



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

96-48
На правах рукописи

Пирогов Юрий Федорович

**ОБЪЕДИНЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
И ЕДИНАЯ СОСТАВЛЕННОСТЬ
ЛЕПТОНОВ, КВАРКОВ
И ХИГГСОВСКИХ БОЗОНОВ**

01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Протвино 1996

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г.Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Л.Н. Липатов (ПИЯФ, Гатчина), доктор физико-математических наук В.А. Рубаков (ИЯИ РАН, Москва), доктор физико-математических наук Л.Д. Соловьев (ИФВЭ, Протвино).

Ведущая организация – НИИЯФ МГУ, Москва.

Защита диссертации состоится “_____” _____ 1996 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 034.02.01 при Институте физики высоких энергий (142284, г. Протвино Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 1996 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 034.02.01

Ю. Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 1996

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Калибровочная теория сильных и электрослабых взаимодействий, так называемая стандартная модель (СМ), является в настоящее время надежно установленной теорией “фундаментальных” частиц и их “фундаментальных” взаимодействий на расстояниях $\geq 10^{-3}$ фм, или эквивалентно при энергиях в системе ц.м. ≤ 100 ГэВ. Дополненная классической теорией гравитации СМ в состоянии описать (по крайней мере в принципе) весь спектр физических явлений в наблюдаемом мире, в том числе бариосинтез во Вселенной. СМ нашла свое полное экспериментальное подтверждение, включая обнаружение топ-кварка. Единственным недостающим пока ее звеном является хиггсовский бозон, поиск и изучение свойств которого представляет собой основную проблему экспериментальной физики высоких энергий ближайшего будущего. Ожидается, что обнаружение Н-бозона завершит длительный этап развития физики высоких энергий XX века.

На первый план выходят проблемы следующего этапа. А именно, ряд внутренних несовершенств и неявных противоречий, а также значительный произвол в выборе параметров СМ приводят к выводу, что последняя является не фундаментальной теорией, а лишь “низкоэнергетическим” остатком некоторой более фундаментальной теории. Построение такой теории — основная проблема фундаментальной физики XXI века.

В отсутствие экспериментальных данных чрезвычайно важным является всестороннее теоретическое и феноменологическое исследование всех априори возможных направлений выхода за рамки СМ и связанных с ними конкретных видов так называемой “новой физики”. При этом проблемой первостепенной важности является решение следующей дилеммы: достигнут ли уже предел элементарности, так что все поля СМ являются точечноподобными вплоть до, возможно, планковской шкалы $M_{Pl} \simeq 10^{18}$ ГэВ, или существует еще (по крайней мере) один уровень субструктуры с массовой шкалой $\mathcal{F} \ll M_{Pl}$?

В настоящее время наиболее популярным в мировой литературе является выбор первой возможности. Это определяется главным образом теми преимуществами,

которые дают перенормируемые единые калибровочные теории и суперсимметрия, использующие элементарные точечноподобные поля. Такие теории, действительно, являются чрезвычайно привлекательными. Однако нет каких-либо убедительных аргументов в пользу того, что полями, соответствующими этим теориям, с неизбежностью должны являться поля СМ, рассматриваемые как конечные сущности.

Скорее наоборот, все предшествующее развитие фундаментальной физики шло по пути углубления уровней субструктуры и достижения за счет этого существенного упрощения описания реального мира. Поэтому вполне возможно, что этот путь повторится вновь на более глубоком уровне субструктуры. По крайней мере, вероятность этого второго пути не меньше, чем вероятность первого. Тем не менее эта возможность почти полностью игнорируется. Следовательно, построение основ соответствующей теории является одной из наиболее актуальных проблем фундаментальной физики.

Цель диссертационной работы состоит в выдвижении и исследовании направления (или “сценария”) единой составленности лептонов, кварков и хиггсовских бозонов, наряду с объединением их хиггсовских и юкавских взаимодействий как остаточных. На современном этапе развития это направление должно рассматриваться как альтернатива общепринятому направлению единых калибровочных теорий и суперсимметрии. Однако последние в данном подходе не отвергаются полностью, а считаются целью дальнейшего этапа развития теории.

Научная новизна. Все работы, легшие в основу диссертации, либо содержат новые, отсутствующие в литературе научные результаты, либо углубляют уже существующие. При этом, хотя отдельные фрагменты сценария единой составленности лептонов, кварков и хиггсовских бозонов имеются в литературе, последовательная разработка рамок этого сценария представлена впервые.

Точная калибровочная исключительная симметрия E_6 в качестве механизма сильной внутренней связи в составных моделях лептонов и кварков была предложена ранее. Однако ее киральный LR-асимметричный вариант с частичным нарушением киральной симметрии для одновременного динамического генерирования как безмассовых составных фермионов, так и хиггс-голдстоуновских бозонов предложен и изучен впервые в данной диссертационной работе.

Идея рассмотрения хиггсовского дублета как составного голдстоуновского бозона, а хиггсовских и юкавских взаимодействий как остаточных, была высказана ранее. Однако подробное изучение простейшей нелинейной модели $G/H = SU(3)_L \times U(1)/SU(2)_L \times U(1)_Y$, воплощающей эту идею в рамках канонической нелинейной реализации, проведено впервые в данной работе. Впервые также исследована возможность достижения натурального иерархического соотношения между масштабом композитности \mathcal{F} и масштабом электрослабого нарушения v : $\mathcal{F} = \mathcal{O}(v/\sqrt{\alpha_W/4\pi}) = \mathcal{O}(10 \text{ ТэВ})$.

Скрытая локальная симметрия в контексте составных моделей лептонов и кварков впервые введена и исследована автором в данной работе. Здесь же впервые

введена и исследована гипотеза векторно-бозонной доминантности калибровочных взаимодействий составных частиц СМ. Это же относится к концепции универсальных доминантных остаточных взаимодействий, порожденных ВБД калибровочных взаимодействий СМ, как сигнатуры единой композитности.

Научная и практическая ценность работы. Развитое в диссертации направление единой составленности лептонов, кварков и хиггсовских бозонов, наряду с объединением их хиггсовских и юкавских взаимодействий как остаточных, открывает принципиально новые перспективы будущего развития фундаментальной физики как теоретической, так и экспериментальной.

С теоретической точки зрения, это направление расширяет набор концепций, связанных с выходом за рамки СМ, в сравнении с общепринятыми, использующими лишь элементарные поля направлениями, позволяет по-новому взглянуть на существующие проблемы, а также ставит новые.

С феноменологической точки зрения, сценарий единой субструктуры с декатэвным масштабом композитности $\mathcal{F} = \mathcal{O}(10 \text{ ТэВ})$ открывает новое поле деятельности в разработке программы физических исследований сооружаемого $p\bar{p}$ -коллайдера ЛНС, а также сможет в будущем лечь в основу программы физических исследований на обсуждаемом e^+e^- линейном коллайдере тэвной энергии и на возможных будущих pp -коллайдерах мультитэвных энергий. Частичное исследование феноменологических следствий этого сценария выполнено в данной работе и может быть применено в указанных целях непосредственно.

Автор защищает:

1. Общие рамки направления единой составленности лептонов, кварков и хиггсовских бозонов с объединением их хиггсовских и юкавских взаимодействий как остаточных.
2. Основы фундаментальной теории поля (ФТП) единой составленности.
3. Основы эффе́ктивной теории поля (ЭТП) единой составленности.

Апробация и публикации. Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на Семинаре ICFA по будущим перспективам физики высоких энергий (БНЛ, Брукхейвен, США, 1987 г.), Международной конференции “Кварки ’92” (Звенигород, 1992 г.), VII Международном рабочем совещании по физике высоких энергий и квантовой теории поля (Сочи, 1992 г.), Международной школе по частицам и космологии (Баксан, 1993 г.), X Международном рабочем совещании по физике высоких энергий и квантовой теории поля (Звенигород, 1995 г.), XVIII Международном рабочем совещании по физике высоких энергий и теории поля (Протвино, 1995 г.), X Тематическом рабочем совещании по физике протон-антипротонных коллайдеров (ФНАЛ, Батавия, США, 1995 г.), сессиях Отделения ядерной физики РАН, семинарах Отдела теоретической физики ИФВЭ (Протвино),

семинаре ЛБЛ (Беркли, США), семинаре Университета штата Огайо (Цинциннати, США), семинаре Университета штата Иллинойс (Блумингтон, США). Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1]–[13].

Структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав основного текста и заключения. Все главы работы объединены одной общей целью — построением основ теории единой составленности. Тем не менее каждая из них является, по существу, самостоятельным исследованием, посвященным отдельному аспекту этой теории, и может рассматриваться в значительной степени независимо. Поэтому каждая глава содержит свое краткое введение, дополняющее и детализирующее общее введение, а также свое краткое заключение. В соответствии с более тесной тематической связью, существующей между группами отдельных глав, работа разбита на две части. Первая часть содержит главу 1, вторая часть — главы 2–4.

Объем диссертации составляет 150 страниц, включая 4 таблицы, 13 рисунков и список литературы из 116 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении излагаются генезис и сущность выдвигаемого направления единой составленности, конспективное описание основных идей этого направления, а также краткое содержание диссертации.

Сначала кратко описывается СМ, обсуждаются ее проблемы и следующие отсюда необходимость и основные рассматриваемые в литературе направления ее расширения. Анализ последних приводит к выдвижению альтернативного направления расширения — направления единой составленности лептонов, кварков и хиггсовских бозонов.

Сущность направления единой составленности состоит в переходе на следующий уровень субструктуры всех полей СМ, кроме калибровочных. Это сопровождается также смещением теоретического акцента от объединения калибровочных взаимодействий на уровне полей СМ, рассматриваемых как элементарные, к объединению хиггсовских и юкавских взаимодействий. Последние являются теперь не фундаментальными, а возникают как остаточные от калибровочных взаимодействий, действующих на уровне более элементарных фермионных полей, из которых одновременно состоят лептоны, кварки и хиггсовские бозоны СМ.

Первая часть работы (**глава 1**) посвящена построению основ фундаментальной теории поля (ФТП) единой составленности. Обосновывается уникальность точной киральной калибровочной симметрии $S_{loc} = E_6$ в качестве фундаментального механизма сильной внутренней связи составных лептонов, кварков и хиггсовских бозонов. Находятся возможные паттерны нарушения киральной симметрии $G \rightarrow H$. Исследуются допустимые наборы потенциально безмассовых составных фермионов

и голдстоуновских бозонов, а также возможность ассоциирования их, в конечном счете, с частицами СМ в простейших прототипных моделях. Выводятся допустимые типы нелинейных моделей G/H , которые могут возникать динамически как “низкоэнергетические” остатки теории E_6 с сильной связью, удовлетворяющей всем известным динамическим критериям непротиворечивости. Возникающие нелинейные модели являются предметом изучения второй части диссертации.

Вторая часть диссертационной работы (**главы 2–4**) посвящена исследованию единой составленности в рамках эффективной теории поля (ЭТП). Изучаются различные аспекты простейших нелинейных моделей G/H , допускающих динамическое обоснование ФТП первой части диссертации.

В главе 2 в качестве прототипа ЭТП единой составленности исследуется так называемая минимальная нелинейная СМ (НСМ) $G/H = SU(3)_L \times U(1)/SU(2)_L \times U(1)_Y$ — простейшая нелинейная модель, реализующая идею хиггсовского дублета как составного голдстоуновского бозона. В борновском приближении изучаются наиболее общий эффективный лагранжиан и отклонения от СМ в лидирующем по $1/\mathcal{F}^2$ приближении, где \mathcal{F} — масштаб нарушения киральной симметрии $G \rightarrow H$.

В главе 3 в качестве улучшенной ЭТП единой составленности вводится и исследуется линейризованная минимальная НСМ $G \times \hat{H}_{loc} \simeq G/H$, где $\hat{H}_{loc} = SU(2)_{\hat{L}} \times U(1)_{\hat{Y}}$ — скрытая локальная симметрия НСМ. Исследуется смешивание тяжелых составных и легких элементарных калибровочных бозонов с идентичными относительно СМ квантовыми числами. Вводится и исследуется гипотеза векторно-бозонной доминантности (ВБД) калибровочных взаимодействий СМ.

В главе 4 вводится и исследуется концепция универсальных доминантных, сильных в масштабе \mathcal{F} остаточных взаимодействий, определяемых ВБД калибровочных взаимодействий СМ, как “низкоэнергетической” сигнатуры единой составленности и новых сверхсильных фундаментальных взаимодействий. Подробно исследуются проявления этих остаточных взаимодействий в e^+e^- -соударениях при тэвных энергиях в процессах $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$, W^+W^- и ZH , корреляции между ними, а также экспериментальные возможности косвенного обнаружения единой субструктуры в дэкатэвной области на обсуждаемом будущем e^+e^- линейном коллайдере тэвной энергии.

В заключении сформулированы выносимые на защиту основные **научные результаты диссертации**:

- Последовательно разработаны общие рамки направления единой составленности лептонов, кварков и хиггсовских бозонов. Концепция объединения калибровочных взаимодействий заменена концепцией объединения хиггсовских и юкавских взаимодействий как остаточных взаимодействий, действующих

только на составном уровне и порожденных комбинацией более фундаментальных калибровочных взаимодействий, действующих на элементарном уровне. Подчеркнута важность двухпетлевого генерирования кривизны эффективного потенциала для получения натурального иерархического соотношения между масштабом композитности \mathcal{F} и масштабом v нарушения электрослабой симметрии: $\mathcal{F} \simeq 4\pi v/g \simeq m_W/\alpha_W = \mathcal{O}(10 \text{ ТэВ})$. Обоснован комплексный подход к построению теории единой составленности, включающий взаимодополняющее сочетание фундаментальной теории поля (ФТП) при высоких энергиях (выше масштаба композитности \mathcal{F}) и эффективной теории поля (ЭТП) при относительно “низких” энергиях (ниже масштаба композитности).

- В качестве механизма сильной внутренней связи составных лептонов, кварков и хиггсовских бозонов введена и изучена точная киральная калибровочная исключительная симметрия E_6 . Принципиально новым явилось введение LR-асимметричного набора составляющих фермионов в фундаментальном 27-плетном представлении E_6 , а также исследование частичного нарушения киральной симметрии для одновременного генерирования как безмассовых составных фермионов, так и голдстоуновских бозонов. Введена гипотеза “выживания”, регламентирующая предпочтительный паттерн такого нарушения. Показана важность учета условий согласования смешанно-гравитационных аномалий, в дополнение к условиям согласования киральных аномалий, для редуцирования спектра возможных решений последних.
- Детально изучена минимальная нелинейная СМ (НСМ) $G/H = SU(3)_L \times U(1)/SU(2)_L \times U(1)_Y$ в качестве простейшей реализации ЭТП единой составленности с дублетом составных хиггсовских бозонов как голдстоуновских. Применен аппарат канонической нелинейной реализации для представления результатов НСМ в форме, максимально приближенной к форме линейно реализованной СМ. Исследован наиболее общий эффективный лагранжиан НСМ в борновском приближении. Показаны точная воспроизводимость результатов СМ в лидирующем порядке по масштабу \mathcal{F} нарушения киральной симметрии, а также отличия от СМ, возникающие в порядке $1/\mathcal{F}^2$.
- В рамках НСМ введена скрытая локальная симметрия $\hat{H}_{loc} = SU(2)_{\hat{L}} \times U(1)_{\hat{Y}}$, а также детально изучена линейризованная НСМ $G \times \hat{H}_{loc} \simeq G/H$. В формализме канонической нелинейной реализации исследован в борновском приближении наиболее общий эффективный лагранжиан линейризованной НСМ. Изучено смешивание динамически генерированных тяжелых составных векторных бозонов, соответствующих \hat{H}_{loc} , и легких элементарных калибровочных бозонов СМ. Показана теоретическая непротиворечивость на квантовом уровне линейризованной НСМ как ЭТП. Введена гипотеза векторно-бозонной доминантности (ВБД) калибровочных взаимодействий составных частиц СМ как универсального проявления динамики сверхсильных взаимодействий, формирующих эти частицы.
- Введена и исследована концепция универсальных доминантных остаточных взаимодействий, порождаемых ВБД, как сигнатуры единой композитности.

Изучены процессы $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$, W^+W^- и ZH , найдены характерные корреляции между ними, а также важность использования правополяризованных электронных пучков и оптимальных угловых обрезаний для максимального повышения чувствительности к проявлениям единой композитности при энергиях, низких в сравнении с масштабом композитности: $\sqrt{s} \ll \mathcal{F}$. Показана возможность допорогового изучения единой субструктуры на будущем e^+e^- линейном коллайдере тэвной энергии вплоть до масштаба составленности $\mathcal{F} = 50$ ТэВ, что заведомо попадает в предпочтительную из соображений натуральности декатэвную область. Подчеркнуто, что наблюдение указанных корреляций между отклонениями от предсказаний СМ может служить первым, хотя и косвенным экспериментальным подтверждением существования единой субструктуры в декатэвной области.

Дополнительное представление о содержании диссертации может быть получено из ее оглавления, приведенного ниже в приложении.

Список литературы

- [1] Pirogov Yu.F. On massless fermions in composite models with exceptional confining groups. // *Phys. Lett.* 1988. V. 207B. P. 174–178.
- [2] Pirogov Yu.F. Higgs doublet as composite Goldstone boson: challenge to multi-TeV energy coliders. // *Int. J. Mod. Phys.* 1992. V. A7. P. 6473–6492.
- [3] Pirogov Yu.F. Vector boson dominance of electroweak interactions. // *Mod. Phys. Lett.* 1993. V. A8. P. 3129–3138.
- [4] Pirogov Yu.F. Chiral gauge E_6 as a binding group for composite leptons, quarks and Higgs bosons. // *Int. J. Mod. Phys.* 1994. V. A9. P. 1397–1410.
- [5] Pirogov Yu.F. Exceptional chiral binding symmetry for composite leptons, quarks and Higgs bosons. Report at VII Int. Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory, Sochi, 1992. // *ЯФ.* 1995. Т. 58. С. 516–523.
- [6] Pirogov Yu.F. Nonlinear standard model. — In: Proc. of the VII Int. Seminar "Quarks '92", Zvenigorod, 1992, eds. Grigoriev D.Yu. *et al.* — World Scientific, Singapore, 1993, p. 375–390.
- [7] Pirogov Yu.F. Deca-TeV substructure deep in the standard model. — In: Proc. of the Int. School on Part. and Cosmology, Baksan Valley, 1993, eds. Alexeev E.N. *et al.* — World Scientific, Singapore, 1994, p. 151–161.
- [8] Kabachenko V.V., Pirogov Yu.F. Testing the vector boson dominance of electroweak interactions via $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$. // *Int. J. Mod. Phys.* 1995. V. A10. P. 3187–3206.

- [9] Kabachenko V.V., Pirogov Yu.F. Testing the vector boson dominance of electroweak interactions via e^+e^- annihilation into boson pairs. Preprint IHEP 95-92, Protvino, 1995. // Int. J. Mod. Phys. 1996. V. A11.
- [10] Kabachenko V.V., Pirogov Yu.F. Vector boson dominance of electroweak interactions and its manifestations at e^+e^- TeV linear collider. Report at the X Int. Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory, Zvenigorod, 1995. — Preprint IHEP 95-149. Protvino, 1995.
- [11] Kabachenko V.V., Pirogov Yu.F. Studying the unified compositeness in e^+e^- collisions. Report at the XVIII Int. Workshop on High Energy Physics and Field Theory, Protvino, 1995. — Preprint IHEP 96-24. Protvino, 1996.
- [12] Jikia G.V., Pirogov Yu.F. Studying triple-Higgs vertex in the process $\gamma\gamma \rightarrow HH$ at TeV energies. // Phys. Lett. 1992. V. 283B. P. 135–141.
- [13] Gershtein S.S., Pirogov Yu.F. Post-Fermi scale physics and future accelerators. — In: Proc. of the 1987 ICFA Seminar on Future Perspectives in High Energy Physics. — BNL 5214, 1987, p. 145–154.

Рукопись поступила 21 июня 1996 г.

Содержание

Введение	1
I Фундаментальная теория поля единой субструктуры	19
1 Киральная калибровочная исключительная симметрия	20
1.1 Введение	21
1.2 Частичное нарушение киральной симметрии	24
1.2.1 Общее рассмотрение	24
1.2.2 Группа E_6	25
1.3 Безмассовые составные фермионы	28
1.3.1 Согласование киральных аномалий	28
1.3.2 Группа E_6	29
1.3.3 Условие отщепления	35
1.3.4 Смешанно-гравитационные аномалии	36
1.4 Составные голдстоуновские бозоны	37
1.5 Явное возмущение симметрии	38
1.6 Составные модели	39
1.6.1 Минимальная модель	39
1.6.2 Расширенные модели	41
1.7 Заключение	46
II Эффективная теория поля единой субструктуры	47
2 Хиггсовский дублет как составной голдстоуновский бозон	48
2.1 Введение	49
2.2 Минимальная расширенная симметрия	52
2.2.1 Расширение глобальной симметрии	52
2.2.2 Расширение локальной симметрии	54
2.3 Нелинейная реализация расширенной симметрии	55
2.4 Эффективный лагранжиан	61
2.5 Дезориентация вакуума	64
2.5.1 Хиггсовский потенциал	52
2.5.2 Юкавские взаимодействия	54
2.6 Явная линейная реализация	68
2.7 Общие физические проявления	74
2.8 Заключение	76
3 Векторно-бозонная доминантность калибровочных взаимодействий	78
3.1 Введение	79
3.2 Скрытая локальная симметрия	80

3.3	Составные векторные бозоны	82
3.4	Векторно-бозонная доминантность	49
3.5	Смешивание векторных бозонов	87
3.6	Универсальные остаточные взаимодействия	89
3.6.1	Хиггсовский сектор	89
3.6.2	Фермионный сектор	90
3.6.3	Калибровочный сектор	92
3.7	Заключение	93
4	Универсальные доминантные остаточные взаимодействия	94
4.1	Введение	95
4.2	Эффективный лагранжиан ВБД	97
4.2.1	Фермион-фермионные взаимодействия	97
4.2.2	Фермион-бозонные и бозон-бозонные взаимодействия	100
4.3	Процессы $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$	102
4.3.1	Дифференциальные сечения	102
4.3.2	Проявления ВБД	105
4.3.3	Полные сечения	115
4.3.4	Асимметрии	116
4.3.5	Рассеяние $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$	118
4.4	Процесс $e^+e^- \rightarrow ZH$	118
4.5	Процесс $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$	124
4.6	Заключение	134
	Заключение	135
	Библиография	138
	Список таблиц	146
	Список рисунков	147

Ю.Ф.Пирогов

Объединение взаимодействий и единая составленность лептонов, кварков
и хиггсовских бозонов.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежева

Подписано к печати 24.06.96. Формат $60 \times 84/8$.

Офсетная печать. Печ.л. 1. Уч.-изд.л. 0.76. Тираж 100. Заказ 680.

Индекс 3649. ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий

142284, Протвино Московской обл.

