

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Федина Олега Львовича

Измерение поляризационных угловых коэффициентов в процессах лептонного распада Z -бозона в эксперименте ATLAS на LHC,

представленную на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук по специальности

01.04.23 – физика высоких энергий.

Диссертация посвящена двум большим темам: измерению поляризационных угловых коэффициентов лептонного распада Z -бозонов, рожденных в эксперименте ATLAS на LHC, и созданию детектора переходного излучения для торцевых частей установки ATLAS.

Изучение процессов рождения и распадов калибровочных бозонов (Z и W), активно начавшееся на e^+e^- коллайдере LEP в конце 80-х годов прошлого столетия, стали подлинным прорывом в исследованиях и верификации Стандартной Модели. Прецизионные измерения в секторе калибровочных бозонов дали толчок развитию техники радиационных поправок, вычислений в высоких порядках (с учетом петель) в электрослабых процессах. Измерение масс Z и W , определение количества поколений лептонов, исследования в секторе трех-бозонных констант ($Z(\gamma)W^+W^-$, $Z(\gamma)Z(\gamma)Z(\gamma)$), поиски эффектов “новой физики”, оценки массы Хиггса и t -кварка - далеко не полный перечень действительно фундаментальных исследований, проведенных с использованием рождения и распадов калибровочных бозонов.

В свою очередь LHC, с рекордной светимостью и замечательными детекторами, расширяет возможности исследований рождения калибровочных бозонов. В отличие от e^+e^- коллайдеров, рождение Z и W на адронной машине происходит на уровне взаимодействия партонов и, таким образом, начинает существенным образом зависеть от КХД. С одной стороны этот факт усложняет анализ данных, а с другой стороны предоставляет нам уникальную

возможность исследовать структуру пертурбативной КХД, позволяет проводить детальное сравнение различных непертурбативных моделей (структурные функции и модели фрагментации).

Упомянутые обстоятельства определяют актуальность и новизну представленного исследования. Диссертация О.Л. Федина выполнена на статистике, набранной на установке ATLAS. Это определяет высокий научный уровень диссертации. Основные результаты многократно докладывались автором на крупных международных конференциях и опубликованы в ведущих журналах. Это гарантирует 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. Диссертация состоит из введения, шести глав, четырех приложений и заключения.

Во **Введении** обсуждается мотивация выбранной темы диссертации, формулируются цели работы, перечислены основные результаты, вынесенные на защиту.

Замечание: Не вполне понятно утверждение Автора, что факторизация и универсальность партонных функций распределения приводит к независимости результатов для процессов Дрелла-Яна от свободных параметров (стр.5, абзац 3). Нигде не обсуждается о каких параметрах идет речь.

В **Первой главе** диссертации представлен теоретический формализм, используемый для описания процесса Дрелла-Яна в рамках кварк-партонной модели. Подробно рассматривается техника разложения дифференциального сечения по гармоническим полиномам, что является основой для дальнейшего анализа поляризационных угловых коэффициентов. Подробно рассматриваются предельные соотношения для угловых коэффициентов и их кинематическое поведение. Автор приводит подробные расчеты угловых ко-

эффициентов в различных порядках теории возмущений ($O(\alpha_S)$ и $O(\alpha_S^2)$), выполненные с помощью программы DYNLLO, а также сравнение проведенных расчетов с коэффициентами, вычисленными с помощью генераторов событий. Данное сравнение выглядит весьма важным, поскольку в дальнейшем Автор использует Монте-Карло генератор для создания шаблонных распределений, используемых для фита экспериментальных данных.

Замечания: Некоторые рисунки (Рис.4, Рис.5) слишком мелки, особенно в области сравнения различных методов расчета (правая колонка). Неудачно выбраны обозначения левой части в выражениях (6) (стр.20). Сечения не могут быть мнимыми, и речь тут, конечно же, идет об амплитудах. Также неудачны обозначения в формуле (15) (стр. 26) при обсуждении системы Коллинза-Сопера. Вместо Z/γ^* логично использовать l^+l^- , как это и сделано в той же формуле при p_z .

Вторая глава диссертации посвящена описанию установки ATLAS и методам реконструкции и идентификации электронов и мюонов. Автор подробно описывает конструкцию детекторов переходного излучения как в центральной, так и в торцевой части установки, и их использование в реконструкции треков и идентификации электронов. Несмотря на то, что координатное разрешение в дрейфовых трубках уступает разрешению в микропиксельных детекторах центральной части установки, большое количество слоев TRT и заметное расширение базы для реконструкции трека значительно улучшают импульсное разрешение (рис. 8). Особенно этот эффект становится заметным для треков с большими импульсами ($p_T > 15 - 20$ ГэВ). Можно констатировать, что детектор TRT, в разработку которого (торцевых частей) Автор внес **определяющий вклад**, существенно улучшает процедуры реконструкции, что свидетельствует о большом практическом значении данной работы.

Замечание: Автор указывает, что для надежной работы дрейфовых приборов очень важна температурная стабилизация и обеспечение минималь-

ного градиента температуры по длине трубки. Однако в тексте нет информации о том, каким образом осуществляется мониторинг (температурные датчики, термостабилизация, методы коррекции при изменении температуры). Также полезно было бы привести среднюю загрузку на трубку, что особенно важно для торцевых частей детектора при работе LHC на полной светимости.

Следующая часть этой главы посвящена методам реконструкции и идентификации треков. Подробно рассматриваются алгоритмы кластеризации и ассоциации треков с кластерами в электромагнитном калориметре. Рассматриваются методы измерения эффективности регистрации на основе экспериментальных данных. Разработанные алгоритмы обеспечивают высокую эффективность и отличное согласие экспериментальных данных с Монте-Карло (рис. 11.). Общая эффективность реконструкции электронов демонстрирует высокую стабильность в переменных E_T и η и практически приближается к 100% (рис. 12.). Обсуждаются методы реконструкции и идентификации мюонов и демонстрируется, что эффективность реконструкции также близка к 100% и отлично согласуется с результатами Монте-Карло (рис. 13.). Процедуры реконструкции и идентификации, в разработке которых Автор принимал **значительное участие**, демонстрируют высокое качество и определяют в эксперименте ATLAS успешный анализ разнообразных процессов с лептонами в конечном состоянии, что подчеркивает большое практическое значение диссертации.

Замечание: Не вполне понятно утверждение о том, что энергия реконструированного электрона определяется энергией кластера в калориметре (стр. 48, абзац 4). Более адекватны данные трековой системы. Тем более что для электронов необходимо проводить фит трека с учетом потерь при прохождении вещества детектора (и это указано в тексте). Кластер в калориметре, ассоциированный с треком, должен служить для идентификации последнего. Может быть в данном случае речь идет только о тор-

цевых частях детектора? Полезно было бы привести данные не только об эффективности, но и о вероятности неверной идентификации (π, K, p как e, μ).

В **третьей главе** Автор подробно описывает процедуры, связанные с отбором данных, моделированием сигнальных и фоновых событий, оценки разнообразных фонов. Подробно анализируются все категории событий, использованных для моделирования сигнал/фон (таблица 3). Автор рассматривает различные источники фоновых событий: собственно фоновые процессы ($W, W+\text{jet}, \text{Di-boson}, t\bar{t}, \text{single-top}, \gamma\gamma \rightarrow l\bar{l}$), неверная идентификация лептонов, идентификация адронов как лептонов, фоновые лептоны (распады адронов и конверсия), миграция лептонов при реконструкции в исследуемой кинематической области. Подробно описываются критерии отбора событий. Эффективные методы идентификации лептонов, критерии изолированности, кинематические отборы и выбор массы $80 < M_{ll} < 100$ ГэВ (в районе полюса Z-бозона), позволяют построить эффективную процедуру отбора, обеспечивающую высокую чистоту отобранных событий (раздел 3.3). В конечном итоге, аккумулированная статистика является действительно высокой (таб.4) и позволяет проводить статистически обеспеченное бинирование данных по различным кинематическим и угловым переменным, что необходимо для проводимого в диссертации анализа. Достоверность описанных процедур демонстрируется отличным согласием (с точностью до поправочных нормировок) угловых распределений (в переменных $\cos \Theta_{CS}$ и ϕ_{CS} , которые и являются основными для измерения угловых коэффициентов) реальных данных с данными Монте-Карло (рис.18). Автор проводит детальное исследование фона КХД, используя различные наборы дискриминирующих переменных и демонстрирует, что для разных каналов ($e^+e^-, \mu^+\mu^-$) и для разных областей (CS и CF) удастся построить процедуру, гарантирующую уровень этого фона значительно меньше 1%.

Замечания, вопросы: Автор использует термин “дискриминируемая” пе-

ременная, хотя более употребительным является термин “дискриминирующая”. При отборе мюонного трека в качестве одного из параметров используется прицельный параметр по отношению к первичной вершине. Используется ли такой же критерий для электронного трека? Также представляется полезным определить вершину пересечения двух лептонных треков и сравнить ее положение с положением первичной вершины. Это может позволить существенно подавить вклад фона от “pile-up” событий.

В четвертой главе описывается техника извлечения угловых коэффициентов из экспериментальных данных. Автор использует тот факт, что дифференциальное сечение представимо в виде разложения по ортогональным гармоническим полиномам (глава 1, формула 10). В этом случае, если взять события с рождением и распадом Z-бозона, сгенеренные с константным матричным элементом, смоделировать отклик детектора с помощью Монте-Карло, провести отбор как для реальных событий, то используя в качестве весов гармонические полиномы (10), можно получить набор распределений, каждое из которых соответствует одному из членов суммирования (10). Тогда неизвестные угловые коэффициенты A_i определяются как множители и являются параметрами фита. Параметры A_i зависят от переменных, связанных с рождением Z-бозона (p_T^Z , y^Z , m^Z) и процедура фита может строиться в любой подобласти этих переменных. При этом гармонические полиномы вычисляются с переменными ($\cos \Theta_{CS}$ и ϕ_{CS}) на уровне генератора. Данный метод является весьма мощным, поскольку автоматически учитывает аксептанс установки, зависимость эффективности реконструкции от направления вылета лептона и его импульса, миграцию лептонов в пространстве переменных. Автор подробно описывает метод построения шаблонных распределений, отмечая, что полученные веса должны быть скорректированы различными факторами, такими как энергетические калибровки, эффективности реконструкции и идентификации и т.д. Для получения коэффициентов A_i используется метод экстремума функции правдоподобия. Далее Автор по-

дробно описывает процедуры учета статистических и систематических ошибок и методов регуляризации с помощью штрафных функций.

Замечание: Рассматривая метод совместного фита различных каналов (e^+e^- , $\mu^+\mu^-$), Автор вводит индивидуальные коэффициенты A_i для каждого канала. Однако, распад Z -бозона полностью отделен от процесса его рождения (та же теорема факторизации) и прекрасно определен в Стандартной Модели. Такой подход был бы оправдан, если бы кроме s -канальной диаграммы с Z -бозоном существовали и t -канальные диаграммы и возникла бы необходимость учитывать их интерференцию. В случае pp -коллайдера можно добавить лишь бокс-диаграмму, которая имеет уже следующий порядок по константе α_e и дает одинаковый вклад в e^+e^- и $\mu^+\mu^-$ каналы, поскольку разница масс фермионов на фоне их больших энергий (мы работаем в полюсе Z -бозона) пренебрежимо мала. Поэтому это выглядит как некое “превышение точности” и увеличение параметров фита. С другой стороны, такой подход, конечно же, хорош для контроля согласованности результатов в разных каналах.

Пятая глава диссертации посвящена анализу статистических и систематических ошибок. Детально исследуются различные источники систематических ошибок, влияние конечной статистики шаблонных распределений и их корреляции. Весьма важным выглядит подробное изучение влияния теоретических неопределенностей (шкала ренормализации, партонные распределения, модели фрагментации, влияние КЭД поправок), поскольку шаблонные распределения напрямую зависят от закладываемых в генератор моделей. Результат этого анализа демонстрирует, что доминирующим источником ошибок, связанных с теоретическими неопределенностями, являются партонные функции распределения. Этот результат выглядит весьма логичным. Следует отметить огромный объем работы, проделанной Автором при анализе ошибок и тщательность, с которой она была сделана. Анализ систематических ошибок всегда является показателем качества работы и профессионализма.

В шестой главе суммируются результаты измерений. Используя полученные коэффициенты, строится сравнение распределений моделированных и реальных событий (рис.41). Великолепное согласие моделированных и реальных распределений демонстрирует качество проведенного фита. Показано также, что при введении дополнительных полиномов более высокого порядка коэффициенты при них сравнимы с нулем. Это доказывает согласованность рассматриваемой теоретической модели и экспериментальных данных на текущем уровне статистики. В данной работе впервые измеряются коэффициенты A_{5-7} и демонстрируется их значимое отличие от нуля при больших величинах p_T^Z на уровне трех стандартных отклонений. В этой же главе проводится сравнение полученных коэффициентов с теоретическими расчетами в разных моделях. В целом наблюдается весьма разумное согласие. При этом демонстрируется, что при больших p_T^Z измеренная разность $A_0 - A_2$ не описывается используемыми моделями и требует присутствия КХД поправок более высокого порядка.

В заключении перечислены в краткой форме основные результаты, полученные в диссертации. Диссертация содержит большой экспериментальный материал и производит очень хорошее впечатление. Полученные результаты выглядят весьма убедительно и характеризуют диссертанта как зрелого физика высокой квалификации, причем как в области анализа данных, так и в области техники эксперимента.

Замечания, перечисленные по тексту отзыва носят в большей степени “редакционный” характер и 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 18 работы, из них 15 в ведущих реферируемых журналах.

Очевиден большой, решающий вклад автора в работы, вошедшие в диссер-

