

**Отзыв научного руководителя на диссертационную работу
Дмитрия Калашникова «Коллайдерные эксперименты как окно в новую физику:
предсказания для лёгких частиц»
на соискание ученой степени кандидата физико – математических наук по
специальности 1.3.3 «теоретическая физика».**

Неполнота Стандартной модели физики элементарных частиц, подтверждаемая невозможностью объяснить с её помощью нейтринные осцилляции, многочисленные явления тёмной материи и отсутствие антиматерии в современной и ранней Вселенной, вынуждает рассматривать различные её обобщения. Отсутствие прямых подтверждений существования новых частиц или фундаментальных взаимодействий, в частности на Большом адронном коллайдере, разделяет реалистичные обобщения на два класса. А именно: модели с тяжёлыми частицами, рождение которых пока не доступно кинематически на существующих установках, и модели с лёгкими частицами, взаимодействие которых с известными частицами очень-очень слабое. Первый случай менее предпочтителен теоретически, поскольку тяжёлые частицы дают большие квантовые поправки к массе хиггсовского бозона, и его величина в 125 ГэВ становится ненатуральной с квантовополевым точки зрения. Второй случай представляет больший интерес для современных экспериментов, поскольку для обнаружения лёгких, но очень слабо взаимодействующих с известными, частиц требуется повысить статистику процессов, в которых такие частицы могут рождаться. А это сегодня технически достичь проще, чем поднять энергию столкновений пучков, что необходимо для прямых поисков новых тяжёлых частиц.

Диссертация Дмитрия Калашникова посвящена изучению ряда простых, но реалистичных моделей с лёгкими частицами. В диссертации предлагаются конкретные наблюдаемые, чувствительные к модельным параметрам и доступные для исследования на конкретных экспериментальных установках, уже работающих, строящихся или проектируемых в настоящее время. Таким образом, полученные в диссертации результаты непосредственно можно использовать и для постановки экспериментальной задачи по проверке модельных предсказаний, и для оценки физического потенциала новых проектов в части поиска сигнала новой физики. Это подтверждает актуальность темы диссертации и востребованность результатов, в ней представленных.

Диссертация состоит из Введения, трёх глав основного текста, заключения и списка литературы. В первой главе рассматриваются суперсимметричные обобщения Стандартной модели физики элементарных частиц с лёгким сектором голдстино, ответственным за спонтанное нарушение суперсимметрии. В простейших моделях спонтанного нарушения суперсимметрии скалярные частицы этого сектора – скалярный и псевдоскалярный голдстино – получают ненулевую массу только за счёт квантовых поправок, что делает их натурально лёгкими для ряда механизмов спонтанного нарушения суперсимметрии. Эти частицы являются суперпартнёрами голдстоуновского поля, а потому их константы взаимодействия обратно пропорциональны параметру нарушения симметрии. В данном случае голдстоуновское поле фермион, и параметр нарушения имеет порядок квадрата

энергетического масштаба спонтанного нарушения суперсимметрии. Таким образом поиски таких частиц и возможное измерение их констант взаимодействия с частицами Стандартной модели укажет на масштаб этого нарушения и на возможный механизм, за него ответственный. Константы также пропорциональны массовым параметрам суперпартнёров: например, константы взаимодействия сголдстино с кварками пропорциональны элементам матрицы квадратов масс скварков. Измерение констант взаимодействия сголдстино наряду с его временем жизни позволит определить и масштаб масс суперпартнёров, по-видимому превышающий несколько ТэВ, судя по данным Большого адронного коллайдера. Поиски сголдстино предлагается вести на эксперименте FASER (и его будущей модификации FASER II) – небольшом детекторе на линии столкновений протонных пучков Большого адронного коллайдера, удалённом от точки столкновения на полкилометра. Эта работающая установка позволяет обнаружить сигнал от распада нейтральной частицы на пару фотонов, заряженных лептонов или адронов внутри установки, что предполагает достаточно большое время жизни частицы. В главе рассмотрены механизмы рождения и распада сголдстино, учтены возможные сохраняющие и нарушающие кварковые ароматы взаимодействия, представлены оценки для областей модельных параметров, которые могут быть исследованы на этом эксперименте.

Вторая глава посвящена определению перспектив проекта s - τ фабрики (электрон-позитронного коллайдера с настраиваемой энергией пучков в области нескольких ГэВ) в изучении моделей с лёгким (псевдо)вектором и моделей с частицами, несущими малый (по сравнению с массой электрона) электрический заряд. Такие модели естественно возникают, например, при взаимодействии видимого и скрытого секторов физики частиц через так называемый векторный портал, где происходит кинетическое смешивание фотона и слабого нейтрального бозона с гипотетическим вектором, нейтральным относительно калибровочных взаимодействий Стандартной модели. Рассматривается как стандартная наблюдаемая – потеря энергии при столкновении пары из-за рождения вылетающих без взаимодействия в детекторе новых частиц – так и новая, оригинальная наблюдаемая для миллизаряженных частиц, рождаемых с малой скоростью. В последнем случае малая константа взаимодействия компенсируется малой скоростью, так что оказывается возможным зарегистрировать след такой пары в трекерной части установки. Найдены области модельных параметров, доступные для исследования на коллайдере с учётом проектного плана изменения энергии пучков.

В третьей главе рассматриваются модели с лёгкими векторными частицами и модели с нейтральными (всево)скалярами, взаимодействующими с фотонами (например, аксионоподобные частицы). Такие частицы могут рождаться в распадах лёгких мезонов и ультрапериферических столкновениях тяжёлых ионов на коллайдере NICA, запускающегося в ОИЯИ (г.Дубна) в ближайшее время. В качестве наблюдаемой предложена пара фотонов с инвариантной массой, равной массе распадающейся в них гипотетической частицы, появляющаяся на некотором удалении от точки столкновения ионов, что позволяет подавить фон случайных совпадений. Представлены области модельных параметров, доступных для исследования. Замечательно, что уже первые месяцы работы новой машины позволят “заглянуть” в ранее неизученную область параметров.

На мой взгляд кандидатская диссертация Калашникова Дмитрия «Коллайдерные эксперименты как окно в новую физику: предсказания для лёгких частиц» является отличным примером своевременной теоретической работы в области физики элементарных частиц с непосредственным приложением к эксперименту по прямой проверке теории. Полученные в диссертации результаты чётко сформулированы и уже применяются в феноменологических исследованиях. Диссертант сформировался как активный и ответственный молодой учёный. Представленная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям. Считаю, что ее автор безусловно заслуживает ученой степени к.ф.-м.н. по специальности 1.3.3 «теоретическая физика».

Научный руководитель,
Д.ф.-м.н, г.н.с. ОТФ ИЯИ РАН
чл.-корр. РАН

Горбунов Д.С.

Подпись Горбунова Д.С. удостоверяю,

Заместитель директора ИЯИ РАН

Рубцов Г.И.

19.03.2025 г.