

ОТЗЫВ официального оппонента, кандидата физико-математических наук
Наумова Вадима Александровича, на диссертацию
Лучука Станислава Владимировича
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему:
**«Квазиупругое взаимодействие мюонных нейтрино заряженным током
в экспериментах MiniBooNE и NOvA»**

по специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Впечатляющий прогресс в нейтринной физике и астрофизике, достигнутый за последние десятилетия, обусловлен тем, что результаты многочисленных экспериментов с солнечными, атмосферными, реакторными и ускорительными нейтрино, а также астрофизические и космологические ограничения на модели физики частиц удалось самосогласованно объяснить на основе концепции нейтринных осцилляций. В рамках этой концепции нейтрино с определёнными флейворами являются суперпозициями частиц, обладающих определёнными массами, но не имеющих определённых флейворов. Т.о., нейтринный сектор Стандартной Модели (СМ) оказался подобным кварковому сектору с той, однако фундаментальной разницей, что чрезвычайно малые массы нейтрино трудно объяснить стандартным хиггсовским механизмом генерации масс фермионов. Параметры осцилляций (углы смешивания, разности квадратов масс) измерены в настоящее время с довольно высокой точностью, но всё ещё плохо известны фаза CP-нарушения, иерархия (спектр) и абсолютные значения масс нейтрино. Дальнейший прогресс здесь возможен только при значительном увеличении точности измерений в современных и будущих нейтринных экспериментах, а также при повышении надёжности феноменологических моделей, используемых при обработке экспериментальных данных. Такие модели обычно содержат набор параметров¹, которые могут быть определены только подгонкой (в хорошем смысле) к экспериментальным данным.

Перспективными экспериментами, в которых можно ожидать качественного улучшения точности измерений, являются ускорительные эксперименты с «длинной базой» [accelerator long-base line (LBL) neutrino experiments], в которых основные ограничения точности связаны с неопределённостями в расчётах потоков и энергетических спектров (анти)нейтрино, а также сечений взаимодействий нейтрино с атомными ядрами, входящими в состав детекторов (νA -взаимодействий). При энергиях нейтрино ниже нескольких ГэВ основной вклад в νA сечения вносят квазиупругоподобные взаимодействия нейтрино со связанными в ядре нуклонами. Работа Лучука С. В. посвящена исследованию именно таких взаимодействий, так что актуальность и важность задачи для физики нейтрино сомнений не вызывает.

Диссертация Лучука С. В. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Она содержит 109 страниц, в том числе 31 рисунок.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, представлены цели и задачи работы, её научная новизна и практическая значимость. Описаны методы исследования, положения, выносимые на защиту, указан личный вклад автора.

В первой главе приводится теоретическое описание изучаемых процессов. Рассматриваются инклюзивные дифференциальные сечения квазиупругого рассеяния электронов и нейтрино на ядрах. Представлен общий вид лептонного и адронного тензоров, а также продольные и поперечные функции отклика. Рассматриваются процессы мезонных обменных токов (2p-2h MEC).

Во второй главе дано описание релятивистской модели искаженных волн (RDWIA) и параметризации 2p-2h MEC, используемых в дальнейшем для вычисления νA сечений. Объединённая модель учитывает также вклад рассеяния на коррелированных парах нуклонов. Описан метод определения аксиального форм-фактора F_A (как функции квадрата переданного 4-импульса $q^2 = -Q^2$) и «дипольной» аксиальной массы нуклона M_A из экспериментальных данных по дифференциальным сечениям квазиупругоподобного νA рассеяния.

В третьей главе представлено сравнение вычисленных электромагнитных функций отклика и дифференциальных сечений рассеяния электронов на углероде с экспериментальными данными. Это позволило проверить точность расчета вклада векторных электрослабых токов в RDWIA+MEC модели. Изучены эффекты двухчастичных MEC и влияние большой аксиальной массы на дифференциальные сечения рассеяния нейтрино на ядрах.

В четвертой главе из сравнения результатов модели RDWIA+MEC с данными эксперимента MiniBooNE (FNAL) по рассеянию нейтрино на ядрах углерода определяется аксиальный форм-фактор нуклона и значение M_A . При

¹ А порой и функций; примером могут служить структурные функции нуклона.

найденном значении M_A оцениваются усреднённые по спектру нейтрино дифференциальные сечения рассеяния при энергиях NOvA – одного из крупнейших современных LBL экспериментов. Эти результаты могут быть проверены на ближнем детекторе NOvA и использованы при анализе осцилляционных данных в дальнем детекторе.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В работе для описания квазиупругоподобного рассеяния нейтрино на ядрах впервые была применена объединенная модель искаженных волн в импульсном приближении и вкладов двухчастичных MEC. В рамках данной модели впервые получена зависимость аксиального форм-фактора нуклона от Q^2 , значение M_A , сделана оценка квазиупругих сечений рассеяния нейтрино и антинейтрино на ядрах при энергиях эксперимента NOvA. Полученные результаты свидетельствуют о научной новизне работы. Показано, что предложенная модель RDWIA+MEC способна правильно описывать экспериментальные данные, поэтому она может использоваться в расчетах сечений рассеяния лептонов на других ядерных мишенях. Этим определяется теоретическая значимость работы. Практическая значимость выражается в получении зависимости аксиального форм-фактора нуклона от Q^2 .

Положения, выносимые на защиту диссертации, ясно сформулированы и обоснованы. Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением сечений, рассчитанных в модели RDWIA+MEC, с экспериментальными данными по рассеянию электронов на ядрах углерода, кальция и аргона.

Достоинством диссертационной работы является вычисление сечений квазиупругоподобных процессов рассеяния лептонов на ядрах в широкой кинематической области. При расчетах были учтены взаимодействия адронов в конечном состоянии, корреляции пар нуклонов в ядре и мезонные обменные токи. Диссертация Лучука С. В. выполнена на высоком уровне. Продемонстрировано хорошее владение материалом в области исследования, умение анализировать полученные результаты. Выводы достаточно ясно сформулированы. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертационной работы. Прделанная работа говорит о высокой научной квалификации автора.

Вместе с тем следует отметить наличие мелких ошибок, оговорок, спорных, на мой взгляд, утверждений и использование нестандартной (и неудачной) терминологии, а именно:

- с. 4 – Формула $v_\alpha = \sum U_{\alpha i} v_i$ справедлива для полей v_α и v_i . Для состояний нужно заменить $U_{\alpha i}$ на $U_{\alpha i}^*$.
- с. 28 – Неудачная конструкция: «...тензоры построены на слабом J^μ заряженном j_μ и адронном токах.» Здесь же: «Константа \tilde{G} ». Но \tilde{G} конечно не константа, а функция Q^2 .
- с. 29 – «Нуклоны на немассовой поверхности». Термин «немассовая поверхность» очень неудачен (поскольку это 3-мерное подпространство импульсов, а не поверхность). К сожалению, он иногда используется в литературе. Было бы корректнее писать «нуклоны вне массовой поверхности» [off-shell nucleons].
- с. 30 – «Преобразования Гордона». Правильнее – «разложение (или тождество) Гордона» [Gordon decomposition (identity)]. Не объяснены ингредиенты (1.25). В частности, не сразу можно догадаться, что U^β и \bar{U}^α это спинор Дирака (удовлетворяющий его же уравнению) и дираковски сопряженный спинор, соответственно, а α и β – отнюдь не лоренцевы, а спиновые индексы. Правильная запись разложения Гордона в обозначениях, использованных в определении вершинной функции (1.23) имеет вид:²

$$\bar{u}_{s'}(p')\gamma^\mu u_s(p) = \frac{1}{2m}\bar{u}_{s'}(p') [(p' + p)^\mu + i\sigma^{\mu\nu}(p' - p)_\nu] u_s(p),$$

где предполагается, что спинор нормирован следующим образом:

$$\sum_{s=\pm} u_s(p)\bar{u}_s(p) = \hat{p} + m.$$

- с. 32 – В (1.30) нужно поднять индекс β , т.е. сделать замену $q_\beta \mapsto q^\beta$.
Здесь же: «При $Q^2 < 1$ ГэВ зависимость форм-факторов от Q^2 хорошо описывается дипольной

²Отмечу здесь, что в диссертации для массы нуклона используются вперемешку обозначения M , m_N и m . Разложение Гордона разумеется справедливо для фермиона произвольной массы $m > 0$.

параметризацией.» Это крайне сомнительное утверждение. Для форм-факторов протона дипольная параметризация годится в лучшем случае при $Q^2 < (0.1 - 0.2)$ ГэВ, а для форм-факторов нейтрона она совсем никуда не годится и может использоваться лишь как грубое приближение. К счастью, как следует из публикаций автора, эта грубая модель не используется в дальнейшем, хотя об этом в диссертации не упоминается.³

- с. 33** – В (1.34) нужно поднять индекс β , т.е. сделать замену $q_\beta \mapsto q^\beta$.
На этой же странице: из (1.37) следует противоположный знак в правой части (1.38). Впрочем второе равенство в (1.34) вообще весьма условно, т.к. приравнивает константу $g_0 f_\pi$ функции $2M^2 F_A(Q^2)$. Соотношение Голдбергера-Треймана [Goldberger-Treiman relation] (не «Гольдберга-Треймана!») всего лишь даёт подсказку для выбора разумной параметризации $F_P(Q^2)$ [пропорциональность $F_A(Q^2)$, пионный полюс, предел при $Q^2 \rightarrow 0$].
- с. 34** – «...вклад F_P мал, по сравнению со вкладом других форм-факторов в квазиупругое рассеяние лептонов...» Этот вклад мал только для $\nu_e/\bar{\nu}_e$ и $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$, но существен для $\nu_\tau/\bar{\nu}_\tau$. Как мне сообщил автор, псевдоскалярный форм-фактор в его расчётах учитывался, хотя в тексте диссертации это не упоминается.
Здесь-же: «Аксиальный радиус нуклона можно выразить через M_A ». Можно, но почему-то этого не сделано. Где-то после (1.41) уместно было бы написать: «Отсюда получаем $\langle r_A^2 \rangle = 12/M_A^2$ ».
- с. 36** – «Тогда, соответствующий адронный тензор дается [88] интегрированием по всем 2p-2h возбужденным состояниям с двумя дырками h_1, h_2 и двумя частицами p'_1, p'_2 в конечном состоянии.» В работе [89], на которой основан обсуждаемый формализм учёта МЕС, $h_{1,2}$ и $p'_{1,2}$ это всё-же не дырки и частицы, а их 4-импульсы. Но ладно, здесь можно сообразить о чём идёт речь. Всё остальное в данном разделе диссертации изложено очень схематично и уяснить формализм без обращения к оригинальной статье трудно. Поскольку же, однако, этот формализм ниже не используется, было бы достаточно ограничиться просто парой ссылок на оригинальные работы. Кстати, ещё одно терминологическое замечание. Автор систематически называет мезонные обменные токи [meson-exchange currents (MECs)] токами «обменных мезонов», что режет слух.
- с. 37** – «Выражение (1.42) сводится к 7-му интегралу...». Конечно имеется в виду $7D$ (семимерный) интеграл, к которому сводится двенадцатимерный монстр (1.42) и на изучении которого сфокусирована работа [89].
- с. 41** – Опечатка в (2.8): $S_k \mapsto S_{k_i}$.
- с. 42** – Подпись к рис. 2 относится лишь к верхней панели, нижняя не описана. Видимо это импульсные распределения нуклонов.
- с. 66** – «...поскольку в параметризации аксиального форм-фактора G_A^5 используется значение $M_{AA} \approx M_A \approx 1$ ГэВ.» Но форм-фактор G_A^5 и параметр M_{AA} не фигурируют в диссертации ни до, ни после процитированного текста, т.е. не определяются и не обсуждаются...

Кроме того, имеются мелкие опечатки: **взависимости** (с. 6), **скейлингования** (с. 13), **меджу** (с. 70), **нетрино** (с. 86), **киниматики** (с. 96).

Более существенно то, что автор не обсуждает условия применимости модели RDWIA, т.е. допустимые диапазоны энергий начального лептона и переданных импульсов. Недостаточно объяснены наблюдаемые в некоторых кинематических областях разногласия между расчётом и экспериментальными данными по электромагнитным функциям отклика $R_{L,T}$ (см. рисунки в разделе 3.1). Было бы также полезно обсудить возможные причины и статистическую значимость большого расхождения между значениями M_A , извлекаемыми из данных по квазиупругому рассеянию (анти)нейтрину на водороде и дейтерии ($M_A \approx 1$ ГэВ) и из данных MiniBooNE ($M_A \approx 1.2$ ГэВ).

Всё вышеперечисленное, впрочем, относится главным образом к качеству и полноте изложения, а поэтому не влияет на представленные к защите результаты диссертации и, в целом, не снижает научную ценность и значимость выполненной автором работы.

³Вместо неё используется модель, предложенная в работе P. Mergell, Ulf-G. Meißner, D. Drechsel, “Dispersion-theoretical analysis of the nucleon electromagnetic formfactors,” Nucl. Phys.A **596** (1996) 367–396 [hep-ph/9506375].

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а его автор **Лучук Станислав Владимирович** заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент,
старший научный сотрудник,
начальник сектора «Нейтронная физика»,
лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова,
кандидат физико-математических наук

_____ В. А. Наумов
«31» августа 2023 года

Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)
141980, Дубна, ул. Жолио Кюри 6, ЛТФ
e-mail: vnaumov@theor.jinr.ru
Тел: +7 (496) 216 23 19

Подпись В. А. Наумова удостоверяю,
Учёный секретарь ЛТФ

_____ А. В. Андреев
«31» августа 2023 года

Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)
141980, Дубна, ул. Жолио Кюри 6, ЛТФ
e-mail: andreev@theor.jinr.ru
Тел.: +7 (496) 216 50 88

Наумов Вадим Александрович – кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц». Основные публикации по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет: [1–8] (см. список литературы).

Список литературы

- [1] A. V. Akindinov et al. Letter of interest for a neutrino beam from Protvino to KM3NeT/ORCA. *Eur. Phys. J. C*, 79(9):758, 2019.
- [2] L. Alvarez-Ruso et al. Recent highlights from GENIE v3. *Eur. Phys. J. ST*, 230(24):4449–4467, 2021.
- [3] I. D. Kakorin, K. K. Kuzmin, and V. A. Naumov. A unified empirical model for quasielastic interactions of neutrino and antineutrino with nuclei. *Phys. Part. Nucl. Lett.*, 17(3):265–288, 2020.
- [4] I. D. Kakorin, K. K. Kuzmin, and V. A. Naumov. Running axial mass of the nucleon as a phenomenological tool for calculating quasielastic neutrino–nucleus cross sections. *Eur. Phys. J. C*, 81(12):1142, 2021.
- [5] I. Ruiz Simo, I. D. Kakorin, V. A. Naumov, K. K. Kuzmin, and J. E. Amaro. Analysis of the kinematic boundaries of the quasielastic neutrino-nucleus cross section in the superscaling model with a relativistic effective mass. *Phys. Rev. D*, 105(1):013001, 2022.
- [6] J. Tena-Vidal et al. Neutrino-nucleon cross-section model tuning in GENIE v3. *Phys. Rev. D*, 104(7):072009, 2021.
- [7] J. Tena-Vidal et al. Hadronization model tuning in GENIE v3. *Phys. Rev. D*, 105(1):012009, 2022.
- [8] J. Tena-Vidal et al. Neutrino-nucleus $CC0\pi$ cross-section tuning in GENIE v3. *Phys. Rev. D*, 106(11):112001, 2022.