

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.119.01  
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от **03.10. 2019 г. № 9/56**

О присуждении **Невзорову Роману Борисовичу**, гражданину РФ, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Феноменологические аспекты суперсимметричных расширений стандартной модели» по специальности 01.04.02 – теоретическая физика, – принята к защите 16 мая 2019 года, протокол № 7/54 диссертационным советом Д 002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), Министерства науки и высшего образования, 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства образования и науки России № 75/нк от 15 февраля 2013 года.

Соискатель Невзоров Роман Борисович, 1971 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Синглетные скалярные бозоны в стандартной и суперсимметричных моделях» защитил в 2000 году, в диссертационном совете, созданном на базе Государственного научного центра РФ Института теоретической и экспериментальной физики.

Невзоров Р.Б. работает старшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении "Институт теоретической и экспериментальной физики имени А. И. Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт".

Диссертация выполнена в Лаборатории теории элементарных частиц Федерального государственного бюджетного учреждения "Институт теоретической и экспериментальной физики имени А. И. Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт".

Официальные оппоненты:

**1. Горбунов Дмитрий Сергеевич**, доктор физико-математических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, отдел теоретической физики, главный научный сотрудник;

**2. Дубинин Михаил Николаевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, отдел теоретической физики высоких энергий, ведущий научный сотрудник;

**3. Казаков Дмитрий Игоревич**, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория теоретической физики имени Н. Н. Боголюбова, директор;

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное учреждение "Институт физики высоких энергий имени А. А. Логунова Национального исследовательского центра "Курчатовский Институт" (г. Протвино) в своем положительном заключении, составленном Зиновьевым Юрием Михайловичем (доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Отдела теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ); подписанном Петровым Владимиром Алексеевичем (доктор физико-математических наук, начальник Отдела теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ); утвержденном Ивановым Сергеем Владиславовичем (доктор физико-математических наук, академик РАН, директор НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ) указала, что диссертация Невзорова Романа Борисовича «Феноменологические аспекты суперсимметричных расширений стандартной модели» полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, в частности пунктам 9, 10, 11, 13 и 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного

Правительством Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Соискатель имеет 90 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 67 работ, из них опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 36. Работы соискателя, представленные в диссертации, посвящены построению и исследованию расширений стандартной модели (СМ), которые могут приводить к относительно лёгкому бозону Хиггса с массой 125 ГэВ, а также изучению их возможных проявлений в различных экспериментах и космологии. Диссертационная работа основана на результатах, полученных и опубликованных в российских и зарубежных журналах в период 2001 – 2018 г.г.. В соответствующих публикациях упомянутые выше проблемы изучаются в рамках расширений СМ, которые можно рассматривать в качестве низкоэнергетического предела теорий Великого Объединения (ТВО). Соискатель внёс определяющий вклад в каждую из этих работ. Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Nevzorov R.  $E_6$  Inspired SUSY Models with Exact Custodial Symmetry // Phys. Rev. D. 2013. Vol. 87. P. 015029.
2. Nevzorov R. Leptogenesis as an origin of hot dark matter and baryon asymmetry in the  $E_6$  inspired SUSY models // Phys. Lett. B. 2018. Vol. 779. P. 223.
3. Nevzorov R. Quasifixed point scenarios and the Higgs mass in the  $E_6$  inspired supersymmetric models // Phys. Rev. D. 2014. Vol. 89. P. 055010.
4. King S. F., Moretti S., Nevzorov R. Theory and phenomenology of an exceptional supersymmetric standard model // Phys. Rev. D. 2006. Vol. 73. P. 035009.
5. King S. F., Moretti S., Nevzorov R. Exceptional supersymmetric standard model // Phys. Lett. B. 2006. Vol. 634. P. 278.
6. Athron P., King S. F., Miller D. J., Moretti S., Nevzorov R. The Constrained Exceptional Supersymmetric Standard Model // Phys. Rev. D. 2009. Vol. 80. P. 035009.

7. Athron P., Harries D., Nevzorov R., Williams A. G. Dark matter in a constrained  $E_6$  inspired SUSY model // JHEP. 2016. Vol. 1612. P. 128.
8. Miller D. J., Nevzorov R., Zerwas P. M. The Higgs sector of the next-to-minimal supersymmetric standard model // Nucl. Phys. B. 2004. Vol. 681. P. 3.
9. King S. F., Muhlleitner M., Nevzorov R. NMSSM Higgs Benchmarks Near 125 GeV // Nucl. Phys. B. 2012. Vol. 860. P. 207.
10. King S. F., Muhlleitner M., Nevzorov R., Walz K. Discovery Prospects for NMSSM Higgs Bosons at the High-Energy Large Hadron Collider // Phys. Rev. D. 2014. Vol. 90. P. 095014.
11. Nevzorov R., Thomas A. W.  $E_6$  inspired composite Higgs model // Phys. Rev. D. 2015. Vol. 92. P. 075007.
12. Froggatt C., Nevzorov R., Nielsen H. B. On the smallness of the cosmological constant in SUGRA models // Nucl. Phys. B. 2006. Vol. 743. P. 133.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации. В отзывах отмечается, что диссертация представляет собой законченное фундаментальное исследование по актуальной тематике. Все полученные результаты являются новыми. Их **достоверность** не вызывает сомнений. Они неоднократно докладывались автором на различных ключевых международных конференциях, а также на многочисленных семинарах в научных институтах нашей страны и за рубежом. Все полученные результаты чётко обоснованы и изложены в десятках публикаций в российских и зарубежных ведущих научных журналах. Автореферат корректно и полно отражает содержание диссертации. Во всех отзывах сделан вывод о том, что диссертация выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, **Невзоров Роман Борисович**, несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика. В качестве критических замечаний отмечены следующие:

1. Отмечается, что около 15 страниц во Введении отведено на стандартные формулы из учебников, которые можно было бы опустить. Указывается, что

при обсуждении идеи вырожденных вакуумов игнорируется проблема калибровочной иерархии.

2. При рассмотрении суперсимметричных расширений СМ в первой главе предлагается обсудить возможность объяснения указаний экспериментов Большого адронного коллайдера (БАК) на наличие лёгких скалярных резонансов. Отмечено, что заметная доля построений приводит к теоретически или феноменологически неприемлемым моделям в этой главе, что можно было бы опустить. Отмечается, что в рамках многих моделей получены предсказания для проверок на БАК, но в ряде случаев такого рода проверки уже были проведены и было бы полезно проанализировать их результаты. В частности, вызывает сомнения реалистичность моделей с заряженным и аксиальным бозонами Хиггса с массами 250 ГэВ (стр. 110). Отмечается, что модели с легчайшими экзотическими фермионами (см. стр. 138 и стр. 174), имеющими массы много меньше 1 эВ, дают вклад в тёмную радиацию, которая влияет на протекание первичного нуклеосинтеза и формирование анизотропии реликтового излучения. Если такие частицы были в равновесии в первичной плазме, их доля в тёмной радиации слишком велика и такая модель противоречит современным космологическим данным.

3. Обращается внимание на то, что при исследовании моделей составного Хиггса во второй главе не приводится никакого конкретного ограничения на массы дикварков. При изучении бариогенезиса в этих моделях (стр. 216) предлагается оценить влияние возможных обратных процессов и процессов перераспределения в космической плазме на вымывание произведённой асимметрии, а также обсудить возможность проверки такого механизма генерации барионной асимметрии.

4. При рассмотрении расширений СМ с вырожденными вакуумами в третьей главе предлагается обсудить влияние квантовых поправок к вакуумной энергии и массе хиггсовского бозона. Обращается внимание на то, что при исследовании суперсимметричного варианта этих моделей остаётся непонятным, почему константы связи можно считать одинаковыми в обоих вакуумах и какова роль гравитационных поправок. Отмечено, что соответствующие построения представляются нереалистичными. Отмечается,

что модели с глюино (суперпартнёры глюонов), имеющими массу 500–2500 ГэВ, вероятно противоречат результатам поисков этих частиц на БАК. Рекомендуется привести оригинальные ссылки на формулы в Приложении А.

5. Отмечается весьма краткое описание методов вычислений для анализа процессов на БАК. Так при вычислении сечений рождения хиггсовских бозонов и силы соответствующего сигнала в разделе 1.3.2 нет сведений о детальном учёте фоновых процессов, а также отсутствуют глобальные  $\chi^2$  фиты в пространстве параметров моделей, общепринятые в имеющейся литературе, что актуально для анализа рождения и нестандартных распадов бозона Хиггса с массой 125 ГэВ.

6. Обращается внимание на то, что при огромной свободе выбора параметров модели, прежде всего связанных с нарушением суперсимметрии, нарушением группы теории Великого объединения, различных шкал и параметров расширенного хиггсовского сектора, несколько теряется магистральная идея. Иногда не вполне ясно, какие следствия относятся исключительно к конкретной реализации модели, а какие являются общими особенностями объединенной теории.

7. Отмечается, что в рамках каждой из новых моделей, изучавшихся в диссертации, возможны различные сценарии, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. В этой связи предлагается привести в одном месте взвешенный набор наиболее реалистичных сценариев, которые характеризуются различными проявлениями рассматриваемых моделей, такими как новые частицы или нестандартные распады бозона Хиггса. Поскольку модели с вырожденными вакуумами представляют собой относительно новый и не слишком широко известный класс, предлагается описать эти модели более подробно.

8. В контексте рекомендаций, касающихся продолжения поиска новых частиц на БАК (стр. 276) предлагается указать рамки (например, для масс  $Z'$ -бозона и дикварков), после выхода за которые можно было бы считать соответствующие модели закрытыми. С этим же связан непростой вопрос о том, где проходит граница (в случае отсутствия новой физики на ускорителях ближайшего времени), когда нужно менять всю концепцию.

9. Отмечены опечатки, неудачные формулировки и обозначения.

Во всех отзывах отмечается, что приведенные замечания не умаляют значимости представленной диссертации и ни в коей мере не влияют на результаты и ее общую высокую оценку. Отмечается, что текст диссертации написан ясным языком, стилистически безупречен и содержит лишь незначительное количество опечаток. Выбор официальных оппонентов и ведущей организацией обосновывается их высокой научной квалификацией, полученными ими научными результатами мирового уровня и многолетним опытом научных исследований по сходной тематике.

Диссертационный совет отмечает, что совокупность полученных в диссертации результатов можно квалифицировать как научное достижение. Данное заключение основано на анализе выполненных соискателем исследований:

1. Предложено расширение МССМ с дополнительной  $U(1)_N$  калибровочной симметрией ( $E_6$ ССМ), спектр частиц которой включает по крайней мере три простейших представления группы  $E_6$ . В рамках  $E_6$ ССМ исследован процесс генерации барионной асимметрии Вселенной, обусловленный распадами легчайших правосторонних нейтрино и снейтрино, которые не участвуют в калибровочных взаимодействиях. Показано, что благодаря наличию экзотических состояний можно избежать проблемы гравитино. При этом экзотические кварки и скварки в  $E_6$ ССМ представляют собой либо лептокварковые (сценарий А) либо дикварковые (сценарий В) состояния. Рассмотрены возможные проявления экзотических состояний в экспериментах на БАК.
2. Найдены простейшие пятимерные суперсимметричные ТВО, которые могут приводить к сценариям А и В при низких энергиях. Предложена  $E_6$  суперсимметричная модель в шестимерном пространстве, в рамках которой спектр частиц в области низких энергиях отвечает сценарию А.
3. Проведён сравнительный анализ эволюции калибровочных констант взаимодействия в МССМ и  $E_6$ ССМ. Показано, что в случае сценария А точного совпадения калибровочных констант СМ при сверхвысоких энергиях на шкале  $M_X$  можно добиться практически при любых феноменологически

приемлемых значениях  $\alpha_3(M_Z)$ , тогда как в рамках сценария В учёт двухпетлевых поправок разрушает объединение калибровочных констант.

4. Исследованы нарушение  $SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_N$  симметрии и спектр бозонов Хиггса в  $E_6$ ССМ. Показано, что даже в древесном приближении масса легчайшего CP-чётного бозона Хиггса в этой модели может достигать 120-130 ГэВ, а относительные парциальные ширины нестандартных распадов этого хиггсовского состояния могут составлять 10-20%. Отдельно в контексте верхнего ограничения на массу легчайшего хиггсовского скаляра изучен сценарий инфракрасной квазификсированной точки.
5. В рамках  $E_6$ ССМ и МССМ с универсальными параметрами мягкого нарушения суперсимметрии на шкале  $M_X$  проанализированы ограничения на параметры этих моделей. Показано, что в  $E_6$ ССМ, так же как и в МССМ, почти все скалярные частицы имеют массы большие 5 ТэВ и существенно тяжелее глюино, а также легчайших нейтралино и чарджино. Установлено, что в общем случае имеющиеся экспериментальные ограничения на сечение рассеяния частиц тёмной материи на ядрах приводят к весьма жёстким нижним ограничениям на массы суперпартнёров калибровочных бозонов. Тем не менее в  $E_6$ ССМ найдены сценарии с относительно лёгкими глюино, нейтралино и чарджино.
6. Используя двухпетлевые уравнения ренормгруппы, установлены теоретические ограничения на значения юкавских констант при низких энергиях в рамках НМССМ и НМССМ+. Показано, что наиболее естественным образом хиггсовский бозон, который можно отождествить с состоянием, обнаруженным в экспериментах на БАК, можно получить в области параметрического пространства, отвечающей НМССМ (или НМССМ+) с приближённой  $U(1)$  симметрией. В этом пределе исследован спектр бозонов Хиггса и вычислены сечения рождения всех хиггсовских состояний в экспериментах на БАК. Отдельно проанализирован сценарий инфракрасной квазификсированной точки.
7. Предложена шестимерная суперсимметричная модель, в которой нарушение  $E_6$  калибровочной симметрии приводит к модели составного Хиггса ( $E_6$ МСХ) с  $SU(6)$  приближённой глобальной симметрией в секторе, образующем набор

связанных состояний. В рамках  $E_6$ МСХ предложен механизм генерации барионной асимметрии, а также рассмотрены генерация масс фермионов и возможные проявления этой модели в экспериментах на БАК. В частности, исследованы сечение рождения и относительные парциальные ширины распадов нейтрального псевдоголдстоуновского бозона, который образуется в результате нарушения  $SU(6)$  симметрии.

8. В расширении СМ с двумя дублетами Хиггса получены соотношения между параметрами этой модели, которые приводят к набору вырожденных вакуумов на шкале  $\Lambda$ , имеющих примерно такую же плотность энергии, что и физический вакуум. Установлено, что такие вырожденные вакуумы образуются в результате спонтанного нарушения приближённой  $U(1)$  симметрии, которая приводит к подавлению процессов, сопровождающихся нейтральными переходами с изменением аромата в кварковом и лептонном секторах, а также эффектов, связанных с СР нарушением в хиггсовском секторе. В рамках данного расширения СМ с вырожденными вакуумами изучен сценарий инфракрасной квазификсированной точки и исследована зависимость массы легчайшего СР-чётного бозона Хиггса от параметров модели.

9. Предложены СУГРА модели с вырожденными вакуумами, один из которых можно отождествить с физическим вакуумом, а в другом низкоэнергетический предел рассматриваемой теории описывается суперсимметричной моделью в плоском пространстве. Предполагая, что различие в плотностях энергий этих вакуумов пренебрежимо мало, получены оценки для величины космологической постоянной. Получены предсказания данных моделей, которые могут быть проверены в экспериментах на БАК.

**Теоретическая значимость исследования обоснована** многосторонним изучением феноменологических аспектов предложенных моделей, что может быть использовано для их экспериментальной проверки. Используя уравнения ренормгруппы, результаты вычислений диаграмм Фейнмана и различные пакеты программ, изучены возможные проявления в различных экспериментах и космологии нового  $U(1)_N$  расширения МССМ ( $E_6$ ССМ), новой модели составного Хиггса ( $E_6$ МСХ), а также расширений СМ с вырожденными

вакуумами, которые были предложены в работе. Все результаты диссертации являются обоснованными. Результаты анализа различных моделей, представленных в работе, наряду с развитыми методами и подходами их исследования легко обобщаются на другие расширения СМ.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что, как указывается в отзывах, основные результаты диссертации, разработанные методы и подходы, актуальны и востребованы в институтах, занимающихся фундаментальными исследованиями в области физики элементарных частиц как в России, так и за рубежом при исследовании физики за пределами СМ и проектировании новых экспериментов. В частности, полученные двухпетлевые уравнения ренормгруппы могут использоваться в последующих работах при дальнейшем изучении расширений СМ, предложенных в диссертации. Предсказания обобщений СМ, рассмотренных в работе, могут быть проверены в ходе экспериментов на БАК. Таким образом полученные результаты могут помочь в интерпретации экспериментальных данных.

**Оценка достоверности результатов выявила,** что результаты проведённых исследований получены с использованием строгих и апробированных методов квантовой теории поля. В отзывах отмечается, что надёжность и достоверность исследования основывается как на проверенных теоретических подходах к вычислению эволюции параметров модели и вычислению диаграмм Фейнмана для описания эффектов новой физики, так и на пакетах программ для БАК, других коллайдеров и космологических приложений, история развития которых измеряется десятилетиями. Обоснованность результатов подтверждается их сопоставлением с результатами других авторов. Результаты исследований, приведённые в диссертационной работе, получили широкую известность и активно обсуждаются в международном научном сообществе.

**Личный вклад соискателя** состоит в том, что он выдвинул ряд ключевых идей в процессе разработки обобщений СМ, изучаемых в диссертации, и принимал непосредственное участие в развитии методов и подходов их исследования, а также в проведении численного анализа соответствующих моделей. В частности, им были получены двухпетлевые уравнения

ренормгруппы СУСИ расширений СМ, которые рассматриваются в диссертации, и проанализированы эволюция констант взаимодействия и спектр частиц в этих моделях. Вклад Р.Б. Невзорова в постановку задач, формулировку выводов и подготовку к публикации полученных результатов, проводимую совместно с соавторами, был определяющим. Содержание диссертации и положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

На заседании 3 октября 2019 года диссертационный совет принял решение присудить Невзорову Роману Борисовичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **23** человек, из них **6** докторов наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика, участвовавших в заседании, из **30** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали:

за - **23**, против -**нет**, недействительных бюллетеней -**нет**.

Председатель диссертационного совета

Д 002.119.01

академик РАН

\_\_\_\_\_ Рубаков В.А.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

канд. физ.-мат. наук

\_\_\_\_\_ Демидов С.В.

03.10.2019 г.

МП