

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Шматова Сергея Владимировича

Исследование процессов парного рождения мюонов в
эксперименте CMS на большом адронном коллайдере ,

представленную на соискание ученой степени доктора

физико-математических наук по специальности

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертация посвящена исследованию образования мюонных пар и множественному рождению частиц в $p\bar{p}$ соударениях при энергии LHC. Надо отметить, что изучение спектра масс мюонных пар проводилось с 70-х 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 весьма актуален и сейчас, ведь на LHC открылась возможность продвижения по массе мюонной пары вплоть до $5000 \text{ ГэВ}/c^2$. В диссертации применяется также метод исследования, основанный на измерении асимметрии вылета вперед-назад в системе покоя пары, то есть пространственной асимметрии, которая обусловлена интерференцией амплитуд с Z и γ . Аналогичные измерения активно проводились на LEP. Эта асимметрия чувствительна к существованию новых калибровочных бозонов, например, Z' . Причем она позволяет обнаружить такую частицу даже вне кинематически доступного для LHC диапазона масс. Таким образом, актуальность и новизна темы диссертации не вызывает сомнения. Диссертация С.В. Шматова выполнена на статистике, набранной на установке CMS, которая является одной из лучших в мире. Это определяет высокий научный уровень диссертации. Основные результаты многократно докладывались автором на конференциях и опубликованы в ведущих жур-

налах. 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 аprobации работы и 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. Много публикаций в российских журналах: ЯФ (8 публикаций), ЭЧАЯ и письма в ЭЧАЯ(6).

Замечания: Во введении можно было уделить больше места описанию истории изучения мюонных пар. Кроме действительно основополагающего эксперимента L. Ledermana et al. был цикл исследований на У-70 в Протвиле в 1975-1980 годы, затем были эксперименты на SPS, Тэватроне.

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: Учитывая большую роль, которую играет Si трекер для измерения импульсов мюонов и их идентификации, можно было дать описание этого детектора.

При описании Предливневого детектора стр.38 сказано, что он имеет отверстие $d=50$ см для трубопровода пучка. На самом деле - для области высокой интенсивности вокруг вакуумной камеры пучка. Эта область перекрывается HF.

Вторая глава посвящена описанию методов моделирования, реконструкции и отбора событий. Очень подробно и на высоком уровне излагается проце-

дара реконструкции треков мюонов и их идентификация. Эта глава включает также проверку разработанных алгоритмов реконструкции и моделирования на тестах на выведенных пучках SPS и в глобальном сеансе на реальной установке на космических мюонах.

Замечания: При описании независимой реконструкции мюонных треков на стр.58 сказано, что размер области взаимодействия пучков по $z \sigma_z = 15 \text{ мкм}$, надо 15 см.

На стр.59 многократное кулоновское рассеяние называется множественным; При описании идентификации мюонов в калориметрической системе стр.68 упоминается о высоком пороге в торцевой части ECAL (500 МэВ) по сравнению с 60 МэВ в центральной части. Интересно, с чем это связано.

При описании алгоритма пространственной изолированности мюонов на стр.71 упоминается критерий на "величину хитов", надо "количество или множественность хитов".

В главах 3,4 в контексте подготовки PhTDR CMS с помощью МК моделирования подробно изучается потенциал CMS в области исследования процесса Дрелла-Яна и поиска новой физики в канале с двумя мюонами при $\sqrt{s} = 14 \text{ ТэВ}$. В главе 4 изучены возможности CMS для поиска новой физики, причем не только традиционных новых калибровочных бозонов Z' , но и состояний со спином 2, возникающих в моделях многомерной гравитации. Кроме непосредственной задачи написания TDR, это исследование позволило разработать критерии отбора событий, изучить источники фона, понять источники систематических ошибок, настроить многочисленные параметры процедур моделирования и реконструкции. В дальнейшем это позволило оперативно получать физические результаты на реальных данных. На высоком уровне излагается теория многочисленных физических процессов. Рассчитаны теоретические погрешности в сечении рождения мюонных пар, вызванные неопределенностями в pdf. Это очень важно, в частности, для поиска новых "нерезонансных" процессов, дающих вклад в сечение рождения пар мюонов.

Замечания: В параграфе 3.5, где описывается асимметрия вперед-назад, рассматривается только система Коллинза-Соннера. Можно было обсудить и другие системы: Готфрида-Джексона, *Helicity*.

При определении системы Коллинза-Соннера не четко сказано, как определяется протон, дающий夸克(антикварк).

На стр.117 сказано, что в СМ асимметрия в районе пика Z -бозона мала "вследствие малости констант связи Z с лептонами". Правильно "малости векторной константы связи".

Часто употребляется термин "эффективность акцептанса". Не всегда ясно, что имеется в виду. Обычно используются термины "геометрическая эффективность" и "эффективность кинематических отборов".

На Рис. 3.75 приводится ошибка в измерении асимметрии вперед-назад A_{FB} . Она становится больше единицы для $M_{\mu\mu} > 3$ ТэВ, что странно; Результаты исследований по поиску НФ приводятся только в контексте "открытия", интересно было бы посмотреть и на области параметров новой физики, которые можно исключить при данной интегральной светимости.

Асимметрия вперед-назад используется только для проверки СМ. Интересно было бы показать потенциал ее использования для обнаружения новой физики (Z') в области не доступной для прямого поиска.

В главах 5,6 приводятся результаты экспериментального исследования процесса Дрелла-Яна и поиска новой физики в канале с двумя мюонами при энергии в с.ц.м. $\sqrt{s} = 7,8$ ТэВ. Данные набраны в ходе RUN1 LHC в 2009-2012 гг. Впервые измерены дифференциальные сечения образования мюонных пар и асимметрия вперед-назад в области масс до 2000 ГэВ. Из асимметрии получено значение $\sin^2 \theta_W$. Измерено инклузивное сечение образования Z -бозона. Проведен поиск калибровочных бозонов Z' , возбужденных состояний многомерного гравитона G_{KK} со спином 2, поиск нерезонансных сигналов, предсказываемых моделями многомерной гравитации. Установлены верхние пре-

дели на сечения этих процессов, получены новые ограничения на параметры теорий.

Замечание: На Рис. 5.126 все рисунки помечены, как "Preliminary", хотя все опубликовано.

В Таблице 5.23, в последней строчке надо $\alpha_{3D} > 3$ мрад.

На стр.196 не написано из какого распада ($Z?$) извлекается эффективность идентификации и реконструкции мюона.

Не описана процедура измерения светимости в CMS, хотя светимость вносит заметную ошибку в результаты.

В главе 7 приводятся результаты исследования процессов множественного рождения частиц при $\sqrt{s} = 7,8$ ТэВ. Эта глава слабо связана с предыдущими главами, связь есть через теоретические сценарии новой физики, а именно, через модели низкоэнергетической гравитации с дополнительными измерениями. Во введении к этой главе автор демонстрирует глубокое знание теории. Путем анализа экспериментальных распределений по полной поперечной энергии S_T получены верхние пределы на сечения процессов множественного рождения частиц в области S_T 1.5-5.0 ТэВ, для событий с разной множественностью. На основе этих результатов впервые в коллайдерных экспериментах получены ограничения на сечения образования микроскопических черных дыр.

Замечание: При определении сферичности S_T стр.257 говорится, что поперечная энергия частиц берется со знаком, в зависимости от знака полярного угла θ . Полярный угол обычно меняется от 0 до π !

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Диссертация содержит большой материал, в том числе, экспериментальный материал, набранный в новом диапазоне энергии в с.ц.м. Дифференциальные сечения рождения и асимметрия «вперед-назад» мюонных пар впервые измерены в широком диапазоне инвариантных масс $M_{\mu\mu}$ до 2000 ГэВ

и быстрот $|Y| < 2,4$ мюонных пар при энергии в с.ц.м. 7 и 8 ТэВ. Кроме того, изучено множественное рождение частиц при поперечной энергии S_T 1.5-5.0 ТэВ. Полученные результаты выглядят очень убедительно и характеризуют доктора физики высокой квалификации. Отдельные перечисленные недостатки ни в коей степени не снижают высокого уровня докторской 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 докторской диссертации опубликовано 53 работы, из них 32 в ведущих реферируемых журналах из списка ВАК. Очевиден большой, решающий вклад автора в работы, вошедшие в докторскую диссертацию. Докторская диссертация С.В. Шматова является законченным научным исследованием, в котором получены новые фундаментальные результаты по физике элементарных частиц. Считаю, что докторская диссертация С.В. Шматова безусловно удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц, 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

01.10.2019

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



Н.Н.Прокопенко

Список основных публикаций за 2014 – 2019 годы

член-корреспондента РАН, доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника с возложением обязанностей начальника Лаборатории электрослабых процессов ФГБУ Института физики высоких энергий имени А. А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» Образцова Владимира Федоровича по теме диссертации Шматова Сергея Владимировича «Исследование процессов парного рождения мюонов в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере», представленной к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «физика атомного ядра и элементарных частиц».

1. R. Aaij et al, “Measurement of the Charm-Mixing Parameter y_{CP} ”, Phys. Rev. Lett. **122** (2019) 011802.
2. R. Aaij et al, “Observation of the decay $B^0_s \rightarrow D^0 K^+ K^-$ ”, Phys. Rev. D **98** (2018) 072006.
3. R. Aaij et al, “Measurement of $Z \rightarrow \tau^+\tau^-$ production in proton-proton collisions at 8 TeV”, JHEP **1809** (2018) 159.
4. R. Aaij et al, “Measurement of the time-integrated CP asymmetry in $D^0 \rightarrow K^0 S K^0 S$ decays”, JHEP **1811** (2018) 048.
5. R. Aaij et al, “Measurement of $D^\pm s$ production asymmetry in pp collisions at 7 and 8 TeV”, JHEP **1808** (2018) 008.
6. R. Aaij et al, “Search for a dimuon resonance in the Υ mass region”, JHEP **1809** (2018) 147.
7. R. Aaij et al, “Search for weakly decaying b-flavored pentaquarks”, Phys. Rev. D **97** (2018) 032010.
8. R. Aaij et al, “Search for excited $B^+ c$ states”, JHEP **1801** (2018) 138,
9. E. Cortina Gil et al, “Search for heavy neutral lepton production in K^+ decays”, Phys. Lett. B **778** (2018) 137.
10. R. Aaij et al, “First Observation of the Rare Purely Baryonic Decay $B^0 \rightarrow pp$ ”, Phys. Rev. Lett. **119** (2017) 232001.
11. R. Aaij et al, “Study of bb correlations in high energy proton-proton collisions”, JHEP **1711** (2017) 030.
12. R. Aaij et al, “Study of J/ψ Production in Jets”, Phys. Rev. Lett. **118** (2017) 192001.
13. R. Aaij et al, “Search for Higgs-like bosons decaying into long-lived exotic particles”, Eur. Phys. J. C **76** (2016) 664.
14. R. Aaij et al, “Measurement of the forward-backward asymmetry in $Z/\gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-$ decays and determination of the effective weak mixing angle”, JHEP **1511** (2015) 190.
15. R. Aaij et al, “Search for long-lived heavy charged particles using a ring imaging Cherenkov technique at LHCb”, Eur. Phys. J. C **75** (2015) 595.