

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Дубинина Михаила Николаевича на диссертацию Невзорова Романа Борисовича "Феноменологические аспекты суперсимметричных расширений стандартной модели", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 — "теоретическая физика"

В диссертации Р.Б. Невзорова проведено многостороннее исследование суперсимметричных расширений стандартной модели взаимодействий частиц. Хотя убедительных прямых экспериментальных свидетельств существования суперсимметрии в настоящее время не получено, она остается наиболее привлекательной возможностью при поиске ответов на ряд основополагающих вопросов современной физики частиц, прежде всего происхождения калибровочных иерархий масштабов масс (в тексте диссертации - "проблема тонкой настройки" параметров модели), природы темной материи и происхождения темной энергии во Вселенной. Среди множества вариантов суперсимметричного расширения стандартной модели автор наиболее подробно рассматривает $N=1$ суперсимметричные расширения, демонстрирующие объединение калибровочных констант на масштабе теории большого объединения порядка 10^{16} ГэВ, где особо выделяет теорию большого объединения (GUT), основанную на калибровочной группе E_6 . Как известно, в предложенной достаточно давно несуперсимметричной GUT с исключительной группой симметрии E_6 каждое поколение левых фермионов/антифермионов размещается в фундаментальных представлениях размерности 27 с последующим разложением $E_6 \rightarrow SO(10) \rightarrow SU(5)$, содержащим два синглета, нестандартный кварк с зарядом $-1/3$ и пару $SU(2)$ дублетов. В суперсимметричном расширении E_6 скалярные суперпартнеры $SU(2)$ дублетов могут определять два скалярных изодублета минимальной суперсимметричной стандартной модели (МССМ). Суперсимметричная E_6 модель, допускающая большое объединение аналогично МССМ, имеет ряд других привлекательных особенностей, динамическую генерацию μ -члена, отсутствие аномалий, возможности объяснения иерархии масс в секторе фермионов, а также имеет дополнительные симметрии $U(1)$, приводящие к появлению новых нейтральных калибровочных бозонов помимо новых кварков, что могло бы демонстрировать интересную новую физику на масштабе энергий порядка нескольких ТэВ и более, а также нестандартные космологические следствия. Интерес к моделям E_6 в последнее время обусловлен также их естественным возникновением в десятимерной теории струн после компактификации шести измерений в рамках ненарушенной $N=1$ суперсимметрии. Таким образом, **актуальность темы и содержания** диссертационной работы, детально описывающей возможные источники новой физики для коллайдеров ТэВного диапазона энергий, в первую очередь Большого адронного коллайдера (БАК), не вызывает сомнений.

Диссертация включает в себя введение, три главы и заключение, сопровождаемые тремя приложениями. Помимо обоснования актуальности темы диссертации, во введении в педагогическом стиле изложены основы $N=1$ теории суперсимметрии, преобразования суперпространства и суперполей, а также структура инвариантных лагранжианов суперсимметричных моделей и механизмы нарушения суперсимметрии. Введение завершается определениями целей и задач диссертационной работы, описанием используемых методов исследования, обоснованием научной новизны и значимости полученных результатов. Новизна полученных результатов определяется выбором оригинального расширения минимальной суперсимметричной стандартной модели (МССМ), основанном на группе симметрии E_6 (в обозначениях автора $E_6\text{ССМ}$) с дополнительной $U(1)_N$ калибровочной симметрией и дискретной симметрией Z_2 в скалярном секторе.

Первая глава диссертации содержит четыре раздела, в первом из которых обсуждается МССМ и ее популярное расширение, неминимальная МССМ (НМССМ), а также наиболее интересующее автора новое расширение МССМ с дополнительной калибровочной симметрией $U(1)_N$ ($E_6\text{ССМ}$), возникающее в результате нарушения симметрии группы E_6 . Автор подробно рассматривает эволюцию калибровочных констант моделей МССМ и $E_6\text{ССМ}$, используя двухпетлевые уравнения ренормализационной группы. Во втором разделе рассматриваются новые пятимерные и шестимерные модели, приводящие к эффективной модели $E_6\text{ССМ}$ на существенно меньшем масштабе энергий. Показано, калибровочные аномалии сокращаются, а время жизни протона может быть достаточно велико. В третьем разделе содержится анализ нарушения калибровочной симметрии в МССМ, ее простейшем расширении НМССМ и модели $E_6\text{ССМ}$, получены спектры масс бозонов Хиггса для всех рассматриваемых случаев и обсуждается эволюция констант Юкавы, которые в области низких энергий демонстрируют сосредоточение в ограниченных областях (так называемые квазификсированные инфракрасные точки - КИТ). Получены ограничения на массу наиболее легкого бозона Хиггса сверху в области КИТ. Автор вычисляет наиболее существенные для физической программы БАК сечения рождения бозонов Хиггса в приближении рождение \times распад (приближение бесконечно малой ширины) и вероятности нестандартных распадов состояния $h(125 \text{ ГэВ})$ в модели $E_6\text{ССМ}$. В четвертом разделе анализируются другие возможные следствия $E_6\text{ССМ}$, а именно общие ограничения на спектр масс суперпартнеров, массы суперпартнеров фермионов, распады наиболее легкого бозона Хиггса в пары нестандартных фермионов и возможности их обнаружения в экспериментах на БАК. В этом же разделе рассматриваются некоторые новые космологические следствия $E_6\text{ССМ}$, а именно представляющие основной интерес для сравнения с данными наблюдений зависимости плотности темной материи и сечения рассеяния наиболее легкого нейтралино на нуклоне в пространстве параметров модели. Раздел завершается анализом механизма генерации барионной

асимметрии Вселенной вследствие распадов правых нейтрино и их суперпартнеров в МССМ и E_6 ССМ.

Во второй главе автор рассматривает возможность составной структуры бозона Хиггса в рамках новой модели, обладающей (приближенной) симметрией $SU(6)$. Нарушение $SU(6)$ симметрии приводит к симметрии $SU(2) \times SU(3)$ в скалярном секторе в сопровождении скалярного $U(1)$ синглета. Показано, что такой сценарий может быть реализован для низкоэнергетического эффективного предела суперсимметричной модели E_6 в шестимерном пространстве. В этой же главе автор рассматривает возможные феноменологические следствия модели для БАК, а также анализирует нарушение барионного числа в модели E_6 с составным бозоном Хиггса, приводящее к генерации барионной асимметрии Вселенной, по крайней мере для скаляров малой массы, соответствующих фундаментальному представлению группы $SU(3)$.

В главе 3 диссертации рассматривается весьма интересный вопрос о возможных новых следствиях существования вырожденных основных состояний на совершенно разных масштабах энергий в расширениях СМ. Как известно (С.Froggatt, Н.Nielsen, 1996), эффективный потенциал СМ может иметь два вырожденных минимума, один на электрослабом масштабе $m_{W,Z}$ и другой на масштабе порядка массы Планка Λ вследствие эволюции согласно уравнениям ренормгруппы, когда бета-функция и константа четверного взаимодействия в хиггсовском потенциале СМ на масштабе Λ близки к нулю. Последнее обстоятельство чувствительно к массам топ-кварка и бозона Хиггса и имеет место при очень близких к наблюдаемым величинам массе топ-кварка $m_{top} = 173 \pm 5$ ГэВ и массе бозона Хиггса $m_h = 135 \pm 10$ ГэВ. Существование различных фаз с вырожденным основным состоянием известно как "принцип мультикритической точки", которая и соответствует нескольким возможным фазам (или параметрическим наборам модели). Хорошее соответствие m_{top} и m_h для вырожденных основных состояний СМ на масштабах $m_{W,Z}$ и Λ естественным образом приводит к вопросам, есть ли такое соответствие в расширениях СМ. Поскольку возникающий в рамках модели E_6 эффективный двухдублетный хиггсовский потенциал МССМ на масштабе $m_{W,Z}$ представляет собой потенциал общей двухдублетной модели, автором рассматриваются наборы вырожденных основных состояний двухдублетного хиггсовского сектора с наиболее общим перенормируемым потенциалом, определяемым известным набором семи известных безразмерных параметров при членах размерности четыре $\lambda_{1,\dots,7}$. Получен ряд интересных результатов, наиболее ценным из которых представляется связь вырожденных основных состояний с нарушением $U(1)$ симметрии модели, что приводит к подавлению нейтральных токов с нарушением аромата в лептонном и кварковом секторе, а также подавлению эффектов прямого нарушения CP четности в двухдублетном хиггсовском секторе. Отметим, что ограничение пространства параметров двухдублетного хиггсовского сектора МССМ на масштабе $m_{W,Z}$ представляет собой основное содержание почти всех работ по феноменологии МССМ на БАК, вследствие чего полученные автором

результаты представляют большой интерес.

Суммируя вышеупомянутые результаты, заключаем, что диссертация Р.Б.Невзорова представляет собой **выполненное с основным вкладом автора** многокомпонентное исследование нового расширения минимальной суперсимметрии E_6 ССМ с дополнительной $U(1)_N$ калибровочной симметрией и дискретной симметрией Z_2 в скалярном секторе, устраняющей лагранжевы члены быстрого распада протона и нейтральные токи с изменением аромата (FCNC) в секторах кварков и лептонов. В рамках E_6 ССМ изучена генерация барионной асимметрии Вселенной, спектры бозонов Хиггса для случая нарушенной калибровочной симметрии $SU(2) \times U(1)_Y \times U(1)_N$, рассмотрены нестандартные каналы распада состояния $h(125 \text{ ГэВ})$ и другие экспериментальные следствия. Получены пятимерные и шестимерные модели суперсимметричного великого объединения, приводящие к спектру частиц модели E_6 ССМ в низкоэнергетическом пределе. Получены двухпетлевые уравнения ренормализационной группы модели E_6 ССМ и проведен анализ эволюции калибровочных констант, рассмотрены сценарии квазификсированной инфракрасной точки, позволяющие ограничить пространство параметров модели. Получены интересные следствия существования различных фаз расширений СМ с вырожденным основным состоянием.

Надежность и достоверность исследования основывается как на проверенных теоретических подходах к вычислению эволюции параметров моделей (прежде всего на решениях уравнений ренормализационной группы) и вычислению диаграмм Фейнмана для описания эффектов новой физики, так и на пакетах программ для БАК, других коллайдеров и космологических приложений (напр., NMSSMTools, NMHDECAY, micrOMEGAS и др.), история развития которых измеряется десятилетиями. Большая степень **востребованности** полученных автором результатов научным сообществом отражается высокой цитируемостью публикаций автора, среди которых пять статей с индексом цитируемости более 100 (по базе данных INSPIRE) и восемь статей с индексом цитируемости более 50.

Определенным недостатком работы представляется весьма краткое описание методов вычислений для анализа процессов на БАК. В разделах диссертации, где упоминается приближение бесконечно малой ширины для сигнала без учета фоновых реакций, при вычислении сечений рождения хиггсовских бозонов (напр., раздел 1.3.2) и вычислении силы сигнала (напр., формула (1.160)) нет сведений о детальном учете фоновых процессов, а также отсутствуют глобальные χ^2 фиты в пространстве параметров моделей, общепринятые в имеющейся литературе, что актуально для анализа рождения и нестандартных распадов скалярного состояния $h(125 \text{ ГэВ})$.

Подводя итоги и оценивая диссертацию Р.Б. Невзорова в целом, следует заклю-

читать, что она представляет собой актуальную научно-квалификационную работу, выполненную на очень высоком уровне и содержащую многочисленные новые результаты для феноменологии суперсимметричных расширений стандартной модели. Результаты диссертации своевременно опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Диссертация удовлетворяет всем требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением N 842 Правительства РФ от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Невзоров Роман Борисович безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

Доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник
Отдел теоретической физики высоких энергий
Научно-исследовательский институт ядерной физики им.Д.В.Скобельцына
МГУ им.М.В.Ломоносова
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д.1, строение 2
тел. +7 495 9392393
e-mail: dubinin@theory.sinp.msu.ru

Дубинин Михаил Николаевич

“ 17 ” сентября 2019 г.

Подпись д.ф.м.н., в.н.с. М.Н.Дубинина удостоверяю.

Директор НИИЯФ МГУ
профессор

М.И. Панасюк

Дубинин Михаил Николаевич

доктор физико-математических наук (шифр специальности – 01.04.23 «Физика высоких энергий»), ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына

dubinin@theory.sinp.msu.ru

Список основных публикаций оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Dubinin M., Petrova E., Pozdeeva E., Sumin M., Vernov Yu., MSSM inflation and cosmological attractors, *Int. J. Geom. Meth. Mod. Phys.*, 15 (2018) 1840001.
2. Dubinin M., Petrova E., Scenarios with low mass Higgs bosons in the heavy supersymmetry, *Int. J. Mod. Phys. A33* (2018) 1850150.
3. Dubinin M., Petrova E., Pozdeeva E., Sumin M., Vernov Yu., MSSM-inspired multifield inflation, *Journal of High Energy Physics* 1712 (2017) 036.
4. Dubinin M., Petrova E., Heavy supersymmetry with $m_H=125$ GeV in the effective field theory approach, *Phys. Part. Nucl.* 48 (2017) no.5, p.815.
5. Dubinin M., Petrova E., Radiative corrections to Higgs boson masses for the MSSM Higgs potential with dimension-six operators, *Physical Review D* 95 (2017) no.5, p.055021.
6. Дубинин М.Н., Петрова Е.Ю., Упрощенные параметрические сценарии МССМ после открытия бозона Хиггса, *Ядерная физика* 79 (2016) № 4, стр.302.
7. Дубинин М.Н., Петрова Е.Ю., High-temperature Higgs potential of the two-doublet model in catastrophe theory, *ТМФ* 184 (2015) № 2, стр.1170.
8. Boos E., Bunichev M., Dubinin M., Kurihara Y., Expectations for probing the Higgs-fermion and the Higgs-vector boson couplings at the ILC, *Physics Letters B* 739 (2014) p.410.
9. Boos E., Bunichev M., Dubinin M., Kurihara Y., Higgs boson signal at complete tree level in the SM extension by dimension-six operators, *Physical Review D* 89 (2014) no.3, p.035001.