

## ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Горбунова И. Н. на тему «Измерение асимметрии «вперед-назад» в процессах рождения мюонных пар при столкновении протонов в эксперименте CMS на LHC », представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц**

### 1. Актуальность темы исследования

Несмотря на точность предсказаний, Стандартная Модель взаимодействия элементарных частиц (СМ) не даёт ответа на ряд принципиальных вопросов, касающихся числа поколений кварков, иерархии масс, механизма CP-нарушения. Следовательно, СМ нельзя рассматривать как окончательную теорию. Существуют теоретические модели, позволяющие выйти за пределы СМ и преодолеть имеющиеся трудности.

Изучение закономерностей рождения пар мюонов в процессах Дрелла-Яна позволяет выполнить поиск «новой» физики и проверить предсказания СМ в новой области энергии. Векторные и аксиально-векторные токи в процессах Дрелла-Яна приводят к появлению асимметрии вылета мюона по направлениям «вперед-назад» относительно направления движения кварка в системе покоя мюонной пары. Величина асимметрии зависит от значений векторной и аксиально-векторной констант связи фермионов, следовательно, она чувствительна к наличию дополнительных вкладов в процессы СМ.

Отличие значения асимметрии от предсказаний СМ может указывать на существование процессов за рамками СМ: новых нейтральных калибровочных бозонов, внутренней структуры кварков и лептонов, суперсимметричных частиц или дополнительных измерений. Асимметрия «вперед-назад» имеет характерную зависимость от быстроты новых нейтральных калибровочных бозонов, предсказываемых рядом моделей с расширенным калибровочным сектором. Это позволяет произвести выбор между различными теоретическими сценариями, даже для частиц, имеющих одинаковый спин. Измерение асимметрии позволяет наложить ограничения на функции распределения партонов. Более того, измерение асимметрии «вперед-назад» в Z-полусе позволяет измерить значения слабого угла смешивания.

Предыдущие результаты по измерению значения асимметрии были получены в экспериментах на Тэватроне в электронном канале при энергии пучков 1,96 ТэВ в системе центра масс. Асимметрия была измерена в области инвариантных масс пары электронов от 40 до 600 ГэВ.

В диссертации представлены результаты измерения асимметрии вылета мюонов «вперед-назад» в процессах Дрелла-Яна на данных первого сеанса LHC эксперимента CMS 2011-2012 годов. Результаты получены на уникальной статистике 5,6 и 19,6 фбн<sup>-1</sup> при энергии взаимодействующих протонов 7 и 8 ТэВ в системе центра масс соответственно.

## **2. Научная новизна и практическая ценность**

Впервые проведено измерение асимметрии вылета мюона по направлению «вперед-назад» в диапазоне инвариантных масс от 40 до 2000 ГэВ и быстрот до 2.4 мюонной пары. Эти уникальные данные получены при рекордных значениях энергий сталкивающихся протонов в не исследованной ранее области инвариантных масс мюонной пары.

Результаты анализа экспериментальных данных позволили проверить предсказания СМ в новой области энергий. Разработаны и реализованы критерии отбора мюонных пар в широкой области инвариантных масс, которые могут быть использованы для изучения характеристик процессов Дрелла-Яна как для проверки СМ, так и поиска новой физики.

Предложена методика извлечения значения асимметрии из данных в условиях pp-столкновений и методы коррекции систематических эффектов.

Результаты измерения асимметрии в Z-полюсе позволили определить значение слабого угла смешивания.

## **2. Основные научные результаты**

В диссертации приведены результаты измерения автором значений асимметрии вылета мюонов по направлению «вперед-назад» в процессах Дрелла-Яна в зависимости от инвариантной массы в области инвариантных масс мюонной пары от 40 до 2000 ГэВ, полученных при уникальной статистике на пучках сталкивающихся протонов при энергии 7 и 8 ТэВ. Измерение выполнено в четырех интервалах по быстройте пары мюонов в диапазоне  $|Y| < 2,4$ .

Автором разработана методика и программное обеспечение для извлечения значения асимметрии «вперед-назад» из данных в условиях pp-столкновений. Были разработаны методы коррекции систематических эффектов (конечного разрешения детекторов, излучения в конечном состоянии, акцептанса, эффективности и ошибок моделирования) и оценены неопределенности, связанные с данными эффектами.

Автором произведена оценка влияния фоновых событий на результаты измерения в рамках СМ тремя различными методами (с помощью моделирования методом Монте-Карло и анализа экспериментальных данных).

## **3. Достоверность и обоснованность результатов, выводов и рекомендаций**

Автор использует известные научные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций.

Обоснованность и достоверность научных результатов, полученных в диссертации, подтверждается корректным использованием современных методов анализа. Достоверность полученных результатов подтверждается также приведенными результатами компьютерного моделирования эксперимента с использованием известных пакетов программ, хорошо зарекомендовавших себя в экспериментах на ЛНС, апробацией основных результатов на конференциях, семинарах и рабочих совещаниях коллаборации, в опубликованных работах.

Работа построена логично, выводы каждого параграфа являются основанием для материалов последующих параграфов работы. Основные результаты и выводы работы обоснованы и достоверны.

#### 4. Недостатки работы

Отмечая научную и практическую значимость работы, высокую степень обоснованности основных ее результатов, следует также указать на некоторые недостатки, присущие диссертации.

В разделе “Научная новизна и практическая ценность” говорится, о том, что результат измерения асимметрии в Z-полусе позволил определить значение слабого угла смешивания, но в дальнейшем сами результаты измерения не приводятся.

На защиту выносятся результаты оценки фоновых процессов, в том числе, с помощью “анализа экспериментальных данных”, но в тексте диссертации информация о методике выполнения данного анализа полностью отсутствует. На рис.3.1-3.5 приводятся только результаты данного анализа, которые лежат систематически немного выше оценок, полученных с помощью Монте-Карло.

К некоторым недостаткам стиля изложения можно отнести использование неустоявшихся англоязычных терминов, таких как например “Particle Flow отбор мюонов” на стр.21, и регулярное, начиная со стр.43, написание имени собственного Монте-Карло без использования заглавных букв.

Следует отметить некоторые неточности в оформлении результатов, в частности, на стр.54 в подписи к рис. 4.1 говорится о чёрной линии, хотя на рисунке чёрные линии отсутствуют. Похожая неточность присутствует на стр.57. В подписи к рис. 4.3 сказано, что чёрными точками показаны данные 2012 года, хотя чёрные точки на распределениях по инвариантной массе пары мюонов на рис. 4.3 отсутствуют.

Другая неточность встречается в тексте на стр.80, где говорится, что “Значения абсолютных систематических неопределенностей измерения асимметрия  $A_{FB}$  после наложения коррекции unfolding для данных и Монте-Карло приведены на рис.5.3 и рис.5.4 соответственно, в зависимости от инвариантной массы и быстроты мюонной пары”, что находится в противоречии с содержанием подписи к рис. 5.3, в котором утверждается, что на нём приведены “Значения абсолютных систематических неопределенностей измерения асимметрия  $A_{FB}$  для МК до коррекции в зависимости от инвариантной массы и быстроты мюонной пары”

Отмеченные недостатки не умаляют перечисленных выше достоинств диссертации Горбунова И.Н. и не оказывают влияния на надёжность и достоверности полученных результатов.

#### 5. Заключение

Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе приведены актуальные научные результаты. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Работа базируется на достаточном числе исходных данных, примеров и расчетов. Она написана доходчиво и грамотно. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы.

Основные положения диссертации изложены в опубликованных работах автора. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Учитывая актуальность выполненных исследований, научную новизну и практическую значимость полученных результатов считаю, что представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Горбунов Илья Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент

к.ф-м.н., доцент  
Булеков О.В.

Подпись удостоверяю  
Заместитель начальника отдела  
документационного обеспечения  
НИЯУ МИФИ

