

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Горбунова Ильи Николаевича

Измерение асимметрии ”вперед-назад” в процессах рождения мюонных пар при столкновении протонов в эксперименте CMS на LHC ,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертация посвящена исследованию образования мюонных пар в pp соударениях при энергии LHC. Надо отметить, что изучение спектра масс мюонных пар проводилось с 70-ых годов прошлого столетия и принесло массу открытий: это открытие семейства Υ -частиц, то есть, открытие b -кварка, открытие Z -бозона в $p\bar{p}$ соударениях и т.д.. Этот метод исследования актуален и сейчас, ведь на LHC открылась возможность продвижения по массе мюонной пары вплоть до $2000 \text{ ГэВ}/c^2$. Этим определяется повизна исследования. В основном, в диссертации применяется метод исследования, основанный на измерении асимметрии вылета вперед-назад в системе покоя пары, то есть пространственной асимметрии. Эта асимметрия обусловлена интерференцией амплитуд с Z и γ , аналогичные измерения активно проводились на LEP. Эта асимметрия чувствительна к существованию новых тяжелых частиц, например, Z' . Причем, она позволяет обнаружить такую частицу даже вне кинематически доступного для LHC диапазона масс. Таким образом, актуальность темы диссертации не вызывает сомнения. Диссертация И.Н. Горбунова выполнена на статистике, набранной на установке CMS, которая является одной из лучших в мире. Это определяет высокий научный уровень диссертации.

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

Во **Введении** обсуждается актуальность темы, повизна и практическая ценность, сведения об апробации работы и приводится список работ, вошедших в диссертацию. Положительным фактом является наличие в списке работ не только официальных публикаций сотрудничества CMS, но и работ с малым числом авторов. Например, наличие в списке ” CMS Analysis Note”, доказывает существенный вклад автора в непосредственное получение результатов.

Замечания: не могу согласиться, что в СМ ”неясный механизм CP-нарушения”. Наоборот, очень ясный, основанный на существенной сложности СКМ матрицы. Дру-

гое дело, что он не достаточен для описания барионной асимметрии вселенной. Во введении можно было уделить место описанию истории изучения спектра мюонных пар и A_{FB} . Ведь до LHC были измерения на Тэватроне, LEP.

В **Первой главе** диссертации представлено краткое описание детектора CMS. Достаточно подробно описана мюонная система. Очень хорошо изложены процедуры реконструкции и идентификации мюонов, это важно для последующих глав.

Замечания: В мюонной системе CMS используются не "ионизационные камеры" (стр.11), а пропорциональные дрейфовые (Barrel) или пропорциональные камеры с катодным считыванием (endcap); возвратное ярмо магнита CMS сделано не из стали, а из мягкого железа. В параграфе 1.3 и в других местах Многократное Кулоновское рассеяние многократно называется "множественным".

Вторая глава посвящена описанию методов измерения асимметрии вылета мюона в процессах Дрелла-Яна. Приводятся все имеющие отношение к A_{FB} формулы Стандартной Модели. Вводится важная для анализа система координат Коллинза-Сопера. Проводится сравнение трех экспериментальных методов определения асимметрии.

Замечания: В формуле 2.2 не объяснено по какой переменной идет суммирование (аромат); В формуле 2.12 $\alpha(s)$ - это бегущая константа связи КЭД, а не КХД; В этой и последующих главах аксептанс установки часто называется "фазовым объемом установки", что, по-моему, является неудачным термином.

В **главе 3** подробно описывается процедура отбора событий пар мюонов и оценка фона. Важно, что для оценки фона используется не только Монте Карло моделирование, но и сами данные: события с мюонами одного знака и $e\mu$ события. В результате на статистике 2012 г. для $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, соответствующей интегральной светимости $\sim 19/6$ фб⁻¹ отобрано $\sim 8 \times 10^6$ событий мюонных пар разного знака с массой вплоть до 2 ТэВ, что безусловно позволяет изучить новую, не исследованную область.

Замечания: Почти совсем не дается информации о статистике 2011 г. $\sqrt{s} = 7$ ТэВ, сказано только, что она в четыре раза меньше. В то же время 3 из 6 работ, вошедших в диссертацию относятся к $\sqrt{s} = 7$ ТэВ. В конце главы неожиданно приводится дифференциальное сечение по $M_{\mu^+\mu^-}$ именно для $\sqrt{s} = 7$ ТэВ (Рис 3.8). А где сечение для $\sqrt{s} = 8$ ТэВ ?

Четвертая глава посвящена измерению асимметрии A_{FB} . Подробно описаны процедуры вычисления поправок, которые необходимы для получения согласия экспериментальных данных и Монте Карло. Это тяжелый, кропотливый труд, требующий хорошего знания деталей установки. Успешное выполнение этой части работы показывает высокую квалификацию диссертанта как физика-экспериментатора. В итоге получены значения асимметрии в 14 интервалах по $M_{\mu^+\mu^-}$ и в четырех интервалах по $Y_{\mu^+\mu^-}$. Данные согласу-

ются с Монте-Карло расчетами, в которые заложена СМ. Для того, чтобы облегчить использование данных теоретиками- не участниками CMS, проведена процедура "unfolding", которая требует высокой квалификации. В результате получены значения асимметрии, которые можно напрямую сравнивать с теорией.

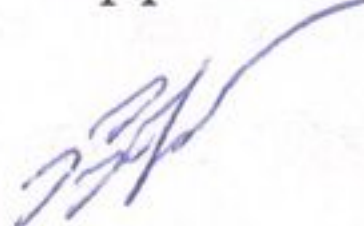
Пятая глава посвящена оценке систематических ошибок и представлению итоговых результатов. Систематические ошибки изучены исключительно тщательно. Это обеспечивает достоверность полученных экспериментальных результатов.

Замечание: *Надо было провести сравнение с существующими экспериментальными результатами, в первую очередь с результатами по e^+e^- парам с Тэватрона при \sqrt{s} 1,96 ТэВ. Интересно было бы обсудить возможность получения из полученных данных конкретных ограничений на Новую Физику.*

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Диссертация содержит большой экспериментальный материал, набранный в новом диапазоне масс мюонной пары: асимметрия «вперед-назад» впервые измерена в широком диапазоне инвариантных масс $M_{\mu\mu}$ от 40 до 2000 ГэВ и быстрот $|Y| < 2,4$ мюонных пар при энергии пучков 7 и 8 ТэВ. 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 6 работ, из них 4 в ведущих реферируемых журналах из списка ВАК. Очевиден большой, решающий вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию. Диссертация И.Н. Горбунова является законченным научным исследованием, в котором получены новые фундаментальные результаты по физике элементарных частиц. Считаю, что диссертация И.Н. Горбунова безусловно удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц, а ее автор заслуживает присуждения этой степени.

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН


В. Ф. Образцов

Подпись В. Ф. Образцова удостоверяю
учёный секретарь ИФВЭ




Н.Н.Прокопенко