

На правах рукописи

Сатунин Пётр Сергеевич

**Эффекты гипотетического нарушения
Лоренц-инвариантности в астрофизике
частиц высоких энергий**

Специальность 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат
*диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук*

Москва 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

Научный руководитель:

кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник отдела теоретической физики ИЯИ РАН, *Сибиряков Сергей Михайлович*

Официальные оппоненты:

Семикоз Виктор Борисович, доктор физ.-мат. наук, заведующий теоретическим отделом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, (г. Москва).

Деденко Леонид Григорьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»

Защита состоится в часов на заседании Диссертационного совета Д 002.119.01 ИЯИ РАН по адресу: 117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте www.inr.ru.

Автореферат разослан

Ученый секретарь диссертационного Совета
доктор физ.-мат. наук

С.В. Троицкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Создание Специальной Теории Относительности (Эйнштейн, 1905) внесло огромный вклад в становление современной физической картины мира. Прямым следствием основных её постулатов является инвариантность всех физических процессов относительно преобразований Лоренца. Идея лоренц-инвариантности оказалась фантастически успешной: открытые десятилетия спустя создания Специальной Теории Относительности сильное и слабое взаимодействия также оказались с хорошей точностью инвариантными относительно лоренцевой симметрии, как и известное на начало XX века электромагнитное взаимодействие. На сей день лоренц-инвариантность (далее ЛИ для краткости) является симметрией как общепринятых теорий электрослабого и сильного взаимодействий — Стандартной Модели и Квантовой Хромодинамики, так и большинства их расширений. Локальная лоренцева инвариантность является также симметрией Общей Теории Относительности как классической теории гравитации. Однако, несмотря на это, в последние десятилетия проводятся интенсивные проверки лоренцевой симметрии. Для этого есть как феноменологические, так и теоретические причины.

Согласно общему принципу науки, сформулированному Карлом Поппером в качестве критерия фальсифицируемости, ни одна научная гипотеза, даже проверенная с огромной точностью, не может быть безоговорочно признана истинной. Необходимо всегда искать пределы применимости данной теории, вне которых она не может с хорошей точностью описывать Природу. Так, общепринятая на конец XIX века симметрия физических процессов относительно преобразований Галилея оказалась применима

только в случае малых по сравнению со скоростью света скоростей как наблюдаемой физической системы, так и наблюдателя. Возможно, лоренц-инвариантность также является лишь приближённой симметрией на характерных для нашего мира масштабах энергии, и при рассмотрении процессов с большими энергиями должна быть заменена другой, более полной группой симметрии. Из примеров физики XX века можно упомянуть открытие нарушения пространственной и CP- чётностей. Каждая из них в своё время считалась точной симметрией; их нарушения, с промежутком в восемь лет, были подтверждены экспериментально.

Другим аргументом в пользу рассмотрения возможного нарушения лоренц-инвариантности (далее лоренц-нарушение, ЛН для краткости) является то, что многие подходы к построению квантовой теории гравитации подразумевают ЛН. Наиболее популярным подходом к квантованию гравитации является теория струн, в основе своей сохраняющая ЛИ. Однако, некоторые модели компактификаций в ней допускают ЛН в низкоэнергетической теории (Костелецкий, Самуэль, 1988). Альтернативной теорией является Петлевая теория гравитации. В некоторых вариантах её построения ЛИ также нарушается (Гамбини, Паллин, 1988; Алфаро, Моралес-Текотл, Уррутиа, 2001). Ещё одним из подходов к данной проблеме является разработка некоммутативной геометрии, в которой пространственные координаты становятся операторами, не коммутирующими друг с другом; это подразумевает ЛН. Определённые сценарии компактификации в теории струн также предсказывают некоммутативную геометрию (Дуглас, Халл, 1997). Среди более экзотических моделей, нарушающих ЛИ, можно отметить пространственно-временную пену (Амелино-Камелия и др., 1996), аналоговую гравитацию (Фаноччи и др., 2010).

Посмотрим на проблему квантования гравитации со стороны квантовой теории поля. В рамках этого подхода необходимо сделать расходящиеся петлевые диаграммы сходящимися. Простейшим, наивным вариантом является обрезание интегрирования по петлевым импульсам на большом энергетическом масштабе Λ_{UV} , которому соответствует фундаментальный масштаб длины Λ_{UV}^{-1} . Существование таких фундаментальных масштабов явным образом нарушает ЛИ. Однако, простейший вариант, с физическим обрезанием, кажется неестественным из-за явной зависимости низкоэнергетической физики от величины масштаба Λ_{UV} . Согласно другому варианту, петлевые диаграммы можно сделать сходящимися добавив члены с высшими производными в лагранжиан теории. Однако, высшие производные по времени практически всегда приводят к появлению нежелательных степеней свободы, поэтому естественной реализацией данной идеи становится добавление лишь пространственных производных, что также подразумевает нарушение лоренц-инвариантности. Самосогласованной реализацией данной идеи (наряду с идеей анизотропного скейлинга в ультрафиолетовом пределе) стала так называемая гравитация Хоравы-Лифшица (Хорава, 2009; Блас, Пужолас, Сибиряков, 2009).

Цель работы состоит в самосогласованном изучении процессов в квантовой электродинамике с дополнительными членами, нарушающими лоренц-инвариантность; а также в постановке ограничений на параметры нарушения лоренц-инвариантности из гипотетического наблюдения фотонов в космических лучах сверхвысоких энергий.

Научная новизна и практическая ценность:

В диссертации впервые были теоретически самосогласованно

выведены правила Фейнмана для квантовой электродинамики с ЛН операторами размерности большей четырёх. Ширины распада фотона и вакуумного черенковского излучения впервые были вычислены самосогласованно в рамках введённой модели. Сечения рассеяния фотона на мягком фоновом фотоне и в кулоновском поле ядра в присутствии нарушения лоренц-инвариантности были вычислены впервые.

Предложен новый квазиклассический метод вычисления сечений процессов во внешнем магнитном поле. Его достоинством является лёгкое обобщение на физику за пределами Стандартной модели. В диссертационной работе данный метод был применён к вычислению ширины распада фотона в магнитном поле. В модели с нарушенной лоренц-инвариантностью данный процесс ранее не рассматривался в литературе.

В то время как возможное ограничение на параметры ЛН из-за отсутствия распада фотона сверхвысоких энергий рассматривалось ранее в литературе (Галаверни, Сигл, 2008), ограничения из-за отсутствия уменьшения сечения взаимодействия фотона сверхвысоких энергий в атмосфере ранее не рассматривались. Соответствующие оценки численные симуляции были проделаны в данной работе впервые.

Показано, что наблюдение нескольких фотонов сверхвысоких энергий поставит чрезвычайно сильные ограничения на параметры ЛН, что позволит ограничить некоторые сценарии квантовой гравитации.

Апробация диссертации

Основные результаты диссертации доложены на 15й Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц, МГУ, Москва, 18-24 августа 2011 г.; на 40-й Зимней Школе по физике

ИТЭФ, 14-21 февраля 2012 г., на 41-й Зимней Школе по физике ИТЭФ, 12-19 февраля 2013 г.; на XVII Международном семинаре “Кварки-2012”, Ярославль, 4-10 июня 2012 г., на XVIII Международном семинаре “Кварки-2014”, Суздаль, 2-8 июня 2014 г.; на Международной конференции “СРТ-13”, университет Индианы, Блумингтон, Индиана, США, 17-21 июня 2013 г., на Международных школах по субъядерной физике, Эриче, Италия (июнь 2012 и июнь 2013 г.), школе по космологии в Пассо дель Тонале, Италия (декабрь 2011 и 2012 г.); на научно-исследовательском семинаре факультета математики Высшей Школы Экономики, на научных семинарах кафедры теоретической физики Ярославского Государственного Университета и Отдела Теоретической Физики ИЯИ РАН.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из Введения, трёх глав основного текста и Заключения, содержит 72 страницы машинописного текста, в том числе 1 рисунок, 1 таблицу и список литературы из 82 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении рассматривается мотивация изучения теорий с нарушенной лоренцевой симметрией, дан краткий исторический обзор некоторых основных работ, описывающих модели с нарушенной лоренц-инвариантностью в рамках феноменологического подхода. Описываются основные эффекты влияния возможного нарушения лоренц-инвариантности в физике частиц. Дан обзор актуальных ограничений на параметры нарушения лоренц-инвариантности. Подробно рассмотрены ограничения, связанные с временем прилёта фотонов от космологически далёких источников, с синхротронными потерями электронов на кольцевых ускорителях, а также с анализом спектра излучения Крабовидной туманности.

В Главе 1 рассматривается модель квантовой электродинамики с операторами размерности 4 и 6, нарушающими Лоренц-инвариантность. Для данной модели вычисляются правила Фейнмана для расчёта древесных диаграмм. Данные правила применяются для расчёта сечений взаимодействия некоторых процессов физики частиц: вакуумных распада фотона и черенковского излучения, рассеяния высокоэнергетичного фотона на мягком фотоне с образованием электрон-позитронной пары, и рождение пары высокоэнергетичным фотоном в кулоновом поле ядра.

В разделе 1.1 описаны эффекты возможного влияния ЛН на сечения взаимодействия пертурбативных процессов: изменение фазового пространства интегрирования по импульсам частиц в конечном состоянии; изменение волновых функций внешних состояний; изменения вершин и пропагаторов. Дан краткий обзор вышеупомянутых эффектов в литературе.

В разделе 1.2 была построена ЛН модель, обобщающая КЭД,

лагранжиан которой включает нарушающие ЛИ операторы размерности 4 и 6. Для данной модели выведены правила Фейнмана, а также другие соотношения, такие как формулы суммирования по поляризациям и интегралы по фазовому пространству, необходимые для расчёта сечений взаимодействия элементарных процессов.

В разделе 1.3 с помощью полученных правил Фейнмана вычисляются древесные сечения взаимодействия некоторых процессов физики частиц, представляющих интерес в астрофизике.

В подразделе 1.3.1 вычисляется ширина распада фотона в вакууме вдали от порога реакции. При этом учитываются как кинематические (изменение фазового объёма), так и динамические (модификация вершин и спиновых сумм) эффекты ЛН. Показано, что данные эффекты дают вклады одного порядка. В зависимости от значений ЛН параметров было выделено несколько случаев, соответствующих разным кинематическим конфигурациям вылетающих частиц.

В подразделе 1.3.2 вычисляется ширина вакуумного черенковского излучения. Реакция является кроссканальным процессом к рассмотренному выше распаду фотона. Вычисление проводится аналогично п. 1.3.2.

Подраздел 1.3.3 посвящён вычислению сечения рассеяния высокоэнергичного фотона на мягком фотоне с образованием электрон-позитронной пары. Показано, что изменение сечения процесса вдали от порога меняется слабо по сравнению с пороговыми эффектами.

В подразделе 1.3.4 вычислено сечение рождения пары высокоэнергичным фотоном в кулоновом поле ядра. Показано, что сечение процесса подавлено степенным образом по сравнению с

лоренц-инвариантным случаем.

В разделе 1.4 описываются основные выводы данной главы, упомянуто возможное обобщение вычислений на петлевые реакции. Дано обоснование оценок сечений реакций по порядку величины, основанных на формализме эффективных масс.

В **Главе 2** рассматривается процесс распада фотона на электрон-позитронную пару во внешнем магнитном поле как в стандартном лоренц-инвариантном случае, так и в случае нарушения лоренцевой симметрии для аналога модели, введённой в Главе 1. Для решения данной задачи модифицирован квазиклассический метод “инстантонов на мировых линиях”.

В разделе 2.1. описывается суть метода “инстантонов на мировых линиях”, указаны задачи, для решения которых он был использован ранее. Обсуждаются преимущества и недостатки данного метода в применении к реакции распада фотона в магнитном поле по сравнению со стандартным методом.

В разделе 2.2 приведено квазиклассическое вычисление ширины распада фотона в магнитном поле. Найдено классическое решение седловых уравнение и действие, вычисленное на данном решении, обсуждается отрицательная мода в флуктуациях около классического решения. Показано, что вычисление применимо в случае экспоненциального подавления процесса.

В разделе 2.3 вычисление предыдущего раздела было обобщено на случай нарушения лоренцевой симметрии. Для вычислений была использована модель аналогичная введённой в Главе 1. Показано, что в данной модели сечение процесса подавлено экспоненциально по сравнению с лоренц-инвариантным случаем.

В разделе 2.4. указаны аргументы, позволяющие обобщить данное вычисление на случай нарушения лоренц-инвариантности

произвольного вида.

В **Главе 3** проанализированы ограничения на параметры ЛН, которые могут быть получены в будущем из возможного наблюдения широких атмосферных ливней, порождаемых фотонами сверхвысоких энергий.

В разделе 3.1 кратко описываются основные факты из физики космических лучей сверхвысоких энергий, необходимые для дальнейшей работы. Описаны возможные источники фотонов сверхвысоких энергий, а также эффекты, которые могут привести к распаду фотонов за время их распространения. Особое внимание уделено процессам, приводящим к возникновению широкого атмосферного ливня в атмосфере Земли; обсуждается влияние ЛН на данные процессы. Дан краткий литературный обзор.

В разделе 3.2 была проведена численная симуляция для небольшого числа N фотонных событий согласно стандартному ЛИ распределению. Для данных событий была получена глубина максимума атмосферного ливня X_{max} . Далее с помощью статистического теста Колмогорова-Смирнова было произведено сравнение симулированных данных с распределением по X_{max} в модели, введённой в Главе 1.

В разделе 3.3 сделано несколько комментариев о влиянии нарушения лоренц-инвариантности на образование атмосферных ливней фотонами более низких энергий, а также о возможности обнаружения атмосферных ливней, вызванных фотонами сверхвысоких энергий в случае сильного нарушения лоренц-инвариантности.

В **Заключении** перечислены основные результаты исследований, представленных в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для защиты выдвигаются следующие результаты:

1. Для модели квантовой электродинамики с дополнительными членами, нарушающими лоренц-инвариантность, выведены правила Фейнмана, формулы суммирования по поляризациям и интегрирования по фазовому объёму. Впервые в рассмотрение самосогласованным образом включены нарушающие лоренцеву симметрию операторы с размерностью более четырёх.
2. Вычислены ширины процессов распада фотона на электрон-позитронную пару и вакуумного черенковского излучения, а также сечений реакций рождения высокоэнергетическим фотоном электрон-позитронной пары на мягком фотоне и в кулоновском поле ядра. Показано, что для расчёта сечений необходимо принимать во внимание как кинематические, так и динамические аспекты нарушения лоренц-инвариантности.
3. На основе подхода “инстантонов на мировой линии” разработан квазиклассический метод описания процессов рождения заряженных частиц в магнитном поле, имеющий прозрачную геометрическую интерпретацию. С помощью данного метода предложен новый вывод ширины распада фотона на электрон-позитронную пару в магнитном поле.
4. Разработанный квазиклассический метод обобщён на модель с нарушенной лоренц-инвариантностью. Показано, что ширина распада фотона в слабом магнитном поле экспоненциально чувствительна к величине нарушения лоренц-инвариантности.

5. Показано, что отклонения от лоренц-инвариантности оказывают влияние на развитие широких атмосферных ливней, индуцированных фотонами в атмосфере Земли. Отмечено, что возможное наблюдение в будущем атмосферных ливней от фотонов сверхвысоких энергий, совместных с предсказаниями стандартной теории, поставит двусторонние ограничения на параметры нарушения лоренц-инвариантности в секторе квантовой электродинамики. Достоинством полученных таким образом ограничений будет их независимость от астрофизических предположений относительно происхождения и распространения фотонов.
6. С помощью численного моделирования наборов фотонных событий сделаны количественные предсказания относительно ожидаемых ограничений. Показано, что их точность на несколько порядков превышает точность ограничений, существующих в настоящее время.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. G.I. Rubtsov, P.S. Satunin, S.M. Sibiryakov «Calculation of cross sections in Lorentz-violating theories» // Phys.Rev.D. **86** (2012) 085012
2. P.S. Satunin «Width of photon decay in a magnetic field: Elementary semiclassical derivation and sensitivity to Lorentz violation» // Phys.Rev.D. **87** (2013) 105015
3. G.I. Rubtsov, P.S. Satunin, S.M. Sibiryakov «Prospective constraints on Lorentz violation from UHE photon detection» // Phys.Rev.D. **89** (2014) 123011
4. P.S. Satunin «Astrophysically relevant processes in Lorentz-violating QED» // Phys.Part.Nucl.Lett. 10 (2013) P. 615-617
5. P.S. Satunin «Probing Lorentz violation» // Particle Physics at the Tercentenary of Mikhail Lomonosov: pp. 432-433.
6. G.I. Rubtsov, P.S. Satunin, S.M. Sibiryakov «The influence of Lorentz violation on UHE photon detection» // Proceedings of the 6th Meeting on CPT and Lorentz Symmetry (CPT 13) arXiv:1307.8027 [hep-ph]