

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор Физического института  
им. П.Н. Лебедева РАН  
член-корреспондент РАН, профессор,  
д.ф.-м.н. И.Н. Колачевский

«02» июня 2017 г.

### ОТЗЫВ

*ведущей организации о диссертации Федорука Сергея Алексеевича «Классические и квантовые модели суперсимметричной механики и частиц высших спинов», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.*

Диссертационная работа С.А. Федорука посвящена решению важной задачи современной теоретической и математической физики – построению суперсимметричных моделей элементарных физических объектов таких, как частицы и струны.

В диссертации предлагаются и изучаются модели суперсимметричной квантовой механики, включая модели расширенной суперконформной механики, твисторные формулировки спиновых частиц и суперчастиц, а также частиц высших спинов и струн. Важность и актуальность этих исследований связана с фундаментальной ролью моделей суперсимметричной механики и моделей спиновых частиц в современных формулировках суперструнных моделей и М-теории, в анализе свойств систем с низкоэнергетичной суперсимметрией, в космологических моделях, в изучении АдС/КфТП соответствия, в построении новых интегрируемых систем.

Объединяющим инструментом при исследовании рассматриваемого класса физических систем является использование дополнительных переменных: полудинамических и чисто калибровочных степеней свободы в моделях суперсимметричной механики, гармонических переменных в системах с расширенной суперсимметрией и твисторов в построении новых моделей частиц со спином. Это позволило автору детально развить следующие направления:

- Составные системы с полудинамическими степенями свободы.

Построены ранее неизвестные суперсимметричные квантовомеханические модели, включая системы с расширенной суперконформной симметрией. С помощью развитых методов, в диссертации детально изучена богатая геометрическая структура фазовых пространств предложенных моделей, задаваемая комплексами де Рама и Дольбо с кручениями, а также различными вариантами келеровой геометрии.

- Обобщенный твисторный подход.

Использование твисторов и обобщенных симметрий динамических систем дало возможность сформулировать новый класс моделей массивных и безмассовых частиц и суперчастиц произвольного спина. Важной чертой анализируемых в диссертации твисторных моделей является наличие бесконечного спектра элементарных возбуждений, что является характерной особенностью единой теории всех взаимодействий.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит список цитируемой литературы из 268 наименований. Полный объем диссертации составляет 328 страниц.

Введение посвящено обсуждению исследований в суперсимметричной квантовой механике и формулировкам безмассовых и массивных частиц произвольного спина. Перечисляются цели и задачи исследования и отмечается актуальность решаемых проблем. Дано краткое описание содержания и приведены основные результаты диссертации.

Целью первой главы является построение новых суперполевых реализаций сигма-моделей расширенной суперсимметричной механики, последующее их квантование и установление геометрических комплексов, описываемых рассмотренными системами. Подробно изучены системы с  $N=4$  суперсимметрией, описывающие гиперкелеровы геометрии с кручением (НКТ) и би-НКТ геометрии. Доказано, что геометрия би-НКТ описывается моделями с обычными и зеркальными  $N=4$  супермультиплетами, являющимися  $N=2$  суперполевыми системами с внешними (анти)голоморфными кручениями. Благодаря использованию размерной редукции получены взаимосвязи систем с разными геометриями. Среди основных результатов, полученных в данной главе, следует отметить определение структуры суперзарядов в случае би-НКТ геометрии, а также нахождение новой  $N=4$  суперсимметричной механики с полудинамическим супермультиплетом. Изучение последней модели позволило установить соответствие между наличием  $N=4$  суперсимметрии в моделях

с полудинамическим  $(3,4,1)$  мультиплетом и уравнением Нама для спиновых степеней свободы в системе.

Вторая глава посвящена построению и исследованию новых квантово-механических моделей с расширенной суперконформной симметрией. Отличительной чертой рассматриваемых в диссертации систем является использование полудинамических супермультиплетов и применение метода калибрования изометрий. Введение полудинамических переменных позволило получить новые конформно-инвариантные взаимодействия спиновых и динамических степеней свободы. В случае  $N=2$  суперсимметрии получено новое суперрасширение многочастичной системы Калоджеро, отличное от системы Фридмана-Менде. С использованием метода  $N=4$   $d=1$  гармонического суперпространства получена новая  $N=4$  суперконформная многочастичная механика, являющаяся  $D(2,1;\alpha)$ -суперрасширением  $U(2)$ -спиновой модели Калоджеро. В этой главе также получены новые физические системы, обладающие симметриями относительно конформной группы Галилея, а также установлены взаимосвязи построенных  $N$ -расширенных суперконформных алгебр Галилея в произвольных размерностях с симметриями расширенных суперконформных механик.

Третья глава посвящена твисторным формулировкам массивных и безмассовых частиц фиксированного спина. Обсуждаются основные проблемы, связанные с построением твисторных формулировок релятивистских частиц ненулевого спина и ненулевой массы. Построена обобщенная твисторная формулировка безмассовой частицы, использующая дополнительную скалярную координату и воспроизводящая пространственно-временную формулировку посредством обобщенных преобразований Пенроуза. Данная пространственно-временная формулировка описывает спиновые степени свободы посредством коммутирующего вейлевского спинора. Ее обобщение на массивный случай и использование чисто калибровочных лоренцевых гармоник позволило построить новую битвисторную формулировку массивной спиновой частицы, фазовыми переменными которой являются координаты двух твисторов и две дополнительные комплексные скалярные координаты. Полученное посредством квантования массивное твисторное поле определено на однородном пространстве  $SL(2, \mathbb{C})/SU(2)$ . Построены интегральные преобразования, связывающие массивную твисторную волновую функцию с обычными пространственно-временными полями массивных частиц.

В четвертой главе проводится исследование моделей частиц и суперчастиц с дополнительными тензорными координатами на классическом и квантовом уровнях. Рассматриваются модели массивных и безмассовых суперчастиц, тензорные импульсы которых описываются твисторными переменными и спинорными лоренцевыми гармониками. Построена модель  $N=1$ ,  $D=4$  суперчастицы, описывающая, в зависимости от параметров системы, все возможные случаи

сохранения суперсимметрии как в безмассовом, так и в массивном случае. В безмассовом случае модель эквивалентна твисторной формулировке безмассовой суперчастицы с тензорными центральными зарядами, в которой одна или две суперсимметрии являются нарушенными. В массивном случае доказано, что тензорная суперчастица, сохраняющая  $\frac{1}{4}$  суперсимметрии, классически эквивалентна псевдоклассической модели массивной частицы спина  $\frac{1}{2}$ . В данной главе также рассмотрено интересное применение симметрий с тензорными центральными зарядами при описании спиновых частиц в постоянном электромагнитном поле. Тензор напряженностей постоянного электромагнитного поля соответствует тензорным центральным зарядам алгебры Максвелла. В диссертации построена модель частицы с симметрией группы Максвелла, выполнено ее квантование и найдены волновые функции.

Пятая глава посвящена построению новых твисторных формулировок частиц и суперчастиц высших спинов и струны Намбу-Гото. Симметрии высших спинов данных формулировок (супер)частиц высших спинов являются бесконечномерными расширениями обобщенной (супер)конформной группы, включающей четный аналог преобразований суперсимметрии. В безмассовом случае обобщенной конформной группой является группа  $SU(3,2)$  или супергруппа  $SU(3,2|1)$  при наличии суперсимметрии. Применение данной симметрии позволяет сохранить в теории полей высших спинов свойство  $N=1$  киральности, являющееся важным в геометрическом подходе в супергравитации. В результате квантования получено суперполе высших спинов, которое описывает бесконечную башню киральных  $N=1$  супермультиплетов с внешними спинорными индексами. Также построена мастер-модель, воспроизводящая на классическом уровне как частицу высших спинов с бозонной суперсимметрией, так и развёрнутую формулировку полей высших спинов, и описывающая после квантования новые мультиплеты высших спинов. В этой главе получена битвисторная формулировка струны Намбу-Гото с натяжением с каноническими правилами квантования твисторного поля. Найдены связи первого рода твисторной струны, включающие связи Вирасоро и  $U(1) \times U(1)$  связи Каца-Муди для локальных фазовых преобразований струнных твисторов.

В заключении представлены полученные в диссертации новые важные результаты. Среди них отметим следующие:

- построение составных сигма-моделей суперсимметричной квантовой механики, основанных на взаимодействии динамических, спиновых и калибровочных мультиплетов и получение  $N=4$  суперконформного расширения многочастичной спиновой модели Калоджеро;
- исследование моделей суперсимметричной квантовой механики, описывающие НКТ и би-НКТ геометрии;
- построение новых динамических систем с конформной симметрией Галилея и

получение новых  $N$ -расширенных суперконформных алгебр Галилея в высших пространственных измерениях.

- построение модели релятивистской частицы, спиновые степени свободы которой описываются коммутирующим вейлевским спинором, и выполнение канонического квантования;
- нахождение битвисторной формулировки модели массивных релятивистских частиц с произвольным фиксированным спином;
- построение модели релятивистской частицы с дополнительными тензорными переменными, обладающей симметрией Максвелла и описывающей взаимодействие с постоянным внешним электромагнитным полем;
- построение и изучение новых моделей безмассовых частиц и суперчастиц высших спинов, инвариантные относительно бозонного аналога суперсимметрии с сохранением условия  $N=1$  киральности в суперсимметричном случае.
- получение новой модели частицы высших спинов, в которой известная модель с развернутой формулировкой и модель частицы с четным аналогом суперсимметрии возникают как две разные фиксации калибровки, а также представление решения уравнений полей высших спинов через твисторный препотенциал;
- построение битвисторного действия бозонной струны с натяжением, генерирующего, после частичных фиксаций калибровок, билинейное твисторное струнное действие.

Диссертационная работа содержит большой объем материала, изложенного четко и ясно. К наиболее важным результатам следует отнести применение битвисторного подхода к описанию массивных частиц, построение  $N=4$  суперсимметричной модели Калоджеро и развитие моделей частиц высших спинов. Полученные результаты являются оригинальными и хорошо обоснованными. Они вносят существенный вклад в развитие новых подходов к построению и изучению суперсимметричных теорий, активно исследуемых в настоящее время. В то же время, следствия из полученных в диссертации результатов для различных частных случаев подтверждаются результатами, полученными другими авторами, свидетельствующие об их достоверности.

В качестве замечаний к диссертационной работе С.А. Федорука, отметим, что уделяя подчас слишком большое внимание обсуждению достаточно хорошо известных формальных вопросов, таких как описание твисторов Пенроуза и алгебр одномерной суперсимметрии, в работе не уделяется достаточно внимания возможным физическим приложениям изучаемых моделей. В частности, это относится к приложениям к моделям теории поля со взаимодействием: хотя в работе показано как воспроизводятся свободные уравнения развернутой формулировки безмассовых полей, представляющееся весьма полезным обсуждение связи предлагаемого формализма с нелинейной теорией высших спинов в работе отсутствует. Кроме того отметим, что использование термина «бозонная суперсимметрия» приводит к

некоторой путанице — возможно автору следовало бы остановиться на применении понятия «чётный аналог суперсимметрии». Впрочем, вышеперечисленные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертации и не снижают ее научной ценности.

Автореферат полно отражает содержание диссертации. Материалы диссертации опубликованы в ведущих научных журналах таких как Journal of High Energy Physics, Physical Review D, Classical and Quantum Gravity, Письма в ЖЭТФ, и неоднократно докладывались на международных научных конференциях. Полученные при выполнении диссертации результаты несомненно найдут применение в исследованиях по теоретической физике высоких энергий, квантовой теории поля, суперсимметрии и теорий суперструн в целом ряде научных и образовательных учреждений. Прежде всего, в Физическом институте им. П.Н. Лебедева, Институте теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Институте теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова, Объединенном институте ядерных исследований, Томском государственном педагогическом университете и в других российских научных центрах.

Результаты диссертационной работы были доложены, обсуждены и одобрены на семинаре Лаборатории квантовой теории поля Отделения теоретической физики им. И.Е. Тамма Физического института им. П.Н. Лебедева РАН 19 мая 2017 года.

Диссертация С.А. Федорука «Классические и квантовые модели суперсимметричной механики и частиц высших спинов» отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.04.02 – теоретическая физика, а ее автор, Федорук Сергей Алексеевич, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв составил:

Заведующий лаборатории Квантовой теории поля  
Отделения теоретической физики им. И.Е. Тамма  
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,  
д.ф.-м.н.

М.А. Васильев

Подпись М.А. Васильева «удостоверяю»

Ученый секретарь ФИАН,  
к.ф.-м.н.



А.В. Колобов

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Адрес: 119991 ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53  
Телефон: 8(499)135-42-64  
E-mail: [postmaster@lebedev.ru](mailto:postmaster@lebedev.ru)