

**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>	Введение в теорию гравитации
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных взаимодействий и космологии
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

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

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: М.Д. Фиткевич, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальных взаимодействий и космологии 25.02.2025

## Аннотация

Кафедра фундаментальных взаимодействий и космологии предлагает студентам МФТИ курс, посвященный общей теории относительности Эйнштейна. На данный момент это лучшая из теорий гравитации, которая может достоверно объяснить все феномены во Вселенной, начиная от рядовых явлений вроде искажения хода часов на околоземных спутниках и заканчивая происхождением крупномасштабных структур в видимом космосе. В течение семестра предполагается знакомство с основными физическими понятиями и математическим аппаратом. Обучающиеся после прохождения курса смогут самостоятельно ставить и решать задачи. Мы расскажем как теория Эйнштейна соотносится с повседневной теорией Ньютона, что может находиться внутри черных дыр, как были детектированы гравитационные волны, что могло быть до Большого взрыва, и какие загадки теории гравитации до сих пор не решены совсем.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Обучить студентов основам современной теории гравитации.

### Задачи дисциплины

Выработать представления и интуицию, необходимые для понимания теории относительности, представить математический аппарат, необходимый для решения задач.

## 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-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
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-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	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

новые научные результаты	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-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

теорию гравитации.

уметь:

решать задачи, возникающие в теории гравитации.

владеть:

математическим аппаратом для решения задач, возникающих в теории гравитации.

### 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	Элементы римановой геометрии.	1	1		1
2	Движение материальной точки.	1	1		1
3	Аномалии в теории Ньютона.	1	1		1
4	Классическая теория поля.	1	1		1
5	Уравнения Эйнштейна.	1	1		1
6	Решение Шварцшильда.	1	1		1
7	Чёрные дыры.	1	1		1
8	Космологические решения.	1	1		1
9	Гравитационные волны.	1	1		1
10	Теоремы о сингулярностях.	1	1		1
11	Модификации ОТО.	1	1		1
12	Экзотические объекты.	1	1		1
13	Квантовая теория и гравитация.	1	1		1
14	Резервная лекция.	1	1		1
15	Зачёт.	1	1		1
Итого часов		15	15		15
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		45 час., 1 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

## 1. Элементы римановой геометрии.

Принцип относительности Галилея. Частная теория относительности. Многообразия, метрические пространства и системы координат. Тензоры. Связность. Ковариантная производная. Кривизна.

## 2. Движение материальной точки.

Принцип эквивалентности (сильный, слабый). Уравнение геодезической.

## 3. Аномалии в теории Ньютона.

Прецессия перигелия Меркурия. Отклонение света.

## 4. Классическая теория поля.

Действия для полей. Вариационный принцип.

## 5. Уравнения Эйнштейна.

Действие Эйнштейна-Гильберта. Вывод уравнений Эйнштейна. Слагаемое Гиббонса-Хокинга-Йорка.

## 6. Решение Шварцшильда.

Вывод решения уравнений Эйнштейна в вакууме.

## 7. Чёрные дыры.

Интерпретация решения Шварцшильда. Координаты Крускала-Шекерса. Горизонты событий и сингулярности. Электрически заряженные и вращающиеся чёрные дыры. Эргосфера.

## 8. Космологические решения.

Пространства постоянной кривизны. Масштабный фактор. Уравнение Фридмана. Модель Лямбда-CDM.

## 9. Гравитационные волны.

Слабые гравитационные поля. Ньютоновский предел. Детекторы гравитационных волн. Гравитоны и ОТО как эффективная теория.

## 10. Теоремы о сингулярностях.

Энергетические условия. Неизбежность сингулярностей.

## 11. Модификации ОТО.

Теория Бранса-Дикке. Массивная гравитация. Теория Хорндески.

## 12. Экзотические объекты.

Кротовые норы, машины времени, дочерние вселенные.

## 13. Квантовая теория и гравитация.

Эффект Хокинга. Информационный парадокс. Голографический принцип. Квантовая гравитация.

14. Резервная лекция.

Резервная лекция.

15. Зачёт.

Зачёт.

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном, доской.

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. Гравитация [Текст] : [в 3 т.]. Т. 2, [монография]/Ч. Мизнер, К. Торн, Дж. Уилер пер. с англ. А. А. Рузмайкина, -М., Мир, 1977
2. Теоретическая физика [Текст]. В 10 т. Т. 2. Теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под. ред. Л. П. Питаевского, М., Физматлит, 2001, 2003, 2006, 2012, 2014
3. Гравитация и космология : Принципы и приложения общей теории относительности [Текст]/С. Вейнберг, -М., Мир, 1975

### **Дополнительная литература**

1. Современная геометрия [Текст]. В 2 т. Т. 1. Геометрия поверхностей, групп преобразований и полей, методы и приложения/Б. А. Дубровин, С. П. Новиков, А. Т. Фоменко, -М., Эдиториал УРСС, 1998
2. Лекции по общей теории относительности [Текст] / С. Н. Вергелес ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) - М.МФТИ,2017
3. Геометрофизика, учебное пособие для вузов / Ю. С. Владимиров. — М., Лаборатория знаний, 2020.— URL: <http://books.mipt.ru/book/301451> (дата обращения: 18.02.2021). - Полный текст (Режим доступа : из сети МФТИ / Удаленный доступ)

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

<https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/> - база экспериментальных данных о структуре ядер  
[http://www.iphc.cnrs.fr/nutheo/code\\_antoine/menu.html](http://www.iphc.cnrs.fr/nutheo/code_antoine/menu.html) - оболочечный код Antoine и его описание  
<https://www.gnu.org/software/gsl/doc/html/intro.html> - GNU Scientific Library – развитая математическая библиотека

## **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.

## **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 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 фундаментальных взаимодействий и космологии  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

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

**Разработчик:** М.Д. Фиткевич, канд. физ.-мат. наук

## 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-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
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-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-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях

## 2. Показатели оценивания компетенций

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

**знать:**

теорию гравитации.

**уметь:**

решать задачи, возникающие в теории гравитации.

**владеть:**

математическим аппаратом для решения задач, возникающих в теории гравитации.

## 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. Необходимость модификации теории гравитации Ньютона.
2. Физический принцип эквивалентности и его реализация.
3. Формулировка общей теории относительности.
4. Уравнение Эйнштейна и его смысл.
5. Метрика Шварцшильда и её интерпретация.
6. Уравнение Фридмана и основные предположения космологии.
7. Получение ньютоновского предела в ОТО.
8. Объяснение эффекта прецессии перигелия.
9. Смысл энергетических условий в ОТО.
10. Объяснение связи гравитации, термодинамики и квантовой механики.

Примеры билетов:

Билет №1

1. Уравнение Эйнштейна и его смысл
2. Метрика Шварцшильда и её интерпретация

Билет №2

1. Вращение деформированных ядер. Эллипсоидные деформации ядер.
2. Фазы рассеяния и оптическая теорема

#### 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.