

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Каменщикова Андрея Александровича «**ПОИСК ЛЕПТОКВАРКОВ ПЕРВОГО ПОКОЛЕНИЯ ПРИ ПАРНОМ РОЖДЕНИИ В ПРОТОН-ПРОТОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ATLAS**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико—математических наук по специальности 01.04.23 — физика высоких энергий

Диссертационная работа Каменщикова А.А. посвящена актуальной проблеме обнаружения физики за рамками Стандартной модели (СМ), а именно, поиску лептокварков первого поколения в эксперименте ATLAS на Большом Адронном Коллайдере (LHC).

В некоторых теориях за пределами СМ, таких, как Теория Великого Объединения, расширенные калибровочные модели, модели техницвета, составные модели фермионов и пр. новые симметрии позволяют объединить кварки и лептоны в едином групповом представлении, т.е. описать все фундаментальные фермионы с единых позиций. Эти модели предсказывают существование новых бозонов, называемых лептокварками (LQ), несущих одновременно барионные и лептонные квантовые числа. Лептокварки имеют дробный электрический заряд, спин, равный 0 или 1, и распадаются на заряженные лептоны и кварки с брэнчингом (неизвестным из теории)  $\beta$  или на нейтрино и кварки с брэнчингом  $1-\beta$ . Таким образом сигналом для таких частиц служит образование пары лептонов и пары струй. Лептокварки, как и фермионы СМ, образуют поколения – частицы первого поколения распадаются на электроны, второго – на мюоны, третьего – на  $\tau$ -лептоны.

Попытки обнаружить подобные состояния предпринимались ранее в экспериментах на ускорительных комплексах HERA, LEP, Tevatron, а также в экспериментах на сталкивающихся протонных пучках LHC при энергии 7 ТэВ в с.ц.м. Продемонстрировав отсутствие значимого сигнала, накопленные данные позволили установить ограничения на массу лептокварков первого поколения, наиболее сильное из которых составило 830 (640) ГэВ для  $\beta = 1.0$  (0.5).

Данная работа лежит в ряду исследований по поиску лептокварков, продолженных в экспериментах на LHC при энергии 8 ТэВ на накопленной статистике, превышающей предыдущую почти в 4 раза. В работе проводилась проверка совместимости модели лептокварков первого поколения при парном рождении с данными, полученными экспериментом ATLAS в канале распада лептокварка на электрон и струю.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и шести приложений. Список литературы включает 123 наименования.

Постановка проблемы изложена во введении.

В первой главе рассмотрены некоторые модели лептокварков, основные механизмы рождения, а также приведены результаты поиска лептокварков как в предшествующих экспериментах, так и на экспериментальных комплексах ATLAS и CMS на данных первого цикла LHC при энергиях 7 и 8 ТэВ в с.ц.м. Кроме того, в этой главе дано краткое описание детекторных систем установки ATLAS, описаны наборы событий экспериментальных данных и Монте Карло событий, используемых в представленном анализе. В заключении в первой главе обсуждены условия отбора и реконструкции физических объектов (электронов, мюонов и струй) и событий, содержащих два электрона и две струи.

Во второй главе проводились оценки величины сигнальных и фоновых событий, выполненные на основании моделирования Монте Карло. Для более точного согласия данных и результатов моделирования выполнена коррекция событий Монте Карло с помощью весовых факторов (для фона от парного рождения  $t$ -кварков) и проведена оценка доли событий с ложными электронами.

Стратегия поискового анализа, используемая в работе, описана в третьей главе. В качестве дискриминирующих предлагается использовать три кинематические переменные: инвариантную массу двух электронов, сумму абсолютных значений поперечных импульсов

двух лептонов и двух струй (ST) и минимально возможную массу лептокварка, т.е. минимальную инвариантную массу лептона и струи в событии. Используя эти переменные, был проведен дополнительный отбор событий для увеличения отношения сигнал/фон. Здесь же описана методика проверки правильности описания фоновых процессов с помощью экспериментальных данных в контрольных областях.

В четвертой главе детально изучены источники систематических ошибок выполненного анализа, включая неопределенности измерения значения интегральной светимости, реконструкции и идентификации электронов, отбора событий, а также теоретические неопределенности оценки величины фоновых процессов.

В пятой главе выполнялось сравнение двух статистических подходов, частотного и байесовского, при проведении анализа по совместимости той или иной физической модели с полученными экспериментальными данными. Была показана совместимость этих подходов с точки зрения получаемых физических интерпретаций.

Основные результаты по поиску парного рождения лептокварков первого поколения приведены в шестой главе. Для этого использовались данные, набранные экспериментом ATLAS при энергии 8 ТэВ и соответствующие интегральной светимости  $20.3 \text{ фбн}^{-1}$ . Получены верхние пределы на величину сечения этого процесса с учетом соответствующей вероятности распада  $\beta$  в зависимости от ожидаемой массы лептокварка. Сравнение полученного экспериментального предела позволило установить новые ограничения на массу лептокварков в зависимости от величины  $\beta$ .

Характеризуя диссертацию в целом, можно сказать, что в ней проведено исследование в актуальной области современной физики высоких энергий, представляющее интерес как для развития теоретических моделей в рассматриваемой области новой физики, так и для анализа современных экспериментальных данных. Качество и объем проведенных работ, использованные в диссертации статистические методы характеризуют соискателя как сложившегося исследователя высокого уровня.

Диссертация написана грамотно, содержит обширный графический материал. Основные результаты сведены в наглядные таблицы.

По существу работы можно высказать следующие основные вопросы и замечания:

1. Из диссертации не совсем ясно, почему для анализа выбрана именно модель Бахмюллера-Рюкла-Уиллера (mBRW)? В чем состоит отличие этой модели от других моделей лептокварков? А также, чем обусловлен выбор значения константы связи  $\lambda$ ? Какие существуют ограничения на эту величину с т.з. теории? Значение выбрано так, чтобы ширина была меньше разрешения детектора, как повлияет на итоговый результат анализа выбор ширины значительно больше разрешения детектора (если это не запрещено теорией)?
2. Недостаточно обоснована новизна двух методов статистической проверки моделей физики за рамками CM в эксперименте. Сравнение в рамках частотного и байесовского подхода предпринимались и раньше. Также в заключении Главы 5 делается вывод, что результаты, полученные в рамках частотного и байесовского статистических формализмов, “сопоставлены и продемонстрировали совместимость их статистической и физической интерпретации.” Однако далее говорится, что “выбор между двумя, частотным и Байесовским, подходами предлагается делать после исследования производительности статистических процедур в каждом индивидуальном анализе НЕР”. Если разница использования методов заключается только в затратах компьютерного времени, то в диссертации можно было бы привести характерные времена проведения анализа для двух разобранных методов на конкретном, описанном в диссертации примере.
3. Стр. 68: Выбор переменной ST в качестве дискриминирующей обусловлено не ее “инклюзивностью”, а ее чувствительностью к топологии событий (степени симметричности).
4. Стр. 8: На рис.6.3 наблюдается систематическое превышение ожидаемого предела на

сечение рождения лептокварков над наблюдаемым во всем диапазоне исследуемых масс лептокварков. Это же упоминается и в тексте диссертации. Хотя разница небольшая, не влияющая на результаты и выводы диссертации (находится в пределах 1-2 среднеквадратичных отклонений), подобное поведение ожидаемых и наблюдаемых пределов наводит на мысль о существовании некоторой неучтенной в анализе систематики.

5. Несмотря на большой объем, в работе опущен ряд деталей, наличие которых (или ссылок на другие источники) помогло бы читателю разобраться в сути обсуждаемых проблем. Примеры
- на стр. 12 при обсуждении механизмов рождения лептокварков желательно было бы привести вклады от разных механизмов в полное сечения рождения
  - на стр. 17 при описании физико-технических характеристик установки ATLAS стоило привести эффективности и точности реконструкции хотя бы для физических объектов, используемых в анализе (электроны и струи).
  - на стр. 19 стоило бы упомянуть, матричный элемент какого порядка теории возмущений использован в генераторе, применяемом для моделирования сигнала.
  - на стр. 23 упоминаются условия на форму кластера в калориметре и другие критерии отбора треков, совместимости кластера и трека, качества объектов в калориметре. Можно было бы описать эти условия или привести ссылку на работы.
  - на стр. 35 как были получены весовые факторы для коррекции наборов данных Монте Карло процесса парного рождения  $t$ -кварка?

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

1. В диссертации введено и используется большое число акронимов, которые, как и используемые переменные, в тексте определяются единожды, что, с учетом объема работы, затрудняет понимание текста. Вместе с тем, ряд терминов и определений либо не вводятся (пример – “интегральная светимость”, стр.7, 14, 18 и т.д), либо вводятся после первого упоминания в тексте (пример –  $m_{LQ}^{\min}$  на стр.32).
2. В тексте часто используется профессиональный жаргон и присутствуют неточности перевода англоязычных терминов, чего следовало бы избегать, особенно с учетом того, что в русском языке имеются устоявшиеся профессиональные термины для обсуждаемых понятий. Примеры – “симуляция” (стр.18 и т.д.), “управляемый данными метод” (стр.18), “коллективно  $Z/\gamma$ ” (стр.18), “внутреннее пространственное разрешение” (стр.24), “образцы Монте-Карло” (стр.27 и т.д.), “пара дубликатов” (стр.29), “срезы по величине инвариантной массы” (стр.29 и т.д.), “постериорная p.d.f.” и “приорная p.d.f.” (стр.91 и т.д.).
3. На стр. 41 в тексте указано, что вероятность ошибочной идентификации электрона  $f$  составляет  $\sim 10\%$ , тогда как из рис.2.38-2.40 следует, что она варьируется от 5 до 23% в зависимости от поперечной энергии электрона и его псевдобыстроты.

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

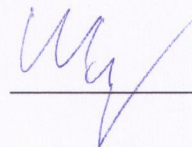
Апробация работы состоялась на ряде представительных международных конференций и семинаров, основные результаты диссертации опубликованы в научных журналах, входящих в список ВАК. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертационная работа Каменщикова Андрея Александровича «Поиск лептокварков первого поколения при парном рождении в протон-протонных взаимодействиях в эксперименте ATLAS» представляет собой фундаментальное научное исследование, выполненное на высоком уровне экспериментальной физики. Её результаты

являются оригинальными, содержат новые разработки стратегии статистического анализа для поиска новой физики за пределами СМ и новые ограничения на параметры моделей лептокварков.


Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор, Каменщиков Андрей Александрович, заслуживает присуждения научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Кандидат физико-математических наук  
по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра  
и элементарных частиц,  
начальник сектора  
Лаборатории физики высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований  
14198, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри 6,  
[shmatov@cern.ch](mailto:shmatov@cern.ch), тел. 8(496) 2163445

  
С.В. Шматов

Подпись Шматова Сергея Владимировича  
заверяю  
ученый секретарь Лаборатории физики высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований



  
Д.В. Пешехонов

24.04.2017