7/</sup>. Установлено, что расчеты, выполненные в рамках такой модели, противоречат данным адрон-ядерных экспериментов<sup>/8/</sup> при высоких энергиях.

В модели ПАК вторичный адрон не взаимодействует с другими нуклонами ядра до тех пор, пока не сформирует свое собственное поле (партонную флуктуацию, содержащую медленные партонны). За это время адрон с импульсом  $P$  пролетает расстояние  $l = P/\mu^2$ , называемое длиной формирования адрона, где средний квадрат поперечной массы партонна  $\mu^2 = m^2 + k_t^2$  ( $m$  – масса партонна,  $k_t$  – внутренний поперечный импульс партонна).

Используемые в настоящей работе расчетные зависимости по модели ПАК с величиной параметра  $\mu^2 = 0,08 \text{ ГэВ}^2$  и по модели ПВК получены с помощью программы генерации искусственных событий<sup>/9/</sup>.

В таблице приведены экспериментальные средние множественности  $g$ -,  $s$ -частиц и отрицательно заряженных  $s$ -частиц. При расчете средних множественностей в фотоэмульсионном эксперименте

незарегистрированные в ПК  $s$ -частицы делились между положительно и отрицательно заряженными пропорционально числу зарегистрированных с данным знаком заряда. Как видно из таблицы, экспериментальные данные не описываются по модели ПВК и удовлетворительно согласуются (с точностью не хуже 10%) с расчетом по модели ПАК.

Таблица Средние множественности вторичных заряженных частиц

	$\nu B$			$\nu Em$		
	$n_g$	$n_s$	$n_{s^-}$	$n_g$	$n_s$	$n_{s^-}$
Эксп.	$0,82 \pm 0,02$	$4,70 \pm 0,02$	$1,62 \pm 0,04$	$1,71 \pm 0,16$	$5,43 \pm 0,21$	$2,03 \pm 0,20$
ПВК	1,68	6,03	2,41	3,95	7,30	3,15
ПАК*)	1,05	4,78	1,79	2,31	5,30	2,14

\*) Расчет по модели ПАК выполнен для  $\mu^2 = 0,08 \text{ ГэВ}^2$ .

При изучении инклюзивных распределений  $s$ -частиц наиболее отчетливое различие между взаимодействиями на ядрах с различным атомным весом проявляется при анализе распределений по скорости частиц  $y = 1/2 \ln(E + p_{||}) / (E - p_{||})$ . Здесь  $E$  - энергия частицы,  $p_{||}$  - продольная компонента импульса частицы, направленная по  $q$ -вектору передачи импульса от лептонов адронному блоку, в лабораторной системе координат.

На рис. 1 представлено отношение распределений по скорости во взаимодействиях нейтрино с ядрами фотоэмульсии и неона  $R(y) = \left( \frac{1}{N_{ev}} \frac{dn_s}{dy} \right)_{Em} / \left( \frac{1}{N_{ev}} \frac{dn_s}{dy} \right)_{Ne}$  для а) положительно заряженных, б) отрицательно заряженных  $s$ -частиц. Отношение  $R(y)$  для положительно заряженных  $s$ -частиц хорошо описывается моделью ПАК в том числе и в области малых скоростей, где наиболее существенно влияние ядра. Для отрицательно заряженных  $s$ -частиц согласие с расчетом по модели ПАК менее удовлетворительно, но большие ошибки в экспериментальных данных не позволяют провести более детальный анализ этой зависимости.

На рис. 2 показано поведение первого и второго моментов  $y$ -распределений для отрицательно заряженных  $s$ -частиц в зависимости от числа  $g$ -частиц в вершине взаимодействия  $n_g$ . Как видно, экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетами по модели ПАК. Как и следовало ожидать, среднее значение скорости убывает с ростом  $n_g$ , которое пропорционально количеству столкновений вторичных адронов с нуклонами внутри ядра. Поведение и

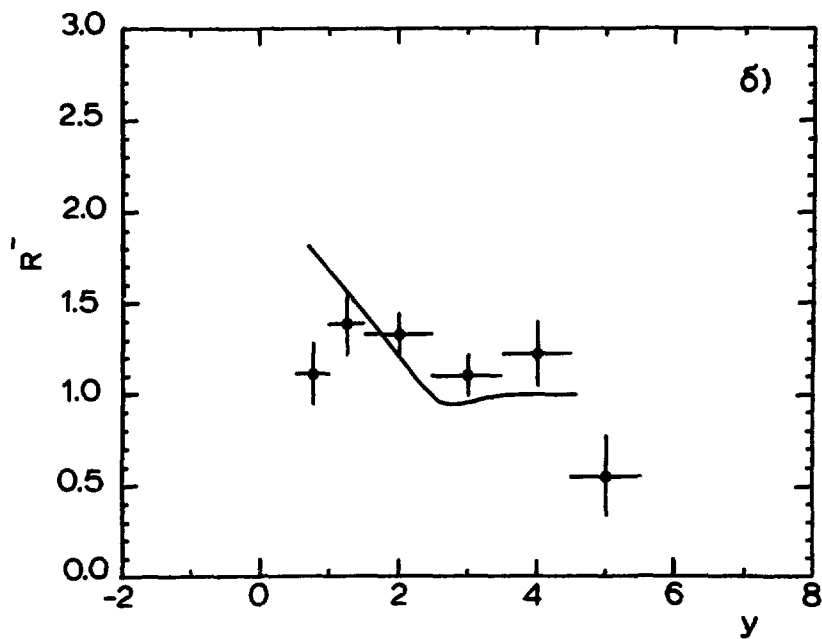
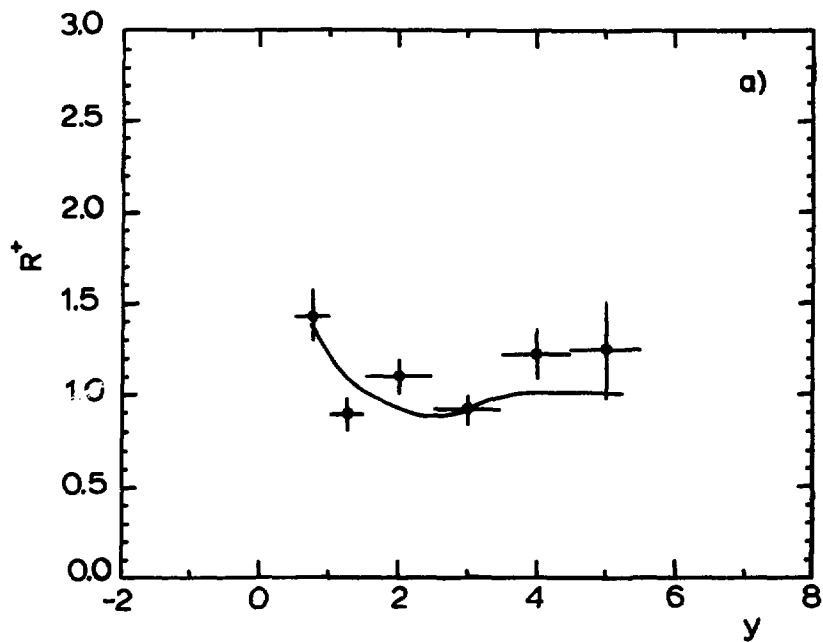


Рис. 1. Отношение распределений по  $y$  для а) положительно и б) отрицательно заряженных  $S$ -частиц, вылетающих в переднем конусе. Кривая — расчет по модели ПАК с  $\mu^2 = 0,08 \text{ ГэВ}^2$ .

величина моментов слабо зависят от атомного веса ядра-мишени. Ширина распределения по быстроте в случае нейтринных взаимодействий, как и в адрон-ядерных взаимодействиях, не зависит от  $p_g$ , что противоречит моделям типа когерентной трубки/10/, в которых дисперсия растет с увеличением числа внутриядерных столкновений. Моменты распределения по быстроте для положительно заряженных  $S$ -частиц имеют те же закономерности, что и для отрицательно заряженных. Для зависимостей моментов распределений как отрицательно, так и положительно заряженных  $S$ -частиц наблюдается хорошее согласие с расчетами по модели ПАК.

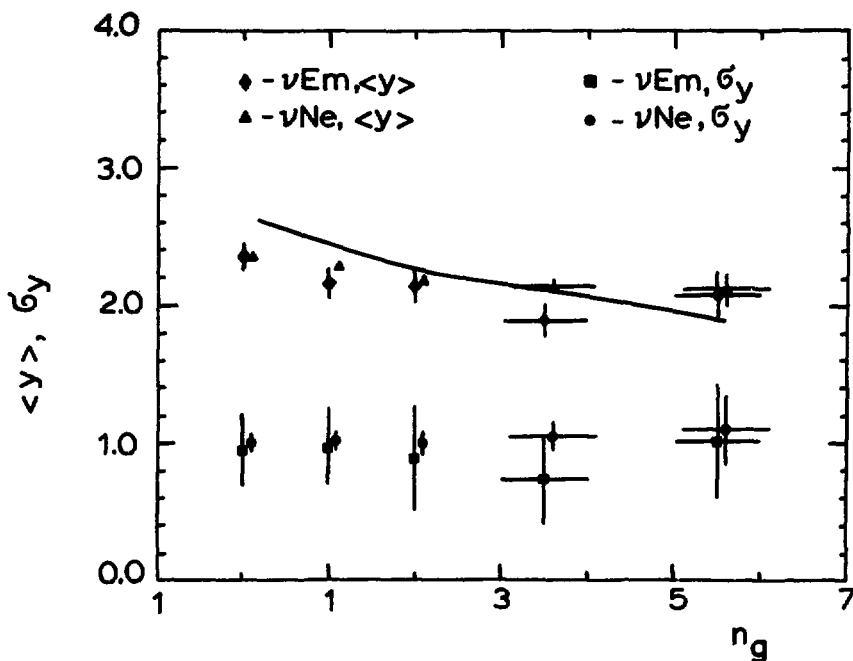


Рис. 2. Зависимость среднего значения быстроты  $\langle y \rangle$  и ширины распределения по быстроте  $\sigma_y$  от числа  $g$ -частиц в событии для  $\nu E\mu$ -,  $\nu Ne$ -взаимодействий. Кривая - расчет по модели ПАК с  $\mu^2 = 0,08 \text{ ГэВ}^2$  для взаимодействий нейтрино в фотоэмульсии.

В модели ПАК с величиной поперечной массы партона  $\mu^2 = 0,08 \text{ ГэВ}^2$  величина среднего поперечного импульса вторичных адронов не увеличивается с ростом  $n_g$  в отличие от модели ПВК. Экспериментальные значения среднего поперечного импульса  $S$ -частиц для  $\nu E\mu$ - и  $\nu Ne$ -взаимодействий совпадают в пределах ошибок и не меняются с ростом  $n_g$ . Величина среднего поперечного импульса  $S$ -частиц во взаимодействиях нейтрино с ядрами фотоэмульсии

равна  $\langle p_t \rangle = 0,35 \pm 0,02$  ГэВ/с и совпадает в пределах ошибки с расчетом по модели ПАК.

Поскольку  $g$ -частицы прямым образом связаны с количеством внутриядерных столкновений при взаимодействии, поэтому их распределения наиболее чувствительны к процессам, происходящим в ядре.

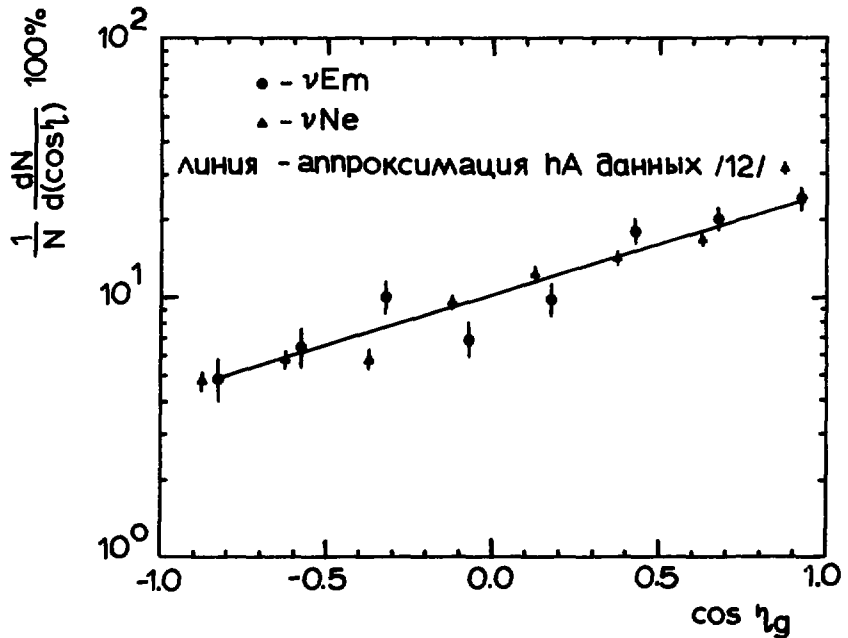


Рис. 3. Распределение по  $\cos \theta$ , углу вылета  $g$ -частицы относительно  $q$ -вектора. Прямая получена из аппроксимации данных адрон-ядерных экспериментов<sup>/11/</sup>.

На рис. 3 представлено распределение для  $g$ -частиц по  $\cos \theta$  ( $\theta$  – угол вылета частицы относительно  $q$ -вектора), которое показывает, что  $g$ -частицы летят, главным образом, в переднюю полусферу по отношению к направлению  $q$ -вектора в лабораторной системе координат. Аппроксимируя наши фотоэмульсионные данные экспонентой  $\sim \exp(A \times \cos \theta)$ , получаем величину показателя  $A = 0,91 \pm 0,08$ , которая совпадает в пределах ошибки с величиной, полученной в результате аппроксимации адрон-ядерных данных  $p\text{Ne}$  (импульс налетающей частицы 300 ГэВ/с),  $\pi^-C$  (40 ГэВ/с, 4 ГэВ/с)<sup>/11/</sup>. На рисунке приведена прямая, полученная из аппроксимации адрон-ядерных данных. Наблюдаемый факт независимости



угловых распределений  $g$ -частиц от типа и энергии налетающей частицы, а также от веса ядра-мишени служит аргументом в пользу одинакового механизма происхождения  $g$ -частиц. Аппроксимация такого же углового распределения, полученного на искусственных событиях, дает величину показателя в экспоненте, равную  $A = (1,31 \pm 0,03)$ , которая не согласуется с экспериментом.

Модель ПАК удовлетворительно описывает корреляционную зависимость среднего числа  $g$ -частиц, испущенных назад от числа  $g$ -частиц, летящих вперед в лабораторной системе координат. На рис. 4 приведена такая зависимость совместно с кривыми, рассчитанными по модели ПАК, и данными  $\nu$ Ne-эксперимента<sup>/11/</sup>. Из совпадения экспериментальных данных в  $\nu$ Ne- и  $p$ Ne-взаимодействиях следует, что данная корреляция не зависит от типа налетающей частицы и энергии взаимодействия.

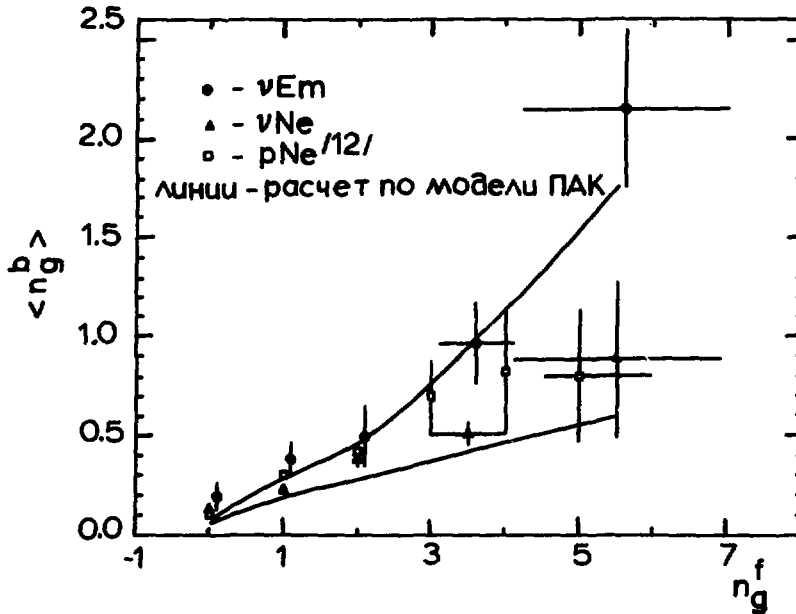


Рис. 4. Зависимость среднего числа  $g$ -частиц, испущенных назад  $\langle n_g^b \rangle$  от числа  $g$ -частиц, летящих вперед  $n_g^f$  в лабораторной системе координат относительно  $q$ -вектора. Кривые - расчет по модели ПАК с  $\mu^2 = 0,08 \text{ ГэВ}^2$ .

Величина параметра  $\mu^2$ , которую мы использовали при расчете по модели ПАК, согласуется с полученным ранее в работе<sup>/12/</sup> ограничением на средний квадрат внутреннего поперечного импульса

партона  $\langle k_t^2 \rangle < 0,1 \text{ ГэВ}^2$ . Наш результат согласуется также с величиной  $\mu^2 = 0,08 \text{ ГэВ}^2$ , полученной в нейтринном эксперименте на камере СКАТ с фреоновым заполнением<sup>/9/</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение приводим основные результаты данной работы.

Модель внутриядерного каскада с мгновенным формированием вторичных адронов в ядре не описывает наши экспериментальные величины средних множественностей различных типов частиц.

Средние множественности и инклюзивные распределения  $s$ -частиц по быстрой и поперечному импульсу удовлетворительно описываются в рамках модели ПАК с длиной формирования для вторичных адронов, определяемой средней величиной поперечной массы партонов  $\mu^2 = 0,08 \text{ ГэВ}^2$ .

Угловые распределения  $g$ -частиц не зависят от типа налетающей частицы и веса ядра-мишени в широком интервале энергий, что свидетельствует в пользу одинакового механизма происхождения этих частиц.

Сильная корреляция между множественностями  $g$ -частиц, испущенных в переднюю и заднюю полусферы, хорошо описывается в рамках модели ПАК и по величине такая же, как в адрон-ядерных взаимодействиях.

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам, участвовавшим в обработке экспериментальной информации. Мы также признательны А.А.Иваниллову за предоставленную возможность использовать его программу моделирования нейтринных взаимодействий с ядрами.

## Литература

1. Николаев Н.Н. - ЭЧАЯ, 1981, т.12, с.162.
2. Канчели О.В. - Письма в ЖЭТФ, 1973, т.18, с.469.
3. Nikolaev N.N. - Zs. Phys., 1980, v.C5, p.291.
4. Smart W. et al. - Act. Phys. Pol., 1986, v.B17, p.41.
5. Baltay C. et al. - Phys. Rev. Lett., 1977, v.39, p.62.
6. Войводик Л. и др. - Препринт ИТЭФ, 1986, № 91, Москва.
7. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействия высокоэнергичных частиц и атомных ядер с ядрами. - М.: Атомиздат, 1972.
8. Гуламов К.Г., Гуламов У.Г., Чернов Г.М. - ЭЧАЯ, 1978, т.9, с.554.
9. Баранов Д.С. и др. - Препринт ИФВЭ 84-69, Серпухов, 1984.
10. Afek Y. et al. - Phys. Rev., 1977, v.D15, p.2622.

11. Аллабердин М.Л. и др. · Множественное образование частиц в адрон-нуклонных и адрон-ядерных взаимодействиях. - Ташкент, 1985, изд-во ФАН УзССР, с.62.
12. Аммосов В.В. и др. - Препринт ИФВЭ 84-179, Серпухов, 1984.

Рукопись поступила 15 декабря 1986 года.

В.В.Аммосов и др.

Изучение инклюзивных характеристик заряженных адронов во взаимодействиях нейтрино с ядрами фотоэмульсии и неона.

Редактор М.Л.Фоломешкина. Технический редактор Л.П.Тимкина.  
Корректор Л.Ф.Васильева.

---

Подписано к печати 11.03.87. Т-09333. Формат 80x90/16.  
Офсетная печать. Печ.л. 0,50. Уч.-изд.л. 0,82. Тираж 270.  
Заказ 220. Индекс 3624. Цена 9 коп.

---

Институт физики высоких энергий, 142284, Серпухов Московской обл.

9 коп.

Индекс 3624.

---

ПРЕПРИНТ 87-17, ИФВЭ, 1987.

---