

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Введение в теорию бран
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра теоретической и математической физики
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - 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

Количество контрольных работ, заданий: 1

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

Программа обсуждена на заседании кафедры теоретической и математической физики 27.03.2025

Аннотация

Несмотря на название, теория струн описывает динамику не только фундаментальных одномерных объектов, собственно струн, но и множества других протяженных объектов, называемых бранами. Примечательно, что несмотря на непертурбативную природу таких объектов, следы их присутствия видны уже в стандартной пертурбативной формулировке теории струн. Например, Др-браны проявляются как граничные условия открытой струны, а NS5-брана выступает в роли магнитного монополя для фундаментальной струны.

Курс посвящен изучению динамики таких, а также соответствующих им решений уравнений супергравитации. Генерируемые бранами полевые конфигурации являются суперсимметричными обобщениями знакомых решений типа Райсснера-Нордстрёма, и обычно называются экстремальными черными бранами. В рамках курса будут обсуждаться теории, описывающие физику таких объектов в рамках теории струн, свойства супергравитационных решений и приложения к физике низких энергий, в том числе, построение Стандартной Модели элементарных частиц.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Сформировать у обучающегося представление о непертурбативной структуре теории суперструн, динамике протяженных объектов, бран, и связь их с решениями суперсимметричных гравитационных теорий в размерностях 10, 11.

Сформировать понимание принципов описания динамики релятивистских мембран их взаимодействия между собой и с супергравитационными фоновыми полями. На примере таких объектов и соответствующих супергравитационных решений продемонстрировать структуру симметрий дуальности теории струн и М-теории.

Задачи дисциплины

- обучить техникам работы с супергравитационными теориями и их решениями, в том числе решениями типа черных бран и BPS решениями,
- развить у обучающегося умение решать уравнения на спиноры Киллинга,
- свободно обращаться с ковариантными производными со спиновой связностью.
- научить свободно оперировать понятиями, связанными с бранами и их конфигурациями,
- строить феноменологические модели.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-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-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-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

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные положения теории струн, супергравитации, конструкцию супералгебр;
- формулировку суперсимметричных теорий в 10- и 11-мерных пространствах; формализм описания динамики бран в 10 и 11 измерениях, их взаимодействий - друг с другом и с супергравитационными фоновыми полями;
- примеры феноменологических приложений развитого формализма.

уметь:

- строить действия для бран, инвариантные относительно калибровочных преобразований в объемлющем пространстве и на мировом объеме;
- строить лагранжианы супергравитационных теорий в демократическом формализме;
- описывать решения типа черных бран в размерностях 4, 10 и 11;
- показывать связь между решениями уравнений супергравитации типа черных бран и бранами теории струн;
- вычислять заряд, натяжение и массу бран.

владеть:

- методами анализа систем, описываемых уравнениями супергравитации;
- техниками решения BPS уравнений и описания явных суперсимметричных решений;
- формализмом описания супергравитации 1.5 рода;
- техникой описания нулевых мод бранных решений супергравитации и построения соответствующих супермультиплетов;
- 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	Спиноры в высших размерностях	3	3		3
2	D-браны в пертурбативной формулировке струны	3	3		3
3	Супергравитация	3	3		3
4	Геометрия бран	3	3		3
5	Динамические Dp-браны	3	3		3
6	ADHM конструкция и D-инстантоны	3	3		3
7	Дуальности между бранами	3	3		3

8	Экзотические браны	3	3		3
9	Некоммутативность в теории струн	3	3		3
10	Приложения к физике низких энергий	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: 2 (Весенний)

1. Спиноры в высших размерностях

Алгебры Клиффорда, определение, построение генераторов, периодичность, простые примеры. Группы $Spin$ и Pin , их связь с ортогональной группой, представления алгебры Клиффорда и групп $Spin$ и Pin , дираковские, вейлевские, майорановские и майорано-вейлевские спиноры. Эквивалентные представления: дираковское и майорановское сопряжения

2. D-браны в пертурбативной формулировке струны

RNS струна, квантование, граничные условия, RR потенциалы в спектре открытой RNS струны. Множители Чана-Патона. RR поля, взаимодействующие с Dp-бранами. T-дуальность граничных условий

3. Супергравитация

Суперсимметрии типа I, IIA/B, N=1 суперсимметрия в D=11, центральные заряды. Полевой состав супергравитации типа I, IIA/B, гетеротической супергравитации. N=1, D=11 супергравитация в формализме 1.5 рода, полевой состав, действие, алгебра локальных симметрий. Супергравитации типа IIA/B, демократическая формулировка, магнитные потенциалы.

4. Геометрия бран

Спиноры Киллинга, явные уравнения на спиноры Киллинга из преобразований суперсимметрии. Черные дыры Райсснера-Нордстрёма, решения с источником, черные браны, экстремальные решения. Решения F1, NS5, KK5, Dp супергравитации типа II. Решения M2, M5 11D супергравитации. Понятие заряда для классических бранных решений. Размазывание решений, T-дуальность между NS5 и KK-монополями. Нулевые моды решений

5. Динамические Dp-браны

Действие DBI из динамики концов открытой струны. Натяжение Dp-браны. Инвариантное действие Весса-Зумино, взаимодействие с RR полями и с полями на мировом объеме браны.

6. ADHM конструкция и D-инстантоны

Инстантонные уравнения и их решения ADHM конструкцией. Интерпретация в терминах D3-браны и D-инстантона. Уравнение Нама для Dp-бран, некоммутативность

7. Дуальности между бранами

S-дуальность между D5-браной и NS5-браной. T-дуальность между NS5-браной и KK5-монополями. Непертурбативное дополнение D2-браны до M2-браны

8. Экзотические браны

Расширение набора центральных зарядов в $D=10$ ПА/В суперсимметрии. Магнитный гравитон, КК-монополь, экзотические NS 5-браны. Старое и новое сканирование бран

9. Некоммутативность в теории струн

Граничные условия струны на пересекающихся Dp-бранах и в присутствии магнитного поля. Пропагатор и открыто-замкнутое отображение струнного фона, параметр некоммутативности. Некоммутативные теории поля.

10. Приложения к физике низких энергий

Модели с пересекающимися D6-бранами, Стандартная модель. Ориентифолдные компактификации, RR заряды ориентифолда. Модели мира-на-бране, инфляция. AdS/CFT соответствие

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

Дополнительная литература

1. G. Dall'Agata, M. Zagermann «Supergravity (lecture notes)»,
2. B. de Wit «Supergravity (lectures)»
3. J. Polchinski, «TASI lectures on branes»

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

Не используются

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.

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
кафедра теоретической и математической физики
курс: 1
квалификация: магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - 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
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-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-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-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

2. Показатели оценивания компетенций

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

знать:

- основные положения теории струн, супергравитации, конструкцию супералгебр;
- формулировку суперсимметричных теорий в 10- и 11-мерных пространствах; формализм описания динамики бран в 10 и 11 измерениях, их взаимодействий - друг с другом и с супергравитационными фоновыми полями;
- примеры феноменологических приложений развитого формализма.

уметь:

- строить действия для бран, инвариантные относительно калибровочных преобразований в объемлющем пространстве и на мировом объеме;
- строить лагранжианы супергравитационных теорий в демократическом формализме;
- описывать решения типа черных бран в размерностях 4, 10 и 11;
- показывать связь между решениями уравнений супергравитации типа черных бран и бранами теории струн;
- вычислять заряд, натяжение и массу бран.

владеть:

- методами анализа систем, описываемых уравнениями супергравитации;
- техниками решения BPS уравнений и описания явных суперсимметричных решений;
- формализмом описания супергравитации 1.5 рода;
- техникой описания нулевых мод бранных решений супергравитации и построения соответствующих супермультиплетов;
- 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. Определить магнитно-дуальные потенциалы для RR полей p-форм. Показать, что действие супергравитации типа IIA/B может быть переписано в демократическом формализме. Показать, что соответствующее выражение для действия является псевдо-действием.
2. Доказать, что суперзаряд Q должен быть майорановским спинором, чтобы образовывать алгебру суперсимметрии
3. Вычислить заряд и массу NS 5-бран, показать, что заряд пропорционален g_s^{-2} . Прокомментировать результат в контексте дуальности струна-5-брана.
4. Показать, что решения Dp-бран сохраняют половину суперзарядов. Найти соответствующие спиноры Киллинга.
5. Найти нулевые моды решений для Dp-бран, M2, M5 бран. Найти, каким мультиплетам они соответствуют.

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

Перечень контрольных вопросов:

1. Электромагнитная дуальность в теории Максвелла, дуальность для p-форм, псевдодействие на примере ковариантной формулировки кинетического действия для 3-форм в размерности 6, дуализация p-форм в IIA/B супергравитации.
2. Построить алгебру Клиффорда $Cl(3,0)$.
3. BPS уравнения 11-мерной супергравитации, решения типа черных дыр $N=1,2$ $D=4$ супергравитаций.
4. Построить инвариантное действие Весса-Зумино для D3-браны.
5. Решения M2, M5 11-мерной супергравитации. Понятие заряда для классических бранных решений.
6. Показать, что размазанная NS5-брана T-дуальна KK-монополю.
7. T-дуальность супергравитации типа II на торе.
8. Показать, что нулевые моды M2-браны образуют $D=3$ $N=8$ супермультиплет.
9. DBI действие для Dp-бран, AdS/CFT соответствие.
10. Получить в явном виде правила преобразования RR-полей под действием T-дуальности.

Примеры билетов:

Билет 1.

1. Показать, что нулевые моды M2-браны образуют $D=3$ $N=8$ супермультиплет.
2. DBI действие для Dp-бран, AdS/CFT соответствие.

Билет 2.

1. BPS уравнения 11-мерной супергравитации, решения типа черных дыр $N=1,2$ $D=4$ супергравитаций.
2. Построить инвариантное действие Весса-Зумино для D3-браны.

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 зачёт проводится в устной форме по билетам.

В каждом билете представлено два теоретических вопроса.

При проведении зачёта обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку.

Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.