

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

99 – 4

На правах рукописи

Кабаченко Василий Васильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ СОСТАВЛЕННОСТИ
С МАСШТАБОМ $10 \div 100$ ТЭВ
В ЛЕПТОН-ЛЕПТОННЫХ СОУДАРЕНИЯХ**

01.04.02 — теоретическая физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Долгопрудный 1999

Работа выполнена в Московском физико-техническом институте (г. Долгопрудный) и в Отделе теоретической физики ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий (г. Протвино).

Научный руководитель — доктор физико-математических наук Ю.Ф. Пирогов.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Н.В. Красников (ИЯИ РАН, Москва), кандидат физико-математических наук С.Р. Слабоспицкий (Отдел экспериментальной физики ИФВЭ, Протвино).

Ведущая организация – НИИЯФ МГУ, Москва.

Защита диссертации состоится ”____” _____ 1999 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета К 063.91.02 при Московском физико-техническом институте (г. Долгопрудный).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках МФТИ и ИФВЭ.

Автореферат разослан ”____” _____ 1999 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 063.91.02

С.М. Коршунов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 1999

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Стандартная модель (СМ), включающая в себя квантовую хромодинамику и теорию электрослабых взаимодействий Глэшоу-Вайнберга-Салама, является хорошо определенной теорией, описывающей все известные на настоящий момент “элементарные” частицы и их взаимодействия. Все современные экспериментальные данные не противоречат СМ и могут быть объяснены с высокой точностью в ее рамках. Однако несмотря на эти успехи и отсутствие явных противоречий, ряд теоретических несовершенств и значительный произвол в выборе параметров СМ не позволяют считать ее фундаментальной теорией и указывают на незавершенность СМ, которая, скорее всего, является “низкоэнергетическим” пределом более фундаментальной теории. Поиски отклонений от предсказаний СМ и определение типа “новой физики”, стоящей за СМ, является основной задачей ближайшего будущего физики высоких энергий. Одной из имеющихся теоретических схем, осуществляющей выход за рамки СМ, является сценарий единой составленности лептонов, кварков и хиггсовских бозонов.¹

Целью диссертационной работы является изучение феноменологических проявлений сценария единой составленности в двух направлениях.

1. Исследование универсальных остаточных взаимодействий, которые, как предполагается, должны возникать в любой модели, реализующей сценарий единой составленности. Они обусловлены обменами тяжелыми динамически генерированными векторными бозонами — низшими резонансами, сформированными сверхсильными взаимодействиями, в системе “преонов”, составляющих лептоны, кварки и хиггсовские бозоны. Эти остаточные взаимодействия определяются только квантовыми числами СМ и не зависят от конкретных деталей неизвестной сверхсильной динамики.

¹Yu. F. Pirogov // Int. J. Mod. Phys. A 1992. V.7. P.6473; Mod. Phys. Lett. A 1993. V.8. P.3129; Int. J. Mod. Phys. A 1994. V.9. P.1397.

2. Исследование неуниверсальных остаточных взаимодействий. В качестве таковых выбраны взаимодействия с нарушением лептонных ароматов/семейств (НЛС) и барионного числа (НБЧ). Они не являются специфическими для сценария единой составленности, а могут возникать и в других расширениях СМ. Исследование ведется в рамках наиболее общих эффективных лагранжианов. Помимо прочих причин, выбор этих взаимодействий определяется тем, что они строго запрещены в рамках (пертурбативной) СМ.

Масштаб составленности \mathcal{F} в сценарии предсказывается лежащим в декатэвной области, поэтому необходимы тэвные энергии для поиска первых сигналов составленности. В работе проводится исследование для будущего линейного электронного коллайдера с полной энергией $\sqrt{s} = 2$ ТэВ, а также для обсуждаемого ныне кольцевого мюонного коллайдера высокой светимости с $\sqrt{s} = 4$ ТэВ. Создание мюонных коллайдеров наряду с электронными позволило бы проверить универсальный характер остаточных взаимодействий единой составленности.

Научная новизна. В работе впервые проведено достаточно полное исследование проявлений единой составленности в лептон-лептонных соударениях. Обнаружены определенные корреляции в отклонениях от предсказаний СМ для различных процессов и наблюдаемых. Наблюдение таких корреляций послужило бы веским доводом в пользу существования единой составленности.

Впервые проведена исчерпывающая классификация четырехлептонных операторов НЛС. Поднят вопрос о необходимости исследования процессов НЛС, используя нетрадиционные каналы столкновения, такие как e^-e^- , $\mu^\pm e^-$ и т.д. Проанализирована возможность изучения в коллайдерных экспериментах эффективных шести-фермионных взаимодействий НБЧ.

Научная и практическая ценность работы. Проведенное в диссертационной работе исследование говорит о том, что лептонные коллайдеры тэвных энергий вполне способны представить первые, хотя и косвенные, данные о существовании единой субструктуры у лептонов, кварков и хиггсовских бозонов. Процессы НЛС, рассмотренные в общем виде, также доступны для исследования, причем наиболее перспективными для этих целей являются коллайдеры $\mu^-\mu^-(\mu^+\mu^+)$ и $e^-\mu^-$ типов. Наблюдение процессов НБЧ, вообще говоря, представляется проблематичным. Поиск эффективных остаточных взаимодействий, рассмотренных в диссертации, должен составить существенную часть физической программы лептонных коллайдеров следующего поколения. Полученные в диссертационной работе результаты могут быть применены в указанных целях непосредственно.

Автор защищает:

1. Принципиальную возможность наблюдать проявления единой составленности в экспериментах на лептонных коллайдерах тэвных энергий.

Предсказание наблюдения определенных корреляций между отклонениями от предсказаний СМ для различных наблюдаемых в различных процессах.

Анализ условий, наиболее благоприятных для наблюдения максимальных отклонений от предсказаний СМ.

2. Классификацию четырехлептонных операторов НЛС, включающую наличие современных ограничений на массовые масштабы и присутствие наиболее опасного шестилептонного фона СМ.

Анализ возможности наблюдать нарушение барионного числа в лептон-лептонных столкновениях.

Апробация и публикации. Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на семинарах Отдела теоретической физики ИФВЭ (Протвино), семинаре Отдела теоретических исследований Института молекулярной физики ГНЦ “Курчатовский институт” (Москва), а также на X Международном совещании по физике высоких энергий и квантовой теории поля (Звенигород, 1995), XVIII Международном совещании по физике высоких энергий и теории поля (Протвино, 1996), XII Международном совещании по физике высоких энергий и квантовой теории поля (Самара, 1997), International Workshop on Linac-Ring Type ep and γp Colliders (Анкара, Турция, 1997), VLHC Physics and Detector Workshop (Батавия, США, 1997). Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1] – [8].

Структура диссертации. Работа состоит из введения, трех глав основного текста и заключения, а также содержит два приложения. Объем диссертации составляет 101 страницу, включая 5 таблиц, 16 рисунков и список цитируемой литературы из 52 наименований.

Содержание работы

В первой главе излагаются некоторые этапы построения эффективной теории единой составленности — так называемой нелинейной стандартной модели (НСМ) и ее “улучшения” путем явного учета векторных резонансов, отвечающих скрытой локальной симметрии НСМ. Формулируется гипотеза векторно-бозонной доминантности (ВБД) электрослабых взаимодействий и обсуждаются другие предположения, которые ведут к эффективному лагранжиану универсальных остаточных взаимодействий. Он зависит всего лишь от двух неизвестных свободных параметров — массового масштаба составленности \mathcal{F} и безразмерного параметра η_1 , который отражает относительную величину изоскалярных и изовекторных ток-токовых взаимодействий.

Рассматриваются ограничения на остаточные взаимодействия, следующие из современных экспериментальных данных. Для этого, используя свободу переопределения полей, из эффективного лагранжиана устраняются четырехфермионные

контактные взаимодействия и модификации вершин взаимодействия калибровочных бозонов с фермионами. Получившийся лагранжиан дает вклады в процессы, исследованные на *LEP I* и *Tevatron*, а также в низкоэнергетических экспериментах, только посредством модификации пропагаторов калибровочных бозонов. Это дает возможность применить формализм неявных поправок, предложенный Пескиным и Такеучи²

Вклады в параметры неявных поправок S, T, U и V, W, X непосредственно вычисляются, и из сравнения с экспериментальными значениями этих параметров получаются ограничения на параметры универсальных остаточных взаимодействий.

Заштрихованная область на рис.1 (а) — это область допустимых значений \mathcal{F} и η_1 , полученная из сравнения со всей совокупностью параметров (S, T, U, \dots) . Из рис.1 видно, что современные данные вполне допускают существование единой составленности с масштабом $\mathcal{F} = \mathcal{O}(10 \text{ ТэВ})$.

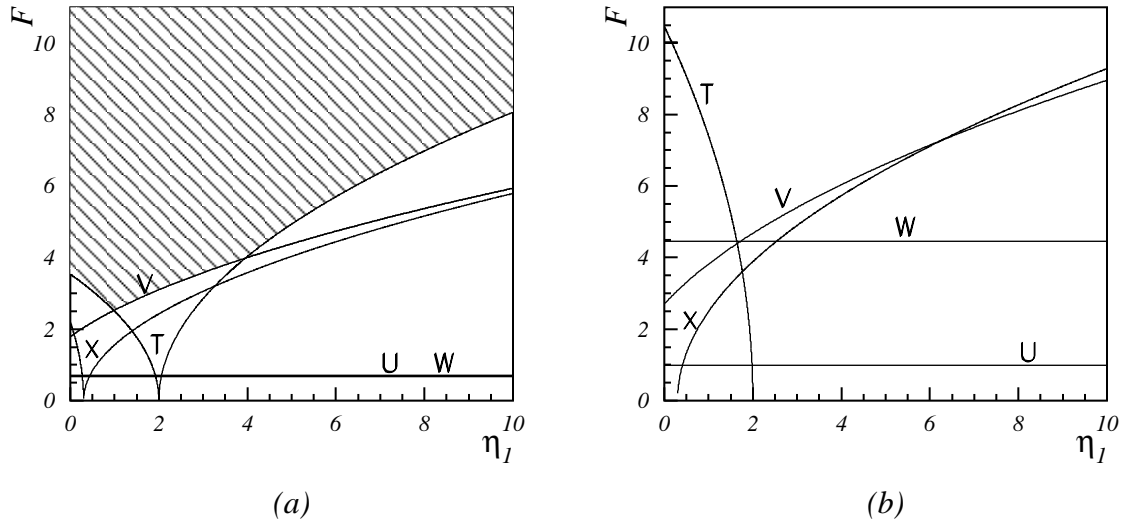


Рис. 1. Допустимая область значений \mathcal{F} (ТэВ) и η_1 – (а); возможные значения \mathcal{F} и η_1 , соответствующие центральным значениям параметров неявных поправок – (б).

Вторая глава посвящена исследованию проявлений единой составленности, дополненной гипотезой ВБД на лептонных коллайдерах тэвнх энергий. Рассматриваются процессы $l^+l^- \rightarrow \bar{f}f$ с различными конечными фермионами, $l^+l^- \rightarrow ZH$, ZHH и $l^+l^- \rightarrow W^+W^-$. Для анализа отклонений от предсказаний СМ были выбраны следующие интегральные характеристики: относительное отклонение полного сечения от сечения, вычисленного в СМ, асимметрия вперед-назад, лево-правая поляризационная асимметрия и смешанная асимметрия. Эти наблюдаемые исследовались как функции параметров \mathcal{F} и η_1 .

²М. Е. Peskin and Т. Takeuchi // Phys. Rev. D 1992. V.46. P.381.

Для оценки статистической значимости вычисленных отклонений от предсказаний СМ использовались полные сечения. Именно, рассматривалась величина

$$n_\sigma = \frac{|\Delta N|}{\sqrt{N_{SM}}} = \frac{|\Delta\sigma|}{\sigma_{SM}} \sqrt{\sigma_{SM} \int \mathcal{L} dt},$$

которая есть число стандартных отклонений от предсказаний СМ. Выбор $n_\sigma = 2$ дает максимально достижимое значение масштаба единой составленности на 95%-м уровне достоверности, как функцию параметра η_1 .

Область достижимости на 95% С.Л. в различных каналах представлена на рис. 2 и 3. Для рассеяния Баба $l^+l^- \rightarrow l^+l^-$ и процесса $l^+l^- \rightarrow W^+W^-$ использовались оптимальные обрезания по углу рассеяния, при которых достижимый масштаб \mathcal{F} максимален.

В заключительной части главы было проведено сравнение отклонений от предсказаний СМ для процесса $l^+l^- \rightarrow W^+W^-$, которые обусловлены универсальными остаточными взаимодействиями и возможными неуниверсальными остаточными взаимодействиями, допустимыми в сценарии единой составленности. В качестве последних были выбраны наименее подавленные взаимодействия, ведущие к модификации тройной вершины калибровочных бозонов. Тем не менее эти взаимодействия приводят к несравнимо меньшим отклонениям, чем взаимодействия ВБД.

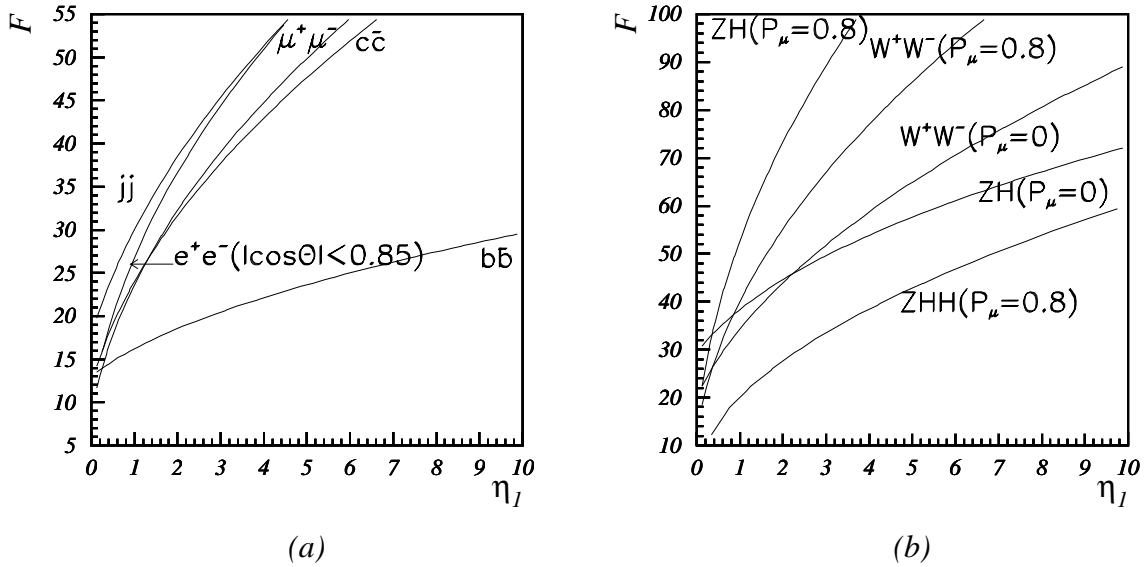


Рис. 2. Масштаб \mathcal{F} , достижимый на 95% С.Л. посредством изучения процессов $l^+l^- \rightarrow \bar{f}f$, как функция параметра η_1 ; **(а)** – для e^+e^- коллайдера с $\sqrt{s} = 2$ ТэВ, $\int \mathcal{L} dt = 20$ фбн $^{-1}$; **(б)** – для $\mu^+\mu^-$ коллайдера с $\sqrt{s} = 4$ ТэВ, $\int \mathcal{L} dt = 10^3$ фбн $^{-1}$.

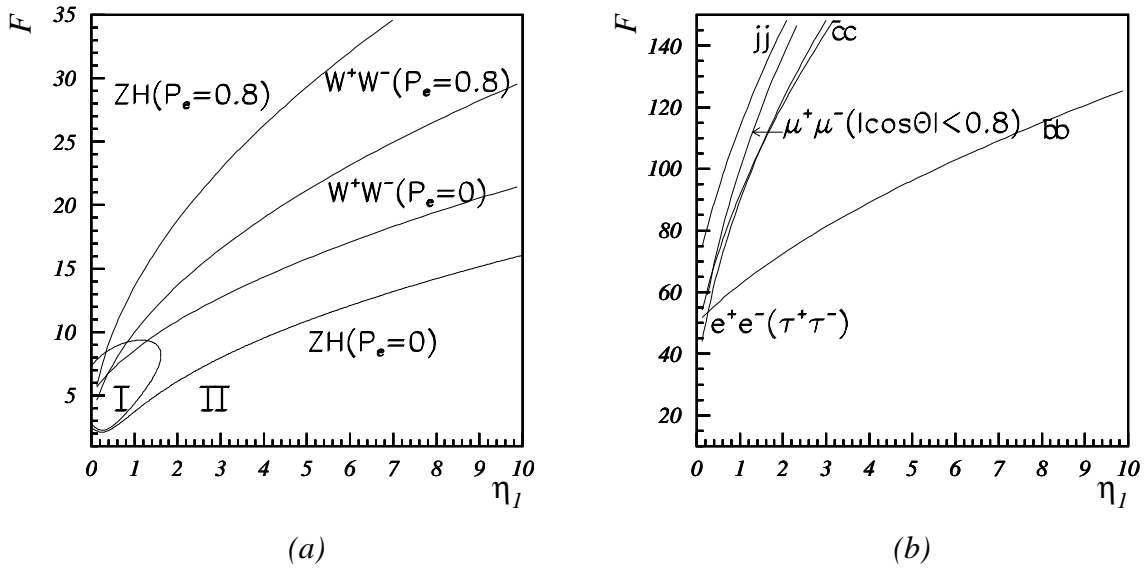


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, только для процессов рождения бозонов. P_l обозначает поляризацию начального лептона (пучок антилептонов предполагается неполяризованным).

Третья глава в некоторой степени является независимой от предыдущих двух. Исследуемые здесь эффективные взаимодействия не являются характерными только для сценария единой составленности, но могут возникать и в других расширениях СМ. Исследование ведется в рамках наиболее общих эффективных лагранжианов.

В первой части этой главы рассматриваются четырехлептонные взаимодействия, ведущие к несохранению лептонных семейств/ароматов. Эти взаимодействия предлагается изучать на будущих электронных и мюонных коллайдерах, а также на гипотетических электрон-мюонных коллайдерах. Получена исчерпывающая классификация всех четырехлептонных процессов НЛС, которые можно исследовать на таких коллайдерах (см. табл. 1). Получены ограничения на масштабы соответствующих операторов. Особое внимание уделяется наиболее опасному шестилептонному фону СМ — когда дисбаланс поколений компенсируется испусканием двух нерегистрируемых нейтрино. Показано, что в большинстве случаев этот фон можно быть успешно подавить, используя неправильную “поляризацию” начальных лептонов.

В заключительной части главы анализируются процессы с нарушением барионного числа. Операторы наименьшей размерности, которые, в принципе, можно изучать в лептон-лептонных столкновениях — это шестифермионные операторы с тремя лептонными и тремя кварковыми полями. Соответствующие массовые масштабы сильно ограничены из данных по поискам распада протона, и тем самым проявление этих операторов в коллайдерных экспериментах невозможно. Исключение составляет единственный тип шестифермионных операторов $u_R u_R u'_R e_R l_L l'_L$ и $u_R u'_R q_L l_L l'_L l'_L$, на который нет прямых экспериментальных ограничений. Из возможного набора каналов столкновения только $\mu^- e^-$ -соударения позволяют искать проявления этих взаимодействий. В диссертации исследован один оператор из данного набора в качестве характерного примера.

Таблица 1. Основные результаты классификации четырехлептонных процессов НЛС.

Тип	Класс	Процессы	Ограничение	Фон
$l'III$	$\mu e e e$	$e^+e^- \rightarrow \mu^+e^-, e^+\mu^-$	$\mathcal{O}(10^2 \text{ ТэВ})$	Есть
		$\mu^+e^- \rightarrow e^+e^-$		
		$e^-e^- \rightarrow \mu^-e^-$		
	$e\mu\mu\mu$	$\mu^+\mu^- \rightarrow e^+\mu^-, \mu^+e^-$	Нет	
		$\mu^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$		
		$\mu^-\mu^- \rightarrow \mu^-e^-$		
$\tau e e e$	$e^+e^- \rightarrow \tau^+e^-, e^+\tau^-$	$\mathcal{O}(1 \text{ ТэВ})$		
	$e^-e^- \rightarrow \tau^-e^-$			
$\tau\mu\mu\mu$	$\mu^+\mu^- \rightarrow \tau^+\mu^-, \mu^+\tau^-$	$\mathcal{O}(1 \text{ ТэВ})$		
	$\mu^-\mu^- \rightarrow \tau^-\mu^-$			
$l'l'II$	$\mu\mu e e$	$\mu^+e^- \rightarrow e^+\mu^-$	$\mathcal{O}(1 \text{ ТэВ})$	Нет
		$e^-e^- \rightarrow \mu^-\mu^-$		
		$\mu^-\mu^- \rightarrow e^-e^-$		
	$\tau\tau e e$	Нет		
$\tau\tau\mu\mu$	$\mu^-\mu^- \rightarrow \tau^-\tau^-$	Нет		
$l'l'l'II$	$\tau\mu e e$	$e^+e^- \rightarrow \tau^+\mu^-, \mu^+\tau^-$	$\mathcal{O}(1 \text{ ТэВ})$	Есть
		$\mu^+e^- \rightarrow \tau^+e^-$		
		$\mu^-e^- \rightarrow e^-\tau^-$		
		$\mu^+e^- \rightarrow e^+\tau^-$		$\mathcal{O}(1 \text{ ТэВ})$
	$e^-e^- \rightarrow \mu^-\tau^-$			
	$\tau e\mu\mu$	$\mu^+\mu^- \rightarrow \tau^+e^-, e^+\tau^-$	$\mathcal{O}(1 \text{ ТэВ})$	Есть
		$\mu^+e^- \rightarrow \mu^+\tau^-$		
		$e^-\mu^- \rightarrow \mu^-\tau^-$		
$\mu^+e^- \rightarrow \tau^+\mu^-$		$\mathcal{O}(1 \text{ ТэВ})$		Нет
$\mu^-\mu^- \rightarrow e^-\tau^-$				
$\mu e\tau\tau$	$\mu^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$	Нет	Есть	
	$\mu^-e^- \rightarrow \tau^-\tau^-$	Нет	Нет	

В заключении сформулированы выносимые на защиту основные результаты диссертации:

1. Получены ограничения на параметры эффективных остаточных взаимодействий в рамках концепции единой составленности лептонов, кварков и хиггсовских бозонов. Показано, что существование декатэвной единой составленности не противоречит современным экспериментальным данным.
2. Обоснован выбор лептонных коллайдеров тэвных энергий для поисков первых проявлений составленности.
3. Найдено, что масштаб единой составленности, который может быть достигнут в лептон-лептонных столкновениях, составляет для 2-тэвного электронного коллайдера $\mathcal{O}(50 \text{ ТэВ})$ и $\mathcal{O}(10 - 30 \text{ ТэВ})$ в четырехфермионных процессах и в процессах рождения пар бозонов, соответственно, а для 4-тэвного мюон-

ного коллайдера с высокой светимостью — $\mathcal{O}(100 \text{ ТэВ})$ и $\mathcal{O}(40 - 100 \text{ ТэВ})$ в аналогичных процессах и $\mathcal{O}(30 \text{ ТэВ})$ — в процессе $\mu^+\mu^- \rightarrow ZHH$.

4. Показана важность использования правополяризованных пучков электронов/мюонов для наблюдения максимально возможных отклонений от предсказания СМ.
5. Для процессов рассеяния Баба и рождения пары W^+W^- (содержащих t -канальный обмен) обнаружено существование оптимального обрезания по углу рассеяния в направлении вперед, при котором достижимый масштаб составленности максимален. Оптимальный угол обрезания найден равным $|\cos\theta| \leq 0.8$ в первом случае и $-0.8 \leq \cos\theta \leq 0.3$ — во втором.
6. Показано, что универсальные остаточные взаимодействия, обусловленные ВБД, дают лидирующие вклады в рассмотренные процессы при энергиях $m_Z, m_W \ll \sqrt{s} \ll \mathcal{F}$. Рассмотрение аномальных трехбозонных взаимодействий показывает, что они также не могут конкурировать с проявлениями ВБД. Это позволяет сделать вывод о том, что ВБД является доминирующим допороговым эффектом единой составленности.
7. Найдено, что процессы $l^+l^- \rightarrow \bar{f}f$ с различными конечными фермионами и $l^+l^- \rightarrow W^+W^-, ZH, ZHH$ являются взаимодополнительными, то есть при любых значениях масштаба составленности \mathcal{F} и параметра η_1 (за исключением особого случая $\eta_1 = \bar{s}^2/\bar{c}^2 \simeq 0.3$) можно выбрать условия, когда отклонения от предсказаний СМ отличны от нуля.
8. Обнаружены тесные корреляции между отклонениями от предсказаний СМ для различных процессов и наблюдаемых, в частности, поведение относительных интегральных характеристик подобно для всех процессов без t -канального обмена (для процессов $l^+l^- \rightarrow ZH$ и $l^+l^- \rightarrow ZHH$ они просто совпадают в высокоэнергетическом пределе). Наблюдение таких определенных корреляций должно служить признаком, позволяющим отличить сценарий единой составленности от других возможных расширений СМ.
9. Указана перспективная возможность поиска процессов НЛС и НБЧ на возможных нетрадиционных $e^-\mu^-, \mu^-\mu^-$ и т.д. коллайдерах.
10. Проведена полная классификация четырехлептонных взаимодействий НЛС и найдены ограничения на масштабы соответствующих операторов, следующие из современных экспериментальных данных.
11. Рассмотрен наиболее опасный для процессов НЛС шестилептонный фон СМ. Проанализирована возможность подавления этого фона с использованием “неправильной” поляризации начальных частиц, а также выделены процессы, для которых шестилептонный фон отсутствует.
12. Найдено, что в большинстве каналов максимальный масштаб НЛС, который может быть обнаружен на обсуждавшихся лептонных коллайдерах, составляет $\mathcal{O}(100 \text{ ТэВ})$.
13. Среди операторов НБЧ обнаружен всего лишь один тип шестифермионных операторов с отсутствующими ограничениями на соответствующие масштабы

- из современных данных по поискам распада протона. Это — единственные операторы, допускающие исследование в коллайдерных экспериментах вообще.
14. Указано, что возможный $e^- \mu^-$ -коллайдер позволит наблюдать процессы, соответствующие этим операторам с максимальным масштабом ~ 6 ТэВ. Это значение находится около нижней границы области для масштаба \mathcal{F} , предпочтительной из соображений натуральности (и разрешенной нынешними экспериментальными данными) в сценарии единой составленности.

Список литературы

- [1] Kabachenko V.V. and Pirogov Yu.F. // Int. J. Mod. Phys. A 1995. V.10. P.3187.
- [2] Kabachenko V.V. and Pirogov Yu.F. // Int. J. Mod. Phys. A 1996. V.11. P.2293.
- [3] Kabachenko V.V. and Pirogov Yu.F. – In: Proc. of the X Int. Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory. – Zvenigorod, 1995, eds. B.B. Levtchenko and V.I. Savrin. – Moscow: MSU Press, 1996, P.180.
- [4] Kabachenko V.V. and Pirogov Yu.F. – Preprint IHEP 96-24; report at the XVIII Int. Workshop on High Energy Physics and Field Theory. – Protvino, 1995.
- [5] Кабаченко В.В. и Пирогов Ю.Ф. // ЯФ. 1997. Т.60. С.1824.
- [6] Kabachenko V.V. and Pirogov Yu.F. // Tr. J. of Physics 1998. V.22. P.631.
- [7] Kabachenko V.V. and Pirogov Yu.F. – In: Proc. Of the XII Int. Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory. – Samara, 1997, ed. B. B. Levtchenko, Moscow: MSU Press, 1999, P.227.
- [8] Kabachenko V.V. and Pirogov Yu.F. // Eur. Phys. J. C 1998. V.4. P.525.

Рукопись поступила 15 февраля 1999 г.

В.В.Кабачеко

Исследование эффектов составленности с масштабом $10 \div 100$ ТэВ в
лептон-лептонных соударениях.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Подписано к печати 16.02.99. Формат $60 \times 84/8$.

Офсетная печать. Печ.л. 1,12. Уч.-изд.л. 0,86. Тираж 100. Заказ 32.

Индекс 3649. ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий

142284, Протвино Московской обл.

