

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Степеннова Антона Дмитриевича
«Образование векторных бозонов в сопровождении адронных струй»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

В диссертации представлены результаты по двум направлениям: исследованию влияния эффектов радиации на передний адронный калориметр(HF) CMS и разработке методики его калибровки; изучению процессов образования векторных бозонов Z , W совместно со струями. По первому направлению надо отметить, что HF работает в CMS в исключительно сложных радиационных условиях, соответствующих годовой дозе ~ 100 Мрад. В таких условиях необходима непрерывная калибровка отклика детектора, причем многие традиционные методы калибровки не возможны. Второе направление интересно с точки зрения изучения сложных процессов, в которых участвуют кварки, глюоны и калибровочные бозоны, которые можно достаточно точно рассчитать в Стандартной Модели. Сравнение с экспериментальными данными (при условии достаточной точности измерений) может выявить значимое расхождение и дать указание на Новую Физику. Исследование выполнено при максимальной доступной энергии $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. Таким образом, актуальность и новизна темы диссертации не вызывает сомнений. Диссертация А.Д. Степеннова выполнена на статистике, набранной на установке CMS, которая является одним из лидеров в физике высоких энергий. Это определяет высокий научный уровень диссертации. Основные результаты прошли многоступенчатую процедуру проверок, принятых в CMS, многократно докладывались автором на конференциях и опубликованы в ведущих научных журналах. Это определяет достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.

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

Во **Введении** раскрывается актуальность темы исследования, личный вклад автора, научная новизна и практическая ценность диссертации, приводятся положения, выдвигаемые на защиту, дается краткий обзор публикаций.

Вторая глава посвящена описанию детектора CMS на LHC, сначала рассказывается о самом коллайдере LHC, его целях, задачах и параметрах, а затем говорится о детекторе CMS и его подсистемах. Детектор описан достаточно подробно. Особенno подробно описывается адронный калориметр(НВ, НЕ, HF, НО), включая реконструкцию струй и мюонная система. Это в дальнейшем помогает понять детали процедуры калибровки HF и анализа физических процессов.

Замечания: *При описании LHC на стр.13 сказано, что в экспериментах, где не требуется максимальная светимость, пучки расфокусируются. Пучки, конечно, фокусируются, но не так сильно, как для CMS и ATLAS ;*

При описании установки ATLAS надо было сказать, что ее особенностью является торoidalный магнит, что собственно зашифровано в названии «A Toroidal LHC ApparatuS»;

При описании силиконовой трековой системы возникает естественный вопрос о полной радиационной длине детектора;

Зачем нужен предливниевый детектор? На стр. 18 написано, что для идентификации фотонов, но ведь есть трековая система, с помощью которой можно отличить фотон от электрона. При этом предливниевый детектор ухудшает энергетическое разрешение прекрасного гамма-детектора;

При описании мюонной системы на стр. 22 сказано, что детекторы расположены между слоев стали в возвратном ярме. Правильно- «слоев железа». Интересно, что эта неточность содержится и в официальной публикации CMS [26].

В Третьей главе представлено измерение ослабления сигнала в переднем калориметре (HF) CMS. Эта глава является первой, где приводятся результаты диссертации, вынесенные на защиту. В ней подробно говорится об

измерении радиационной стойкости кварцевых волокон, о различных аспектах этой проблемы. Видна ведущая роль группы ИТЭФ в этих измерениях. В диссертации реализован интересный метод калибровки, основанный на том, что средняя энергия, выделяемая в кольце модулей калориметра с определенной псевдобыстротой при одинаковых условиях работы ускорителя постоянна. На практике светимость ускорителя и количество взаимодействий в одном пересечении пучков может плавать, и это необходимо учитывать в процедуре калибровки. Чтобы увеличить стабильность условий измерений, использовались события с образованием Z — бозона в центральной области детектора. Даже после учета указанных эффектов отнюдь не тривиально, что калибровка увенчалась успехом, что указывает на высокую квалификацию диссертанта.

Замечания: *Можно было кратко рассмотреть возможность традиционных методов калибровки, например, радиоактивным источником, как это сделано для HB и HE;*

Не рассматривается вопрос о радиационной стойкости фотодетекторов, о них ничего не сказано и в Главе 2.

Четвертая глава посвящена изучению событий с Z бозоном и струей, инициированной c -кварком. Этот процесс интересен сам по себе, например, для поисков эффектов «intrinsic» c -кварков в протоне и проверки теоретических расчетов и как фон для поисков эффектов новой физики (НФ). Надо отметить, что автором выбран сложный для экспериментального изучения процесс. Для его анализа нужно восстанавливать как электроны и мюоны, так и адронные струи, при этом уметь отбирать струи от c -кварков с достаточной эффективностью и надежным подавлением фона. Для этого требуется высокая квалификация и выполнение большого объема работы. Анализ излагается детально, на высоком уровне.

Замечания: не дано определение нормировок SFl , SFc , SFb при описании процедуры измерения числа событий с c -флейвором (4.6). Пришлось смотреть в [26], где ясно написано, что это отношение долей l, c, b компонент, полученных из фита и из МК; возникают вопросы об оптимальности

процедуры определения числа с-струй путем фитирования именно распределения по t_{sv} . Более логичным выглядит фитирование распределения по дискриминатору CSVv2 [45], используемому в процедуре с-мечения.

В пятой главе описано исследование электрослабых процессов с векторными бозонами и двумя струями. Речь идет о процессах $lljj$ и $lvjj$, где l это электрон или мюон, а струи получаются в результате фрагментации夸ков, возникающих в жестком процессе. Измеренное сечение процессов при больших массах лептонной и струйной пары и больших p_t струй сравнивается с вычислениями в СМ. Эти процессы также используются для поиска НФ, а именно, аномального трехбозонного взаимодействия. Эти процессы также весьма трудны для изучения, так как есть фоновые КХД процессы, где струи инициированы глюонами. Поэтому необходим алгоритм, который эффективно отличает夸ковые струи от глюонных. Есть также фоновые КХД-процессы, которые интерферируют с электрослабыми. Отдельная задача, решенная доктором наук, это оценка и учет этой интерференции. Успешное измерение сечений изучаемых EW процессов в таких трудных фоновых условиях еще раз доказывает высокую квалификацию доктора наук.

Замечания: на правом Рис.54 верхний входной夸к - и - , а не - d - ; в правой части формулы (16) стр.90 «+» , а не «-» ; надо было привести «типичную» диаграмму фонового процесса с глюонными струями; полученные ограничения на аномальное трехбозонное взаимодействие надо было сравнить с мировыми данными, в частности, с данными LEP.

В Заключении суммируются основные результаты докторской работы.

Докторская диссертация содержит большой экспериментальный материал, набранный в новом диапазоне энергий в с.п.м., который весьма подходит как для изучения рождения Z,W совместно со струями, так и для поисков новой физики, в частности аномальных констант связи ТГС. Полученные результаты выглядят очень убедительно и характеризуют доктора наук как зрелого физика высокой квалификации. Хочется отметить широкий диапазон тематики докторской диссертации: от чисто экспериментальной главы, посвященной калибровке

переднего калориметра CMS до глав, требующих хорошего знания теории. Отдельные перечисленные недостатки ни в коей мере 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 5 работ в ведущих реферируемых журналах из списка ВАК. Очевиден большой вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию. Результаты докладывались автором на шести конференциях, в том числе на важной международной конференции ICHEP2020. Диссертация А. Д. Степеннова является законченным научным исследованием, в котором получены новые фундаментальные результаты по физике элементарных частиц. Считаю, что диссертация А.Д. Степеннова безусловно удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий, а ее автор заслуживает присуждения этой степени.

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН
главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ
142281, Россия, г. Протвино Московской обл., площадь Науки, дом 1,
Тел. +74967744419, Vladimir.Obraztsov@ihep.ru

Владимир Федорович Образцов



01.09.2021

Подпись В. Ф. Образцова удостоверяю

Зам. директора НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ



О. В. Бажинова