

**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>	Общая теория относительности и космология
<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>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: А.В. Пополитов, phd (к.ф.-м.н.)

Программа обсуждена на заседании Физтех-кластера академической и научной карьеры 30.04.2021

## Аннотация

Курс формирует широкое представление о предмете общей теории относительности и космологии и рассчитан на людей, которые до этого не сталкивались с предметом.

Сначала курс закладывает необходимую понятийную базу по дифференциальной геометрии. Ключевые слова: касательное расслоение, метрика, символы Кристоффеля, тензор кривизны Римана, геодезические.

Затем мы перейдем к переформулировке обычной теории тяготения Ньютона на новом языке, чтобы связать новое с уже хорошо знакомым.

Далее мы рассмотрим режим слабых гравитационных полей, то есть теорию возмущений, и обсудим гравитационные волны, которые сейчас являются невероятно актуальной темой.

Далее мы изучим упрощенную риндлерову модель черной дыры, а затем перейдем к рассмотрению настоящих сферически симметричных решений уравнений Эйнштейна -- черной дыры Шварцшильда и Керра.

В части курса, посвященной Космологии, мы рассмотрим идеализированные космологические модели: Вселенную Фридмана и др., обсудим эффекты, которые оказывает космологическая постоянная.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

изучение современного теоретического аппарата физики сильных гравитационных полей, а также физики на космологических масштабах.

### Задачи дисциплины

По итогам курса студенты должны уметь уверенно вычислять и объяснять эффекты, возникающие в сильных гравитационных полях, например, вблизи черных дыр. Также они должны уметь выводиться из первопринципов стандартные космологические модели Вселенной (фридмановскую и т. п.) и объяснять, как они согласуются с опытными данными.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
УК-6 Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни	УК-6.1 Определяет приоритеты профессиональной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
	УК-6.2 Способен планировать самостоятельную деятельность в решении профессиональных задач; подвергать критическому анализу проделанную работу; находить и творчески использовать имеющийся опыт в соответствии с задачами саморазвития
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности

ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
	ОПК-4.4 Владеет навыками работы с компьютером и компьютерными сетями с целью получения, хранения и обработки научной (технической, технологической) информации
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	ПК-1.9 Знает перечень ведущих периодических научных изданий и способен выделять актуальные научные публикации в профессиональной области
	ПК-1.2 Имеет глубокое знание и понимание базовых математических дисциплин
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.2 Умеет находить ключевые параметры, определяющие изучаемое явление, и производить численные оценки по порядку величины
	ПК-2.3 Способен представлять научные утверждения, их обоснования и доказательства, научные проблемы и их решения ясно и точно в терминах, понятных для профессиональной аудитории, в письменной и устной форме
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области
	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

Постулаты ОТО, к каким наблюдаемым эффектам оно приводит, а также вывод этих эффектов, в чем состоят элементарные космологические модели Вселенной и какие есть экспериментальные свидетельства в их пользу.

уметь:

Выводить сферически симметричные решения уравнений Эйнштейна (Шварцшильда, Керра), выводять пертурбативные эффекты ОТО (прецессия перигелия Меркурия), выводять простейшие модели Вселенной (Фридмановская и др.).

владеть:

аппаратом дифференциальной геометрии, необходимым в ОТО, теорией возмущений в ОТО, техникой качественного анализа уравнений Эйнштейна на больших масштабах.

### 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	Тензорная алгебра в искривленном пространстве-времени.	3	3		7
2	Язык ОТО: от расслоений и связностей к кривизне.	3	3		8
3	Теория Ньютона на языке ОТО.	3	3		7
4	Риндлерова модель черной дыры.	3	3		8
5	Уравнение Эйнштейна и космологическая постоянная.	3	3		7
6	Слабые гравитационные поля, теория возмущений.	3	3		8
7	Лагранжев подход к ОТО.	3	3		7
8	Как различные классические области физики ведут себя на фоне ОТО.	3	3		8
9	Сферические звезды.	3	3		7
10	Идеализированные космологические модели.	3	3		8
Итого часов		30	30		75
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 8 (Весенний)

##### 1. Тензорная алгебра в искривленном пространстве-времени.

Тензорная алгебра в искривленном пространстве-времени: метрика, алгебра касательных векторов и 1-форм, переходы между системами отсчета.

##### 2. Язык ОТО: от расслоений и связностей к кривизне.

Расслоения и касательные расслоения, параллельный перенос, тензор Леви-Чивиты, геодезические как ковариантно постоянные линии, кривизна как перенос по бесконечно малому контуру, тензоры Римана, Риччи и Вейля и их физический смысл.

##### 3. Теория Ньютона на языке ОТО.

Расслоение ньютоновского пространства-времени, галилеевы системы координат, формулировка Картана для ньютоновской теории, формулировка теории Ньютона без координат, критика геометрического подхода к физике.

##### 4. Риндлерова модель черной дыры.

Принцип эквивалентности, системы часов и стержней в криволинейном пространстве, система равномерно ускоренных наблюдателей.

##### 5. Уравнение Эйнштейна и космологическая постоянная.

Автоматическое сохранение источника, космологическая постоянная, ньютоновский предел, аксиоматический подход к теории Эйнштейна.

6. Слабые гравитационные поля, теория возмущений.

Линеаризованная теория тяготения, гравитационные волны, влияние тяготения на материю.

7. Лагранжев подход к ОТО.

Вариационный принцип и начальные данные, принцип действия Гильберта и вариационный метод Палатини, лагранжиан материи и тензор энергии-импульса, принцип Маха и происхождение инерции.

8. Как различные классические области физики ведут себя на фоне ОТО.

Термодинамика, гидродинамика, электродинамика, геометрическая оптика и кинетическая теория.

9. Сферические звезды.

Координаты и метрика статической сферической системы, физическая интерпретация шварцшильдовских координат, уравнения внутреннего состояния звезды, построение звездной модели.

10. Идеализированные космологические модели.

Приближение идеальной жидкости для энергии-импульса материи Вселенной, сопутствующие и синхронные системы координат, временные параметры и постоянная Хаббла, элементарная фридмановская космология замкнутой Вселенной.

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором, экраном, фломастерной или меловой доской.

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

Основная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 2 : Теория поля : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под. ред. Л. П. Питаевского .— 8-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2001, 2003, 2006, 2012, 2014 .— 536 с.

Дополнительная литература

Не используется.

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

<https://arxiv.org> статьи разделов hep-ph, hep-th

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

На лекциях возможно использование мультимедийных технологий, 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 дисциплины, 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.

Рекомендуется в качестве самостоятельной работы опережающее по ходу лекций чтение учебника из списка основной литературы, а также монографии

- Ч.Мизнер, К.Торн, Дж.Уилер «Гравитация» тт.1-2 --- М.: Издательство «Мир» 1977.

**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
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчик:** А.В. Пополитов, phd (к.ф.-м.н.)

# 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
УК-6 Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни	УК-6.1 Определяет приоритеты профессиональной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
	УК-6.2 Способен планировать самостоятельную деятельность в решении профессиональных задач; подвергать критическому анализу проделанную работу; находить и творчески использовать имеющийся опыт в соответствии с задачами саморазвития
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
	ОПК-4.4 Владеет навыками работы с компьютером и компьютерными сетями с целью получения, хранения и обработки научной (технической, технологической) информации
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	ПК-1.9 Знает перечень ведущих периодических научных изданий и способен выделять актуальные научные публикации в профессиональной области
	ПК-1.2 Имеет глубокое знание и понимание базовых математических дисциплин
ПК-2 Способен анализировать полученные в	ПК-2.2 Умеет находить ключевые параметры, определяющие изучаемое явление, и производить численные оценки по порядку величины



ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.3 Способен представлять научные утверждения, их обоснования и доказательства, научные проблемы и их решения ясно и точно в терминах, понятных для профессиональной аудитории, в письменной и устной форме
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области
	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Общая теория относительности и космология» обучающийся должен:

### знать:

Постулаты ОТО, к каким наблюдаемым эффектам оно приводит, а также вывод этих эффектов, в чем состоят элементарные космологические модели Вселенной и какие есть экспериментальные свидетельства в их пользу.

### уметь:

Выводить сферически симметричные решения уравнений Эйнштейна (Шварцшильда, Керра), выводить пертурбативные эффекты ОТО (прецессия перигелия Меркурия), выводить простейшие модели Вселенной (Фридмановская и др.).

### владеть:

аппаратом дифференциальной геометрии, необходимым в ОТО, теорией возмущений в ОТО, техникой качественного анализа уравнений Эйнштейна на больших масштабах.

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

Примеры контрольных заданий:

1. Вывести уравнение геодезических на двумерной сфере
2. Получить выражение для времени падения наблюдателя на черную дыру
3. Получить уравнение Эйнштейна с помощью вариации действия
4. Вывести прецессию перигелия Меркурия

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

Перечень контрольных вопросов:

1. Тензор Римана  $n$ -мерной сферы
2. Риндлерова модель черной дыры
3. Три простейшие идеализированные модели Вселенной
4. Решение Шварцшильда
5. Действие Эйнштейна-Гильберта

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 зачет проводится в устной форме. При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на дифференцированном зачете не должен превышать одного астрономического часа. Оценивание знаний производится в соответствии с вышеуказанными критериями в соответствии с содержанием дисциплины.