РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Безруков Федор Леонидович

Туннельные и многочастичные процессы в электрослабой теории и моделях теории поля

01.04.02 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва–2003

Работа выполнена в Отделе теоретической физики Института ядерных иследований РАН.

Научные ркуоводители:

доктор физико-математических наук,

академик РАН — В. А. Рубаков

профессор — К. Ребби

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук — А. С. Горский

доктор физико-математических наук — Д. И. Казаков

Ведущая организация:

Математический институт им. В. А. Стеклова Российской академии наук

Защита диссертации состоится «   » ________________ 2003 г. в   часов на заседании Диссертационного совета Д 002.119.01 Института ядерных исследований РАН (117312 Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института ядерных исследований РАН.

Автореферат разослан «   » ________________ 2003 г.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук — Б. А. Тулупов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Стандартная модель фундаментальных взаимодействий в настоящий момент с высокой точностью описывает большинство наблюдаемых процессов в физике частиц во всем доступном существующим экспериментам диапазоне энергий. Большинство результатов, используемых для описания реальных физических процессов при высоких энергиях, получено в ней в рамках теории возмущений по малой константе связи. Благодаря малости констант связи в электрослабом секторе, и свойству асимптотической свободы квантовой хромодинамики, теория возмущений отлично подходит для описания многих процессов. Однако даже в пределе слабой связи существуют эффекты, не описываемые в рамках теории возмущений.

Одним из таких эффектов является возможность несохранения фермионного (барионного и лептонного) числа в электрослабой теории. Этот эффект связан с нетривиальной структурой вакуума калибровочных теорий: неабелевы калибровочные теории обладают счетным множеством физически эквивалентных вакуумов. В рамках теории возмущений существование различных вакуумов, и, соответственно, упомянутый эффект, незаметен. Однако, в полной квантовой теории возможны переходы между этими вакуумами, приводящие в теориях с фермионами к несохранению фермионных чисел.

Интересен вопрос, возможно ли наблюдать такие процессы экспериментально. В электрослабой теории соседние топологически различные вакуумы разделены потенциальным барьером конечной высоты. Классическое нестабильное решение статических уравнений движения, соответствующее вершине этого барьера (строго говоря, седловой точке между вакуумами),— сфалерон — имеет в стандартной электрослабой модели энергию $E_{\rm sph} \sim M_W/\alpha_W$, или, при стандартных значениях параметров, около 8 ТэВ. При энергиях, много меньших высоты барьера, процессы, описывающие переходы с изменением топологического числа, хорошо описываются в квазиклассическом приближении, которое приводит в данном случае к теории возмущений вокруг классического непертурбативного решения в евклидовом времени, интерполирующего между соседними вакуумами — инстантона. Соответственно, вероятности туннелирования подавлены экспоненциальным фактором вида $\exp(-2S_{\rm inst})$, где $S_{\rm inst}$ — евклидово действие инстантона, обратно пропорциональное константе связи. В электрослабой теории действие инстантона $S_{\rm inst} = 4\pi/\alpha_W$, что дает фактор подавления 10^{-170}. Это приводит к тому, что при низких энергиях такие процессы практически ненаблюдаемы.

Квантовомеханическая интуиция, основывающаяся на известной задаче о туннелировании через барьер в одномерной квантовой механике, подсказывает, что подавление может пропасть при энергии, равной высоте барьера. Это действительно происходит в процессах при высокой температуре, большой плотности фермионов, или при наличии тяжелых фермионов в начальном состоянии.

Вообще говоря, высота барьера, $E_{\rm sph} \simeq 8$ ТэВ относительно невелика, и сравнима с энергиями, достижимыми на будущих ускорителях. В связи с этим встает вопрос, сохраняется ли экспоненциальное подавление процессов с нарушением фермионных чисел в столкновениях частиц при энергиях, совпадающих с энергией сфалерона, и превышающих ее.

В работах Рингвальда и Эспинозы в 1990 году было замечено, что при низких энергиях амплитуды процессов $2 \to N$ с нарушением топологического числа могут быть найдены с помощью теории возмущений на фоне инстантона. Было получено, что эти амплитуды в ведущем порядке растут с энергией степенным образом, а инклюзивное сечение растет экспоненциально

$$\sigma_{\text{tot}} \sim \exp\left\{-\frac{4\pi}{\alpha_W}\left[1-\frac{9}{8}\left(\frac{E}{E_0}\right)^{4/3}+\frac{9}{16}\left(\frac{E}{E_0}\right)^2\right]\right\}, \qquad (1)$$

где $E_0 = \sqrt{6}\pi M_W/\alpha_W$, причем оно насыщается конечным состоянием с большим (порядка $1/\alpha_W$) числом частиц с относительно малыми энергиями. Дальнейшие исследования показали, что полное сечение имеет экспоненциальный вид

$$\sigma_{\text{tot}}(E) \sim \exp\left\{-\frac{4\pi}{\alpha_W}F_{HG}(E/E_{\text{sph}})\right\} ,$$

где α_W — слабая константа связи, а функция F_{HG} выражается в виде ряда по дробным степеням E/E_{sph}, и зависит от константы связи только неявным образом через E_{sph}. Предэкспоненциальный множитель зависит от константы связи и энергии степенным образом и, следовательно, относительно мало существенен. Ряд теории возмущений на фоне инстантона для функции $F_{HG}(E/E_{\text{sph}})$ взрывается при $E \gtrsim E_{\text{sph}}$, и, следовательно, анализ инстантонных процессов в самой интересной области высоких энергий требует применения непертурбативных методов.

Экспоненциальная форма полного сечения предполагает, что может существовать квазиклассический метод вычисления $F_{HG}(E/E_{\text{sph}})$ при любых энергиях, включая $E \gtrsim E_{\text{sph}}$. Однако, как уже было замечено, начальное состояние, содержащее две частицы, не является квазиклассическим. Метод решения этой проблемы был предложен Рубаковым, Тиняковым и Шоном в 1992 году. Метод основан на предположении об *универсальности* функции $F_{HG}(E/E_{\text{sph}})$, то есть о том, что она не зависит от деталей начального состояния, пока число частиц в нем не становится параметрически большим. Это предположение было проверено явными вычислениями в нескольких порядках теории возмущений по $E/E_{\rm sph}$ в калибровочной теории а также в явно в квантовой механике с двумя степенями свободы). Состояние же с несколькими частицами можно рассматривать как предельный случай квазиклассического состояния с числом частиц $N = \tilde{N}/\alpha_W$, при стремлении параметра $\tilde{N}$ к нулю. Для многочастичного начального состояния инклюзивное сечение перехода с изменением топологического числа имеет явно квазиклассическую форму

$$\sigma(E,N) \sim \exp\left\{-\frac{16\pi^2}{g^2}F(E/E_{\rm sph},\tilde{N})\right\} \ .$$

Функция же $F_{HG}(E/E_{\rm sph})$, отвечающая двухчастичному сечению, получается в пределе $\tilde{N} \to 0$,

$$\lim_{\tilde{N}\to 0} F(E/E_{\rm sph},\tilde{N}) = F_{HG}(E/E_{\rm sph}) \ . \tag{2}$$

Таким образом, можно косвенно вычислить функцию $F_{HG}(E/E_{\rm sph})$ квазиклассически.

В рамках этого метода функции $F(E/E_{\rm sph},\tilde{N})$ определяется действием на специальном решении классических уравнений поля на контуре в комплексном времени. Хотя для большинства реалистических моделей найти требуемые решения аналитически затруднительно, возможно, по крайней мере в принципе, получить эти решения численно. Кроме этого, можно приближенно решить эту задачу в пределе малых энергий и числа частиц.

Возможность применения численных методов в данной задаче была продемонстрирована на примере модельной теории поля, описывающей распад ложного вакуума. Однако применение этого метода при высоких энергиях сталкивается с проблемой — решения граничной задачи, интерполирующие между различными топологическими вакуумами перестают существовать. Эта проблема была отмечена и при анализе распада ложного вакуума, и в модельной задаче квантовомеханического туннелирования в системе с двумя степенями свободы.

Основной задачей диссертации является вычисление показателя экспоненты $F(E/E_{\mathrm{sph}}, \tilde{N})$ и получение информации о $F_{HG}(E/E_{\mathrm{sph}})$ в калибровочной теории с группой SU(2) и дублетом Хиггса, т.е. электрослабой теории с $\sin\theta_W = 0$.

В топологически тривиальном секторе в моделях со слабой связью при относительно невысоких энергиях также существуют процессы, плохо описываемые теорией возмущений. В этом случае возможны ситуации, когда в теории появляются конкурирующие малые (или большие) параметры. Примером является процесс с большим количеством частиц n в конечном состоянии, сравнимым с обратной константой связи λ^{-1}.

В обычной теории возмущений даже около топологически тривиального вакуума уже наивная оценка амплитуды дает факториальную зависимость $n!$ от количества частиц в конечном состоянии, что снимает подавление, связанное с константой связи. В 1991 году Волошиным было найдено точное выражение для древесной амплитуды процесса рождения одной виртуальной частицей n реальных в теории $\frac{\lambda}{4}\varphi^4$ (массу полагаем равной единице) при специальной кинематике: все частицы обладают нулевыми пространственными импульсами

$$A_{1\to n}^{\mathrm{tree}} = n! \left(\frac{\lambda}{8}\right)^{\frac{n-1}{2}} .$$

Данный результат указывает на полную неприменимость обычной теории возмущений при $n > \lambda^{-1}$, поскольку входит в противоречие с унитарностью теории.

Таким образом, для вычисления данных сечений необходим некоторый непертурбативный метод. Интерес представляет режим

$$\lambda \to 0 \;, \quad \lambda n = \text{fixed} \;, \quad \varepsilon = \text{fixed} \;,$$

где $\varepsilon = (E - n)/n$ — средняя кинетическая энергия конечных частиц в системе центра масс. Существующие вычисления в рамках теории возмущений свидетельствуют о том, что в этом режиме полное сечение имеет экспоненциальный вид,

$$\sigma_{1\to n} \sim \exp\left(\frac{1}{\lambda} F(\lambda n, \varepsilon)\right) \;.$$

Это указывает на возможную применимость квазиклассического приближения.

В диссертации исследовано поведение функции $F(\lambda n, \varepsilon)$ в древесном приближении при произвольных энергиях ε.

Цель работы состоит в изучении процессов с нарушением барионного и лептонного чисел в столкновениях при высоких энергиях в стандартной электрослабой теории с помощью квазиклассических методов, а также в исследовании многочастичного рождения в теории $\lambda\varphi^4$ на древесном уровне с помощью сингулярных классических решений.

Научная новизна и практическая ценность.

В диссертации впервые квазиклассический метод нахождения вероятности туннелирования в многочастичных столкновениях применен к калибровочной теории.

Обнаружено качественно новое свойство туннелирования при высоких энергиях — туннелирование на сфалерон. Для численного нахождения решений такого типа использовалась регуляризованная версия граничной задачи. Таким образом, впервые получены результаты для показателя экспоненты подавления туннельных процессов в SU(2) калибровочной теории с хиггсовским дублетом для энергий, достигающих и превышающих энергию сфалерона.

С помощью этих результатов получена оценка и ограничение на показатель экспоненты подавления сечений процессов с нарушением барионного числа. При этом выявлен новый факт, что экспонента подавления выполаживается при энергии выше энергии сфалерона. Полученные результаты сильно ограничивают возможность обнаружения процессов с электрослабым нарушением барионного числа на будущих ускорителях и в космических лучах сверхвысоких энергий.

С помощью квазиклассической техники, связывающей сечения и сингулярные решения уравнений поля, численно исследованы древесные сечения многочастичного рождения при произвольных энергиях. Впервые исследована форма седловой поверхности сингулярности при средних энергиях (сравнимых с массой бозона). Полученное ограничение на древесные сечения является самым сильным на настоящий момент.

Апробация диссертации. Основные результаты, полученные в диссертации, были доложены в 1996–2003 гг. на научных семинарах ИЯИ РАН, на XXIV Зимней школе ИТЭФ (Снегири, 1996), на 37-ой Международной школе по субъядерной физике (Эриче, Италия, 1999г.), двух Международных школах «Частицы и космология» (Приэльбрусье, 2001 г. и 2003 г.), на Международном семинаре «КВАРКИ-96» (Ярославль, 1996г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 6 работ.

Объем работы. Диссертация состоит из Введения, трех глав основного текста, Заключения и одного дополнения, содержит 124 страницы машинописного текста, в том числе 25 рисунков и список литературы из 97 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обсуждаются непертурбативные эффекты в теориях поля, связанные с нетривиальной структурой вакуума в электрослабой модели и многочастичными процессами. Обсуждается возможность применения квазиклассических методов для исследования таких процессов. Кратко изложено содержание диссертации.

В Главе 1 описана использовавшаяся при изучении переходов с нарушением топологического числа калибровочная модель, описан общий квазиклассический метод нахождения экспоненты подавления вероятности переходов, а также получено аналитическое решение соответствующей граничной задачи при низких энергиях. Кроме этого, описаны общие свойства решений граничной задачи в зависимости от параметров.

В разделе 1.1 описывается изучаемая модель — калибровочная теория с группой SU(2) и хиггсовским дублетом, соответствующая бозонному сектору стандартной электрослабой теории с нулевым углом смешивания $\theta_W = 0$. Различные топологические вакуумы в модели характеризуются целым топологическим числом.

Далее выводится граничная задача для нахождения показателя экспоненты инклюзивной вероятности перехода между соседними топологическими вакуумами для со-

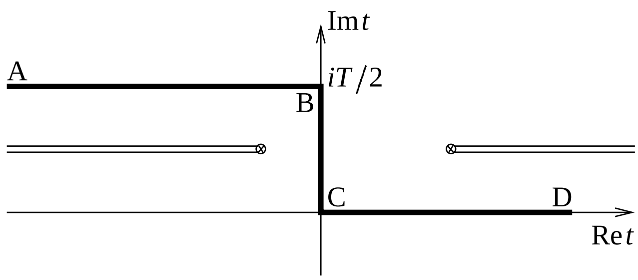

Рис. 1. Контур в комплексном времени

стояния с определенной энергией и числом частиц в квазиклассическом приближении. Граничная задача формулируется на контуре в комплексном времени, изображенном на рис. 1, во всех внутренних точках которого должны удовлетворяться обычные уравнения поля (продолженные в комплексную область значений полей), граничные условия на конечном участке контура являются условием асимптотической действительности полей, а граничные условия при начальном времени связывают положительно- и отрицательно-частотные компоненты поля $f_{\boldsymbol{k}}$ и $g^*_{\boldsymbol{k}}$:

$$f_{\boldsymbol{k}} = \mathrm{e}^{-\theta} g_{\boldsymbol{k}} \ .$$

Инклюзивная вероятность туннелирования дается тогда выражением

$$\sigma(E,N) \sim \exp\left\{-\frac{4\pi}{\alpha_W} F(E,N)\right\}$$

$$\frac{4\pi}{\alpha_W} F(E,N) = 2\,\mathrm{Im}\, S_{ABCD} - N\theta - ET \ ,$$

где S_{ABCD} — действие на контуре ABCD в пределе бесконечных начального и конечного времен, E и N — энергия и число частиц в начальном состоянии, а T и θ — вспомогательные параметры, определяемые тем, что решение действительно имеет требуемую энергию и число частиц в начальном состоянии.

Заметим, что граничные условия на начальном участке контура сформулированы только для физических возбуждений поля. В случае калибровочной теории в калибровке $A_0 = 0$ необходимо кроме них потребовать выполнения закона Гаусса и зафиксировать остаточную калибровочную инвариантность относительно не зависящих от времени калибровочных преобразований.

При низких энергиях (и малых числах частиц) можно приближенно решить эту граничную задачу аналитически. Такое решение («θ–инстантон») в виде цепочки инстантонов и антиинстантонов, соответственным образом модифицированных и помещенных в определенных местах на евклидовой оси времени, приведено в разделе 1.2.

С помощью этого решения в разделе 1.3 получена экспонента подавления вероятности топологических переходах при низких (но ненулевых) энергии и числе частиц. Особенно интересно приведенное в этом разделе сравнение с аналитическим результатом для вероятности топологических переходов в двухчастичных столкновениях, которое подтверждает гипотезу предельного перехода (2). Также важен анализ зависимости F и T от N при малых числах частиц, результаты которого используются в дальнейшем при экстраполяции численных данных в область $N \to 0$.

В Главе 2 описывается численный подход к решению граничной задачи при любой энергии. В ней приводятся результаты для большой области значений E и N, вплоть до границы классически разрешенной области, и энергий в два раза превышающих энергию сфалерона. Описан метод получения туннелирующих на сфалерон решений при высокой энергии. С помощью экстраполяции в нулевые N получено ограничение и оценка подавления двухчастичного сечения процессов с нарушением барионного числа.

Раздел 2.1 описывает O(3) симметричную форму полей, необходимую для получения задачи, пригодной для решения на современных компьютерах. Можно, однако, ожидать, что s-волновой вклад является основным для определения экспоненты подавления.

Раздел 2.2 посвящен формулировке дискретной версии уравнений, пригодной для численного анализа. В подразделе 2.2.1 приведено решеточное выражение для действия модели, варьирование которого по полевым переменным во внутренних узлах решетки приводит к уравнениям движения. Для формулировки граничных условий необходимо явно выделить физические и калибровочные моды в модели. Это удобнее и точнее делать численно в дискретизованной задаче, что описано в подразделе 2.2.2. Собственно граничные условия приведены в подразделе 2.2.3, включая θ-граничные условия, условия действительности в конечном состоянии, а также закон Гаусса и уравнения, фиксирующие остаточную калибровку (мы везде используем калибровку $A_0 = 0$). Также описывается метод фиксации трансляционной инвариантности задачи вдоль действительного времени, который необходимо применять при численном решении задачи.

Раздел 2.3 описывает итеративную процедуру поиска решений.

В разделе 2.4 описаны решения граничной задачи при энергиях, меньших энергии сфалерона. Описан метод наглядного изображения решений, применявшийся для проверки топологических свойств решения. В подразделе 2.4.1 полученные результаты в пределе малых энергий сравниваются с аналитическими результатами главы 1, что дает независимую проверку правильности численного решения задачи.

Раздел 2.5 посвящен проблеме, появляющейся при попытке найти решения с энергией, превышающей энергию сфалерона (строго говоря, некоторую зависящую от N энергию бифуркации $E_1(N) > E_{\rm sph}$). При таких энергиях существует несколько ветвей решений — одна из них обладает неправильными топологическими свойствами (начинается и заканчивается в одном и том же вакууме), и, соответственно, не дает вклада в вероятность туннелирования; а другая отвечает решениям, заканчивающимся вблизи сфалерона (который потом распадается классически на элементарные возмущения над одним из вакуумов). Такие решения удовлетворяют условию действительности в конечном состоянии лишь асимптотически, и не могут быть непосредственно найдены численно. Для их поиска необходимо ввести регуляризацию, сводящуюся к добавлению мнимого члена к действию,

$$\delta S = i\epsilon \int dt \int dr\, (\bar{\phi}(r)\phi(r) - 1)^8 \,,$$

где ϵ — малый параметр, а ϕ — поле Хиггса. Полученные решения обладают правильными топологическими свойствами, а в пределе $\epsilon \to 0$ восстанавливается ответ исходной граничной задачи.

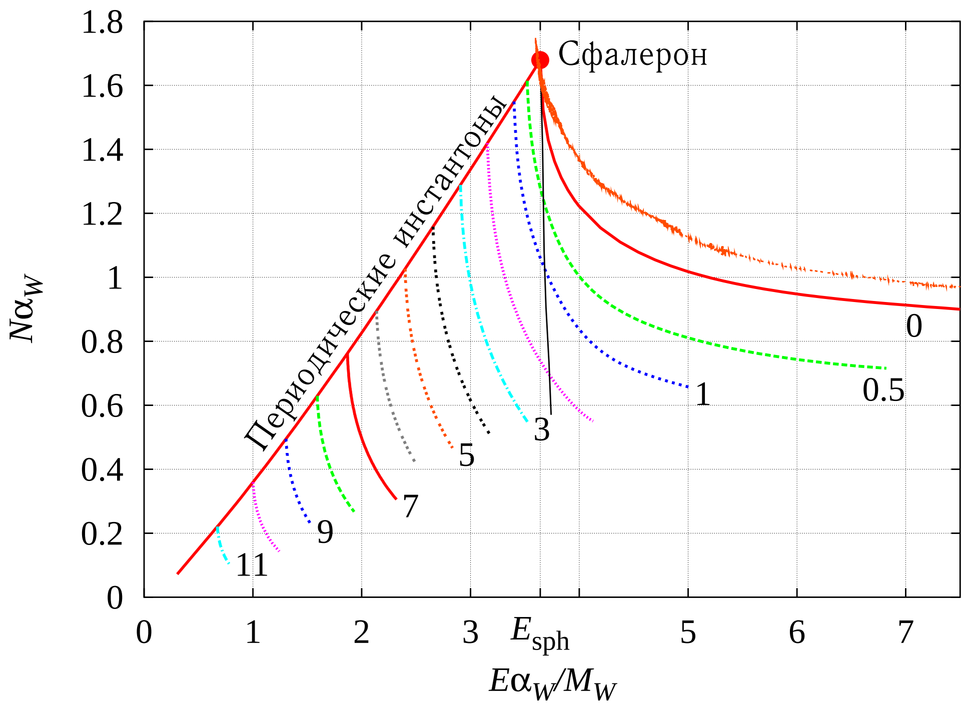

Рис. 2. Линии $F(E,N) = \text{const}$. На рисунке нанесены значения показателя экспоненты подавления $-\alpha_W \log\sigma = 4\pi F$. Энергия E указана в единицах M_W/α_W, число частиц N — в единицах $1/\alpha_W$. Линия с подавлением 0 ($F = 0$) является границей классически разрешенной области. «Размытая» линия является приближенной границей классически разрешенной области, найденной с помощью надбарьерных вычислений Ребби и Синглтона.

В разделе 2.6 приводятся подробно численные результаты для вероятностей переходов с изменением топологического числа (рис. 2), объясняется выбор параметров решетки, описываются произведенные проверки численного метода.

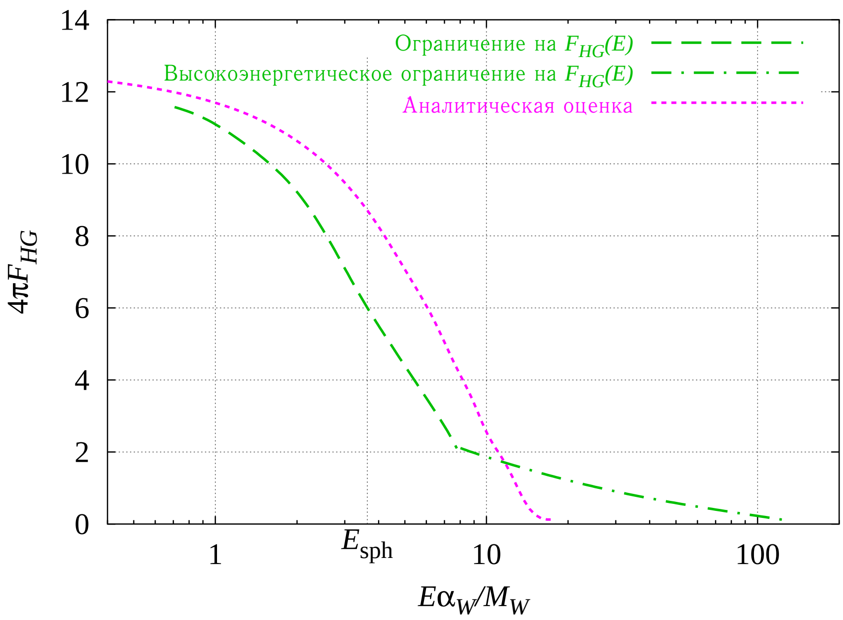

Рис. 3. Ограничение снизу на показатель экспоненты подавления топологических переходов в двухчастичных столкновениях, штриховая и штрих-пунктирная линия. Пунктирная линия — аналитическая оценка из работ Рингвальда и Хозе.

Разделы 2.7 и 2.8 посвящены получению ограничения и оценки экспоненты подавления топологических переходов индуцированных столкновениями частиц, соотвественно. Так как с помощью доступных компьютеров на даный момент представляется невозможным получить решения граничной задачи при достаточно низком N, в этих разделах применяются разные методы экстраполяции результатов в область $N \to 0$. При этом показано, что экспоненциальное подавление сохраняется, по крайней мере, вплоть до энергии порядка 250 ТэВ (рис. 3). Оценка же сечения (рис. 4) свидетель-

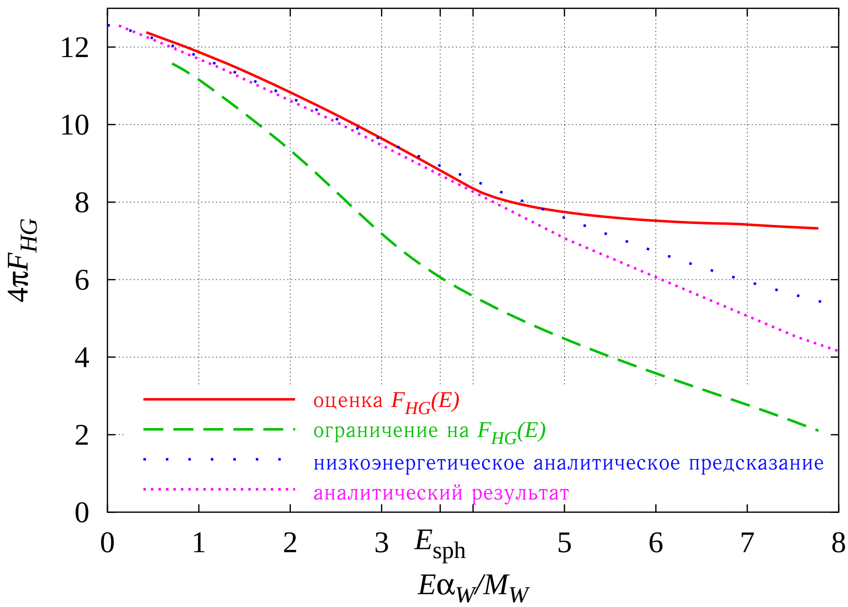

Рис. 4. Оценка показателя экспоненты подавления топологических переходов в двухчастичных столкновениях $F_{HG}(E)$ (сплошная линия), ограничение снизу на $F_{HG}(E)$ (штриховая линия), аналитическое предсказание при низких энергиях (1) (редкая пунктирная линия) и аналитическая оцена работ Рингвальда и Хозе (пунктирная линия).

ствует о том, что до энергии сфалерона известные аналитические результаты являются очень хорошим приближением, но при энергиях больших сфалеронной подавление спадает очень медленно, что является следствием «туннелирования на сфалерон».

Глава 3 описывает применение квазиклассического метода к нахождению древесного сечения многочастичного рождения в теории $\lambda\varphi^4$. С помощью описанного метода найдено сечение рождения n частиц со средней энергией ϵ из одной виртуальной частицы с нулевым импульсом и энергией $n\epsilon$.

В разделе 3.1 выводится общий формализм получения древесных сечений в теории поля с помощью сингулярных классических решений. Он сводится к нахождению решения евклидовых уравнений, сингулярных на некоторой гиперповерхности, проходящей через начало координат, и убывающей при стремлении евклидова времени к бесконечности. Тогда вероятность рождения выражается через асимптоику решения на временной бесконечности, после экстремизации по всем поверхностям сингулярности.

В разделе 3.2 описанный метод выражен в терминах сферических мод в четырехмерном евклидовом пространстве. В разделе 3.3 найдено ограничение на многочастичное сечение. При этом мы ограничивались решениями с несколькими ненулевыми сферическими модами на бесконечности, что отвечает экстремизации по некоторому подклассу поверхностей сингулярности. Поверхность сингулярности, на которой достигается экстремум, не является сферической, что совпадает с аналитическими ожиданиями, основанными на результатах при больших энергиях. В разделе 3.4 производится сравнение численного ограничения с аналитической оценкой при низких энергиях, с ограничением при сверхвысоких энергиях, а также с ограничением, получаемым из непосредственного анализа диаграмм. Ограничение, полученное в данной диссертации, является самым сильным.

В Заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Дополнение посвящено подробному описанию численного алгоритма решения системы уравнений, получающихся при дискретизации граничной задачи в главе 2. Применяется вариант алгоритма разбиений для решения трехдиагональных систем уравнений («divide–and–conquer» algorithm), позволяющий эффективно использовать параллельные вычисления, как на архитектурах с разделяемой памятью, так и на вычислительных кластерах.

Для защиты выдвигаются следующие результаты, полученные в диссертации:

1. Сформулирован метод квазиклассического вычисления вероятностей туннелирования в калибровочных теориях поля, позволяющий исследовать процессы с фиксированной энергией и числом частиц в начальном состоянии. Метод реализован в виде компьютерного кода, эффективно решающего требуемую граничную задачу на параллельных суперкомпьютерах и компьютерных кластерах.
2. Обнаружено качественно новое поведение туннельных решений при энергиях, превышающих высоту барьера между калибровочными вакуумами (энергию сфалерона): туннелирование происходит с образованием состояния около вершины барьера (сфалерона), которое затем распадается классическим образом на элементарные возбуждения. Данный эффект не является специфическим для калибровочных теорий поля, а возникает при анализе туннелирования большинства систем со многими степенями свободы.
3. Найдена численно вероятность туннелирования в SU(2) модели с хиггсовским дублетом, отвечающим бозонному сектору электрослабой теории с углом смешивания $\theta_W = 0$, для диапазона начальных энергий $0.2 < E/E_{\rm sph} < 2$, и числа частиц в начальном состоянии, большем $N > 0.4N_{\rm sph}$, где $E_{\rm sph} \simeq 8$ ТэВ — энергия сфалерона, $N_{\rm sph} \simeq 1.7/\alpha_W$ — число частиц, образующихся при распаде сфалерона.
4. Путем экстраполяции результатов в физически интересную область малого числа частиц, соответствующую двухчастичным столкновениям, получено ограничение на вероятность процессов с нарушением фермионных чисел в электрослабой теории. На основе этих данных сделано заключение, что экспоненциальное подавление вероятности таких процессов присутствует, по крайней мере, до энергии

$30E_{\text{sph}} \simeq 250$ ТэВ.

5. Получена оценка на сечение процессов с нарушением барионного и лептонного чисел в столкновениях при высоких энергиях. Вплоть до энергии сфалерона полученная оценка хорошо воспроизводит существовавшие ранее аналитические результаты, полученные с помощью теории возмущений на инстантонном фоне. При энергии сфалерона поведение сечения радикально меняется, и при дальнейшем росте энергии подавление оказывается существенно сильнее, чем предсказывается аналитическими методами.
6. Получено аналитическое решение граничной задачи для процессов инстантонного типа в теории SU(2) при низких энергиях и числах частиц. Полученные результаты использованы для проверки численных расчетов, а также для подтверждения гипотезы о предельном переходе к двухчастичным столкновениям.
7. Произведен численный квазиклассический анализ процессов многочастичного рождения в теории $\lambda\varphi^4$. Полученные результаты улучшают существующие аналитические ограничения на древесную вероятность многочастичного рождения.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. F. L. Bezrukov, M. V. Libanov, S. V. Troitsky, O(4) symmetric singular solutions and multiparticle cross-sections in ϕ^4 theory at tree level. // –Mod. Phys. Lett. A –1995. –10. –p.2135–2141.
2. Ф. Л. Безруков. Использование классических сингулярных решений для вычисления сечений многочастичных процессов в теории поля. // –ТМФ. –1998. –115. –стр.358–372.

3. F. Bezrukov, C. Rebbi, V. Rubakov, P. Tinyakov. Instanton-Like Processes in Particle Collisions: a Numerical Study of the SU(2)-Higgs Theory below the Sphaleron Energy. // –Proc. XI-th Int. School “Particles and Cosmology”, Baksan valley 2001. –INR Moscow. –2003. –p.248–266.
4. Ф. Л. Безруков, Д. Г. Левков. θ–инстантоны в SU(2) теории с механизмом Хиггса. // направлено в ТМФ –hep-th/0303136.
5. F. Bezrukov, D. Levkov, C. Rebbi, V. Rubakov, P. Tinyakov, Semiclassical study of baryon and lepton number violation in high-energy electroweak collisions. // принято к печати в Phys. Rev. D –hep-ph/0304180.
6. F. Bezrukov, D. Levkov, C. Rebbi, V. Rubakov, P. Tinyakov, Suppression of baryon number violation in electroweak collisions: Numerical results. // направлено в Phys. Lett. B –hep-ph/0305300.