

## ОТЗЫВ

на диссертационную работу  
Зыкунова Владимира Александровича

на тему: «Эффекты радиационных поправок в современных экспериментах в физике высоких энергий» по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

1. Современный адронный ускорительный комплекс – Большой адронный коллайдер (ЛHC), открывает широкие возможности для изучения физики микромира. Основными задачами, решаемыми при выполнении коллайдерных экспериментов, являются, во-первых, всесторонняя и прецизионная проверка Стандартной Модели (СМ), а также поиск новых явлений и объектов (новых частиц и взаимодействий) в достижимой области энергий. Новые частицы могут иметь массу достаточную для наблюдения индуцированных ими прямых эффектов, таких, например, как прямое или резонансное рождение новых калибровочных бозонов  $Z'$  и  $W'$ , скалярных и векторных лептокварков, суперсимметричных лептонов и кварков в суперсимметричных теориях с нарушенной  $R$ -четностью, скалярных или векторных билептонов, гравитонных состояний Калуцы - Клейна в моделях с дополнительными пространственными измерениями и др. Очевидно, что достижение порога рождения новых частиц явилось бы прямым доказательством проявлений «новой» физики. Если экспериментальные данные при достигнутом уровне точности согласуются с предсказаниями СМ, т.е. статистически значимых отклонений от предсказаний СМ не наблюдается, то полученная экспериментальная информация может быть использована для оценки ограничений на динамические параметры этих частиц (константы связи, параметры смешивания) и их массы.

Рождение лептонных пар в канале Дрелла-Яна является весьма эффективным процессом для проверки СМ и поиска новых объектов и явлений в экспериментах на адронном коллайдере ЛHC в силу сравнительно простой кинематики, возможности регистрации лептонов с высокой эффективностью и из-за значительной подавленности фоновых процессов. Обнаружение и идентификация новых физических объектов и явлений возможна при сравнении экспериментальных данных по измерению физических наблюдаемых величин (сечений, асимметрий и др.) с предсказаниями теории при условии, что экспериментальная и теоретическая точности являются сопоставимыми друг с другом. Отметим также, что чувствительность наблюдаемых величин к эффектам «новой» физики напрямую зависит от точности теоретических расчетов и экспериментальных погрешностей. В этой связи, надежная оценка погрешности измеряемых физических величин, включающая как теоретическую, так и экспериментальную составляющие, является, безусловно, важной и актуальной задачей. Надежный и достоверный учет радиационных поправок к физическим наблюдаемым величинам способствует уменьшению теоретических неопределенностей. В силу сказанного, настоящая диссертационная работа соискателя Зыкунова В.А., посвященная расчету радиационных эффектов для различных процессов, интенсивно исследуемых на современных ускорительных комплексах, представляется, безусловно, актуальной задачей. Вместе с тем, после ознакомления с диссертацией, которая была размещена на сайте ОИЯИ, у меня возникли вопросы и замечания, которые я собираюсь изложить ниже.

2. В своих комментариях к диссертации я хочу коснуться процессов, которые идут за счет взаимодействия нейтральных токов. К ним относятся, в частности, процесс рассеяния Меллера, а также процесс Дрелла-Яна (на партонном уровне это кварк-антикварковое аннигиляционное рождение лептонных пар). Один из моих основных

вопросов связан с используемой в диссертации параметризацией электромагнитного тока аналогичной той, которая применяется для описания взаимодействия слабых нейтральных токов фермионов.

Структура лагранжиана взаимодействия фермионов и бозонов в СМ, а также выражения для сечений различных процессов уже давно стали научной классикой и содержатся в многочисленных учебниках, монографиях, а также авторитетных справочных изданиях типа Particle Data Group (PDG) [1]. Именно на PDG я буду активно ссылаться в своих комментариях, приведенных ниже, чтобы избежать возможной двусмысленности в изложении сути проблемы.

Известно, что в СМ относительный знак электромагнитной и слабой составляющих взаимодействия нейтральных токов фермионов однозначно определен. И здесь никакой двусмысленности быть не может. Поясню на примере четырехфермионного процесса ( $f, l$  - фермион и лептон)

$$\bar{f} + f \rightarrow l^+ + l^-, \quad (1)$$

который в СМ описывается лагранжианом нейтральных токов, состоящим из суммы электромагнитной и слабой составляющих (см. (10.2) и (10.5) в [1]):

$$-L_{NC} = eJ_{em}^\mu A_\mu + g_Z J_Z^\mu Z_\mu. \quad (2)$$

Здесь  $g_Z = \frac{e}{s_W c_W}$ ,  $s_W^2 = \sin^2 \theta_W$ ,  $c_W^2 = 1 - \sin^2 \theta_W$ . Слабый  $J_Z^\mu$  и электромагнитный  $J_{em}^\mu$  токи

можно записать в универсальном виде, как это часто встречается в литературе (см., например, [2]) и сделано также в диссертации:

$$J_i^\mu = \bar{\psi}_f \gamma^\mu (V_i^f - A_i^f \gamma_5) \psi_f, \quad (i = \gamma, Z). \quad (3)$$

Причем, константы связи в СМ имеют вид (см. (10.5) в [1] и более подробно [2]):

$$V_\gamma^f = Q_f, \quad A_\gamma^f = 0, \quad (4)$$

$$V_Z^f = \frac{I_{3L}^f}{2} - Q_f s_W^2, \quad A_Z^f = \frac{I_{3L}^f}{2}. \quad (5)$$

Отметим, что слабые константы нейтрального тока  $V_Z^f$ ,  $A_Z^f$  в (5) с точностью до множителя совпадают с теми, которые используются в диссертации, за исключением электромагнитной константы  $V_\gamma^f$  в (4), которая имеет противоположный знак:

$$V_\gamma^f = -Q_f \quad (\text{в диссертации}). \quad (6)$$

Следует сравнить первое равенство в (4) с выражением (6). Из приведенных формул видно, что параметризация фермионных констант связи, принятая в диссертации (формулы (2.9) и (4.8)) и используемая для описания сечений и поправок к ним, содержит ошибку – она **не согласуется** со СМ. Различие параметризаций, используемое в диссертации и представленное в PDG [1] (а также, например, в [2]), состоит в наличие разных знаков у векторной константы связи электромагнитной компоненты нейтрального тока, т.е. электромагнитного тока.

Вопрос об относительном знаке электромагнитной и слабой составляющих нейтральных токов, или, что тоже, констант связи, мог бы естественным образом разрешиться, если бы соискатель привел в диссертации явный вид лагранжиана нейтральных токов. Отмечу, однако, что ни в представленной диссертации, ни в одной из публикаций диссертанта нигде не приводится явный вид лагранжиана взаимодействий нейтральных токов.

3. Как известно, физика – наука экспериментальная, поэтому хотелось бы привести еще один, наиболее важный, на мой взгляд, аргумент, основывающийся на имеющейся экспериментальной информации, в пользу параметризации констант связи, предсказываемых СМ, а не той, которая содержится в диссертации. Действительно, относительный знак электромагнитной  $ee\gamma$  и слабых  $eeZ$  констант однозначно определен экспериментально на коллайдере LEP2 при измерении процесса  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ , поэтому нет никакого разночтения в определении относительного знака констант  $V_\gamma^l$  и  $(V_Z^l, A_Z^l)$ .

Поясню более подробно высказанное утверждение. Эксперименты на коллайдере LEP2 по измерению процесса парного рождения W-бозонов впервые и с высокой точностью продемонстрировали калибровочную природу взаимодействия заряженных и нейтральных бозонов в СМ (см. рис.1). Другими словами, любая альтернативная гипотеза, предполагающая иную, отличную от СМ, структуру взаимодействий, в том числе, нейтральных токов, **исключена экспериментально**. Это относится, в частности, и к случаю изменения знака константы  $V_\gamma^l = Q_l$  на  $V_\gamma^l = -Q_l$ . В качестве примера на рис.1 приведены два варианта модификации СМ. В частности, в первом варианте предполагается отсутствие ZWW вершин (штриховая линия), а во втором варианте присутствует лишь амплитуда нейтринного обмена (пунктирная линия). Во всех этих «моделях», в отличие от СМ, наблюдается резкий рост сечения с увеличением энергии (рис.1). Такое же растущее с энергией поведение сечения будет наблюдаться для параметризации с  $V_\gamma^l = -Q_l$ , содержащейся в диссертации. На рис.1 приведены также экспериментальные точки с соответствующими погрешностями, которые наглядно демонстрируют согласие экспериментальных данных с предсказаниями СМ и, вместе с тем, несогласие рассматриваемых «альтернативных моделей» этим данным.

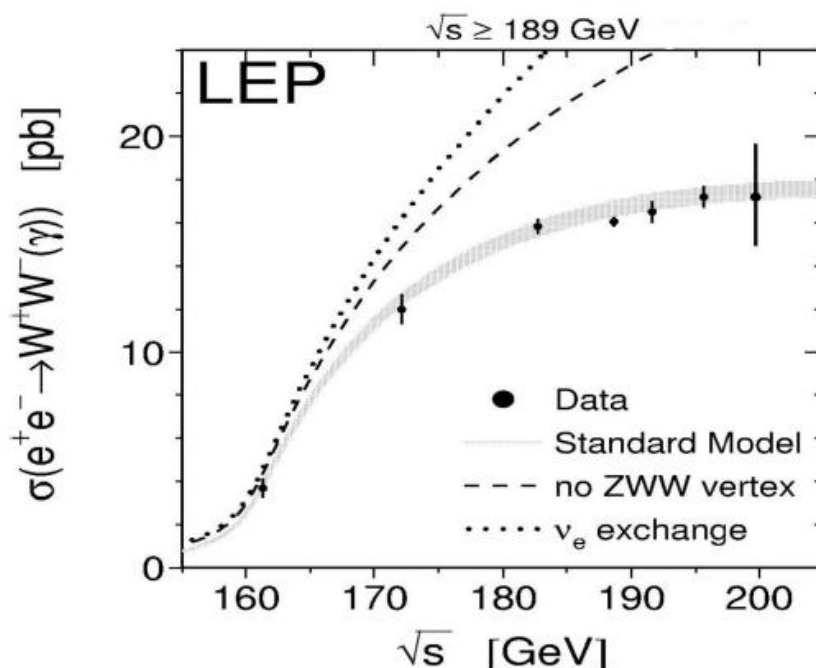


Рис.1 Энергетическая зависимость полного сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  в СМ с обменом  $\gamma$ , Z и нейтрино (затонированная вытянутая область), в случае отсутствия ZWW вершины (штриховая линия) и с учетом только амплитуды нейтринного обмена (пунктирная линия). Точки с вертикальными линиями соответствуют экспериментальным данным с соответствующими погрешностями. Рисунок взят из работы D.G. Charlton, «Precise electroweak results from LEP-2», Int.J.Mod.Phys. A 15S1 (2000) 352 [hep-ex/9912019].

Уникальность процесса парного рождения W-бозонов состоит в том, что он обладает высокой чувствительностью к различным эффектам (в том числе «новой физики»), которые могут давать вклад в этот процесс, дополнительно к СМ. Это связано с имеющим здесь (в СМ) место механизмом калибровочного сокращения. Суть этого механизма состоит в том, что, несмотря на сильный рост с энергией отдельных вкладов в сечение от амплитуд с обменом фотоном, Z-бозоном и нейтрино, полное сечение, благодаря механизму калибровочного сокращения, имеет «правильное», падающее с энергией поведение типа  $\ln(s)/s$  (рис.1). Изменение знака электромагнитной константы,  $V_\gamma^f \rightarrow -V_\gamma^f$ , приводит к «разбалансировке» отдельных вкладов в сечение СМ и, как следствие, к нарушению механизма калибровочного сокращения. Вместо ожидаемого (и что, самое главное, подтвержденного в экспериментах на LEP2) энергетического поведения сечения, оно становится растущим с энергией из-за сильно растущих и ничем некомпенсированных вкладов, которые при высоких энергиях ведут к нарушению унитарности.

В силу сказанного можно заключить, что отсутствуют всякие основания (как **теоретического**, так и **экспериментального** плана) для использования параметризации электромагнитной векторной константы в виде  $V_\gamma^l = -Q_l$ , содержащейся в формулах (2.9) и (4.8) диссертации.

4. Зададимся вопросом: к каким феноменологическим следствиям может привести изменение знака электромагнитной векторной константы в исследуемых процессах? Из формул для сечений меллеровского рассеяния и процесса Дрелла-Яна на борновском уровне, приведенных в диссертации, видно, что они не зависят от знака заряда  $Q_f$ , или, что тоже самое, от векторной электромагнитной константы  $V_\gamma^f$ , так как эти константы входят в сечения в четных степенях – 2-й и 4-й, поэтому формально численных отличий в борновских сечениях наблюдаться не будет при использовании того или иного вида параметризации. Итак, если на борновском уровне сечение меллеровского рассеяния (2.2) не зависит от знака  $V_\gamma^e$ , то ситуация кардинально меняется при учете вкладов высших порядков, в частности, от бозонной собственной энергии и электронных вершинных функций, содержащих трехбозонные константы связи  $WW\gamma$  и  $WWZ$ . Причина в том, что интерференционные члены в сечении, обусловленные интерференцией диаграммам с промежуточными состояниями, например, типа  $ee \rightarrow \gamma - W(\text{loop}) - Z \rightarrow ee$  и  $ee \rightarrow Z - W(\text{loop}) - Z \rightarrow ee$  и т.п. явно зависят от знака векторной электромагнитной константы. Это видно из приведенных в диссертации выражений (2.16) – (2.18). Действительно, четыре функции  $M_1^S - M_4^S$ , содержащиеся в сечении, явно зависят от знака  $V^\gamma$  (в обозначениях, принятых в диссертации).

Аналогичное заключение и выводы можно сделать для процесса Дрелла-Яна: сечения (4.13) и (4.16) на борновском уровне не зависят от знака  $V^\gamma$ , а вклад от бозонной собственной энергии (4.79) и фермионных вершинных функций (4.74) и (4.75), содержащих трехбозонные константы связи  $WW\gamma$  и  $WWZ$ , имеет явную зависимость от знака векторной константы.

Если кратко коснуться истории вопроса о «злополучной» параметризации, то следует отметить, она берет начало еще с 2009 г., когда я рецензировал монографию соискателя и обнаружил эту нестыковку со СМ. Причем, как оказалось, диссертант использовал ее в расчетах, которые вошли почти во все публикации по теме диссертации. Я неоднократно указывал соискателю на необходимость разобраться в данном вопросе, тем не менее, даже в его последующих статьях использовалась прежняя ошибочная параметризация констант.

Очевидно, что все сказанное выше о константе  $V^Y$  отразится на численных результатах, представленных в диссертации, а это, в свою очередь, повлияет на достоверность полученных результатов. Не исключено, что количественные предсказания будут отличаться существенно при выборе того или иного знака у  $V_Y^l = \pm Q_l$ , если принимать в расчет сильную энергетическую зависимость вкладов от бозонной собственной энергии и вершинных функций, содержащих трехбозонные константы связи. Это, в свою очередь, может повлиять на основные выводы и, возможно, положения, выносимые на защиту. Но обо всем этом можно будет судить лишь после корректного использования в численных расчетах параметризации нейтральных токов в СМ. А это возможно сделать лишь на основании новой серии количественных расчетов. Новые расчеты необходимо сделать в обязательном порядке, так как прежние оценки были выполнены при использовании константы  $V_Y^f$ , величина которой экспериментально исключена.

Как мне представляется, нынешний вариант диссертации в силу приведенных выше аргументов вряд ли удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям для представления в совет по защите. В сложившейся ситуации я рискну предложить следующий конструктивный план действий: следует отложить защиту диссертации на некоторое время; за это время выполнить перерасчет основных численных результатов, которые могут повлиять на выводы и положения, выносимые на защиту; необходимо оперативно переопубликовать новые количественные результаты в тех же периодических изданиях с пометкой ERRATUM; внести необходимые правки в текст диссертации и в обсуждение результатов, а также, если необходимо, в положения выносимые на защиту. Конечно, все это потребует определенного времени, но обновленный вариант диссертации, на что я очень рассчитываю, будет удовлетворять всем законным требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям.

1. K.A. Olive et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014) and 2015 update.
  2. D.Y. Bardin, W. Hollik and T. Riemann, Bhabha scattering with higher order weak loop corrections, Z. Phys. C 49 (1991) 485 – формулы (2.6)-(2.9);
- J.L. Hewett and T.G. Rizzo, Much ado about leptoquarks: A Comprehensive analysis, Phys. Rev. D 56 (1997) 5709 – (A7) в приложении А;  
A. Leike, The Phenomenology of extra neutral gauge bosons, Phys. Rept. 317 (1999) 143 – формулы (1.20)-(1.22);  
P. Osland and A.A. Pankov Z-prime interference effects from TRISTAN to LEP-2, Phys. Lett. B 403 (1997) 93 – выражение (6).

Главный научный  
сотрудник ГГТУ (Гомель),  
д.ф.-м.н., профессор,  
член экспертного совета №1  
по физике ВАК Беларуси



А.А. Панков

11.08.2016

