

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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.

Диссертация С.А. Федорука посвящена важным и актуальным разделам современной теоретической физики – построению и изучению новых моделей расширенной суперсимметричной квантовой механики, новых формулировок массивных и безмассовых спиновых частиц и суперчастиц, а также частиц высших спинов и расширенных объектов. При этом особый интерес представляют модели суперконформной механики ввиду применения таких систем к описанию движения спиновых частиц вблизи горизонта черных дыр, а также твисторные формулировки безмассовых и массивных спиновых частиц и суперструн. Одним из эффективных инструментов получения и исследования новых суперсимметричных моделей, как квантово-механических, так и квантово-полевых, является использование дополнительных переменных, среди которых выделенную роль играют гармоника и твисторы. Адекватный выбор переменных для описания систем или введение дополнительных вспомогательных переменных позволяет провести полный анализ моделей с определением симметрий, а также построить дополнительные взаимодействия. Поэтому вопрос о нахождении подходящих переменных представляет собой важной, весьма нетривиальной задачей, решению которой для рассматриваемых систем посвящена значительная часть данной диссертации. Следует отметить, что поставленные и решенные в диссертации задачи, а именно:

- Построение моделей расширенной суперсимметричной механики, включая суперрасширения многочастичных конформных систем, и динамических систем с суперконформной симметрией Галилея;
- Исследование гиперкелеровой и би-гиперкелеровой геометрий с помощью моделей суперсимметричной механики;
- Построение твисторных и пространственно-временных формулировок спиновых частиц с установлением координатных и полевых преобразований Пенроуза, а также моделей частиц с тензорными координатами, включая системы с симметрией Максвелла;
- Построение и исследование новых моделей частиц и суперчастиц высших спинов с нахождением квантового спектра и полевых твисторных преобразований;
- Развитие твисторных методов в описании динамики расширенных объектов, включая построение твисторной формулировки струны с натяжением, производящей канонические правила квантования твисторного струнного поля



относятся к одним из наиболее интересных и, в тоже время, математически довольно сложных вопросов современных суперсимметричных теорий.

Ввиду всего сказанного, не вызывает сомнений важность и актуальность предпринятого в диссертации исследования.

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста и заключения. Список цитируемой литературы насчитывает 268 наименований.

Во введении обсуждается современное состояние проблемы исследований в расширенной суперсимметричной механике и твисторной формулировке безмассовых и массивных частиц произвольного спина. Особое внимание уделяется моделям суперконформной механики и связи их с описанием физики экстремальных чёрных дыр. Перечисляются цели и задачи исследования и отмечается актуальность решаемых проблем. Кратко описывается содержание и основные результаты диссертации.

Первая глава посвящена изучению свойств сигма-моделей, обладающих расширенной суперсимметрией. Основные результаты, полученные в данной главе, включают определение структуры суперзарядов в случае би-НКТ геометрии и нахождение новой  $N=4$  суперсимметричной механики с полудинамическим супермультиплетом. В частности показано, что би-НКТ модели описываются обычными и зеркальными  $N=4$  супермультиплетами и являются примерами  $N=2$  суперполевых систем с внешними (анти)голоморфными кручениями. Получено замечательное соответствие между уравнением Нама для спиновых степеней свободы и наличием  $N=4$  суперсимметрии в моделях с полудинамическим  $(3,4,1)$  мультиплетом.

Во второй главе исследуются новые модели суперконформной механики, построенные с использованием полудинамических мультиплетов и калиброванием изометрий систем. Использование полудинамических переменных в такого типа системах позволило получить дополнительные конформно-инвариантные взаимодействия. Рассмотрены многочастичные системы и в  $N=2$  случае получено новое суперрасширение системы Калоджеро, отличное от системы Фридмана-Менде. Новая  $N=4$  суперконформная многочастичная механика, использующая в своем описании  $N=4$   $d=1$  гармоническое суперпространство, определяет новое  $D(2,1;\alpha)$  суперрасширение  $U(2)$ -спиновой модели Калоджеро. Получены новые физические системы, обладающие конформной симметрией Галилея, а также построены  $N$ -расширенные суперконформные алгебры Галилея в произвольных размерностях.

В третьей главе изучаются твисторные формулировки массивных и безмассовых частиц фиксированного спина. Построена обобщенная твисторная формулировка безмассовой частицы, производящая пространственно-временную формулировку посредством обобщенных преобразований Пенроуза. Данная формулировка имеет прямое обобщение на массивный случай, что позволило построить новую битвисторную формулировку массивной спиновой частицы. Кроме того, в данной главе найдена массивная твисторная волновая функция и построены для нее твисторные полевые преобразования.



В четвертой главе исследуются классические и квантовые модели частиц и суперчастиц с дополнительными тензорными координатами. С использованием твисторных переменных и лоренцевых гармоник строится модель суперчастицы, описывающая все возможные случаи сохранения таргетной суперсимметрии как в безмассовом, так и в массивном случае. При этом получена интересная классическая эквивалентность псевдоклассической модели массивной частицы спина  $\frac{1}{2}$  и тензорной суперчастицы, сохраняющей  $\frac{1}{4}$  таргетной суперсимметрии. Особое внимание уделяется применению тензорных центральных зарядов при описании спиновых частиц в постоянном электромагнитном поле. Для этого строится модель частицы с симметрией группы Максвелла, проводится ее квантование и изучается квантово-механический спектр.

Пятая глава посвящается твисторным формулировкам частиц и суперчастиц высших спинов, а также построению твисторной струнной модели. Новые формулировки суперчастиц высших спинов основаны на использовании четного аналога суперсимметрии, применение которого позволило сохранить важное свойство  $N=1$  киральности, лежащей в основе геометрического подхода в супергравитации. Кроме того, построена модель, воспроизводящая на классическом уровне как частицу высших спинов с бозонной суперсимметрией, так и развёрнутую формулировку Васильева, и описывающая после квантования новые мультиплеты высших спинов. В этой главе построена также твисторная формулировка струны Грина-Шварца с каноническими правилами квантования твисторного поля и полным набором струнных связей первого рода.

В заключении перечислены все полученные в диссертации результаты.

В диссертации получен ряд важных результатов, востребованных при изучении суперсимметричных теорий с расширенной суперсимметрией и теории суперструн, и развиты новые направления, связанные с созданием новых подходов в теоретической физике высоких энергий. В частности, предложен подход, использующий составные системы с полудинамическими степенями свободы для построения новых моделей суперсимметричной квантовой механики. Также разработаны оригинальные методы описания безмассовых и массивных частиц и суперчастиц высших спинов с использованием твисторных переменных. Проведенные исследования вносят существенный вклад в развитие новых подходов при исследовании суперсимметричных моделей, активно изучаемых в настоящее время.

К сожалению, исключительно большой объем диссертации совместно с заметным количеством опечаток существенно затрудняет восприятие представленного материала. В то же время, представлялось бы разумным при применении в главе 2 гармонического описания различных  $N=4$  супермультиплетов не отсылать читателя к их описанию, сформулированному в предыдущей главе, а привести их тут же, пусть и в краткой форме. Также, признавая эффективность подхода с использованием лоренцевых гармоник при анализе  $k$ -симметрии безмассовой суперчастицы, было бы уместным провести сравнительный анализ этого подхода с твисторным,

что весьма бы обогатило содержание диссертации. Впрочем, последнее замечание относится скорее к пожеланиям, чем к критическим замечаниям.

Приведенные замечания никак не влияют на общую высокую оценку диссертации.

Материалы диссертации своевременно опубликованы в ведущих научных журналах, неоднократно докладывались на международных научных конференциях и хорошо известны специалистам, работающим в данной области теоретической физики. Результаты диссертации могут найти применение в исследованиях, проводимых в ОИЯИ, Физическом институте им. П.Н. Лебедева и Институте теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, ИТЭФ, а также в других российских научных организациях, где проводятся исследования по теоретической физике высоких энергий, кантовой теории поля, суперсимметрии и теорий суперструн.

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

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Главный научный сотрудник,  
Сектор квантовой теории поля  
Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН,  
член-корреспондент РАН,  
профессор, д.ф.-м.н.

Александр Абрамович Белавин

142432, г.Черноголовка,  
Московской обл.,  
пр-т академика Семенова, д.1-А  
тел. (495)702-93-17  
e-mail: belavin@itp.ac.ru

Подпись Александра Абрамовича Белавина заверяю:

ученый секретарь ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН  
к.х.н.



С.А. Крашаков

26 мая 2017 г.