

**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>	Теория струн
<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: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 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 07.04.2023

## Аннотация

Одной из важнейших задач современной физики является построение теории, которая позволила бы единым образом описать четыре известных фундаментальных взаимодействия. Множество наблюдений показывают, что успешным подходом к решению этой проблемы является квантовая теория поля. С ее помощью физикам уже удалось построить объединенную квантовую теорию электрослабых взаимодействий, а также квантовую теорию сильных взаимодействий (квантовую хромодинамику). Однако построение квантовой теории гравитации является совершенно нетривиальной задачей.

Теория струн предлагает элегантный способ решения этой проблемы и предоставляет единое квантовое описание для всех четырех фундаментальных взаимодействий. Кроме того, теория струн объединяет и связывает большинство направлений современной математической физики, такие как интегрируемые системы, конформную теорию поля, суперсимметричные калибровочные теории поля, супергравитация, и т.д. Освоение теории струн является необходимым для теоретиков в области физики частиц высоких энергий. В курсе будут рассмотрены основные понятия физики бозонных и фермионных струн.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Цель освоения дисциплины состоит в формировании у студентов представления о теории струн, обсуждении основных методов описания и квантования в теории струн, описании связей с другими теориями и моделями.

### Задачи дисциплины

Задача дисциплины состоит в обучении студентов основным принципам и методам теории струн, подготовке студентов к ведению исследований, связанных с теорией струн и близкими областями теоретической физики и математики.

## 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
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-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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия

профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
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
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

Основные принципы теории струн, соответствующие свойства и методы.

уметь:

Эффективно использовать на практике теоретические понятия, решать базовые задачи, связанные с теорией струн.

владеть:

Основными методами, использующимися при решении задач, связанных с теорией струн.

### 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	Введение		2		4
2	Классическая бозонная струна		4		8
3	Каноническое квантование бозонной струны		4		8
4	Классическая фермионная струна		2		4
5	Каноническое квантование фермионной струны		4		8
6	Конформная теория поля - как релятивистски инвариантный подход к описанию струн		2		4
7	Квантование струны методом функционального интеграла		2		4
8	Струнные взаимодействия		4		8
9	Низкоэнергетические действия для полей безмассового сектора струнных возбуждений		2		4

10	T- и S- дуальности в теории струн		4		8
Итого часов			30		60
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Введение

Мотивация изучения теории струн. Проблемы квантовой гравитации (неперенормируемость, сингулярности, информационный парадокс, энтропия черных дыр, космологическая постоянная), объединение всех фундаментальных взаимодействий, дуальное описание калибровочных теорий (голография).

Следствия из теории струн и способы ее обанружения: суперсимметрия, новые частицы, реликтовое излучение, космические струны.

Действия для релятивистской частицы и его симметрии. Квантование систем со связями (подход Дирака). Вращающаяся точечная супер частица, супер частица Бринка-Шварца, суперсимметрия.

##### 2. Классическая бозонная струна

Действие Намбу-Гото и его симметрии, уравнения движения. Действие Полякова и его симметрии, уравнения движения, сохраняющиеся величины. Классическая эквивалентность действия Полякова и Намбу-Гото.

Открытые и замкнутые струны (граничные условия Неймана/Дирихле и периодические).

Разложение струнных решений по модам. Алгебра Вирасоро.

##### 3. Каноническое квантование бозонной струны

Квантование в калибровке светового конуса. Разрешение связей.

Спектр струнных возбуждений, Лоренц инвариантность, классификация Вигнера, тахион, безмассовый сектор - гравитон, поле Кальба-Рамонда (2-форма), дилатон, скаляры и векторные поля на D-бранах. Множество совпадающих D-бран, (супер) Янг-Миллс как их эффективное низкоэнергетическое описание.

##### 4. Классическая фермионная струна

Спиноры в общей теории относительности.

Действие Грина-Шварца и Рамона-Навье-Шварца для суперструн.

Суперструны типа I, IIA, IIB.

Суперсимметрия, Вейлевская и супер Вейлевская симметрии действия РНШ.

Суперконформная калибровка.

Граничные условия Рамона и Навье-Шварца для суперструны РНШ.

Супер алгебра Вирасоро.

##### 5. Каноническое квантование фермионной струны

Каноническое квантование, квантование на световом конусе.

Спектр фермионной струны для типа I, IIA, IIB, ГШО проекция.

Контрольная работа № 1.

## 6. Конформная теория поля - как релятивистски инвариантный подход к описанию струн

Операторное разложение и тождества Уорда.

Центральный заряд и алгебра Вирасоро, Вейлевская аномалия.

Соответствие между операторами теории и ее пространством состояний.

## 7. Квантование струны методом функционального интеграла

Интеграл по путям. Души Фадеева-Попова.

Критическая размерность.

Пространство струнных состояний и вершинные операторы.

Некритические струны.

## 8. Струнные взаимодействия

Древесные амплитуды для замкнутых струн (Вирасоро-Шапиро).

Древесные амплитуды для открытых струн (Венециано).

Однопетлевые амплитуды. Соответствие между петлевыми амплитудами для открытых струн и древесными для замкнутых.

## 9. Низкоэнергетические действия для полей безмассового сектора струнных возбуждений

Струна на фоне нетривиальной метрики, поля Кальба-Рамонда и дилатона.

Вейлевская инвариантность, обнуление бета функций для фоновых полей.

Уравнения и действие супергравитации.

Уравнения и действие Борна-Инфельда.

## 10. T- и S- дуальности в теории струн

Замкнутая и открытая струны на окружности. Симметрии спектра.

Правила Бушера.

Контрольная работа № 2.

## 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. G. Arutyunov, Lectures on String Theory
2. R. Blumenhagen, D. Lust, S. Theisen, Basic Concepts of String Theory
3. P. West, Introduction to Strings and Branes
4. D. Tong, String Theory
5. J. Polchinski, String Theory
6. M. Green, J. Schwarz and E. Witten, Superstring Theory

### Дополнительная литература

1. B. Zwiebach, A First Course in String Theory
2. T. Ortin, Gravity and Strings
3. P. Di Francesco, P. Mathieu and D. Senechal, Conformal Field Theory

## **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 занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. Для дистанционных занятий могут быть использованы Яндекс-телемост, wxMaxima.

## **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)**

<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 (Теоретическая и математическая физика)
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	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
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-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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
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
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Теория струн» обучающийся должен:

### знать:

Основные принципы теории струн, соответствующие свойства и методы.

### уметь:

Эффективно использовать на практике теоретические понятия, решать базовые задачи, связанные с теорией струн.



**владеть:**

Основными методами, использующимися при решении задач, связанных с теорией струн.

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

1. Чему равна мера интегрирования в действии Намбу-Гото, Полякова?
2. Выписать симметрии действия Намбу-Гото, как зависят параметры от координат на мировом листе.
3. Почему в действие Полякова нельзя добавить потенциал или космологическую константу?
4. Вывести дисперсионное соотношение для тахиона. В чем его проблема?
5. Какие бывают типы граничных условий для бозонных и фермионных струн?
6. Что такое ГШО проекция?
7. Что такое Т-дуальность в теории открытых струн?

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

Перечень контрольных вопросов для проведения дифференцированного зачета:

1. Принципиальное отличие действия Полякова и Намбу-Гото.
2. Первичное и вторичное квантование.
3. Открытые и замкнутые струны.
4. D-браны.
5. Т-дуальность.
6. Вейлевская инвариантность.
7. Суперсимметрия.
8. ГШО проекция.

Примеры контрольных заданий (не менее пяти вопросов/заданий)

1. Показать, что группа Пуанкаре является полупрямым произведением.
2. Показать супер симметричность для вращающейся супер частицы.
3. Оцените характерные параметры струны, натяжение, длину.
4. Показать супер симметричность для струны РНШ.
5. Вывести уравнения движения струны в координатах светового конуса.

### **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.