

На правах рукописи

Горбунов Дмитрий Сергеевич

**Возможные проявления новой
физики частиц
в космологии и ускорительных
экспериментах**

01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

*диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук*

Москва 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН

М. И. Высоцкий (ИТЭФ)

доктор физико-математических наук

Д. И. Казаков (ОИЯИ)

доктор физико-математических наук

К. А. Постнов (ГАИШ)

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт ядерной физики им.

Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им.

М. В. Ломоносова

Защита диссертации состоится _____ 27 мая 2013 г.

в 12 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.023.02
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук по адресу:
119991 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Автореферат разослан _____

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 002.023.02

доктор физико-математических наук

Я. Н. Истомин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Физика элементарных частиц предназначена в первую очередь для описания физических процессов на расстояниях порядка и меньше атомного масштаба 10^{-8} см. В решении этой задачи достигнут значительный прогресс. В результате скрупулёзного анализа большого набора экспериментальных данных была построена Стандартная модель физики элементарных частиц (СМ). На момент написания диссертации все частицы, предсказываемые в рамках СМ, кроме одной (хиггсовский бозон), обнаружены экспериментально. Более того, получены данные экспериментов ATLAS и CMS, работающих на Большом адронном коллайдере (далее LHC), которые можно интерпретировать как подтверждение существования бозона Хиггса. Из всех взаимодействий, описываемых СМ, лишь взаимодействия хиггсовского бозона пока не получили прямого экспериментального подтверждения. Определённую роль в решении этой проблемы должны сыграть исследования на LHC.

Современные эксперименты позволяют напрямую исследовать взаимодействия между частицами на малых расстояниях вплоть до 10^{-16} см. Все имеющиеся наблюдения согласуются с предсказаниями СМ, за исключением нейтринного сектора. В рамках СМ нейтрино — безмассовые фермионы, участвующие лишь в слабых процессах. В многочисленных экспериментах с так называемыми солнечными нейтрино, атмосферными (анти)нейтрино, реакторными антинейтрино, ускорительными (анти)нейтрино надёжно установлен факт перехода (анти)нейтрино одного поколения (или аромата) в (анти)нейтрино других поколений (ароматов) СМ. При этом происходит нарушение лептонных квантовых чисел,

сохраняющихся в СМ.

Переходы можно объяснить, предположив наличие масс у нейтринных компонент. Линейные комбинации нейтрино разных ароматов образуют массовые состояния, причём в случае общего положения ароматный и массовый базисы не являются сонаправленными, что и обеспечивает переходы между нейтрино разных ароматов. Этого нельзя обеспечить в рамках СМ, и наблюдаемые нейтринные переходы (осцилляции) являются прямым экспериментальным указанием на неполноту СМ.

Другие важные феноменологические указания на неполноту СМ следуют из анализа астрофизических и космологических данных. Одно из указаний связано с таким парадоксом. В окружающем мире мы наблюдаем барионное вещество (водород, гелий, другие химические элементы) без всяких признаков макроскопического количества антивещества (антибарионов) где-либо в видимой части Вселенной; в то же время в СМ взаимодействия симметричны относительно барионного заряда, и в современной Вселенной нет процессов, приводящих к генерации *барионной асимметрии*. Количественно барионную асимметрию характеризует барион-фотонное отношение η_B — отношение плотностей числа барионов n_B и реликтовых фотонов n_γ , современное значение которой равно

$$\eta_B = \frac{n_B}{n_\gamma} = 6.1 \times 10^{-10} . \quad (1)$$

Значит, в ранней Вселенной на каком-то этапе должны были рождаться барионы.

В рамках общей теории относительности (ОТО), описывающей гравитационные взаимодействия, Вселенная расширяется в соответствии с уравнениями Эйнштейна. Источником гравитации является материя, со-

стоящая из частиц СМ. Механизмов генерации необходимого количества барионной асимметрии (1) при стандартных гравитации (ОТО) и физики частиц (СМ) не найдено. Следовательно, для объяснения *барионной асимметрии Вселенной* требуется модификация стандартной физики. Если не обсуждать возможность специального выбора начальных условий во Вселенной, то здесь требуется именно модификация физики частиц. Представляется замечательным, что анализ состава такого макроскопического объекта как Вселенная в целом требует модификации микрофизики — физики частиц.

Другая феноменологическая проблема астрофизики и космологии, которую не удаётся разрешить в рамках стандартного подхода, базирующегося на ОТО и СМ, это явление *тёмной материи*. Оно весьма многогранно, и не может быть объяснено одним лишь выбором начальных условий в ранней Вселенной. В то же время, это явление могло бы быть обусловлено модифицированной (по сравнению с ОТО) гравитацией, поскольку именно недостаток гравитационных сил в различных физических системах и составляет на самом деле суть проблемы. В рамках ОТО источником гравитационных сил выступает материя, и замечательным представляется то, что один и тот же с точки зрения гравитации тип материи (пыль), притом естественный с точки зрения физики частиц (пылевидную компоненту могут образовать стабильные нерелятивистские частицы), обеспечивает в каждой из “проблемных” физических систем недостающие гравитационные силы. Важно, что физические системы существенно разнотипны. Это укрепляет уверенность в том, что именно физика частиц ответственна за явление тёмной материи.

Анализ космологических данных указывает на присутствие тёмной

материи во Вселенной по крайней мере начиная с эпохи, когда температура электромагнитной компоненты плазмы была порядка 1 эВ, а вероятнее всего, эта компонента появилась во Вселенной значительно раньше. Относительные вклады тёмной и барионной материи в современную плотность энергии Вселенной составляют

$$\Omega_{DM} \simeq 0.22 \quad \text{и} \quad \Omega_B \simeq 0.045, \quad (2)$$

соответственно, так что тёмной материи по массе примерно в пять раз больше, чем барионов. Объяснение явления тёмной материи в рамках физики частиц требует модификации СМ: а именно, добавления новых полей (по крайней мере одного!) к уже имеющимся в СМ. Для обеспечения стабильности частиц тёмной материи на космологическом масштабе времени, вероятно, также требуется введение нового (почти) сохраняющегося квантового числа. Отметим вновь замечательную связь физики на сверхбольших и сверхмалых расстояниях: для объяснения процессов на галактических и даже космологических пространственных масштабах требуется модифицировать физику частиц — физику микромира.

Обсуждавшиеся выше три проблемы являются общепризнанными феноменологическими проблемами физики частиц, для решения которых необходимо модифицировать СМ. Понятно, что вариантов модификаций может быть предложено множество, и, вообще говоря, они должны удовлетворять лишь двум критериям: решать три проблемы и не противоречить имеющимся экспериментальным данным. Однако, следуя призыву У. Оккама “не привлекать новые сущности без самой крайней на то необходимости”, можно остановить свой выбор на моделях, которые используют “минимум модификаций” (новых полей, взаимодействий и т.п.) для решения всех трёх проблем. В защиту такого подхода можно

(хотя это и не совсем корректно) привести факт отсутствия каких-либо прямых указаний на неполноту СМ (помимо осцилляций нейтрино). Опыт “моделестроительства” показывает, что модификации с большим количеством новых взаимодействий и полей легко входят в противоречие с имеющимися экспериментальными данными. Чтобы их избежать, требуется вводить новые поля, взаимодействия, симметрии, не имеющие никакого отношения к решению трёх вышеозначенных феноменологических проблем, но способных сократить, компенсировать вклад “новой физики” в наблюдаемые, которого, судя по экспериментальным данным, нет. Отдельно, как мотивацию для попыток найти единый механизм решения космологических проблем можно предъявить факт совпадения (по порядку величины) современных вкладов в плотность массы материи от видимой компоненты (барионы) и невидимой компоненты (тёмная материя), см. (2).

В космологии имеется ещё ряд специфических проблем, для решения которых, по-видимому, требуется нестандартная физика. Речь идёт о так называемых проблемах теории горячего Большого взрыва. По сути это *проблемы начальных данных* горячей (радиационно-доминированной) стадии эволюции Вселенной: отсутствие механизма генерации в ранней Вселенной первичных неоднородностей материи, проблема начальной сингулярности, проблема энтропии (отсутствие источника большой энтропии Вселенной), проблема горизонта (проблема однородности Вселенной на больших масштабах), проблема кривизны (проблема плоскостности Вселенной). Эти проблемы элегантно решаются в рамках гипотезы о предшествовавшем горячей стадии почти экспоненциальном расширении Вселенной — *инфляции*. Реализации инфляции в рамках стан-

дартных взаимодействий физики частиц и гравитации не предъявлено. В простейших реалистичных моделях инфляция обеспечивается специфической динамикой одного доминирующего в ту эпоху во Вселенной скалярного поля — *инфлатона*. Его появление требует модификации СМ и/или ОТО.

Помимо феноменологических проблем у СМ есть и проблемы сугубо теоретического характера, решение которых, как правило, также требует её модификации. Среди таких проблем в первую очередь следует назвать проблему неустойчивости иерархии энергетических масштабов относительно квантовых поправок. Конкретно, в СМ однопетлевой вклад в квадрат массы хиггсовского бозона, обусловленный юкавским взаимодействием с фермионами СМ, расходится квадратично по величине петлевого импульса. При физической регуляризации теории для сохранения масштаба массы Хиггса требуется произвести подгонку параметров “древесного” лагранжиана с очень высокой точностью, определяемой отношением квадратов физической массы хиггсовского бозона к квадрату энергетического масштаба, на котором производится регуляризация теории. Такая ситуация представляется крайне неприемлемой. Имеющиеся в СМ феноменологические проблемы (нейтринные осцилляции, тёмная материя, барионная асимметрия Вселенной) требуют её модификации, а потому, вообще говоря, введения в теорию нового энергетического масштаба соответствующей новой физики. Тогда вопрос о подгонке параметров встаёт именно на этом масштабе, и чем он выше электрослабой шкалы, тем острее. Это обстоятельство традиционно интерпретируют как теоретическое (модельное в рамках теории поля) указание на новую физику сразу за электрослабым масштабом или несколько выше. По сути

эта физика должна обеспечить сокращение неприемлемых квадратично расходящихся вкладов на близком к электрослабому энергетическом масштабе и тем избавить от подгонки параметров.

Наиболее популярной реализацией этой идеи являются суперсимметричные обобщения СМ. Суперсимметрия — симметрия между бозонами и фермионами — чудесным образом обеспечивает нужный эффект. А именно: квантовые поправки от бозонов и фермионов оказываются в точности равными по величине, но противоположного знака, так что в сумме дают нуль. Замечательно, что суперсимметричные модели оказываются интересными и для других аспектов физики частиц. Так в широком классе моделей (модели с так называемой *R-чётностью*) легчайший суперпартнёр частиц СМ (*R-нечётен* и потому) оказывается стабильным. Если он электрически нейтрален — это подходящий кандидат на роль тёмной материи. Суперсимметричные модели реализуют и различные механизмы генерации барионной асимметрии в ранней Вселенной.

К сожалению, суперсимметричные обобщения СМ сталкиваются с серьёзными трудностями при объяснении многочисленных экспериментальных результатов физики кварковых ароматов: все наблюдаемые распады мезонов и барионов происходят в согласии с предсказаниями СМ, и это при том что квантовые поправки от суперпартнёров в ряде случаев должны доминировать. Это обстоятельство также естественным образом приводит к требованию минимальности в смысле феноменологических проявлений при отборе суперсимметричных обобщений СМ.

Подводя итог, можем заключить, что построение минимальных, феноменологически приемлемых обобщений СМ, позволяющих одновременно решить все или многие из вышеуказанных проблем, является од-

ной из важнейших задач современной физики.

Цель диссертации состоит в разработке минималистического подхода к расширению Стандартной модели физики частиц, необходимому для объяснения нейтринных осцилляций, барионной асимметрии Вселенной, явления тёмной материи, проблем космологической теории Горячего большого взрыва; в построении конкретных теоретико-полевых моделей и изучении их космологических и феноменологических следствий.

Научная новизна и практическая ценность.

- Впервые предложены способы прямой экспериментальной проверки сектора двух тяжёлых нейтрино модели νMSM , отвечающего за появление масс активных нейтрино и генерацию барионной асимметрии в ранней Вселенной. Полученные оценки максимальных и минимальных сигналов в распадах мезонов, в экспериментах с пучком на мишени инициировали поиск стерильных нейтрино в экспериментах E949 и Belle. Поиск стерильных нейтрино включён в список перспективных задач эксперимента LHCb, проектов NuSOng, HiResM ν , LBNE. Предложен новый специальный эксперимент с целью полной проверки модели для масс нейтрино менее 2 ГэВ. Идёт активное обсуждение вариантов его реализации на базе CERN.
- Впервые изучен механизм разогрева Вселенной в модели инфляции на поле Хиггса SM. Полученная оценка температуры разогрева позволила уточнить предсказания модели для величин космологических параметров. В частности, это даёт возможность отличить данную модель от близкой по инфляционной динамике модели Старобинского, ориентируясь на чувствительности таких экспериментов, как PLANCK и CMBPol.

- Для перенормируемой модели хаотической инфляции впервые предложен реалистичный способ её прямой проверки в лабораторных экспериментах. Специфическое модельное предсказание для ускорительных экспериментов — появление пары мюон-антимюон на некотором удалении от точки столкновения — рассматривается как новый тип сигнала для физических программ BelleII, LHCb, перспективных экспериментов в CERN.
- Подробно исследована феноменология суперсимметричных обобщений CM с лёгкими гюлдстино. Впервые рассмотрены соответствующие процессы с нарушением ароматов кварков и лептонов. Замечательно, что константы взаимодействия гюлдстино с частицами CM обратно пропорциональны квадрату энергетического масштаба нарушения суперсимметрии в полной теории. Таким образом, эксперименты по поиску гюлдстино дают уникальную возможность исследовать масштаб нарушения суперсимметрии. Интересно, что аномальные события в эксперименте HiggsCP могут быть объяснены как проявление лёгкого гюлдстино. Поиски гюлдстино проводились в экспериментах E391a, E799, ISTRA+, Belle, LHCb, и планируются с новой статистикой в экспериментах LHCb и BelleII.
- Методы и подходы, разработанные в диссертации, актуальны и востребованы в организациях, занимающихся фундаментальными исследованиями в области теоретической физики, физики высоких энергий и астрофизики, в том числе в ИЯИ РАН, ФИАН, ИТЭФ, НИИЯФ МГУ, ОИЯИ, ИФВЭ, ИКИ, МГУ им. М.В.Ломоносова, ГАИШ МГУ, а также за рубежом.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. В модели ν MSM предложены способы прямой экспериментальной проверки сектора двух тяжёлых нейтрино, отвечающих за появление масс активных нейтрино (механизм качелей) и генерацию барионной асимметрии Вселенной. Для масс нейтрино менее 5 ГэВ вычислены верхние и нижние ограничения для ширин двух- и трёх-частичных распадов мезонов и τ -лептонов. Сделаны оценки максимального и минимального сигнала от распадов стерильных нейтрино, рождённых в эксперименте на мишени для работающих интенсивных пучков высокоэнергетичных протонов.
2. Исследован механизм разогрева Вселенной в модели инфляции на поле Хиггса Стандартной модели. Получена оценка для величины температуры разогрева.
3. Предложен механизм генерации барионной асимметрии в модели с инфляцией на поле Хиггса Стандартной модели.
4. Предложен реалистичный способ прямой и полной экспериментальной проверки перенормируемой модели хаотической инфляции с четвертичным самодействием и разогревом через связь квадрата поля инфлатона с квадратом хиггсовского дублета, в которой инфлатон может быть легче 2 ГэВ.
5. В инфляционной модели Старобинского предложен механизм гравитационного рождения частиц тёмной материи и тяжёлых стерильных нейтрино, чей распад сопровождается появлением лептонной асимметрии. Вычислены величины масс частиц тёмной материи и тяжёлых лептонов, при которых проблемы тёмной материи,

нейтринных осцилляций и барионной асимметрии оказываются решёнными одновременно.

6. В моделях с низкоэнергетическим нарушением суперсимметрии исследована феноменология лёгких сголдстино. Предложены различные способы прямого поиска этих частиц. Из существующих экспериментальных данных получены ограничения на масштаб нарушения суперсимметрии в этих моделях.
7. Найден класс суперсимметричных обобщений Стандартной модели, допускающий лёгкое гравитино в качестве тёплой тёмной материи.
8. Предложена модификация минимального суперсимметричного обобщения Стандартной модели с расщеплённым спектром суперпартнёров и дополнительным скаляром, допускающая электрослабый бариогенезис и естественным образом включающая тёмную материю. В модели получены предсказания для величин электрических дипольных моментов нейтрона и электрона, позволяющие проверить механизм генерации барионной асимметрии.

Апробация диссертации. Основные результаты, полученные в диссертации, неоднократно докладывались автором на научных семинарах Института ядерных исследований РАН, Свободного университета Брюсселя, Института теоретической физики Лозаннского политехнического института, Института Нильса Бора в Копенгагене, Стокгольмского университета Альба-Нова, Института теоретической физики Анси, Центра астрофизики и космологии парижского университета, Объединённого института ядерных исследований, Физического института им. П. Н. Лебедева, Института теоретической и эксперимен-

тальной физики им. А. И. Алиханова, Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ, Института космических исследований РАН, Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга МГУ, Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН; на международных семинарах “Кварки–2004” (Пушкинские горы), “Кварки–2008” (Сергиев Посад), “Кварки–2010” (Коломна), “Кварки–2012” (Ярославль), на международных конференциях “QFTNER-2001” (Тверь), “QFTNER-2011” (Сочи), на Гинзбургской конференции по физике (Москва 2012), на международных конференциях “SUSY-2001” (Дубна), “ $e^+ - e^-$ -столкновения от ϕ до ψ ” (2006, Новосибирск), “Физика на Тевных коллайдерах” (Лез Уш, 2001), “Встречи в Морионе (Электрослабые взаимодействия и Объединённые теории)” (Лез Арк, 2002), “Встречи во Вьетнаме (новые взгляды на физику частиц)” (Ханой, 2004), “Каонс-2007” (Фраскати), “SCALARS-2011” (Варшава), “Нарушение барионного и лептонных чисел” (Гатлинбург, 2011), Юкавском международном семинаре “Гравитация и космология” (Киото, 2010), испано-российском семинаре “Физика частиц, ядерная физика и астрофизика” (Барселона, 2011), “Гравитация, астрофизика и космология” (Куи-Нон, 2011), “Актуальные темы современной космологии” (Каржез, 2012), на открытых Совещаниях CMS по перспективам физики частиц на Большом адронном коллайдере (Алушта 2010, 2011), на открытом совещании по перспективам физики на новых В-фабриках (Цукуба, 2010), на совещаниях по физике на ЛНСб (Женева, 2011, Москва, 2012), на Ломоносовских международных конференциях по физике элементарных частиц (Москва 2011, 2009), на Всероссийском совещании по прецизионной физике и фундаментальным физическим константам (Дубна,

2011), использованы в курсах лекций, прочитанных автором на международных Школах современной теоретической физики DIAS (Дубна, 2007, 2008, 2010), на зимних школах Петербургского института ядерной физики (Роцино 2010, 2011, 2012), на международной байкальской летней школе ОИЯИ-ИГУ (Большие коты, 2012), а также в различных научно-популярных лекциях.

Публикации и личный вклад автора. По результатам диссертации опубликовано 15 работ. Список работ приведён в конце автореферата. Вклад автора в полученные результаты является определяющим.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из Введения, двух глав основного текста и Заключения. Общий объём диссертации 281 страницы. Диссертация содержит 24 рисунка, 4 таблицы и список литературы из 281 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении раскрывается общий круг проблем, составляющих тему диссертации. Обозначаются используемые подходы, обсуждаются найденные конкретные решения и способы их экспериментальной проверки. Приводится содержание диссертации и информация о том, где она прошла апробацию.

В Главе 1 рассмотрены обобщения СМ, претендующие на феноменологическую полноту. А именно, в них находят своё объяснение явления нейтринных осцилляций, тёмной материи, барионной асимметрии Вселенной, и реализуется ранняя инфляционная стадия развития Вселенной.

В § 1 рассматривается пример перенормируемого обобщения СМ, построенного по принципу “снизу-вверх”: стартуя с *минимального по числу*

новых полей и взаимодействий решения загадки нейтринных осцилляций, величины новых параметров *подстраиваются* таким образом, чтобы с тем же набором полей решить и две другие, космологические проблемы (явление тёмной материи и барионная асимметрия Вселенной). Оказывается, это можно сделать, причём в *теоретически наиболее предпочтительном варианте*: когда все новые частицы оказываются ниже электрослабого масштаба и нет усугубления проблемы иерархии масштабов. Замечательно, что этот же вариант является *наиболее предпочтительным и с феноменологической стороны*: новые частицы можно напрямую исследовать в ускорительных экспериментах. Редкой особенностью данной модели является реалистичная перспектива экспериментально исследовать всю область пространства модельных параметров для ситуации, когда масштаб масс новых частиц не превышает нескольких ГэВ.

Речь идёт о модели, получившей в литературе название ν MSM (минимальное нейтринное расширение SM), где к составу полей SM добавляется три новых майорановских фермиона — синглеты по калибровочной группе SM. Для них можно ввести единственное перенормируемое взаимодействие с полями SM: юкавского типа связь с хиггсовским полем и лептонным дублетом. При этом, поскольку лептонный дублет имеет левую киральность, новые фермионы в этом взаимодействии оказываются правыми. Модель описана в разделе 1.1. После спонтанного нарушения электрослабой симметрии это юкавское взаимодействие приводит к смешиванию на квадратичном уровне между активными нейтрино и стерильными фермионами, поэтому фермионы называют *стерильными нейтрино*. После диагонализации в секторе нейтрино активные нейтри-

но приобретают массы, а их ароматные состояния (состояния в калибровочном базисе) смешиваются между собой, что и нужно для описания нейтринных осцилляций. При этом далеко не все модельные параметры (массы стерильных нейтрино и юкавские константы связи) фиксируются. Оставшиеся можно подобрать так, что легчайшее стерильное нейтрино будет стабильно на космологических временных масштабах и составит тёмную материю. Два других стерильных нейтрино обеспечивают генерацию лептонной асимметрии до электрослабого фазового перехода, так что сфалеронные переходы перерабатывают её в барионную асимметрию. Кроме того, в минимальной модели, сгенерированная уже после электрослабого фазового перехода лептонная асимметрия способствует неравновесному рождению лёгких стерильных нейтрино, составляющих тёмную материю. Массы тяжёлых стерильных нейтрино при этом оказываются ниже электрослабой шкалы, так что кинематически есть возможность рождения новых частиц и их непосредственного изучения в ускорительных экспериментах. Существующие ограничения из лабораторных исследований приведены в разделе 1.2. Учитывая малость юкавских констант связи, практический интерес представляет ситуация, когда эти массы не превышают нескольких ГэВ. Такие стерильные нейтрино будут рождаться в редких (слабых) распадах тяжёлых мезонов и барионов, обсуждаемых в разделе 1.4. Поиск таких распадов — один из способов обнаружить стерильные нейтрино. Другой вариант — поиск (слабых) распадов самих стерильных нейтрино в частицы SM, происходящих из-за смешивания с активными нейтрино. Распадам стерильных нейтрино посвящён раздел 1.3. При данной массе стерильных нейтрино величины юкавских констант (или углы смешивания с активными

нейтрино) ограничены сверху (из требования неравновесности процессов со стерильными нейтрино в первичной плазме) и снизу (из требования обеспечить необходимый масштаб масс активных нейтрино), так что и парциальные ширины распада мезонов на стерильные нейтрино и время жизни стерильных нейтрино ограничены сверху и снизу. Это открывает возможность *полностью проверить предсказания данной модели*, претендующей на феноменологическую полноту и теоретическую самоогласованность. Получению этих предсказаний и построению стратегии экспериментальной проверки модели посвящён раздел 1.5.

В § 2 рассматривается пример построения обобщения СМ по принципу “сверху-вниз”: стартуя с инфляционной модели, призванной описать динамику развития Вселенной на стадии самых высоких плотностей энергии, постепенно приходим к низкоэнергетической физике электрослабого масштаба. Феноменология здесь пополняется новой частицей — лёгким инфлатоном. Замечательно, что модель может быть полностью исследована современным поколением экспериментов в области физики частиц — в первую очередь на В-фабриках. По сути это есть следствие лёгкости инфлатона, что обеспечено отсутствием новых, больших по сравнению с электрослабым масштабом модельных параметров размерности массы. Этим же фактом — отсутствием нового масштаба — обеспечивается и стабильность спектра модели и её феноменологических предсказаний относительно квантовых поправок. Помимо содержащего размерный параметр релевантного оператора все остальные операторы в лагранжиане теории маргинальные (размерности четыре без учёта петлевых поправок), поэтому физические явления, протекающие на больших энергетических масштабах (инфляция) и малых энергетических

ческих масштабах (редкие распады B -мезонов) оказываются связанными между собой. Модель призвана продемонстрировать возможность такой связи в реалистичном обобщении СМ. Кроме этого, модель допускает обобщения, решающие другие феноменологические проблемы СМ, но притом не затрагивающие инфляционную динамику и вытекающие отсюда предсказания для низкоэнергетических экспериментов.

Сам выбор инфляционной модели, описанной в разделе 2.1, определён стремлением иметь минимальное обобщение СМ, обеспечивающей раннюю инфляционную стадию развития Вселенной, но оставляющей СМ в рамках перенормируемости и стабильности относительно квантовых поправок. Это одна из первых моделей хаотической инфляции, предложенная А. Линде: скалярное поле X с потенциалом самодействия четвёртого порядка βX^4 . Инфляционная стадия реализуется при транспланковских значениях поля, однако плотности энергии существенно меньше планковских, поэтому вполне применимо классическое рассмотрение процесса. Единственный модельный параметр — константа самодействия β — безразмерна, её величина фиксируется нормировкой амплитуды спектра возмущений материи на измерение анизотропии реликтового излучения.

Для послеинфляционного разогрева Вселенной требуется ввести взаимодействие инфлатона с полями СМ, и сохраняющий перенормируемость теории вариант только один — взаимодействие с калибровочно-инвариантной квадратичной формой поля Φ хиггсовского дублета СМ, $\xi X^2 \Phi^\dagger \Phi$. В общем скалярном потенциале теории представляется естественным иметь лишь один размерный параметр, который бы и задавал масштаб электрослабого вакуума. Этот параметр можно поместить в сектор инфлатона. Сектор СМ тогда будет масштабнo-инвариантным

на древесном уровне, что может быть интересно для решений теоретических проблем СМ, таких как проблема иерархии масштабов. В результате спонтанного нарушения симметрии из-за отрицательного квадрата массы поля инфлатона (тот самый размерный параметр), инфлатон и хиггсовское поле СМ получают ненулевые вакуумные средние, пропорциональные одному и тому же размерному параметру.

Спектр скалярных частиц над вакуумом представляет собой линейные комбинации “чистых” состояний инфлатона и Хиггса СМ, зависящие от величины ξ . Этим и определяется феноменология модели: инфлатон взаимодействует с частицами СМ только за счёт этого смешивания. Оно обеспечивает и первичный разогрев Вселенной. Смешивание ξ не может быть малым — рождение частиц СМ будет слабым, и температура разогрева Вселенной неприемлемо низкой. Смешивание не может быть и большим — на квантовом уровне оно даёт поправку к инфлатонному потенциалу, которая может испортить его форму, так что пропадёт масштабная инвариантность спектра генерирующихся на инфляционной стадии скалярных возмущений. Поскольку в модели всего один свободный параметр — величина смешивания ξ определяет и низкоэнергетическую массу инфлатона, которая таким образом оказывается зажатой с двух сторон: от нескольких десятков МэВ до 1-2 ГэВ. В такой ситуации инфлатон может рождаться в распадах адронов (раздел 2.3) и распадаться в частицы СМ (раздел 2.2), а значит его можно искать в ускорительных экспериментах (раздел 2.4). Причём для данной массы в разрешённом интервале однозначно предсказываются темп рождения инфлатона, его время жизни и парциальные ширины распада. Существующие ограничения из ускорительных экспериментов и предсказания для будущих поис-

ков представлены в разделе 2.5. Оказывается, эта простая *инфляционная модель* может быть *полностью исследована* в результате анализа уже имеющихся и будущих данных В-фабрик и эксперимента LHCb.

Модель естественно объединяется с обсуждавшейся выше моделью ν MSM, что показано в разделе 2.6. А именно, можно ввести юкавское взаимодействие между стерильными нейтрино и полем инфлатона. После приобретения инфлатонным полем вакуумного среднего отсюда получим майорановскую массу для стерильных нейтрино. Взаимодействие с инфлатоном открывает возможность рождения стерильных нейтрино (в том числе лёгких нейтрино тёмной материи) в ранней Вселенной.

Одно из логических решений задачи об организации инфляционной динамики в ранней Вселенной без введения нового масштаба в физику частиц состоит в привлечении к работе гравитационного сектора теории. Для этого требуется модифицировать гравитационное действие, и исторически первая работающая инфляционная модель — рассмотренная в § 3 модель Старобинского — именно так и была построена. К действию Эйнштейна–Гильберта были добавлены квадратичные по тензорам Риччи и Римана и скаляру кривизны слагаемые. Для метрики однородной и изотропной Вселенной было найдено решение уравнение такой “нелинейной” гравитации, в котором масштабный фактор экспоненциально рос со временем. Новый масштаб появляется, но в гравитационном секторе — за счёт параметра, стоящего перед квадратичными слагаемыми в действии. Он определяет масштаб изменения гравитации, где влияния “линейного” и “квадратичных” слагаемых оказываются одного порядка. Его величина фиксируется из нормировки на измерение амплитуды анизотропии реликтового излучения.

Замечательно, что в данной модели (в отличие, например, от модели раздела § 2) не требуется вводить специального взаимодействия между инфляционным сектором и полями СМ для обеспечения послепериодического разогрева Вселенной. Всё делает та же гравитация, что и обеспечивает саму инфляционную стадию. А именно: за счёт универсального гравитационного взаимодействия энергия, накопленная в расположенном в гравитационном секторе “инфлатоне”, переходит во все частицы модели: происходит их гравитационное рождение. При этом среди частиц СМ наиболее эффективно рождаются хиггсовские бозоны, которые быстро перерассеиваются в другие частицы СМ. Так “экономно” и происходит разогрев в этой инфляционной модели.

Универсальность механизма разогрева (гравитационное рождение всех частиц в модели) естественно приводит к мысли воспользоваться им и для решения других насущных “космологических” проблем: рождения частиц тёмной материи (раздел 3.1) и генерации барионной асимметрии (раздел 3.2). Оказывается, реалистичным и естественным кандидатом на роль частиц тёмной материи оказываются свободные фермионы. Барионную асимметрию удаётся объяснить через лептогенезис с двумя тяжёлыми стерильными нейтрино. Роль гравитации здесь состоит в неравновесном рождении этих частиц в ранней Вселенной. Причём стерильные нейтрино смешиваются с активными и за счёт механизма “качелей” обеспечивают массы последним, что даёт возможность объяснить явление нейтринных осцилляций. Представляется забавным, что *величина барионной асимметрии*, которую можно получить в данной модели, *естественно* (без специального выбора параметров) *оказывается именно малой, численно близкой к наблюдаемой*. В результате, с тремя но-

выми майорановскими фермионами и нелинейной при больших энергиях гравитацией, мы получаем ещё один вариант феноменологически полной модели, минимальной с точки зрения дополнительных полей и взаимодействий, которые потребовалось добавить в сектор физики частиц для решения всех основных феноменологических проблем СМ. Достоинства и недостатки такого решения, а также другие варианты, включая объединение с ν MSM, рассмотрены в разделе 3.3.

Далее, в § 4 обсуждается, возможно, наиболее радикальное предложение по организации инфляционной стадии в ранней Вселенной, поскольку в нём не подразумевается вообще никаких новых степеней свободы в теории: ни в секторе частиц, ни в гравитационном секторе. Роль инфлатона играет хиггсовский бозон СМ, неминимальным образом связанный с гравитацией (модель представлена в разделе 4.1), а за послеинфляционный разогрев, изучаемый в разделе 4.2, отвечают известные взаимодействия бозона Хиггса с полями СМ. Предсказания для спектров скалярных и тензорных возмущений, генерирующихся во время инфляции, весьма близки к предсказаниям инфляции Старобинского и полностью согласуются со всеми имеющимися космологическими данными. Интересно, что если на масштабе сильной связи модели, зависящем от величины хиггсовского поля, появляются неперенормируемые операторы, что обсуждается в разделе 4.3, то они могут быть ответственны и за появление масс у активных нейтрино, и за барионную асимметрию Вселенной (через нетермальный лептогенезис). Вероятно, это наиболее консервативное обобщение СМ и ОТО, поскольку без добавления новых степеней свободы в модель в рамках единого подхода предлагаются решения проблем инфляции, барионной асимметрии и нейтринных осцилляций.

Глава 2 посвящена суперсимметричным обобщениям СМ. Фундаментальный интерес здесь связан с возможностью сосуществования различных физических масштабов в таких теориях: квантовые поправки не дестабилизируют иерархию, как мы обсуждали выше. Здесь, однако, рассматриваются космологические и феноменологические приложения, относящиеся как к вопросам экспериментального поиска суперсимметрии, так и к возможной роли новых частиц в эволюции Вселенной, решении загадок тёмной материи и барионной асимметрии.

В § 1 рассмотрена “космологически-мотивированная” минимальная феноменологически приемлемая реализация идеи “расщеплённой” суперсимметрии. Речь идёт о “расщеплённом” варианте неминимальной MSSM, так называемой NMSSM (Next-to-Minimal Supersymmetric Standard Model), в которую к набору полей MSSM добавлено ещё одно суперполе: майорановский фермион и его суперпартнёры (скаляр и псевдоскаляр), синглеты по калибровочной группе СМ. “Расщепление” суперсимметрии реализуется как стабильная относительно квантовых поправок иерархия между массами суперпартнёров частиц СМ: скаляры (скварки, слептоны) считаются тяжёлыми, с массами порядка $m_s \sim 10^4$ - 10^{15} ГэВ, а фермионы (калибрино, хиггсино) — лёгкими, с массами порядка электрослабого масштаба или на порядок выше. В такой ситуации скварки дают исчезающе малый вклад в редкие процессы в кварковом секторе, экспериментальное изучение которых (пока?) подтверждают СМ. В то же время легчайший суперпартнёр (LSP – Lightest Super-Partner), нейтралино, может решить проблему тёмной материи. Однако в простейшем варианте расщеплённой MSSM, как обсуждается в разделе 1.1, нет решения другой космологической проблемы — загадки барионной

асимметрии Вселенной. Хотя в суперсимметричных моделях возможна генерация барионной асимметрии на ранних этапах эволюции Вселенной посредством механизма Аффлека–Дайна, это требует дальнейшего расширения модели и добавления новых полей, чья динамика, как правило, недоступна прямому экспериментальному исследованию. В NMSSM генерация барионной асимметрии может произойти на относительно низком масштабе 100 ГэВ — работает электрослабый бариогенезис.

В предлагаемой гибридной модели, “расщеплённой” NMSSM, описанной в разделе 1.2, решены обе космологические проблемы (тёмной материи и барионной асимметрии), притом модель приемлема феноменологически, поскольку тяжёлые скварки не приводят к процессам с нарушением ароматов. По сравнению с “расщеплённой” MSSM на электрослабом масштабе имеются дополнительные нейтральные частицы. Они дают вклад в эффективный скалярный потенциал, так что электрослабый фазовый переход (ЭФП) становится переходом сильно I рода (раздел 1.3), что необходимо для успешной работы электрослабого бариогенезиса. С новыми полями также связан дополнительный источник CP-нарушения в теории. В разделе 1.4 оценивается количество барионной асимметрии, произведённой в ходе ЭФП, используя WKB-приближение для CP-нарушающих источников в диффузионных уравнениях. В разделе 1.5 вычисляется вклад нужных для бариогенезиса CP-нарушающих взаимодействий в аномальный дипольный момент электрона и электрический дипольный момент нейтрона. В разделе 1.6 изучается закалка нейтралино в ранней Вселенной, составляющей тёмную материю. Итогом является заключение о полной феноменологической и космологической приемлемости модели. Замечательно, что феноменологические предска-

зания модели могут быть проверены на ЛНС и в лабораторных экспериментах ближайшего будущего.

Наряду с нейтралино, лёгкое гравитино, которому посвящён § 2, является возможным кандидатом на роль частиц тёмной материи, будучи легчайшим суперпартнёром в некоторых классах суперсимметричных обобщений СМ. Гравитино считается *менее натуральным* кандидатом, поскольку для обеспечения требуемого количества тёмной материи, как правило, требуется тонкая подстройка параметров модели (в том числе и массы гравитино), а иногда и начальных условий горячей фазы развития Вселенной (например, величины температуры разогрева), а значит параметров инфляционного сектора. Гравитино как кандидат на роль частиц тёмной материи менее привлекателен и с точки зрения возможности прямых поисков: сверхслабое взаимодействие с частицами СМ почти не оставляет шансов. Тем не менее, гравитино представляет безусловный интерес, не только потому, что фактически является легчайшим в ряде теоретически мотивированных суперсимметричных моделей, но и потому что (в отличие от нейтралино) допускает интересную возможность формирования *тёплой компоненты* тёмной материи, что подробно рассмотрено в разделе 2.1. Механизмам рождения гравитино в ранней Вселенной посвящён раздел 2.2. Полученные результаты обсуждаются в разделе 2.3. Замечательным фактом является то, что именно эта возможность допускает (хотя и косвенную) проверку модели в экспериментах физики частиц, а именно, на большом адронном коллайдере. В любом случае, как кандидат на роль частиц тёплой тёмной материи гравитино будет либо исключено на ЛНС, либо эта модель найдёт там своё подтверждение.

Весьма актуален и вопрос о том, какие низкоэнергетические проявления суперсимметрии можно ожидать в моделях, где суперпартнёры частиц СМ — скварки, слептоны, калибрино — тяжёлые и не доступны для прямого рождения и последующего исследования на ЛНС. Проявления помимо квантовых поправок суперпартнёров, обсуждавшихся выше. Речь здесь идёт о физических явлениях, обусловленных динамикой полей *скрытого сектора*, в котором происходит спонтанное нарушение суперсимметрии, передающееся затем в видимый сектор. Там оно проявляется, в частности, в виде нарушающих суперсимметрию доминирующих вкладов в массы суперпартнёров частиц СМ. Отметим, что к явлениям этим имеется важный самостоятельный интерес вне зависимости от масштаба масс суперпартнёров. Их (возможное) обнаружение и последующее исследование позволит заглянуть в скрытый сектор, понять динамику, ответственную за спонтанное нарушение суперсимметрии.

В данном контексте ясно, что такое исследование возможно лишь для моделей, допускающих прямое рождение частиц скрытого сектора в ускорительных экспериментах, или их появление в ранней Вселенной, влияющее на её дальнейшее развитие. В § 3 мы рассматриваем наиболее важную часть скрытого сектора — *супермультиплет голдстино*. По определению, это именно тот супермультиплет, чья вспомогательная компонента получила ненулевое вакуумное среднее, чем нарушила спонтанно суперсимметрию во всей теории. Интерес представляет партнёр голдстино по мультиплету, *сголдстино*, имеющий скалярную и псевдоскалярную компоненты. Эти частицы R -чётны, а потому могут распадаться в частицы СМ и одиночно рождаться в их рассеяниях. Это обстоятельство даёт заметное преимущество в поисках проявлений скрытого

сектора: процессы с участием *сголдстино* подавлены слабее аналогичных с *голдстино* (*гравитино*). Константы взаимодействия *сголдстино* с полями *СМ* подавлены степенями масштаба нарушения суперсимметрии в полной теории. Обнаружение *сголдстино* позволило бы определить этот масштаб. Недостаток в том, что массы *сголдстино* (в отличие от массы *гравитино*) являются модельно зависимыми параметрами. При изучении общей феноменологии сектора *голдстино* эти массы считаются свободными параметрами с единственным естественным ограничением: они должны быть не больше масштаба нарушения суперсимметрии.

Лагранжиана взаимодействия между полями *СМ* и их суперпартнёрами с полями *гравитино* (*голдстино*) и *сголдстино* получен в разделе 3.1. Раздел 3.2 посвящён феноменологии моделей с низкоэнергетическим нарушением суперсимметрии и относительно лёгкими *сголдстино*, $\lesssim 100$ ГэВ. Дается обзор астрофизических, лабораторных, ускорительных экспериментов (чувствительных к физике *сголдстино*), чьи результаты используются для получения нетривиальных ограничений на *масштаб нарушения суперсимметрии* в моделях с соответствующим масштабом масс *сголдстино*. Это наиболее сильные модельно-независимые феноменологические ограничения на *масштаб нарушения суперсимметрии* в полной модели. Приводятся оценки чувствительности экспериментов на ЛНС к этим моделям.

В Заключении представлены выводы и сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. D. Gorbunov and M. Shaposhnikov. How to find neutral leptons of the nuMSM? // –JHEP. –2007. –0710. –p.015.

2. D. Gorbunov, A. Khmelnitsky and V. Rubakov. Constraining sterile neutrino dark matter by phase-space density observations. // –JCAP. –2008. –0810. –p.041.
3. F. Bezrukov and D. Gorbunov. Light inflaton Hunter’s Guide. // –JHEP. –2010. –1005. –p.010.
4. D. S. Gorbunov and A. G. Panin. Scalaron the mighty: producing dark matter and baryon asymmetry at reheating. // –Phys. Lett. –2011. –B700. –p.157.
5. F. Bezrukov and D. Gorbunov. Distinguishing between R^2 -inflation and Higgs-inflation. // –Phys. Lett. –2012. –B713. –p.365.
6. F. Bezrukov, D. Gorbunov and M. Shaposhnikov. On initial conditions for the Hot Big Bang. // –JCAP. –2009. –0906. –p.029.
7. F. Bezrukov, D. Gorbunov and M. Shaposhnikov. Late and early time phenomenology of Higgs-dependent cutoff. // –JCAP. –2011. –1110. –p.001.
8. S. V. Demidov and D. S. Gorbunov. Non-minimal Split Supersymmetry. // –JHEP. –2007. –0702. –p.055.
9. D. Gorbunov, A. Khmelnitsky and V. Rubakov. Is gravitino still a warm dark matter candidate? // –JHEP. –2008. –0812. –p.055.
10. D. Gorbunov, V. Ilyin and B. Mele. Sgoldstino events in top decays at LHC. // –Phys. Lett. –2001. –B502. –p.181.
11. D. S. Gorbunov and N. V. Krasnikov. Prospects for sgoldstino search at the LHC. // –JHEP. –2002. –0207. –p.043.
12. S. V. Demidov and D. S. Gorbunov. LHC prospects in searches for neutral scalars in $pp \rightarrow \gamma \gamma + \text{jet}$: SM Higgs boson, radion, sgoldstino. // –Phys. Atom. Nucl. –2006. –69. –p.712.

13. S. V. Demidov and D. S. Gorbunov. Flavor violating processes with sgoldstino pair production. // -Phys. Rev. -2012. -D85. -p.077701.
14. D. S. Gorbunov and V. A. Rubakov. On sgoldstino interpretation of HyperCP events. // -Phys. Rev. -2006. -D73. -p.035002.
15. S. V. Demidov and D. S. Gorbunov. More about sgoldstino interpretation of HyperCP events. // -JETP Lett. -2007. -84. -p.479.