

# О Т З Ы В

официального оппонента кандидата физико–математических наук Невзорова Романа Борисовича

на диссертацию Астапова Константина Олеговича  
« Феноменология суперсимметричных моделей со сголдстино в ускорительных экспериментах », представленную на соискание учёной степени кандидата физико–математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика

Поиск новых физических явлений, которые не описываются Стандартной Моделью (СМ), является одной из ключевых задач физики высоких энергий на современном этапе её развития. Существование «новой физики» не вызывает никаких сомнений. В частности, на наличие в нашей Вселенной существенного количества небарионной тёмной материи, которое не может быть объяснено в рамках СМ, указывают данные многочисленных астрофизических наблюдений. В настоящее время наиболее многообещающим расширением СМ являются суперсимметричные модели. Суперсимметрия, которая предполагает, что фермионы и бозоны объединяются в супермультиплеты, не может быть точной симметрией. Она должна быть нарушена спонтанно, что приводит к появлению безмассового фермиона голдстино, который поглощается гравитино. В диссертации К.О. Астапова рассматривается механизм нарушения суперсимметрии, обусловленный взаимодействием полей минимальной суперсимметричной стандартной модели (МССМ) с полями скрытого сектора посредством супермультиплета голдстино. По существу работа посвящена изучению взаимодействий скалярного суперпартнёра голдстино (сголдстино) с бозонами Хиггса и частицами СМ в суперсимметричном расширении СМ с низким масштабом нарушения суперсимметрии, а также возможных проявлений таких взаимодействий в ускорительных экспериментах.

**Актуальность работы** с одной стороны определяется поисками «новой физики» и изучением свойств бозона Хиггса в экспериментах, которые уже ведутся на Большом адронном коллайдере (БАК) или только планируются в настоящее время. В этой связи К.О. Астаповым был проведён детальный анализ взаимодействий сголдстино с бозонами и фермионами в рамках

МССМ, а также исследованы возможные проявления сголдстино в экспериментах на БАК и проведена оценка чувствительности экспериментов с фиксированной мешенью SHiP и NA64 к моделям с лёгким сголдстино. С другой стороны вклад в плотность энергии вакуума обусловленный механизмом спонтанного нарушения суперсимметрии в моделях с низким масштабом нарушения суперсимметрии на много порядков меньше, чем в моделях, в которых нарушение суперсимметрии происходит при сверхвысоких энергиях. Это позволяет существенно снизить тонкую подстройку параметров, необходимую для получения феноменологически приемлемого значения космологической постоянной. Модели с низким масштабом нарушения суперсимметрии также предполагают, что легчайшей суперсимметричной частицей является гравитино с массой менее  $1\text{эВ}$ , что приводит к весьма интересным предсказаниям, которые могут быть проверены в самое ближайшее время в экспериментах на БАК. Перечисленные выше обстоятельства также стимулируют изучение данного класса моделей.

**Оценка содержания диссертации и её завершенности.** Диссертация состоит из введения, трёх глав основного содержания, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 95 страниц, в том числе 29 рисунков. Список литературы включает 109 наименований.

*Во введении* приводится краткий обзор проблем возникающих в рамках СМ и её суперсимметричных расширений и даётся общая характеристика работы. В частности, обсуждается актуальность проведённых исследований, цели и задачи диссертационной работы, её новизна и практическая значимость, а также положения выносимые на защиту.

В *первой главе* рассматривается взаимодействие супермультиплета голдстино с суперполями МССМ. Приводится выражение для потенциала сектора хиггсовских полей и сголдстино в древесном приближении. Показано, что соответствующее взаимодействие приводит к смешиванию между сголдстино и хиггсовскими бозонами МССМ. Данное смешивание привносит дополнительный положительный вклад в массу Хиггс-подобного состояния. Получены выражения для констант взаимодействия Хиггс-подобного и сголдстино-подобного состояний с частицами СМ. В этом разделе также проведён сравнительный анализ сечений различных каналов рождения и парциальных

ширин распада Хиггс-подобного и сголдстино-подобного состояний с соответствующими наблюдаемыми величинами для бозона Хиггса в СМ. В частности, было установлено, что существует область пространства параметров модели, где присутствие легкого сголдстино-подобного состояния  $\tilde{s}$  может объяснить избыток событий найденный на уровне  $2\sigma$  на LEP в канале  $e^+e^- \rightarrow Z\tilde{s}c\tilde{s} \rightarrow b\bar{b}$  массой примерно 98 ГэВ.

*Вторая глава* посвящена оценке чувствительности недавно предложенного эксперимента высокой интенсивности по поиску скрытых частиц SHiP к лёгкому сголдстино. В этом эксперименте сголдстино могут рождаться как в результате слияния жестких глюонов при столкновении протонов пучка и мишени так и в распадах тяжелых мезонов возникающих при рассеянии протонов. Показано, что мезонный канал рождения доминирует, когда сголдстино существенно легче 4 ГэВ. В данном разделе приведён лагранжиан взаимодействия скалярного и псевдоскалярного сголдстино с частицами СМ. Обсуждаются возможные каналы их распадов. Отдельно рассматриваются случаи, когда константы взаимодействия сголдстино нарушают симметрию аромата. Оказывается, что введение соответствующих параметров приводит к более интенсивному процессу рождения сголдстино в эксперименте SHiP. Кроме того изучаются ограничения на параметры рассматриваемой модели, которые получены исходя из анализа данных эксперимента CHARM.

В *третьей главе* диссертации рассматриваются перспективы поисков лёгкого скалярного сголдстино в эксперименте высокой интенсивности с электронным пучком NA64. При этом предполагается, что сголдстино легче 1 ГэВ. Обсуждаются процессы образования и распада данного состояния. Приведена оценка чувствительности эксперимента NA64 к суперсимметричным расширениям СМ, в которых имеется такое лёгкое сголдстино.

*В заключении* кратко сформулированы основные результаты работы.

Текст диссертации характеризуется завершённостью и полностью отражает положения, выносимые на защиту. Автором выполнен большой объём работы на высоком профессиональном уровне.

### **Научная новизна.**

В диссертационной работе впервые детально исследовано параметрическое пространство сектора сголдстино и суперсимметричного расширения СМ с низким масштабом нарушения суперсимметрии в контексте недавно открытого Хиггс-подобного резонанса с массой 125 ГэВ. Проведён сравнительный анализ сечений различных каналов рождения и парциальных ширин распада Хиггс-подобного и сголдстино-подобного состояний с соответствующими наблюдаемыми для бозона Хиггса в СМ. Изучены процессы рождения лёгких состояний сголдстино, различные каналы их распадов, а также перспективы поиска скалярных и псевдоскалярных сголдстино в недавно предложенных экспериментах высокой интенсивности SHiP и NA64. Также впервые установлены ограничения на параметры суперсимметричного расширения СМ с низким масштабом нарушения суперсимметрии, полученные исходя из анализа данных эксперимента CHARM.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы для определения и дальнейшего уточнения стратегии поиска скалярных и псевдоскалярных сголдстино в экспериментах на БАК, SHiP и NA64.

**Обоснованность и достоверность выводов и заключений** основана на том, что диссертация прошла достаточно серьёзную апробацию. Результаты, полученные К.О. Астаповым, докладывались на трёх научных семинарах в России и одном научном семинаре в Японии, а также были представлены на 5 международных конференциях и 3 международных школах. В основу диссертации легли результаты исследований, опубликованные в 3 статьях, две из которых опубликованы в ведущих международных журналах и хорошо известны специалистам. Это даёт основания полагать, что результаты работы К.О. Астапова успешно прошли независимую научную экспертизу и являются достоверными и достаточно обоснованными.

Тем не менее, хотелось бы сделать несколько замечаний по поводу данной диссертационной работы.

1. Хотя в целом диссертация достаточно ясно написана и хорошо оформлена автору не удалось избежать погрешностей. В тексте встречаются

неизбежные опечатки и ошибки. В частности, в формулах (1.17)-(1.18) и (1.23)-(1.25) что-то не то с размерностью. Более того, в древесном приближении смешивание в секторе псевдоскалярных полей не должно зануляться в пределе, когда  $\tan \beta = 1$ , в то время как из выражения (1.25) следует, что соответствующий матричный элемент в этом пределе стремится к нулю. Следует также отметить, что аналитическое выражение (1.49) для вклада однопетлевых поправок к массе Хиггс-подобного состояния от  $t$ -кварка и его суперпартнеров занижено в 4 раза. Наконец, что-то не то с размерностью в выражении (2.7) для относительной парциальной ширины распада  $B$ -мезона в сголдстино.

2. В первой половине 2017 года руководство CERN одобрило публикацию материалов подготовленных рабочей группой по изучению физики бозона Хиггса на БАК (LHC Higgs Cross Section Working Group Collaboration). Данная рабочая группа объединила в своём составе почти 400 теоретиков и экспериментаторов из многих стран мира. В открытом доступе соответствующий документ появился в конце 2016 года (см. arXiv:1610.07922[hep-ph]). В нём есть разделы посвящённые хиггсовскому сектору суперсимметричных расширений CM. Автору следовало бы сопоставить результаты представленные в arXiv:1610.07922[hep-ph] с результатами изложенными в первой главе и отметить комплементарный характер проведённых исследований.
3. В самом конце первой главы автор упоминает, что рассматриваемая модель может приводить к нестандартным распадам Хиггс-подобного состояния. Данное замечание является исключительно ценным. Автору следовало бы привести хотя бы грубые оценки относительных парциальных ширин экзотических распадов бозона Хиггса.
4. Во второй и третьей главах при оценке чувствительности экспериментов высокой интенсивности SHiP и NA64 к лёгкому сголдстино автор не обсудил теоретические неопределённости связанные с вычислением вероятностей рождения данного состояния в этих экспериментах. У оппонента нет сомнений в достоверности результатов диссертации, однако сведения о погрешностях расчёта следовало привести.
5. В процессе вычисления амплитуды рождения сголдстино в столкновениях пучка электронов со свинцовой мишенью в третьей главе автор пренебрёг взаимодействием сголдстино с атомами мишени. Хотя оппоненту представляется, что часть параметрического пространства, где

такое приближение работает, должно действительно существовать, автору следовало бы указать при каких условиях данным взаимодействием можно пренебречь.

6. В диссертационной работе автор рассматривает массу сголдстино в качестве свободного параметра. Она варьируется от 1 до 100 ГэВ. Однако во всех случаях сголдстино существенно легче суперпартнёров кварков и лептонов. Хотя оппоненту представляется, что реализация такого сценария вполне возможна, автору следовало бы указать возможные механизмы генерации массы такого лёгкого сголдстино.
7. В суперсимметричном расширении СМ с низким масштабом нарушения суперсимметрии, которое изучается в этой диссертационной работе, легчайшей суперсимметричной частицей является гравитино. При этом частица следующая по массе за легчайшей суперсимметричной частицей (СЛСЧ) может быть достаточно долгоживущей. В этой связи было бы интересно обсудить возможное влияние распадов СЛСЧ на процесс нуклеосинтеза.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки работы. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертация К. О. Астапова «Феноменология суперсимметричных моделей со сголдстино в ускорительных экспериментах» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне. В целом, нужно отметить, что диссертация написана ясно, а результаты проведённых исследований соответствуют мировому уровню. Основные результаты диссертации своевременно опубликованы в ведущих научных журналах. Выводы и рекомендации работы достаточно обоснованы. Диссертация К. О. Астапова соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения учёных степеней», утверждённом постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а сам Константин Олегович Астапов, бесспорно, заслуживает присуждения ему учёной степени кандида-

та физико–математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Официальный оппонент

старший научный сотрудник  
лаборатории теории элементарных частиц  
НИЦ «Курчатовский Институт» — ИТЭФ  
кандидат физико–математических наук

Невзоров Р.Б.  
13 декабря 2017 г.

E-mail:nevzorov@itep.ru  
Тел.: +7-916-871-24-88

117218 Россия, г. Москва, улица Большая Черемушkinsкая, д. 25  
Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский Институт» — ИТЭФ)

Подпись Р.Б. Невзорова заверяю

Учёный Секретарь  
НИЦ «Курчатовский Институт» — ИТЭФ  
кандидат физико–математических наук

Васильев В.В.

## Невзоров Роман Борисович

Кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика

Должность: старший научный сотрудник

Место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Лаборатория теории элементарных частиц. 117218 Россия, Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25

Телефон: +7 916-871-2488

E-mail: [nevzorov@itep.ru](mailto:nevzorov@itep.ru)

Список основных публикаций по теме диссертации за последние 5 лет:

1. R. Nevzorov and A. W. Thomas, Baryon asymmetry generation in the E6CHM, Phys. Lett. B **774** (2017) 123;
2. C. D. Froggatt, H. B. Nielsen, R. Nevzorov and A. W. Thomas, Dark Energy Density in SUGRA models and degenerate vacua, Int. J. Mod. Phys. A **32** (2017) 1730013;
3. P. Athron, D. Harries, R. Nevzorov, A. G. Williams, Dark Matter in a Constrained E6 Inspired SUSY Model, JHEP **1612** (2016) 128;
4. R. Nevzorov, A. W. Thomas, LHC signatures of neutral pseudo-Goldstone boson in the E6CHM, J. Phys. G **44** (2017) 075003;
5. S. F. King, R. Nevzorov, 750 GeV Diphoton Resonance from Singlets in an Exceptional Supersymmetric Standard Model, JHEP **1603** (2016) 139;
6. P. Athron, D. Harries, R. Nevzorov, A. G. Williams, E6 Inspired SUSY benchmarks, dark matter relic density and a 125 GeV Higgs, Phys. Lett. B **760** (2016) 19;
7. S. F. King, M. Muhlleitner, R. Nevzorov, K. Walz, Exploring the CP-violating NMSSM: EDM Constraints and Phenomenology, Nucl. Phys. B **901** (2015) 526;
8. R. Nevzorov, A. W. Thomas, E6 inspired composite Higgs model, Phys. Rev. D **92** (2015) 075007;
9. P. Athron, M. Muhlleitner, R. Nevzorov, A. G. Williams, Non-Standard Higgs Decays in U(1) Extensions of the MSSM, JHEP **1501** (2015) 153;
10. S. F. King, M. Muhlleitner, R. Nevzorov, K. Walz, Discovery Prospects for NMSSM Higgs Bosons at the High-Energy Large Hadron Collider, Phys. Rev. D **90** (2014) 095014;
11. C. D. Froggatt, R. Nevzorov, H. B. Nielsen, A. W. Thomas, Cosmological constant in SUGRA models with Planck scale SUSY breaking and degenerate vacua, Phys. Lett. B **737** (2014) 167;
12. R. Nevzorov, Quasi-fixed point scenarios and the Higgs mass in the E6 inspired SUSY models, Phys. Rev. D **89** (2014) 055010;
13. R. Nevzorov, S. Pakvasa, Exotic Higgs decays in the E<sub>6</sub> inspired SUSY models, Phys. Lett. B **728** (2014) 210;
14. S. F. King, M. Muhlleitner, R. Nevzorov, K. Walz, Natural NMSSM Higgs Bosons, Nucl. Phys. B **870** (2013) 323;
15. R. Nevzorov, E6 Inspired SUSY Models with Exact Custodial Symmetry, Phys. Rev. D **87** (2013) 015029.