

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ

доктор физ.-мат. наук, академик РАН



Иванов С.В.

2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

о диссертации Беляева Никиты Леонидовича

«Эффекты СР-нарушения и аномальные взаимодействия в хиггсовском секторе»,
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.23 — «Физика высоких энергий»

Представленная диссертация выполнена по одному из наиболее актуальных направлений в физике высоких энергий - поиску «новой» физики в процессах рождения бозонов Хиггса. Это направление является ведущим для экспериментов БАК (Большой адронный коллайдер, ЦЕРН). Данная работа вносит заметный теоретический и экспериментальный вклад в поиск эффектов СР-нарушения и аномальных взаимодействий в секторе бозонов Хиггса.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и библиографии. Общий объём диссертации составляет 193 страницы, включая 61 рисунок и 27 таблиц. Библиография состоит из 153 наименований.

Во **Введении** обосновывается актуальность выбранной темы исследований, приведён обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **первой** главе приведено описание детектора ATLAS и устройство отдельных его подсистем.

Во **второй** главе описываются основные моменты Стандартной модели. Детально рассматриваются явления глобальной и локальной калибровочной симметрии, теорема Голдстоуна, а также механизм Хиггса и спонтанное нарушение электрослабой симметрии с последующей генерацией масс элементарных частиц.

В **третьей** главе детально рассматривается формализм Эффективной теории поля (ЭТП) в физике элементарных частиц. Описаны общие принципы построения ЭТП и основные свойства эффективных Лагранжианов. Несомненным достоинством является детальное обсуждение различных современных феноменологических моделей (k -модель, SMEFT, BSM Characterisation (BSMC), Higgs Characterisation и модель, основанная на эффективной амплитуде вершины HVV). Приведено описание основных программных пакетов, используемых для моделирования событий.

В **четвертой** главе рассмотрено применение формализма ЭТП в исследованиях процессов взаимодействий бозонов хиггсовского типа с фермионами и бозонами Стандартной модели. Следует отметить важность полученных аналитических соотношений, связывающие между собой параметры различных моделей ЭТП. В этой же главе приведены результаты по определению допустимых значений параметров моделей (констант связи) для последующего получения не противоречащих эксперименту предсказаний теории.

Весьма интересным и важным представляется рассмотрение метода морфинга, который позволяет проводить непрерывное описание произвольных наблюдаемых физических сигналов в многомерном пространстве параметров модели. Автором представлен разработанный метод расширенного морфинга, в котором предполагается использование дополнительных элементов наряду с основными базовыми элементами.

Пятая глава посвящена изучению потенциальных возможностей поиска эффектов CP-нарушения в процессе распада бозона Хиггса в четыре лептона или в пару $\tau^+ \tau^-$ лептонов с помощью использования специальных переменных, распределения по которым будут асимметричны в случае присутствия CP-нечётных слагаемых в Лагранжиане.

В **шестой** главе рассматриваются процессы образования бозона Хиггса с последующим распадом $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$. Получены ограничения на аномальные константы связи бозона Хиггса. Рассмотрены методы разделения различных процессов рождения бозона Хиггса с помощью механизмов ggF и VBF. Проведена оценка перспектив поиска четырёхлептонных процессов распада бозона Хиггса на будущем ускорителе HL-LHC.

В этой же главе был разработан универсальный программный пакет классификации под названием FSClassifier, основанный на использовании технологии BDT (boosted decision trees) для глубокой классификации данных.

В **Заключении** приведены основные результаты работы.

В целом представленная Диссертация является законченным научным исследованием. Подробно и ясно описываются и обосновываются сделанные предположения. Важность, актуальность и достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Работы, представленные в диссертации, прошли апробацию внутри коллаборации ATLAS, на международных конференциях, а также в рецензируемых международных научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Среди полученных результатов следует отметить следующие:

- полученные соотношения, связывающие между собой параметры некоторых основных моделей ЭТП;
- разработанный метод определения CP-чётности бозона Хиггса с помощью угловых переменных в процессах $\bar{l} \rightarrow H \rightarrow \tau^{+l} \tau^{-il}$;
- методика выбора оптимальных наблюдаемых для поиска возможных эффектов CP-нарушения в хиггсовском секторе;
- реализация метода морфинга, а также разработка метода расширенного морфинга;

- реализованный программный пакет глубокой классификации процессов, имеющих различную топологию, но одинаковое конечное состояние.

Без сомнения, полученные результаты найдут своё применение в дальнейших исследованиях и анализе экспериментальных данных с БАК.

Среди отмеченных недостатков следует упомянуть следующие:

В **Главе 3** на стр. 36 в обозначении $\{SU(3)\} \text{ rsub } \{C\} \otimes \{U(1)\} \text{ rsub } \{QCD\}$ не ясно, что такое $U(1)_{QCD}$.

На стр. 41 введены обозначения $\tilde{W}_{\mu\nu}^{-ii}$ и $\tilde{A}_{\mu\nu}$, а они определены только на стр. 57.

Желательно описать смысл "минимального нарушения аромата" (см. Стр. 48).

В Таблице 3 (стр. 59) не определена величина $\eta_{\mu_2\mu_3}$. На стр. 60 сказано, что "... в дальнейшем константы связи g_i рассматривались как вещественные ...". Однако, далее в Таблице 4 явно указаны $\Re(\tilde{k}_H \partial W)$ и $\Im(\tilde{k}_H \partial W)$, а на стр. 61 написано "в случае комплекснозначных $\tilde{k}_H \partial W$ ".

На стр. 72 и 73 следовало бы объяснить, что такое "чистые" и "смешанные" процессы. При описании метода расширенного морфинга (стр.75) следовало бы более детально обсудить каким образом выбираются и генерируются дополнительные новые элементы.

В **Главе 4** следовало бы уделить внимание вопросу об ошибках, связанных с генерацией наборов. Источниками таких ошибок могут быть: выбор структурных функций партонов, выбор масштабов Q^2 , процедура адронизации кварков и глюонов, моделирование отклика детекторов и т.п.

На стр. 87 и 88 следовало бы указать, что Z-бозон вблизи массовой оболочки называется «лидирующим». Также желательно указать границы инвариантных масс для $M(Z_1)$ и $M(Z_2)$.

В **Главе 5** не указан критерий изолированности заряженных лептонов и эффективность реконструкции лептонов. Не ясно, требовалось ли отсутствие жёстких адронных струй, что является важным требованием для выделения исследуемого канала $\bar{c} \rightarrow H$ от VBF канала. В формуле (5.13) на стр. 107 нет параметров a_τ, b_τ .

В **Главе 6** (см. стр. 135) не указано отличие моды $2e \rightarrow 2\mu$ от моды $2\mu \rightarrow 2e$. Следовало бы указать основные фоновые процессы, а также набор основных кинематических обрезаний, используемых для выделения сигнальных событий. Кроме того, не ясно требовалось ли наличие *только* двух струй в конечном состоянии.

Среди замеченных опечаток можно указать следующие:

Ускоритель LEP закончил работу в 2001, а не в 2011 г. (см. Стр. 6). На стр. 42 в формуле (3.10) приведены два раза знак ++ и лишняя скобка. Текст на стр. 100: "Было результаты показывают ..." следует заменить на "Полученные результаты показывают ..."

Данные замечания никоим образом не снижают общую ценность работы, выполненной на высоком уровне. Диссертационная работа Беляева Никиты Леонидовича на тему «Эффекты СР-нарушения и аномальные взаимодействия в хиггсовском секторе» выполнена в соответствии с требованиями, предъявляемыми правительством Российской Федерации в постановлении от 24 сентября 2013 г. N 842 о порядке присуждения учёных степеней. Автореферат диссертации правильно и полно отражает содержание диссертации.

Автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 - «Физика высоких энергий».

Отзыв составлен ведущим научным сотрудником Отделения экспериментальной физики, доктором физико-математических наук Слабоспицким Сергеем Ростиславовичем. Отзыв о диссертации обсуждался и был утверждён на семинаре Отделения экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ.

Ведущий научный сотрудник
Отделения экспериментальной физики
НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ,
доктор физико-математических наук
Адрес: 142281, Московская область,
город Протвино, площадь Науки, дом 1
Телефон: +7 (965) 3054605
E-mail: Sergei.Slabospitskii@ihep.ru



Слабоспицкий Сергей Ростиславович

Подпись Слабоспицкого Сергея Ростиславовича заверяю

Ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ
Николаевич



Прокопенко Николай

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
Адрес: 142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1.
Телефон: +7 (4967) 71-36-23
E-mail: fgbu@ihep.ru