

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Иевлева Евгения Альбертовича
на тему: «Динамика неабелевых струн
в суперсимметричных калибровочных теориях»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Наиболее интригующей загадкой теории сильных взаимодействий является проблема невылетания кварков. Хотя в данной области имеются определенные продвижения задача остается нерешенной на протяжении уже 45 лет. Сложность задачи обусловлена тем, что необходимо удовлетворить двум противоречащим друг другу требованиям. Во-первых, необходимо чтобы все адроны были бесцветными. Это не очень трудно, для этого достаточно использовать явление Хиггса. Глюоны приобретают массу, взаимодействие становится короткодействующим, а вылетающие частицы – бесцветными. Во-вторых, не должны вылетать частицы с нецелым барионным зарядом. Это требование выглядит очень странным поскольку никакое взаимодействие в КХД не связано с барионным зарядом состояния. В силу полноты состояний это означает, что состояния с нецелым зарядом имеют бесконечную энергию, что естественно связать с далекодействующим взаимодействием в этих секторах. Однако, это требование противоречит короткодействию в секторах с целым зарядом. Для этого прежде всего необходимо, чтобы экранировка цвета в состояниях с нецелым барионным зарядом была невозможна.

Удалось построить несколько примеров такой ситуации. В классической теории она возникает в примере, приведенном Мандельштамом. Рассмотрим 2 статических монополя, находящихся на больших расстояниях друг от друга, в теории с заряженным конденсатом как в сверхпроводнике. Поскольку магнитное поле не может проникнуть в сверхпроводник, а экранировать монополи нечем, то их магнитное поле вытягивается в трубку конечной толщины. В результате энергия взаимодействия монополей линейно растет с расстоянием, а энергия уединенного монополя равна бесконечности.

Пример настоящей квантовой теории поля с невылетанием дает 2+1 теория Джорджи-Глэшоу, рассмотренная А.М. Поляковым. Здесь вакуум представляет собой сверхпроводник по неабелевым компонентам Хиггсова поля. Поскольку теория неабелева, то в ней возможны монополи t'Хофт-Polyakov большой массы. Вводя 2 таких монополя в теорию можно непосредственным вычислением убедиться, что их взаимодействие линейно растет с расстоянием. Используя соображения дуальности можно показать, что в аналогичной теории с конденсатом монополей кварки (заряды) будут не вылетать.

Данные примеры показывают, что невылетание должно быть свойством вакуумного состояния теории Янга-Миллса без кварков. Линейный потенциал в полной КХД отсутствует поскольку экранируется рождением кварк-антикварковых пар.

В реальной теории Янга-Миллса задача о невылетании, однако, оказывается слишком сложной. Поэтому естественно рассмотреть более простые теории, в которых это явление имеет место. С этой целью полезно рассмотреть теории с симметрией гораздо более высокой, чем в КХД, поскольку они существенно проще. Наиболее естественным способом резко повысить симметрию исходной теории, это рассмотреть ее суперсимметричное (SUSY) обобщение. Витеном и Зейбергом был построен класс SUSY теорий в четырехмерном пространстве-времени, которые содержат невылетание того же

типа как модель Полякова. В то же время они обладают свойством дуальности, которое позволяет точно вычислить ряд величин в этих теориях. Это не означает, однако, что эти теории точно решаются, поскольку не все величины теории могут быть вычислены.

Как и во всякой суперсимметричной теории фазовые переходы (по внутренним параметрам теории) невозможны. Хотя натяжение струны и не относится к вычислимым величинам следует ожидать, что переход в состояние деконфайнмента невозможен. Поэтому в любой области параметров конфайнмент в теории Виттена-Зейберга должен быть поскольку он имеет место в области слабой связи. Однако, механизм конфайнмента может быть разным.

Можно ожидать также, что конфайнмент не исчезнет, если мягко нарушить суперсимметрию, а затем в новой теории – с меньшей суперсимметрией или даже без суперсимметрии – менять параметры. Этим приемом можно понизить симметрию теории и приблизить ее к реальной задаче.

Исходная теория Виттена-Зейберга имеет высокую $N=2$ SUSY симметрию. По сравнению с чистой теорией Янга-Миллса она имеет большое количество дополнительных частиц – фермионов и скаляров в присоединенном представлении. Еще большее количество дополнительных частиц возникнет если добавить в эту теорию суперсимметричную материю. С помощью внутренних параметров можно нарушая суперсимметрию перейти в $N=1$ SUSY и даже в чистую теорию Янга-Миллса (с присоединенной материей), в которой SUSY нет вовсе. Для этого необходимо добиться, чтобы массы лишних частиц стремились к бесконечности. При этом явление невылетания должно по-прежнему присутствовать во всех этих теориях.

К моменту начала работы соискателя такой путь был известен. Поэтому стала актуальной задача исследовать устройство струн в соответствующих теориях. Именно этой задаче, а также выявлению спектра и устройства появляющихся адронов и посвящена диссертация.

Диссертация начинается с выяснения структуры струн в исходной $N=2$ теории. В области слабой связи найдено решение классических уравнений движений, отвечающее струне. Оно обладает нулевыми модами, которые должны учитываться при определении спектра струны. Интерес представляют только безмассовые состояния, поскольку остальные состояния приобретают бесконечную массу при изменении параметров теории.

Наличие нулевых мод означает, что струна обладает внутренними степенями свободы или группой симметрии, которая в общем случае оказывается неабелевой. Эффективная струнная теория сложнее чем обычная теория Намбу-Готто. Спектр легких частиц теории состоит из монополей, соединенных этими неабелевыми струнами. В зависимости от ситуации возможны “мезоны” (монополь-антимонеполь) и “барионы” (N монополей, соединенных струнами). Мезоны и барионы объединяются в мультиплеты остаточной группы симметрии, которая представляет собой комбинацию исходных цветной и флэйворной групп. В теории возникает известное явление color-flavor locking, когда цвет и флэйвор возбуждений коррелируют друг с другом. Такая картина невылетания (в данном случае монополей) была названа Авторами instead-of-confinement механизм. Конечно, она не соответствует наблюдаемой в природе, однако, данный механизм представляется новым и очень интересным.

Соответствующая теория струны дается некоей SUSY теорией на 2мерной кривой поверхности. В диссертации указывается, что эта теория оказывается $CP(N-1)$ (для исходной группы $SU(N)$) моделью. Эта теория рассматривалась прежде, однако,

соискателю удалось получить ряд новых результатов. Все результаты в $CP(N-1)$ модели и исходной $N=2$ теории находятся в одно-однозначном соответствии.

Дальнейшие главы диссертации посвящены мягкому переходу к теории с $N=1$ SUSY, а также к теории без SUSY. При этом соискатель пытается проследить как меняется структура струны и ее спектр. Следует отметить, что это нельзя сделать вовсе без предположений. Однако, эти гипотезы соискателя выглядят очень правдоподобными и по сути соответствуют общепринятым представлениям.

Соискатель отмечает все возникающие интересные ситуации. Так, большое внимание уделено случаю, когда в теории струны исчезает конформная аномалия и соответственно Лиувилевский член. В этом случае спектр струны может быть определен до конца. Ширина струны в этом случае, однако логарифмически расходится на больших расстояниях, поскольку в теории не остается размерных параметров. В целом, диссертация представляет собой исчерпывающее исследование возникающих SUSY теорий.

Сделаю несколько замечаний.

1. Прежде всего можно предъявить претензии к стилю диссертации. Приведенный текст очень труден для чтения, прежде всего из-за обилия сокращений, которыми Автор явно злоупотребляет. Хуже того, некоторые сокращения используются ранее того момента, когда они расшифрованы. Сокращения должны использоваться только общеупотребительные или те, которые легко расшифровать. Не всегда также понятия, вводимые в тексте, определены полностью в тексте. Встречаются также обозначения, никак не объясненные и не определенные в диссертации.
2. Автор совершенно не обращает внимания на то, чтобы приблизиться к реальной ситуации, существующей в природе, хотя, казалось бы, это должно быть его основной целью. Примером является большое внимание уделенное струне типа Намбу, в то время как этот случай максимально далек от того, что есть в природе. Наличие лиувилевского члена не должно смущать, ибо теории струны представляет собой эффективную низкоэнергетическую теорию. Другим примером является то, что автор все время говорит конфайнменте монополей и слабой связи, в то время как нам нужна сильная связь и конфайнмент зарядов. Хотя дуальность гарантирует, что эти вопросы связаны, необходимо было каждый раз указывать как полученные результаты переводятся на случай невылета кварков.
3. Автор правильно отмечает известный факт, что неустойчивость классического решения, отвечающего струне, не играет большой роли так как в реальной КХД все равно неустойчива. Можно показать, что наиболее существенны струны, которые имеют наименьшее отношение ширины распада к расстоянию между ее уровнями. Однако, такие конфигурации поля не обязательно являются BPS конфигурациями и возможно пропускаются в диссертации.
4. Для меня осталось неясным, все ли запрещенные конфигурации действительно не вылетают. Монополи действительно не вылетают в слабой связи, но остаются ли в спектре обесцвеченные кварки? Хотя эти объекты не имеют ни определенного барионного заряда, ни цвета, все же их существование запрещено.

5. Мне неясно, почему Автор не воспользовался еще одним методом перехода к режиму сильной связи, применимым во всех SUSY теориях. Речь идет о суперсимметричной ‘температуре’. При высоких температурах теория находится в слабой связи и может быть полностью исследована. При понижении температуры фазовых переходов не происходит, что позволяет выяснить основные свойства теории при температуре ноль. Существует ряд работ с результатами на эту тему и интересно бы знать, как они соотносятся с результатами соискателя.
6. Соискатель сам отмечает, что спонтанное нарушение киральной симметрии есть второе важнейшее явление, определяющее облик КХД. Однако, на этом замечании все и заканчивается – более киральное нарушение не комментируется никак. Конечно, оно не имеет прямого отношения к невыетанию, но было бы очень интересно его исследовать методами соискателя (тем более, что это сделано при высокой “температуре”). Еще более интересно было бы сопоставить возникающее у Автора явление color-flavor locking, поскольку оно реально наблюдается в КХД. Сопоставление спектров могло бы многое сказать об отличии теории от КХД и направлении, в котором надо было бы двигаться.

Однако перечисленные замечания не отменяют научной значимости основных результатов, полученных в диссертации, а лишь указывают возможные направления дальнейшей работы. Статьи, вошедшие в диссертацию, опубликованы в журналах, имеющих высокий рейтинг.

Считаю, что диссертация Ивлева Евгения Альбертовича на тему: «Динамика неабелевых струн в суперсимметричных калибровочных теориях» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете». Соискатель Ивлев Евгений Альбертович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета
доктор физико-математических наук
руководитель Отделения теоретической физики
Петербургский институт ядерной физики



В.Ю. Петров

« 23 » марта 2021 года