

**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**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Дополнительные главы теории струн и теории высших спинов
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау Физтех-кластер академической и научной карьеры
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	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 Физтех-кластера академической и научной карьеры 17.04.2023

## 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 ПВ 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.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау Физтех-кластер академической и научной карьеры (Теория фундаментальных взаимодействий и квантовая гравитация)
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	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**

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  $N=1$   $d=11$ ,  $N=2$   $d=10$  IIA и IIB.
14. T-дуальность для открытых и замкнутых струн и суперструн.
15. Солитонные решения в супергравитации и D-браны. Заряд и натяжение D-браны.
16. T-дуальность в фоновых полях, действие DBI для D-браны.
17. S-дуальность в теориях IIB и гетеротических суперструн.
18. Предел сильной связи теории IIA 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 T-дуальности.
4. Получить правило преобразования дилатона при T-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 экзаменационных 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.

Билет 3.

1. Суперструны типа I и II. Граничные условия и спектр состояний.

2.  $N=1$   $d=11$  супергравитация и размерная редукция в  $d=10$ .

Билет 4.

1. Гетеротические суперструны. Граничные условия и спектр состояний.

2. Функция распределения струны в однопетлевом приближении.

Билет 5.

1. Т-дуальность и правила Бушера.

2. Осцилляторные разложения в формализме RNS.

#### 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.