

ОТЗЫВ

официального оппонента Горбунова Дмитрия Сергеевича
на диссертацию Петровой Елены Юрьевны

“Исследование эффективного потенциала хиггсовского сектора минимальной суперсимметрии”,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.04.16 “физика атомного ядра и элементарных частиц”

Несмотря на активное развитие в последние десятилетия различных теоретических идей об устройстве физики за электрослабым масштабом, наиболее предпочтительной остаётся относительно старая гипотеза о суперсимметричном расширении Стандартной модели физики частиц. В рамках этого подхода у каждой частицы предсказывается существование суперпартнёра – частицы со спином, отличающимся на половинку, несущей те же квантовые числа (например, электрический заряд), что и партнёр. При этом удаётся решить одну из фундаментальнейших проблем физики частиц: нестабильность массы хиггсовского бозона относительно квантовых поправок пропадает, поскольку в суперсимметричных теориях такие поправки от партнёров сокращаются с поправками от суперпартнёров. Поиск экспериментальных проявлений суперсимметрии – одна из главных задач экспериментов на Большом адронном коллайдере, постепенно поднимающим энергию столкновения протонов в системе центра масс и увеличивающим интенсивность столкновений – статистику событий. Этим подтверждается актуальность диссертационной работы, связанной с теоретическим анализом Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели (МССМ).

Анализ МССМ сконцентрирован на получении эффективного потенциала хиггсовского сектора. Это новый сектор физики частиц, только открытый для прямого экспериментального исследования, и это второй аргумент в подтверждение актуальности диссертации. Именно с этим сектором сейчас связывают большие надежды на обнаружение проявлений новой физики. Причин здесь несколько: механизм стабилизации массы бозона Хиггса должен работать непосредственно в этом секторе, в минималистических моделях тёмной материи именно через хиггсовский сектор происходит взаимодействие с полями Стандартной модели, модифицированный хиггсовский сектор может обеспечить образование асимметрии между материей и антиматерией (барионную асимметрию) в ранней Вселенной. Таким образом, исследования хиггсовского сектора, в том числе данная работа, являются востребованными в научном сообществе. Полученные в ходе работы над диссертацией результаты могут быть использованы в научных коллективах МГУ, НГУ, ИЯИ РАН, ФИАН, НИЦ КИ, МФТИ, МИФИ, других российских и зарубежных исследовательских организаций, ведущих работы по разработке и изучению моделей новой физики частиц, включая их космологические аспекты. Развитые методы и полученные результаты могут использоваться при анализе и физической интерпретации экспериментальных данных, планировании перспективных новых проектов и исследований в физике элементарных частиц, включая Международный Линейный Коллайдер, Будущий Кольцевой Коллайдер и др.

Представленная диссертация состоит из Введения, трёх глав основного текста с оригинальными результатами, Заключение, трёх приложений с детальными формулами, обсуждаемыми в основном тексте, и списка литературы. Введение посвящено обоснованию актуальности темы

диссертации. Здесь содержится небольшой обзор имеющихся экспериментальных данных о хиггсовском секторе, описание наиболее популярных суперсимметричных обобщений Стандартной модели и их влияния на хиггсовский сектор. Во Введении автор представил очень много информации, и вероятно недостаток места не позволил правильно сформулировать все утверждения. Так указывается что “электрослабый фазовый переход первого рода способен объяснить генерацию ненулевого барионного заряда $(n_B - n_{\bar{B}})/n_\gamma \sim 6 \times 10^{-10}$ ”, однако на самом деле фазовый переход должен быть сильно первого рода, он должен проходить быстро по сравнению со сфалеронными переходами, чтобы асимметрия не замывалась последними. Это накладывает более жёсткие требования на параметры хиггсовского потенциала, чем те, что получаются в работе. Из краткого перечисления проблем Стандартной модели непонятно, в чём проблема фазового перехода первого рода (проблема барионной асимметрии указана отдельным пунктом), в чём проблема смешиваний между поколениями. Во Введении (см. также стр.33) масштаб масс суперпартнёров M_S назван масштабом спонтанного нарушения суперсимметрии, что совсем не так (см. обсуждение моделей спонтанного нарушения суперсимметрии в том же Введении). Параметр X_t не объяснён.

В Первой главе исследуются радиационные поправки к хиггсовскому сектору МССМ. Рассмотрение проводится в максимально общем виде, что позволяет использовать результаты для большинства минимальных суперсимметричных обобщений СМ. Рассматривается три наиболее распространённых подхода: метод эффективного потенциала, диаграммный подход и применение инструментария эффективной теории поля. Подробно обсуждаются точности вычислений, достигнутые в рамках данных подходов, обсуждаются логарифмические и пороговые поправки. Наконец, строится эффективный скалярный потенциал хиггсовского сектора, включающий операторы размерности вплоть до размерности шесть, находится спектр, анализируется вопрос о стабильности вакуума и важности учёта квантовых поправок для правильного предсказания низкоэнергетического спектра по величине модельных параметров и для правильной связи между низкоэнергетическими параметрами теории (наблюдаемыми). Показано, что рассмотренные поправки в некоторых случаях могут существенно изменять область феноменологически разрешённых параметров МССМ. В изложении следовало бы указать, в какой калибровке проводятся вычисления, например, чтобы получить вклад калибровочных бозонов (1.49). При обсуждении хиггсовского сектора с бозонами 30-90 ГэВ следовало бы пояснить реалистичность модели с учётом поисков на LEP2, Тэватроне и БАК.

Во Второй главе диссертации рассматриваются реалистичные суперсимметричные модели, в которых нейтральный скалярный хиггсовский бозон имеет массу 125 ГэВ, и его свойства согласуются с данными измерений на БАК. Это очень важная часть диссертации, иллюстрирующая её актуальность и востребованность в современных теоретических исследованиях и интерпретации экспериментальных данных. Собственно, она позволяет дать ответ на вопрос: а какая область физических наблюдаемых открыта после результатов БАК? а как она связана с фундаментальными параметрами теории? Какие ещё нужно провести измерения, чтобы исследовать наиболее привлекательные области? Здесь замечаний немного. Непояснён термин ДДМ. Местами идёт обсуждение моделей с очень лёгким спектром, например на стр. 59 массы хиггсовских бозонов до 150 ГэВ, следовало бы прокомментировать реалистичность таких сценариев. Аналогичный вопрос встаёт на стр. 71.

В Третьей главе рассматривается скалярный потенциал при ненулевых температурах и с учётом квантовых поправок. Рассматриваются методы описания фазового перехода первого рода, в том числе с приложением к электрослабому переходу. Здесь содержатся результаты оригинальной идеи применения теории катастроф к описанию электрослабого фазового перехода в контексте эффективной двухдублетной хиггсовской модели. Применение нового метода мотивировано сложностью анализа температурной эволюции потенциала в ходе которой и массы частиц, и величины вакуумных средних дублетов, все по-разному изменяются с температурой. В этой части работы следовало бы чётче выделить конкретные полученные результаты. Было бы полезно привести сравнение данных результатов с результатами, известными в литературе, и полученными иными методами. Автор верно указал, что при столкновении пузырей могут рождаться гравитационные волны, но лишь часть (и небольшая) энергии может пойти на это. Не очень понятно применение приближения идеального газа к описанию фазового перехода в Стандартной модели в разделе 3.2 (см. также рис. 3.1), ведь оно здесь не работает. Было бы полезным привести используемые “интегралы обобщённой функции Гурвица”, поскольку (под таким названием) это не очень широко распространённые специальные функции, и тот факт, что один из аргументов функции размерный, а интеграл по безразмерному параметру даёт безразмерный ответ, может поставить в тупик (см. стр. 92).

К работе есть ряд замечаний и вопросов.

- Мне представляется, что именно в этой диссертации следовало бы на конкретных примерах явно указать, какие именно вклады демонстрируют проблему квадратичных расходимостей в ситуации, когда суперпартнёры заметно тяжелее обнаруженного на БАК хиггсовского бозона.
- Во Введении стоило указать более современные измерения констант взаимодействия хиггсовского бозона, полученные при анализе данных при энергии столкновения 13 ТэВ.
- Во Введении на стр.9 указано, что масса бозона Хиггса содержит логарифмические расходимости, подавленные шкалой M_S (то ли масштаб суперпартнёров, то ли масштаб спонтанного нарушения супресимметрии). Хотелось бы понять эту фразу в контексте проблемы квадратичных расходимостей в массе хиггсовского бозона.
- Следовало бы отметить, что при построении эффективной низкоэнергетической теории суперсимметричные модели в ситуации общего положения приводят к операторам с нарушением кварковых ароматов и лептонных чисел, индуцирующих редкие процессы, не наблюдавшиеся в эксперименте. Это накладывает дополнительные ограничения на суперсимметричные модели, сокращая область реалистичных модельных параметров.
- Следовало бы обсудить калибровочную зависимость результатов, полученных в Первой главе различными методами, и их влияние на предсказания спектра масс и других наблюдаемых.
- Хотелось бы пояснить фразу “Обычно предполагается, что основные вклады в поправки на петлевом уровне вносят скварки третьего поколения, а хиггсино, глюино и электрослабые гейджино отщепляются на шкале $M \gg M_S$ ” (стр.34). Даже если неравенство ошибочно,

почему вклады малы, ведь речь в диссертации местами идёт о процентных точностях? Если неравенство верно, то как же определяется M_S , и кто кандидат на роль частиц тёмной материи?

- В начале раздела 2.1 идёт речь о модели, где все скварки, кроме скварков третьего поколения, отщеплены на масштабах много больших M_S . Что означает “отщеплены” в данном контексте? Если они просто очень тяжёлые, как определяется масштаб M_S , и какой механизм нарушения суперсимметрии приводит к такому спектру масс суперпартнёров кварков?
- В каком порядке теории возмущений проведено на стр.69 (см. также Таблицу 7) вычисление сечений рождения хиггсовских бозонов в протон-протонных столкновениях?
- Откуда возникло дополнительное к трём сахаровским условие сохранения величины $(B-L)$ на стр.84 ?
- Стенки пузырей в первичной плазме электрослабой эпохи как правило двигаются со скоростями заметно меньше скорости света (см. стр.86), что обусловлено их трением о плазму взаимодействующих со стенкой частиц.
- Может ли в рассматриваемых моделях реализоваться многоступенчатый (многостадийный) фазовый переход? Если да, то при каких условиях, и как его описывать в рамках оригинального подхода с теорией катастроф?
- На стр.106 рассматривается модель со скалярными топ-кварками и одним скалярным красивым кварком легче 100 ГэВ, причём хиггсино легче. Разве такая модель не закрыта поисками на БАК (двухчастичный распад красивого скварка на кварк и хиггсино)? Аналогичный вопрос про выбор параметров для рис.3.8

Должен отметить, что в диссертации содержится лишь небольшое число опечаток, однако в ряде случаев они существенно изменяют смысл. Так во Введении, вероятно из-за опечатки, написано, что мыслы электрослабых калибровочных бозонов “генерируются кинетическим членом потенциала”, что поставит в тупик незнакомого с хиггсовским механизмом читателя. Также во Введении отклонение от теплового равновесия выполняется за счёт “сфалерона” (см. также стр.84), а корректнее было бы множественное число, или даже “сфалеронных переходов”, там же на стр.9 термин “гейджино” сведён к суперпартнёрам глюонов, что неверно. В тексте используются англицизмы: брэнчинги, гейджино, резюмирование.

Местами предложения составлены крайне неудачно, вплоть до абсурда. Так из Введения (стр.5) можно было бы заключить, что коллайдер ТэВатрон по-прежнему работает. Из текста на стр.10 можно заключить, что хиггсовские бозоны сокращают калибровочные аномалии, индуцированные их суперпартнёрами. На стр.11 указан электрослабый масштаб как масштаб масс суперпартнёров. Вероятно вершиной можно считать перечисление Эйлера среди учёных, предложивших метод эффективного потенциала (стр. 21). Текст на стр.85 о сфалеронных переходах также может поставить в тупик. Решёточные симуляции названы “простым способом непертурбативного изучения системы”. Инстантоны состоят из “мгновенных комков частиц” (стр.86). Фраза

“время больше времени жизни современной Вселенной” в контексте распада нестабильного электрослабого вакуума тоже нелогична.

Многие из указанных замечаний, к сожалению, относятся в равной мере к тексту автореферата.

Сделанные замечания и отмеченные недостатки ни в коей мере не влияют на научную составляющую выполненной работы и общее положительное впечатление от текста диссертации. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Вынесенные на защиту основные положения чётко сформулированы и обоснованы, соответствуют основным результатам, полученным в опубликованных работах автора. Публикации сделаны в ведущих зарубежных и российских журналах, результаты неоднократно докладывались на международных и российских научных конференциях, что подтверждает их оригинальность и повышает их достоверность. Диссертационная работа “Исследование эффективного потенциала хиггсовского сектора минимальной суперсимметрии” соответствует требованиям “Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова”, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Петрова Елена Юрьевна, несомненно заслуживает присуждения искомой учёной степени.

Организация	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук
Почтовый адрес	Проспект 60-летия Октября, д. 7а, Москва, 117312, Россия
Телефон	(499)7839291
Электронная почта	inr@inr.ru

Главный научный сотрудник ИЯИ РАН,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН



Горбунов Дмитрий Сергеевич

Подпись Горбунова Д.С. заверяю:

Учёный секретарь ИЯИ РАН,
кандидат физико-математических наук



Селидовкин Андрей Дмитриевич

