ОТЗЫВ

официального оппонента 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.

Диссертация посвящена поиску целого семейства бозонов хиггса, которое предсказывается в ряде теорий, являющихся расширением Стандартной модели (СМ) физики элементарных частиц. В основном, это MCCM- минимальное суперсимметричное расширение стандартной модели. Идея суперсимметричного обобщения СМ, которая появилась в начале 80-ых годов рассматривалась, как наиболее обещающая теоретическая идея для решения проблемы натуральности и иерархии масс в СМ. Простейшая схема приводит к MCCM. В MCCM хиггсовский сектор претерпевает существенные изменения по сравнению с СМ. Из восьми исходных степеней свободы двух комплексных дублетов остаются пять наблюдаемых частиц: CP-четные h,H ; CP-нечетный A и два заряженных бозона $H^{\pm}$. Поиском этого семейства частиц физики активно занимались на LEP и Тэватроне. После обнаружения 125-ГэВ бозона на LHC для всех, кто верил в суперсимметрию возник естественный вопрос, что открыто: h, H или A. Естественно, еще большую актуальность получили поиски заряженных бозонов хиггса. LHC дает уникальную возможность продвижения в поисках суперсимметрии. Таким образом, актуальность и новизна темы диссертации не вызывает сомнения. Диссертация А.Н. Никитенко выполнена на статистике, набранной на установке CMS, которая является одним из лидеров в этом направлении. Это определяет высокий научный уровень дис-

сертации. Основные результаты прошли многоступенчатую процедуру проверок и утверждения, принятых в CMS, многократно докладывались автором на конференциях и опубликованы в ведущих журналах. Это определяет достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.

Остановлюсь кратко на содержании работы и на наиболее важных и интересных, с моей точки зрения, результатах диссертации.

Во **Введении** обсуждается теоретическая мотивация и актуальность темы, новизна и практическая ценность. Приводятся сведения об апробации работы и список работ, вошедших в диссертацию. Положительным фактом является очень подробное описание личного вклада автора, при этом приводится много ссылок на технические работы с малым числом авторов, опубликованные в виде " CMS Notes".

Замечания: *Вспомогательные работы можно было включить в основной список работ, вошедших в диссертацию. Хотелось бы также увидеть " CMS Analysis Notes", соответствующие работам, вошедшим в диссертацию.*

Во **Второй главе** диссертации кратко описывается феноменология процессов, поиск которых является целью диссертации. Надо отметить, что автор выбрал сложные для изучения, но принципиально важные процессы с конечными состояниями, содержащими τ, $b\bar{b}$, недостающую энергию. Изучение этих систем требует высокой квалификации и много технической работы по триггеру, калибровке, фонам и т.д.

Замечания: *В этой главе и далее широко используется термин " branching fraction". Почему не хорошо устоявшийся русский эквивалент " относительная вероятность" ? Используются без перевода и масса других терминов: " Dark Matter" = " Темная материя". Можно было один раз дать определение на русском, а далее использовать английское сокращение- " DM".*

В **Третьей главе** диссертации представлено (очень) краткое описание

детектора CMS, которое минимально достаточно для понимания последующих процедур реконструкции и отбора событий.

Замечания: *Некоторые системы описаны небрежно и с ошибками: предливниевый детектор представлен, как "свинцовый и силиконово-стриповый детекторы"; В мюонной системе CMS используются не " ионизационные детекторы", а пропорциональные дрейфовые(центральный детектор) или пропорциональные камеры с катодным считыванием(торцевая часть); возвратное ярмо магнита CMS сделано не из стали, а из мягкого железа. Надо было выбрать несколько важнейших для анализа систем(калориметры, мюонная система) и описать их более подробно.*

Четвертая глава является первой, где приводятся основные результаты диссертации. В ней рассмотрен поиск заряженного бозона хиггса в моде $H^{\pm} \to \tau^{\pm}\nu_{\tau}$. при этом $H^{\pm}$ ищется в процессе распада топ-кварка $t \to H^{+}b$. Для анализа выбираются адронные распады тау. Так как доминирует парное рождение топ, и он распадается и в $H^{+}b$ и в $W^{+}b$, а W^{+} , в свою очередь имеет разные лептонные моды распада, то возникает много различных конечных состояний, которые требуют отдельного рассмотрения. Еще одна степень свободы- $\sqrt{s}$. Приводится анализ сеансов $\sqrt{s} = 7, 8, 13$ ТэВ, а в них разные фоновые условия, разные калибровки и т.д. Очень большой объем работы ! Анализ излагается очень подробно, на высоком уровне. В конце приводится суммарный по всем модам верхний предел на $Br(t \to H^{+}b) \cdot Br(H^{+} \to \tau^{+}\nu)$ в зависимости от массы $m_{H^{+}}$ и исключенная область в плоскости MSSM параметров. В результате получен очень важный результат- заряженный бозон Хиггса с массой меньше 160 ГэВ исключен при всех значениях $tan\beta$. Из этого результата много интересных следствий, которые обсуждаются в седьмой главе .

В пятой главе представлен поиск нейтральных бозонов хиггса в моде $\phi \to \tau\tau$. Поиск проведен при $\sqrt{s} = 7, 8, 13$ ТэВ. Отдельно рассматривались две топологии: с дополнительными b-струями и без них. Первая категория

может быть усилена в MMSM. Рассмотрены пять различных сигнатур для $\tau\tau$: $e\tau_h; \mu\tau_h$; $\tau_h\tau_h; e\mu; \mu\mu$. Результатом являются ограничения на произведение сечения образования на относительную вероятность распада бозона хиггса на $\tau\tau$ и, как следствие, исключенные области на плоскости $m_A, tan\beta$.

Замечания: *совсем не говорится о $h_{125} \to \tau\tau$, обнаруженном CMS на этой же статистике. Куда он делся ? В работе, где он обнаружен выделяется процесс рождения через слияние векторных бозонов (VBF). Почему эта категория событий не используется в представленном анализе ?*

В шестой главе приводятся результаты экспериментального поиска распада тяжелого бозона хиггса H на два легких $H \to hh \to \tau\tau b\bar{b}$. Этот сценарий возникает в MSSM при малых $tan\beta$. Поиск проведен при $\sqrt{s} = 8, 13$ ТэВ. Используются конечные состояния $e\tau_h; \mu\tau_h; \tau_h\tau_h$. В результате получается ограничение на произведение сечения образования H на произведение относительных вероятностей всей цепочки распадов в зависимости от M_H. В конце главы приводится исключенная в результате анализа область на плоскости параметров MSSM: $m_A, tan\beta$.

Замечание: *На стр.69 говорится о коллинеарном приближении для продуктов распада τ, но не дается определения.*

В главе 7 , весьма короткой главе(1.5 стр.) обобщаются следствия, проведенных в предыдущих главах поисков для MSSM.

Замечание: *В выводах говорится о "сечениях" распадов $H \to hh, A \to Zh, H \to t\bar{t}$ и др. Надо "относительные вероятности".*

Глава 8 посвящена поиску нейтрального бозона хиггса в процессе $pp \to b\bar{b}A, A \to \mu\mu$. На первый взгляд, это выглядит гораздо менее обещающим, чем поиск в канале с двумя тау-лептонами, так как канал проигрывает фактор ~ 200 по относительной вероятности. Практически оказалось, что это почти компенсируется большей эффективностью реконструкции и разрешением. Окончательный результат в области до $m_A < 60$ Гэв сравним с результатами, полученными в моде $\tau\tau$, то есть эти исследования дополняют друг

друга. Поиск бозона хиггса в области относительно малых масс в ассоциации с $b\bar{b}$ мотивирован сценарием WS в модели 2HDM, в котором сечение этого процесса аномально велико. Этот вопрос подробно разобран в Главе 2.

В главе 9 представлен поиск распада обнаруженного бозона хиггса h(125) на два других нейтральных бозона хиггса $h_{125} \to \phi\phi$ с последующим распадом $\phi \to \tau\tau$. При этом используется топология, в которой один τ распадается на $\mu\nu\bar{\nu}$, а второй на одну заряженную частицу противоположного знака и нейтрино. Сценарий распада $h_{125} \to \phi\phi$ возникает в "следующей-после-минимальной" суперсимметричной модели(NMSSM) и в 2HDM. Естественно, сигнал ищется в пределах $2m_\tau < m_\phi < 2m_b$.

Замечание: *в конце стр. 97 говорится об ожидаемом пределе "в рамках нулевой гипотезы". Что это за гипотеза? ; При выделении сигнала логично было бы использовать условие равенства полной инвариантной массы системы массе h(125). Из текста не ясно, было ли это сделано.*

В главе 10 описан поиск распада $h \to invisible$, то есть в нейтральные частицы, типа нейтралино, которые являются кандидатами в DM. Для поиска выбирается мода рождения хиггса через слияние векторных бозонов. Ее сигнатура, плюс потерянная энергия позволяют уменьшить фон. Далее проводится объединение анализов, в которых использовались различные моды рождения(VBF, ggH, ZH) и данные при $\sqrt{s} = 7, 8, 13$ ТэВ и получается суммарное ограничение на $\frac{\sigma \cdot h_{125} \to invisible}{\sigma_{SM}}$ для 125-ГэВ хиггса, которое используется в рамках модели, в которой DM взаимодействует с веществом только через этот 125-ГэВ хиггс (Higgs-Portal DM) для получения ограничений на сечение взаимодействия нуклона и частиц DM в зависимости от массы этих частиц. Получается результат, который вполне конкурирует с прямыми поисками темной материи в подземных низкофоновых экспериментах.

В Заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Диссертация содержит большой экспериментальный материал, набранный в новом диапазоне энергии в с.ц.м., который весьма подходит для поисков новой физики, в частности в хиггсовском секторе. Полученные результаты выглядят очень убедительно и характеризуют диссертанта как зрелого физика высокой квалификации. Отдельные перечисленные недостатки ни в коей степени не снижают высокого уровня диссертации. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию. Следует подчеркнуть общий высокий уровень работы, актуальность и научная новизна которой не вызывают сомнений. Все полученные результаты опубликованы. Всего по теме диссертации опубликовано 13 работ в ведущих реферируемых журналах из списка ВАК. Очевиден большой, решающий вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию. Диссертация А.Н. Никитенко является законченным научным исследованием, в котором получены новые фундаментальные результаты по физике элементарных частиц. Считаю, что диссертация А.Н. Никитенко безусловно удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 — физика высоких энергий , а ее автор заслуживает присуждения этой степени.

доктор физ.-мат. наук, член-кор. РАН,
г.н.с. НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ,
142281 г.Протвино, Московской обл., площадь Науки, дом.1,
тел.+74967744419, Vladimir.Obraztsov@ihep.ru

Владимир Фёдорович Образцов

07.11.2019

Подпись В. Ф. Образцова удостоверяю
учёный секретарь НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ
Н.Н.Прокопенко