

## ОТЗЫВ

официального оппонента Горбунова Дмитрия Сергеевича  
на диссертацию Невзорова Романа Борисовича «Феноменологические аспекты  
суперсимметричных расширений Стандартной модели», представленной на  
соискание ученой степени доктора физико-математических наук по  
специальности 01.04.02- «теоретическая физика».

Стандартная модель физики элементарных частиц неполна: нейтринные осцилляции, явление тёмной материи, барионная асимметрия Вселенной не находят объяснения и требуют её модификации, введения новых частиц и взаимодействий. В то же время, тяжёлые частицы дают квантовые поправки к массе бозона Хиггса, стремящиеся поднять её к масштабу их масс. Эта проблема иерархии масштабов находит элегантное решение в рамках суперсимметричных обобщений Стандартной модели, где квантовые поправки от суперсимметричных пар в точности сокращаются. Такой механизм может представлять интерес и для решения другой проблемы иерархии масштабов – чудовищной малости космологической постоянной в современной Вселенной по сравнению с ожидаемыми вкладами гравитации и физики частиц в плотность энергии вакуума. Представленная диссертация как раз посвящена построению и изучению свойств суперсимметричных обобщений Стандартной модели, и затрагивает эти и другие феноменологически важные аспекты. Актуальность данной работы и ее важность для развития соответствующих направлений квантовой теории поля, теоретической и математической физики несомненна.

Диссертация состоит из Введения, трёх глав основного текста, Заключения, трёх приложений и списка литературы. Во Введении даётся общая мотивация и показывается актуальность темы исследования. Вводится понятие суперсимметрии и математический аппарат, позволяющий наглядно продемонстрировать её характерные свойства и быстро проводить вычисления в суперсимметричных теориях. Около 15 страниц отведено на стандартные

формулы их учебников, которые нигде в дальнейшем изложении не используются. Их вполне можно было бы опустить, хотя изложение полное и может представлять самостоятельный интерес как методический материал. В этом случае стоит отметить неверный знак в формуле (17), неудачное использование сочетания «в рамках теорий классических групп» (есть квантовые группы, но в тексте речь совсем о другом) и обозначения  $U(1)_Y$  с наименованием группы гиперзаряда (в тексте речь о произвольной абелевой группе, но точно не группе гиперзаряда Стандартной модели), неубедительность появления прямого произведения  $G \times H$  в изложении на стр.9, несправедливость утверждения «спонтанное нарушение суперсимметрии не может возникнуть как квантовый эффект» (непертурбативные эффекты это делают). По сути, местами непонятна логика. Так фраза на странице 6 – «Хотя проблема тонкой настройки вероятно указывает на то, что стандартную модель не следует рассматривать в качестве низкоэнергетического предела теорий Великого Объединения (ТВО), ..., наиболее весомым аргументом в пользу существования так называемой «новой физики»..., пожалуй, является наличие тёмной материи» – состоит, на мой взгляд, из двух справедливых утверждений, но связи тут нет. Кроме того, подавляющий объём материала диссертации посвящён изучению как раз ТВО на основе группы симметрий  $E_6$ , а физика частиц тёмной материи вообще почти не рассматривается. На странице 8 при обсуждении идеи вырожденных вакуумов (см. также вынесенное на защиту положение 8) молчаливо игнорируется проблема калибровочной иерархии, являющаяся основной физической мотивацией для моделей суперсимметрии и техницвета, которым собственно и посвящена диссертация.

В первой главе рассматриваются суперсимметричные расширения Стандартной модели на основе калибровочной группы  $E_6$  и её подгрупп. Хотя в тексте нет серьёзного обсуждения такого выбора группы ТВО, он ничему не противоречит. Здесь рассмотрено много различных вариантов, изложение довольно подробное, хорошо проиллюстрировано формулами и отсылками к оригинальной литературе. Стоит отметить модель,

рассматриваемую на стр.50, где среди набора частиц есть две, которые могут давать вклад в тёмную материю. Многокомпонентная тёмная материя активно изучается в космологическом контексте, и примеры моделей физики частиц, где многокомпонентность возникает естественным образом, представляют несомненный интерес. В моделях с лёгкими скалярами стоило бы обсудить возможность объяснения (не очень значимых статистически) указаний экспериментов Большого адронного коллайдера на наличие лёгких скалярных резонансов. В то же время, заметная доля построений приводит к теоретически или феноменологически неприемлемым моделям. Подробности тут не представляют интереса, и опускание этого материала существенно уменьшило бы объём диссертации, без потери её актуальности. В тексте много численных оценок (и это хорошо) масс частиц и констант взаимодействия, но было бы полезно указывать (например в подписях к таблицам 1.14, 1.15, и к таблицам 3.1, 3.3 в главе 3), в каких случаях удаётся их согласовать с наблюдениями и считать модель реалистичной. Местами серьёзно затрудняет понимание использование термина «шкала нарушения суперсимметрии» для обозначения масштаба масс суперпартнёров частиц Стандартной модели (см. стр. 55, 118 и далее в главе 3 на стр. 226, 261). Формулы (1.12) и (1.194) содержат опечатки. В рамках многих моделей получены предсказания для проверок на Большом адронном коллайдере, но в ряде случаев такого рода проверки уже были проведены (см. например обсуждение событий с потерей энергии на стр.146), и было бы полезно проанализировать результаты. Интенсивные поиски проявлений новой физики довольно серьёзно ограничили пространство параметров минимальных суперсимметричных обобщений Стандартной модели, и, например, реалистичность моделей с тяжёлым и аксиальным хиггсом ( а значит, и заряженными тоже) массы 250 ГэВ (стр.110) вызывает сомнения. На стр.91 (а также стр. 199 в главе 2) дано неверное определение калибровочной константы группы гиперзаряда. Утверждение на стр.56, что «В СУСИ обообщениях СМ приблизительное равенство калибровочных констант при сверхвысоких энергиях позволяет объединить на

планковской шкале гравитацию с другими калибровочными взаимодействиями в рамках СУГРА моделей..» представляется слишком оптимистичным. Вызывает вопросы фраза стр.37 «.. легчайшее нейтралино.. может объяснить происхождение крупномасштабной структуры Вселенной, а также обеспечить существенный вклад в плотность тёмной материи, если масса соответствующего состояния меньше или порядка ТэВ»: во-первых, из космологии не следует никаких ограничений на массу частицы тёмной материи (а из экспериментальных поисков исключены как раз лёгкие частицы), а во-вторых, именно тёмная материя и обеспечивает рост структур во Вселенной. На стр. 138 указывается, что вклад легчайшего экзотического фермиона с массой менее 1эВ в тёмную материю мал. Но такие частицы в ранней Вселенной 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 (что ожидается при температурах выше массы  $Z'$ -бозона), их доля в тёмной радиации слишком велика, и такая модель противоречит современным космологическим данным. Это же замечание относится к обсуждению на стр.174.

В главе 2 рассматриваются модели составного бозона Хиггса в рамках ТВО. Техницвет решает проблему тонкой настройки для бозона Хиггса, но наличие тяжёлых скаляров в ТВО требует их суперсимметризации. В модели есть новые лёгкие частицы, что представляет интерес для поисков на Большом адронном коллайдере. На стр.215 указано, что поиски позволяют получить ограничения на дикварки, но никакого конкретного ограничения на массы не приведено. При обсуждении бариогенезиса на стр.216 следовало бы оценить влияние возможных обратных процессов и процессов перерасеяния в космической плазме на вымывание произведённой асимметрии. Было бы интересно обсудить возможность проверки такого механизма генерации барионной асимметрии.

Глава 3 посвящена расширениям Стандартной модели с вырожденными

вакуумами. При построении несуперсимметричного обобщения следовало бы обсудить вопрос о влиянии квантовых поправок к вакуумной энергии и массе хиггсовского бозона на результат работы предложенного механизма получения таким образом нулевой космологической постоянной. Из изложения не очень понятен статус констант связи  $\lambda_6$  и  $\lambda_7$ . Они должны быть нулевыми из-за накладываемой дискретной  $Z_2$  симметрии, но для них приводятся и решаются ренормгрупповые уравнения, и они получают ненулевые квантовые поправки от других констант связи, несмотря на симметрию. При построении суперсимметричного варианта остаётся непонятным, почему константы связи можно считать одинаковыми в обоих вакуумах, ведь даже небольшое различие приведёт к огромному вкладу в плотность энергии вакуума, что делает построение нереалистичным. Какова роль гравитационных поправок, ведь теория неперенормируема? Если автор считает, что предложенная схема решает проблему космологической постоянной, почему это не указано явно в конце раздела и не вынесено как одно из положений диссертации? Стоит также отметить, что глюино (суперпартнёры глюонов) в модели имеют массу 500-2500 ГэВ (стр.267), что вероятно противоречит результатам поисков на Большом адронном коллайдере. Представляется неверным утверждение на стр.268, что «в моделях глобальной СУСИ конденсат калибрино не нарушает суперсимметрию». В рекомендациях продолжить поиски новых частиц на Большом адронном коллайдере (стр.276) было бы полезно указать какие-то рамки (например, для масс  $Z'$ -бозона и дикварков), после выхода за которые можно было бы считать соответствующие модели закрытыми.

Сам текст диссертации написан ясным языком, стилистически безупречен и почти не содержит опечаток, что очень редко встречается для текста такого большого объёма. Из технических накладок -- сдвинулись подписи к вертикальным осям графиков на рис.3.8 и 3.9. Также стоило бы привести оригинальные ссылки на формулы в Приложении А.

Все вышеизложенные недостатки, замечания и вопросы нисколько не

снижают ценности диссертации как фундаментального научного исследования. Все полученные результаты являются новыми. Они чётко обоснованы и изложены в десятках публикаций в российских и зарубежных рецензируемых журналах. Результаты неоднократно докладывались на различных российских и международных конференциях, а также на многочисленных научных семинарах в научных институтах нашей страны и за рубежом.

Автореферат корректно и полно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа полностью отвечает всем требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а сам автор, Невзоров Роман Борисович, несомненно заслуживает присуждения искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Главный научный сотрудник ОТФ ИЯИ РАН  
доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН

Горбунов Д.С.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)  
Адрес: проспект 60-летия Октября, 7а, Москва, 117312  
Тел.: +7(499)783-9291  
e-mail: gorby@ms2.inr.ac.ru

Дата: 16.09.2019г.

Подпись Д.С. Горбунова удостоверяю.

Директор ИЯИ РАН  
чл.-корр. РАН

Кравчук Л.В.

Горбунов Дмитрий Сергеевич

Доктор физ.-мат. наук, чл.- корр. РАН

01.04.02 - теоретическая физика.

Gravitational waves from phase transition in split NMSSM

By S.V. Demidov, D.S. Gorbunov, D.V. Kirpichnikov.

arXiv:1712.00087 [hep-ph].

[10.1016/j.physletb.2018.02.007](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.02.007).

Phys.Lett. B779 (2018) 191-194.

Revised neutrino-gallium cross section and prospects of BEST in resolving the Gallium anomaly

By Vladislav Barinov, Bruce Cleveland, Vladimir Gavrin, Dmitry Gorbunov, Tatiana Ibragimova.

arXiv:1710.06326 [hep-ph].

[10.1103/PhysRevD.97.073001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.073001).

Phys.Rev. D97 (2018) no.7, 073001

Hiding an elephant: heavy sterile neutrino with large mixing angle does not contradict cosmology

By F. Bezrukov, A. Chudaykin, D. Gorbunov.

arXiv:1705.02184 [hep-ph].

[10.1088/1475-7516/2017/06/051](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2017/06/051).

JCAP 1706 (2017) no.06, 051

Fatal youth of the Universe: black hole threat for the electroweak vacuum during preheating

By Dmitry Gorbunov, Dmitry Levkov, Alexander Panin.

arXiv:1704.05399 [astro-ph.CO].

[10.1088/1475-7516/2017/10/016](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2017/10/016).

JCAP 1710 (2017) no.10, 016

On the dark radiation problem in the axiverse

By Dmitry Gorbunov, Anna Tokareva.

arXiv:1702.05924 [hep-ph].

[10.1088/1475-7516/2017/06/016](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2017/06/016).

JCAP 1706 (2017) no.06, 016