

**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 струн
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: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 45 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 90 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: И.В. Бахматов, научный сотрудник

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 введением в теорию бозонных струн. Подробно рассматриваются формализмы Намбу-Гото и Полякова для релятивистской струны и их квантование. Для описания взаимодействующих струн будет построена теория возмущений. Обсуждается низкоэнергетическое приближенное описание бозонной струны: бозонный сектор супергравитации.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- изучение основных положений, методов и внутренней структуры теории струн.

Задачи дисциплины

- ознакомление студентов с основами теории струн, 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	Классическая релятивистская струна	4	7		25
2	Квантование бозонной струны	4	7		25
3	Метод Фаддеева-Попова и репараметризационные духи	3	8		20
4	Взаимодействующие струны	4	8		20
Итого часов		15	30		90
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Классическая релятивистская струна

Точечная релятивистская частица, связи, метрика на мировой линии. Безмассовая релятивистская струна, действие Намбу-Гото, симметрии и уравнения движения. Действие Полякова, симметрии и уравнения движения. Связи и выбор калибровки. Действие Полякова в конформной калибровке и остаточная калибровочная свобода. Гамильтонов формализм для струны. Теорема Нётер, сохраняющиеся токи для струны. Импульс и момент. Осцилляторные разложения. Генераторы Вирасоро, алгебра Витта. Функция Гамильтона и лоренц-инвариантная эффективная масса струны. Примеры классических решений.

2. Квантование бозонной струны

Каноническое квантование бозонной струны. Духи. Алгебра Вирасоро, центральный заряд. Связи в квантовой теории. Константа нормального упорядочения для L_0 и вклад в массу. Квантование в калибровке светового конуса. Решение связей, гамильтониан. Регуляризация (дзета, экспоненциальная). Оператор массы. Спектр масс для струны с граничными условиями NN в калибровке светового конуса. Тахион. Несколько низших состояний, классификация Вигнера. Спектр замкнутой струны, линеаризованная ОТО в калибровке светового конуса. Спектр открытой струны с граничными условиями DD. D-браны и метки Чана-Патона.

3. Метод Фаддеева-Попова и репараметризационные духи

Ковариантное квантование методом континуального интеграла. Метод Фаддеева-Попова для бозонной струны. Репараметризационные духи b, c : квантование, алгебра Вирасоро, критическая размерность как условие сокращения центральных зарядов. Центральный заряд b, c -системы в конформной теории поля. Вейлевская аномалия и центральный заряд. Спектр струны в формализме континуального интеграла.

4. Взаимодействующие струны

Соответствие «состояние-оператор» в конформной теории поля. Вершинные операторы. Взаимодействующие струны. Струнная S-матрица. Сумма по топологиям и струнная константа связи. Древесные амплитуды замкнутых струн. Амплитуда Вирасоро-Шапиро. Амплитуда Венециано. Низкоэнергетические эффективные действия. Пертурбативное разложение по α' . Перенормировка полей и констант связи в действии на мировом листе. Бета-функция в 1-петлевом приближении. Бозонный сектор супергравитации.

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, 2012. – <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/string.html>
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)

Представление материала на доске и/или при помощи медиапроектора. Возможно использование ПО для символьных и/или численных вычислений, а также Zoom, Skype для дистанционных занятий.

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 теории фундаментальных взаимодействий и квантовой гравитации
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: И.В. Бахматов, научный сотрудник

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 «Введение в теорию струн» 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

Примеры заданий контрольной работы:

Задача: получить действие Полякова для бозонной струны путём фиксации калибровки в действии Намбу-Гото.

Задача: вычислить амплитуду рассеяния струны в безмассовом состоянии с данным тензором поляризации, и двух тахионов.

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

1. Осцилляторные разложения для бозонной струны Полякова, классические решения.
2. Каноническое квантование и Алгебра Вирасоро. Центральный заряд.
3. Спектр состояний бозонной струны. Оператор массы.
4. Граничные условия Дирихле и спектр струны. Факторы Чана-Патона, квантование открытой струны на D-бране.
5. Центральный заряд b, c -системы в конформной теории поля.
6. Фиксация конформной калибровки. Остаточная калибровочная свобода.
7. Древесные амплитуды открытых струн. Амплитуда Венециано.
8. Теорема Нётер, сохраняющиеся токи для струны.
9. Низкоэнергетические эффективные действия. Бозонный сектор супергравитации.
10. Квантование в калибровке светового конуса.
11. Показать, что концы открытой струны с граничными условиями Неймана движутся со скоростью света.
12. Получить коммутационные соотношения алгебры Вирасоро.
13. Проверить что репараметризационные духи b, c являются первичными конформными полями.
14. Найти уравнение поля для дилатона в бозонном секторе супергравитации типа II.
15. Получить выражение для амплитуды Вирасоро-Шапиро для рассеяния тахионов замкнутой струны.

Примеры билетов:

Билет 1.

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

Билет 2.

1. Квантование в калибровке светового конуса.
2. Показать, что концы открытой струны с граничными условиями Неймана движутся со скоростью света.

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 недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо 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 твёрдо 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 дифференцированного зачёта обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку.

Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.