

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе **Сатунина Петра Сергеевича** «Эффекты гипотетического нарушения Лоренц-инвариантности в астрофизике частиц высоких энергий», представленной на соискание ученой степени кандидата физико – математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

В диссертации изучаются процессы в квантовой электродинамике с включением дополнительных членов в исходном лагранжиане, нарушающими Лоренц-инвариантность, а также устанавливаются ограничения на параметры нарушения Лоренц-инвариантности из гипотетического наблюдения фотонов в космических лучах сверхвысоких энергий. Аргументация в пользу рассмотрения возможного нарушения Лоренц-инвариантности (ЛИ) основана, в частности, на неизбежности такого нарушения во многих моделях квантовой гравитации. Всплеск интереса к этому направлению после появления первых результатов в космических лучах сверхвысоких энергий, а затем статьи Коулмена и Глэшоу (1999) о возможных тестах Лоренц-инвариантности (ЛИ) при таких энергиях, побудил теоретиков искать сначала кинематические ограничения на параметры ЛИ (в работах Сигла и Галаверни), или, как например, в данной работе, динамические ограничения с расчетом матричных элементов, сечений или вероятностей известных процессов, следующих из расширения лагранжиана стандартной модели при включении новых ЛИ слагаемых.

Диссертация состоит из Введения, трех глав основного текста и Заключения, содержит 72 страницы машинописного текста, в том числе 1 рисунок, 1 таблицу и список литературы из 82 наименований. Основные результаты диссертации доложены на многочисленных международных конференциях, школах, а также на семинарах ряда российских научных учреждений. Результаты опубликованы в шести (6) работах, из которых 4 статьи из списка ВАК.

**Введение** начинается с мотивировки изучения ЛН, в частности, в моделях квантовой гравитации, и затем краткого обзора теоретических работ предшественников и проводимых экспериментов по поиску ограничений на параметры Расширенной Стандартной Модели (РСМ), описывающей нарушение ЛИ. К таким экспериментам относятся интерференционные типа Майкельсона-Морли в криогенных камерах, изучение осцилляций нейтральных мезонов, изучение атомных переходов. Во всех опытах устанавливались верхние границы на параметры РСМ 4-го порядка. **Петр Сатунин** рассматривает в расширенных моделях также операторы 6-го порядка, что может оказаться важным при сверхвысоких энергиях. Кроме того, соискатель рассматривает СРТ – симметрию точной в связи с сильным ограничением СРТ нарушения в экспериментах. Сохранение СРТ-симметрии запрещает появление ЛН операторов размерности пять из-за киральной структуры Стандартной Модели.

В **первой главе** правильно акцентируется внимание на изучении **электродинамических процессов при сверхвысоких энергиях**, так как именно в рамках стандартной квантовой электродинамики (КЭД) с сохранением лоренц-инвариантности сечения и вероятности этих процессов известны с наибольшей точностью. Помимо широко обсуждаемых новых ЛН эффектов, обязанных нарушению стандартных законов сохранения в ЛИ теориях, **Сатунин** рассматривает динамические ЛН эффекты, в частности, в электродинамических процессах первого порядка по константе тонкой структуры  $\alpha$ , таких как распад фотона на электрон-позитронную пару и черенковское излучение фотона электроном в вакууме. Эти процессы изучались и раньше (Клинкхамер и Шрек), но соискатель расширил поиск вероятностей (ширин) этих реакций введением в ЛН лагранжиан дополнительных слагаемых шестого порядка, играющими важную роль при сверхвысоких энергиях. В следующих порядках по  $\alpha$  рассмотрены рождение пар на мягком фотоне  $\gamma\gamma \rightarrow e^-e^+$  (процесс  $\sim \alpha^2$ ) и особо важный для формирования атмосферных ливней, вызванных космическими лучами сверхвысоких энергий, процесс Бете-Гайтлера  $\gamma Z \rightarrow Ze^-e^+$ , сечение которого пропорционально  $\sim Z^2\alpha^3$ . Как известно, такой процесс является основным каналом первого взаимодействия фотонов сверхвысоких энергий в атмосфере Земли. Для проведения расчетов всех этих процессов, на первом этапе, автору потребовалось сформулировать обобщение правил Фейнмана в квантовой

электродинамике с дополнительными членами в лагранжиане, нарушающими Лоренц-инвариантность. Понятно, что калибровочная инвариантность для фермионов потребовала введения двухфотонных (подобно случаю заряженных пионов) и даже трехфотонных вершин. Автору потребовалась также модификация решений уравнений Дирака и векторов поляризации фотона с учетом изменения дисперсионных соотношений для каждого вида взаимодействующих частиц. Все эти шаги позволили найти модифицированные пропагаторы фотонов и электронов и приступить к последующему написанию матричных элементов любого электродинамического процесса с вычислением ширин распадов, сечений и т.д. Следует подчеркнуть, что важны оба аспекта нарушения Лоренц-инвариантности: кинематический и динамический. Первый важен для изменения фазового пространства в интегралах при вычислении сечений, а второй сказывается на изменениях волновых функций и вершин взаимодействия. Что нового в расчетах **Сатуниным** электродинамических процессов в ЛН моделях? **Впервые в рассмотрение самосогласованным образом включены нарушающие Лоренц-симметрию операторы с размерностью больше четырех.** При сверхвысоких энергиях их вклад может оказаться сопоставим с вкладом ранее учтенных операторов четвертого порядка.

Во **второй главе** рассматривается **распад фотона в магнитном поле на электрон-позитронную пару.** Это известный процесс в КЭД в стандартном Лоренц-инвариантном случае (Робл, 1952 и Клепиков, 1954). Вместо сложных расчетов с использованием точных волновых функций электрона в магнитном поле, что было бы затруднительным при обобщении на случай ЛН моделей, **Сатунин** применяет квазиклассический метод «инстантонов на мировых линиях», аналогичный методу Швингера со спонтанным рождением электрон-позитронных пар во внешнем электрическом поле. В квазиклассическом пределе относительно слабого магнитного поля, но сверхвысоких энергий фотона вблизи ГЗК - обрезания спектра космических лучей, этот процесс может оказаться важным для определения ограничений **ЛН параметров** вблизи Земли (магнитные поля порядка 0.5 Гаусс). Квазиклассический подход при таком соотношении высокой энергии фотона и слабого магнитного поля оказывается важным. Дело в том, что суммарный знак **основной комбинации** всех трех ЛН параметров ( $=\omega_{LV}$  **в формуле (1.21)**), входящей в итоговый результат данной главы – ширину распада фотона (2.29), неизвестен. С одной стороны, при

отрицательном знаке ( $\omega_{LV} < 0$ ) ширина распада становится еще более экспоненциально подавленной по сравнению с ЛИ результатом для рассматриваемого процесса  $\gamma \rightarrow e^-e^+$  в магнитном поле. С другой стороны, при положительном знаке ( $\omega_{LV} > 0$ ) процесс распада фотона перестает быть экспоненциально подавленным, т.е. нарушается используемое квазиклассическое приближение. Однако в этом случае становится кинематически разрешенным более **быстрый распад фотона в электрон-позитронную пару в вакууме**, изученный автором в первой главе диссертации. Распад фотона в магнитном поле Земли с энергией вблизи ГЗК – обрезания спектра ( $10^{19.5}$  эВ и более) происходит вне атмосферы Земли на высоте порядка тысячи километров, образуя так называемый пре-ливень из сравнительно небольшого числа частиц. При вхождении в атмосферу пре-ливень развивается, образуя ШАЛ-широкий атмосферный ливень. **На что претендует Сатунин в данной главе?** Предложен новый вывод ширины распада фотона на электрон-позитронную пару в магнитном поле, не прибегая к точным волновым функциям – соответствующему решению уравнения Дирака. Это метод классических траекторий с использованием производящего функционала, вариационных производных от него и вычислением мнимой части поляризационного оператора фотона. Упрощение вычисления ширины распада фотона таким методом позволило автору применить его при расчетах в расширенных моделях с добавлением ЛН параметров в лагранжиане. Замечательно, что по аналогии с квазиклассикой Швингера для распадов в электрическом поле в подобных расчетах нет зависимости от спина частиц, что позволяет рассматривать спинорные электроны как скалярные частицы. Это значительно упрощает расчеты. Очевидно, что основной результат главы (2.29) переходит в известный (2.1) в отсутствие нарушения Лоренц-инвариантности.

В **третьей главе** даны расчеты ограничений на нарушение лоренц-инвариантности из физики космических фотонов сверхвысоких энергий. Надо отметить, что ни один фотон сверхвысоких энергий пока не был зарегистрирован, хотя из распада нейтрального  $\pi^0$  мезона,  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ , после фоторождения самого  $\pi^0$  на реликтовом излучении протонами с энергиями выше ГЗК порога, следует ожидать появления таких энергичных фотонов в космических лучах. **Петр Сатунин** концентрирует свое внимание на взаимодействии фотонов с атмосферой и магнитным полем Земли с целью получения таких ограничений на ЛН

параметры, которые не зависят от астрофизических моделей происхождения и распространения фотонов через космическое пространство. Основной целью **главы 3** является оценка статистически значимых ограничений на ЛН параметры в зависимости от ожидаемого числа зарегистрированных фотонов. Вместо плохо известной глубины первого взаимодействия фотона с ядрами атомов в атмосфере, рассчитанной по стандартному сечению Бете-Гайтлера и его обобщению (1.56) в первой главе диссертации, автор делает расчеты числа ожидаемых событий на глубине  $X_{\max}$ , отвечающей хорошо определяемому максимуму количества заряженных частиц в ливне, рожденном первичным фотоном. Основные результаты данной главы представлены в таблице 3.1, где на двух уровнях достоверности показано отношение стандартного сечения Бете-Гайтлера и обобщенного автором сечения (1.56) и соответствующее число событий на разных глубинах в атмосфере.

**В заключении** соискатель перечисляет результаты, полученные в трех главах диссертации.

К недостаткам данной работы следует отнести невнимательность при написании некоторых формул. В исходном дисперсионном соотношении (1) на странице 5 в последнем слагаемом в знаменателе должно быть  $M^2$ , а не  $M$ . В фотонном лагранжиане (1.11) на странице 19 фактор  $1/2$  надо заменить на  $1/4$ . Далее на странице 22, во втором предложении после (1.16) написано «...является стандартным матричным элементом...», надо писать «...определяется стандартным матричным элементом...», или «...квадратом стандартного матричного элемента...». На странице 36 после (1.54) неверно дана ссылка на параметр ЛН  $\omega_{LV}$  (1), должна быть формула (1.21). Имеются опечатки (орфографические). В последней строчке на странице 43 написано «...собственному временем  $T$ .» Исправить на «...собственному времени  $T$ .». На странице 58 неверно во многих строчках написана размерность длины пробега  $X$ , вместо  $г/см^{-2}$  должно быть  $г/см^2$ . В конце страницы 61 перед последним параграфом концовку фразы «...проведен на данный момент отсутствует.» заменить на «..., проведенный на данный момент, отсутствует.», как часть предложения, относящуюся к подлежащему «анализ». Но еще короче было бы завершить словами «...анализ...не проведен на данный момент.».

Сделанные замечания никак не умаляют достоинств проделанной работы, являющейся новым шагом в получении ограничений на возможные расширения Стандартной Модели при учете нарушения лоренц-инвариантности в астрофизике частиц высоких энергий.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

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 наук, а ее автор, **Сатунин Петр Сергеевич**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Заведующий теоретическим отделом ИЗМИРАН,  
доктор физ-мат. наук В.Б. Семикоз  
142190 г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН  
Тел. 8 (495) 851 -09-12, E-mail: semikoz@yandex.ru

Подпись Семикоза В.Б. удостоверяю,  
Ученый секретарь ИЗМИРАН

к.ф.-м.н.

А.И. Рез

Семикоз Виктор Борисович,

заведующий теоретическим отделом ИЗМИРАН, доктор физико-математических наук (01.04.16).

Основные публикации по теме защиты:

1. Instability of magnetic fields in electroweak plasma driven by neutrino asymmetries. Maxim Dvornikov, Victor B. Semikoz . JCAP 1405 (2014) 002
2. Hypermagnetic helicity evolution in early universe: leptogenesis and hypermagnetic diffusion. V.B. Semikoz, A.Yu. Smirnov, D.D. Sokoloff. JCAP 1310 (2013) 014
3. Lepton asymmetry growth in the symmetric phase of an electroweak plasma with hypermagnetic fields versus its washing out by sphalerons. Maxim Dvornikov, Victor B. Semikoz. Phys.Rev. D87 (2013) 025023
4. Lepton asymmetries and primordial hypermagnetic helicity evolution V.B. Semikoz , D.D. Sokoloff , J.W.F. Valle JCAP 1206 (2012) 008
5. Leptogenesis via hypermagnetic fields and baryon asymmetry. Maxim Dvornikov, Victor B. Semikoz. JCAP 1202 (2012) 040, Erratum-ibid. 1208 (2012) E01
6. Chern-Simons anomaly as polarization effect. V.B. Semikoz, J.W.F. Valle. JCAP 1111 (2011) 048
7. Is the baryon asymmetry of the Universe related to galactic magnetic fields? V.B. Semikoz , D.D. Sokoloff , J.W.F. Valle. Phys.Rev. D80 (2009) 083510