

## Отзыв официального оппонента

кандидата физико-математических наук Гладышева Алексея Валерьевича на диссертационную работу Гурской Альбины Валентиновны «Свойства бозонов Хиггса в неминимальной суперсимметричной стандартной модели с нарушением  $CP$ -инвариантности», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Открытием бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН в 2012 году завершилось строительство фундамента физики элементарных частиц, однако, до сих пор существует ряд вопросов, на которые современная физика высоких энергий не может дать ответа. К ним, в частности, относится вопрос о том, является ли Стандартная модель окончательной теорией, справедливой при любых энергиях, либо это лишь эффективное «низкоэнергетическое» приближение. В связи с этим интересны теории, предполагающие выход за пределы Стандартной модели, в частности теории с более широкой симметрией. Одним из наиболее многообещающих расширений является модель, основанная на суперсимметрии – симметрии, связывающей между собой поля материи (фермионы) и переносчики взаимодействий (бозоны). Наиболее изучена так называемая Минимальная суперсимметричная Стандартная модель, более того масса открытого бозона Хиггса вполне согласуется с предсказаниями. Другая нерешенная проблема Стандартной модели – это проблема  $CP$ -нарушения. Это известное экспериментально в течение многих лет явление, к сожалению, не полностью объяснено в рамках существующей теории.

Диссертационная работа А.В.Гурской «Свойства бозонов Хиггса в неминимальной суперсимметричной стандартной модели с нарушением  $CP$ -инвариантности» посвящена развитию теоретических идей, описанных выше, и попытке объяснить  $CP$ -нарушение, поскольку в модели имеется дополнительный источник нарушения  $CP$ -инвариантности. В исследуемой неминимальной суперсимметричной Стандартной модели, кроме того, расширен сектор полей Хиггса, что приводит к более богатой феноменологии.

Диссертация состоит из введения, трех глав основного содержания, заключения, списка цитированной литературы и приложения. Во Введении очерчен круг вопросов, изучению которых посвящена работа: обсуждаются успехи и трудности Стандартной модели фундаментальных взаимодействий, причины расширения сектора скалярных полей Хиггса. Также обсуждается проблема  $CP$ -нарушения в Стандартной модели, приводятся аргументы необходимости выхода за ее пределы, а также дальнейшего расширения до модели с явным нарушением  $CP$ -инвариантности. Четко сформулирована цель диссертационной работы: «теоретическое исследование расчета ширин распадов нейтральных бозонов

Хиггса в неминимальной суперсимметричной Стандартной модели, попытка объяснения ненаблюдаемости возможного легкого нейтрального бозона Хиггса». Перечислены основные задачи работы и кратко описана методика исследования. Также отражены научная новизна диссертации и практическая значимость работы.

Глава 1 посвящена обзору неминимальной суперсимметричной Стандартной модели (НМССМ) с нарушением  $CP$ -инвариантности. Приведен состав полей НМССМ, лагранжиан модели, описаны различные варианты  $CP$ -нарушения. Описано явное и спонтанное нарушение  $CP$ -инвариантности за счет комплексности параметров скалярного потенциала (констант взаимодействия, массовых параметров, параметров мягкого нарушения суперсимметрии). Подробно обсуждается сектор Хиггса рассматриваемой теории: минимизирован потенциал скалярных полей, получены элементы массовой матрицы нейтральных бозонов Хиггса, которых в данной модели пять. Рассмотрены также фермион-сфермионный сектор и сектор нейтралино. Приведены выражения для однопетлевых поправок к  $CP$ -нарушающим параметрам НМССМ.

В Главе 2 рассмотрены процессы рождения и распадов бозонов Хиггса в НМССМ. Обсуждаются основные процессы рождения бозонов Хиггса на Большом адронном коллайдере: глюонное слияние, ассоциированное рождение с калибровочными бозонами, совместное рождение с тяжелыми кварками. Описаны основные моды распада бозона Хиггса, приведены графики, иллюстрирующие результаты анализа данных, выполненные коллаборациями ATLAS и CMS. Приведены три различных сценария существования более чем одного бозона Хиггса. Рассмотрены однопетлевые поправки к парциальным ширинам распада бозона Хиггса в различных каналах. Для визуализации и аналитических вычислений использовались приложения программы символьных вычислений Wolfram Mathematica – пакет FeynArts и пакет FeynCalc.

В третьей главе описаны три сценария НМССМ с двумя относительно легкими бозонами Хиггса. Каждый из сценариев обладает определенным набором параметров модели, различающихся феноменологически. Приведены значения параметров модели, которые соответствуют положительным квадратам массы бозона Хиггса (вообще говоря, могут быть значения параметров, которые по этому критерию исключаются из рассмотрения) и не противоречат значению, полученному на эксперименте.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы. Справочные формулы приведены в приложении.

В целом, диссертационная работа А.В. Гурской представляет собой современное важное научное исследование, особенно актуальное в годы работы

Большого адронного коллайдера. Однако, стоит отметить некоторые недостатки работы.

Некоторые утверждения в тексте диссертации заслуживают более подробного обсуждения, например, при обсуждении массы нейтрино во Введении. Вопрос о массе нейтрино в Стандартной модели, действительно, до конца не понят, хотя введение в лагранжиан юкавских взаимодействий для нейтрино позволяет получить их массы в полной аналогии с другими фермионами. Остается, правда, проблема малости соответствующих юкавских констант связи. При обсуждении источников CP-нарушения в Стандартной Модели не упоминается матрица смешивания Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты в лептонном секторе, также содержащая CP-нарушающую фазу, и элементы которой экспериментально измерены (!). Однако это не снимает проблему дополнительного источника CP-нарушения. Не совсем корректно утверждение о том, что нейтрино «не должно взаимодействовать с барионной материей». Слабое взаимодействие (не обязательно  $SU(2)$ ), но вполне допустимо.

К недостаткам работы хотелось бы отнести некоторую небрежность изложения сути дела. В ряде случаев используются формулировки (смысл, конечно, понятен для владеющего материалом), которые могут ввести в заблуждение читателя, не являющегося специалистом в данной области. Также встречается некоторая несогласованность обозначений. В некоторых местах используется жаргонное слово «каплинг», хотя в русскоязычной литературе имеется общепринятый термин «константа связи». Некоторые сложные формулы, очевидно, полученные с помощью программы Mathematica, содержат обозначения, отличающиеся от общепринятых (видимо, использованы обозначения из кода). В тексте основного содержания диссертации встречаются отклонения от конвы изложения, которые были бы уместны во Введении, но не при обсуждении деталей. Ряд утверждений недостаточно подкреплён выводами автора. Например, в Главе 3, где представлены численные результаты исследования, делается утверждение о том, что «порядки ширины распадов согласуются с наблюдаемыми», при этом нигде не приведены экспериментальные значения наблюдаемых. Для ширины распада бозона Хиггса на пару нейтрино, вычисление которой заявлено как одна из задач, приводится лишь график, который даже не обсуждается. В тексте присутствуют очевидные опечатки, иногда создается такое впечатление, что написано в спешке. Заключение представляет собой всего лишь перечисление полученных результатов, при этом не приводится итогового вывода о предпочтительности какого-либо из рассмотренных сценариев.

Тем не менее, указанные недостатки не снижают важность и актуальность представленной диссертационной работы. Результаты, полученные в работе могут найти применение при анализе данных Большого адронного коллайдера, а также при планировании новых экспериментов.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертационной работы. Результаты, вынесенные на защиту, докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях и опубликованы в научной литературе, в том числе в журналах, входящих в список ВАК.

Диссертационная работа Гурской Альбины Валентиновны «Свойства бозонов Хиггса в неминимальной суперсимметричной стандартной модели с нарушением  $CP$ -инвариантности» удовлетворяет всем требованиям Высшей Аттестационной Комиссии Российской Федерации, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент,  
кандидат физико-математических наук (01.04.02),  
старший научный сотрудник  
Лаборатории теоретической физики им. Н.Н.Боголюбова  
Объединенного Института ядерных исследований

А.В. Гладышев

141980, г. Дубна Московской области,  
ул. Жолио-Кюри, д.6, ЛТФ ОИЯИ,  
+7 49621 64980 (тел. рабочий),  
+7 910 4449366 (тел. мобильный),  
gladysh@theor.jinr.ru,  
alexey.gladyshev@mail.ru

«24» апреля 2017 г.

Подпись Гладышева А.В. удостоверяю

Ученый секретарь ЛТФ ОИЯИ



А.В. Андреев

«24» апреля 2017 г.