

2-99-87

На правах рукописи  
УДК 538.945

К-891

**КУЗНЕЦОВ**  
Валентин Евгеньевич

**ВВЕДЕНИЕ ТРЕТЬЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДИПОЛЯ  
В ФИЗИКУ НЕЙТРИНО**

Специальность: 01.04.16 — физика ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им.  
Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук В.М. Дубовик

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук О.А. Займидорога  
(ЛСВЭ, ОИЯИ)

кандидат физико-математических наук В.С. Замиралов  
(НИИЯФ МГУ)

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт прикладной физики  
Иркутского государственного университета

Защита диссертации состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 1999 г. на заседании  
диссертационного совета К047.01.01 при Лаборатории теоретической  
физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных ис-  
следований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного  
института ядерных исследований.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 1999 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор физико-математических наук

А.Е. Дорохов

### Актуальность темы

Огромное количество экспериментальных данных в физике нейтрино, зачастую противоречивых, до сих пор не дает ответов на самые фундаментальные вопросы теории нейтрино: какой природы является эта частица, дираковской или майорановской, каковы массы у нейтрино различных ароматов, и, наконец, какие у них электромагнитные свойства. Дираковское нейтрино может, в принципе, иметь магнитный и электрический дипольный моменты. В 1957 г. Я.Б. Зельдович в связи с открытием четности ввел третью электромагнитную характеристику частиц со спином  $1/2$ , назвал ее анаполем и предложил ее физическое толкование. Далее с участием А.М. Переломова, ими были сделаны оценки величины анаполя в слабых взаимодействиях и указаны возможные вызываемые им эффекты. Спустя 15 лет в рамках разрабатываемой в то время стандартной модели (СМ) были сделаны первые попытки вычислить данную характеристику для лептонов и кварков. Результаты оказались неоднозначными, и встал вопрос о перенормируемости и наблюдаемости данной характеристики в рамках СМ. Несколько ранее, в работах В.М. Дубовика и А.А. Чешкова, был окончательно выяснен статус третьего семейства мультипольных моментов, первый член которого был назван тороидным дипольным моментом. Было показано, что тороидный дипольный момент является более “физичной” характеристикой, чем анаполь. Именно он, по всем его свойствам, соответствует тому простому классическому аналогу - “точечному” тороидальному соленоиду, который указывался в начале для анаполя. В рамках мультипольного подхода анаполь, вообще говоря, оказался составной величиной: раз-

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

постью первой производной по времени от электрического дипольного момента (элемента линейного тока) и тороидного дипольного момента, заданных в одной точке и ориентированных по одной оси. Вследствие этого анаполь не может характеризовать процесс превращения тяжелой частицы в легкую с испусканием фотона. Вместе с тем, тороидный диполь и анаполь совпадают в нефизической точке для процесса излучения, когда массы начальной и конечной частицы равны друг другу. Последнее порождает большую путаницу в литературе. По изложенным выше причинам третья дипольная характеристика в электромагнитном токе будет называться только тороидным дипольным моментом.

В рамках СМ ситуация с вычислением тороидного дипольного момента элементарного фермиона оставалась неясной до 1992 года, до того, как были выявлены все расходимости в петлевых диаграммах и классифицированы способы их устранения. Поэтому сразу же встал вопрос о вычислении этой характеристики в рамках СМ для нейтрино и ее роли в различных процессах. Интерес к данной проблеме был также вызван фактом, установленным впервые А. Б. Окунем и И. Ю. Кобзаревым в 1972 году: если нейтрино — майорановская частица, то ее единственной электромагнитной характеристикой является тороидный дипольный момент. Позднее было замечено, что майорановские частицы с любым спином могут обладать моментами только тороидного мультипольного семейства, а интерес к майорановским частицам возрос в связи с развитием теории суперсимметрии.

Общий вид взаимодействия дираковского нейтрино с внешним электромагнитным полем выражается в нерелятивистском пределе следующим образом:

$$\mathcal{H}_{\text{int}}^{\text{Dirac}} \propto -\mu(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B}) - d(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E}) - \tau(\boldsymbol{\sigma} \cdot \text{rot } \mathbf{B}),$$

где  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{E}$  представляют собой магнитную и электрическую напряженности электромагнитного поля;  $\mu$ ,  $d$  и  $\tau$  — проекции на направление спина аномального магнитного, электрического и тороидного дипольных моментов. Приведем также для сравнения ковариантные анапольную и мультипольную параметризации электромагнитного тока частицы со спином  $1/2$ . При разных четностях начального и конечного состояния взаимодействие тока с электромагнитным полем выглядит

- при анапольной параметризации как

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_{\text{int}} &= eA(q^2, m_1^2, m_2^2) \bar{\psi}_2(x) [q^2 \gamma_\mu - \hat{q} q_\mu] \gamma_5 \psi_1(x) \mathcal{A}^\mu(x) \\ &\Rightarrow eA(q^2, m_1^2, m_2^2) \bar{\psi}_2(x) \gamma_\mu \gamma_5 \psi_1(x) \frac{\partial F^{\mu\nu}(x)}{\partial x^\nu} \\ &\Rightarrow eA(q^2, m_1^2, m_2^2) \bar{\psi}_2(x) \gamma_\mu \gamma_5 \psi_1(x) J_{\text{ext}}^\mu, \end{aligned}$$

- при мультипольной параметризации как

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_{\text{int}} &= ieT(q^2, m_1^2, m_2^2) \bar{\psi}_2(x) \varepsilon_{\mu\nu\lambda\rho} F^\nu q^\lambda \gamma^\rho \psi_1(x) \mathcal{A}^\mu(x) \\ &= eT(q^2, m_1^2, m_2^2) \bar{\psi}_2(x) \{ \Delta m \sigma_{\mu\nu} q^\nu + [q^2 \gamma_\mu - \hat{q} q_\mu] \} \gamma_5 \psi_1(x) \mathcal{A}^\mu(x) \\ &\stackrel{q^2=0}{\Rightarrow} e\Delta m T(q^2, m_1^2, m_2^2) \bar{\psi}_2(x) \sigma_{\mu\nu} \gamma_5 \psi_1(x) F^{\mu\nu}(x), \end{aligned}$$

где  $\psi_1(x), \psi_2(x)$  — волновые функции фермионов в свободных состояниях,  $A(q^2, m_1^2, m_2^2)$  и  $T(q^2, m_1^2, m_2^2)$  — анапольный и тороидный форм-факторы,  $\mathcal{A}^\mu(x)$  — 4-вектор-потенциал и  $F^{\mu\nu}(x)$  — тензор электромагнитного поля. Даже самое общее сравнение двух гамильтонианов сразу позволяют установить несколько фактов:

1. имеется совпадение между параметризациями при  $m_1 = m_2$ , что уже отмечалось выше;
2. анапольный ток не может быть ответственным за излучение ни при каких значениях параметров вершинной функции  $q^2, m_1^2, m_2^2$  и взаимодействует лишь локально с внешним током;

3. тороидный ток может взаимодействовать с внешним электромагнитным полем и может излучать;
4. вероятность излучения тороидным диполем на две степени по "частоте перехода"  $\Delta m := m_1 - m_2$  выше, чем вероятность излучения за счет оператора электрического дипольного момента  $\sigma_{\mu\nu} q_\nu \gamma_5$ . Однако при распаде тяжелой частицы в легкую эти вероятности могут давать сравнимый вклад, что часто не учитывается при расчетах процессов  $\nu_2 \rightarrow \nu_1 + \gamma$ .

Хотя общие соотношения между анапольным и тороидным форм-факторами были найдены еще в 1974 г. многие детали не были проработаны. Этот технический пробел был восполнен нами в недавних работах. Вычисление тороидного форм-фактора нейтрино и изучение его свойств – основной результат данной диссертационной работы. Следующим шагом стало изучение различных эффектов, вызываемых тороидным дипольным моментом нейтрино. Областью применения стали вопросы о вкладе тороидного дипольного момента в нейтринные осцилляции, сечения рассеяния нейтрино на электронах и более перспективные эффекты в различных средах, например, вычисление переходного излучения нейтрино, вызванного его тороидным дипольным моментом на границе раздела двух сред. Вакуумные эффекты, как и следовало ожидать, оказались небольшими и трудно доступными для экспериментаторов.

Однако если нейтрино окажутся майорановскими частицами, что не противоречит данным современных экспериментов и выводам теоретических исследований, то дальнейшее изучение их свойств может происходить двумя путями: либо путем увеличения/уменьшения энергии пучков нейтрино, либо за счет поиска эффективного усиления электромагнитных взаимодействий нейтрино в средах с высокой плотно-

стью локальных магнитных вихревых полей.

### Цель работы.

Вычисление тороидного дипольного момента дираковского и майорановского нейтрино в рамках стандартной модели; изучение влияния тороидного дипольного момента на осцилляции нейтрино, вклада тороидного дипольного момента в сечение рассеяния нейтрино на электронах и в интенсивность переходного излучения нейтрино на границе раздела двух сред.

### Научная новизна.

Проведено общего вида вычисление тороидного дипольного момента в предположении смешивания нейтрино при произвольных массах. Найдены тороидные форм-факторы трех нейтрино,  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ , для широкого спектра переданных импульсов,  $0 \leq q^2/2m_W^2 \leq 10^{-2}$ .

Получены соответствующие выражения для тороидного дипольного момента безмассовых нейтрино, и сделано обобщение на случай дираковского нейтрино. Можно говорить об универсальности тороидного дипольного момента нейтрино, т. к. он не исчезает с массой нейтрино и слабо зависит от ее величины.

Вычислен вклад тороидного дипольного момента в сечение рассеяния нейтрино на электронах.

Рассмотрен вопрос о вкладе тороидного дипольного момента в нейтринные осцилляции и предложен мысленный эксперимент по обнаружению геометрического резонанса в нейтринных осцилляциях.

Получены оценки переходного излучения нейтрино на границе раздела двух сред за счет его тороидного дипольного момента.

### Основные защищаемые положения.

Получены

- общее выражение для величины тороидного дипольного момента майорановского нейтрино,  $\tau_\nu = eT(0)$ :

$$T_i(0) \approx \frac{\sqrt{2}G_F}{12\pi^2} \left[ \sum_{\ell=e,\mu,\tau} |K_{\ell i}|^2 \left( 1 + \ln \frac{m_W^2}{4m_\ell^2} \right) - P_i \right],$$

где  $P_i$  – поляризационный вклад;

- выражение для энергии переходного излучения нейтрино за счет наличия у него тороидного дипольного момента:

$$\frac{d^2S}{d\theta d\omega} = \frac{T^2(0)\omega^6 \sin\theta}{8\pi^2} (R_1^2 - R_2^2) \times \left\{ 2 \sin^2\theta \left( 1 + \frac{n\omega \cos\theta}{p_{2z}} \right) + \frac{E_\nu E_2}{pp_{2z}} - 1 + \frac{m_\nu^2}{pp_{2z}} \right\},$$

где

$$R_i = \frac{1 - n_i^2}{n_i p - p_{2z} - n_i \omega \cos\theta},$$

$$S = \int_0^{E_\nu - m_\nu} d\omega \int_0^{\theta_{\max}} \frac{d^2S}{d\theta d\omega};$$

- выражения вклада тороидного дипольного момента в рассеяние нейтрино на электронах

$$\frac{\sigma_{\text{тор}}^\gamma}{\sigma_{SM}} = \frac{8\alpha^2 m_e f_1(E_\nu/m_e)}{\pi^2 E_\nu}, \quad \frac{\sigma_{\text{тор}}^Z}{\sigma_{SM}} = \frac{\alpha m_e f_2(E_\nu/m_e)}{\pi E_\nu};$$

- проведено обсуждение вопроса о вкладе тороидного дипольного момента в осцилляции нейтрино.

### Практическая ценность работы.

Полученные результаты создают базис для дальнейшего изучения свойств тороидного дипольного момента нейтрино в средах с большими неоднородными магнитными полями: активных галактических ядрах

и при изучении вопроса об эволюции нейтрино в ранней Вселенной и т. д., а также для постановки реального эксперимента по его обнаружению.

### Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 11 работ.

### Апробация работы.

Результаты, представленные в настоящей диссертации, докладывались на семинарах лабораторий теоретической физики и ядерных проблем ОИЯИ, лаборатории теоретической физики Иркутского Государственного Университета, на международных конференциях "New physics beyond the standard model and neutrino physics", NANP'97 (Дубна 1997), "XXVIII International Conference on High Energy Physics", ICHEP'96 (Варшава 1996).

Объем и структура диссертации Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и пяти приложений. Она содержит 28 рисунков, 7 таблиц и список литературы, включающий 125 ссылки. Общий объем диссертации составляет 149 страниц.

В Главе 1 (Введение) дается краткий экскурс в историю открытия нейтрино.

В Главе 2 (Теория нейтрино) рассматриваются различные аспекты физики нейтрино. Обсуждаются вопросы о природе нейтрино и ее массах, дается введение в формализм нейтринных осцилляций (в вакууме и веществе), обсуждаются электромагнитные свойства нейтрино. В заключении данной главы дается обзор широкого спектра экспериментальных данных, в том числе обсуждаются эксперименты по прямому изучению нейтринных масс, поиску нарушения лептонного

числа и эксперименты по поиску нейтринных осцилляций, с освещением тех экспериментальных работ, в которых принял участие автор.

**В Главе 3 (Тороидный момент нейтрино)** обсуждается история открытия тороидного дипольного момента, его отличия и сходство с анаполем. Затем приведена схема вычисления тороидного дипольного момента майорановского нейтрино в предположении полного смешивания и конечной массы нейтрино. Результаты расчетов обобщены на случай безмассовых и дираковских нейтрино. В заключении данной главы рассматривается вопрос о размерности и экспериментальном обнаружении дипольных моментов нейтрино.

**В Главе 4 (Тороидный дипольный момент нейтрино и его физические приложения)** полностью посвящена вопросу о физических приложениях тороидного дипольного момента нейтрино. Рассматриваются три задачи: вклад тороидного дипольного момента в сечение рассеяния нейтрино на электронах; переходное излучение нейтрино, вызванное его тороидным дипольным моментом, на границе раздела двух сред, и вклад тороидного дипольного момента в нейтринные осцилляции.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

**В пяти приложениях** вынесены технические вопросы: различие анапольной и мультипольной параметризации (сравнение анаполя и тороидного дипольного момента); набор правил Фейнмана для майорановских нейтрино в предположении смешивания массивных нейтрино; вычисление дисперсионных интегралов, явные выражения вкладов различных диаграмм в мнимую и реальную часть тороидного дипольного момента нейтрино, а также обсуждение вопроса об электромагнитном токе майорановского нейтрино.

**Основные результаты работы.**

- В рамках стандартной модели получен однопетлевой вклад в величину тороидного дипольного момента майорановского нейтрино для произвольной массы нейтрино в предположении полного смешивания. Вычисления проводились с помощью дисперсионного метода. Получены мнимые части различных вкладов в тороидный дипольный момент и по ним восстановлена реальная часть тороидного форм-фактора нейтрино в широком диапазоне переданных импульсов  $0 \leq q^2/2m_W^2 \leq 10^{-2}$ . Из этого результата получены выражения для тороидного дипольного момента безмассовых и дираковских нейтрино.
- Подсчитан вклад тороидного дипольного момента в сечение рассеяния нейтрино на электронах и вычислено дифференциальное сечение по кинетической энергии электрона отдачи.
- Проведен анализ вклада тороидного дипольного момента нейтрино в нейтринные осцилляции и предложена постановка эксперимента по проверке геометрического резонанса в нейтринных осцилляциях.
- Вычислено переходное излучение нейтрино, вызванное его тороидным дипольным моментом, на границе раздела двух сред. Получены дифференциальные распределения по углам и энергии фотона для полной энергии излучения нейтрино.

*По теме диссертации опубликованы следующие работы:*

1. Vladimir M. Dubovik and Valentin E. Kuznetsov, "The Toroid Dipole Moment of the Neutrino", Int. J. Mod. Phys. A13 (1998) 5257.
2. Elena N. Bukina, Vladimir M. Dubovik and Valentin E. Kuznetsov, "Transition Radiation of the Neutrino Toroid Dipole Moment" Phys. Lett. B 435, (1998) pp. 134.

3. J. Altegoer et. al. (V. E. Kuznetsov), "A search for  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  oscillations using the NOMAD detector", Phys. Lett. B 431 (1998) pp. 219.
4. J. Altegoer et. al. (V. E. Kuznetsov), "The NOMAD experiment at CERN SPS", Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A404 (1998) 96.
5. G. Baricchello et. al. (V. E. Kuznetsov), "A B4C-Silicon Target for the Detection of Neutrino Interactions" Nucl. Inst. Meth. Phys. A419 (1998) 1
6. A.S.Ayan et. al. (V. E. Kuznetsov), "A high sensitivity short baseline experiment to search for  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  oscillation", CERN-SPSC/97-5, SPSC/I 213 (1997).
7. Elena N. Bukina, Vladimir M. Dubovik and Valentin E. Kuznetsov, "Anapole or toroid dipole", JINR-Report no. P2-97-412 (1997).
8. E. N. Bukina, V. M. Dubovik and V. E. Kuznetsov, "Third electromagnetic characteristic of neutrino: Appearance, Estimations and Applications" Яд. Физ. 61 (1998) 1129 [Sov. Part. Atom. Nucl., 61 (1998) 1035].
9. Vladimir M. Dubovik and Valentin E. Kuznetsov, "The Toroid Moment of Majorana Neutrino" JINR-preprint E2-96-53.
10. S. E. Korenblit, V. E. Kuznetsov and V. A. Naumov, "Geometric phases for three-level non-hermitian system", Proc. Int. Conf. Quantum Systems: New Trends and Methods, Minsk 1995, ed. by A. O. Barut et al., Singapore, World Sci. (1995) p. 209.
11. Valentin E. Kuznetsov, Vadim A. Naumov, "Relationship Between the Kobayashi-Maskawa and Chau-Keung Presentations of the Quark Mixing Matrix", Il Nuovo Cimento Vol. 108 A (1995) 1451.

Рукопись поступила в издательский отдел  
2 апреля 1999 года.