

ОТЗЫВ

на диссертацию Никитенко Александра Николаевича
«**Поиски Хиггсовских бозонов вне рамок Стандартной модели
на Большом адронном коллайдере»,**

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Общая характеристика и актуальность работы

Одна из важнейших задач, которая должна быть решена в экспериментах ATLAS и CMS на коллайдере LHC – это проверка того, что электротягкая симметрия действительно нарушается за счет механизма, предложенного Франсуа Энглертом, Робертом Броутом и Питером Хиггсом, который приводит к возникновению масс калибровочных бозонов и фермионов. Открытие в 2012 году на ускорителе LHC бозона Хиггса с массой 125 ГэВ и с характеристиками, совместимыми с предсказаниями Стандартной модели, стало завершающим триумфом этой модели.

Однако кроме обнаружения частицы со свойствами, похожими на бозон Хиггса, необходимо выяснить, какие из теорий хиггсовского сектора согласуются с экспериментальными данными. Для решения этой задачи можно измерять как можно более точно константы связи уже открытого бозона Хиггса с частицами Стандартной модели, чтобы обнаружить расхождение теоретических расчетов и экспериментальных данных. Работа по прецизионному измерению таких констант связи в экспериментах ATLAS и CMS началась сразу после открытия бозона Хиггса.

Другой подход состоит в поиске отсутствующих в Стандартной модели мод распада бозона Хиггса или поиске дополнительных бозонов Хиггса, существование которых предсказывается в ряде моделей, которые являются расширением Стандартной модели. Диссертационная работа Александра Николаевича Никитенко как раз посвящена актуальной проблеме обнаружения новой физики за рамками СМ, а именно поиску дополнительных бозонов Хиггса и поиску отсутствующих в Стандартной модели мод распада бозона Хиггса.

Поставленная и успешно решенная в диссертации задача чрезвычайно сложна. Речь по сути идет об измерении сечений на уровне нескольких пикобарн и даже ниже при наличии фоновых процессов СМ с сечением сотни и даже тысячи пикобарн. В конечном состоянии изучаемых процессов образуются тау-лептоны и b -струи. Идентификация и реконструкция таких объектов детектором крайне сложна и требует нетривиального анализа данных. Стоит вспомнить, что только совсем недавно эксперименты ATLAS и CMS зарегистрировали сигнал от распада бозона Хиггса в пару b -кварков. Особенno трудной представляется задача оценки фонов к этим процессам. Для решения поставленной в диссертации задачи потребовалось разработать методики отбора событий и оценки фона, а также процедуру теоретической интерпретации результатов. Все это было успешно выполнено либо непосредственно самим автором, либо под его руководством, как руководителя физических групп CMS Higgs-Tau и Higgs-Exotica.

В диссертации представлены результаты работы по поиску дополнительных нейтральных бозонов Хиггса с массами как больше, так и меньше массы уже открытого бозона Хиггса (125 ГэВ) в модах распада на пару мюонов, тау-лептонов или на два бозона Хиггса СМ. Поиск дополнительных заряженных бозонов Хиггса, в данной работе, выполнялся в канале распада на тау-лептон и нейтрино. Был выполнен также поиск отсутствующих в Стандартной модели мод распада бозона Хиггса в частицы темной материи, а также на пару легких псевдоскалярных или скалярных гипотетических бозонов Хиггса. В данном случае, если такие распады не наблюдаются экспериментально, то устанавливались верхние пределы на сечение этих процессов с 95% уровнем достоверности.

Обширный экспериментальный материал, накопленный в эксперименте CMS при энергиях протон-протонных столкновений 7, 8 и 13 ТэВ на коллайдере LHC позволил существенно расширить область поиска в пространстве параметров рассматриваемых

моделей по сравнению с предыдущими экспериментами, выполненными на электрон-позитронном коллайдере LEP в ЦЕРН и протон-антипротонном коллайдере Tevatron.

Следует также отметить, что именно автором были инициированы работы по поиску на установке CMS дополнительного нейтрального бозона Хиггса в канале его распада на два бозона Хиггса, один из которых затем распадается на пару тау-лептонов, а второй – на пару b -кварков. Автор также предложил провести поиск легкого СР-нечетного нейтрального бозона Хиггса в канале его рождения в ассоциации с двумя b -кварками и последующим распадом на пару мюонов $pp \rightarrow bbA \rightarrow bb\mu\bar{\mu}$.

Научная новизна

Открытие бозона Хиггса с массой 125 ГэВ в экспериментах ATLAS и CMS позволило впервые провести поиск его нестандартных распадов в частицы темной материи, а также на пару легких псевдоскалярных или скалярных гипотетических бозонов Хиггса, используя данные установки CMS. Энергия столкновения протонов и светимость, достигнутые на коллайдере LHC, позволили выполнить поиск дополнительных бозонов Хиггса, существование которых предсказывается в ряде теоретических моделей, расширяющих СМ, в широком интервале масс, что было недоступно ранее в предыдущих экспериментах на электрон-позитронном коллайдере LEP и протон-антипротонном коллайдере Tevatron.

Практическая значимость и рекомендации по использованию

Несмотря на то, что в данной работе так и не были обнаружены дополнительные бозоны Хиггса, а также нестандартные распады бозона Хиггса, открытого на установках ATLAS и CMS, результаты данной работы существенно ограничили пространство свободных параметров теоретических моделей, пытающихся выйти за рамки Стандартной модели. Результаты, полученные в данной работе, позволили уточнить программу дальнейших поисков в Хиггсовском секторе при работе ускорителя LHC на повышенной светимости и при энергии 14 ТэВ. Разработанные под руководством автора в данной работе методики отбора событий, извлечения возможного сигнала из данных и оценки фона, а также подходы для теоретической интерпретации результатов несомненно будут применяться для дальнейших поисков в Хиггсовском секторе при работе ускорителя LHC на повышенной светимости как в эксперименте CMS, так и в эксперименте ATLAS.

Структура диссертации и ее оформление

Диссертация состоит из введения, девяти глав основного текста, заключения, благодарностей, и содержит 65 рисунков, 17 таблиц и список литературы из 330 наименований. Общий объем диссертации 145 страниц. Содержание диссертации полно и точно отражено в автореферате.

Достоверность полученных результатов

Обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, обусловлена использованием современных экспериментальных методик физики высоких энергий. Достоверность результатов исследования подтверждается также их согласованностью с данными эксперимента ATLAS на LHC.

Апробация результатов

Результаты, представленные в диссертации, докладывались неоднократно на совещаниях коллегии CMS, семинарах в национальной лаборатории им. Э. Резерфорда и Э. Эплтона (Англия), в университете г. Павия (Италия), в Институте феноменологии физики частиц университета г. Дарем (Англия), в Исследовательском центре по физике частиц DESY (Германия), на многочисленных международных конференциях и совещаниях. По результатам диссертации опубликовано 13 печатных работ в реферируемых журналах.

Вклад автора в получение результатов

Основной вклад автора состоит в следующем:

- Автор предложил и осуществлял руководство первыми работами в эксперименте CMS по поиску распадов нейтрального узкого скалярного резонанса, который распадается на пару

тау-лептонов $\phi \rightarrow \tau\tau$, а также дополнительного заряженного бозона Хиггса в его распадах на тау-лептон и нейтрино $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu$ при энергии LHC 7 ТэВ;

– Автор инициировал и осуществлял руководство первыми работами в эксперименте CMS по поиску отсутствующих в Стандартной модели мод распада бозона Хиггса, открытого на LHC, в частицы темной материи $h \rightarrow \text{invisible}$, а также на пару легких псевдоскалярных или скалярных гипотетических бозонов Хиггса с последующим их распадом в тау-лептоны: $h \rightarrow \phi_1 \phi_1 \rightarrow \tau\tau\tau\tau$ при энергии 8 ТэВ.

– Под руководством автора были разработаны методики отбора событий, извлечения возможного сигнала из данных, оценки фона и теоретической интерпретации результатов, которые были затем применены для анализа данных при энергиях 8 и 13 ТэВ, где автор также принимал активное участие;

– Автор предложил выполнить в эксперименте CMS поиск распада тяжелого нейтрального бозона Хиггса в пару бозонов Хиггса с массой 125 ГэВ, которые распадаются на пару тау-лептонов и пару b -кварков $H \rightarrow hh \rightarrow \tau\tau bb$, и вместе с группой Imperial College (London) участвовал в оптимизации отбора событий и теоретической интерпретации полученных результатов;

– Автор предложил и участвовал в работе по поиску в эксперименте CMS легкого псевдоскалярного бозона Хиггса в ассоциативном рождении с парой b -кварков и его распадом на пару мюонов: $pp \rightarrow bbA, A \rightarrow \mu\mu$.

Из работ, выполненных в соавторстве, в диссертации представлены те положения и результаты, которые получены либо лично соискателем, либо при его определяющей роли в постановке задач, разработке и реализации их решений.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО РАБОТЕ

По существу работы можно высказать следующие основные вопросы и замечания:

1. Так называемую трековую изоляцию лептона автор определяет (стр. 36) как векторную сумму поперечных импульсов реконструированных частиц, лежащих внутри конуса отбора с радиусом $\Delta R = 0,3$, за исключением вклада самого лептона. Обычно изоляция лептона определяется как сумма (не векторная!) поперечных импульсов реконструированных частиц, за исключением самого лептона, лежащих внутри заданного конуса отбора, отнесенная к импульсу лептона.
2. В таблице 2 (стр. 38) приведено ожидаемое количество событий от распадов заряженных бозонов Хиггса, когда в конечном состоянии наблюдается электрон или мюон и тау-лептон, распадающийся в адроны. Количество событий с электроном в конечном состоянии примерно в 1,7 раза меньше чем количество событий с мюоном в конечном состоянии. Из текста диссертации непонятно, с чем это связано. Возникает ли это различие из-за разности в эффективности идентификации и реконструкции электронов и мюонов.
3. Из текста диссертации неясно, чем объясняется большая разница между ожидаемым и наблюдаемым пределом для вероятности распада топ-кварка в заряженный бозон Хиггса для полностью адронной моды распада (рис. 4.7 слева, стр. 44) в широком диапазоне массы заряженного бозона Хиггса.
4. При описании работы триггера, используемого для поиска распадов бозона Хиггса в пару легких бозонов Хиггса в рамках модели NMSSM, непонятно о каких ближайших к пучку точках идет речь (стр. 91): «... расстояние между ближайшими к пучку точками не должно превышать 2 мм в направлении оси пучка.»
5. По-видимому, в формулах, определяющих вероятность распада гипотетического легкого СР-четного бозона Хиггса в пару тау-лептонов (стр. 93) присутствует опечатка: вместо $\phi_1 \rightarrow \tau_{\mu\text{one-prong}}$, должно быть $\phi_1 \rightarrow \tau_\mu \tau_{\text{one-prong}}$.

Работа также не лишена небольшого количества формальных недостатков, среди которых можно указать следующие:

1. В тексте встречаются опечатки (пример многостраничный КХД фон стр. 50), пунктуационные ошибки, жаргон (пример каплинги стр. 46 и т.д.)
2. В тексте используются английские обозначения для единиц сечений, светимости, длины, а также неоправданно часто используются английские термины.
3. В тексте иногда вместо общепринятого термина недостающая энергия используется термин потерянная энергия.

Указанные недостатки не влияют на общую высокую оценку результатов, полученных А. Н. Никитенко в диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация Никитенко Александра Николаевича «Поиски Хиггсовских бозонов вне рамок Стандартной модели на Большом адронном коллайдере» представляет собой законченное научное исследование, доставившее исчерпывающую информацию по поиску дополнительных нейтральных бозонов Хиггса в эксперименте CMS, а также поиску отсутствующих в Стандартной модели мод распада бозона Хиггса с массой 125 ГэВ. Диссертация написана грамотно и содержит обширный графический материал.

Диссертация основана на работах, опубликованных в реферируемых высокорейтинговых журналах. Основные ее результаты докладывались автором на семинарах, рабочих совещаниях и международных конференциях. Выводы диссертации обоснованы, полностью соответствуют поставленной задаче и логично вытекают из проведенной работы. Все выносимые на защиту результаты получены при определяющем вкладе самого автора. Автореферат полностью и ясно отражает содержание диссертации. Полученные диссертантом результаты могут использоваться в работах, проводимых в российских институтах таких, как: ИТЭФ, ИФВЭ, ИЯФИ, НИИЯФ, ПИЯФ, ОИЯИ, ФИАН, а также в других научных центрах России, Европы, Азии и США.

Диссертация А. Н. Никитенко отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор А. Н. Никитенко заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Отзыв составил:

Доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
руководитель отделения физики высоких энергий
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Федин Олег Львович

25.10.2019

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константина Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт»,
188300, Россия, Лен. Область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1,
Тел: +7 (81371) 4-60-25, Факс: +7 (81371) 3-60-25
E-mail: dir@pnpi.nrcki.ru, http://www.pnpi.spb.ru/



Подпись О. Л. Федина удостоверяю
Заместитель директора по научной работе
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В.В. Воронин