

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ КАРТИНА ГЛУБОКОНЕУПРУГИХ ЛЕПТОН-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ С РОЖДЕНИЕМ КУМУЛЯТИВНЫХ НУКЛОНОВ

С.М.Елисеев, **М.Камаль**

Представлены результаты расчетов взаимодействий нейтрино с энергией  $10 \div 200$  ГэВ с ядрами эмульсии. Расчет производился по модели, учитывающей пространственно-временные характеристики внутриядерных взаимодействий, поглощение частиц в ядре и испарение частиц из ядра остатка. Особое внимание уделено кумулятивным протонам. Теория сравнивается с экспериментом, выполненным недавно сотрудничеством ОИЯИ, ИФВЭ, ИТЭФ, ФНАЛ и др. Приведены также некоторые предсказательные расчеты.

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ.

### Space-Time Picture of Deep Inelastic Lepton-Nucleus Collisions with Cumulative Nucleon Production

S.M.Eliseev, **M.Kamal**

Results are presented of calculations of interactions of neutrinos with energies from 10 to 200 GeV with emulsion nuclei. The calculations have been made within the model which takes account of the space-time characteristics of intranuclear interactions, absorption of particles in a nucleus and evaporation of particles from a residual nucleus. Special attention is paid to the cumulative protons. The theory is compared with the experiment recently performed by the collaboration of the JINR, IHEP, ITEP, FNAL et al. Some predictive computations are presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of Theoretical Physics, JINR.

После открытия кумулятивного эффекта<sup>/1/</sup> взаимодействие лептонов с ядрами привлекает к себе пристальное внимание (см., например,<sup>/2/</sup>). В лептон-ядерном взаимодействии лептон внутри ядра взаимодействует заведомо один раз (в отличие от адрона). Это позволяет исследовать влияние ядра на характеристики "вновь рожденных" частиц в наиболее чистом виде, так как дополни-

тельные взаимодействия в ядре фрагментов налетающей частицы в данном случае исключены. Большой интерес вызывают лептон-ядерные взаимодействия с рождением кумулятивных частиц.

В экспериментах, выполненных в последнее время сотрудниками группы институтов (ОИЯИ, ИФВЭ, ИТЭФ, ФНАЛ и др.), исследовались взаимодействия нейтрино (протекающие через заряженный ток) с ядрами эмульсии, в результате которых рождались кумулятивные нуклоны. Эмульсия помещалась внутри 15-футовой камеры ФНАЛ и облучалась пучком нейтрино с широким спектром энергий от 10 до 200 ГэВ. Чтобы надежно исключить влияние испарительных механизмов, отбирались кумулятивные события с протонами (вылетающими в заднюю полусферу), имеющими довольно большой импульс — больше 300 МэВ/с. Были получены многие важные результаты, например, представлены характеристики расщепления ядер как с образованием кумулятивных нуклонов, так и без кумулятивных нуклонов. Впервые наблюдалось множественное рождение кумулятивных нуклонов<sup>/3-5/</sup> и т.д.

Модели, использованные до настоящего времени, как правило, были ориентированы на детальное рассмотрение одиночной характеристики кумулятивного процесса. Для интерпретации новых<sup>/3-5/</sup> разнообразных данных полезно иметь модель, приспособленную не просто для описания какой-либо усредненной характеристики кумулятивного процесса (скажем, импульсного спектра), а позволяющую детально рассчитывать каждое взаимодействие налетающей частицы с атомным ядром. В работе<sup>/6/</sup> была рассмотрена такая модель глубоконеупругого лептон-ядерного взаимодействия, основанная на моделировании процесса методом Монте-Карло. Здесь мы исследуем применимость подхода<sup>/6/</sup> для описания имеющихся результатов по образованию кумулятивных нуклонов<sup>/3-5/</sup>. Приводим также некоторые предсказательные расчеты. Сравнение с ними новых экспериментальных данных (когда они будут получены) поможет в будущем определить область применимости нашей модели и выяснить другие особенности механизма лептон-ядерного взаимодействия с рождением кумулятивных нуклонов.

Приведем главные положения используемой модели (см. <sup>/6/</sup> и указанную в ней литературу).

В основе подхода лежит предположение, что первичное нейтрино взаимодействует с одним из нуклонов ядра-мишени как со свободной частицей. Характеристики рожденных при этом частиц моделируются с учетом соответствующих экспериментальных данных по  $\nu N$ -взаимодействиям с заданным пучком первичных

частиц. В работе /6/ показано, что наш способ этого моделирования хорошо согласуется с наблюдением. Иницируемый таким образом каскад частиц, взаимодействующих с отдельными нуклонами ядра, является марковским процессом, который моделируется методом Монте-Карло.

Пространственно-временные свойства взаимодействия учитывались введением сечения взаимодействия, зависящего от длины (времени) пробега формирующихся частиц в ядре:

$$\sigma_{hN} = \sigma_{hN}^0 (1 - e^{-L m_0 / \beta \gamma}), \quad (1)$$

где  $\beta = v/c$ ,  $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ ,  $L$  — длина свободного пробега в ядре,  $\sigma_{hN}^0$  — сечения взаимодействия свободных частиц (пионов и нуклонов) с нуклонами, определяемые в экспериментах по  $\pi N$ - и  $NN$ -рассеянию,  $m_0$  — параметр, характеризующий длину формирования частиц. В данной работе мы полагали  $m_0 = 0,4$  ГэВ (в соответствии с /6/).

Из формулы (1), в частности, видно, что в используемой модели быстрые частицы взаимодействуют в ядре слабо, а довольно медленные могут взаимодействовать в ядре с сечением взаимодействия обычных пионов и нуклонов с нуклонами. Такая картина прохождения рождающихся частиц в ядре качественно согласуется со многими данными по различным ядерным реакциям при высоких энергиях.

В расчетах учитываются многие ядерные эффекты: фермиевское движение нуклонов, принцип Паули, энергия связи нуклонов и т.д. /6/. Как будет показано, в механизме образования кумулятивных нуклонов, наблюдаемых в работах /3-5/, важную роль играет фермиевское движение нуклонов ядра и поглощение пионов в ядре\*. Эти эффекты мы учитывали так же, как и в наших предыдущих работах по описанию ядерных реакций при различных энергиях /6/. После вылета всех быстрых частиц из ядра и соответствующего числа нуклонов для каждого нейтрино-ядерного взаимодействия мы рассчитывали испарение возбужденного ядра-остатка. Конечно, вычисления такого типа по методу Монте-Карло

---

\*В недавней работе /7/ было также найдено, что в механизме нейтрино-ядерного мезообразования поглощение пионов в ядре играет большую роль.

очень сложны, но зато таким образом можно попытаться описать совместно самые различные продукты ядерной реакции (кумулятивные, испарительные и т.д.).

Мы рассчитали несколько десятков тысяч нейтрино-ядерных взаимодействий. Далее кратко обсудим средние результаты (статистические ошибки составляют пару процентов). Прежде всего, была определена вероятность события с кумулятивным нуклоном (т.е. с нуклоном импульса больше 0,3 ГэВ/с, летящим в заднюю полусферу), она оказалась равной 24%. В эксперименте эта вероятность составляет  $(20,5 \pm 2,7) \%^{/3-5/}$ . Среднее число таких нуклонов на одно взаимодействие у нас равно 0,29, в эксперименте —  $(0,33 \pm 0,07)$ . Мы вычислили асимметрию углового распределения  $g$ -частиц (используется далее обычная эмульсионная терминология), т.е. отношение числа частиц, летящих назад (кумулятивных) к наблюдаемому полному числу  $g$ -частиц. Получилось значение, равное 0,16. Экспериментально такая величина пока не определена. В таблице приведены средние значения различных частиц во взаимодействиях с определенным (0, 1,  $\geq 2$ ) числом кумулятивных нуклонов. Видно хорошее согласие теории с экспериментом. На рис. 1 показана зависимость структурной функции образования нуклонов от квадрата импульса нуклона  $p^2$ , вылетающего в заднюю полусферу. В районе  $p^2 \approx 0,1$  (ГэВ/с) $^2$  виден перегиб в форме спектра, он соответствует переходу от быстрой стадии реакции к испарительной. Имеет место хорошее согласие рассчитанной кривой с опытом. Это, по-видимому, свидетельствует о том, что нейтрино-ядерное взаимодействие с образованием нуклонов, вылетающих назад, также распадается на две различные

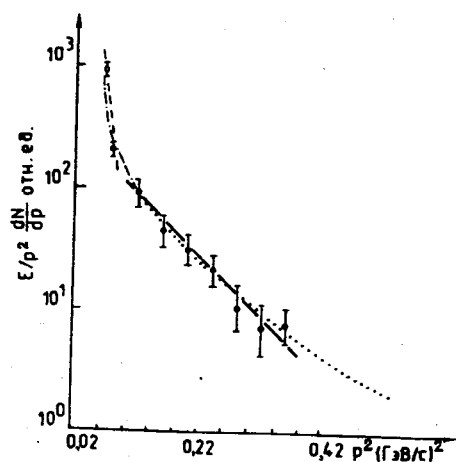


Рис.1. Распределение импульсов протонов, вылетающих назад, во взаимодействиях нейтрино с эмульсией. Значками  $\circ$  и  $\bullet$  обозначены экспериментальные данные из работ  $^{/3-5/}$ . Штриховой (---) и сплошной (—) линиями показаны результаты фитирования (см. в тексте)  $^{/3-5/}$ . Штрихпунктирной (-·-·-) и пунктирной (.....) линиями представлены результаты расчетов спектров соответственно испарительных и кумулятивных нуклонов.

Таблица

Средние числа различных частиц в зависимости от чисел ( $k=0; 1, \geq 2$ ) кумулятивных нуклонов, образующихся во взаимодействиях нейтрино с ядрами эмульсии. В скобках указаны экспериментальные результаты из работ /3-5/

k	$\bar{N}_g$	$\bar{N}_g$	$\bar{N}_b$
		вперед	
0	1,1 (1,4 ± 0,1)	1,1 (1,4 ± 0,1)	3,9 (4,4 ± 0,2)
1	2,8 (3 ± 0,3)	1,8 (2 ± 0,3)	5,2 (5,4 ± 0,6)
2	5,6 (5,6 ± 0,5)	3 (3,1 ± 0,6)	9 (10 ± 1)

стадии (быструю и испарительную), как и другие ядерные взаимодействия. Если кумулятивную часть рассчитанной кривой ( $p^2 > 0,1$  (ГэВ/с)<sup>2</sup>) аппроксимировать функцией

$$f \approx e^{-Bp^2}, \quad (2)$$

то для параметра наклона В получается значение, практически совпадающее с экспериментом /3-5/ :  $B \approx 10,9$  (ГэВ/с)<sup>-2</sup> (см. рис. 1).

Наконец, на рис.2 и 3 приведены предсказательные кривые для структурной функции образования нуклонов, вылетающих вперед в нейтрино-ядерных взаимодействиях с кумулятивными нуклонами

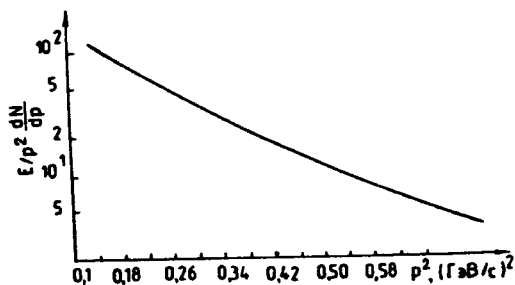


Рис.2. Импульсные спектры нуклонов, вылетающих вперед, во взаимодействиях нейтрино с эмульсией, в которых образуются также и кумулятивные нуклоны.

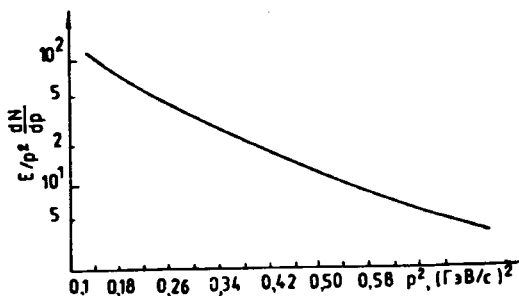


Рис.3. То же, что и на рис.2, но без рождения кумулятивных нуклонов.

(рис.2) и без кумулятивных нуклонов (рис. 3). Дальнейшее сравнение с экспериментом поможет не только понять природу ядерного скейлинга  $^{3-5/}$ , но и уточнить применимость модели для механизма лептон-ядерного взаимодействия.

### Литература

1. Балдин А.М. и др. — Препринт ОИЯИ P1-5819, Дубна, 1971.
2. Berge J.P. et al. — Phys.Rev., 1978, D18, p.1367.
3. Аммар Р. и др. — Препринт ФИАН СССР № 48, 1988.
4. Аммар Р. и др. — Письма в ЖЭТФ, 1989, 49, с.189.
5. Аммосов В.В. и др. — Препринт ИФВЭ, 87-17, Серпухов, 1987.
6. Елисеев С.М., Камаль М., Эль-Наги А. — Краткие сообщения ОИЯИ, №6 (32) -88, Дубна, 1988, с.11.
7. Gaisser T.K. et al. — Phys.Rev., 1986, D33, p.1233.

Рукопись поступила 10 августа 1989 года.