

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу П.С. Сатунина «Эффекты гипотетического нарушения лоренц-инвариантности в астрофизике частиц высокой энергии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Как известно, специальная теория относительности А. Эйнштейна является краеугольным камнем в современной физике. Согласно этой теории все события происходят в 4-мерном пространстве-времени с определенной в этом пространстве псевдоевклидовой метрикой (метрикой Минковского). Лоренц-инвариантность этой теории проверена в тысячах экспериментов на ускорителях и в космических лучах. Сотни миллионов пользователей систем спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS, сами того не подозревая, ежедневно «участвуют» в этой проверке. Это представление является фундаментальным в современной физике. Однако наука не стоит на месте и у теоретиков появляются основания создавать новые теории. Очень существенное развитие претерпела как ускорительная техника, так и экспериментальная база для детектирования космических лучей в области сверхвысоких энергий. Огромные установки Pierre Auger Observatory и Telescope Array позволяют детектировать широкие атмосферные ливни, генерированные в атмосфере Земли частицами первичного космического излучения с энергией выше 10^{20} эВ. Этот прогресс позволяет существенно уменьшить оценки погрешности экспериментов по проверке фундаментальной теории, что также стимулирует теоретиков делать новые предложения.

Именно эти важные проблемы проверки фундаментальной теории на новом уровне и рассматриваются в диссертации П.С. Сатунина «Эффекты гипотетического нарушения лоренц-инвариантности в астрофизике частиц высоких энергий». В диссертации сделаны новые конкретные предложения и

получены оценки параметров, характеризующих нарушение теории. Поэтому новизна и актуальность диссертации П.С. Сатунина не вызывают сомнений.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и вполне достаточного списка цитируемой литературы из 87 наименований, изложена на 72 страницах и иллюстрирована несколькими рисунками и таблицами и содержит огромное количество формул и важных оценок.

Во введении соискатель сначала отмечает фундаментальную роль специальной теории относительности А. Эйнштейна и ее следствия – лоренц-инвариантности (ЛИ) – в современной физике. Затем автор диссертации обращает внимание, что все теории могут быть проверены только с какой-то точностью. Конечная погрешность измерений и результаты новых экспериментов позволяют разрабатывать альтернативные теории. П.С. Сатунин приводит хорошо известные примеры нарушения симметрии относительно преобразований Галилея, пространственной четности P и комбинации зарядового сопряжения и пространственной четности CP . Далее как другая мотивация построения моделей с нарушенной лоренц-инвариантностью (ЛН) рассматриваются различные подходы к построению квантовой теории гравитации. Соискатель обращает внимание, что в некоторых моделях компактификации теории струн, петлевой теории гравитации, теориях с некоммутативной геометрией и некоторых других теориях появляется ЛН. П.С. Сатунин обращает внимание, что с точки зрения квантовой теории поля при построении квантовой теории гравитации петлевые диаграммы можно сделать сходящимися, добавив члены с высшими производными в лагранжиан теории. Добавление только пространственных производных означает явное нарушение ЛИ. Именно такой подход соискатель использует в своей диссертации. Далее автор диссертации делает краткий обзор различных попыток рассмотрения нарушения ЛИ. Соискатель отмечает, что кинематический подход нарушения ЛИ на основе дисперсионных соотношений описывает лишь часть возможных эффектов нарушения ЛИ и делает вывод о необходимости развития соответствующего

лагранжева формализма для полного описания ЛН. Именно такому развитию лагранжева формализма и посвящена основная часть диссертационной работы П.С. Сатунина, изложенная в последующих главах диссертации. Соискатель в то же время предполагает, что развиваемая теория должна обладать калибровочной инвариантностью и симметрией относительно СРТ преобразований. Особо следует выделить процессы, для которых эффекты нарушения ЛИ были бы относительно легко замечены. Поскольку в рамках квантовой электродинамики (КЭД) погрешности рассчитанных сечений стандартных процессов малы, то это облегчает наблюдение возможных отклонений от стандартной теории. Поэтому надо согласиться с соискателем, который ограничивает тему диссертации процессами с участием фотонов, электронов и позитронов и отмечает особую роль этих процессов в астрофизике частиц высокой энергии. Соискатель перечисляет некоторые возможные эффекты с этими частицами, при наблюдении которых можно заметить нарушение ЛИ. Это изменения скоростей распространения частиц в вакууме, интенсивности некоторых процессов и сечений взаимодействия. Также становятся возможными запрещенные в лоренц-инвариантной теории реакции. Наконец, соискатель приводит значения уже известных ограничений на параметры, нарушающие ЛИ.

В конце введения указана структура диссертации, приведено распределение материала по главам, представлен список публикаций автора диссертации и перечень международных конференций и семинаров, на которых соискателем докладывались результаты его работы.

В прекрасно написанном введении четко обозначены актуальность работы, ее новизна и возможности практического использования конкретных результатов в различных экспериментальных исследованиях в области астрофизики частиц высоких энергий.

В первой главе диссертации рассматривается модель КЭД, в лагранжиан (1.1) которой добавлены операторы размерности вплоть до 6 (производные только по пространственным координатам), нарушающие ЛИ

(см. стр. 15).

Три добавленных члена содержат три безразмерных параметра κ , g и ξ , которые характеризуют величину нарушения ЛИ. Два последних добавочных члена подавлены масштабом M , в качестве которого фиксирована планковская масса 10^{19} ГэВ. Рассматриваются только квадратичные по полям операторы. Предполагается калибровочная инвариантность, инвариантность относительно СРТ и вращений в трехмерном пространстве в выделенной системе отсчета, сохранение P четности. Делаются также и некоторые другие предположения. Для выбранной модели выводятся правила Фейнмана, формулы суммирования по поляризациям, интегралы по фазовому пространству и другие соотношения. Наконец, приводятся результаты вычислений сечений некоторых процессов. Рассматриваются распад фотонов в вакууме, вакуумное черенковское излучение, рассеяние фотона с большой энергией на фотоне с малой энергией с образованием пары электрон-позитрон и рождение пары электрон-позитрон фотоном с большой энергией в кулоновом поле ядра. Для невзаимодействующих полей соискатель получает дисперсионные соотношения для фотонов и электронов. В этих соотношениях появились члены, содержащие импульс частиц в четвертой степени. Коэффициенты при квадратах импульса в соотношениях для фотонов и электронов отличаются. Эти отличия от ЛИ соотношений характеризуются введенными в лагранжиан параметрами κ , g и ξ . Затем соискатель определяет суммы по поляризациям фотонов и волновые функции спиноров и спиновые суммы для фермионов и отмечает совпадение сумм по поляризациям и спиновым сумм с полученными ранее результатами в работе D. Anselmi и T. Taiti (Phys. Rev. 2011, D83, p.056010). Этот результат показывает контролируемость результатов, полученных соискателем. Получены также выражения для фермионного и фотонного пропагаторов. Далее соискатель учитывает взаимодействия полей по теории возмущений. В отличие от лоренц-инвариантной теории стандартная трёхчастичная вершина содержит добавочные члены с параметрами κ и g , которые определяют

нарушение ЛИ. Кроме того, появляются также вершины, которые описывают двухфотонное и трехфотонное взаимодействия. Для всех случаев в диссертации получены соответствующие выражения. В разделе 1.3 соискатель описывает процедуру расчетов вероятностей некоторых важных для астрофизики процессов и приводит результаты этих расчетов. Рассматриваются такие простые процессы первого порядка по электромагнитной константе связи, как распад фотона на пару электрон-позитрон и черенковское излучение фотона электроном в вакууме, которые уже изучены и описаны в литературе. Однако в диссертации впервые получены результаты вычислений ширины данных процессов для модели с операторами четвертого и шестого порядков, которые нарушают ЛИ. Эти результаты используются для вычислений более сложных реакций рассеяния фотона на фотоне с образованием пары электрон-позитрон и рождения пары фотоном в кулоновом поле ядра, результаты которых также приведены в этой главе.

Полученные результаты – несомненное достижение диссертанта. Прямые вычисления соискателя показали, что для расчетов сечений рассеяния необходимо учитывать как кинематические, так и динамические причины нарушения лоренц-инвариантности. Первые изменяют фазовое пространство в интегралах из-за вариации дисперсионных соотношений, а вторые приводят к изменениям волновых функций частиц и вершин взаимодействия.

Во второй главе рассматривается процесс распада фотона на пару электрон-позитрон во внешнем слабом магнитном поле. Этот процесс рассматривался в работах Н. Robl в 1952 г. (см. [58]) и Н.П. Клепикова в 1954 г. (см. [59]). Технические детали этих работ сложны и их обобщение на случай нарушения ЛИ слишком громоздко. Соискателем предлагается технически более простой подход, основанный на квазиклассическом методе «инстантонов на мировых линиях». Подобный подход применялся для оценки рождения пары электрон-позитрон во внешнем классическом

электрическом поле (метод Швингера). Соискатель модифицировал этот метод и получил результаты для стандартной КЭД (2.1) в разделе 2.2. Затем в разделе 2.3 этот метод был обобщен на случай, когда лоренц-инвариантность нарушена, и было получено основное соотношение (2.29), которое используется в третьей главе.

Ограничения на параметры, которые нарушают лоренц-инвариантность теории, могут быть получены из наблюдений широких атмосферных ливней, генерированных в атмосфере Земли фотонами сверхвысоких энергий. Эти ограничения рассмотрены в третьей главе. В настоящее время имеются экспериментальные подтверждения уменьшения потока частиц первичного космического излучения при энергиях частиц выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ. Если это уменьшение обусловлено эффектом Грейзена, Зацепина, Кузьмина (ГЗК), то в потоке первичных частиц должны быть фотоны. Согласно предсказанию ГЗК протон первичного космического излучения взаимодействует с реликтовыми фотонами и теряет свою энергию в процессах генерации пи-мезонов, если энергия протона превышает пороговое значение $3 \cdot 10^{19}$ эВ. Нейтральные пи-мезоны распадаются на фотоны. Соискатель обращает внимание на важность экспериментального обнаружения этих фотонов. Он отмечает, что в работах Галаверни и Сигла (см. ссылки [34, 36]) на основе результатов возможных в будущем наблюдений интенсивности потока этих фотонов получены ограничения на параметры, которые нарушают ЛИ в КЭД. В диссертации автор обращает особое внимание, что не только процессы в межзвездной среде, но также взаимодействия фотона с магнитным полем Земли и в атмосфере позволяют получить ограничения на параметры, которые нарушают ЛИ в КЭД. Соискатель провел моделирование положения глубины максимума ливня, генерированного фотоном с энергией 10^{19} эВ, для стандартной КЭД и для случая, когда ЛИ нарушена. Используя тест Колмогорова-Смирнова для сравнения результатов, П.С. Сатунин получил ограничения сверху на положения глубины максимума ливня и отношения сечений первого взаимодействия для двух теорий, представленные в таблице

3.1 (см. стр. 60) для двух уровней достоверности. Из таблицы следует, что уже при небольшом увеличении статистики наблюдаемых событий можно получить существенные ограничения параметров, нарушающих ЛИ. В соотношении (3.2) приведены существенные ограничения этих параметров, полученных на основе формулы (2.29) второй главы и возможных наблюдений «внеатмосферных» ливней (ливней, развившихся из-за взаимодействий фотона с геомагнитным полем на высотах порядка тысяч километров).

В Заключении приведены основные результаты, полученные диссертантом.

Основные результаты диссертации П.С. Сатунина опубликованы в 6 статьях (4 из списка ВАК) в высокорейтинговых международных журналах и российских изданиях, неоднократно докладывались лично автором на международных и всероссийских конференциях и семинарах.

В диссертационной работе П.С. Сатунина имеются опечатки и описки. Например, в формуле (1) для дисперсионного соотношения (см. стр. 5) последнее слагаемое не совпадает по размерности с остальными членами суммы. В ссылке [53] пропущено название журнала (см. стр. 69). Термин «пре-ливень» (см. стр. 57) – это странный гибрид английской приставки «pre», которая имеет смысл «до», и русского слова. По аналогии с атмосферным ливнем, возможным переводом мог бы быть термин «внеатмосферный ливень». На стр. 59 в названии детектора «флюоресцентный черенковский детектор» слово «черенковский» лишнее. Отметим, что даже в печатных изданиях после работы редактора и корректоров остаются опечатки. Поэтому сделанные выше замечания не могут повлиять на высокую оценку диссертационной работы П.С. Сатунина. Автореферат диссертации полностью соответствует ее полному тексту. Результаты диссертации могут быть использованы в ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, МИФИ, ОИЯИ, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН и ИТЭФ и в других отечественных и зарубежных институтах и лабораториях.

Диссертационная работа Сатунина Петра Сергеевича

«Эффекты гипотетического нарушения лоренц-инвариантности в астрофизике частиц высоких энергий», 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.

Профессор кафедры общей физики физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,

доктор физико-математических наук,
профессор /Деденко Леонид Григорьевич/
28 октября 2014 г.

Адрес:

119991, Москва, Ленинские Горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, дом 1,
строение 2, физический факультет,

Тел. 495-939-14-89

e-mail: ddn@dec1.sinp.msu.ru

Подпись Л.Г. Деденко удостоверяю:

Декан физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,

Профессор /Сысоев Н.Н./

Деденко Леонид Григорьевич,

Профессор кафедры общей физики физического факультета МГУ им.
М.В. Ломоносова, доктор физико-математических наук (01.04.16).

Основные публикации по теме защиты:

1. Dedenko L.G., Roganova T.M., Fedorova G.F. Test of Hadron Interaction Models in the Most Important Energy Range of Secondary Particles in Spectra of Atmospheric Muons. JETP Letters, 2014, том 100, № 4, с. 223-226
2. Деденко Л.Г., Манагадзе А.К., Роганова Т.М., Багуля А.В., Владимиров М.С., Земскова С.Г., Коновалова Н.С., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Чернявский М.М., Грачев В.М. Перспективы исследований геологических структур методом мюонной радиографии на основе эмульсионных трековых детекторов. Краткие сообщения по физике, 2014, № 8, с. 34-46
3. Деденко Л.Г., Роганова Т.М., Федорова Г.Ф. Тестирование моделей взаимодействия адронов в наиболее важной области энергий вторичных частиц по спектрам атмосферных мюонов. Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики", 2014, том 100, № 4, с. 247-251
4. Dedenko L.G., Fedorova G.F., Roganova T.M., Glushkov A.V., Knurenko S.P., Makarov A.K., Makarov L.T., Pravdin M.I., Sabourov A.A., Sleptsov I.Ye . Possible composition of the primary particles at ultrahigh energies observed at the Yakutsk array. Journal of Physics: Conference Series, 2013, том 409, с. 2068-2071
5. Dedenko L.G., Fedorova G.F., Roganova T.M. Units of signals in the surface and underground scintillation detectors of the Yakutsk array. Journal of Physics: Conference Series, 2013, том 409, с. 2093-2096
6. Dedenko L.G., Fedorova G.F., Roganova T.M., Glushkov A.V., Knurenko S.P., Makarov A.K., Makarov L.T., Pravdin M.I., Sabourov A.A., Sleptsov I.Ye . The composition of the primary particles at energies 3×10^{17} – 3×10^{19} eV observed at the Yakutsk array. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2012, том 39, № 9, с. 095202-095212

7. Dedenko L.G., Glushkov A.V., Knurenko S.P., Makarov I.T., Pravdin M.I., Sleptsov I.E., Roganova T.M., Fedorova G.F. Changes in the chemical composition of primary cosmic radiation at ultrahigh energies. Bulletin of the Russian Academy of Science, Physics, 2011, том 75, № 3, с. 296-298
8. Dedenko L.G., Roganova T.M., Fedorova G.F. Signals in the Underground Scintillation Detectors of the Yakutsk Array from Muons of Extensive Air Showers . MOSCOW UNIVERSITY PHYSICS BULLETIN, 2011, том 66, № 4, с. 358-362
9. Деденко Л.Г., Роганова Т.М., Федорова Г.Ф. Сигналы в подземных сцинтилляционных детекторах Якутской установки от мюонной компоненты широких атмосферных ливней. Вестник МГУ. Физика, 2011, № 4, с. 37-41
10. Dedenko L.G., Glushkov A.V., Knurenko S.P., Makarov I.T., Pravdin M.I., Podgrudkov D.A., Sleptsov I.E., Roganova T.M., Fedorova G.F., Fedunin E.Yu Particles of Primary Cosmic Radiation Generating Extensive Air Showers of Energy above 10(20) eV in the Atmosphere. в Physics of Atomic Nuclei, 2010, том 73, № 12, с. 2125-2132
11. Podgrudkov D.A., Dedenko L.G., Roganova T.M., Fedorova G.F. Spatiotemporal structure of pulses in detectors of Cherenkov light of extensive atmospheric showers. MOSCOW UNIVERSITY PHYSICS BULLETIN, 2010, том 65, № 2, с. 152-154 D
12. Rubtsov GI, Dedenko LG, Fedorova GF, Fedunin EY, Glushkov AV, Gorbunov DS, Makarov IT, Pravdin MI, Roganova TM, Sleptsov IE, Troitsky SV. Upper limit on the ultrahigh-energy photon flux from AGASA and Yakutsk data. Physical Review D 2006, том 73, № 6, с. 063009
13. Dedenko L.G., Roganova T.M., Fedorova G.F., Fedunin E.Y. Pions in primary cosmic rays of ultrahigh energies. JETP Letters, 2003, том 78, № 3, с. 101-105
14. Dedenko L.G., Kirillov A.A., Fedorova G.F., Fedunin E.Yu, Roganova T.M. Test of Lorentz invariance through observation of the maximum depths in giant air showers. Nuclear Physics B, 2003, том 122, с. 321-324
15. Antonov EE, Dedenko LG, Kirillov AA, Roganova TM, Fedorova GF, Fedunin EY Test of Lorentz invariance through observation of the longitudinal development of ultrahigh-energy extensive air showers JETP Letters, 2001, том 73, № 9, с. 446-450