

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Дубинина Михаила Николаевича
на диссертацию Астапова Константина Олеговича "Феноменология
суперсимметричных моделей со гголдстино в ускорительных экспериментах",
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 01.04.02 — "теоретическая физика"

В диссертации К.О. Астапова рассматривается суперсимметричная модель, содержащая скалярные суперпартнеры голдстоуновского фермиона (голдстино), известные в литературе под названием гголдстино. Расширения стандартной модели (СМ) взаимодействий частиц в рамках суперсимметрии рассматриваются в течение последних более чем тридцати лет, а наиболее популярное расширение СМ, минимальная суперсимметричная стандартная модель (МССМ), является одной из основополагающих теоретических схем, применявшихся для поиска эффектов новой физики на коллайдерах LEP2 (CERN, Женева), HERA (DESY, Гамбург), Tevatron (FNAL, Чикаго) и используемых в настоящее время для моделирования процессов рождения новых частиц на коллайдере БАК (CERN, Женева). Обширные разделы, посвященные МССМ и ее расширениям, содержатся в обоснованиях физических программ будущих коллайдеров HL LHC, ILC, FCC, CEPC, физический потенциал которых всегда соотносится с возможностями открытия суперпартнеров. Модели суперсимметрии представляют также большой интерес для астрофизики и космологии, поскольку содержат отсутствующие в СМ частицы - кандидаты на роль темной материи, допускают фазовые переходы первого рода, необходимые для космологической эволюции, а также включают источники нарушения CP инвариантности, необходимые для генерации барионной асимметрии Вселенной.

Хорошо известно, что голдстоуновский фермион (голдстино) возникает при нарушении суперсимметрии на масштабе \sqrt{F} , который может всего на один-два порядка отличаться от определяемого константой Ферми слабого масштаба $\sqrt{G_F}$ порядка 300 ГэВ. В этом случае гравитино с массой $m_{3/2} \sim F/M_P$ (M_P - масса Планка) порядка 10^{-1} – 10^{-2} эВ ассоциируется с легким голдстино на масштабе энергий современных коллайдеров порядка ТэВ. В случае линейной реализации спонтанно нарушенной суперсимметрии соответствующая эффективная теория должна содержать также суперпартнеры голдстино, обычно обозначаемые как гголдстино. В наиболее простом случае голдстино и гголдстино образуют киральный супермультиплет. Константы связи гголдстино зависят от размерных параметров спонтанного нарушения суперсимметрии в положительных степенях и от масштаба нарушения суперсимметрии в отрицательных степенях, вследствие чего при небольших \sqrt{F} могут появиться возможности экспериментального обнаружения легких гголдстино в экспериментах с

большой светимостью.

Анализ возможных феноменологических следствий моделей такого типа обычно проводится в рамках 4D N=1 МССМ, дополненной киральным суперполем голдстино - сголдстино, являющимся калибровочным синглетом. Если предположить, что кинетический член эффективного лагранжиана факторизуется, явного нарушения CP инвариантности нет (за исключением СКМ), а спонтанное нарушение суперсимметрии определяется одним параметром $\langle F \rangle$ (вакуумное среднее вспомогательного поля, генерируемое в скрытом секторе), то в наиболее простом случае комплексная скалярная компонента кирального супермультиплета включает в себя два сголдстино, CP-четное и CP-нечетное. Анализ еще более упрощается, если предположить, что калибровочная симметрия спонтанно нарушена вакуумными средними хиггсовских изодублетов, смешивание бозонов Хиггса с сголдстино отсутствует, а суперпартнеры лептонов, кварков, скалярных и векторных бозонов достаточно тяжелые и сголдстино в них не распадается. В этом случае для эффективной теории поля МССМ на масштабе $\sqrt{G_F}$ действительная s и мнимая p части скалярной компоненты кирального супермультиплета голдстино-сголдстино являются в хорошем приближении массовыми состояниями, а их взаимодействия с частицами SM γ, g, Z, W^\pm, f представляются в форме произведений сверток тензоров полей SM или спиноров фермионов с CP-четным или CP-нечетным сголдстино.

Диссертация включает в себя введение, три главы и заключение. В первой главе диссертации автор рассматривает возможные следствия смешивания сголдстино с бозонами Хиггса двухдублетного сектора МССМ, основной вклад в которое вносит наблюдаемое CP-четное состояние $h(125.2 \text{ ГэВ})$. Лагранжиан модели, равный сумме суперпотенциала и потенциала Кэлера, определяет вид эффективного потенциала сектора голдстино. Переписывание лагранжиана скалярных полей в компонентах ϕ, h_u, h_d (обозначения для двух последних в (1.6) не определены, что затрудняет восприятие) после перехода в массовый базис МССМ скаляров введением углов смешивания CP- четных массовых состояний h и H , а также угла смешивания $\tan \beta = v_2/v_1$ приводит к недиагональным массовым матрицам 3×3 и 2×2 для CP-четных и CP-состояний, которые можно найти явно, используя предположение о "подстройке третьей производной" потенциала Кэлера (1.10), где появляются не определенные ранее в (1.6) параметры M_1 и M_2 . В пределе отщепления псевдоскаляра A и пределе настройки для углов смешивания $\beta - \alpha = \pi/2$ эти матрицы можно диагонализировать дополнительным ортогональным поворотом в плоскости (h, s) , в результате чего массы состояний расщепляются и масса хиггсо - подобного \tilde{h} увеличивается (соответственно, масса сголдстино - подобного состояния уменьшается). В разделе 1.2.2 выписаны эффективные члены взаимодействия массовых состояний \tilde{h} и \tilde{s} , имеющие упомянутую выше форму, константы связи которой видоизменены

за счет смешивания с состояниями голдстино, зависящими от нового параметра ϑ , угла поворота для (h, s) . Здесь же приводятся однопетлевые эффективные вершины для взаимодействий двух векторных бозонов со скалярами.

Экспериментальные следствия для хиггсо-подобных и голдстино-подобных состояний рассматриваются в разделе 1.3. С этой целью автор фиксирует две многомерные параметрические области, характеризующиеся определенными ограничениями пределов изменения параметров модели. Для вычисления спектра масс и констант связи используется пакет NMSSM Tools "в режиме приближения к МССМ" для сканирования пространства параметров в выделенных областях с целью исключения потенциальных поверхностей, не имеющих локальных минимумов (седлообразные конфигурации), а также включения ограничений на редкие распады. Сканирование выделенных областей с учетом ограничения на массу легкого СР-четного состояния $h(125.2)$ и ограничения на силу сигнала σ/σ_{SM} позволяет выделить предпочтительные параметрические конфигурации, раздел 1.3.2. Наиболее существенные результаты показаны на рис.1.3 и последующих, где для выбранных областей полностью исключены, например, области с небольшими параметрами членов мягкого нарушения суперсимметрии и области больших β , а для приемлемых областей удовлетворяются ограничения на силу сигнала в различных каналах.

Во второй главе диссертации рассматриваются возможности обнаружения голдстино в эксперименте SHiP (Search for hidden particles, эксперимент с выведенным пучком ускорителя SpP S Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН)). Поскольку эффективная энергия для случая выведенного на фиксированную мишень пучка протонов с энергией 400 ГэВ составляет приблизительно 28 ГэВ, реалистичными представляются поиски легкого голдстино, масса которого не превышает нескольких ГэВ. В отличие от сценариев МССМ, рассматривавшихся в главе 1 диссертации, угол смешивания с бозоном Хиггса h мал и поправки к константам связи легкого (намного легче m_h) голдстино с полями СМ вследствие смешивания с h весьма малы. В разделе 2.3.1 диссертации и последующем разделе 2.3.2 получены сечения рождения скалярного и псевдоскалярного голдстино в gg столкновениях в зависимости от масштаба нарушения суперсимметрии \sqrt{F} , а также сечения рождения за счет распадов B -мезонов. В разделе 2.3.3 вычислены парциальные ширины распадов в частицы СМ и далее получены оценки числа событий рождения голдстино в эксперименте SHiP, которые применяются для реконструкции контуров исключения в плоскости $(m_S, 1/\sqrt{F})$, рис 2.5. В разделе 2.3.5 рассмотрен случай недиагональной массовой матрицы суперпартнеров фермионов МССМ, вследствие чего возможны процессы рождения с несохранением ароматов в секторе скварков. Автор учитывает ограничения на параметры мягкого нарушения, полученные из анализа осцилляций мезонов $B^0-\bar{B}^0$ и $D^0-\bar{D}^0$, а также редкого канала распада $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$. В разделе

2.4 получены контуры исключения для псевдоскалярного голдстино в моделях с сохранением четности. Подводя итоги анализа в разделе 2.5 автор приходит к выводу, что эксперимент SHiP обладает высоким потенциалом поиска легкого голдстино, позволяя в то же время существенно расширить исключенные области пространства параметров по сравнению с имеющимися в настоящее время по результатам других исследований.

В главе 3 диссертации рассмотрены возможности поиска легкого голдстино (масса не превышает 1 ГэВ) в экспериментах с выведенным пучком электронов при энергии 100 ГэВ, реализуемые в эксперименте NA64 Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН). В этом случае смешивание с бозоном Хиггса также очень мало, рассматриваются только диаграммы с излучением голдстино из линии электрона и слиянием фотонов в голдстино (рис.3.2). Полученные контуры исключения на плоскости $(m_{S,1}/\sqrt{F})$ сильно отличаются от контуров главы 2, позволяя исследовать область масс не более 0.1 ГэВ для масштаба нарушения суперсимметрии не более нескольких десятков ГэВ.

Таким образом, диссертация представляет собой многостороннее исследование возможностей регистрации голдстино на БАК ЦЕРН и в двух экспериментах ЦЕРН с выведенным пучком в рамках расширенной дополнительной киральной мультиплетом голдстино - голдстино минимальной суперсимметричной стандартной модели (MSSM), феноменологические следствия которой учитывают возможность смешивания в скалярном секторе. Надежность и достоверность результатов основывается на проверенных теоретических подходах к идентификации эффектов новой физики в экспериментах с фиксированной мишенью и со встречными пучками.

Определенным недостатком работы представляется отсутствие детального сравнения проведенного анализа с работами других авторов, в которых рассматриваются аналогичные модели суперсимметрии. Нет в наличии оригинального интегрированного пакета программ для расчета процессов рождения, что вынуждает автора пользоваться сторонними пакетами программ в специфических режимах, достоверность которых не описана (например, упомянутый в главе 1 пакет NMSSM Tools, по выражению автора, "в режиме обычной NMSSM" без нейтрально LSP, см. стр. 29). Следует отметить многочисленные дефекты оформления диссертации, затрудняющие восприятие материала. В первую очередь к ним относится отсутствие объяснений обозначений в формулах (например, обозначение параметров мягкого нарушения на стр.28 почему-то объясняется на стр.54, и др.), а также несогласованные обозначения (например, для хиггсовских изодублетов на стр.21 и др.). Опечатки имеются также и в автореферате.

Оценивая диссертацию в целом, следует заключить, что она представляет собой

актуальную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком уровне. На основе расширенной модели минимальной суперсимметрии получены новые результаты, детально описывающие возможности открытия сглюконинов в экспериментах SHiP и NA64 Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН) и его проявления на БАК. Результаты диссертации своевременно опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Диссертация удовлетворяет всем требованиям 'Положения о порядке присуждения ученых степеней', утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 N 842, а ее автор Астапов Константин Олегович несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата 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

13 декабря 2017 г.

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

Зам.директора НИИЯФ МГУ
профессор

В.И. Саврин

Дубинин Михаил Николаевич

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.23 — физика высоких энергий
Должность: ведущий научный сотрудник

Место работы: Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

Телефон: +7 (495) 9392393

E-mail: dubinin@theory.sinp.msu.ru

Список основных публикаций по теме диссертации за последние 5 лет:

1. 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
2. Boos E., Bunichev M., Dubinin M., Kurihara Y., Expectations for probing the Higgs-fermion and the Higgs-vector boson couplings at the ILC, Boos E., Bunichev M., Dubinin M., Kurihara Y., *Physics Letters B* 739 (2014), p.410
3. Дубинин М.Н., Петрова Е.Ю., High-temperature Higgs potential of the two-doublet model in catastrophe theory, *ТМФ* 184 (2015) № 2, стр.1170
4. Дубинин М.Н., Петрова Е.Ю., Упрощенные параметрические сценарии МССМ после открытия бозона Хиггса, *Ядерная физика* 79 (2016) № 4, стр.302
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. 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
7. Dubinin M., Petrova E., MSSM-inspired multifield inflation, *Physical Review D* 89 (2014) 3, p.035001-1