

Отзыв научного руководителя  
на диссертацию Сатунина Петра Сергеевича  
«Эффекты гипотетического нарушения лоренц-инвариантности  
в астрофизике частиц высоких энергий»,  
представленной на соискание степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.02, теоретическая физика.

Симметрия фундаментальных взаимодействий относительно преобразований Лоренца является одним из базовых принципов современной физики, проверенным с высокой точностью во множестве экспериментов. Тем не менее, существуют некоторые теоретические подходы, согласно которым лоренц-инвариантность может являться лишь приближенной симметрией теории на относительно низких энергиях, доступных современным экспериментам, и может быть нарушена при больших энергиях. С феноменологической точки зрения, уточнение экспериментальных ограничений на отклонения от лоренц-инвариантности имеет принципиальное значение как проверка основ общепринятых физических теорий. Выявление наблюдательных следствий гипотетического отклонения от лоренц-инвариантности, поиск соответствующих эффектов в экспериментальных данных и уточнение ограничений на величину отклонения составляет в настоящее время активное направление исследований. Особую актуальность эти исследования приобрели в связи со значительным прогрессом в области экспериментов по астрофизике частиц, где характерные энергии наблюдаемых элементарных частиц достигают максимальных значений.

Именно этой тематике посвящена диссертация П.С. Сатунина. В качестве "теоретической лаборатории" для исследования эффектов возможного нарушения лоренц-инвариантности при высоких энергиях выбран сектор квантовой электродинамики, как наиболее свободный от теоретических неопределенностей. Лагранжиан стандартной квантовой электродинамики дополнен слагаемыми, приводящими к модификации дисперсионных соотношениях для фотонов и электронов (позитронов) при высоких энергиях. Впервые проведен полный учет роли таких слагаемых на динамическом уровне, проведено квантование модели, и развиты правила Фейнмана. С помощью разработанного формализма рассчитаны ширины и сечения ряда процессов, важных для астрофизики частиц. Некоторые из этих процессов, такие как распад фотона на электрон-позитронную пару в вакууме и излучение фотона

свободным электроном, кинематически запрещены в лоренц-инвариантном случае и становятся возможными лишь благодаря нарушению лоренц-инвариантности. Показано, что для корректного вычисления ширин таких процессов необходим учет нарушения лоренц-инвариантности как на кинематическом, так и на динамическом уровне. Для процессов, которые разрешены и в лоренц-инвариантном случае, таких как рождение электрона и позитрона в рассеянии фотона на фотоне и распад фотона в электрон-позитронную пару в кулоновском поле ядра, отклонения от лоренц-инвариантности могут приводить к существенному изменению сечений.

Также в диссертации разработан метод учета отклонений от лоренц-инвариантности при вычислении скоростей процессов, не описываемых теорией возмущений, таких как распад фотона на электрон-позитронную пару в магнитном поле. Для этого обобщен квазиклассический метод "инстантонов на мировой линии", использовавшийся ранее для описания эффекта Швингера --- спонтанного рождения электрон-позитронных пар в постоянном электрическом поле. В этом методе задача о вычислении ширины распада сводится к нахождению траекторий частиц рожденной пары в мнимом (евклидовом) времени и вычислении величины классического действия на этой траектории. Последнее определяет экспоненту подавления ширины процесса. Показано, что отклонение от лоренц-инвариантности существенно сдвигает значение энергии фотона, выше которой распад перестает быть экспоненциально подавленным. Следует отметить, что предложенный в диссертации подход носит общий характер и применим ко многим процессам с участием заряженных частиц в магнитных полях, в том числе в рамках стандартной лоренц-инвариантной физики. Его достоинством является наглядная геометрическая интерпретация и относительная техническая простота по сравнению со стандартными методами, основанными на использовании точных пропагаторов частиц в магнитном поле.

Процессы рождения пар в поле ядра и в магнитном поле играют ключевую роль при анализе взаимодействия фотонов сверхвысоких энергий (более  $10^{19}$  эВ) с атмосферой Земли и геомагнитным полем. Наличие ненулевого потока фотонов таких энергий предсказывается всеми существующими теориями происхождения и распространения космических лучей через межзвездную среду, хотя и с большой долей неопределенности. На сегодняшний день ни один фотон с такой энергией не был зарегистрирован, но их поиск активно ведется в экспериментах Pierre Auger и Telescope Array, исследующих космические лучи сверхвысоких энергий. При этом регистрируются не сами первичные частицы, а широкие атмосферные ливни, порождаемые ими в атмосфере Земли.

Характеристики ливня зависят от сечения первого взаимодействия высокоэнергичной первичной частицы в атмосфере. В диссертации рассмотрена предполагаемая ситуация, согласно которой в будущем зарегистрировано некоторое число широких атмосферных ливней, порожденных фотонами с энергиями порядка  $10^{19}$  эВ и совместных с предсказаниями стандартной теории. Оценена точность ограничений на отклонения от лоренц-инвариантности, которые будут получены в такой ситуации в зависимости от числа фотонных событий. Показано, что даже небольшого числа событий будет достаточно для получения ограничений, на много порядков улучшающих ныне существующие. Преимущество такого метода ограничения нарушения лоренц-инвариантности состоит в том, что он абсолютно нечувствителен к астрофизическим моделям относительно происхождения и распространения фотонов в космическом пространстве, кроме предположения о самом факте существования таких фотонов.

Сильной стороной диссертации является строгий систематический подход к решению поставленных вопросов, исходя из "первых принципов", через разработку новых методов анализа процессов в астрофизике частиц к получению конкретных количественных предсказаний для сравнения с данными существующих и планируемых экспериментов. Прделанная теоретическая работа является актуальной, а ее результаты востребованы в научном сообществе.

Старший научный сотрудник ИЯИ РАН,  
кандидат физико-математических наук

С.М. Сибиряков

18.06.2014