

**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:	Дополнительные главы теории струн и теории высших спинов
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра теории фундаментальных взаимодействий и квантовой гравитации
курс:	1
квалификация:	магистр

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

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Д.В. Нестеров, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры теории фундаментальных взаимодействий и квантовой гравитации
25.03.2025

Аннотация

Теория струн является результатом применения квантовой теории для описания релятивистских фундаментальных одномерных объектов. На её основе возможно квантовое описание гравитации, а также построение единой теории всех фундаментальных взаимодействий и полей материи. Несмотря на гипотетический характер теории, её внутренняя структура очень жёсткая и вместе с тем богатая, и естественным образом включает объекты большей размерности (браны). Развитие методов теории струн за последние 30 лет обогатило различные разделы теоретической физики высоких энергий, математической физики, чистой математики, а в последние годы и другие области теоретической физики.

Предлагаемый курс является продолжением вводного курса теории струн (теория струн-1). После краткого обзора теории классических бозонных струн и их квантования, будет подробно рассмотрено квантовое описание суперсимметричных струн (с суперсимметрией на мировом листе и в пространстве-времени). Для описания взаимодействующих струн будет построена теория возмущений. Будут получены низкоэнергетические приближенные описания теории суперструн: супергравитация и суперсимметричная теория Янга-Миллса. Мы рассмотрим динамику D- и M-бран, различные симметрии и дуальности теорий суперструн и M-теории, а также элементы AdS/CFT-соответствия. Мы также обсудим предел нулевого натяжения в теории струн и его связь с калибровочной теорией высших спинов.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Изучение основных положений, методов и внутренней структуры теории струн.

Задачи дисциплины

Ознакомление студентов с основами теории суперструн, её современными приложениями и местом в физической картине мира. Предполагается, что, прослушав этот курс, студенты смогут использовать методы и идеи теории струн в своей научно-исследовательской работе.

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-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-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	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-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
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 понятия по теме дисциплины.

уметь:

- пользоваться развитыми в рамках дисциплины методами исследования, решать задачи по теме дисциплины.

владеть:

- математическим и понятийным аппаратом и методами исследований, составляющими содержание дисциплины.

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	Свободная бозонная струна	2	2		5
2	Квантование бозонной струны	2	2		5
3	Суперсимметрия на мировом листе	4	4		5
4	Суперсимметрия в пространстве-времени	4	4		5
5	Взаимодействующие струны	4	4		5
6	Низкоэнергетические эффективные теории	4	4		5
7	D-браны и AdS/CFT	4	4		5
8	M-теория и дуальности	2	2		5

9	Предел нулевого натяжения и теория высших спинов	4	4		5
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Свободная бозонная струна

Свободная бозонная струна, действия Намбу-Гото и Полякова, симметрии, осцилляторные разложения, классические решения.

2. Квантование бозонной струны

Каноническое квантование, алгебра Вирасоро, уравнения движения и связи. Квантование в калибровке светового конуса, спектр состояний бозонной струны. Элементы конформной теории поля, БРСТ квантование. Метод континуального интеграла. Граничные условия Дирихле и спектр струны. Факторы Чана-Патона, квантование открытой струны на D-бране.

3. Суперсимметрия на мировом листе

Спиноры в общей теории относительности. Суперструна в формализме RNS. Граничные условия и осцилляторные разложения, супералгебра Вирасоро, связи и конформная инвариантность. Каноническое квантование и квантование в калибровке светового конуса. GSO-проекция.

4. Суперсимметрия в пространстве-времени

Действие для частицы и струны в суперпространстве, каппа-симметрия. Квантование и сокращение аномалий. Спектр открытых и замкнутых струн, RR-поля. Суперструна типа I и II, гетеротические суперструны.

5. Взаимодействующие струны

Структура струнной теории возмущений. Древесные амплитуды замкнутых и открытых струн. Амплитуда Вирасоро-Шапиро, амплитуда Венециано. Флуктуации D-бран и натяжение. Функция распределения струны в однопетлевом приближении. Модулярная инвариантность.

6. Низкоэнергетические эффективные теории

Сокращение аномалий, теория рассеяния и эффективные теории. Предел $\alpha' \rightarrow 0$, супергравитация и супер-Янг-Миллс. КК-разложение и размерная редукция. Супергравитации N=1 d=11, N=2 d=10 IIA и IIB.

7. D-браны и AdS/CFT

T-дуальность для открытых и замкнутых струн и суперструн. Солитонные решения в супергравитации и D-браны. Заряд и натяжение D-браны. T-дуальность в фоновых полях, действие DBI для D-браны. D3-браны и N=4 супер-Янг-Миллс. Предел вблизи горизонта D-бран, голографическая дуальность.

8. M-теория и дуальности

S-дуальность в теориях IIВ и гетеротических суперструн. Предел сильной связи теории ПА и М-теория. Фундаментальные М2 и М5-браны, солитонные решения и компактификация. U-дуальность.

9. Предел нулевого натяжения и теория высших спинов

Предел нулевого натяжения. Поведение струнных амплитуд рассеяния. Теория высших спинов.

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

Учебная аудитория, доска, при необходимости медиапроектор, экран.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Blumenhagen R., Lust D., Theisen S., Basic concepts of string theory. – Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2013;
2. Polchinski J. String Theory. – Cambridge University Press, 2005;
3. Green M.B., Schwarz J.H., Witten E., Superstring theory – Cambridge University Press, 2015.

Дополнительная литература

1. Tong D., String theory. – <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/string.html>, 2012;
2. Johnson C.V., D-branes. – Cambridge University Press, 2006;
3. Becker K., Becker M., Schwarz J.H., String theory and M-theory – Cambridge University Press, 2007.

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)

Не используются.

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 преподавателю.

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

ПРИЛОЖЕНИЕ

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 теории фундаментальных взаимодействий и квантовой гравитации
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
Разработчик:	Д.В. Нестеров, канд. физ.-мат. наук

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-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-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	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-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
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 «Дополнительные главы теории струн и теории высших спинов» обучающийся должен:

знать:

- основные понятия по теме дисциплины.

уметь:

- пользоваться развитыми в рамках дисциплины методами исследования, решать задачи по теме дисциплины.

владеть:

- математическим и понятийным аппаратом и методами исследований, составляющими содержание дисциплины.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлого занятия.

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

Перечень примерных вопросов:

1. Осцилляторные разложения для бозонной струны Полякова, классические решения.
2. Каноническое квантование и Алгебра Вирасоро. Спектр состояний бозонной струны.
3. БРСТ квантование. Метод континуального интеграла.
4. Граничные условия Дирихле и спектр струны. Факторы Чана-Патона, квантование открытой струны на D-бране.
5. Осцилляторные разложения в формализме RNS, супералгебра Вирасоро.
6. Каноническое квантование и квантование в калибровке светового конуса в формализме RNS.
7. Действие для частицы и струны в суперпространстве, каппа-симметрия.
8. Суперструна типа I и II, гетеротические суперструны. Спектр состояний и граничные условия.
9. Структура струнной теории возмущений. Древесные амплитуды замкнутых струн. Амплитуда Вирасоро-Шапиро.
10. Структура струнной теории возмущений. Древесные амплитуды открытых струн. Амплитуда Венециано.
11. Функция распределения струны в однопетлевом приближении. Модулярная инвариантность.
12. Сокращение аномалий, теория рассеяния и эффективные теории. Предел $\alpha' \rightarrow 0$, супергравитация и супер-Янг-Миллс.
13. КК-разложение и размерная редукция. Супергравитации N=1 d=11, N=2 d=10 ПА и ПВ.
14. Т-дуальность для открытых и замкнутых струн и суперструн.
15. Солитонные решения в супергравитации и D-браны. Заряд и натяжение D-браны.
16. Т-дуальность в фоновых полях, действие DBI для D-браны.
17. S-дуальность в теориях ПВ и гетеротических суперструн.
18. Предел сильной связи теории ПА и M-теория. U-дуальность.
19. Фундаментальные M2 и M5-браны, солитонные решения и компактификация.
20. Предел вблизи горизонта D-бран. Определение голографической дуальности и предельные переходы.
21. AdS/CFT дуальность и операторные соответствия.

Примеры контрольных заданий:

1. Показать, что концы открытой струны с граничными условиями Неймана движутся со скоростью света.
2. Получить коммутационные соотношения алгебры Вирасоро.
3. Получить правила Бушера для Т-дуальности.
4. Получить правило преобразования дилатона при Т-дуальности.
5. Получить выражение для амплитуды Вирасоро-Шапиро для рассеяния тахионов замкнутой струны.
6. Проверить, что уравнения поля для NSNS сектора супергравитации типа II совпадают с бета-функциями струны.

Примеры билетов:

Билет 1.

1. Симметрии действий Намбу-Гото и Полякова.
2. Древесные амплитуды замкнутых струн. Амплитуда Вирасоро-Шапиро.

Билет 2.

1. Фиксация конформной калибровки. Остаточная калибровочная свобода.
2. Древесные амплитуды открытых струн. Амплитуда Венециано.

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

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.