

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**и.о. директора физтех-школы
физики и исследований им.
Ландау**

А.А. Воронов

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Введение в М-теорию
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау Физтех-кластер академической и научной карьеры
курс:	2
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 3 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Э.Т. Мусаев, phd (к.ф.-м.н.)

Программа обсуждена на заседании Физтех-кластера академической и научной карьеры 04.06.2020

Аннотация

Утверждение, что пространство вакуумов суперструны соответствует пространству решений 10-мерной супергравитации верно лишь в пертурбативном режиме, когда применимы стандартные техники квантования двумерной сигма-модели. Многие наблюдения показывают, что точки, соответствующие 10-мерным полевым конфигурациям, являются скорее исключением, и в основном пространство вакуумов населено решениями уравнений 11-мерной супергравитации. При этом, размер одиннадцатого измерения пропорционален струнной константе связи. Правильным описанием струнной динамики в таком непертурбативном режиме является теория трехмерной сигма-модели, называемой обычно супермембраной. Вследствие непертурбативности соответствующая теория, называемая М-теорией, оказывается очень слабо изученной.

Курс посвящен изучению наблюдений, позволяющих утверждать о существовании М-теории, ее размерных редукций, симметрий U-дуальности трехмерной сигма-модели и 11-мерной супергравитации, динамики супермембран. В рамках курса будут обсуждаться конкретные модели для действия супермембран, преобразования U-дуальности полей супергравитации и супертоков на поверхности мембраны. Будут изучены схемы размерных редукций в присутствии флаксов, в том числе негеометрических, описание таких редукций в терминах калиброванных супергравитаций.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Сформировать у обучающегося представление о непертурбативной структуре теории суперструн, симметриях ее пространства вакуумов относительно преобразований U-дуальности, их связь со свойствами решений уравнений одиннадцатимерной супергравитации. Сформировать понимание принципов описания динамики релятивистских мембран их взаимодействия между собой и с супергравитационными фоновыми полями. Изучить современные подходы к компактификациям супергравитации, основанным на теоретикогрупповом анализе вложений группы изометрий компактного пространства в группу U-дуальности.

Задачи дисциплины

Обучить техникам работы с супергравитационными теориями и их решениями, с различными теориями трехмерной суперсимметричной сигма-модели и моделями M5-браны. Развить у обучающегося умение решать уравнения на спиноры Киллинга. Научить оперировать понятиями, связанными с размерной редукцией супергравитационных теорий, строить феноменологические модели.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами

ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

основные положения и понятия М-теории, 11-мерной супергравитации, алгебру супертоков для мембраны; формализмы описания динамики одной, двух и N супермембран, их взаимодействий друг с другом и с супергравитационными фоновыми полями, связь с триалгебрами и нambu-лиевой механикой; примеры феноменологических приложений развитого формализма; группы симметрий U-дуальности для М-теории на n-мерном торе.

уметь:

показывать симметричность М-теории и 11-мерной супергравитации относительно преобразований U-дуальности; строить действия для двумерной и пятимерной супермембран, в том числе действия BLG и ABJM.

владеть:

методами анализа размерных редукций супергравитации, основанными на формализме тензора погружения; методами анализа непертурбативных объектов теории струн, в том числе, экзотических бран.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Пять теорий суперструн, дуальности между ними	3	3		3
2	Супералгебра М-теории, БПС состояния, БПС решения 11-мерной супергравитации	3	3		3
3	U-дуальность алгебры супертоков мембраны, симметрии и преобразования БПС состояний, интерпретация преобразований константы связи	3	3		3
4	p-бранная интерпретация БПС состояний	3	3		3
5	M2-браны и теория Черна-Саймонса с 16 суперзарядами, BLG	3	3		3
6	M2-браны и теория Черна-Саймонса с 12 суперзарядами, ABJM	3	3		3
7	M5-браны, действие Пасти-Сорокина-Тонины, редукция к теории струн	3	3		3
8	Проблема квантования мембраны, нестабильность, матричная модель	3	3		3
9	Размерная редукция 11-мерной супергравитации, U-дуальность	3	3		3
10	Формализм тензора погружения	3	3		3
Итого часов		30	30		30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 3 (Осенний)

1. Пять теорий суперструн, дуальности между ними

Суперструна типа I, IIA, IIB, гетеротические суперструны с группами $E_8 \times E_8$, $SO(32)$, спектр возбуждений; T-дуальность между теориями типа IIA и IIB; S-дуальность теории типа IIB.

2. Супералгебра M-теории, БПС состояния, БПС решения 11-мерной супергравитации

Супералгебра в размерности 11, ее представления; короткие мультиплеты и БПС состояния, решения 11-мерной супергравитации.

3. U-дуальность алгебры супертоков мембраны, симметрии и преобразования БПС состояний, интерпретация преобразований константы связи

Симметрии БПС состояний 11-мерной супералгебры, преобразования T-, S- и U-дуальности; алгебра супертоков мембраны, взаимодействующей с калибровочным потенциалом, центральные заряды.

4. p-бранная интерпретация БПС состояний

Расширение набора центральных зарядов в $D=10$ IIA/IIB суперсимметрии. Старое и новое сканирование бран. Решения супергравитации в виде экстремальных бран.

5. M2-браны и теория Черна-Саймонса с 16 суперзарядами, BLG

Действие двумерной сигма модели Баггера-Ламберта-Густавссона; предел низких энергий; уравнение Нама и спектр БПС состояний; 3-скобка на мембране; теории с калибровочной симметрией, задаваемой 3-алгеброй.

6. M2-браны и теория Черна-Саймонса с 12 суперзарядами, ABJM

Действие для N супермембран, низкоэнергетическое приближение, теория ABJM; голографическое соответствие, решение $AdS_4 \times S^7$ 11-мерной супергравитации.

7. M5-браны, действие Пасти-Сорокина-Тонина, редукция к теории струн

Калибровочный потенциал 6-формы, магнитный партнер для супермембраны, проблем самодуальных теорий в размерности 6; модель PST, малая теория струн.

8. Проблема квантования мембраны, нестабильность, матричная модель

Квантование супермембраны, спектр возбуждений на фоне плоской метрики, pp-волны, фоновых флуксуонов; дискретизация системы, матричная модель, квантование матричной модели; нестабильной энергетического спектра.

9. Размерная редукция 11-мерной супергравитации, U-дуальность

Редукция 11-мерной супергравитации на n-мерный тор, объединение полей в мультиплеты группы U-дуальности; дуализация калибровочных потенциалов.

10. Формализм тензора погружения

Максимальные суперсимметричные деформации максимальной d-мерной супергравитации, условия самосогласованности на тензор вложения; решения условий для самосогласованной редукции 11-мерной супергравитации.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, доска.

Компьютер для использования интернет-ресурсов.

Проектор для демонстраций иллюстраций и визуального материала.

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. M.J. Duff, «The World in Eleven Dimensions Supergravity, supermembranes and M-theory» , ISBN 9780750306720
2. D.Z. Freedman, A. van Proeyen, «Supergravity», ISBN 978-0-521-19401-3,
3. I.L. Buchbinder, S.M. Kuzenko «Ideas and methods of supersymmetry and supergravity», ISBN 0-7503-0506-1,
4. T. Ortin «Gravity and strings» ISBN 978-0-521-76813-9.
5. C. Johnson, «D-branes», ISBN 9780521030052

Дополнительная литература

1. G. Dall'Agata, M. Zagermann «Supergravity (lecture notes)»,
2. B. de Wit «Supergravity (lectures)»
3. C. M. Hull, P. K. Townsend, ``Unity of superstring dualities," Nucl. Phys. B438 (1995), 109-137
4. N.A. Obers, B. Pioline, «U duality and M theory»,Phys. Rept. 318 (1999), 113-225

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<https://www.arxiv.org> – Архив электронных препринтов

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

Для проведения дистанционных занятий (при необходимости) и консультаций используются zoom, Google meet.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау Физтех-кластер академической и научной карьеры (Теоретическая и математическая физика)
курс:	2
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 3 (осенний) - Дифференцированный зачет	
Разработчик:	Э.Т. Мусаев, phd (к.ф.-м.н.)

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов

ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Введение в М-теорию» обучающийся должен:

знать:

основные положения и понятия М-теории, 11-мерной супергравитации, алгебру супертоков для мембраны; формализмы описания динамики одной, двух и N супермембран, их взаимодействий друг с другом и с супергравитационными фоновыми полями, связь с триалгебрами и нambu-лиевой механикой; примеры феноменологических приложений развитого формализма; группы симметрий U-дуальности для М-теории на n -мерном торе.

уметь:

показывать симметричность М-теории и 11-мерной супергравитации относительно преобразований U-дуальности; строить действия для двумерной и пятимерной супермембран, в том числе действия BLG и ABJM.

владеть:

методами анализа размерных редукций супергравитации, основанными на формализме тензора погружения; методами анализа непертурбативных объектов теории струн, в том числе, экзотических бран.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Примеры задач из домашнего задания

1. Показать, что действие для M2-браны при двойной размерной редукции сводится к действию для фундаментальной струны
2. Показать, что гетеротическая струна взаимодействует с полем Калба-Рамона неминимально
3. Дуализацией скалярных полей на мировом листе показать, что действие для M2-браны при размерной редукции воспроизводит действие для D2-браны.
4. Найти компоненту тензора вложения для максимальной $D=7$ супергравитации, соответствующего потоку тензора напряженности 4-формы. Прокомментировать связь с решением Фройнда-Рубина.
5. Найти нулевые моды решений для M2, M5 бран. Найти, каким мультиплетам они соответствуют.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Примеры вопросов и задач для дифференцированного зачета

1. Вывести уравнение Нама из супералгебры в размерности $D=11$
2. Действие BLG. Показать, что оно описывает две супермембраны
3. Квадратичные условия на тензор вложения.
4. Квантование мембраны на фоне pp-волны

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Дифференцированный зачет проводится в устной форме. Студенту дается два теоретических вопроса и одна задача. При проведении зачёта обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.