

КВАЗИУПРУГИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРИНО С ЯДРАМИ В ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЕГУЩЕЙ АКСИАЛЬНОЙ МАССЫ НУКЛОНА

К. С. Кузьмин^{1,2}, *В. А. Наумов*¹, *О. Н. Петрова*^{1,*}

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва

В рамках модели «бегущей» (зависящей от энергии нейтрино) аксиальной массы нуклона изучаются неопределенности предсказаний скоростей счета событий квазиупругого рассеяния нейтрино и антинейтрино на ядерных мишенях, используемых в ускорительных экспериментах по измерению параметров смешивания нейтрино.

The uncertainties in predicting the event rates of neutrino and antineutrino quasielastic scattering on nuclear targets used in the accelerator experiments for measuring the neutrino mixing parameters are studied within the model of “running” (dependent on the neutrino energy) axial mass of the nucleon.

PACS: 13.15.+g; 13.60.Hb; 14.60.Lm; 14.60.Pq; 25.30.Pt

ВВЕДЕНИЕ

Наибольшую неопределенность в расчет сечений квазиупругого рассеяния, идущего за счет заряженных токов (CCQE), нейтрино на нуклонах вносит аксиальный формфактор нуклона $F_A(q^2)$. Как правило, в вычислениях используется дипольная параметризация зависимости F_A от квадрата переданного 4-импульса q^2 , в которую входит параметр M_A (аксиальная масса нуклона), измеренный с невысокой точностью. В работе предлагается метод расчета QE-сечений рассеяния нейтрино на ядрах в рамках модели релятивистского ферми-газа (РФГ) [1] с модифицированной трактовкой аксиальной массы нуклона, позволяющей существенно снизить неопределенности расчета сечений и, следовательно, более надежно определять параметры смешивания нейтрино в современных ускорительных экспериментах. Результаты расчетов

*E-mail: redponick@gmail.com

иллюстрируются на примере эксперимента $\text{NO}\nu\text{A}$ (FNAL) [2], нацеленного на измерение фазы CP-нарушения δ_{CP} , определение иерархии масс нейтрино и уточнение углов смешивания θ_{23} и θ_{13} . $\text{NO}\nu\text{A}$ — так называемый внеосевой («off-axis») эксперимент с двумя детекторами, использующими в качестве мишеней углеродосодержащий сцинтиллятор. Конструкция детекторов позволяет выделять QE-события по их топологии. Дальний детектор массой 14 кт расположен под углом 14 мрад к оси пучка мюонных (анти)нейтрино NuMI и находится на расстоянии 810 км от ближнего калибровочного детектора.

БЕГУЩАЯ АКСИАЛЬНАЯ МАССА НУКЛОНА

Анализ экспериментальных данных по измерению полных и дифференциальных QE-сечений и q^2 -распределений в $\nu_\mu\text{D}$ -реакциях приводит к значению $M_A \approx 1$ ГэВ [3–5]. Это значение хорошо описывает результаты экспериментов на ядерных мишенях с $A > 2$ при средней энергии ν_μ - и $\bar{\nu}_\mu$ -пучков, $\langle E_\nu \rangle$, выше нескольких ГэВ (таких как NOMAD, CERN). Однако для описания данных недавно проведенных экспериментов MINER νA и MiniBooNE (FNAL)* по измерению дифференциальных и дважды дифференциальных сечений CC-взаимодействия ν_μ и $\bar{\nu}_\mu$ на углеродосодержащих мишенях при $\langle E_\nu \rangle \lesssim 1$ ГэВ значение M_A необходимо существенно увеличить. Этот эффект, очевидно, связан с неприменимостью РФГ-модели в ее стандартной формулировке для расчета ядерных поправок при низких энергиях. Структурные функции T_i , описывающие QE-рассеяние на ядре, зависят не только от q^2 , но и от переданных ядру энергии q_0 и 3-импульса $|\mathbf{q}|$. С учетом сохранения энергии-импульса эта зависимость сводится (в лабораторной системе) к зависимости T_i от q^2 и энергии нейтрино E_ν , что позволяет свести учет ядерных эффектов, выходящих за рамки РФГ, к замене параметра M_A в структурных функциях на эмпирическую, убывающую с энергией функцию $M_A^{\text{run}} = M_A^{\text{run}}(E_\nu)$ — «бегущую» аксиальную массу. Детальный статистический анализ имеющихся ускорительных данных показал, что простейшая параметризация $M_A^{\text{run}} = M_0 (1 + E_0/E_\nu)$ обеспечивает хорошее описание полных, дифференциальных и дважды дифференциальных QE-сечений, а также q^2 -распределений для всех ядерных мишеней, используемых в нейтринных экспериментах, при значениях параметров $M_0 = (1,006 \pm 0,025)$ ГэВ и $E_0 = 0,334_{-0,054}^{+0,058}$ ГэВ. Для расчета электромагнитных формфакторов нуклона использовалась модель, описанная в [7]. Параметр M_0 , значение которого близко к токовому значению M_A , извлеченному из дейтериевых данных, можно отождествить с истинной (токовой) аксиальной массой M_A .

*Ссылки на статьи с экспериментальными результатами приведены в [4, 5].

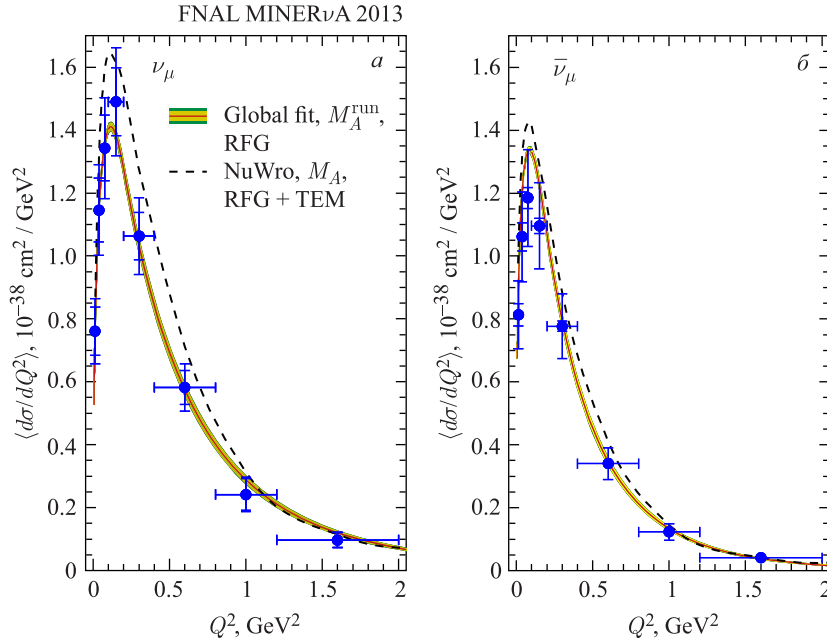


Рис. 1. Усредненные по спектру дифференциальные сечения QE-рассеяния ν_μ (a) и $\bar{\nu}_\mu$ (б), полученные в эксперименте MINERνA: сплошная кривая и полосы — расчет с M_A^{run} с учетом неопределенностей параметров M_0 и E_0 на 63%-м уровне значимости; штриховая — расчет, выполненный с Монте-Карло генератором NuWro в модели РФГ + TEM [6] при $M_A = 0,99$ ГэВ согласно [3]

На рис. 1 показано сравнение рассчитанных нами дифференциальных сечений QE-рассеяния ν_μ и $\bar{\nu}_\mu$ на нуклонах углеродосодержащей мишени с данными эксперимента MINERνA. Сравнение расчетов с другими современными данными приведено в работах [4, 5].

На рис. 2 показаны ожидаемые числа событий, вызванных QE-взаимодействиями нейтрино и антинейтрино в дальнем детекторе NOνA. Числа событий определяются потоком (анти)нейтрино от ускорителя, вероятностями флейворных осцилляций, сечениями взаимодействия (анти)нейтрино с веществом детектора и эффективностью регистрации событий данного типа (полагалась равной единице в данном примере). Для расчета усиления эффекта CP-нарушения в дальнем детекторе NOνA за счет когерентного рассеяния нейтрино на электронах при прохождении пучка сквозь вещество Земли (МСВ-механизм) использована модель плотности земной коры CRUST 1.0 [8], но вместо меняющейся вдоль траектории пучка плотности использовалось ее эффективное постоянное значение, наилучшим образом воспроизводящее

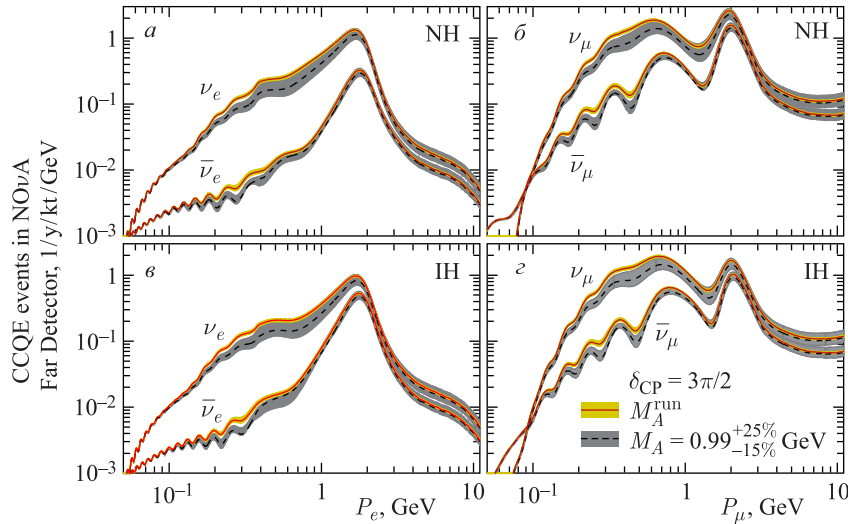


Рис. 2. Числа QE-событий, индуцированные ν_e и ν_μ в ν -моду, $\bar{\nu}_e$ и $\bar{\nu}_\mu$ в $\bar{\nu}$ -моду, в дальнем детекторе NO ν A при $\delta_{\text{CP}} = 3\pi/2$. Расчет сделан в предположении нормальной (а, б) и обратной (в, г) иерархий масс нейтрино. Показаны расчеты, использующие постоянное значение M_A , принятое в эксперименте NO ν A по умолчанию, и с M_A^{run} . Полосы неопределенности у кривых соответствуют неопределенностям M_A и M_A^{run} на уровне 1σ

результаты расчета с модельным профилем плотности (см. [5]). Для среды с постоянной плотностью вероятности флейворных переходов $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ вычислялись по точному решению эволюционного уравнения (см., например, [9]). Параметры смешивания и разности квадратов масс нейтрино взяты из [10].

ВЫВОДЫ

Учет эффективной зависимости M_A от энергии приводит к общему увеличению чисел событий и значительному уменьшению систематической погрешности, обусловленной неопределенностями расчета сечений взаимодействия (анти)нейтрино с ядрами. Метод бегущей аксиальной массы можно использовать для моделирования событий и обработки данных ускорительных экспериментов по изучению нейтринных осцилляций.

Благодарности. Авторы благодарят Л. Д. Колупаеву, А. Г. Ольшевского, О. Б. Самойлова, Д. В. Тайченачева, И. М. Шандрова и А. С. Шешукова за полезные обсуждения и помощь в работе, а также коллаборацию NO ν A за предоставленную информацию.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научных проектов № 14-22-03090 и № 16-02-01104-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smith R. A., Moniz E. J.* // Nucl. Phys. B. 1972. V. 43. P. 605; Erratum // Nucl. Phys. B. 1975. V. 101. P. 547.
2. *Patterson R. B. (on behalf of the NO ν A Collab.)* // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2013. V. 151. P. 235; arXiv:1209.0716 [hep-ex].
3. *Kuzmin K. S., Lyubushkin V. V., Naumov V. A.* // Eur. Phys. J. C. 2008. V. 54. P. 517; arXiv:0712.4384 [hep-ph].
4. *Kakorin I. D., Kuzmin K. S., Naumov V. A.* NO ν A Internal Document 23018.
5. *Kolupaeva L. D. et al.* // Mod. Phys. Lett. A. 2016. V. 31, No. 12. P. 1650077; arXiv:1603.07451 [hep-ph].
6. *Bodek A. et al.* arXiv:1310.7669 [nucl-ex].
7. *Bodek A. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2008. V. 110. P. 082004; arXiv:0709.3538 [hep-ex].
8. *Laske G. et al.* // Geophys. Res. Abstr. 2013. V. 15. Abstract EGU2013-2658.
9. *Наумов В. А.* // ЖЭТФ. 1992. Т. 101. С. 3.
10. *Olive K. A. et al. (Particle Data Group)* // Chin. Phys. C. 2014. V. 38. P. 090001.