

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

Г 859

P2-87-859

В.Г.Гришин, С.М.Елисеев

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
НЕЙТРИНО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
ПРИ ЭНЕРГИЯХ $E = 3:30$ ГэВ**

1987

Как известно, в настоящее время большой интерес вызывают глубоководные взаимодействия быстрых лептонов с атомными ядрами. Лептон-ядерное взаимодействие является примером простейшей ядерной реакции, в которой могут проявиться некоторые особенности механизма неупругого взаимодействия с участием ядер.

В частности (см., например,^{11/}), в случае лептон-ядерного взаимодействия удобно исследовать пространственно-временные свойства элементарного лептон-нуклонного взаимодействия.

На современном этапе развития теории мы не можем "из первых принципов" рассчитать пространственно-временные характеристики ни лептон-ядерного, ни лептон-нуклонного взаимодействия. Например, в рамках квантовой хромодинамики необходимо вводить дополнительные предположения, не вытекающие из самой теории, о механизме образования наблюдаемых на опыте частиц из кварков-партонов. Поэтому большое распространение получили различные модели, в рамках которых пытаются получить некоторую информацию о свойствах взаимодействий на малых расстояниях. В таких подходах ядро является как бы генератором новых частиц — частицы рождаются на одном из нуклонов ядра. Ядро является также и детектором — рожденные частицы взаимодействуют с остальными нуклонами ядра. Исследуя такие взаимодействия, мы пытаемся получить новую информацию о характере протекания процесса в ядре. Существует проект эксперимента (в рамках сотрудничества 2-метровой пропановой камеры) по исследованию неупругих взаимодействий нейтрино с различными ядрами на серпуховском ускорителе^{12/}.

В данной работе мы проводим расчеты по нейтрино-ядерному взаимодействию при условиях, близких к планируемому эксперименту. Расчеты проводились по модели многократного рассеяния рождающихся частиц в ядре с учетом элементов пространственно-временного развития процесса взаимодействия. Как и в работе^{11/}, мы использовали модель длины формирования (зоны формирования), вычисления проводились методом Монте-Карло. Работа носит в значительной степени методический характер. Мы хотели посмотреть, какие результаты можно ожидать на опыте в рамках существующих моделей, какова чувствительность результатов к элементам пространственно-временного развития элементарного ν N-взаимодействия и т.д.

В результате разработана методика вычислений, составлены программы, которые можно будет использовать далее для уточнения существующих моделей и получения новой информации при сравнении с экспериментом.

Расчет, в основном, проводился по модели, подробно описанной в¹¹. В отличие от работы¹¹, в которой характеристики частиц из νN -взаимодействий разыгрывались по усредненным инклюзивным данным, здесь мы использовали рассчитанные заранее отдельные νN -события. В соответствии с энергетическим спектром нейтрино было смоделировано ≈ 10000 νN -взаимодействий, данные всех этих взаимодействий записаны на ленту*. Как в¹¹, мы считали, что сечение взаимодействия "частицы" с нуклоном в ядре равно

$$\sigma = \sigma_0 (1 - e^{-\tau/\tau_0}), \quad (1)$$

где τ — время движения частицы от точки рождения до точки взаимодействия, σ_0 — сечение взаимодействия сформировавшихся частиц с нуклоном (значение σ_0 при различных энергиях мы брали из экспериментов), τ_0 — параметр. Формулу (1) можно записать в виде

$$\sigma = \sigma_0 (1 - e^{-\ell m_0 / \beta \gamma}). \quad (2)$$

Здесь ℓ — длина пробега частицы в ядре от точки ее рождения до точки взаимодействия, $m_0 = 1/\tau_0$, β — скорость частицы,

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}.$$

Мы рассчитывали ≈ 10000 взаимодействий нейтрино с ядрами Cu и Pb (такую статистику предполагают набрать в рассматриваемом эксперименте). Особое внимание уделяли исследованию чувствительности различных одночастичных характеристик вторичных частиц по отношению к изменению параметра m_0 . Заметим, что значению $m_0 \rightarrow \infty$ соответствует обычная каскадная модель. В работе¹¹ при $m_0 = 0,4$ ГэВ получено хорошее согласие теории с экспериментом.

На рис. 1-5 показаны рассчитанные распределения. На рис.1 и 2 приведены импульсные спектры пионов из νCu - и νPb -взаимодействий при разных значениях параметра m_0 . Видно, что средние энергии пионов изменяются при рассмотренных значениях на 10-15%. В спектре π -мезонов также можно наблюдать значительные изменения при переходе от одного значения m_0 к другому. Как и следовало ожидать, более тяжелые ядра-мишени удобнее для исследования эффекта формирования частиц.

На рис.3 и 4 приведены распределения множественности образовавшихся нуклонов, а также нетто-заряда $Q = n^+ - n^-$. Здесь также заметна определенная чувствительность рассчитанных величин при изменении m_0 .

*Последние результаты были получены П.П.Темниковым и использовались им для других полей.

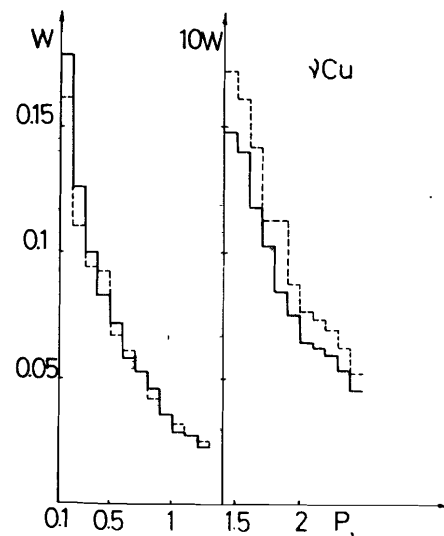


Рис.1. Импульсные распределения пионов, родившихся в νCu -взаимодействии. Значения параметров $m_0 \rightarrow \infty$ (—) и $m_0 = 0,4$ ГэВ (---). Средние значения импульсов равны $\bar{p} = (0,814 \pm \pm 0,005)$ ГэВ/с при $m_0 \rightarrow \infty$ и $\bar{p} = (0,898 \pm \pm 0,005)$ ГэВ/с при $m_0 = 0,4$ ГэВ.

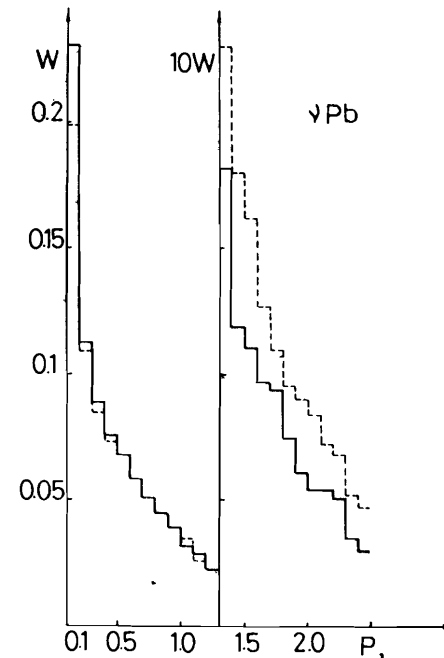


Рис.2. Импульсные распределения пионов, родившихся в νPb -взаимодействии. Значения параметров $m_0 \rightarrow \infty$ (—) и $m_0 = 0,4$ ГэВ (---). Средние значения импульсов равны $\bar{p} = (0,746 \pm 0,005)$ ГэВ/с при $m_0 \rightarrow \infty$ и $\bar{p} = (0,867 \pm 0,005)$ ГэВ/с при $m_0 = 0,4$ ГэВ.

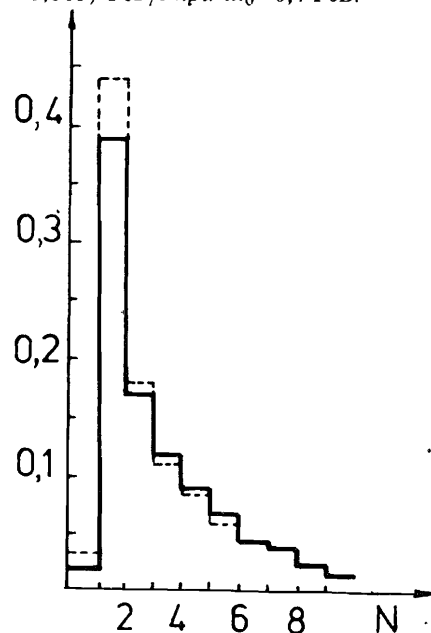


Рис.3. Распределения по множественности нуклонов, родившихся в νCu -взаимодействии. Значения параметров равны $m_0 \rightarrow \infty$ (—) и $m_0 = 0,4$ ГэВ (---). Средние значения множественностей $\bar{N} = 3,16 \pm 0,03$ ($m_0 \rightarrow \infty$), $\bar{N} = 2,79 \pm \pm 0,03$ ($m_0 = 0,4$ ГэВ).

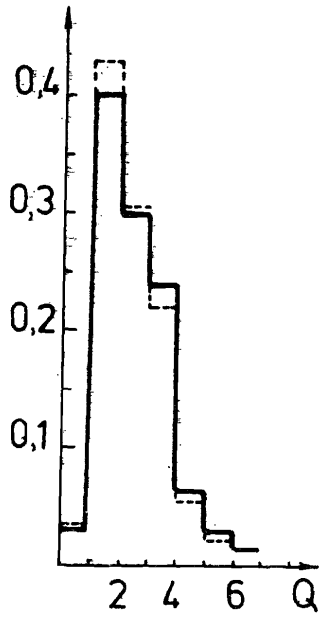


Рис.4. Распределения нетто-заряда $Q = n^+ - n^-$ частиц, родившихся во взаимодействии нейтрино с медью. Значения параметров $m_0 \rightarrow \infty$ (—) и $m_0 = 0,4$ ГэВ (---). Средние значения Q равны: $\bar{Q} = 2,05 \pm 0,02$ ($m_0 \rightarrow \infty$) и $\bar{Q} = 1,91 \pm 0,02$ ($m_0 = 0,4$ ГэВ).

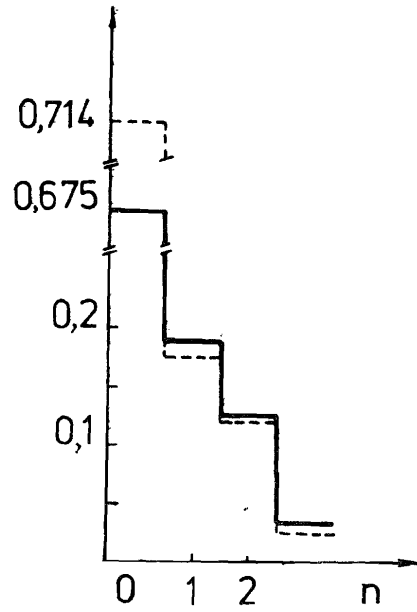


Рис.5. Распределение по множественности нуклонов, родившихся в νCu -взаимодействии и вылетевших в заднюю полусферу. Значения параметров: $m_0 \rightarrow \infty$ (—), $m_0 = 0,4$ ГэВ (---). Средние значения множественностей $\bar{n} = 0,532 \pm 0,005$ (—) и $\bar{n} = 0,454 \pm 0,004$ ($m_0 = 0,4$ ГэВ).

На рис.5 показаны распределения "кумулятивных" нуклонов. В рамках модели такие нуклоны, вылетающие в заднюю полусферу, в основном образуются из-за наличия поглощения пионов в ядре, а также многократных перерассеяний на нуклонах ядра. С уменьшением m_0 уменьшается число внутриядерных перерассеяний, и число "кумулятивных" нуклонов также уменьшается.

Интересно проследить за изменением величин, определяемых развитием внутриядерного каскада в различных ядрах в νA -столкновении при разных энергиях нейтрино. В табл. 1 приведены данные, характеризующие процесс неупругого взаимодействия нейтрино с медью при различных максимальных энергиях нейтрино E_ν (ГэВ) (первый столбец таблицы) и различных значениях параметра m_0 (ГэВ). Для сравнения приведены также соответствующие характеристики νN -столкновений, использованных в наших расчетах. Во втором столбце таблицы показаны

Таблица 1
Характеристики процесса неупругого взаимодействия нейтрино с медью при разных энергиях обрезаемых спектров нейтрино (E_ν , ГэВ) и различных значениях параметров длины формирования ($m_0 \rightarrow \infty$ — обычный каскад и $m_0 = 0,4$ ГэВ). В таблице указаны также (для сравнения) средние значения n_π (числа пионов) и E_K^π (кинетические энергии, ГэВ) для νN -взаимодействий, а также число внутриядерных взаимодействий (упругих и перезарядки, поглощений и неупругих)

E_ν/m_0	n_π		E_K^π		N_N	N_N	N_N	Q	K	L	M						
	νN	νCu	νN	νCu								(упр., пер.)	(погл.)	(неупр.)			
	∞	0,4	∞	0,4	∞	0,4	∞	0,4	∞	0,4	∞						
3	2,34	2,06	0,329	0,286	0,312	2,50	2,37	0,411	0,362	1,75	1,69	3,68	3,60	0,246	0,215	0,153	0,121
6	2,40	2,35	0,385	0,334	0,355	2,62	2,51	0,411	0,403	1,79	1,78	3,81	3,80	0,242	0,233	0,197	0,151
9	2,56	2,53	0,430	0,369	0,393	2,73	2,58	0,442	0,413	1,84	1,80	3,96	3,86	0,252	0,245	0,232	0,175
12	2,70	2,71	0,482	0,411	0,448	2,86	2,63	0,468	0,421	1,90	1,83	4,14	3,90	0,263	0,248	0,273	0,191
15	2,86	2,89	0,534	0,455	0,499	2,93	2,68	0,487	0,431	1,94	1,85	4,21	3,94	0,274	0,251	0,314	0,218
18	2,98	3,06	0,588	0,500	0,555	2,99	2,72	0,494	0,441	1,96	1,87	4,26	3,93	0,274	0,259	0,359	0,243
21	3,08	3,20	0,651	0,554	0,615	3,03	2,74	0,506	0,446	1,99	1,89	4,30	3,94	0,275	0,261	0,389	0,257
24	3,22	3,40	0,733	0,617	0,689	3,14	2,77	0,529	0,451	2,04	1,90	4,42	3,93	0,284	0,266	0,463	0,284
27	3,30	3,52	0,807	0,676	0,758	3,16	2,79	0,532	0,454	2,05	1,91	4,44	3,94	0,285	0,267	0,504	0,303

Таблица 2
Характеристики процесса неупругого взаимодействия нейтрино со свинцом. Обозначения такие же, как и в табл. 1

E_ν / m_0	$n_\pi / \nu N$	$n_\pi / \nu Pb$	$E_K^\pi / \nu N$	$E_K^\pi / \nu Pb$	$N_N / \nu Pb$	$N_N / \cos\theta_L < 0$	$Q / \nu Pb$	K (упр., пер.)	L (полг.)	M (неупр.)								
3	2,34	1,97	1,83	0,329	0,264	0,298	3,06	3,07	0,598	0,626	1,53	1,46	7,66	8,15	0,414	0,441	0,226	0,211
6	2,40	2,21	2,09	0,385	0,313	0,353	3,29	3,27	0,651	0,671	1,62	1,52	8,06	8,77	0,435	0,468	0,279	0,272
9	2,56	2,40	2,26	0,430	0,351	0,397	3,46	3,38	0,694	0,695	1,66	1,58	8,54	8,92	0,459	0,485	0,329	0,289
12	2,70	2,61	2,43	0,482	0,385	0,445	3,69	3,49	0,753	0,717	1,72	1,63	9,09	9,22	0,483	0,502	0,416	0,337
15	2,86	2,79	2,61	0,534	0,426	0,493	3,85	3,58	0,780	0,730	1,78	1,66	9,33	9,36	0,504	0,515	0,487	0,379
18	2,98	2,96	2,78	0,588	0,468	0,540	4,01	3,66	0,828	0,744	1,83	1,69	9,72	9,48	0,526	0,519	0,558	0,414
21	3,08	3,12	2,94	0,651	0,513	0,590	4,19	3,80	0,863	0,776	1,87	1,74	10,0	9,77	0,549	0,536	0,639	0,468
24	3,22	3,36	3,12	0,733	0,568	0,665	4,38	3,88	0,908	0,793	1,93	1,78	10,4	9,93	0,574	0,547	0,749	0,519
27	3,30	3,50	3,22	0,807	0,618	0,730	4,48	3,93	0,930	0,805	1,97	1,80	10,6	10	0,583	0,554	0,824	0,552

средние множественности пионов $n_\pi(\nu N)$, родившихся в элементарном νN -взаимодействии, в пятом столбце — кинетические энергии $E_K^\pi(\nu N)$. Видно, что модель (при низких энергиях нейтрино) предсказывает уменьшение множественности пионов $n_\pi(\nu A)$ в νA -взаимодействии по сравнению с νN -взаимодействиями. Это уменьшение объясняется поглощением пионов в ядре. Число поглощенных пионов в ядре представлено в 16 и 17 столбцах таблицы.

Интересно отметить, что при $E_\nu \approx 12$ ГэВ и $m_0 \rightarrow \infty$ $n_\pi(\nu A) \approx n_\pi(\nu N)$, несмотря на наличие неупругих внутриядерных взаимодействий. В данном случае число пионов, родившихся в неупругих внутриядерных взаимодействиях, примерно компенсируется числом пионов, поглотившихся в ядре (числа неупругих внутриядерных взаимодействий и числа поглощенных в ядре пионов см. в 16:19 столбцах таблицы). Однако при $E_\nu \approx 12$ ГэВ и $m_0 = 0,4$ ГэВ $n_\pi(\nu A) < n_\pi(\nu N)$. Последнее неравенство является одним из следствий предсказания модели с учетом длины формирования: с уменьшением m_0 уменьшается число неупругих внутриядерных взаимодействий (особенно при более высоких энергиях, см. 18 и 19 столбцы таблицы). По этой же причине равенство $n_\pi(\nu A) \approx n_\pi(\nu N)$ (при $m_0 = 0,4$ ГэВ) имеет место лишь в области энергий $E_\nu \gtrsim 27$ ГэВ (а не при $E \approx 12$ ГэВ, как для параметра $m_0 \rightarrow \infty$).

Естественно также, что низкоэнергетическая компонента внутриядерного каскада слабо зависит от величины m_0 . Это, в частности, видно из 14 и 15 столбцов табл. 1, в которых представлены средние числа упругих взаимодействий (а также перезарядки) при различных энергиях нейтрино E_ν . Такие взаимодействия инициируются нуклонами отдачи и относятся к области низких энергий.

В таблице 2 приведены данные для взаимодействия нейтрино со свинцом.

Таким образом, в рамках модели есть возможность теоретически исследовать элементы пространственно-временной картины развития взаимодействий нейтрино с ядрами. Сравнение теории с планируемым экспериментом помогло бы уточнить модель и величину ее основного параметра — m_0 . Особый интерес представляют тяжелые ядра-мишени. Важную информацию, по-видимому, можно получить из анализа корреляционных характеристик вторичных частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елисеев С.М., Юлдашев Б.С.-ЯФ, 1984, 40, с.944.
2. Азимов С.А. и др. ОИЯИ, 1-85-89, Дубна, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 декабря 1987 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р.55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р.00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р.50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р.30 к.
D1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р.50 к.
D10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программирования и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983.	3 р.50 к.
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р.75 к.
D11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.00 к.
D13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р.80 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р.75 к.
D3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р.50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. /2 тома/	13 р.50 к.
D1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. /2 тома/	7 р.35 к.
D9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. /2 тома/	13 р.45 к.
D7-87-63	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986	7 р.10 к.
D2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа-86". Дубна, 1986	4 р.45 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Гришин В.Г., Елисеев С.М.

P2-87-859

Моделирование нейтрино-ядерных взаимодействий при энергиях $E = 3:30$ ГэВ

Проведено теоретическое исследование глубоконеупругого нейтрино-ядерного взаимодействия при энергиях $3:30$ ГэВ методом моделирования. Расчеты проводились методом Монте-Карло при условиях, близких к планируемому эксперименту на серпуховском ускорителе. Использовалась модель многократного рассеяния частиц в ядре с учетом длины их формирования. Изучены характеристики ветвящихся процессов в ядрах свинца и меди при разных энергиях нейтрино и различных параметрах длины формирования. Показано, что во многих случаях для исследования пространственно-временного развития множественного процесса удобно использовать тяжелые ядра-мишени.

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод Т.Ю.Думбрайс

Grishin V.G., Eliseev S.M.

P2-87-859

Simulation of Neutrino-Nucleus Interactions at Energies $E = 3:30$ GeV

Theoretical study of deep inelastic neutrino-nucleus interaction at $3:30$ GeV is made by the simulation method. Calculations are carried out by Monte-Carlo method under conditions close to the planned experiment. Use was made of the model of multiple scattering of particles with the length of their formation (formation zone effect) taken into account. Characteristics are studied of branching processes in lead and copper nuclei at different neutrino energies and parameters of the formation length. It is shown that in many cases it is convenient to utilize heavy nucleus-targets for investigating the space-time evolution of multiparticle processes.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987